

Przegląd metodologii związanej z wielokątowym charakteryzowaniem wzorców widmowego współczynnika odbicia

Streszczenie. Artykuł opisuje ogólne metody wzorcowania spektrofotometrów odbiciowych i kolorymetrów tróchromatycznych wzorcowanych w Głównym Urzędzie Miar w Zakładzie Elektryczności i Promieniowania. Zaprezentowano podstawowe wzory obliczeniowe mające zastosowanie w kolorymetrii odbiciowej. Przedstawiono stanowiska pomiarowe umożliwiające wyznaczenie dwukierunkowej funkcji rozkładu odbicia (BRDF) oraz stanowisko pomiarowe związane z wielokątowym charakteryzowaniem wzorców widmowego współczynnika odbicia.

Abstract. This paper describes the general rules of calibration procedure for reflectance spectrophotometers and trichromatic colorimeters used at the Central Office of Measures in the Electricity and Radiation Department. Basic calculation formulas applicable in reflectance colorimetry are presented. The paper presents a measuring stands which has been used to determine BRDF and the measurement stand related to multi-angled characterization of the spectral reflectance standards. (Overview of methodology related to multi-angled characterization of the spectral reflectance standards)

Słowa kluczowe: światło odbite, wzorce widmowego współczynnika odbicia, spektrofotometr z przystawką wielokątową.

Keywords: reflected light, spectral reflectance standards, spectrophotometer with multi-angle adapter, reflectance colorimetry

Wstęp

W Głównym Urzędzie Miar (GUM) w Zakładzie Elektryczności i Promieniowania na stanowisku do pomiaru barwy wykonywane są badania związane m.in. z problematyką kolorymetrii odbiciowej. Charakterystyka światła odbitego jest zróżnicowana ze względu na parametry kształtujące wiązkę tego światła takie jak: rodzaj światła padającego na materiał, kąty padania i odbicia, powierzchnia samego materiału (jego gęstość, chropowatość, temperatura). Odbicie światła może być zwierciadlane lub rozproszone dyfuzyjnie (równomierne we wszystkich kierunkach, niezależnie od kąta padania). W rzeczywistości najczęściej występuje odbicie kierunkowe (ze składową lustrzaną) lub kierunkowo-rozproszone [1]. Jednym z czynników określających sposób pomiaru światła odbitego jest geometria pomiarowa, zawierająca zarówno kąty padania światła jak i kąty jego odbicia. Określona geometria nie daje jednak pełnej informacji o dokładnym zakresie kątowym światła odbitego. Taka uzupełniona charakterystyka wzorców współczynnika odbicia może wpłynąć na poszerzenie wiedzy na temat specyficznych zachowań różnego rodzaju wzorców odbiciowych stosowanych m. in. do kontroli spektrofotometrów i kolorymetrów odbiciowych w świetle odbitym.

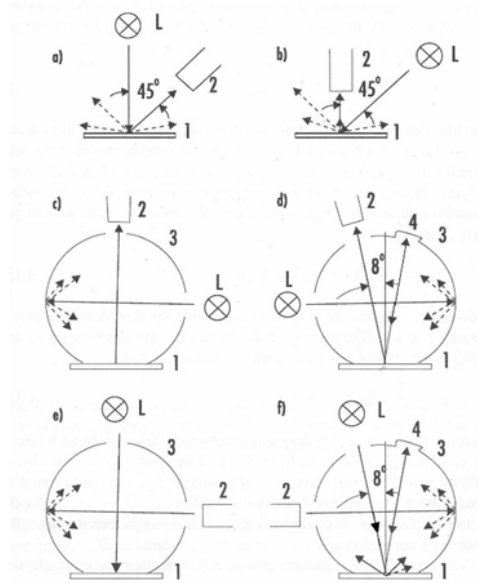
W niniejszym artykule opisano podstawową terminologię związaną z kolorymetrią odbiciową, przedstawiono zależności matematyczne z tym związane, oraz stanowiska pomiarowe mogące mieć wpływ na stworzenie dedykowanej metody pomiarowej mającej zastosowanie na autorskim stanowisku pomiarowym do wielokątowego charakteryzowania wzorców współczynnika odbicia w laboratorium do pomiaru barwy Głównego Urzędu Miar.

Terminologia stosowana podczas pomiarów kolorymetrycznych

W Głównym Urzędzie Miar, w laboratorium do pomiaru barwy, wykonywane są wzorcowania spektrofotometrów odbiciowych i kolorymetrów tróchromatycznych jak i wzorców widmowego współczynnika odbicia i luminancji. Przyrządy te oraz wzorce stosowane są w placówkach naukowych związanych z przemysłem barwników, samochodowym, włókienniczym, elektrotechnicznym, ceramicznym, jak również w laboratoriach wielu gałęzi przemysłu, między innymi w przemyśle farmaceutycznym,

kosmetycznym, woskowym, spożywczym, farbiarskim, lakierniczym, drukarskim, materiałów budowlanych [2].

Laboratorium związane z pomiarami barwy dysponuje stanowiskami pomiarowymi do przekazywania jednostki miary widmowego współczynnika odbicia i widmowego współczynnika luminancji. Służą temu spektrofotometry pracujące na ogół w zakresie widzialnym promieniowania optycznego, a ich geometrie pomiarowe odpowiadają konfiguracjom zalecanym przez CIE [3].



Rys.1. Schematy geometrii kierunkowych: a) geometria 0°:45°, b) geometria 45°:0°, c) geometria d:0°, d) geometria d:8°, e) geometria 0°:d, f) geometria 8°:d, 1 – badana próbka, 2 – detektor, 3 – kula całkująca, 4 – pułapka odbicia lustrzanego, L – lampa [4]

Geometrie kierunkowe, które są stosowane w laboratorium [3]:

- 0°:45° (rys. 1 a) - próbka oświetlana jest pod kątem 0° do normalnej, obserwowana pod kątem 45°;
- 45°:0° (rys. 1 b) - próbka oświetlana jest pod kątem 45° do normalnej, obserwowana pod kątem 0°;

Geometrie sferyczne [3]:

- d:0° (rys. 1 c) - próbka oświetlana jest światłem rozproszonym w kuli całkującej i obserwowana pod kątem 0° do normalnej;
- 0°:d (rys. 1 e) - próbka oświetlana jest pod kątem 0°, mierzone jest światło rozproszone w kuli całkującej;
- d: 8° (rys. 1 d) - próbka oświetlana jest światłem rozproszonym w kuli całkującej i obserwowana pod kątem 8° do normalnej;
- 8°:d (rys. 1 f) - próbka oświetlana jest pod kątem 8°, mierzone jest światło rozproszone w kuli całkującej [3][4].

Innym ważnym aspektem jest określenie obserwatora kolorymetrycznego (CIE 2° i 10°) oraz źródła oświetlenia. W naszym laboratorium najczęściej stosowanymi są podstawowe źródła tzw. iluminanty normalne CIE: iluminant A, D65 i C [5].

W trakcie wzorcowań spektrofotometrów i kolorymetrów w świetle odbitym dokonuje się porównania wskazań wzorcowanych przyrządów z wartościami parametrów kolorymetrycznych L^* , a^* , b^* (dla określonego iluminantu i obserwatora kolorymetrycznego) zestawu ceramicznych wzorców odniesienia „Glossy Ceramic Colour Standards” DM05. Taki zestaw składa się z ceramicznych, barwnych dziesięciu płytek, dobranych pod kątem odpowiedniej płaskości i wysokiej jednorodności wybarwienia. Wzorce te są systematycznie wzorcowane przez brytyjski narodowy instytut metrologiczny NPL, posiadają odpowiednie świadectwo wzorcowania NPL a wartości zawarte w tym świadectwie służą jako wartości odniesienia w laboratorium do pomiaru barwy Głównego Urzędu Miar. Tego typu wzorce są powszechnie stosowane na całym świecie i są uznawane jako podstawowe odniesienia barwy przez światowej klasy instytuty metrologiczne.

Podstawowe zależności obliczeniowe mające zastosowanie w kolorymetrii odbiciowej

Niepoprawność wskazań urządzenia może być przedstawiona poprzez wartość wyrażającą odległość ΔE między punktami w równomiernej przestrzeni barw, gdzie pierwszy punkt odpowiada barwie rzeczywistej reprezentowanej przez wzorec (wartości ze świadectwa) a drugi wyznaczony jest dla tego wzorca przez badane urządzenie pomiarowe [2].

Odległość tę wyrażamy za pomocą równania:

$$1) \quad \Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

$$2) \quad \Delta E = \sqrt{(L_{x,r}^* - L_{w}^*)^2 + (a_{x,r}^* - a_{w}^*)^2 + -(b_{x,r}^* - b_{w}^*)^2}$$

gdzie: L_w^* , a_w^* , b_w^* – wartości odniesieniowe parametrów L^* , a^* , b^* , charakteryzujących barwę wzorca, według świadectwa wzorcowania,
 $L_{x,sr}^*$, $a_{x,sr}^*$, $b_{x,sr}^*$ – średnie wartości charakteryzujące barwę wzorca, zmierzone w trakcie wzorcowania przyrządu [4].

Koordinaty przestrzeni barw L^* , a^* , b^* (określana także jako CIELAB), zdefiniowane przez CIE w 1976 r., obliczane są według poniższych równań:

$$3) \quad L^* = 116 / (Y / Y_n)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 \left[(X / X_n)^{1/3} - (Y / Y_n)^{1/3} \right]$$

$$b^* = 200 \left[(Y / Y_n)^{1/3} - (Z / Z_n)^{1/3} \right]$$

dla $Y/Y_n, X/X_n, Z/Z_n > 0,008856$

gdzie: X, Y, Z - opisują rozważany bodziec barwowy,
 X_n, Y_n, Z_n - opisują określony biały bodziec achromatyczny.

Tróchromatyczne wartości X, Y, Z określone są przez CIE wzorami:

$$4) \quad X = k \sum_{\lambda} R(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta(\lambda)$$

$$Y = k \sum_{\lambda} R(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta(\lambda)$$

$$Z = k \sum_{\lambda} R(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta(\lambda)$$

dla $k = 100 / \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta(\lambda)$

gdzie: $R(\lambda)$ – całkowity współczynnik odbicia, $S(\lambda)$ – rozkład widmowy mocy promieniowania wybranego iluminantu (źródła oświetlenia), $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ – funkcje kolorymetryczne układu XYZ [4].

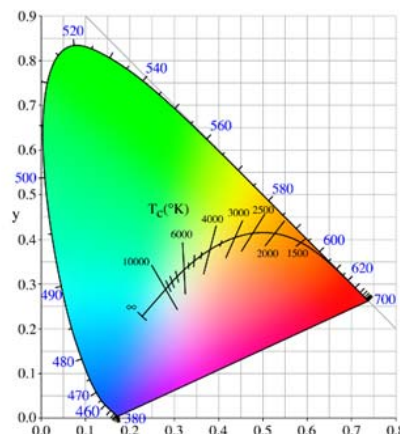
Dodatkowo do oceny barwy wprowadzono współrzędne chromatyczności x i y oraz wartość jasności Y .

Dla barwy o tej samej jasności Y pozostałe dwa parametry x i y oblicza się według równań [4]:

$$5) \quad x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$6) \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Taki przekrój przestrzeni barw nazywa się trójkątem barw lub wykresem chromatyczności [6].



Rys.2. Trójkąt barw - wykres chromatyczności [6]

W zależności od kąta padania światła na próbkę i kąta odbicia tego światła, uzyskiwane są różne wartości widmowego współczynnika odbicia. Nieznajomość pełniejszej charakterystyki katowej badanej próbki w świetle odbitym wpływa na mniejszą dokładność, a co za tym idzie większą niepewność przekazywania jednostek miar podczas wzorcowań wzorców.

Próbę pozyskania pełniejszej charakterystyki odbiciowej wzorców można przeprowadzić za pomocą spektrofotometru z przystawką wielokątową będącą na wyposażeniu laboratorium Głównego Urzędu Miar.

Dwukierunkowa funkcja rozkładu odbicia (BRDF) i stanowiska pomiarowe umożliwiające wyznaczenie tej funkcji.

Konieczność opracowania nowej metody wielokątowego charakteryzowania wzorców współczynnika odbicia pozwalającej przeprowadzić tego typu pomiary skłania do poszukiwań podobnych rozwiązań mających już zastosowanie w praktyce.

Opis energetycznych zależności za pomocą współczynnika odbicia, czyli stosunku strumienia odbitego Φ_s do strumienia światła padającego Φ_i , jest przydatny, jeśli

odbicie można uważać za czysto zwierciadlane lub rozproszenie jest czysto dyfuzyjne. W takim przypadku współczynnik odbicia wyraża się wzorem:

$$7) \quad \rho = \frac{\Phi_S}{\Phi_i}$$

Jednak w innych przypadkach, gdy istnieje potrzeba określenia dokładnej informacji o kierunku światła odbitego, opis ten może być niewystarczający. Według Nikodemusa [7] tą dodatkową zależność można wyrazić za pomocą dwukierunkowej funkcji rozkładu odbicia BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function). Funkcja ta określa dwukierunkową zdolność odbijania światła przez powierzchnię i definiuje relację pomiędzy światłem padającym na powierzchnię, a światłem od niej odbitym [7].

Funkcję BRDF definiuje się dla określonej długości fali jako stosunek luminancji energetycznej (radiacji) światła odbitego dL punkcie x z kierunku Θ_s do natężenia napromieniowania (irradiacji) światła padającego dE na ten punkt z kierunku Θ_i [8]:

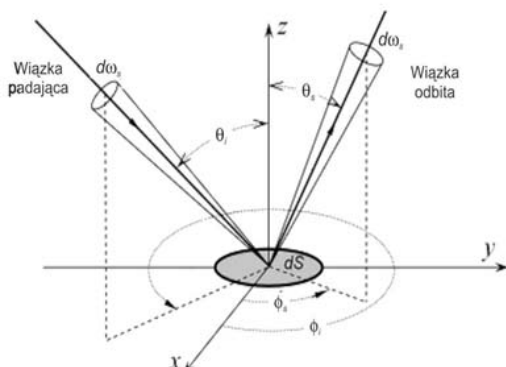
$$8) \quad f_{BRDF}(x, \Theta_i \rightarrow \Theta_s) = \frac{dL(x \rightarrow \Theta_s)}{dE(x \leftarrow \Theta_i)}$$

Opierając się na praktyce doświadczalnej wyznacza się natężenie promieniowania rozproszonego P_s pochodzącego od skończonego, niedużego elementu powierzchni S , w kierunku Θ_s detektora, zbierającego promieniowanie z kąta bryłowego Ω . Przy tych założeniach, funkcję BRDF można wyrazić za pomocą wzoru [1]:

$$9) \quad BRDF(\Theta_i, \Phi_i, \Theta_s, \Phi_s) = \frac{P_s(\Theta_i, \Phi_i, \Theta_s, \Phi_s)}{dE_i} = \frac{\frac{P_i(\Theta_i, \Phi_i, \Theta_s, \Phi_s)}{\Omega S \cos \Theta_s}}{\left(\frac{P_i}{S}\right)}$$

$$10) \quad BRDF(\Theta_i, \Phi_i, \Theta_s, \Phi_s) = \frac{P_s(\Theta_i, \Phi_i, \Theta_s, \Phi_s)}{P_i \Omega \cos \Theta_s} [sr^{-1}]$$

gdzie: P_i - jest mocą promieniowania padającego na badany obszar powierzchni S .

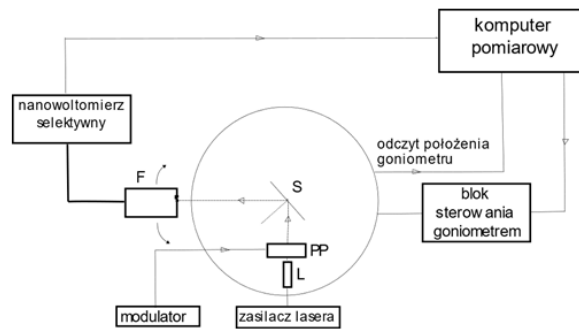


Rys.3. Geometryczny układ promieni świetlnych w definicji BRDF [1]

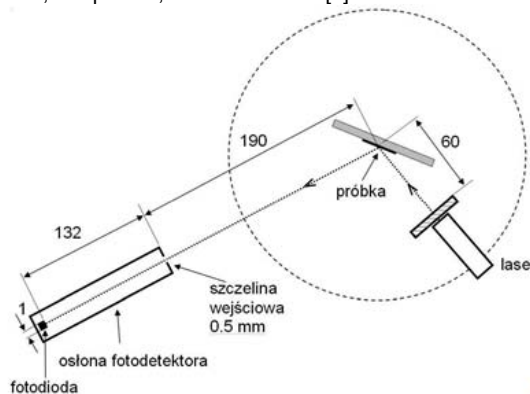
W Instytucie Fizyki Politechniki Krakowskiej zbudowane zostało stanowisko pomiarowe, służące do automatycznego wyznaczania BRDF metodą goniometryczną. Schemat takiej aparatury przedstawia rysunek [1]:

Źródłem światła są tu moduły laserowe o różnych długościach fali w zakresie od 408 nm do 680 nm. Światło spolaryzowane przechodzi przez płytkę półfalową, która ustawia polaryzację wiązki w wariacie S lub P. Fotodioda F spełnia funkcję detektora mocy promieniowania rozproszonego i zlokalizowana jest za szczeliną wyjściową o regulowanej szerokości. Modulator odpowiada za intensywność wiązki laserowej z częstotliwością ok. 2,9 kHz, do której dostrojony jest nanowoltomierz selektywny,

odbierający sygnał z fotodetektora. Pomiaru odbywają się przy świetle dziennym, dla pomiarów o większej czułości stosowane jest zaciemnienie. Dane pomiarowe transferowane są z nanowoltomierza selektywnego do komputera. Za precyzyjne ustawienie kątów z rozdzielczością do 0,01° odpowiada goniometr (zbudowany na bazie dyfraktometru rentgenowskiego DRON-3). Najczęściej pomiary wykonywane są wtedy, gdy pionowa oś obrotu goniometru zawarta jest w płaszczyźnie próbki. W takim przypadku wyznaczyć można współczynnik odbicia badanej powierzchni, w przedziale kątów padania od ok. 10° do 90°. Zmiana kąta nachylenia płaszczyzny próbki względem płaszczyzny poziomej może dokonywać się w zakresie od 0° do 60° z dokładnością co 1° [1].



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania BRDF metodą goniometryczną. Oznaczenia: L – laser, PP – płytkę półfalowa, S – próbka, F – fotodetektor [1]

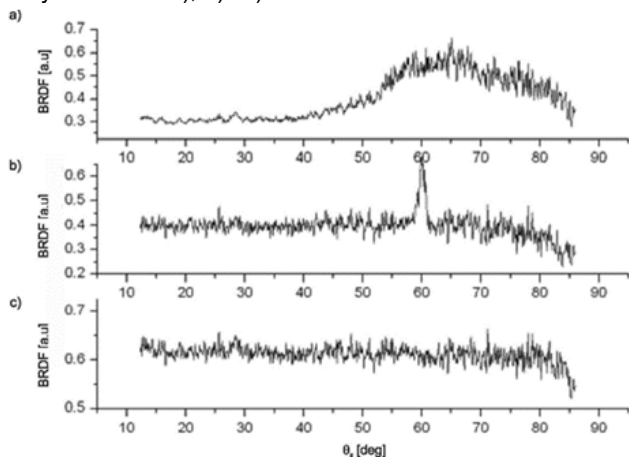


Rys. 5. Rozmieszczenie elementów układu pomiarowego na stole goniometru (wymiary w mm) [1]

Goniometr sterowany jest za pomocą komputera poprzez autonomiczny układ z mikrokontrolerem. Komputer uzyskuje informację o położeniu kątowym fotodetektora. W każdym pomiarze BRDF ustalany jest kąt padania światła (wiązki laserowej) na próbkę. Odczyty detektora dokonują się w czasie 1-2 sekund z kilkunastu pomiarów dla jednego położenia próbki, po czym podawana jest wartość średnia z tych odczytów. Nad całością pomiarów czuwa oprogramowanie napisane w środowisku LabView. Najczęstsze pomiary przeprowadzane są dla kąta padania w przedziale od 45° do 60° i kąta odbicia rozproszonego w przedziale kilkunastu stopni wokół kąta odbicia zwierciadlanego [1].

Opisane stanowisko umożliwiło ocenę i porównanie stanu powierzchni materiałów poddanych obróbce mechanicznej np.: frezowaniu, polerowaniu maszynowemu, polerowaniu przy użyciu proszków mielących, polerowaniu ręcznemu za pomocą past szlifierskich itp. Metoda ta okazała się odpowiednia dla powierzchni inżynierskich o chropowatościach w przedziale od kilku nanometrów do kilkudziesięciu mikrometrów [1].

Pomiary BRDF posłużyły tu także do oceny procesu renowacji wzorców bieli „spectralon”, używanych podczas kalibracji spektrofotometrów (m.in. w Głównym Urzędzie Miar). Dokonano pomiarów tego typu wzorca, poddanego długotrwałej eksploatacji oraz po procesie jego oczyszczania w komorze ultradźwiękowej przy użyciu wody dejonizowanej. Finalnie przeprowadzono także proces piaskowania wzorca [1]. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 6 a), b) i c):

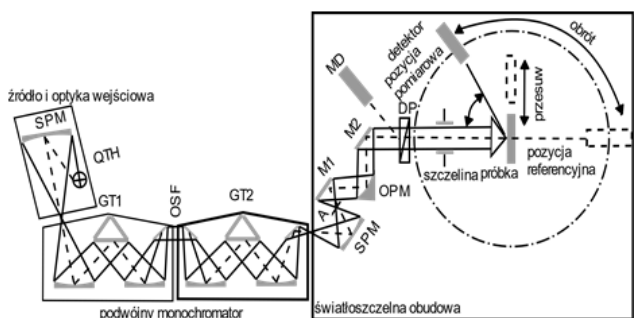


Rys. 6. Kontrola procesu renowacji wzorca bieli (spectralon): a) zabrudzony wzorec, b) wzorec po kąpeli w dejonizowanej wodzie w komorze ultradźwiękowej, c) wzorec po piaskowaniu [1]

Na rys. 6a zależność *BRDF* nie jest stała, co jest wymogiem wzorców bieli. Taką stałą zależność można zauważyć po procesie oczyszczenia przy użyciu wody zdejonizowanej (rys. 6 b), zwraca tu jednak uwagę pik pochodzący od składowej zwierciadlanej, co może być spowodowane niepożądanym wygładzeniem wzorca. Po procesie piaskowania nie stwierdzono już występowania dużych maksimów sygnału na detektorze, co świadczy o uzyskaniu pożądanej charakterystyki dla wzorca bieli (rys. 6 c). Procesy czyszczenia wzorców okazały się skuteczne, co wykazała analiza metodą *BRDF* [1].

Innym przykładem funkcjonującego stanowiska do pomiarów *BRDF* jest stanowisko gonioreflektometryczne zbudowane w Helsinkach na University of Technology [9]. Gonioreflektometr służy do ustalenia bezwzględnej skali całkowitych rozproszonych współczynników odbicia w całym zakresie spektralnym 360-830 nm.

Schemat takiego stanowiska zawarty jest poniżej:



Rys. 7. Schemat budowy gonioreflektometru: QTH - (lampa kwarcowo-wolframowa), SPMs - lustra sferyczne, GT1, GT2 - siatka dyfrakcyjna, OSF – filtr, M1, M2 - lusterka płaskie, A – otwór, OPM - pozaosiowe zwierciadło paraboliczne, DP - polaryzator dichroiczny, MD - detektor monitora, L - odległość między próbką a detektorem [9]

Na tym stanowisku w pierwszej kolejności ustawiono wiązkę pomiarową i dokonano doboru długości

odpowiedniej fali światła padającego na próbkę. Następnie wykonano serię pomiarów kątowych w płaszczyźnie poziomej. Kalibrację detektora przeprowadzono poprzez badanie sygnału wiązki bezpośrednio trafiającej do detektora (próbka jest przesunięta poza wiązkę); detektor rejestruje wówczas pełne natężenie padającej wiązki. Odczyt ciemnego sygnału jest pobierany z fotodetektora, w czasie zablokowania wiązki (detektor nieoświetlony). Następnie detektor zostaje przesunięty do pozycji początkowej pomiarów. Pomiary są zwykle wykonywane w zakresie następujących kątów: 10°- 85° oraz od -10° do -85°, z krokiem co 5°.

W ten sposób uzyskuje się bezpośrednio rozkład strumienia na całej płaszczyźnie biegunowej półkuli, co pozwala uniknąć błędów w obliczeniach współczynnika odbicia półkuli, które mogłyby być spowodowane niewielkimi przesunięciami w ustawieniu padania i kątów widzenia, jak np. przez przemieszczenie padającej wiązki względem osi obrotu. Sekwencję pomiarową przeprowadza się zarówno dla wiązek spolaryzowanych s, jak i p, a średnia wyników jest wykorzystywana do obliczenia współczynników odbicia [9].

Tabela 1. Względne standardowe niepewności występujące w pomiarach z użyciem gonioreflektometru [9].

Source of uncertainty	Type of uncertainty	Standard Uncertainty	Uncertainty in ρ/d reflectance factor (%)
Signal-to-noise ratio (nm)			
360-400	A	0.08%	0.08
400-440	A	0.05%	0.05
440-820	A	0.03%	0.03
Instrument stability	A	0.02%	0.02
Aperture-to-sample distance	B	0.15 mm	0.06
Aperture diameter	B	2.0 μ m	0.02
Wavelength	B	0.1 nm	<0.01
Stray light			
Isochromatic	B	0.14%	0.14
Heterochromatic	B	<0.01%	<0.01
Detector nonlinearity	B	0.04%	0.04
Spatial nonuniformity	B	0.10%	0.10
Illumination and viewing angles	B	0.1 deg	<0.01
Polarization	B	0.05%	0.05
Combined standard uncertainty (400-820 nm)			0.2

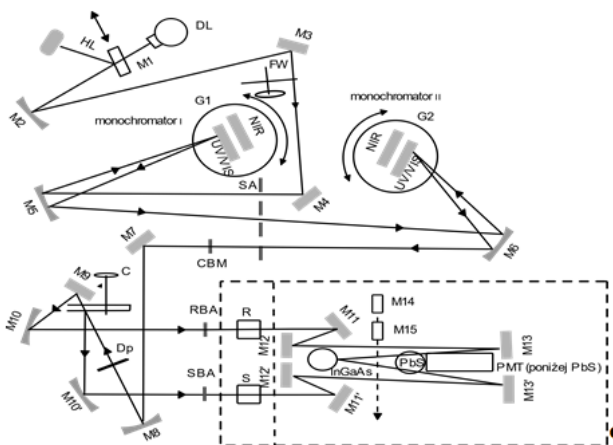
Wartość niepewności dla białych wzorców współczynnika odbicia jest oszacowana na 0,2%. W opracowaniu związanym ze stanowiskiem przedstawiono budżet niepewności [Tabela 1]. Źródłami możliwych błędów brany pod uwagę przy wyznaczaniu budżetu niepewności były następujące składowe: stosunek sygnału do szumu, stabilność przyrządu, odległość przysłony od próbki, średnica otworu, długość fali, światło rozproszone (izochromatyczne, heterochromatyczne), nieliniowość detektora, niejednorodność przestrzenna, oświetlenie i kąty widzenia, polaryzacja [9].

Dokładne oszacowanie budżetu zostało podane w poniższej tabeli:

Stanowisko pomiarowe służące do wyznaczania charakterystyki wielokątowej wzorców w laboratorium do pomiarów barwy w Głównym Urzędzie Miar.

Opisane procedury pomiarowe, obliczenia, budżet niepewności jak i schemat działania przyrządów służących do wyznaczania funkcji *BRDF* stanowią jeden z elementów pomocnych przy próbie stworzenia odpowiedniej metodyki do opracowania koncepcji budowy nowego stanowiska pomiarowego związanego z charakterystyką wielokątową wzorców w Głównym Urzędzie Miar. Stanowisko do pomiaru barwy posiada spektrofotometr PerkinElmer Lambda 1050 wraz z wielokątową przystawką goniometryczną TAMS.

Schemat budowy spektrofotometru prezentuje rys. 8:



Rys. 8. Schemat budowy spektrofotometru Perkin Elmer Lambda 1050: lampa deuterowa (DL) i lampa halogenowo wolframowa (HL), zwierciadła (M1...M15), filtr optyczny na zespole koła filtrowego (FW), zespół szczelin (SA), siatki dyfrakcyjne (G1, G2), przerywacz wiązki „chopper” (C), przysłona wspólnej wiązki (CBM), filtr depolaryzacyjny (DP), tłumiki wiązki odniesienia (RBA), tłumiki wiązki próbki - atenuatory (SBA), wiązka odniesienia (R), wiązka próbki (S), detektor fotopowielacza (PMT) dla zakresu UV/Vis, detektor siarczku ołowiu (PbS) dla zakresu NIR [10].

Takie połączenie spektrometru Lambda wraz z wielokątową przystawką TAMS umożliwia przeprowadzenie pomiarów współczynnika odbicia dla różnych kątów padania i odbicia z użyciem różnego rodzaju wzorców. Badania te mogą być prowadzone dla źródła światła umożliwiającego pracę w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR), widzialnym (VIS) jak i ultrafioletu (UV), w zakresie od 175 nm do 3300 nm. Zasięg kątowy detektora wynosi od 15° do 345°, zakres kątowy współczynnika odbicia dla ustawień próbki wynosi od 7,5° do 80°, z dokładnością kątową dla detektora jak i próbki równą 0,02° [10][11].

Wnioski

Korzystając z powyższych możliwości zaplecza pomiarowego, można podjąć próbę uzyskania pełniejszej charakterystyki wzorców widmowego współczynnika odbicia, które to wzorce są używane podczas wzorcowania aparatury w laboratorium związanym z pomiarami barwy.

Uzyskanie pełniejszej charakterystyki dla poszczególnych wzorców w zakresie światła odbitego będzie miało wpływ na zwiększenie dokładności przekazywania jednostek miar w ramach wzorcowań wzorców i przyrządów pomiarowych wykonywanych w Głównym Urzędzie Miar oraz pozwoli na zwiększenie możliwości usługowych laboratorium. Badania te dodatkowo umożliwią pozyskanie dodatkowych informacji dotyczącej stabilności badanych wzorców jak i powtarzalności oraz odtwarzalności pomiarów. Poszerzona charakterystyka rozkładów odbicia może przyczynić się do

uzyskania informacji związanej ze składową niepewnością pomiaru badanych wzorców współczynnika odbicia, a co za tym idzie na bardziej precyzyjne wyrażanie wartości całego budżetu niepewności pomiaru z użyciem tych wzorców.

Planowane jest również przeprowadzenie badania własności sprzętu, weryfikacje odpowiednich nastaw przyrządu (m.in. ustawienie uchwyty próbek, ustawienie detektora). W tym celu przeprowadzona zostanie modyfikacja stanowiska polegająca na zastosowaniu dodatkowych akcesoriów sprzętowych (pomiar laserowy) pozwalających na sprawdzenie poprawności ustawień uchwyty próbki jak i detektora. Opracowana będzie procedura przeprowadzenia badań przy użyciu różnego rodzaju wzorców współczynnika odbicia: pomiary wzorców o różnej barwie i o różnej charakterystyce powierzchni, dla wybranego zakresu kąтового światła padającego oraz światła odbitego w wybranym zakresie. Podjęta zostanie próba ustalenia optymalnej siatki kątowej dla ściśle przypisanego wzorca. Zostanie sprawdzone zjawisko całkowitego odbicia światła z użyciem różnego rodzaju próbek i ustalone zostaną warunki, dla którego to zjawisko przebiega najefektywniej. Nastąpi także próba zastosowania wzorców obliczeniowych tu przytoczonych (tj. parametry kolorymetryczne, funkcja *BRDF*) do opisu badań przy użyciu wspomnianej aparatury. Celem przedstawionych prac jest utworzenie metody pozwalającej na wykonanie pomiarów charakterystyk wielokątowych posiadanych wzorców na danym stanowisku pomiarowym. Poza określeniem charakterystyk wzorców odbiciowych powstałe stanowisko mogłoby jako pierwsze w kraju umożliwić przekazywanie jednostki miar z wzorca na spektrofotometri wielokątowe. Prace te będą prowadzone m.in. w ramach realizacji VI edycji programu „Doktorat wdrożeniowy”.

Badania naukowe zostały zrealizowane w ramach doktoratu wdrożeniowego (VI edycja) realizowanego w Politechnice Białostockiej i sfinansowane przez ministra właściwego do spraw nauki na podstawie umowy nr DWD/6/0433/2022.

LITERATURA

- [1] Jaglarz J., Duraj R., Goniometryczny pomiar funkcji BRDF dla powierzchni stałych, *Czasopismo Techniczne. Nauki Podstawowe*, (2011), R. 108, Z. 22, 1-NP, 85-94
- [2] Zydorowicz A., Książek K., Górnik S., Wzorcowanie spektrofotometrów odbiciowych i kolorymetrów trójkromatycznych, *Metrologia. Biuletyn Głównego Urzędu Miar* (2010), nr 4(19), 8-17
- [3] Commission Internationale de l'Eclairage, Technical report. Colorimetry, Publ. CIE 130 (CIE, 2004).
- [4] Mielicki J. „Zarys wiadomości o barwie”, FRPK, Łódź, 1997
- [5] PN-989/E-04042/2, Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne. Iluminanty i źródła normalne
- [6] Felhorski W., Stanioch W., Kolorymetria trójkromatyczna, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1973
- [7] Nicodemus F.E., Richmond J.C., and Hsia J.J., Geometrical Considerations and Nomenclature for reflectance, *National Bureau of Standards Monograph (National Bureau of Standards)*, Washington, (1977), Vol. 160.
- [8] Falski M., Przegląd modeli oświetlenia w grafice komputerowej, praca magisterska, Uniwersytet Wrocławski, Wydział Matematyki i Informatyki, 2004
- [9] Nevas S., Manoocheri F., Ikonen E., Gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflectance, *Applied Optics*, 43(35), (2004), 6391–6399
- [10] instrukcja użytkownika spektrofotometru Perkin Elmer Lambda 950/1050, High Performance Lambda Spectrometers, *Perkin Elmer* (2014)
- [11] van Nijnatten P.A., Timmermans S.J.M., instrukcja użytkownika przystawki wielokątowej TAMS do spektrofotometru PE Lambda 1050, TAMS. Total Absolute Measurement System. User Manual, *OMT Solutions BV*, (2020)