

Pomiar strumienia świetlnego

Pomiaru strumienia świetlnego przez porównanie z wzorcem strumienia dokonuje się za pomocą urządzenia zwanego lumenomierzem przestrzennym – kulą Ulbrichta.

Metodę tę wybiera się w większości przypadków, zwłaszcza dla pomiarów seryjnych i przemysłowych. Można bowiem w możliwie prosty i szybki sposób wyznaczyć całkowity strumień świetlny wypromieniowany ze źródła.

Lumenomierze najczęściej mają kształt kuli. Puste wnętrze kuli pokryte białą matową farbą o nieselektywnym i możliwie dużym współczynniku odbicia światła.



Źródło: <http://www.ee.pw.edu.pl/TS/nowa/laboratoria.htm>

Przykładowe fotografie lumenomierzy przestrzennych

Pomiar strumienia świetlnego

Teoria pomiaru została podana w latach dwudziestych ubiegłego wieku przez Friedricha Richarda Ulbrichta – profesora Politechniki Drezdeńskiej.

Ciekawostka

Kula Ulbrichta – jako jedyne urządzenie fotometryczne doczekało się pomnika na terenie Politechniki Drezdeńskiej

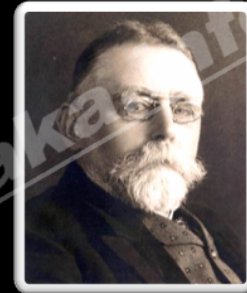
Z uwagi na problemy związane z budową kul o dużych średnicach, wymaganych przy pomiarach wielkogabarytowych źródeł światła i opraw oświetleniowych, starano się zastąpić kule inną bryłą – sześcianem, prostopadłościanem.

- Mimo pozytywnych wyników badań lumenomierze sześcienne nie znalazły szerokiego zastosowania w fotometrii i rzadko są one omawiane w literaturze.

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

U podstaw teorii pomiaru strumienia świetlnego metodą obiektywną leży następujące założenie, że natężenie oświetlenia na okienku pomiarowym kuli Ulbrichta jest proporcjonalne do strumienia świetlnego badanego źródła światła czy oprawy oświetleniowej



Friedrich Richard
ULBRICHT,
(1848 - 1923)
profesor Politechniki
Drezdeńskiej



Pomnik na terenie kampusu
Politechniki Drezdeńskiej

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Źródło światła świecące w kuli Ulbrichta wywołuje na ścianach natężenie oświetlenia, które jest sumą dwóch składowych:

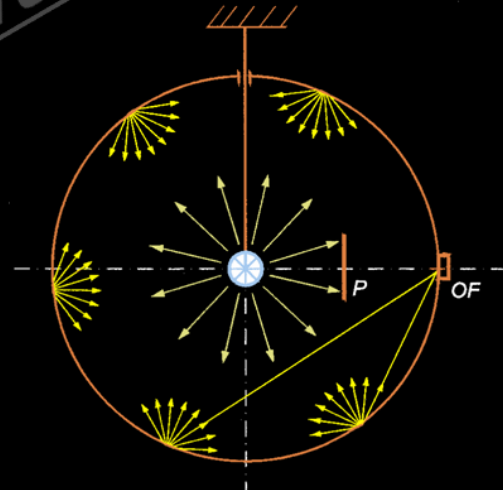
⇒ **bezpośredniej** (E_b) – wywołanej przez światło wypromieniowane bezpośrednio ze źródła (składnik zależny od bryły fotometrycznej źródła, od położenia źródła w lumenomierzu)

⇒ **pośredniej** (E_p) – wywołanej przez światło jedno lub wielokrotnie odbite od ściany kuli (składnik niezależny od bryły fotometrycznej źródła, od położenia źródła w lumenomierzu)

Natężenie oświetlenia w każdym punkcie powierzchni kuli

$$E = E_b + E_p = E_b + \frac{\Phi_p}{S} \quad S = 4\pi \cdot r^2$$

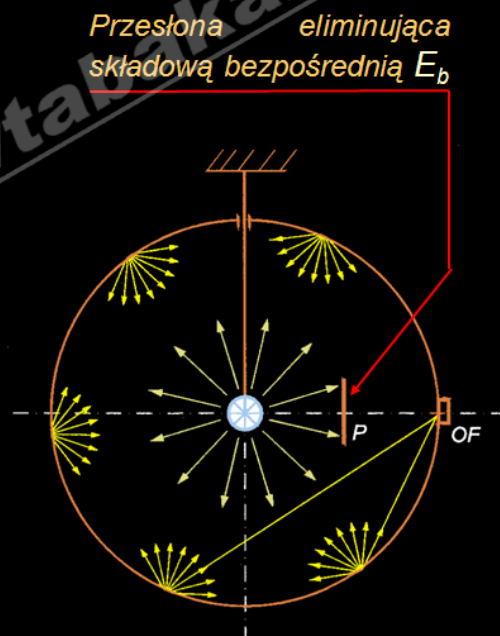
Strumień świetlny źródła światła po jednorazowym odbiciu od ściany kuli o współczynniku ρ wynosi $\rho\Phi$. Strumień odbity podąża znowu do ścian kuli, przy drugim odbiciu odbija się część $\rho^2\Phi$, przy trzecim $\rho^3\Phi$ itd. Uwzględniając wszystkie odbicia pada więc razem na wewnętrzne powierzchnie kuli strumień świetlny



Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

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



Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Aby zmierzyć strumień świetlny należy zasłonić fotoogniwo przed bezpośrednim promieniowaniem źródła światła (czyli należy wyeliminować składnik bezpośredniego natężenia oświetlenia)

Po wyeliminowaniu składnika E_b zachodzi proporcja między strumieniem świetlnym a natężeniem oświetlenia

Z uwagi m.in. na starzenie się farby pokrywającej lumenomierz (jej stopniowe zabrudzenie), zmiany czułości fotoogniwa – wskazań prądu fotoelektrycznego nie skaluje się w lumenach.

Prowadzi się zatem pomiary porównawcze wynikające z porównania wskazań miernika przy źródle wzorcowym i badanym.

$$\Phi_X = \Phi_W \frac{\Delta_X}{\Delta_W}$$

Φ_W - strumień świetlny wzorca

Δ_X - wskazanie (galwanometru) przy źródle badanym

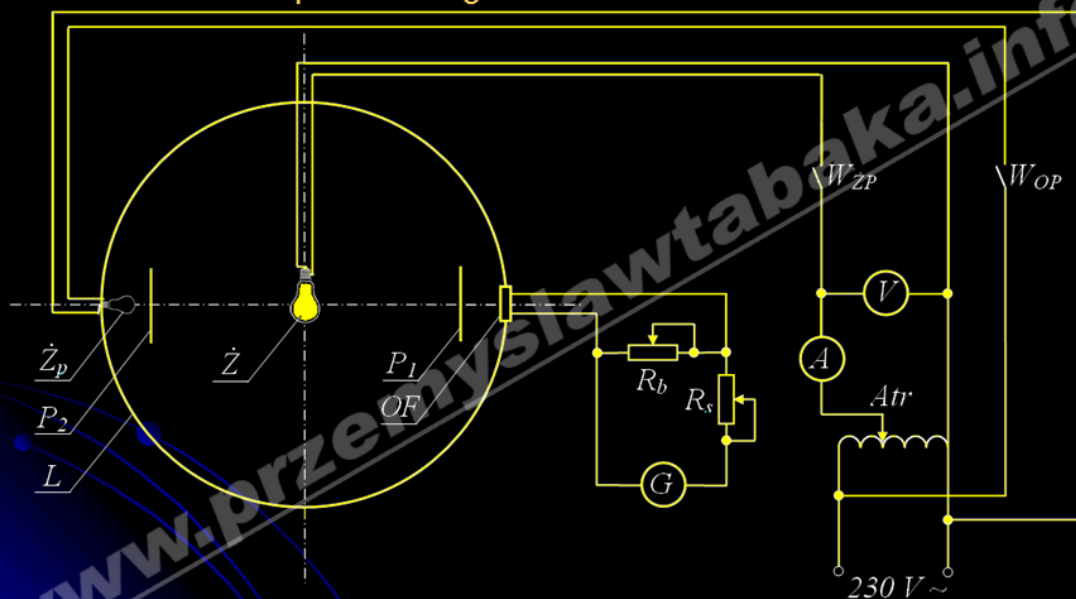
Δ_W - wskazanie (galwanometru) przy źródle wzorcowym

Galwanometr –
czuły miernik
magnetoelektryczny,
służący do mierzenia
niewielkich wartości
natężenia prądu
elektrycznego

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Schemat układu pomiarowego



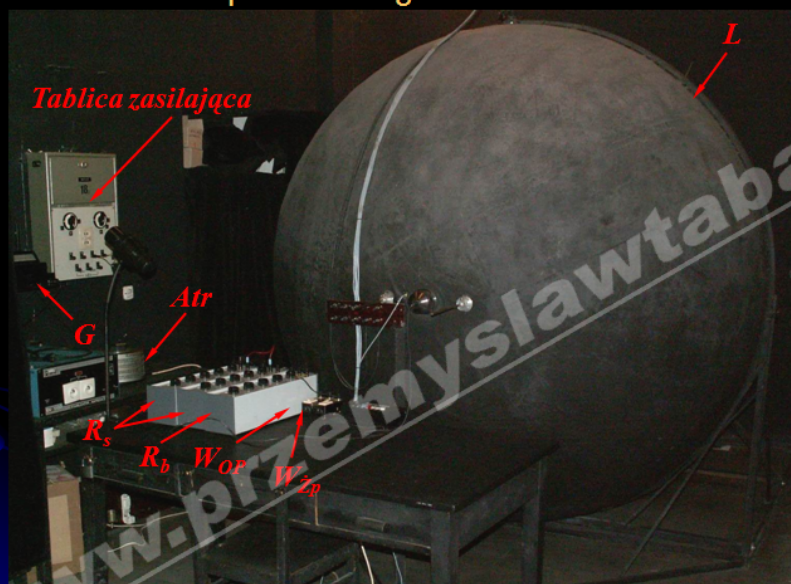
Atr - autotransformator;
L - lumenomierz,
OF - ogniwo fotoelektryczne,
 P_1, P_2 - przesłony

R_b - rezystor dekadowy równoległy,
 R_s - rezystor dekadowy szeregowy,
 $\dot{Z}$ - badane źródło światła,
 $\dot{Z}_p$ - żarówka pomocnicza

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Widok układu pomiarowego



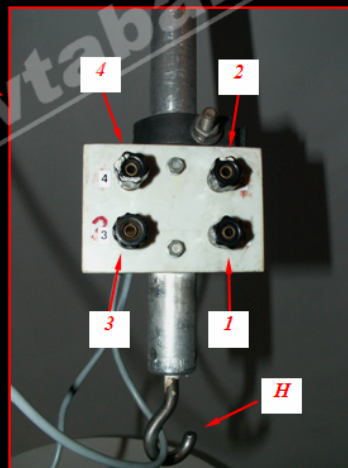
Atr - autotransformator;
L - lumenomierz,
OF - ogniwo fotoelektryczne,
 P_1, P_2 - przesłony

R_b - rezystor dekadowy równoległy,
 R_s - rezystor dekadowy szeregowy,
 $\dot{Z}$ - badane źródło światła,
 $\dot{Z}_p$ - żarówka pomocnicza

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Wnętrze kuli Ulbrichta



Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Założenia teoretyczne lumenomierza

1. Odbicie od powierzchni wewnętrznej lumenomierza jest zgodne z prawem Lamberta (odbicie doskonale rozproszone).
2. Współczynnik odbicia wewnętrznej powierzchni kuli jest stały (dla każdego punktu).
3. Przesłona przesłania jedynie okienko pomiarowe przed bezpośrednim promieniowaniem źródła światła, nie zasłania żadnej części powierzchni lumenomierza.

Strumień świetlny odbity od wewnętrznej powierzchni lumenomierza nie jest pochłaniany przez źródło światła, ani urządzenia do jego zawieszenia, jak również przez przesłonę.

4. Strumień świetlny odbity od wewnętrznej powierzchni lumenomierza nie jest pochłaniany przez źródło światła, ani urządzenia do jego zawieszenia, jak również przez przesłonę.
5. Monochromatyczny współczynnik odbicia wewnętrznej powierzchni kuli jest stały (odbicie jest nieselektywne).
6. Płytkę mleczną zamykającą okienko pomiarowe odpowiada ściśle prawu Lamberta.

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

W warunkach rzeczywistych żaden z wymienionych warunków (1-6) nie jest spełniony w całości – co jest powodem powstawania błędów pomiarowych przy porównywaniu strumienia świetlnego wzorca ze strumieniem świetlnym badanego źródła światła.

Błędy będą tym większe, im większe będą różnice między porównywanymi źródłami światła pod względem:

- kształtu bryły fotometrycznej
- wymiarów źródeł światła
- współczynników odbicia źródeł światła
- barwy światła

Przy pomiarach należy dążyć do tego, aby badane źródło światła i wzorcowe źródło światła były możliwie zbliżone do siebie pod tymi względami. Powinny też znaleźć się w tym samym miejscu w lumenomierzu.

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Równomierność odbicia światła

Podczas eksploatacji dolne powierzchnie lumenomierza szybciej się brudzą z uwagi na osiadanie kurzu. Dlatego też współczynnik odbicia dla różnych części lumenomierza jest różny. W celu stwierdzenia nierównomierności współczynnika odbicia należałoby wykonać pomiar kontrolny z wykorzystaniem źródła światła o skupionym rozsyśle.

Przesłona

Przesłona która jest konieczna do zasłonięcia bezpośrednich promieni świetlnych od badanego źródła światła do okienka pomiarowego w praktyce zasłania nie tylko odcinek powierzchni kuli przed bezpośrednim promieniowaniem źródła światła ale również część powierzchni lumenomierza, która to nie bierze udziału w tworzeniu natężenia oświetlenia na okienku pomiarowym. W wyniku tego na okienku pomiarowym powstanie mniejsze natężenie oświetlenia.

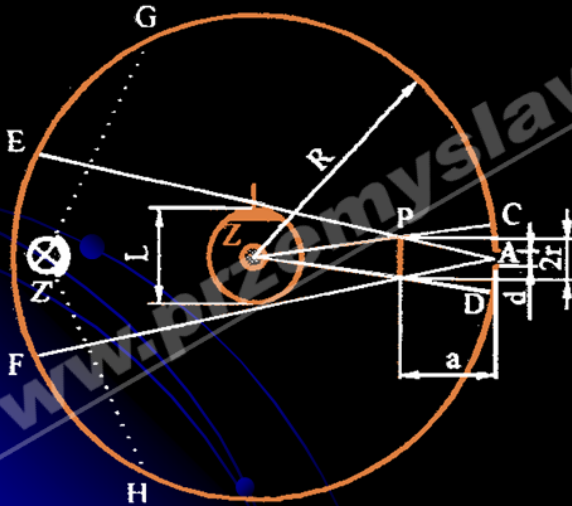
W celu zmniejszenia błędów maksymalnie zmniejsza się wymiary przesłony, która zwykle ma kształt krążka o średnicy $2r$.

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Przesłona – cd.

Promień przesłony (r) wynika z wymiarów kuli, okienka pomiarowego, maksymalnego wymiaru źródeł światła mocowanych w lumenomierzu oraz od odległości przesłony od okienka pomiarowego



W przybliżeniu można przyjąć

$$2r = \frac{a(L-d)}{R} + d$$

d – średnica okienka pomiarowego

L – maksymalny wymiar źródła światła

R – promień kuli Ulbrichta

a – odległość przesłony od okienka pomiarowego

Optymalne położenie przysłony

$$a \cong (0,6 \div 0,7)R \quad 2r \cong \frac{2}{3}L + \frac{d}{3}$$

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Pochłanianie strumienia świetlnego w lumenomierzu

Strumień świetlny w lumenomierzu jest pochłaniany przez:

- ⇒ oprawkę,
- ⇒ źródło światła,
- ⇒ przesłonę i inne elementy kuli

Elementy te nie powinny pochłaniać strumienia świetlnego. Błąd spowodowany niemożliwością spełnienia tego warunku można zmniejszyć stosując źródła światła (wzorcowe i badane) o identycznych kształtach brył fotometrycznych.

Wymaganie dot. identycznych kształtów brył fotometrycznych staje się niemożliwe do spełnienia w przypadku wyznaczania sprawności oprawy oświetleniowej.

Z tego powodu należy uwzględnić poprawkę do uzyskanego wyniku pomiaru.

Do kuli wprowadza się dodatkowe źródło światła – **zarówkę pomocniczą**

Pomiar strumienia świetlnego

Pochłanianie strumienia świetlnego w lumenomierzu – cd.

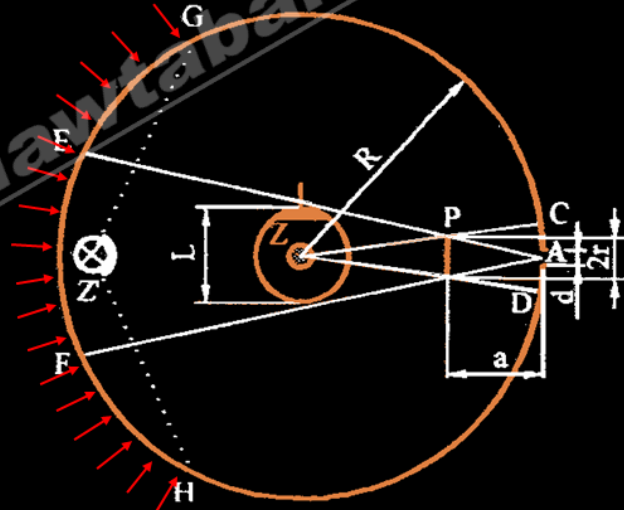
Żarówka pomocnicza świeci na część powierzchni kuli lumenomierza (zwykle mniejszą od połowy powierzchni całej kuli) w dwóch przypadkach:

→ przy umieszczonym w lumenomierzu źródle wzorcowym (źródło to nie świeci)

→ przy umieszczonym w lumenomierzu źródle badanym (źródło to nie świeci)

Iloraz natężenia oświetlenia w okienku pomiarowym dla tych dwóch przypadków jest miarą pochłaniania strumienia świetlnego przez te źródła

$$k = \frac{E'_w}{E'_x} \leftarrow \text{współczynnik korekcji pomiaru}$$



Pomiar strumienia świetlnego

Pochłanianie strumienia świetlnego w lumenomierzu – cd.

Skorygowana wartość strumienia świetlnego

$$\Phi_x = \Phi_w \frac{E_x}{E_w} \frac{E'_w}{E'_x}$$

↑
współczynnik korekcji pomiaru

E_w - natężenie oświetlenia w okienku pomiarowym przy wzorcowym źródle światła świecącym w lumenomierzu

E_x - natężenie oświetlenia w okienku pomiarowym przy badanym źródle światła świecącym w lumenomierzu

E'_w - natężenie oświetlenia w okienku pomiarowym wywołane żarówką pomocniczą (Z_p) przy nie świecącym wzorcu umieszczonym w kuli

E'_x - natężenie oświetlenia w okienku pomiarowym wywołane żarówką pomocniczą (Z_p) przy nie świecącym badanym źródle światła umieszczonym w kuli

Φ_w - strumień świetlny wzorca

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

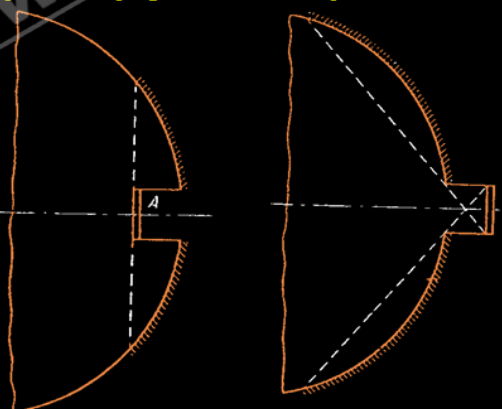
Stałość monochromatycznego współczynnika odbicia

Wartość monochromatycznego współczynnika odbicia w funkcji długości fali powinien być stały. W praktyce nie jest łatwo spełnić to wymaganie.

Do farby nawierzchniowej stosuje się równe dodatki np. ultramarynę, czerń typu „kość słoniowa” w celu wyrównania monochromatycznego współczynnika odbicia kosztem zmniejszenia jego całkowitej wartości.

Usytuowanie głowicy fotometrycznej

Głowica fotometryczna powinna być ściśle usytuowana do wewnętrznej powierzchni lumenomierza, w przeciwnym razie część powierzchni lumenomierza nie będzie na nią promieniowała.



Nieprawidłowe umieszczenie szyby mlecznej

Opracował: Przemysław Tabaka

Pomiar strumienia świetlnego

Wykład opracowany został na podstawie literatury:

1. Erich Helbig: Podstawy fotometrii, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1975
2. Tadeusz Oleszyński: Miernictwo techniki świetlnej, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1957

Tabaka P.: Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta



WPROWADZENIE

W wyniku eksploatacji farba którą pokryte jest wnętrze lumenomierza ulega starzeniu, dodatkowo na jej powierzchni osadza się kurz

Zachodzi zatem potrzeba cyklicznego odnawiania wewnętrznego pokrycia kuli Ulbrichta

V Konferencja Promieniowanie Optyczne – Oddziaływanie, Metrologia, Technologie
Rokosowo k. Leszna 23 – 25 maja 2012

Tabaka P.: Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta



WYMAGANIA DOT. FARBY DO POKRYCIA WNĘTRZA LUMENOMIERZA



PN-91E-04040/01: Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary fotometryczne. Pomiar i wyznaczania strumienia świetlnego

Raport CIE 84-1989: The Measurement of Luminous Flux

V Konferencja Promieniowanie Optyczne – Oddziaływanie, Metrologia, Technologie
Rokosowo k. Leszna 23 – 25 maja 2012

Tabaka P.: Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta



WYMAGANIA DOT. FARBY DO POKRYCIA WNĘTRZA LUMENOMIERZA



WYMAGANIE 1.

Wewnętrzna powierzchnia kuli powinna być matowa, odbijać w sposób rozproszony, zgodny z prawem Lamberta lub zbliżony do tego rodzaju odbicia i nie wykazywać zjawiska fluorescencji

WYMAGANIE 2.

Współczynnik odbicia wewnętrznej powierzchni kuli powinien wynosić $0,80_{-0,02}^{+0,05}$

V Konferencja Promieniowanie Optyczne – Oddziaływanie, Metrologia, Technologie
Rokosowo k. Leszna 23 – 25 maja 2012

Tabaka P.: Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta



WYMAGANIA DOT. FARBY DO POKRYCIA WNĘTRZA LUMENOMIERZA



WYMAGANIE 3.

Odbicie od wewnętrznej powierzchni powinno być praktycznie nieselektywne widmowo

WYMAGANIE 4.

Przy zaświeconej w lumenomierzu żarówce o temperaturze barwowej 2856 K zmierzona temperatura barwowa światła wychodzącego przez okienko pomiarowe nie różni się więcej niż o 100 K

V Konferencja Promieniowanie Optyczne – Oddziaływanie, Metrologia, Technologie
Rokosowo k. Leszna 23 – 25 maja 2012

Tabaka P.: Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta



WARUNEK 1. Rozproszony charakter odbicia, brak zjaw. fluorescencji

Warunek pierwszy wymaga aby powierzchnia, którą pokryte jest wnętrze lumenomierza kulistego z pewnym przybliżeniem spełniało **prawo Lamberta** opisaną zależnością

$$I_{\beta} = I_m \cos \beta$$

I_m - światłość w kierunku prostopadłym do powierzchni promieniującej.

I_{β} - światłość pod kątem β mierzonym od normalnej próbki.



Rys. 1. Kształty krzywych rozpraszania powierzchni dyfuzyjnej:
a) rozkład światłości, b) rozkład luminancji

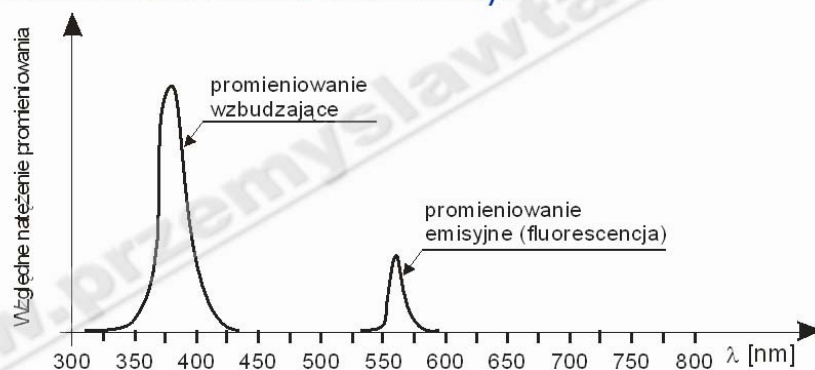
V Konferencja Promieniowanie Optyczne – Oddziaływanie, Metrologia, Technologie
Rokosowo k. Leszna 23 – 25 maja 2012

Tabaka P.: Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta



WARUNEK 1. Rozproszony charakter odbicia, brak zjaw. fluorescencji

Wewnętrzna powierzchnia lumenomierza nie powinna wykazywać zjawiska fluorescencji. Fluorescencja powoduje świecenie ciał wzbudzonych promieniowaniem krótkofalowym.



Rys. 2. Ilustracja zjawiska fluorescencji

V Konferencja Promieniowanie Optyczne – Oddziaływanie, Metrologia, Technologie
Rokosowo k. Leszna 23 – 25 maja 2012

Tabaka P.: Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta



WARUNEK 2. Współczynnik odbicia wnętrza kuli na poziomie 0,8

Całkowity współczynnik odbicia powinien zawierać się w granicach **0,78-0,85**

- ☐ wyższe wartości współczynnika odbicia byłyby źródłem błędu pochłaniania przez ciała obce (oprawkę, źródło światła, elementy mocujące oprawkę)
- ☐ przy wyższych wartościach współczynnika odbicia, w wyniku eksploatacji kuli, będą występowały duże różnice przy współczynnikach odbicia dolnej i górnej części kuli
- ☐ dużym wartościom współczynnika odbicia odpowiada duża selektywność lumenomierza



V Konferencja Promieniowanie Optyczne – Oddziaływanie, Metrologia, Technologie
Rokosowo k. Leszna 23 – 25 maja 2012

Tabaka P.: Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta



WARUNEK 3. Odbicie aselektywne

Rozkład widmowy źródła oświetlającego wewnętrzną powierzchnię kuli Ulbrichta, po odbiciu od niej nie powinien ulec zmianie.

Wymaganie to nie miałoby żadnego znaczenia, przy założeniu, że oba źródła badane jak i wzorcowe charakteryzują się identycznym rozkładem widmowym promieniowania. W praktyce jednak taka sytuacja występuje bardzo rzadko.



V Konferencja Promieniowanie Optyczne – Oddziaływanie, Metrologia, Technologie
Rokosowo k. Leszna 23 – 25 maja 2012

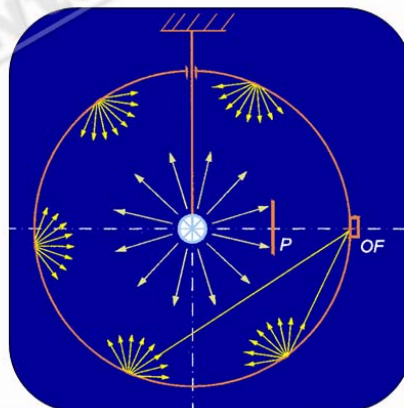
Tabaka P.: Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta



WARUNEK 4. Selektyność lumenomierza nie powoduje zmiany temperatury barwowej o więcej niż 100 K

W warunku tym bierze się pod uwagę fakt, że natężenie oświetlenia na okienku pomiarowym lumenomierza jest efektem wielokrotnych odbić światła od poszczególnych elementów kuli.

Zniekształcenie kolorymetryczne w lumenomierzu jest wynikiem nakładania się na siebie kolejnych wielokrotnych selektywnych odbić.



V Konferencja Promieniowanie Optyczne – Oddziaływanie, Metrologia, Technologie
Rokosowo k. Leszna 23 – 25 maja 2012