

STUDIA NIESTACJONARNE
ELEKTROTECHNIKA
Laboratorium PODSTAW TECHNIKI ŚWIETLNEJ

**Temat: BADANIE LUKSOMIERZA I POMIAR ROZKŁADU NATĘŻENIA OŚWIETLENIA.
WYZNACZANIE LUMINANCJI POWIERZCHNI.**

Opracowanie wykonano na podstawie:

1. Laboratorium z techniki świetlnej (praca zbiorowa pod redakcją Władysława Golika). Skrypt nr 1792. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.,
2. W. Żagan: Podstawy techniki świetlnej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
3. J. Bąk, W. Pabjańczyk: Podstawy techniki świetlnej. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1996.

1.1. BADANIE LUKSOMIERZA

Luksomierz (rys. 1) służy do pomiaru natężenia oświetlenia ^A. Luksomierz obiektywny zbudowany jest z dwóch zasadniczych części:

- przetwornika fotoelektrycznego, którym zazwyczaj jest ogniwo fotoelektryczne, fotorezystor lub fotodioda,
- analogowego lub cyfrowego miernika wielkości elektrycznych, wyskalowanego w luksach.



Rys. 1. Luksomierz.

Aby luksomierz obiektywny mógł spełniać swoje zadanie, powinien:

- oceniać mierzone promieniowanie zgodnie ze względną, widmową skutecznością świetlną $V(\lambda)$ ^B (krzywa widmowej skuteczności świetlnej fotoprzetwornika $S(\lambda)$ powinna być zgodna z krzywą $V(\lambda)$),
- ocenia światło padające pod kątem w stosunku do normalnej zgodnie z kosinusem kąta padania,
- oceniać średnie wartości natężenia oświetlenia przy dużym współczynniku tętnienia zgodnie z prawem Talbota ^C,

^A Natężenie oświetlenia E , jednostka luks $[lx]$ – stosunek strumienia świetlnego padającego na daną powierzchnię do pola tej powierzchni.

^B Względna widmowa skuteczność świetlna $V(\lambda)$ odpowiada przyjętej przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE) względnej widmowej skuteczności świetlnej przeciętnego oka ludzkiego.

^C Oko postrzega oddzielne krótkotrwałe, okresowe bodźce świetlne tylko wtedy, kiedy następują one po sobie dostatecznie wolno. Przy szybszym następowaniu po sobie bodźców stwierdza się migotanie a powyżej

- wskazania powinny być niezależne od czasu i temperatury,
- wskazania powinny być niezależne od stopnia polaryzacji światła,
- mieć liniowy związek między natężeniem oświetlenia a wartością mierzoną (równomierną skalę).

Wskutek czasowych zmian starzeniowych cech fotometrycznych przetwornika fotoelektrycznego oraz zmian we współpracującym z nim układzie elektrycznym wskazania luksomierza ulegają zmianie w czasie. Z tego względu zaleca się okresowe skalowanie luksomierzy. W celu skorygowania wskazań wprowadza się współczynnik korekcji luksomierza zdefiniowany jako:

$$k = \frac{E_{rz}^{zr}}{E_{sk}^{zr}} \quad (1)$$

gdzie:

E_{rz}^{zr} - rzeczywiste natężenie oświetlenia pochodzące ze źródła światła, dla którego wyznaczony jest współczynnik korekcji,

E_{sk}^{zr} - natężenie oświetlenia odczytane ze skali luksomierza dla źródła światła, dla którego wyznaczany jest współczynnik korekcji.

Współczynnik korekcji luksomierza jest iloczynem współczynników korekcji skali k_s i korekcji widmowej k_w . Współczynnik korekcji skali wyznaczany jest przy użyciu wzorca żarówkowego z zależności:

$$k_s = \frac{E_{rz}^w}{E_{sk}^w} \quad (2)$$

gdzie:

E_{rz}^w - rzeczywiste natężenie oświetlenia pochodzące od źródła wzorcowego,

E_{sk}^w - natężenie oświetlenia odczytane ze skali luksomierza dla źródła wzorcowego.

Z uwagi na fakt, że najczęściej krzywa względnej widmowej czułości przetwornika fotoelektrycznego $S(\lambda)$ nie pokrywa się z krzywą względnej widmowej skuteczności świetlnej $V(\lambda)$, oraz że występują różnice w rozkładach widmowych promieniowania źródeł światła, dla których wykonuje się pomiary natężenia oświetlenia i źródła wzorcowego (najczęściej wzorcem jest żarówka) konieczne jest wyznaczenie współczynnika korekcji widmowej jako:

$$k_w = \frac{E_{rz}^{zr}}{E_{sk}^{zr}} \cdot \frac{E_{sk}^w}{E_{rz}^w} \quad (3)$$

Wartość współczynnika korekcji widmowej k_w należy wyznaczyć dla różnych źródeł światła t.j. źródeł światła różniących się rozkładem widmowym^D. Po uwzględnieniu zależności (2) i (3) otrzymujemy:

$$k = k_s \cdot k_w \quad (4)$$

oraz

$$E_{rz}^{zr} = k_s \cdot k_w \cdot E_{sk}^{zr} \quad (5)$$

określonej częstotliwości (częstotliwość zanikowa) powstaje wrażenie stałej jaskrawości, które przy dalszym podnoszeniu częstotliwości nie ulega zmianie. Według Talbota szybko następujące po sobie kolejne okresowe bodźce wywołują w oku wrażenie równomiernej jaskrawości, jeżeli ich częstotliwość leży powyżej częstotliwości zanikowej. Oka ma przy tym zdolność uśredniania luminancji w czasie.

^D Najczęściej współczynnik korekcji widmowej wyznacza się dla następujących źródeł światła: świetlówek w trzech podstawowych barwach (świetlówek z różnym luminoforem), lampy rtęciowe, lampy metalohalogenkowe, lampy sodowe.

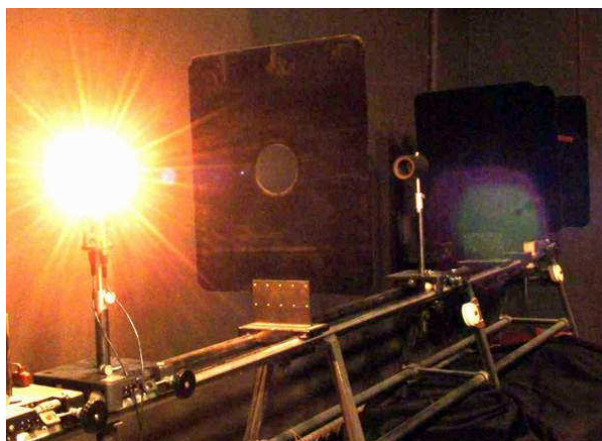
Jak wynika z zależności (5), przemnożenie wskazań luksomierza przez wartość jego współczynnika korekcji k pozwala ustalić rzeczywistą wartość mierzonego natężenia oświetlenia. W stosowanych luksomierzach obiektywnych o częściowo skorygowanym przetworniku fotoelektrycznym wartości współczynników korekcji zwykle zawierają się w następujących granicach:

Tabela 1. Przykładowe wartości współczynników korekcji luksomierzy.

L_p	Współczynnik korekcji	Symbol	Wartość
1	Współczynnik korekcji skali	k_s	0.8 – 1.2
2	Współczynnik korekcji widmowej	k_w	0.9 – 1.4

Gdy głowica z przetwornikiem fotoelektrycznym nie jest skorygowana do kosinusa kąta padania, to pojawia się błąd wynikający z niewłaściwego pomiaru natężenia oświetlenia spowodowanego światłem padającym na powierzchnię oświetlaną pod kątem w stosunku do normalnej.

Skalowanie luksomierza można przeprowadzić na ławie fotometrycznej (rys. 2), która umożliwia precyzyjne ustawienie w zadanej odległości źródła światła i badanego obiektu.



Rys. 2. Ława fotometryczna.

Jeżeli na ławie fotometrycznej umieścić wzorcowe źródło światła o znanej wartości światłości kierunkowej I_w^E i jeżeli wymiary tego źródła światła są znacznie mniejsze od odległości r pomiędzy wzorcem a przetwornikiem fotoelektrycznym luksomierza F , to wartość natężenia oświetlenia E_{rz}^W na powierzchni przetwornika fotoelektrycznego można obliczyć z tzw. prawa odwrotności kwadratów:

$$E_{rz}^W = \frac{I_w^E}{r^2} \quad (6)$$

Jednocześnie przy ustawieniu przetwornika fotoelektrycznego w odległości r należy odczytać wartość natężenia oświetlenia E_{sk}^W ze skali luksomierza. Obie wartości natężenia oświetlenia posłużą do obliczenia współczynnika korekcji skali k_s (2).

^E I - światłość kierunkowa wyrażona w kandelach [cd] to stosunek strumienia $d\Phi$ rozchodzącego się w elementarnym kącie bryłowym $d\omega$ do wartości tego kąta, charakteryzuje sposób rozchodzenia się strumienia źródła światła w przestrzeni.

^F Zazwyczaj przyjmuje się, że odległość fotometryczna powinna być 5-krotnie większa od największego wymiaru źródła światła. Wtedy błąd wynikający ze stosowania tzw. prawa odwrotności kwadratów dla niepunktowych źródeł światła jest mniejszy niż 1%.

1.2. POMIAR ROZKŁADU NATĘŻENIA OŚWIETLENIA

Rozkład natężenia oświetlenia na powierzchni roboczej stanowiska pracy stanowi istotny czynnik oceny komfortu widzenia. Poziome natężenia oświetlenia na danej powierzchni roboczej określony jest przez średnie natężenie oświetlenia. Jeżeli pole S danej powierzchni jest podzielone na n jednakowych elementów ΔS_i , to średnie natężenie oświetlenia E_{sr} można wyznaczyć z zależności:

$$E_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot \Delta S_i}{S} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_i \quad (7)$$

gdzie:

E_i - natężenie oświetlenia na elemencie ΔS_i , w praktyce przy właściwym podziale powierzchni S może być zastąpione przez natężenie oświetlenia na środku i -tego elementu.

Rozkład natężenia oświetlenia na danej powierzchni pomieszczenia charakteryzuje równomierność oświetlenia δ opisana wzorem (8).

$$\delta = \frac{E_{min}}{E_{sr}} \quad (8)$$

gdzie:

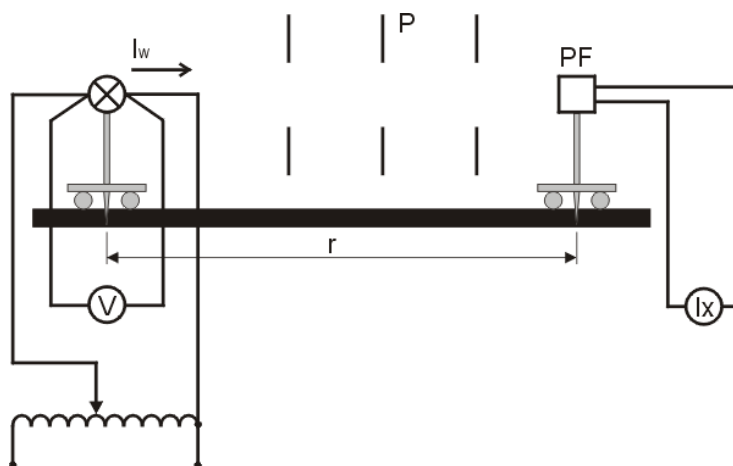
E_{min} - minimalne natężenie oświetlenia na danej powierzchni.

Najmniejsze średnie natężenie oświetlenia E_{sr} i równomierność oświetlenia δ na płaszczyźnie roboczej są normowane. Zalecane wartości średniego natężenia oświetlenia i równomierności oświetlenia niezbędne do zapewnienia właściwych warunków widzenia na stanowiskach pracy znajdujących się we wnętrzach znajdują się w normie *PN-EN 12464-1 Oświetlenie miejsc pracy - Część 1: Miejsca pracy wewnątrz pomieszczeń*.

1.3. POMIARY

1.3.1 Skalowanie luksomierza

Skalowanie luksomierza wykonać na ławie fotometrycznej w układzie przedstawionym na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do wzorcowania luksomierza: I_w – światłość źródła wzorcowego, PF – przetwornik fotoelektryczny luksomierza, r – odległość pomiędzy wzorcem a przetwornikiem, P – przesłona.

Na jednym z końców ławy ustawić żarowy wzorzec światłości o znanej światłości I_w . Zamocować na wózku przetwornik fotoelektryczny luksomierza i przesuwając wózek po ławie fotometrycznej, zmieniając odległość r wyznaczyć zależność zmian rzeczywistego natężenia oświetlenia pochodzącego od źródła wzorcowego E_{rz}^w w funkcji natężenia oświetlenia odczytanego ze skali luksomierza E_{sk}^w (9). Wartość natężenia oświetlenia E_{rz}^w na powierzchni przetwornika fotoelektrycznego należy obliczyć z zależności (6).

$$E_{rz}^w = f(E_{sk}^w) \quad (9)$$

Przy danym wzorcu światłości umocować wózek z przetwornikiem fotoelektrycznym w stałym położeniu na ławie fotometrycznej. Obracając przetwornik fotoelektryczny dookoła własnej osi wyznaczyć zależność mierzonego natężenia oświetlenia E od kąta padania światła α ^G (10). Pomiarów wykonać przy zmianach kąta padania światła co 5° .

$$E = f(\alpha) \quad (10)$$

Wyniki pomiarów skalowania luksomierza zestawić w tabeli.

Wykreślić zależność (9). Zmiany natężenia oświetlenia E w funkcji kąta podania światła α przedstawić w postaci względnej jako $E' = f(\alpha)$, gdzie $E' = E/E_{\alpha=0}$. Na tym samym wykresie narysować funkcję $\cos \alpha$.

Obliczyć współczynniki korekcyjności skali k_s dla wszystkich zakresów pomiarowych badanego luksomierza.

1.3.2 Pomiar rozkładu natężenia oświetlenia

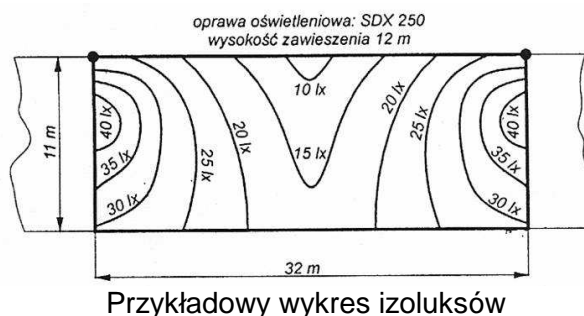
Za pomocą wyskalowanego luksomierza zmierzyć rozkład natężenia oświetlenia na powierzchni roboczej. Podzielić powierzchnię roboczą na równe kwadraty o boku nie większym niż 1m. Przetwornik fotoelektryczny luksomierza umieszczać w środkach kwadratów. Podczas odczytów osoba wykonująca pomiary nie powinna zaciemniać przetwornika fotoelektrycznego.

Przetwornik fotoelektryczny luksomierza będącego przedmiotem badań charakteryzuje się dobrą korekcją widmową do $V(\lambda)$. Współczynniki korekcji widmowej k_w nie jest wyznaczany. W związku z tym należy przyjąć, że wartość współczynnika korekcji widmowej wynosi 1. Przy takim założeniu rzeczywistą, mierzoną przez luksomierz wartość natężenia oświetlenia E_{rz}^zr należy obliczyć z zależności (11).

$$E_{rz}^zr = k \cdot E_{sk}^zr = k_s \cdot E_{sk}^zr = \frac{E_{rz}^w}{E_{sk}^w} \cdot E_{sk}^zr \quad (11)$$

Ze zmierzonych wartości **obliczyć średnie natężenie oświetlenia E_{sr}** (7) i **równomierność oświetlenia δ** (8).

Narysować rozkład natężenia oświetlenia w postaci izoluksów.



^G Kąt padania światła liczy od normalnej do powierzchni fotoprzetwornika



Grupa:		Dzień:		Godzina:	
Skalowanie luksomierza.					
Typ badanego luksomierza:					
Typ wzorca światłości:					
Napięcie fotometrowania U_{fot} [V]:					
Światłość wzorca I_w [cd]:					

Lp	r	E_{sk}^w	$E_{\text{rz}}^w = \frac{I_w}{r^2}$	k_s
-	[m]	[lx]	[lx]	[-]
Zakres pomiarowy luksomierza:				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
Zakres pomiarowy luksomierza:				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

Lp	r	E_{sk}^w	$E_{\text{rz}}^w = \frac{I_w}{r^2}$	k_s
-	[m]	[lx]	[lx]	[-]
Zakres pomiarowy luksomierza:				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
Zakres pomiarowy luksomierza:				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				



Grupa:		Dzień:		Godzina:	
Wyznaczanie zależności mierzonego natężenia oświetlenia E od kąta padania światła α.					
Typ badanego luksomierza:					

Lp	α	E
-	[1°]	[lx]
1	-85	
2	-80	
3	-75	
4	-70	
5	-65	
6	-60	
7	-55	
8	-50	
9	-45	
10	-40	
11	-35	
12	-30	
13	-25	
14	-20	
15	-15	
16	-10	
17	-5	
18	0	

Lp	α	E
-	[1°]	[lx]
19	5	
20	10	
21	15	
22	20	
23	25	
24	30	
25	35	
26	40	
27	45	
28	50	
29	55	
30	60	
31	65	
32	70	
33	75	
34	80	
35	85	



Grupa:		Dzień:		Godzina:	
Pomiar rozkładu natężenia oświetlenia.					
Typ badanego luksomierza:					

Współrzędne punktów pomiarowych		Zakres pomiarowy luksomierza:							
		X ₁ [m]	X ₂ [m]	X ₃ [m]	X ₄ [m]	X ₅ [m]	X ₆ [m]	X ₇ [m]	X ₈ [m]
Y ₁ [m]	E _{sk} ^{żr} [lx]								
	E _{rZ} ^{żr} [lx]								
Y ₂ [m]	E _{sk} ^{żr} [lx]								
	E _{rZ} ^{żr} [lx]								
Y ₃ [m]	E _{sk} ^{żr} [lx]								
	E _{rZ} ^{żr} [lx]								
Y ₄ [m]	E _{sk} ^{żr} [lx]								
	E _{rZ} ^{żr} [lx]								
Y ₅ [m]	E _{sk} ^{żr} [lx]								
	E _{rZ} ^{żr} [lx]								
Y ₆ [m]	E _{sk} ^{żr} [lx]								
	E _{rZ} ^{żr} [lx]								
Y ₇ [m]	E _{sk} ^{żr} [lx]								
	E _{rZ} ^{żr} [lx]								
Y ₈ [m]	E _{sk} ^{żr} [lx]								
	E _{rZ} ^{żr} [lx]								

Lp	Nazwa	Symbol	Wartość
1	Średnie natężenie oświetlenia	E _{sr} [lx]	
2	Równomierność oświetlenia	δ [-]	

2.1. Wyznaczanie luminancji powierzchni

Luminancja świetlna L [cd/m^2] – jest fizyczną miarą jaskrawości.

$$L = \frac{d\Phi}{d\omega \cdot dS \cdot \cos \Theta} = \frac{dl}{dS \cdot \cos \Theta} = \frac{dl}{dS'}$$

gdzie:

$d\Phi$ – elementarny strumień świetlny przenoszony przez elementarną wiązkę promieniowania przechodzącą przez określony punkt znajdujący się w elementarnym kącie bryłowym $d\omega$

$d\omega$ - elementarny kąt bryłowy obejmujący określony kierunek,

dS – powierzchnia przekroju wiązki promieniowania zawierająca określony punkt

Θ - kąt między normalną do powierzchni tego przekroju, a kierunkiem rozchodzenia się wiązki promieniowania,

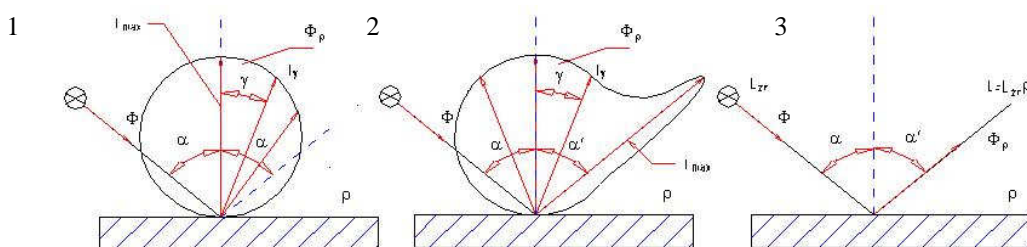
dl – elementarna światłość w elementarnym kącie bryłowym $d\omega$.

Obliczanie luminancji powierzchni.

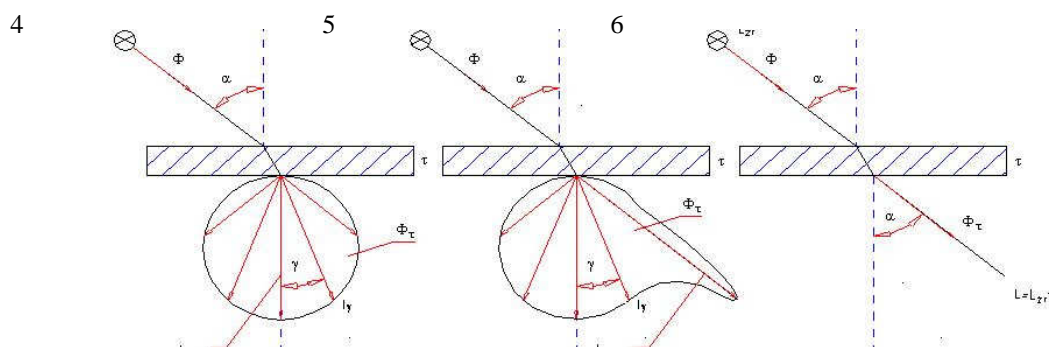
Sposób obliczenia luminancji uzależniony jest od własności fotometrycznych powierzchni.

Ze względu na własności refleksyjne (transmisyjne) powierzchnie dzielimy na:

- powierzchnie odbijające (przepuszczające) światło w sposób kierunkowy,
- powierzchnie odbijające (przepuszczające) światło w sposób rozproszone,
- powierzchnie odbijające (przepuszczające) światło w sposób kierunkowo rozproszony.

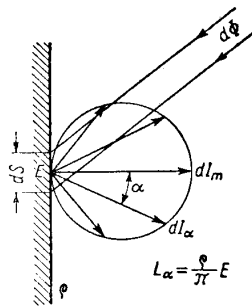


1. odbicie rozproszone
2. odbicie kierunkowe - rozproszone
3. odbicie kierunkowe



4. odbicie rozproszone
5. odbicie kierunkowe - rozproszone
6. odbicie kierunkowe

Do określenia **luminancji powierzchni rozpraszającej** w wybranym kierunku α względem normalnej potrzebna jest znajomość wartości współczynnika odbicia tej powierzchni oraz natężenia oświetlenia na tej powierzchni.



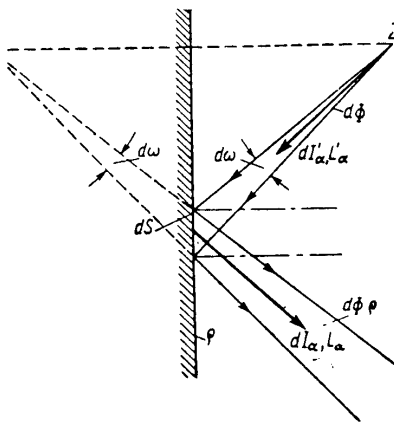
$$\Phi_\rho = \Phi \cdot \rho$$

$$I_m \cdot \pi = \Phi \cdot \rho$$

$$I_m = \frac{\Phi \cdot \rho}{\pi}$$

$$L_\alpha = L = \frac{dl_\alpha}{dS \cdot \cos \alpha} = \frac{dl_m \cdot \cos \alpha}{dS \cdot \cos \alpha} = \frac{d\Phi \cdot \rho}{\pi} = \frac{E \cdot dS \cdot \rho}{\pi} = \frac{E \cdot \rho}{\pi}$$

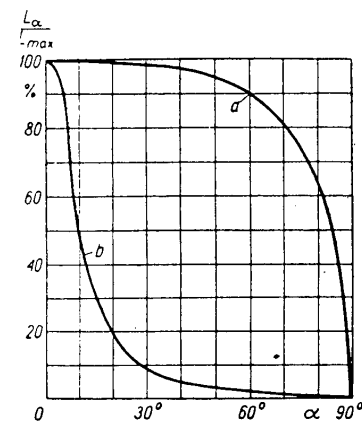
Luminancję powierzchni odbijającej światło w sposób idealnie kierunkowy można wyznaczyć znając luminancję L'_α źródła światła i współczynnik odbicia ρ powierzchni.



$$L_\alpha = \frac{dl_\alpha}{dS \cdot \cos \alpha} = \frac{d\Phi \cdot \rho}{dS \cdot \cos \alpha} = \frac{dl'_\alpha \cdot \rho}{dS \cdot \cos \alpha} = L'_\alpha \cdot \rho$$

Luminancja powierzchni odbijającej w sposób kierunkowo - rozproszony zależy od zdolności rozproszenia powierzchni oraz od kierunku, pod którym ma być wyznaczona. Do określenia luminancji takiej powierzchni niezbędna jest znajomość bryły fotometrycznej lub krzywej światłości światła odbitego od tej powierzchni przy danym kącie padania.

Luminancja elementarnej powierzchni dS pod kątem α jest proporcjonalna do $I_\alpha / \cos \alpha$. Dokonując rzutu prostokątnego końca wektora światłości I_α w kierunku normalnej do powierzchni otrzyma się na tym kierunku (na normalnej) odcinek o wartości $I_\alpha / \cos \alpha$ proporcjonalny do luminancji L_α . Przenosząc długość tego odcinka na kierunek α otrzyma się luminancję L_α . Łącząc wszystkie końce wektorów luminancji w poszczególnych kierunkach otrzymuje się **krzywą wskaźnikową luminancji**.



a - Krzywa wskaźnikowa luminancji szkła matowego
 b - Krzywa wskaźnikowa luminancji szkła zwykłego

Zdolności rozpraszające danej powierzchni określa się jako stosunek pola powierzchni pod krzywą wskaźnikową do całkowitego pola wykresu.

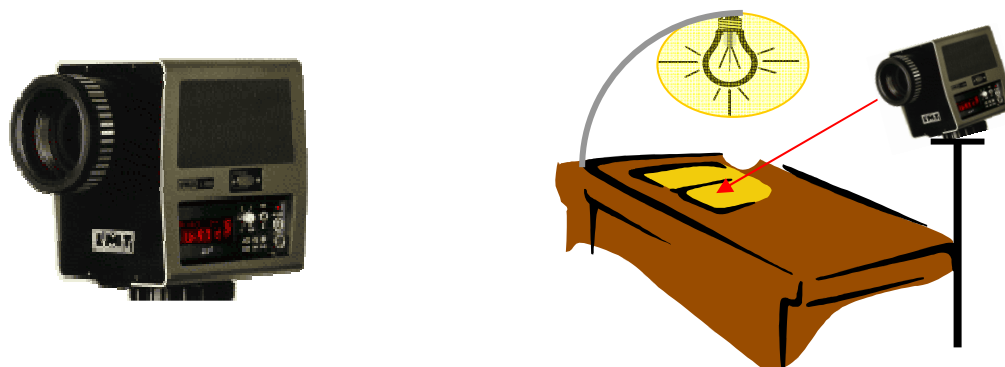
Zdolności rozpraszające danej powierzchni określić można także na podstawie wartości luminancji wyznaczonej pod określonymi kątami ($\alpha = 5^\circ, 20^\circ, 70^\circ$).

$$\delta = \frac{L_{20} + L_{70}}{2 \cdot L_5}$$

$$0 \text{ (odbicie kierunkowe)} \geq \delta \leq 1.0 \text{ (odbicie rozproszone)}$$

2.2. Pomiar luminancji

Pomiar luminancji powierzchni wykonuje się miernikiem luminancji.



Dla powierzchni rozpraszających wyznaczyć na podstawie pomiaru luminancji i natężenia oświetlenia wartość współczynnika odbicia.

Wyniki pomiarów

POMIARY					
Opis powierzchni					
Natężenie oświetlenia	1.	2.	3.	4.	5.
	Mierzona luminancja L [cd/m ²]				
E ₁ = [lx]					
E ₂ = [lx]					
OBLICZENIA					
Opis powierzchni					
Natężenie oświetlenia	1.	2.	3.	4.	5.
	Wyznaczony współczynnik odbicia strumienia świetlnego $\rho = \frac{L \cdot \pi}{E}$				
E ₁ = [lx]					
E ₂ = [lx]					