



# Badanie chropowatości powierzchni gładkich za pomocą skaterometru kąтового. Cz. 1. Metoda pomiaru. Przyrząd pomiarowy

ANDRZEJ PAWLATA

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,  
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, apawlata@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W artykule opisano podstawowe parametry chropowatości powierzchni. Przedstawiono metodę obliczenia tych parametrów dla powierzchni gładkich na podstawie pomiaru funkcji *BSDF* charakteryzującej rozproszenie z badanej powierzchni. Opisano zbudowany w IOE WAT zautomatyzowany skaterometr kątowy służący do pomiaru powyższych parametrów.

**Słowa kluczowe:** chropowatość powierzchni, rozproszenie, funkcja *BSDF*, skaterometr

**DOI:** 10.5604/12345865.1145426

## 1. Wstęp

Wraz z rozwojem wielu dziedzin techniki, zwłaszcza mechaniki precyzyjnej, elektroniki oraz optyki, coraz częściej pojawia się potrzeba pomiaru chropowatości powierzchni wynoszących kilka nanometrów, a w wielu przypadkach nawet poniżej jednego nanometra. Ma to miejsce np. przy kontroli krzemowych podłoży układów scalonych czy też elementów układów optycznych, dla których występują wysokie wymagania dotyczące ich powierzchni. Jednocześnie żąda się, aby metoda pomiaru pozwalała ocenić nierówności bez styku przyrządu z mierzoną powierzchnią, w celu uniknięcia ewentualnych uszkodzeń. Dlatego do pomiaru chropowatości precyzyjnie obrabionych powierzchni elementów optycznych i elektronicznych często stosowane są metody optyczne.

Jedną z nich jest metoda pomiaru chropowatości wykorzystująca rozpraszanie światła przez badaną powierzchnię. Jest to jedna z najbardziej czułych metod

stosowanych do oceny chropowatości. Pozwala mierzyć chropowatość powierzchni w zakresie od dziesiątej części nanometra do ok. dziesięciu nanometrów [1, 2]. Ten zakres pomiarowy dobrze pokrywa się z chropowatościami polerowanych powierzchni elementów optycznych wykonywanych z różnych materiałów (np. dla szkła BK-7 wynosi on poniżej 2 nm, dla kwarcu ok. 1 nm, dla krzemu ok. 0,3 nm, dla germanu ok. 2 nm, dla YAG:Nd<sup>3+</sup> ok. 1 nm, dla stali nierdzewnej ok. 4 nm, dla molibdenu ok. 5 nm) [3, 4, 10].

## 2. Metoda pomiaru

### 2.1. Parametry chropowatości

Rozważmy najprostszy przypadek powierzchni jednowymiarowej. Do oceny chropowatości powierzchni rozpraszającej światło stosowana jest średniokwadratowa odchyłka chropowatości od powierzchni średniej (oznaczana przez  $\sigma$ ). Niech profil powierzchni określa krzywa  $z(x)$ . Średnią wysokość oraz średnie nachylenie profilu o długości  $L$  określają wzory [4, 9]:

$$\bar{z} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} z(x) dx, \quad \bar{z}' = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{dz(x)}{dx} dx, \quad (1)$$

Średniokwadratowa chropowatość  $\sigma$  oraz średniokwadratowe nachylenie  $m$  profilu o długości  $L$  są zdefiniowane następująco [4, 9]:

$$\sigma = \left( \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} [z(x) - \bar{z}]^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}, \quad m = \left( \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left[ \frac{dz(x)}{dx} - \bar{z}' \right]^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Na podstawie obu tych parametrów możemy określić tzw. średnią powierzchniową długość fali  $l$  profilu [4, 6, 8]:

$$l = 2\pi \frac{\sigma}{m}. \quad (3)$$

Ważną rolę w obliczaniu parametrów chropowatości powierzchni pełni funkcja powierzchniowej widmowej gęstości mocy PSD (*Power Spectral Density*), zdefiniowana jako kwadrat modułu transformaty Fouriera profilu powierzchni. Funkcja PSD jest częstotliwościowym widmem chropowatości powierzchni mierzonym w jednostkach odwrotności długości [4, 9]. Dla powierzchni jednowymiarowej o długości  $L$ :

$$PSD(f_x) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \left| \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} z(x) e^{-j2\pi f_x x} dx \right|^2, \quad (4)$$

gdzie:  $f_x$  — częstotliwość przestrzenna w kierunku  $x$ .

Wykorzystując tę funkcję, powyższe parametry dla profilu mogą być obliczone ze wzorów [4]:

$$\sigma = \left[ 2 \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} PSD(f_x) df_x \right]^{\frac{1}{2}}, \quad m = \left[ 2 \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} (2\pi f_x)^2 PSD(f_x) df_x \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

gdzie  $f_{\min}, f_{\max}$  określają zakres częstotliwości przestrzennych.

Analogiczne wzory występują dla powierzchni dwuwymiarowej [4, 9].

## 2.2. Opis metody

Metoda pomiaru została oparta na wektorowej teorii rozpraszania fali od powierzchni gładkiej opracowanej przez Rayleigha oraz Rice'a, a następnie dostosowanej w publikacjach Churcha, Elsona i Bennetta oraz Maradudina i Millsa (lata siedemdziesiąte XX w.) do zagadnień rozpraszania światła. Teoria ta daje związek pomiędzy mocą światła rozproszonego  $dP_s$  w kąt bryłowy  $d\Omega$  w kierunku  $(\theta_s, \Phi_s)$  a mocą światła padającego  $P_i$  na powierzchnię pod kątem  $\theta_i$ . Uwzględniając definicję funkcji *BSDF* (*Bidirectional Scatter Distribution Function*), możemy napisać [4, 5, 6, 7]:

$$\begin{aligned} BSDF &= \frac{dP_s / d\Omega}{P_i \cos \theta_s} \approx \frac{P_s}{P_i \Omega \cos \theta_s} = \\ &= \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos \theta_i \cos \theta_s Q(\varepsilon, \theta_i, \theta_s, \Phi_s) PSD(f_x, f_y), \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:  $dP_s$  — moc światła rozproszonego w kąt bryłowy  $d\Omega$  w kierunku  $(\theta_s, \Phi_s)$ ;  
 $P_i$  — moc światła padającego na powierzchnię pod kątem  $\theta_i$ ;  
 $\Phi_s$  — kąt między płaszczyzną padania a płaszczyzną rozpraszania;  
 $\lambda$  — długość fali padającego światła;  
 $Q(\varepsilon, \theta_i, \theta_s, \Phi_s)$  — czynnik zależny od stałej dielektrycznej powierzchni  $\varepsilon$ , od kąta padania  $\theta_i$  i rozpraszania  $(\theta_s, \Phi_s)$  oraz od typu polaryzacji światła padającego na powierzchnię próbki i detektora;

$PSD(f_x, f_y)$  — funkcja reprezentująca chropowatość powierzchni, gdzie:  $f_x$  i  $f_y$  — częstotliwości przestrzenne fal powierzchniowych w kierunku  $x$  i  $y$ .

Powyższa zależność jest słuszna wtedy, gdy badana powierzchnia jest czysta (nie powinno być rozproszenia od zanieczyszczeń na powierzchni), odbiciowa (nie powinno być rozproszenia od elementów podpowierzchniowych) oraz gładka, czyli taka, dla której wysokość mikronierówności  $\ll \lambda$  [4, 6, 7].

Bezwymiarowa wielkość  $Q$  (czynnik polaryzacyjny) wyraża wpływ własności materiału powierzchni na funkcję  $BSDF$ . Zależy ona od stałej dielektrycznej  $\epsilon$  materiału powierzchni, od kąta padania  $\theta_i$ , od kąta rozpraszania ( $\theta_s, \Phi_s$ ) oraz od stanów polaryzacji światła padającego na powierzchnię próbki i światła rozproszonego padającego na powierzchnię detektora. Na przykład dla światła padającego na powierzchnię próbki spolaryzowanego w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny padania (typ „s” polaryzacji) oraz dla światła rozproszonego padającego na powierzchnię detektora o tym samym stanie polaryzacji mamy [4, 7]:

$$Q = \left[ \frac{(\epsilon - 1) \cos \Phi_s}{(\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i})(\cos \theta_s + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_s})} \right]^2. \quad (7)$$

Funkcja  $PSD$  jest dwuwymiarową funkcją powierzchniowej gęstości mocy zależną od częstotliwości fal powierzchniowych próbek  $f_x$  i  $f_y$  [4, 7]:

$$f_x = \frac{\sin \theta_s \cos \Phi_s - \sin \theta_i}{\lambda}, \quad f_y = \frac{\sin \theta_s \sin \Phi_s}{\lambda}. \quad (8)$$

Możemy wykorzystać zależność (6) do rozwiązania problemu odwrotnego w zagadnieniu rozpraszania, czyli obliczenia parametrów statystycznych chropowatości powierzchni na podstawie pomiaru rozproszenia. Dokonując pomiaru funkcji  $BSDF$ , możemy otrzymać funkcję  $PSD$  powierzchni rozpraszającej, a następnie obliczyć parametry chropowatości. Ponieważ wiele (zwłaszcza polerowanych) powierzchni spełnia warunki czystości, odbiciowości i gładkości, zatem pomiar rozproszenia może być dla nich ważną bezkontaktową metodą pomiaru chropowatości.

### 2.3. Wyznaczenie parametrów chropowatości dla powierzchni izotropowych

Wiele polerowanych oraz nanoszonych powierzchni posiada funkcję  $PSD$  prawie izotropową (czyli o symetrii kołowej) [2, 4, 7]. Właściwość ta powoduje, że dla określenia funkcji  $PSD$  takich powierzchni wystarczy pomiar rozproszenia przeprowadzony tylko w jednej półpłaszczyźnie (od wiązki zwierciadlane odbitej)

półsfery rozproszenia. Najlepiej jest to przeprowadzić w płaszczyźnie padania światła. Wówczas mamy [4, 7, 8]:

$$\Phi_s = 0, \quad f_y = 0, \quad f_x = \frac{\sin \theta_s - \sin \theta_i}{\lambda}. \quad (9)$$

Jeśli przyjmiemy w takim przypadku, że wiązka światła padająca na powierzchnię próbki będzie miała polaryzację typu „s”, to można wykazać, że:

$$Q = \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)}, \quad (10)$$

gdzie  $R(\theta_i)$ ,  $R(\theta_s)$  to współczynniki odbicia powierzchni dla kątów  $\theta_i, \theta_s$  [4, 7].

Zatem po przekształceniu zależności (6) otrzymujemy:

$$PSD(f_x, f_y) = \frac{\lambda^4 BPDF}{16\pi^2 \cos \theta_i \cos \theta_s \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)}}. \quad (11)$$

W celu uproszczenia obliczeń dwuwymiarową funkcję  $PSD$  dla przypadku izotropowego można zredukować do postaci jednowymiarowej [4, 7, 8]:

$$PSD_{izo}(f) = \int_0^{2\pi} PSD(f_x, f_y) f d\alpha = 2\pi f PSD(f_x, f_y), \quad (12)$$

$$gdzie: \quad f = (f_x^2 + f_y^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Parametry chropowatości można wtedy określić ze wzorów [4, 7, 8]:

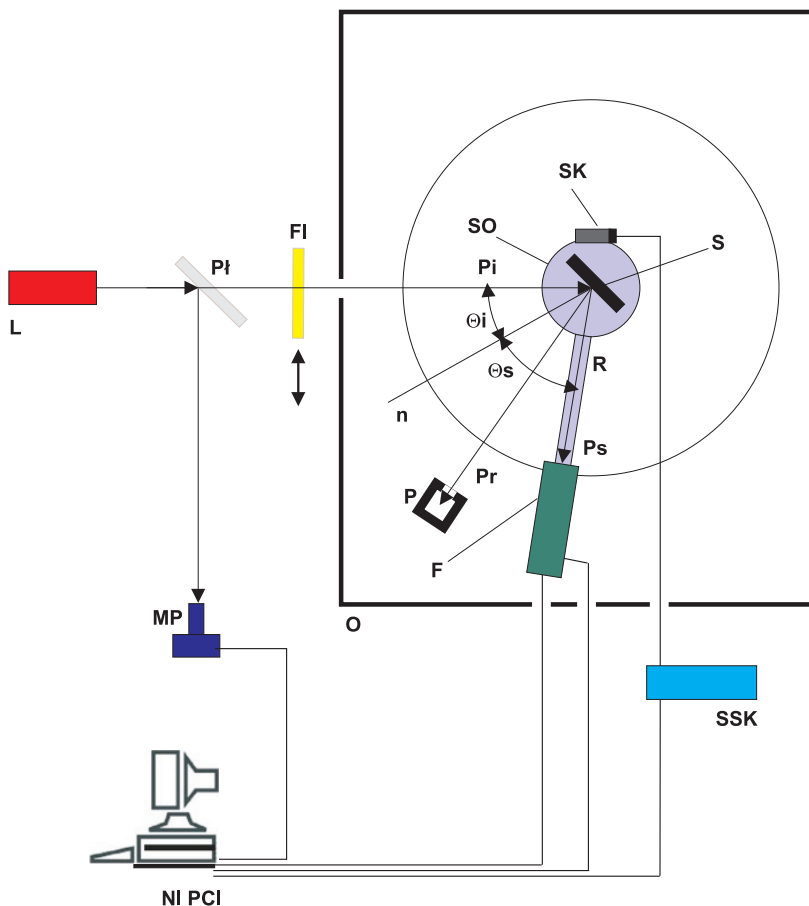
$$\sigma = \left[ \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} PSD_{izo}(f) df \right]^{\frac{1}{2}}, \quad m = \left[ \frac{1}{2} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} (2\pi f)^2 PSD_{izo}(f) df \right]^{\frac{1}{2}}, \quad l = 2\pi \frac{\sigma}{m}. \quad (14)$$

Zauważmy, że wielkości  $BPDF$ , a zatem i  $PSD$  (w konsekwencji także  $\sigma$ ,  $m$ ,  $l$ ) są wielkościami ograniczonymi zakresem częstotliwości. Dolna granica częstotliwości odpowiadająca najmniejszemu mierzonemu kątowi rozproszenia jest ograniczona przez kąt, dla którego można jeszcze oddzielić rozproszenie bliskie zwierciadlanemu odbiciu od samego zwierciadlanego odbicia. Górna granica częstotliwości odpowiadająca największemu mierzonemu kątowi rozproszenia jest ograniczona przez rozproszenie ślizgające się po powierzchni. Obliczone tą metodą parametry chropowatości należy podawać razem z zakresem pomiarowym częstości  $f$  fal powierzchniowych.

### 3. Układ pomiarowy

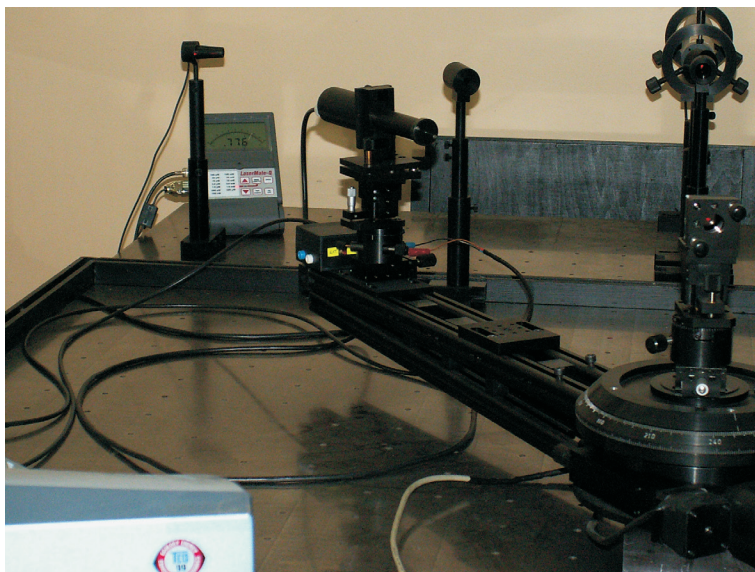
W celu przeprowadzenia badań chropowatości powierzchni metodą analizy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego, zbudowano zautomatyzowany skaterometr kątowy [12].

Schemat tego układu pomiarowego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat zautomatyzowanego skaterometru kąтового ( $L$  — laser He-Ne;  $P_i$  — moc promieniowania padającego na badaną powierzchnię;  $P_o$  — moc promieniowania odbitego od płytki płasko-równoległej;  $P_r$  — moc promieniowania odbitego zwierciadlanie od powierzchni badanej;  $P_s$  — moc promieniowania rozproszonego w kierunku  $\theta_s$ ;  $\theta_i$  — kąt padania;  $\theta_s$  — kąt rozproszenia;  $S$  — próbka;  $n$  — normalna do powierzchni próbki;  $P_l$  — płytka płasko-równoległa;  $Fl$  — filtr ND osłabiający padające na powierzchnię promieniowanie;  $SO$  — stolik obrotowy;  $R$  — ramię stolika obrotowego;  $SK$  — silnik krokowy;  $SSK$  — sterownik silnika krokowego;  $F$  — fotopowielacz;  $P$  — pułapka promieniowania odbitego zwierciadlanie;  $MP$  — miernik mocy;  $D$  — diafragma;  $O$  — osłona skaterometru;  $NI\ PCI$  — karta akwizycji danych umieszczona w komputerze PC)

Zdjęcie zautomatyzowanego skaterometru kąтового przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Zdjęcie zautomatyzowanego skaterometru kąтового

Na badaną powierzchnię  $S$  pada, po przejściu przez płytkę płasko-równoległą, wiązka światła z lasera He-Ne (długość fali  $\lambda = 632,8$  nm, polaryzacja typu „s”). Płytkę płasko-równoległą umożliwia podział wiązki laserowej na wiązkę padającą na powierzchnię próbki (o mocy ok. 6,3 mW) oraz wiązkę odniesienia padającą na miernik mocy (ok. 0,7 mW). Wiązka padająca na powierzchnię próbki zostaje częściowo zwierciadlanie odbita, a częściowo rozproszona (poza wiązką zwierciadlanie odbitą). Średnica obszaru oświetlonego wiązką laserową wynosi ok. 2 mm. Skaterometr kątowy mierzy następujące wielkości (rys. 1):

- kąt  $\theta_s$  określający położenie fotopowielacza w płaszczyźnie padania względem normalnej do powierzchni próbki,
- moc  $P_s$  światła rozproszonego przez badaną powierzchnię pod kątem  $\theta_s$  do normalnej, poprzez pomiar odpowiadającego tej mocy napięcia  $U_s$  na fotopowielaczu,
- moc  $P_i$  światła padającego na badaną powierzchnię pod kątem  $\theta_i$  do normalnej, poprzez pomiar mocy  $P_o$  wiązki odniesienia (po odbiciu od płytki płasko-równoległej), który jest realizowany poprzez pomiar napięcia  $U_p$  na mierniku mocy,
- napięcie  $V_c$  na fotopowielaczu sterujące wzmocnieniem fotopowielacza.

Do pomiaru mocy światła rozproszonego przez badaną powierzchnię wykorzystano fotopowielacz H 5784 (Hamamatsu) [11], ponieważ moc światła rozproszonego

od powierzchni gładkiej zmniejsza się bardzo szybko wraz ze wzrostem kąta rozproszenia mierzonego od wiązki odbitej zwierciadłanie, osiągając bardzo małe wartości (nawet rzędu pikowata) dla dużych kątów rozproszenia. Zakres pomiarowy tego fotopowielacza to ok.  $(10^{-6}-10^{-12})$  W. Zakres zmian czułości w zależności od napięcia sterującego wynosi:  $(10^{-2}-10^2)$  V/nW. Maksymalna wartość sygnału: 10 V („output offset”: -2,6 mV). Średnica elementu czynnego wynosi 8 mm. Fotopowielacz umieszczono w cylindrycznej obudowie (otwartej od strony powierzchni czynnej) zamocowanej do odpowiedniego uchwyty na stoliku pochylnym. Przed fotopowielaczem umieszczono w odpowiedniej odległości soczewkę skupiającą (z warstwami AR na obu powierzchniach dla długości fali 632,8 nm) poprzedzoną diafragmą aperturową o średnicy 8 mm położoną bezpośrednio przed soczewką. Cały zespół (diafragma i soczewka) umieszczono także w zamkniętej, cylindrycznej obudowie (zamocowanej do tego samego uchwyty), umożliwiającej dostęp światła do fotopowielacza tylko poprzez tę diafragmę. Kąt bryłowy określony przez diafragmę aperturową wynosi  $2,02 \times 10^{-4}$  sr. Moc światła rozproszonego mierzonego za pomocą fotopowielacza określona jest na podstawie zależności:

$$P_s = \frac{U_s}{S}, \quad (15)$$

gdzie  $S$  — czułość fotopowielacza.

Z danych otrzymanych od producenta wynika, że dla rekomendowanego zakresu zmian napięcia sterującego wynoszącego (0,25-0,9) V czułość tego detektora można przedstawić wzorem:

$$S = 10^{1,79} V_c^{7,04} \quad [\text{V/nW}], \quad (16)$$

gdzie  $V_c$  to napięcie sterujące podawane na fotopowielacz [V].

Karta akwizycji danych NI PCI 6014 (*National Instruments*, 16-bitowa) umieszczona w komputerze przeznaczona jest do zautomatyzowania procesu pomiarowego. Program sterujący pracą skaterometru umożliwia m. in. odczytywanie poprzez tę kartę sygnałów  $U_s$ ,  $U_p$ ,  $V_c$  składających się z serii  $N$  pomiarów o zadanym odstępnie czasu między tymi pomiarami, a także wypracowanie i podanie (poprzez tę kartę) odpowiedniego napięcia sterującego na fotopowielacz.

Miernik mocy lasera LaserMateQ (Coherent) pozwala poprzez pomiar mocy wiązki odniesienia na ciągle pośredni pomiar mocy wiązki padającej na badaną powierzchnię. Współczynnik przetwarzania mierzonej mocy promieniowania laserowego na sygnał napięciowy wynosi 1 V/1 mW. W celu dostosowania sygnału wyjściowego z miernika mocy do karty pomiarowej zastosowano odpowiedni układ kondycjonujący [13].



Komputer (1,24 GHz, 512 MB RAM, Windows XP) pozwala sterować pracą skaterometru (w tym odczytem i rejestracją danych pomiarowych) oraz wykonywać obliczenia parametrów chropowatości badanych powierzchni.

W celu rejestrowania z odpowiednią dokładnością kątową zmiany mocy światła rozproszonego  $P_s$  wraz ze wzrostem kąta rozpraszania  $\theta_s$ , zastosowano precyzyjny stolik goniometryczny o średnicy 200 mm (Cobrabid Optica) posiadający ramię o długości ok. 600 mm przeznaczone do zamocowania fotopowielacza. Stolik ten obracany jest silnikiem krokowym (Nanotec) sterowanym poprzez sterownik Monopack LT (Trinamic) połączony z komputerem za pomocą łącza RS 232. Dokładność obrotu stolika wynosi:  $0,01^\circ$  (teoretycznie nawet poniżej  $0,001^\circ$ ). Program sterujący pracą skaterometru, współdziałając ze sterownikiem silnika krokowego, pozwala na automatyzację pracy tego układu, w tym m.in. na wypracowanie i podanie odpowiedniego kąta obrotu dla silnika oraz odczytywanie kąta  $\theta_s$  określającego położenie fotopowielacza.

Na obrotowym ramieniu zamocowano zespół precyzyjnych stolików regulacyjnych umożliwiających prostopadłe ustawienie powierzchni czulej fotopowielacza względem padającej wiązki laserowej. Składa się on z precyzyjnych stolików: liniowych ( $x$  i  $z$ ), obrotowego, pochylonego ( $\alpha$  i  $\beta$ ) oraz z uchwytu do zamocowania obudowy fotopowielacza i obudowy zespołu soczewki. Dzięki zastosowaniu płytki dystansowej pomiędzy ramieniem i zespołem stolików, zespół ten może być umieszczony w odległości (150-550) mm od powierzchni próbki.

W osi obrotu stolika goniometrycznego zamocowano drugi zespół precyzyjnych stolików regulacyjnych umożliwiających prostopadłe ustawienie powierzchni badanej (umieszczonej w osi obrotu) względem padającej wiązki laserowej. Składa się on z precyzyjnych stolików: liniowych ( $x$  i  $z$ ), obrotowego oraz pochylonego ( $\alpha$  i  $\beta$ ) wraz z uchwytem na próbki.

Justowanie układu skaterometru polegało na takiej regulacji położenia lasera, powierzchni badanej oraz fotopowielacza, aby padająca wiązka laserowa przecinała się z osią obrotu stolika goniometrycznego oraz aby normalna do powierzchni fotopowielacza była w płaszczyźnie padania wiązki laserowej na badaną powierzchnię w całym zakresie obrotu ramienia. Maksymalna różnica, jaką uzyskano pomiędzy płaszczyzną padania wiązki a płaszczyzną obrotu fotopowielacza (na ramieniu 500 mm) w zakresie kąta obrotu  $180^\circ$  wynosiła ok. 1 mm.

Program sterujący pracą skaterometru oraz przetwarzający dane pomiarowe do programu obliczeniowego umożliwia pełną automatyzację procesu pomiarowo-obliczeniowego. Ma to duże znaczenie, głównie z powodu trudnych warunków pomiaru (konieczność prowadzenia badań w zaciemnieniu). Program obliczeniowy pozwala na wykreślenie funkcji  $BSDF$ ,  $PSD$  oraz parametrów chropowatości powierzchni ( $\sigma$ ,  $m$ ,  $l$ ) w zależności od częstości  $f$  fali powierzchniowej. Programy: sterujący oraz obliczeniowy zostały napisane w środowisku programistycznym MATLAB. W ramach oprogramowania do obsługi skaterometru wykonano m.in. następujące procedury [13]:

- graficznego interfejsu użytkownika,
- ustalania punktów pomiarowych,
- ustalania liczby  $N$  pomiarów w sygnale pomiarowym,
- ustalania odstępu czasu pomiędzy pomiarami w sygnale pomiarowym,
- zmieniania parametrów pomiaru,
- zmianę położenia kąтового fotopowielacza według zadanej wartości,
- kilka wariantów procedur pomiarowych,
- zapisywania i odczytywania wyników pomiaru,
- rysowania wykresów funkcji  $BSDF$ ,  $PSD$  oraz parametru  $\sigma$  w trakcie trwania pomiaru,
- monitorowania zmiennych uwzględnianych w obliczeniach,
- uruchamiania programu obliczeniowego.

#### 4. Wyznaczenie zależności pomiędzy $P_i$ oraz $P_o$

Do wyznaczenia funkcji  $BSDF$  potrzebny jest jednoczesny pomiar mocy światła rozproszonego przez powierzchnię  $P_s$  oraz mocy padającego na nią światła  $P_i$  (rys. 1). Pomiar  $P_i$  jest realizowany w sposób pośredni poprzez pomiar mocy wiązki laserowej  $P_o$  (odbitej od płytki płasko-równoległej) za pomocą miernika mocy LaserMateQ (połączonego poprzez wyjście analogowe z kartą akwizycji danych NI 6014). Pomiar ten pozwala na uwzględnienie przy wyznaczaniu funkcji  $BSDF$  zmiany w czasie mocy wyjściowej lasera.

Aby określić ilościową zależność między  $P_i$  oraz  $P_o$ , wykonano pomiary mocy wiązki laserowej  $P_i$  (po przejściu przez płytkę płasko-równoległą i diafragmę) za pomocą miernika mocy lasera Coherent 212 (wskazania tego miernika były sprawdzone w Akredytowanym Laboratorium Badawczym IOE). Jednocześnie mierzono moc wiązki odbitej  $P_o$  poprzez pomiar sygnału  $U_p$  z miernika LaserMateQ na karcie NI 6014. Przyjęto na podstawie danych pomiarowych, że średnia wartość stosunku  $\frac{P_i}{U_p}$ , czyli tzw. parametr „ $c$ ” skaterometru (wykorzystywany do obliczenia mocy padającej  $P_i$  dla kolejnych punktów pomiarowych na podstawie pomiaru napięcia  $U_p$ ), wynosi:

$$c = \left( \overline{\frac{P_i}{U_p}} \right) = 8,95 \quad [\text{mW/V}]. \quad (17)$$

Powyzsza zależność pozwala na uwzględnienie zmiany w czasie mocy  $P_i$  światła padającego na badaną powierzchnię (wskutek fluktuacji mocy lasera) poprzez zarejestrowanie odpowiadającej jej zmiany napięcia  $U_p$ .

## 5. Podsumowanie

W artykule opisano podstawowe parametry chropowatości pozwalające ocenić jakość powierzchni różnych materiałów, w tym polerowanych powierzchni elementów optycznych. Przedstawiono metodę wyznaczania parametrów chropowatości tych powierzchni na podstawie wektorowej teorii rozpraszania światła z powierzchni gładkich. Opisano zbudowany w IOE WAT zautomatyzowany skaterometr kątowy przeznaczony do pomiaru funkcji *BSDF* oraz obliczenia parametrów chropowatości badanych powierzchni. Skaterometr ten poprzez pomiar chropowatości może być także przydatny podczas opracowywania technologii polerowania powierzchni elementów optycznych, zwłaszcza optymalnego czasu polerowania oraz doboru materiału polerskiego.

Praca była realizowana z PBW 858.

Artykuł wpłynął do redakcji 12.10.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 27.01.2011 r.

### LITERATURA

- [1] TMA Technologies, Inc. *TMA CASI Scatterometer System*, Technical Information, USA.
- [2] Schmitt Measurement System, Inc. *μScan Scatterometer System*, User's Manual, USA.
- [3] BENNETT H.E., *Scattering characteristics of optical materials*, Optical Engineering, vol. 17, no. 5, 1978.
- [4] STOVER J.C., *Optical Scattering — measurement and analysis*, SPIE Optical Engineering Press, 1995.
- [5] BENNETT J.M., MATTSON L., *Introduction to surface roughness and scattering*, Optical Society of America, 1993.
- [6] CHURCH E.L., ZAVADA J.M., *Residual surface roughness of diamond-turned optics*, Applied Optics, vol. 14, no. 8, 1975.
- [7] CHURCH E.L., JENKINSON H.A., ZAVADA J.M., *Measurement of the finish of diamond turned metal surfaces by differential light scattering*, Optical Engineering, vol. 16, no. 4, 1977.
- [8] STOVER J.C., *Roughness characterization of smooth machined surfaces by light scattering*, Applied Optics, vol. 14, no. 8, 1975.
- [9] ASME B46.1, 1995.
- [10] PAWLATA A., *Badanie chropowatości powierzchni za pomocą skaterometru*, Biul. WAT, vol. 51, nr 6, 2002.
- [11] HAMAMATSU, *Photomultiplier tube modules*, Technical Information, 2001, Japan.
- [12] PAWLATA A., *Badanie chropowatości powierzchni metodą analizy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego*, Sprawozdanie z PBW, IOE, 2006.

- [13] PAWLATA A., *Zautomatyzowany skaterometr kątowy do badania chropowatości powierzchni gładkich*, IOE, Sprawozdanie roczne nr 2/2008.

A. PAWLATA

**Examination of smooth surfaces roughness using angle scatterometer.**

**Part 1. The method of measurement. The measurement instrument**

**Abstract.** The basic parameters of surface roughness are described in this article. The method of calculation of these parameters from measurement of BSDF function characterizing scatter from surface is shown. Automated angle scatterometer, built at the Institute of Optoelectronics of the Military University of Technology (IOE MUT), used for measurements of above parameters is described.

**Keywords:** surface roughness, scattering, BSDF function, scatterometer