

UKŁAD GONIOFOTOMETRU SŁUŻĄCEGO DO WYZNACZANIA KRZYWEJ ŚWIATŁOŚCI PROMIENIOWANIA PRZEPUSZCZANEGO PRZEZ ELEMENTY ROZPRASZAJĄCE TYPU ENGINEERED DIFFUSERS™

Piotr JAKUBOWSKI¹, Antoni FREJ², Katarzyna KOŁACZ³, Irena FRYC⁴

1. członek Polskiego Komitetu Oświetleniowego SEP
tel.: 85 746 9407 e-mail: piotr.7akubowski@gmail.com
2. Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki
tel.: 505 948 015, e-mail: 261670@pw.edu.pl
3. Instytut Optyki Stosowanej imienia prof. Maksymiliana Pluty, Warszawa
tel.: 795 574 461 e-mail: kkolacz@inos.pl
4. Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej
tel.: 85 746 9407 e-mail: i.fryc@pb.edu.pl

Streszczenie: Dokonująca się LED-owa rewolucja oświetleniowa nie byłaby możliwa bez stosowania w konstrukcjach układów świetlno-optycznych elementów kształtujących wiązkę promieniowania np. rozpraszaczy. W procesie projektowania konstrukcji świetlno-optycznych bardzo istotnym elementem jest znajomość parametrów technicznych stosowanych elementów. Jednakże tylko nieliczni producenci prezentują dane dotyczące krzywych światłości elementów dyfuzyjnych. W związku z tym zachodzi konieczność określania tego parametru przez ich użytkowników. Komercyjnie dostępne układy goniofotometrów nie są przeznaczone do charakteryzowania elementów rozpraszających. Dlatego autorzy opracowali i wykonali układ pomiarowy umożliwiający wyznaczenie krzywej światłości dyfuzorów zarówno w świetle białym jak i monochromatycznym. Zaprezentowano też wyniki pomiarów uzyskane w omawianym układzie pomiarowym.

Słowa kluczowe: fotometria, goniometr, krzywa światłości, struktury rozpraszające.

1. WSTĘP

W konstrukcjach układów świetlno-optycznych współczesnych opraw oświetleniowych stosuje się elementy kształtujące wiązkę promieniowania. Często w tym celu używane są rozpraszacze [1,2,3,4]. Przy prawidłowym projektowaniu i konstrukcji układów świetlno-optycznych nieodzowne są informacje dotyczące parametrów technicznych używanych w tej konstrukcji elementów składowych. Bardzo istotną informacją, która decyduje o parametrach konstrukcji układu optycznego z dyfuzorem jest krzywa światłości promieniowania przechodzącego przez dyfuzor oświetlany skierowaną wiązką światła. Jednakże informacje dotyczące krzywych światłości elementów dyfuzyjnych są udostępniane tylko przez nielicznych producentów. Ponadto nawet jeżeli tego typu informacje są prezentowane, to dotyczą one tylko jednej płaszczyzny pomiarowej. W związku z tym zachodzi konieczność przeprowadzania we własnym zakresie tego rodzaju pomiarów. Niestety, ale komercyjnie dostępne

układy goniofotometrów nie są przeznaczone do charakteryzowania elementów rozpraszających. Są to typowe układy służące do charakteryzowania źródeł światła i opraw oświetleniowych, a mierzenie za ich pomocą krzywej światłości promieniowania przepuszczonego przez dyfuzor oświetlany wiązką światła skierowaną pod dowolnym kątem jest niemożliwe. W związku z powyższym autorzy niniejszego opracowania postanowili wypełnić lukę w metrologii promieniowania optycznego i opracować układ umożliwiający wyznaczenie krzywej światłości promieniowania przepuszczonego przez rozpraszacze. W celu odpowiedniego skonstruowania takiego układu należy znać parametry i definicje charakteryzujące materiały rozpraszające.

2. PARAMETRY CHARAKTERYZUJĄCE MATERIAŁY ROZPRASZAJĄCE PROMIENIOWANIE OPTYCZNE

Rozpraszacze promieniowania optycznego można podzielić na powierzchniowe, w których kierunek biegu wiązki jest kształtowany za pomocą zjawisk refrakcyjnych oraz objętościowe, które zawierają w swojej strukturze wewnętrzne centra rozpraszania. W związku z czym możemy mówić o rozpraszaczach odbijających lub/i przepuszczających promieniowanie. Ze względu na różną technologię ich wykonania charakteryzują się one różnymi wartościami parametrów, takich jak całkowity oraz widmowy współczynnik przepuszczania, kąt rozsyłu, krzywa wskaźnikowa luminancji czy krzywa światłości. W aplikacjach oświetleniowych jednym z najistotniejszych parametrów technicznych charakteryzujących elementy przepuszczające w sposób rozproszony światło jest krzywa światłości. W zależności od techniki wykonania dyfuzora, krzywa światłości może charakteryzować się rozkładami typu gaussowskiego czy lambertowskiego [5,6]. Z takim jej charakterem mamy do czynienia w przypadku matówek i szkła mlecznego [7]. Współczesne technologie pozwalają

również na wytworzenie struktur ukierunkowujących bieg promieni światła w praktycznie dowolny sposób. W związku z tym należy mieć możliwość wyznaczania krzywej światłości promieniowania przepuszczanego przez rozpraszacze (zarówno dla światła białego) jak i monochromatycznego.

2.1. Krzywa światłości

Światłość określa iloraz elementarnego strumienia świetlnego wypromieniowanego we wnętrzu nieskończenie małego stożka obejmującego dany kierunek, oraz kąta bryłowego tego stożka. Bezpośredni pomiar odbywa się przez zarejestrowanie natężenia oświetlenia E w danym punkcie i obliczenie na tej podstawie wartości światłości przy zastosowaniu zależności (1). Zebrane w ten sposób punkty równoodległe od źródła, leżące na jednej płaszczyźnie, tworzą krzywą światłości.

$$I = Er^2 \quad (1)$$

gdzie: I – światłość, E – natężenie oświetlenia, r – odległość fotometrowania (przeprowadzania pomiarów).

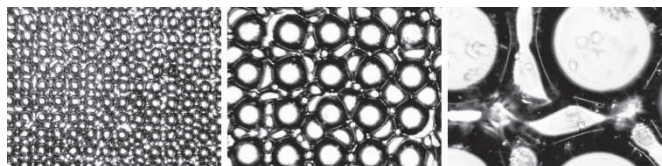
2.2. Widmowy współczynnik przepuszczania

Nie bez znaczenia pozostaje wpływ materiałów z jakich wykonany jest dany rozpraszacz na rozkład widmowy przepuszczanego przez niego promieniowania. Istotne jest również to, czy każda z długości fali promieniowania oświetlającego zmienia swój kierunek biegu w taki sam sposób pod wpływem działania elementu rozpraszającego.

2.3. Podawane katalogowo parametry charakteryzujące elementy typu Engineered Diffusers™

W zaprojektowanym układzie przebadano wybrane rozpraszacze Engineered Diffusers™ firmy RPC Photonics. Dyfuzory te są strukturami mikrosoczewkowymi, wykonanymi w polimerze umieszczonym na szklanym podłożu [3]. Zdjęcia jednej ze struktur, wykonane mikroskopem optycznym z obiektywami o różnych powiększeniach, prezentuje rys. 1.

W katalogach charakteryzowane są przez producenta przede wszystkim pod względem kąta rozsyłu światłości oraz kształtu plamki światła po rozproszeniu (np. kołowa, kwadratowa). Dodatkowo podawany jest temperaturowy oraz widmowy zakres pracy, jak również wykorzystany materiał i jego współczynnik załamania dla wybranej długości fali. Do każdego dostępnego w katalogu rozpraszacza zamieszczona jest również charakteryzująca go krzywa światłości.



Rys. 1. Rozpraszacz Engineered Diffusers™ w powiększeniu kolejno 4-, 10- i 40-krotnym

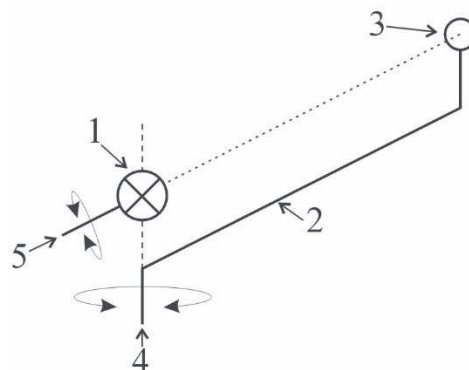
3. UKŁAD POMIAROWY

Budowany układ pozwala na wykonywanie pomiarów różnych rodzajów rozpraszaczy. Istotną cechą jest również możliwość kontrolowania barwy światła poprzez filtry

absorbujące. Pomiar krzywej światłości [8] elementów dyfuzyjnych wymagał połączenia metody fotometru ramieniowego oraz metody goniometru.

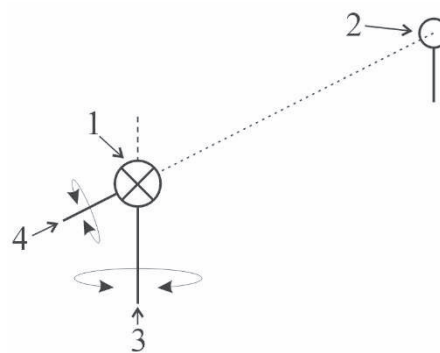
3.1. Pomiary krzywej światłości

W klasycznej metodzie fotometru ramieniowego, odpowiednio skonstruowany układ mechaniczny umożliwia obrót ramienia na którego końcu umieszczony jest detektor pomiarowy. Długość ramienia powinna spełniać warunek granicznej odległości fotometrowania. Obrót odbywa się wokół punktu centralnego w którym umieszczony jest badany obiekt. W czasie pomiaru struktura pozostaje nieruchoma, a wynikiem jest krzywa światłości w danej płaszczyźnie fotometrowania (przeprowadzania pomiarów). Po obróceniu obiektu o pożądany kąt, możliwy jest pomiar w innej płaszczyźnie (rys. 2).



Rys. 2. Schemat budowy fotometru ramieniowego: 1 – badany dyfuzor, 2 – ramię obrotowe, 3 – głowica pomiarowa, 4 – oś obrotu ramienia, 5 – oś obrotu źródła światła

Metoda goniometru bazuje na koncepcji odwrotnej – obracany jest badany obiekt, zaś nieruchoma pozostaje głowica pomiarowa (rys. 3).

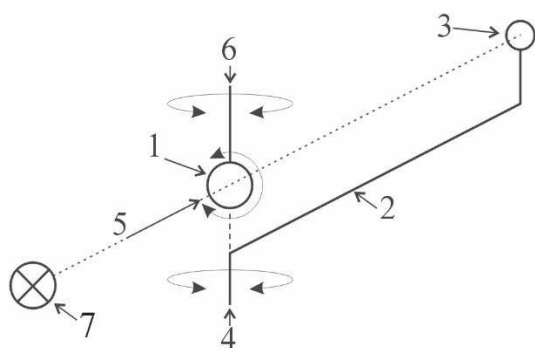


Rys. 3. Schemat budowy układu goniometrycznego: 1 – badany dyfuzor, 2 – głowica pomiarowa, 3 – pierwsza oś obrotu źródła, 4 – druga oś obrotu źródła

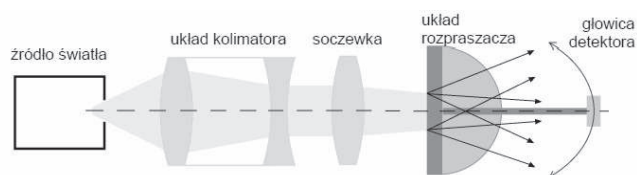
Połączenie wskazanych metod, umożliwia prowadzenie badań rozsyłu światłości dla różnych kątów padania promieniowania na rozpraszacz. W skonstruowanym układzie było to realizowane poprzez obrót mierzonego elementu wokół prostej wyznaczającej bieg promieniowania od źródła do rozpraszacza oraz obrót rozpraszacza wokół osi prostopadłej do tej prostej (rys. 4.). Wszystkie elementy układu umieszczone zostały na ławie optycznej.

Bazując na idei konstrukcji przedstawionej na rys. 4. autorzy pracy zbudowali układ goniofotometru służącego do wyznaczania krzywej światłości promieniowania

przepuszczanego przez elementy rozpraszające. Układ ten (rys. 5) składa się z żarowego źródła światła, układu odpowiadającego za kolimację wiązki świetlnej, soczewki skupiającej, układu mocującego badany rozpraszacz oraz detektora mocowanego na ramieniu. Głowica detekcyjna podłączona była do luksomierza, z którego dane przesyłano w czasie rzeczywistym do komputera. Dla uzyskania odpowiedniego stosunku sygnału do szumu niezbędne było zastosowanie źródła światła białego o dużej wartości strumienia świetlnego, co daje możliwość dokładniejszego zarejestrowania zmian rozsyłu światłości, szczególnie dla dużych kątów. Jednocześnie wiąże się to z koniecznością stosownego chłodzenia układu oświetlającego.



Rys. 4. Schemat układu goniofotometrycznego:
1 – badany rozpraszacz, 2 – ramię, na którym zamocowana jest głowica pomiarowa, 3 – głowica pomiarowa, 4 – oś obrotu ramienia, 5 – pierwsza oś obrotu rozpraszacza, 6 – druga oś obrotu rozpraszacza, 7 – źródło światła (naświetlacz)



Rys. 5. Układ służący do wyznaczania krzywej światłości transparentnych elementów rozpraszających

Obecność soczewki skupiającej wynika z zastosowania kolimatora o z góry ustalonych parametrach. Wiązka z niego wychodząca miała zbyt dużą średnicę. Metodyka pomiaru kształtu krzywej światłości rozpraszaczy dopuszcza takie rozwiązanie [9]. Należy zaznaczyć, że możliwe jest też wykonanie układu bez soczewki skupiającej, jeśli wymiary plamki są zadowalające. Główną rolę odgrywa tu zależność jej wymiarów względem odległości od detektora, związana prawem odwrotności kwadratu odległości [8].

Istotną kwestią projektowanego układu pomiarowego było również zadbanie o to, aby podczas pomiarów natężenia światła detektor zawsze znajdował się w równej odległości od badanego rozpraszacza. W tym celu dyfuzor musiał być umieszczony bezpośrednio w osi obrotu głowicy detekcyjnej, prostopadle do osi optycznej całego układu. W związku z tym zastosowany został stolik pozwalający na regulację położenia w dwóch kierunkach, który umieszczono na mocowaniu obrotowego ramienia. Na stoliku przytwierdzona została metalowa ramka, będąca uchwytem na rozpraszacz. Jej zadaniem było również zredukowanie promieni biegnących poza oś. Wewnątrz ramki znajdował się element mocujący rozpraszacz, wydrukowany z użyciem drukarki 3D dla uzyskania dokładniejszego połączenia dyfuzor-ramka. W zależności

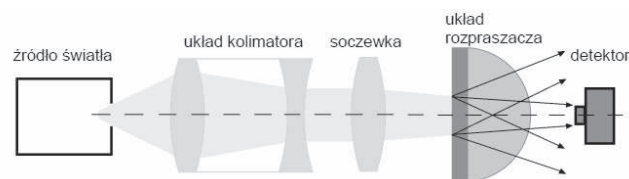
od wymiarów badanego rozpraszacza możliwe jest wydrukowanie odpowiedniego uchwyty. Pomiędzy stolik a mocowanie ramienia wstawiony był dodatkowo kątomierz pozwalający na pomiar kąta położenia detektora względem osi optycznej. Całość została umieszczona na silniku krokowym sterowanym za pomocą mikrokontrolera. Ze względu na szerokie kąty rozsyłu badanych struktur, przyjęto krok $3,6000^\circ$, natomiast konstrukcja układu pozwala na zmniejszenie kroku nawet do $0,1125^\circ$.

Pomiary światłości odbywały się z wykorzystaniem precyzyjnego luksomierza L-100 firmy Sonopan wraz z głowicą pomiarową G.L-100 o klasie dokładności A. Duża czułość przyrządu wymagała precyzyjnego wyciemnienia całego pomieszczenia, w którym dokonywane były pomiary, a więc samego oświetlacza przede wszystkim, jak i całej drogi optycznej, jaką przebywało światło przed trafieniem na płaszczyznę rozproszenia.

Zestawiony w ten sposób układ pozwala na dokładną rejestrację wartości natężenia rozproszonego światła. W przypadku wyznaczania krzywej światłości w zależności od długości fali promieniowania oświetlającego możliwe jest wstawienie bezpośrednio za soczewką filtrów barwnych.

3.2. Pomiary rozkładu widmowego

Zbadano również względne wartości widmowego współczynnika przepuszczania rozpraszacza. Wiązało się to z potrzebą zastąpienia w układzie pomiarowym luksomierza spektrometrem kompaktowym. Zastosowano spektrometr HR4000 firmy Ocean Optics o zakresie pomiarowym $(200 \div 1100)$ nm. Parametry charakteryzujące tego typu urządzenia zostały omówione w pracy „Istotne parametry spektrometru wielokanałowego” [10]. Schemat ideowy tego układu pomiarowego pokazano na rys. 6.



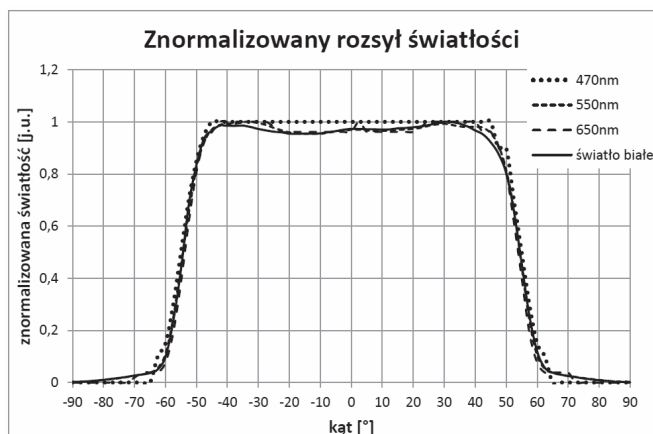
Rys. 6. Schemat układu wykorzystywanego do pomiarów względnych rozkładów widmowych promieniowania przepuszczonego przez transparentne elementy rozpraszające

W omawianym układzie pomiarowym zastosowano również filtr szary (umieszczony przed rozpraszaczem), w przypadku gdy podczas pomiarów zbyt duży strumień świetlny docierający do detektora spektrometru powodował nasycenie się tego przyrządu pomiarowego.

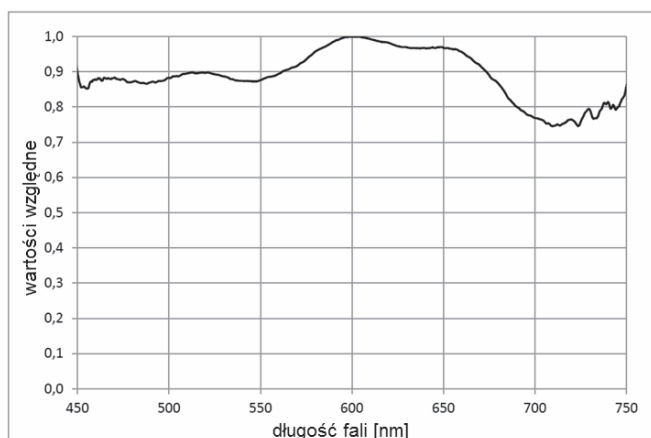
4. WYNIKI POMIARÓW

Każdorazowo wykonano dwie serie pomiarowe dla danego rozpraszacza. Zbadane zostały trzy struktury o różnych kątach rozsyłu, nazywane umownie od 1 do 3. Na rys. 7. zamieszczono krzywe światłości uzyskane dla jednego z tych rozpraszaczy przy oświetleniu go światłem białym i barwnym.

Rys. 8. przedstawia znormalizowane wartości widmowego współczynnika przepuszczania rozpraszaczy specjalnych. Sygnał wyjściowy zmierzono dla rozpraszacza o największym kącie rozsyłu. Pomiary wykazały duże podobieństwo między sygnałami wyjściowymi każdej z badanych struktur.



Rys. 7. Porównanie krzywych światłości w zależności od barwy światła dla rozpraszacza o najszerszym kącie rozsyłu



Rys. 8. Znormalizowane wartości względne współczynnika przepuszczania rozpraszaczy Engineered Diffusers™

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Zaprojektowany i wykonany układ goniofotometru umożliwia określanie parametrów różnego typu dyfuzorów oraz przeprowadzanie badań dotyczących wyznaczenia krzywej światłości struktur przepuszczających światło w sposób rozproszony. Umożliwia on również wyznaczenie kąta rozsyłu danego rozpraszacza. Zautomatyzowanie układu znacząco przyspiesza wykonywanie pomiarów. Przy

użyciu zaprezentowanego układu istnieje również możliwość określania widmowego współczynnika przepuszczania danej struktury. Jest to możliwe w przypadku zastosowania w nim jako głowicy pomiarowej kompaktowego spektrometri. W celu określenia wartości całkowitego współczynnika przepuszczania dyfuzora należy ten układ wyposażyć w kulę całkującą.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Sales T. R. M., Chakmakjian S. H.; Schertler D. J., Morris G. M.: LED illumination control and color mixing with Engineered Diffusers, Proc. SPIE 5530
2. Kim H. T., Kim S. T., Cho Y. J.: An Optical Mixer and RGB Control for Fine Images using Grey Scale Distribution, *International Journal of Optomechatronics*, Vol. 6, Iss. 3, 2012
3. Chang S. I., Yoon J. B., Kim H., Kim J. J., Lee B. K., Shin D. H.: Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system, *Opt. Lett.* 31, 3016-3018, 2006
4. Wang. Z., Radl B.: Engineered optical films with microstructures for solid state lighting applications; Proc. SPIE 9293
5. Sales T. R. M., Chakmakjian, S., Morris, G. M., Schertler, D. J.: Light Tamers, Engineered microlens arrays provide new control for display and lighting applications. *Photonics Spectra*. 2004, Vol. 38, 6.
6. Morris G. M., Sales, T. R. M., Chakmakjian, S., Schertler, D. J.: Engineered diffusers™ for display and illumination systems: Design, fabrication, and applications. *Photonics Spectra*. 2004, Vol. 38.
7. Żagan, W.: Oprawy oświetleniowe: kształtowanie rozsyłu strumienia świetlnego i rozkładu luminancji. Warszawa, OWPW, 2012.
8. Żagan, W.: Podstawy techniki świetlnej. Warszawa, OWPW, 2005.
9. How to use Engineered Diffusers™. [online] <http://www.rpcphotonics.com/how-to-use-engineered-diffusers/> [25/04/2017].
10. Fryc I.: Istotne parametry spektrometri wielokanałowego; *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4a; s. 230-231; 2012

GONIOPHOTOMETER FOR DETERMINATION OF LUMINOUS INTENSITY DISTRIBUTION CURVE OF RADIATION PASSED THROUGH DIFFUSING ELEMENTS LIKE ENGINEERED DIFFUSERS™

The light-scattering structures find a lot of applications, including luminaires. The large selection of light diffusers with very varied parameters and their wide applications lead to the need for a measuring system that allows them to be tested. The design and implementation of such a system has allowed to examine the shape of the luminous intensity curve depending on the wavelength of the illumination, as well as to know the effect of the diffuser on the spectral distribution. The chosen method was far-field goniophotometer with photometer, as a measuring instrument to record illuminance converted to luminous intensity. The collimated beam falls on the diffuser after passing through the focusing lens. The lens is responsible for reducing the size of the light spot. It is important to use a light source with a large luminous flux to record more accurately the changes in light distribution. Measurements can be conducted in the white and color light, for example through the use of interference filters. Measurements of spectral distribution are performed with a spectrometer set directly in the optical axis. In order to check the operation of designed system, Engineered Diffusers™ parameters were measured.

Keywords: light diffuser, luminous intensity distribution, distribution angle, photometry.