

Źródło:

Erich Helbig: Podstawy fotometrii, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1975

11.4. POMIAR STRUMIENIA ŚWIETLNEGO

Całkowity strumień świetlny wypromieniowany ze źródła światła może być wyznaczony dwiema metodami:

1. przez wyznaczenie przestrzennego rozsyłu światła i związaną z tym ocenę rachunkową lub wykreslną;
2. przez pomiar w kuli Ulbrichta.

11.4.2. Pomiar strumienia świetlnego za pomocą kuli Ulbrichta

11.4.2.1. Zasady [454]

Wyznaczenie strumienia świetlnego z rozkładu światłości jest stosunkowo długotrwałe i stosowane przeważnie tylko w takich przypadkach, w których oprócz strumienia świetlnego potrzebny jest również jednocześnie przestrzenny rozsył światła. W większości przypadków, szczególnie dla pomiarów seryjnych i przemysłowych, wybiera się metodę bezpośrednią, za pomocą której możliwe jest proste i szybkie wyznaczenie całkowitego strumienia świetlnego, wypromieniowanego ze źródła. Dla tego rodzaju bezpośrednich pomiarów najlepszą okazała się opracowana przez Ulbrichta [208, 209] metoda pomiaru za pomocą pustej kuli pomalowanej wewnątrz na białą.

Źródło światła świecące w kuli Ulbrichta wywołuje na ścianach natężenie oświetlenia, które jest sumą dwu składowych: bezpośredniej, wywołanej przez światło wypromieniowane bezpośrednio ze źródła, i pośredniej wywołanej przez światło jedno- lub wielokrotnie odbite od ściany kuli. Pośrednie natężenie oświetlenia E przy spełnieniu określonych wymagań jest we wszystkich miejscach ściany wewnętrznej kuli stałe i proporcjonalne do całkowitego strumienia Φ źródła. Między E i Φ istnieje zależność

$$E = \frac{\Phi}{4\pi r^2} \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (130)$$

przy czym:

r - jest to promień kuli,

ρ - współczynnik odbicia jej wewnętrznej powłoki.

Przy stałych parametrach kuli otrzymuje się

$$E = k\Phi \quad (131)$$

k nazywa się współczynnikiem kuli.

Równanie (130) można wyprowadzić stosunkowo łatwo: jeżeli Φ jest strumieniem świetlnym promieniowanym ze źródła, to po jednorazowym odbiciu od ściany kuli o współczynniku odbicia ρ , strumień świetlny wynosi $\rho\Phi$. Strumień odbity pada znowu do ścian kuli, przy drugim odbiciu — odbija się część $\rho^2\Phi$, przy trzecim $\rho^3\Phi$ itd. Uwzględniając wszystkie odbicia pada więc razem na wewnętrzne powierzchnie kuli strumień świetlny

$$\Phi + \rho\Phi + \rho^2\Phi + \rho^3\Phi + \dots = \Phi + \rho\Phi(1 + \rho + \rho^2 + \dots)$$

Wyrażenie w nawiasach przedstawia szereg nieskończony o sumie $\frac{1}{1 - \rho}$

Po nieskończeniu wielu odbiciach pada więc razem na powierzchnię kuli strumień

$$\Phi + \Phi \frac{\rho}{1 - \rho}$$

i wywołuje tam natężenie oświetlenia.

$$E = \frac{\Phi}{4\pi r^2} + \frac{\Phi}{4\pi r^2} \frac{\rho}{1 - \rho}$$

Pierwszy składnik tego wyrażenia przedstawia natężenie oświetlenia wywołane przez strumień pierwotny padający, drugi składnik — przez strumienie odbite. W miejscach, na które pada tylko światło odbite (zasłonięte przesłoną) powstaje więc natężenie oświetlenia

$$E = \frac{\Phi}{4\pi^2} \frac{\rho}{1-\rho}$$

Jest ono zależne tylko od strumienia całkowitego Φ , wymiarów powierzchni oświetlonej $4\pi^2$ i współczynnika odbicia, a niezależne od charakteru rozkładu światła lampy oraz od miejsca jej zawieszenia w kuli Ulbrichta.

11.4.2.2. Metoda pomiaru za pomocą kuli Ulbrichta [32, 210, 211, 462]

Przy pomiarze strumienia świetlnego, dokonywanym przeważnie metodą podstawiania, zawiesza się w tym samym miejscu kolejno źródło światła mierzone (lampę X) o szukanym strumieniu Φ_X i źródło wzorcowe (lampa N) o znanym strumieniu Φ_N . Wywołują one w miejscu pomiarowym (okno pomiarowe) natężenie oświetlenia

$$E_X = \frac{\Phi_X}{4\pi^2} \frac{\rho}{1-\rho} \quad i \quad E_N = \frac{\Phi_N}{4\pi^2} \frac{\rho}{1-\rho}$$

Stąd dla szukanego strumienia otrzymuje się zależność

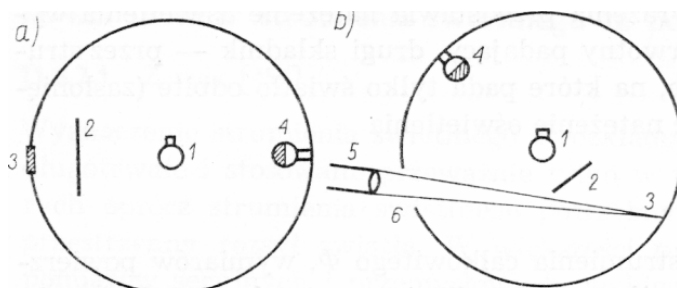
$$\Phi_X = \Phi_N \frac{E_X}{E_N} \quad (133)$$

Promień kuli r i współczynnik odbicia o wewnętrznej powłoki kuli redukują się przy obliczaniu. Wartości bezwzględne natężenia oświetlenia E_X i E_N , których pomiar może być wykonany metodą wzrokową lub fizyczną, nie muszą być znane, znany musi być tylko ich stosunek. W stosowanych przeważnie metodach pomiarowych fizycznych wystarcza więc wyznaczać prądy fotoelektryczne proporcjonalne do natężenia oświetlenia.

Do pomiaru można zastosować np. urządzenie pokazane na rys. 73. Między źródłem 1, które umieszczone powinno być możliwie w środku kuli, a oknem pomiarowym 3, znajduje się przesłona 2, która nie dopuszcza, aby bezpośrednie światło z 1 dochodziło do 3. Musi ona mieć tańce wymiary, aby bezpośrednie światło całej lampy, a nie tylko z ciała świecącego (żarnika), było zacienione. W oknie pomiarowym jest umieszczona płytka rozpraszająca (szczególnie przy pomiarach wzrokowych) lub odbiornik fizyczny. Metodą wzrokową mierzy się luminancję lub światłość płytki; obie te wielkości bowiem są proporcjonalne do natężenia oświetlenia na wewnętrznej ścianie kuli. Metodą fizyczną bezpośrednio wyznacza się w większości przypadków natężenie oświetlenia odnośnego odbiornika.

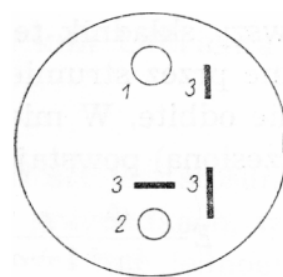
W Anglii i w USA stosuje się często także metodę równoczesną, która polega na tym, że lampa mierzona i wzorcową znajdują się w kuli jednocześnie (rys. 74). Lampy włączane są kolejno. W tym przypadku zamiast jednej przesłony potrzebne są trzy, z których środkowa nie dopuszcza, aby światła świeciły nawzajem bezpośrednio na siebie. W przeciwnym przypadku uzyskaloby się różne warunki odbicia od obu lamp, co powodowałoby błędy.

Metodę równoczesną stosuje się przede wszystkim wtedy, gdy lampa (lub oprawa) mierzona ma dość duże wymiary. Ponieważ w czasie obu pomiarów znajduje się ona w kuli, spowodowane przez nią zakłócenia są w obu przypadkach bardzo podobne.



Rys. 73. Kula Ulbrichta do pomiaru strumienia świetlnego (metoda podstawienia)

1 — źródło mierzone, 2 — przesłona, 3 — okno pomiarowe, 4 — lampa pomocnicza, 5 — miernik luminancji, 6 — otwór wejściowy



Rys. 74. Kula Ulbrichta do pomiaru strumienia świetlnego (metoda równoczesna)

1 — mierzone źródło światła, 2 — przesłona, 3 — okno pomiarowe, 4 — lampa wzorcowa

11.4.2.3. Wpływ błędów [211, 212]

U podstaw teorii kuli Ulbrichta leżą następujące założenia

1. Wnętrze ma kształt kuli.
2. W kuli nie znajdują się żadne przedmioty, które wpływają na rozchodzenie się światła lub pochłaniają światło.
3. Wewnętrzna powierzchnia kuli odbija całkowicie rozpraszająco i we wszystkich miejscach jednakowo.
4. Powłoka wewnętrzna kuli jest aselektywna, tzn. jej możliwości odbicia są niezależne od długości fali światła.

Jeżeli pierwsze trzy warunki są spełnione, to pośrednie natężenie oświetlenia na wewnętrznej ścianie kuli, które wg zależności (130) jest proporcjonalne do całkowitego strumienia świetlnego źródła, jest wszędzie równe i niezależne od przestrzennego rozsyłu światła oraz od miejsca zawieszenia mierzonej lampy w kuli. Ponieważ jednak wymagania stawiane idealnej kuli Ulbrichta w rzeczywistości nie mogą być spełnione, wobec tego pomiar bezwzględny, tzn. wyznaczenie strumienia świetlnego na podstawie wielkości występujących w równaniu (130) jest mało dokładny. Natomiast przy zwykłych metodach (podstawienia i równoczesności) błędy pomiaru i wzorcowania mają w przybliżeniu jednakową wartość i dlatego przy utworzeniu ilorazu redukują się w znacznym stopniu. Błędy te wywierają tym mniejszy wpływ, im bardziej zbliżone są przy pomiarach wartości strumieni zakłócających, tzn. im mniej różnią się od siebie wymiary źródeł światła oraz ich przestrzenne i widmowe rozkłady promieniowania.

W szczególności na temat wpływu błędów można powiedzieć co następuje

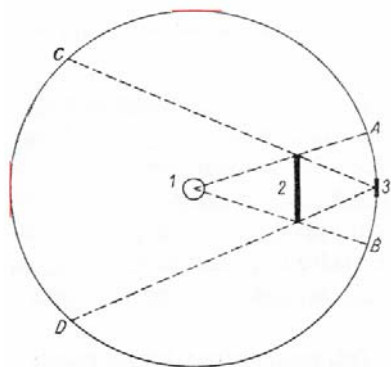
(1) Według badań różnych uczonych [213—219] można, uwzględniając pewne przepisy pomiarowe, stosować do pomiarów strumienia świetlnego także powierzchnie wewnętrzne, których kształt odbiega od kulistego. Odnosi się to w szczególności do tych przypadków, w których porównuje się ze sobą źródła światła o jednakowym lub podobnym przestrzennym rozsyłu światła. Zamiast kulistych kształtów przestrzeni pustych, często wobec prostoty wykonania, wybiera się wielościany, przede wszystkim przy dużych wymiarach.

(2) Założenie, że światło wewnątrz kuli fotometrycznej może rozchodzić się bez przeszkód, jest z góry niespełnione, bowiem w kuli znajdują się jako bryły zakłócające nie tylko źródła światła wraz z umocowaniem, lecz także jedna lub więcej przesłon [448]. Wpływają one na pomiary dwójako: po pierwsze pochłaniają część światła (błędy pochłaniania), po drugie utrudniają światłu swobodne rozchodzenie się (nazywane błędem przesłony, ponieważ przy przesłonach jest on szczególnie duży). Zrozumiałe jest, że oba rodzaje błędów są bezpośrednio ze sobą związane.

Błąd pochłaniania jest tym znaczniejszy, im większa jest powierzchnia zewnętrzna ciała zakłócającego w stosunku do wewnętrznej powierzchni kuli, im mniejszy jest współczynnik odbicia powierzchni ciała zakłócającego oraz im większy jest współczynnik odbicia ścian kuli. Współczynnik odbicia ścian kuli ma wpływ szczególnie wtedy, gdy powierzchnie zewnętrzne obu porównywanych źródeł światła są bardzo różne, jak np. w przypadku badania opraw.

Wpływ przesłony na rozchodzenie się światła jest łatwo widoczny na rys. 75. Przesłona 2 nie dopuszcza, aby światło ze źródła 1 przeszło do strefy AB włącznie z oknem pomiarowym 3, a także — aby okno pomiarowe odebrało światło bezpośrednio ze strefy CD.

Błąd spowodowany przez przesłonę jest tym większy, im bardziej rozległa jest powierzchnia całej zaciemnionej części powierzchni kuli. Błąd zależy od rozsyłu światła źródła światła [220]



Rys. 75. Wpływ przesłony na rozchodzenie się światła
1- źródło światła, 2 - przesłona,
3 - okienko pomiarowe

oraz współczynnika odbicia ściany kuli, a mianowicie zmniejsza się ze wzrastającym współczynnikiem odbicia. Według wytycznych RFN i NRD [32, 221] średnica przesłony powinna wynosić $d/3$ (d — średnica kuli), a jej odstęp od okna pomiarowego powinien być $d/6$. Zgodnie z zaleceniami angielskimi i amerykańskimi wymiary przesłony powinny być nie większe niż to jest bezwzględnie potrzebne, a odstęp od środka kuli powinien wynosić w przybliżeniu $d/6$. Zastosowanie przesłony przepuszczającej światło (przepuszczenie ok. 3%), które niekiedy się zaleca, przynosi jedynie względne korzyści. Tylko przy pewnych rozsyłach światła udaje się wystarczająco skompensować błąd przesłony.

Aby błąd przesłony ograniczyć, źródło światła w kuli umieszcza się tak, ażeby możliwie duża część wypromieniowanego strumienia świetlnego mogła dotrzeć bezpośrednio do ściany kuli. Jest to

realizowane wówczas, gdy płaszczyzna symetrii bryły fotometrycznej o największej powierzchni przekroju jest prostopadła do linii łączącej okno pomiarowe ze środkiem kuli. A więc źródło światła o kształcie wydłużonym zawieszają się jego długą osią w kierunku tej linii.

Błędy pochłaniania i błędy przesłony są tym mniejsze, im większa jest średnica kuli w stosunku do wymiarów ciała zakłócającego. Dlatego jest wskazane stosowanie kuli Ulbrichta o możliwie dużej średnicy. Według wytycznych RFN i NRD największe wymiary źródeł powinny być mniejsze niż połowa średnicy kuli.

Wpływ obcych ciał spowodowany źródłami światła i ich umocowaniami, można w znacznym stopniu wyeliminować przez zastosowanie metody podstawienia z lampą pomocniczą wg Helwiga [215]. Jeżeli ciała zakłócające przy pomiarze i wzorcowaniu są tego samego rodzaju, tak że pochłaniają ten sam procent światła, to istnieją zależności

$$\begin{aligned} E_X &= K\Phi_X \\ E_N &= K\Phi_N \end{aligned} \quad (134)$$

Jeśli taki przypadek nie zachodzi, to współczynniki proporcjonalności mają różne wartości i wtedy

$$\begin{aligned} E_X &= K_X\Phi_X \\ E_N &= K_N\Phi_N \end{aligned} \quad (135)$$

i zatem stosunek

$$\frac{E_X}{E_N} = \frac{k_X}{k_N} \frac{\Phi_X}{\Phi_N} \quad (136)$$

Iloraz k_X/k_N wyznacza się za pomocą dwu pomiarów z pomocniczą lampą, która jest oddzielona osłoną lub przesłoną od źródła światła i jego umocowania oraz od okna pomiarowego.

Jeżeli przy pierwszym pomiarze z lampą pomocniczą znajduje się w kuli lampka mierzona, a przy drugim lampka wzorcowa, to

$$E_{pX} = k_X\Phi_p \quad i \quad E_{pN} = k_N\Phi_p \quad (137)$$

przy czym:

E_{pN} jest to natężenie oświetlenia przy pomiarze ze świecą lampą pomocniczą i nieświecą lampą X,

E_{pN} — jest to natężenie oświetlenia przy pomiarze ze świecą lampą pomocniczą a nieświecą lampą N oraz

Φ_p - wypromieniowany strumień świetlny z lampy pomocniczej.

Z zależności (136) i (137) otrzymuje się ostatecznie

$$\Phi_X = \Phi_N \frac{E_X}{E_N} \frac{E_{pN}}{E_{pX}} \quad (138)$$

(3) Ściana kuli nigdy nie odbija całkowicie równomiernie [222]. Nierównomierność wynika po pierwsze z konieczności umieszczenia okna pomiarowego, a po drugie z zabrudzenia kuli, które następuje nieuchronnie z biegiem czasu. Nierównomierności, które powstają przy nanoszeniu powłoki, mają na ogół znaczenie podrzędne.

Jeżeli współczynnik odbicia ściany kuli nie jest jednakowy we wszystkich miejscach, to pośrednie natężenie oświetlenia aż do pewnej wartości zależy od przestrzennego rozsyłu światła źródła światła. Jest jasne, że błąd wzrasta z wielkością względną powierzchni zakłócającej [220].

Wewnętrzna ściana kuli powinna być odnawiana co najmniej raz do roku; istnieje dużo zaleceń dotyczących sposobu powlekania ściany kuli [32, 223, 224, 460].

(4) Jeżeli widmowy rozkład promieniowania światła lampy mierzonej jest zgodny z rozkładem lampy wzorcowej, to selektywność powłoki kuli nie ma znaczenia. Jeżeli tak nie jest, to różnica barwy między obydwoma porównywalnymi lampami powoduje błąd pomiaru, którego wartość zależy od wartości tej różnicy [225]. Jest wobec tego konieczne wybranie takiej powłoki kuli, której selektywność jest możliwie mała. Z powodu wielokrotnego odbicia w kuli Ulbrichta dla selektywności nie jest miarodajny widmowy współczynnik odbicia $\rho(\lambda)$, lecz współczynnik określony wyrażeniem $\frac{\rho(\lambda)}{1-\rho(\lambda)}$. Ten współczynnik jest tym większy, im lepsze są właściwości

odbicia powłoki kuli.

Jasne jest, że selektywność umieszczonej w oknie pomiarowym płytki ze szkła mlecznego ma podobny wpływ na pomiary, jak powłoka kuli.