

Jerzy PIETRZYKOWSKI

GEOMETRIE POMIARU STOSOWANE W KOLORYMETRII I SPEKTROFOTOMETRII ODBITEGO PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO I ICH NOTACJE

STRESZCZENIE *Przedstawiono geometrie pomiaru stosowane w kolorymetrii i spektrofotometrii promieniowania odbitego oraz podano zasady notacji funkcjonalnej geometrii pomiaru ilustrując je odpowiednimi przykładami.*

Słowa kluczowe: *promieniowanie optyczne, odbicie promieniowania, wielkości fizyczne, geometria pomiaru, kolorymetria i spektrofotometria, notacja funkcjonalna*

1. WPROWADZENIE

Pomiary spektrofotometryczne i kolorymetryczne odbitego promieniowania optycznego oraz ich porównanie nasyca wiele trudności spowodowanych w dużej mierze różnorodnością warunków geometrycznych i wielością wielkości fizycznych stosowanych do opisu zjawiska odbicia. Odbicie promieniowania jest

mgr Jerzy PIETRZYKOWSKI
e-mail: j.pietrzykowski@neostrada.pl

Polski Komitet Oświateniowy

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 237, 2008

zjawiskiem fizycznym, przy którym strumień energetyczny promieniowania optycznego padający na powierzchnię lub ośrodek jest zawracany, bez zmiany częstotliwości jego składowych monochromatycznych. Część promieniowania padającego na ośrodek odbija się od powierzchni ośrodka (odbicie powierzchniowe), pozostała część może być rozproszona wstecznie wewnątrz ośrodka (odbicie objętościowe). Zależnie od rodzaju i właściwości powierzchni odbicie promieniowania może zachodzić w sposób kierunkowy, rozproszony lub mieszany (częściowo kierunkowy i częściowo rozproszony).

Przy odbiciu rozproszonym należy wyróżnić odbicie rozproszone izotropowo, przy którym rozkład przestrzenny promieniowania świetlnego odbitego jest taki, że luminancja energetyczna lub świetlna jest taka sama we wszystkich kierunkach w półkuli wewnątrz której promieniowanie jest odbijane.

Nie istnieją powierzchnie, ani idealnie odbijające w sposób kierunkowy (idealne zwierciadło płaskie), ani idealnie odbijające w sposób rozproszony (rozpraszacz doskonały). Pojęcie „rozpraszacz doskonały przy odbiciu” wprowadzono w 1969 r. do pomiarów promieniowania odbitego jako definicyjny wzorzec odniesienia. Zgodnie z międzynarodowym słownikiem techniki świetlnej [1] rozpraszacz doskonały przy odbiciu jest to idealny rozpraszacz równomierny (izotropowy) o współczynniku odbicia równym 1. Jako wzorzec definicyjny rozpraszacz nie może być realizowany bezpośrednio w postaci wzorca materialnego, a jedynie pośrednio przez stosowanie bezwzględnych metod pomiaru współczynnika odbicia.

2. WIELKOŚCI FIZYCZNE W POMIARACH PROMIENIOWANIA ODBITEGO

Do oceny ilościowej promieniowania odbitego stosuje się jedną z trzech następujących wielkości fizycznych:

- współczynnik odbicia ρ ,
- współczynnik odbicia względem rozpraszacza doskonałego R ,
- współczynnik luminancji (energetycznej lub świetlnej) β .

Współczynnik odbicia ρ (ang. *reflectance*) jest definiowany jako iloraz strumienia energetycznego lub świetlnego odbitego do strumienia energetycznego lub świetlnego padającego, a więc

$$\rho_e = \Phi_{er} / \Phi_{ei} \quad (1)$$

lub

$$\rho_v = \Phi_{vr} / \Phi_{vi} \quad (2)$$

gdzie:

- ρ_e – współczynnik odbicia (energetyczny),
- ρ_v – współczynnik odbicia (światlny),
- Φ_e – strumień energetyczny odbity, W,
- Φ_{ei} – strumień energetyczny padający, W,
- Φ_{vr} – strumień światlny odbity, lm,
- Φ_{vi} – strumień światlny padający, lm.

W przypadku, gdy strumienie energetyczne Φ_{er} i Φ_{ei} oraz strumienie światlne Φ_{vr} i Φ_{vi} są strumieniami monochromatycznymi, wzory (1) i (2) określają widmowy współczynnik odbicia $\rho(\lambda)$.

Z kolei współczynnik odbicia względem rozpraszacza doskonałego R (ang. *reflectance factor*) jest definiowany jako iloraz strumienia energetycznego lub światlnego odbitego od powierzchni próbki do strumienia energetycznego lub światlnego odbitego w tych samych kierunkach przez rozpraszacz doskonały, napromieniowany lub naświetlony w taki sam sposób, zatem

$$R_e = \Phi_{er} / \Phi_{er,id} \quad (3)$$

lub

$$R_v = \Phi_{vr} / \Phi_{vr,id} \quad (4)$$

gdzie:

- $\Phi_{er,id}$ – strumień energetyczny odbity od rozpraszacza doskonałego,
- $\Phi_{vr,id}$ – strumień światlny odbity od rozpraszacza doskonałego.

Podobnie jak to miało miejsce powyżej, w przypadku, gdy strumienie energetyczne lub światlne są strumieniami monochromatycznymi, wzory (3) i (4) określają widmowy współczynnik odbicia względem rozpraszacza doskonałego $R(\lambda)$.

Trzecią wielkością fizyczną stosowaną do opisu promieniowania odbitego jest współczynnik luminancji energetycznej β_e (ang. *radiance factor*) lub światlnej β_v (ang. *luminance factor*). Współczynnik luminancji energetycznej/światlnej definiuje się jako iloraz luminancji energetycznej/światlnej elementu powierzchni w danym kierunku do luminancji energetycznej/światlnej rozpraszacza doskonałego identycznie napromienianego/naświetlanego. Odpowiednie zależności mają postać

$$\beta_e = L_e/L_{e,id} \quad (5)$$

lub

$$\beta_v = L_v/L_{v,id} \quad (6)$$

gdzie:

- L_e – luminancja energetyczna elementu powierzchni,
- $L_{e,id}$ – luminancja energetyczna rozpraszacza doskonałego,
- L_v – luminancja świetlna elementu powierzchni,
- $L_{v,id}$ – luminancja świetlna rozpraszacza doskonałego.

Podobnie jak w poprzednich przypadkach, jeśli strumienie napromieniające są strumieniami monochromatycznymi, mamy do czynienia z widmowym współczynnikiem luminancji $\beta(\lambda)$.

Wartości współczynnika odbicia, współczynnika odbicia względem rozpraszacza doskonałego i współczynnika luminancji zależą oczywiście od warunków geometrycznych wiązki padającej na powierzchnię i wiązki obserwowanej odbitej. Warunki geometryczne opisujące te wiązki są często nazywane geometrią pomiaru, a do ich oznaczania stosowana jest specjalna notacja. Metody pomiaru i schematy urządzeń do pomiaru właściwości odbiciowych powierzchni przy rozmaitych geometriach pomiaru podano w publikacji CIE [2].

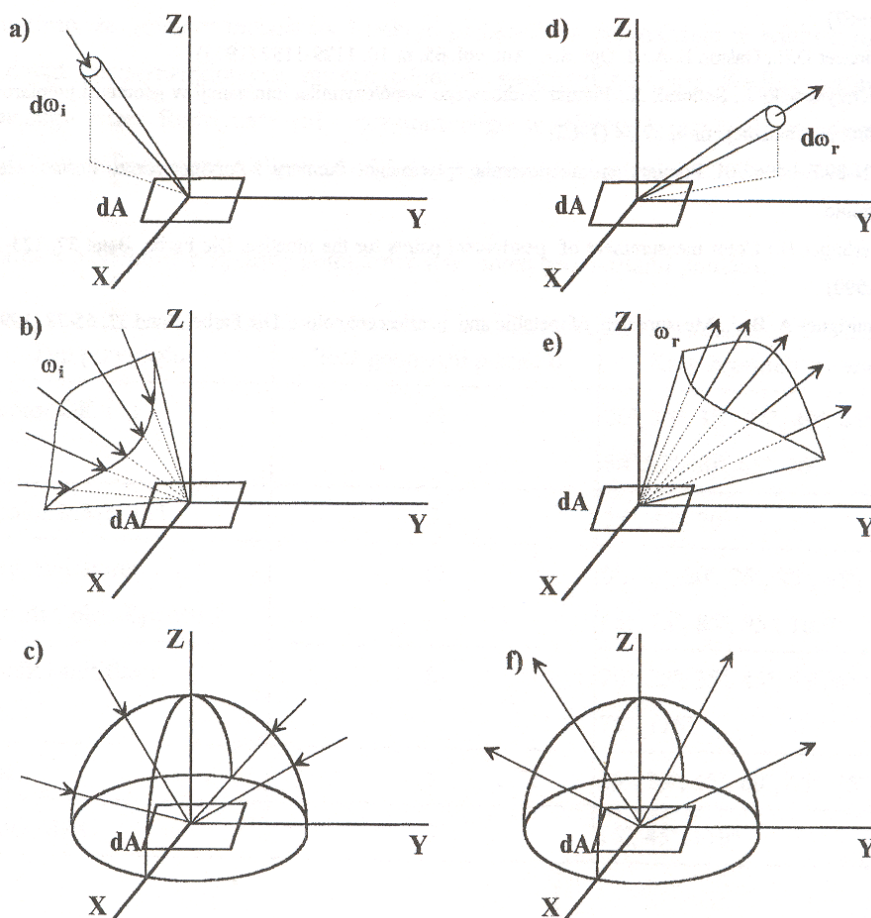
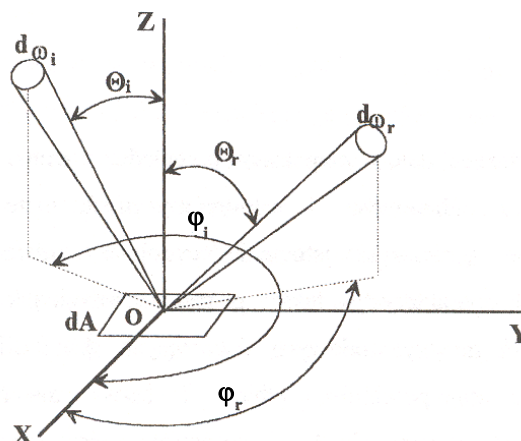
3. OPIS STOSOWANYCH WARUNKÓW GEOMETRYCZNYCH I ICH NOTACJA

Jeżeli przyjmie się założenie, że właściwości odbiciowe próbki są jednorodnie na całej powierzchni oraz że powierzchnia próbki jest napromieniana jednorodnie, to wartości geometryczne przy pomiarach promieniowania odbitego można opisać przy użyciu układu współrzędnych cylindrycznych pokazanego na rysunku 1 [3].

Próbka umieszczona jest w płaszczyźnie XY , a oś Z jest normalną do powierzchni próbki. Rozwartość padającej i odbitej wiązki promieniowania określona jest wartością kąta przestrzennego (bryłowego) ω . Termin „wiązka promieniowania” może oznaczać zarówno wiązkę rozchodzącą się w nieskończenie małym kącie bryłowym $d\omega$, jak i wiązkę zawartą w stożku określonym przez kąt bryłowy ω , a także, wiązkę zawartą w całej półkuli w przypadku, gdy $\omega = 2\pi$. Na rysunku 2 pokazano trzy podstawowe formy zarówno wiązki padającej, jak i wiązki mierzonej (obserwowanej). Tworząc ich kombinacje może-

my utworzyć dziewięć różnych geometrycznych warunków pomiarowych do pomiarów odbicia wyszczególnionych w tabeli 1.

Rys. 1. Układ współrzędnych do opisu warunków geometrycznych w pomiarach promieniowania optycznego odbitego



Rys. 2. Podstawowe formy wiązki padającej (a, b, c) i wiązki obserwowanej (d, e, f)

TABELA 1

Możliwe geometrie pomiaru i ich symbole dla współczynnika odbicia ρ i współczynnika odbicia względem rozpraszacza doskonałego R .

Geometria pomiaru	Oznaczenie	
	Współczynnik odbicia	Współczynnik odbicia względem rozpraszacza doskonałego
Kierunkowo-kierunkowa	$\rho(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r)$	$R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r)$
Kierunkowo-stożkowa	$\rho(\Theta_i, \varphi_i; \omega_r)$	$R(\Theta_i, \varphi_i; \omega_r)$
Kierunkowo-półsferyczna	$\rho(\Theta_i, \varphi_i; 2\pi)$	$R(\Theta_i, \varphi_i; 2\pi)$
Stożkowo-kierunkowa	$\rho(\omega_i; \Theta_r, \varphi_r)$	$R(\omega_i; \Theta_r, \varphi_r)$
Stożkowo-stożkowa	$\rho(\omega_i; \omega_r)$	$R(\omega_i; \omega_r)$
Stożkowo-półsferyczna	$\rho(\omega_i; 2\pi)$	$R(\omega_i; 2\pi)$
Półsferyczno-kierunkowa	$\rho(2\pi; \Theta_r, \varphi_r)$	$R(2\pi; \Theta_r, \varphi_r)$
Półsferyczno-stożkowa	$\rho(2\pi; \omega_r)$	$R(2\pi; \omega_r)$
Półsferyczno-półsferyczna	$\rho(2\pi; 2\pi)$	$R(2\pi; 2\pi)$

Z wielu możliwych rodzajów geometrii pomiaru Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa (CIE) zaleciła do stosowania cztery geometrie pomiaru: dwie kierunkowo-kierunkowe, jedną półsferyczno-kierunkową i jedną kierunkowo-półsferyczną, uzupełniane jeszcze w razie potrzeby o jedną półsferyczno-półsferyczną. Przyjęta przez CIE notacja geometrii pomiaru jest wyjątkowo prosta i zawiera wartości kąta padania i kąta obserwacji przedzielone ukośnikiem lub symbol 'd' przy napromienianiu półsferycznym lub pomiarze przy użyciu kuli całkującej oraz przedzielone ukośnikiem kąt padania lub kąt obserwacji.

Szczegółowe warunki oświetlenia i obserwacji przy pomiarach odbicia zawiera norma PN-89/E-04042/01 [4] i Publikacja CIE nr 15 [5]. W tabeli 2 przedstawiono w sposób uproszczony zapis różnych geometrii pomiaru z odniesieniami do geometrii realizowanych w praktyce. Indeksy zastosowane przy symbolach wielkości oznaczają:

- d napromienianie półsferyczne,
- c napromienianie stożkowe,
- g napromienianie kierunkowe.

TABELA 2
Geometrie pomiarów odbicia

Geometria pomiaru	Charakterystyka	Symbol	Praktyczna realizacja
półsferyczna-półsferyczna	współczynnik odbicia	ρ_d	d/d
półsferyczna-stożkowa	współczynnik odbicia względem rozpraszacza doskonałego	R_d	–
półsferyczna-kierunkowa	współczynnik luminancji	β_d	d/0; d/8
stożkowa-półsferyczna	współczynnik odbicia	ρ_c	–
stożkowa-stożkowa	współczynnik odbicia względem rozpraszacza doskonałego	R_c	–
stożkowa-kierunkowa	współczynnik luminancji	β_c	–
kierunkowa-półsferyczna	współczynnik odbicia	ρ_g	0/d; 8/d
kierunkowa-stożkowa	współczynnik odbicia względem rozpraszacza doskonałego	R_g	–
kierunkowa-kierunkowa	współczynnik luminancji	β_g	45/0; 0/45

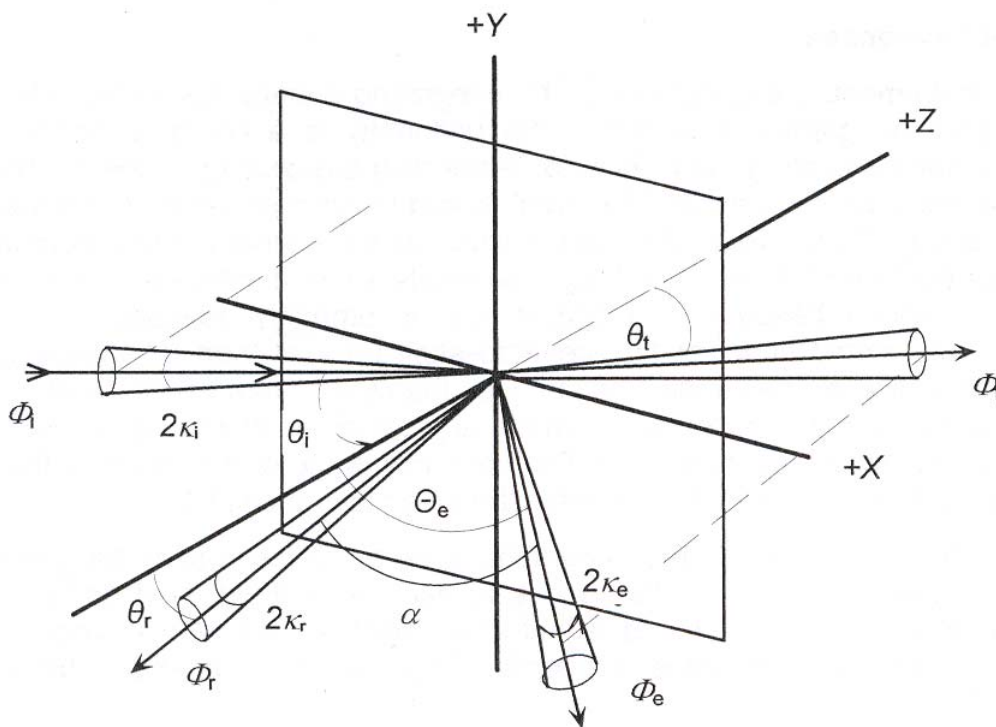
4. NOWA NOTACJA GEOMETRII POMIARU OPISANA W PUBLIKACJI CIE 176

Przedstawiona powyżej notacja geometrii pomiaru jest niesłychanie prosta, jednakże nie podaje ani tolerancji kąta padania i kąta obserwacji, ani rozbieżności promieni w wiązce oświetlającej. Nie można jej także użyć do sprecyzowania geometrii pomiaru 45/0 przy oświetleniu pierścieniowym. Dla przykładu przypomnijmy informację o geometrii pomiaru 0/45 zamieszczoną w normie [4] "8.2.4 Geometria pomiaru 0/45. Próbka jest oświetlona wiązką, której oś jest pod kątem nieprzekraczającym 10° do normalnej do próbki. Próbka jest obserwowana pod kątem $45^\circ \pm 2^\circ$ do normalnej. Kąt między osią wiązki oświetlającej i którymkolwiek z jej promieni nie powinien przekraczać 8° . To samo ograniczenie obowiązuje dla wiązki obserwowanej".

Z powyższego widać, że stosowana notacja geometrii pomiaru 0/45 wymaga jeszcze dodatkowych informacji. Zachodziła zatem potrzeba opracowania zasad nowej notacji geometrii pomiaru, zawierającej zapis odpowiednich tolerancji odnośnie wiązki promieniowania. Taka notacja została po raz pierwszy podana w normie amerykańskiej ASTM E 1767-95 [6]. W CIE został powołany Komitet Techniczny 2-39 do opracowania odpowiednich zaleceń i po kilku latach Komitet przedstawił projekt publikacji, która po głosowaniu została

opublikowana jako publikacja CIE 176:2006 „Tolerancje geometryczne przy pomiarach barwy” [7]. Publikacja CIE bardzo dużo ustaleń przejęła z normy amerykańskiej.

Rozważane w nowej notacji wiązki promieniowania przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wiązki promieniowania w pomiarach promieniowania odbitego

Zasady nowego opisu i nowej notacji geometrii pomiaru w pomiarach kolorymetrycznych i spektrofotometrycznych promieniowania odbitego są następujące:

- Strumienie energetyczne lub świetlne: padający, odbity mierzony (obserwowany) i odbity kierunkowo, są przedstawiane w postaci stożków kołowych o wierzchołkach umieszczonych w początku układu współrzędnych.
- Położenie każdego stożka względem płaszczyzny odniesienia (powierzchnia próbki mierzonej) określa kąt θ między osią stożka a normalną do powierzchni próbki oraz kąt azymutalny φ mierzony w płaszczyźnie odniesienia, poczynając od dodatniej półosi X w kierunku dodatniej półosi Y (np. kąty φ_i , φ_r na rysunku 1).
- Rozmiar stożka określa wierzchołkowy kąt połówkowy κ .
- W celu rozróżnienia strumieni energetycznych i świetlnych oraz odpowiadających im kątów stosuje się następujące indeksy: i – dotyczący strumienia

- padającego; r – dotyczący strumienia odbitego mierzonego; e – dotyczący strumienia odbitego kierunkowo.
- e) Nowa notacja geometrii pomiarów odbicia ma postać ogólną $F(G : g)$, gdzie: F – mierzona wielkość fizyczna z dziedziny promieniowania odbitego, np. ρ , R , $R(\lambda)$; G – parametry charakteryzujące geometrię strumienia padającego; g – parametry charakteryzujące geometrię strumienia odbitego mierzonego.
 - f) Pełna notacja geometrii pomiaru współczynnika odbicia względem rozpraszacza doskonałego ma postać następującą: $R(\varphi_i, \kappa_i, \Theta_i : \Theta_r, \kappa_r, \varphi_r)$.
 - g) W przypadku wyłączenia strumienia odbitego kierunkowo notacja ulega rozszerzeniu do następującej postaci: $R(-\varphi_e, -\kappa_e, -\Theta_e, \varphi_i, \kappa_i, \Theta_i : \Theta_r, \kappa_r, \varphi_r)$.
 - h) Każdy parametr, który jest niezdefiniowany lub nieokreślony, może mieć przypisaną wartość 0 lub może być usunięty z notacji.
 - i) Jeżeli próbka jest oświetlona przy użyciu kuli całkującej, to ponieważ kula ma symetrię azymutalną, kąt φ_i przyjmie wartość 0° oraz ponieważ strumień padający nie ma żadnego wyróżnionego kierunku, to dla kąta Θ_i można również przypisać wartość 0° .

5. PRZYKŁADY NOTACJI FUNKCJONALNEJ

W celu zilustrowania zasad funkcjonalnej notacji geometrii pomiaru poniżej podano notacje geometrii pomiaru zalecanych do stosowania przez CIE i często stosowanych w rozwiązaniach konstrukcyjnych kolorymetrów i spektrofotometrów. W poniższych przykładach zastosowano zapis pełny nie opuszczając parametrów niezdefiniowanych i nieokreślonych. Pełny i prawidłowy zapis geometrii pomiaru przy użyciu notacji funkcjonalnej wymaga ścisłego opisu tej geometrii, co nie zawsze jest spełnione nawet w normach.

- a) Geometria pomiaru $d/0$

Próbka jest oświetlona światłem rozproszonym przy użyciu kuli całkującej, zatem kąt wierzchołkowy stożka strumienia padającego wynosi 180° . „Wiązka padająca” ma symetrię azymutalną i brak w niej jakiegokolwiek wyróżnionego kierunku. Kąt między osią i którymkolwiek z promieni wiązki obserwowanej nie powinien przekraczać 5° .

Notacja funkcjonalna: $R(\lambda) (0^\circ, 90^\circ, 0^\circ : 0^\circ, 5^\circ, \varphi_r)$.

- b) Geometria pomiaru $d/8$

Próbka oświetlona jak poprzednio. Wiązka obserwowana jest pod kątem 8° . Ponieważ kula ma symetrię azymutalną, zatem φ_i jest równe zero jak w poprzednim przykładzie. Parametr φ_r nie jest określony w zaleceniach CIE.

Notacja funkcjonalna: $R(\lambda) (0^\circ, 90^\circ, 0^\circ : 8^\circ, 5^\circ, \varphi_r)$.

- c) Geometria pomiaru $0/d$
 Próbką jest oświetlona wiązka skierowaną w kierunku normalnej. Strumień odbity jest zbierany w kuli całkującej. Kąt między osią wiązki oświetlającej i którymkolwiek z jej promieni nie powinien przekraczać 5° .
 Notacja funkcjonalna: $R(\lambda) (\varphi_i, 5^\circ, 0^\circ : 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$.
- d) Geometria pomiaru $8/d$
 Próbką oświetlona wiązka, której oś tworzy z normalną kąt 8° . Strumień odbity obserwowany jest zbierany w kuli całkującej.
 Notacja funkcjonalna: $R(\lambda) (\varphi_i, 5^\circ, 8^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$.
- e) Geometria pomiaru $8/d$ z wyłączeniem składowej kierunkowej
 Oś wiązki oświetlającej tworzy z normalną do powierzchni kąt 8° . Kąt połówkowy wiązki oświetleniowej winien wynosić 2° , a nominalny kąt połówkowy usuwanej wiązki odbitej kierunkowo winien być równy 4° . Strumień odbity obserwowany jest zbierany w kuli całkującej.
 Notacja funkcjonalna: $R(\lambda) (-\varphi_e, -4^\circ, -8^\circ, \varphi_i, 2^\circ, 8^\circ : 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$.
- f) Geometria pomiaru $d/8$ z wyłączeniem składowej kierunkowej
 Próbką jest oświetlona światłem rozproszonym przy użyciu kuli całkującej. Kąt połówkowy wiązki obserwowanej winien wynosić 2° , a nominalny kąt połówkowy usuwanej wiązki odbitej kierunkowo winien być równy 4° .
 Notacja funkcjonalna: $R(\lambda) (-\varphi_e, -4^\circ, -8^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ : 8^\circ, 2^\circ, \varphi_r)$.
- g) Geometria pomiaru $45/0$
 Próbką jest oświetlona wiązka, której oś tworzy kąt $45^\circ \pm 2^\circ$ z normalną do powierzchni próbki. Kąt między kierunkiem obserwacji a normalną do próbki wynosi 0° . Kąt połówkowy wiązki padającej i obserwowanej nie powinien przekraczać 2° .
 Notacja funkcjonalna: $R(\lambda) (\varphi_i, 2^\circ, 45^\circ : 0^\circ, 2^\circ, \varphi_r)$.
- h) Geometria pomiaru $0/45$
 Próbką jest oświetlona wiązka, której oś jest skierowana wzdłuż normalnej do powierzchni próbki. Kąt połówkowy wiązki padającej i obserwowanej nie powinien przekraczać 2° . Próbką jest obserwowana pod kątem $45^\circ \pm 2^\circ$ do normalnej.
 Notacja funkcjonalna: $R(\lambda) (\varphi_i, 2^\circ, 0^\circ : 45^\circ, 2^\circ, \varphi_r)$.
- i) Geometria pomiaru $45/0$ z użyciem oświetlenia pierścieniowego
 Do oświetlenia próbki użyto źródła o kształcie pierścienia.
 Notacja funkcjonalna: $R(\lambda) (360^\circ, 2^\circ, 45^\circ : 0^\circ, 2^\circ, \varphi_r)$.

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy funkcjonalna notacja geometrii pomiaru daje znacznie więcej informacji o parametrach wiązek występujących w pomiarach promieniowania odbitego i stwarza możliwości uwzględnienia w notacji nietypowych rozwiązań dotyczących oświetlenia próbki i odbioru promieniowania odbitego. Pewną wadą notacji jest możliwość opuszczania w zapisie parametrów niezdefiniowanych lub przyjmujących wartości zerowe, bowiem taki uproszczony zapis może doprowadzić do niejasności lub niezrozumienia. Nowa notacja może być również używana do opisu geometrii pomiaru promieniowania przepuszczonego przez próbkę.

LITERATURA

1. Publ. CIE 17.4:1987 International Lighting Vocabulary . Wyd. polskie: PN-90/E-01005 Technika świetlna. Terminologia.
2. Publ. CIE 130:1998 Practical methods for the measurement of reflectance and transmittance.
3. Pietrzykowski J.: Warunki geometryczne w spektrofotometrii i kolorymetrii materiałów odbijających. II Krajowe Sympozjum Kolorymetryczne KSK 97, str. 61-70, 1997.
4. PN-89/E-04042/01 Pomiar promieniowania optycznego. Pomiar kolorymetryczny. Postanowienia ogólne.
5. Publ. CIE 15:2004 Colorimetry.
6. ASTM E 1767-95 Specifying the geometry of observations and measurements to characterize the appearance of materials.
7. Publ. CIE 176:2006 Geometric tolerances for colour measurements.

Rękopis dostarczono dnia 10.04.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Władysław Dybczyński

MEASURING GEOMETRIES USED IN COLORIMETRY
AND SPECTROPHOTOMETRY OF REFLECTED OPTICAL
RADIATION AND THEIR NOTATIONS

Jerzy PIETRZYKOWSKI

ABSTRACT *Measuring geometries used in colorimetry and spectrophotometry of reflected optical radiation are presented and principles of functional notation of measuring geometry with the examples are given.*



Mgr Jerzy Pietrzykowski absolwent Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Łódzkiego, specjalność fizyka teoretyczna. Wieloletni pracownik naukowy Zakładu Promieniowania Optycznego Głównego Urzędu Miar. Główne zainteresowania zawodowe: pomiary barwy materiałów i ocena różnicy barw, spektrometria promieniowania optycznego, samokalibracja fotodiod półprzewodnikowych i odbiorniki pułapkowe. Autor i współautor ponad 80 artykułów i referatów prezentowanych w czasopismach i na konferencjach naukowych.