

## Model głowicy fotometrycznej luksomierza, z elementem korygującym optymalnie uchyb pomiarowy, spowodowany skośnym padaniem światła na jej powierzchnię pomiarową

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono różne rozwiązania konstrukcji głowicy fotometrycznej luksomierza. Wykazano istnienie wpływu rodzaju tej konstrukcji, na jakość korekcji uchybu spowodowanego skośnym padaniem światła na jego głowicę pomiarową. Przedstawiono model matematyczny elementu w optymalny sposób korygującego ten uchyb. Zaprezentowana metoda, projektowania głowicy fotometrycznej luksomierza, pozwala uzyskać głowicę skorygowaną w sposób optymalny pod względem przestrzennym oraz widmowym.

**Abstract.** The article presents various designs of photometric head of luxmeters. It also showed the influence of designing parameters of luxmeter on quality of its correction. The mathematical model of this correction element is shown also. (Constructing luxmeters with optimal its spatial correction parameters).

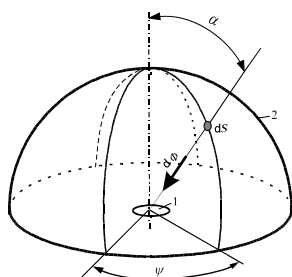
**Słowa kluczowe:** miernictwo wielkości świetlnych, fotometria, luksomierz,

**Keywords:** optical radiation measurements, photometry, luxmeter.

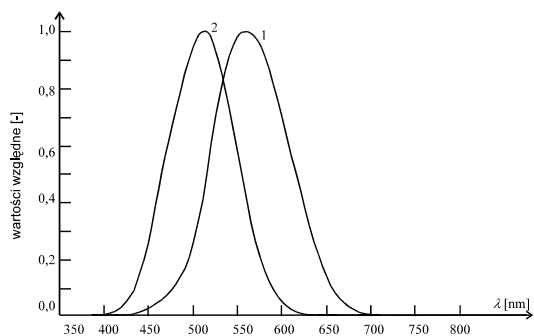
doi:10.12915/pe.2014.01.79

### Wstęp

Luksomierze - podstawowe przyrządy pomiarowe techniki świetlnej, działają na zasadzie pomiaru strumienia świetlnego, pochodzącego z półprzestrzeni (rysunek 1.). Wartość mierzonego promieniowania, ma się zmieniać zgodnie z funkcją kosinusa kąta padania tegoż promieniowania, na głowicę fotometryczną tj. głowica musi być skorygowana przestrzennie. Ponadto, przy pomiarach natężenia oświetlenia, głowica pomiarowa musi reagować na strumień świetlny dokładnie tak samo, jak standardowy obserwator o czułości względnej oka  $V_\lambda$  dla widzenia fotonowego lub  $V_\lambda$  dla widzenia skotopowego (rysunek 2.) tj. ma być skorygowana widmowo.



Rys.1. Model geometrii padania strumienia świetlnego na głowicę fotometryczną luksomierza: 1 - głowica luksomierza, 2 - otaczająca półprzestrzeń,  $\alpha$  - kąt padania strumienia świetlnego na głowicę fotometryczną (kąt zenitalny),  $\psi$  - kąt azymutalny,  $d\Phi$  - jednostkowy strumień świetlny,  $dS$  - powierzchnia elementarna [1]



Rys.2. Względna skuteczność świetlna promieniowania monochromatycznego: krzywa (1)  $V_\lambda$  odpowiada widzeniu fotonowemu, a krzywa (2)  $V_\lambda$  widzeniu skotopowemu [1]

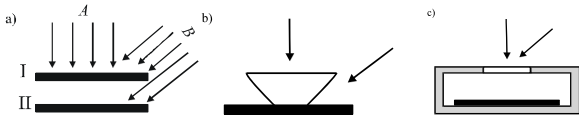
W związku z tym, głowica fotometryczna jest zbudowana z:

- detektora promieniowania optycznego,
- zestawu filtrów promieniowania optycznego, korygującego charakterystykę widmową detektora do wymaganej krzywej czułości,
- elementu służącego do zapewnienia odpowiedniej czułości kątowej głowicy tj. elementu korekcji przestrzennej, korygującego uchyb spowodowany skośnym padaniem światła na głowicę.

Istnieje wiele konstrukcji korekcji przestrzennej głowicy fotometrycznej luksomierza. Jednak żadna z nich nie zapewnia idealnego jej skorygowania [2]. W związku z tym badania dotyczące tego rodzaju korekcji są istotnym zagadnieniem w miernictwie wielkości fotometrycznych.

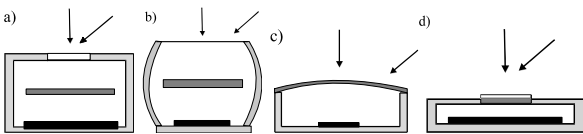
### Znane metody korekcji przestrzennej głowicy fotometrycznej luksomierza

Istnieje wiele konstrukcji pomocniczych, pozwalających na zmniejszenie uchybu spowodowanego skośnym padaniem światła. Rozwiązanie z rysunku 3a przewiduje zastosowanie dwóch fotodetektorów pomiarowych - jednego pod drugim. Skośne padanie strumienia świetlnego (tj. strumień  $B$ ) powoduje, że drugi fotodetektor zostaje również nim oświetlony. W związku z tym natężenie prądu fotoelektrycznego drugiego detektora dodaje się do natężenia prądu pochodzącego od detektora pierwszego. Kompensuje to straty związane ze skośnym padaniem strumienia świetlnego na górny fotodetektor. Rozwiązanie z rysunku 3b, polega na umieszczeniu na powierzchni fotodetektora przesłony w kształcie lejka. Konstrukcja taka, powoduje osłabienie sygnału promieniowania padającego prostopadłe na ten detektor, i zwiększenie jego wartości, dla dużych kątów padania promieniowania (poprzez zwiększenie powierzchni światłoczułej fotodetektora i dodatkowe odbicia od tej przysłony). Poprzez odpowiedni dobór wymiarów geometrycznych przysłony, w stosunku do detektora można kształtować sygnał wyjściowy z tego rodzaju głowicy fotometrycznej. W rozwiązaniu przedstawionym na rysunku 3c, strumień świetlny pada na fotodetektor, przez otwór wykonany w środku pomalowanej od wewnątrz na biało obudowy, co przy skośnym padaniu światła daje dodatkowe jego odbicie na fotodetektor.



Rys.3. Schematy rozwiązania korekcji przestrzennej głowic fotometrycznych

Obecnie, w praktyce pomiarowej, w celu spełnienia warunku, zgodnie z którym, mierzone promieniowanie ma się zmieniać zgodnie z funkcją kosinusa kąta padania promieniowania na głowicę fotometryczną, stosuje się elementy rozpraszające padający strumień świetlny. Elementy te, są umieszczone przed skorygowanym widmowo fotoogniwem. W elemencie rozpraszającym następuje wielokrotne odbijanie i rozpraszanie strumienia świetlnego, a w związku z tym zachodzą w nim duże straty energetyczne. Tym samym takiego rodzaju głowica fotometryczna luksomierza charakteryzuje się niską sprawnością świetlną  $\eta$ .



Rys. 4. Schematy rozwiązań korekcji przestrzennej głowicy fotometrycznej z zastosowaniem elementu rozpraszającego

W rozwiązaniach przedstawionych na rysunkach 4a oraz 4b za podstawę rozwiązania konstrukcyjnego przyjęto działanie kuli fotometrycznej, do której światło wpada przez górny otwór. W rozwiązaniu przedstawionym na rysunku 4c fotoogniwo umieszczone jest w pomalowanym od wewnątrz na czarno tubusie, przykrytym wypukłym szkłem mlecznym. Na rysunku 4d przedstawione zostało rozwiązanie łączące zasadę działania układów korekcyjnych przedstawionych na rysunkach 4c oraz 4a. Obecnie w praktyce pomiarowej tego rodzaju rozwiązanie korekcji przestrzennej jest używane najczęściej. Zastosowany w tym rozwiązaniu element korekcyjny zbudowany jest z dwóch części, tj. z przezroczystego matowanego na poboczniczy walca, który jest naklejony na rozpraszającą promieniowanie optyczne matówkę. Poprzez odpowiedni dobór, wymiarów geometrycznych tych obydwu części składowych elementu korekcyjnego, można korygować kąto- głowice fotometryczne. Istnieje także możliwość kąto- skorygowania głowicy fotometrycznej luksomierza przy użyciu elementu optycznego (nasadki) bez powierzchni rozpraszającej [1,3]. Nasadka ta (rysunek 5.), jest w ten sposób zbudowana, aby nie zawierała elementów rozpraszających. W tej metodzie, jako elementu korekcyjnego, używa się odpowiednio ukształtowanej soczewki typu wklęsło-wypukłego. Odejście od tradycyjnego rozwiązania korekcji przestrzennej głowicy fotometrycznej luksomierza, w oparciu o dyfuzyjne rozpraszanie światła, poprawia sprawność świetlną głowicy fotometrycznej, ponieważ następuje przeszło czterokrotne zwiększenie sprawności świetlnej luksomierza [3].



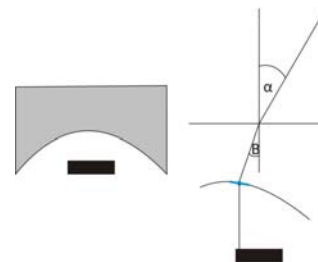
Rys. 5. Schemat przezroczystego elementu korekcyjnego [3]

Zawsze jednak, płaszczyzna czynna tego typu głowic znajduje się na powierzchni czołowej, szczyt

rozpraszacza lub na detektorze. Może ona ulegać zmianie wraz ze zmianą kąta padania na głowicę wiązki świetlnej [2]. Prowadzi to w konsekwencji do powstawania błędu pomiarowego rzędu kilku procent [2, 4]. Błąd ten wynika z różnicy położenia pomiędzy rzeczywistą, a przyjętą płaszczyzną czynną. Błąd ten jest wyznaczony na podstawie prawa odwrotności kwadratów. Wartość tego błędu maleje wraz ze wzrostem odległości fotometrycznej [4].

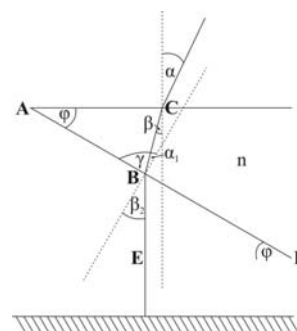
### Proponowana metoda projektowania głowicy fotometrycznej luksomierza

Projektując głowicę fotometryczną luksomierza należy oprócz zapewnienia korekcji przestrzennej i widmowej wziąć pod uwagę aspekt zapewnienia stałości płaszczyzny czynnej. Należy zaprojektować taki element (przezroczysty, wykonany z materiału o współczynniku załamania  $n$ ), aby padające na jego powierzchnię pod dowolnym kątem promieniowanie, po przejściu przez ten element, wychodziło z niego tak, że strumień świetlny niesiony przez wiązkę promieniowania równoległą do jego osi optycznej, był proporcjonalny do kosinusa kąta padania promieniowania na powierzchnię czołową tego elementu (rysunek 6.). Wtedy można będzie uniknąć kłopotów związanych z niedoskonałościami kątowymi korekcji widmowej (np. umieszczając te filtry w dużej odległości od rozpatrywanego elementu). Dodatkowo, w celu uniknięcia problemów związanych z niestałością płaszczyzny pomiarowej głowicy, jej powierzchnia czołowa powinna być płaska.



Rys. 6. Schemat przezroczystego elementu korekcyjnego wraz z załozoną drogą promienia w głowicy

W celu znalezienia odpowiedzi na pytanie, jaki powinien być kąt łamiący, małego wycinka dolnej powierzchni granicznej elementu korekcyjnego „dolnego pryzmatu”  $\varphi$ , by promień świetlny padający na ścianę tego „pryzmatu” pod kątem  $\alpha$ , po przejściu przez niego, był prostopadły do ściany „pryzmatu”, na którą padał (rysunek 7.), wykonano przedstawioną w dalszej części pracy analizę.



Rys.7. Analiza kąto- drogi promienia świetlnego w projektowanej głowicy fotometrycznej

Z prawa załamania promieniowania (w przypadku pierwszej powierzchni granicznej):

$$(1) \quad \sin \alpha = n \sin \beta$$

Z prawa załamania promieniowania (w przypadku drugiej powierzchni granicznej):

$$(2) \quad n \sin \alpha_1 = \sin \beta_2$$

Po przekształceniu otrzymujemy:

$$(3) \quad \alpha = \arcsin(n \sin \beta)$$

Z trójkąta ABC (rysunek 7.)

$$(4) \quad 180^\circ = \varphi + \gamma + 90^\circ - \beta$$

$$\gamma = 90^\circ + \beta - \varphi$$

Z trójkąta BDE (rysunek 7.)

$$(5) \quad 180^\circ = 90^\circ + \varphi + 90^\circ - \beta_2$$

$$\varphi = \beta_2$$

Ponadto, znana jest zależność:

$$(6) \quad \alpha_1 + \gamma = 90^\circ, \quad \alpha_1 = 90^\circ - \gamma$$

Po podstawieniu równania (4) do równania (6) otrzymujemy:

$$(7) \quad \alpha_1 = \varphi - \beta$$

Podstawiając do równania (2) równanie (5) oraz równanie (6) można wyznaczyć kąt załamania  $\beta$  promieniowania po przejściu przez pierwszą powierzchnię graniczną:

$$(8) \quad n \sin(\varphi - \beta) = \sin \varphi$$

Korzystając z tożsamości

$$(9) \quad \sin(\varphi - \beta) = \sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta$$

z równania (8) otrzymujemy:

$$(10) \quad \varphi = \arctan \frac{n \sin \beta}{n \cos \beta - 1}$$

Korzystając z równania (1), równanie (10) możemy zapisać w postaci:

$$(11) \quad \varphi = \arctan \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - 1}$$

Załóżmy, że rozpatrywany element ma symetrię osiową, a jego dolna powierzchnia opisana jest funkcją  $g(r)$ . Jeżeli powierzchnia czołowa tego elementu zostanie oświetlona przez znajdujące się w dużej odległości źródło światła, (jak pokazano na rysunku 1), to natężenie oświetlenia na tej powierzchni będzie równe:

$$(12) \quad E = \frac{d\Phi}{ds} \cos \alpha d\psi d\alpha,$$

gdzie:  $d\Phi$  oznacza wartość strumienia świetlnego padającego na powierzchnię pomiarową (powierzchnię elementu)  $ds$ .

Do detektora, dotrze tylko wiązka światła, która po przejściu przez rozpatrywany element, będzie równoległa do jego osi optycznej. Załóżmy, że będzie to ta część wiązki promieniowania świetlnego, padającego na powierzchnię czołową elementu korekcyjnego, która przejdzie przez jego dolną powierzchnię w punkcie o współrzędnych  $(r, \psi)$ . W związku z tym, strumień świetlny padający na detektor będzie równy:

$$(13) \quad d\Phi_d = \eta E r dr d\psi$$

gdzie:  $\eta$  jest pewną stałą, związaną z pochłanianiem światła przez filtry służące do korekcji widmowej luksomierza. Rozpatrywany element powinien mieć takie właściwości, by dla każdego kąta padania promieniowania świetlnego  $\alpha$ ,  $d\Phi_D$  było proporcjonalne do  $E$  oraz  $d\Phi_D$  było proporcjonalne do  $\cos \alpha$ . Z tych powodów powinno być spełnione równanie:

$$(14) \quad A \frac{d\Phi}{ds} \cos \alpha d\psi d\alpha = \eta E_0 \cos \alpha r dr d\psi,$$

przy czym  $A$  i  $E_0$  oznaczają pewne stałe. Z równania (14) wynika, że:

$$(15) \quad \frac{d\alpha}{dr} = \frac{\eta E_0}{A} \frac{d\Phi}{ds} r.$$

Oznaczając, jako  $T$  kombinację stałych po prawej stronie równania (15), możemy je zapisać w postaci:

$$(16) \quad \frac{d\alpha}{dr} = T r.$$

Rozwiązując powyższe równanie różniczkowe otrzymujemy funkcję:

$$(17) \quad \alpha = T \frac{r^2}{2} + \alpha_0,$$

gdzie:  $\alpha_0$  oznacza stałą. W przypadku projektowanego elementu stała ta musi wynosić 0, gdyż kąt padania promieniowania na powierzchnię czołową głowicy, leży w przedziale od 0 do  $\pi/2$  radianów.

Ponieważ dolna powierzchnia rozpatrywanego elementu opisana jest funkcją  $g(r)$ , z właściwości pochodnej funkcji:

$$(18) \quad \frac{d}{dr} g(r) = \tan \varphi.$$

Podstawiając (11) i (17) do (18) otrzymujemy:

$$(19) \quad \frac{d}{dr} g(r) = \frac{\sin \left( T \frac{r^2}{2} \right)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \left( T \frac{r^2}{2} \right)} - 1}$$

Rozwiązując numerycznie powyższe równanie różniczkowe, można wyznaczyć kształt dolnej powierzchni rozpatrywanego elementu:

### Podsumowanie

Zaprezentowana metoda projektowania głowicy fotometrycznej luksomierza pozwala zaprojektować głowicę w sposób optymalny ze względu na błędy korekcji przestrzennej i widmowej projektowanego przyrządu. Dzięki ograniczeniu do minimum obliczeń numerycznych, metoda powinna cechować się dużą dokładnością, a zaprojektowany przyrząd, powinien pracować zgodnie z założeniami projektanta.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach działalności statutowej S/W/E/2/08

### LITERATURA

- [1] Fryc I., Korekcja widmowa i przestrzenna fotometrów, *Rozprawy Naukowe PB*, Białystok 2000
- [2] Hovila J., Mustonen M., Kärhä P., Ikonen E., Determination of the diffuser reference plane for accurate illuminance responsivity calibrations, *Applied Optics*, Vol. 44, nr 28, (2005), s. 5894-5898
- [3] Fryc I., Design issue of novel type of an illuminance meter photometric head, *Journal of Modern Optics*, Vol.56, nr 13 (2009), s.1504-1508
- [4] Bonisławski K., Fryc I., Położenie płaszczyzny czynnej głowicy fotometrycznej luksomierza, a kształt elementu korekcji przestrzennej, *XX Krajowa Konferencja Oświetleniowa, Technika Świetlna*, (2011) s. 116-118

### Autorzy:

dr hab. inż. Irena Fryc Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Optoelektroniki i Techniki Świetlnej, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45d, E-mail: i.fryc@pb.edu.pl  
dr inż. Eugeniusz Czech, Politechnika Białostocka, Studium Fizyki, ul. Wiejska 45a, 15-351 Białystok, E-mail: eczech@plusnet.pl