



Badania porównawcze parametrów powierzchni gładkich metodami rozpraszania światła

dr JANUSZ JAGLARZ², dr inż. WOJCIECH KAPŁONEK³, WŁODZIMIERZ LIPIŃSKI¹,
mgr inż. MARCIN PAWEŁCZAK¹, dr inż. ROMUALD SYNAK¹

¹ Instytut Maszyn Matematycznych, Warszawa, ² Politechnika Krakowska, Instytut Fizyki

³ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny

Praktyczne wykorzystanie zjawiska rozpraszania światła do pomiaru wysokości nierówności powierzchni charakteryzujących się dużą gładkością zostało zapoczątkowane przez Bennetta i Porteusa, którzy zbudowali pierwszy układ działający na zasadzie pomiaru całkowitej mocy promieniowania rozproszonego przez powierzchnię TIS (ang. *Total Integrated Scatter*) [1]. Później pojawiły się inne sposoby zastosowania tego zjawiska, polegające m.in. na pomiarze kąтового rozkładu natężenia promieniowania rozproszonego ARS (ang. *Angle-Resolved Scatter*) [3]. Rozkład taki można wyznaczyć w wybranej płaszczyźnie i przedstawić go za pomocą indyktrys rozpraszania. Istnieje również możliwość jego przedstawienia przestrzennego. W tym przypadku stosowana jest dwukierunkowa funkcja rozkładu refleksyjności oznaczana akronimem BRDF (ang. *Bidirectional Reflectance Distribution Function*) lub BSDF (*Bidirectional Scatter Distribution Function*). Metody te i technika pomiarów została szeroko opisana w literaturze światowej (np. w pracach Stovera [16], Benett i Mattssona [2]), a także w monografiach krajowych [8, 12]. Zwięzły opis metod i przegląd aparatury pomiarowej podano też w pracy [18].

Pomimo powstania wielu innych technik bezstykowej oceny powierzchni gładkich, np., interferometrii i mikroskopii sił atomowych, umożliwiających uzyskanie topografii powierzchni i jej charakterystykę za pomocą bardzo wielu parametrów, metody rozpraszania światła są w dalszym ciągu intensywnie rozwijane. W wielu przypadkach, np. przy kontroli wyrobów istotny jest krótki czas pomiaru, niski koszt urządzenia i możliwość jego instalacji nawet w warunkach produkcyjnych. W takich warunkach często wystarczające jest zmierzenie kilku parametrów, a nawet jednego, którym jest najczęściej średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności. Dlatego oprócz dawniej już opisywanych urządzeń przeznaczonych do takich celów [17, 22, 23] ostatnio pojawiło się wiele nowych aparatów przenośnych [7, 14] lub podręcznych [14, 15]. Działanie tych przyrządów jest oparte na zasadzie ARS, brak jest natomiast takich urządzeń bazujących na pomiarze parametru TIS. Przyczyną tego jest dość duży koszt i gabaryty elementów służących do tego rodzaju pomiaru, którymi są sfery integracyjne (kule Ulbrichta) lub półkuliste zwierciadła wklęsłe (sfery Coblentza) [12, 16].

Z tego względu już wcześniej podjęto w Instytucie Maszyn Matematycznych (IMM) prace nad opracowaniem innego elementu integrującego [19], dla zakresu pomiaru chropowatości powierzchni większej od 1 nm, a obecnie są prowadzone prace nad nowym umożliwiającym pomiary poniżej tej wartości. Wyniki badań takiego elementu, nazwanego integratorem fotodiodowym, zostały przedstawione w pracy [20].

Wskutek mniejszej powierzchni integrującej nowy element charakteryzuje się mniejszym zakresem pasma częstotliwości przestrzennych niż urządzenia tradycyjne, co może być przyczyną błędów pomiarowych. Dlatego niezbędne było porównanie wyników pomiarów uzyskanych za pomocą integratora fotodiodowego z wynikami uzyskanymi przy użyciu dotąd stosowanych

rozwiązań. W tym celu w IMM opracowano kulę Ulbrichta umożliwiającą jej użycie na stanowisku pomiarowym przeznaczonym do badania nowego integratora, co zapewniło porównanie obu elementów w zbliżonych warunkach – przy tym samym źródle światła, układzie optycznym i pozycjonerze elementu badanego. Dodatkowo, w kooperacji z innymi ośrodkami zajmującymi się problematyką pomiarów parametrów powierzchni za pomocą metod rozpraszania światła, zostały przeprowadzone badania parametrów powierzchni metodami ARS. W Instytucie Fizyki Politechniki Krakowskiej (IF PK) wykonano pomiary funkcji BRDF, a na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej (WM PK) pomiary indyktrys rozpraszania.

Badania zostały wykonane przy użyciu próbek materiałowych obejmujących płytki krzemowe, zwierciadła optyczne, płytki wzorcowe oraz inne płytki metalowe. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane wyniki badań wraz z opisem zastosowanych metod i aparatury.

Badanie powierzchni metodą pomiaru całkowitego promieniowania rozproszonego (TIS)

Do obliczania wysokości nierówności powierzchni metodą TIS, zwaną też metodą integracyjną, wykorzystuje się zależności wynikające ze wzoru podającego związek między średnim kwadratowym odchyleniem wysokości nierówności σ , a stosunkiem refleksyjności zwierciadlanej R_r do refleksyjności całkowitej R_o [1]:

$$R_r/R_o = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (1)$$

gdzie θ_i – kąt padania światła na powierzchnię, λ – długość fali światła.

Reflektancje powierzchni z definicji oznaczają stosunek mocy promienistej światła odbitego do padającego, tzn. R_r jest stosunkiem mocy składowej odbitej zwierciadlanie P_r do mocy wiązki padającej P_p , reflektancja dyfuzyjna R_s jest stosunkiem mocy światła rozproszonego przez powierzchnię do P_p , a R_o – sumą R_r i R_s . Zależność (1) można stosować przy założeniu, że σ jest znacznie mniejsza, a odstęp między nierównościami znacznie większe od λ . Przy tych założeniach funkcję wykładniczą można przybliżyć za pomocą funkcji liniowej otrzymując:

$$\sigma \cong \frac{\lambda}{4\pi \cos \theta_i} \sqrt{TIS} \quad (2)$$

przy czym przez TIS rozumie się stosunek refleksyjności dyfuzyjnej do całkowitej. Jeżeli badana powierzchnia jest bardzo gładka, reflektancja dyfuzyjna jest bardzo mała w porównaniu ze zwierciadlaną i wówczas otrzymuje się:

$$TIS = R_s/R_o \cong R_s/R_r \quad (3)$$

oraz:

$$\sigma \cong \frac{\lambda}{4\pi \cos \theta_i} \sqrt{P_s/P_r} \quad (4)$$



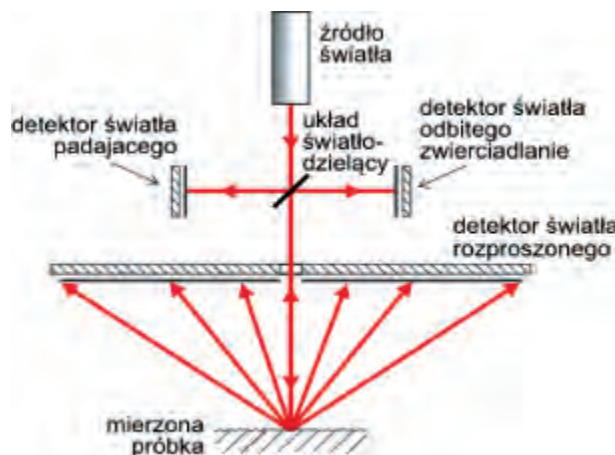
Warunkiem uzyskania prawidłowych wyników pomiaru jest by przyrząd pomiarowy mierzył całkowitą moc rozproszoną przez powierzchnię, a ponieważ promienie rozproszone rozchodzą się we wszystkich kierunkach nad powierzchnią, oznacza to potrzebę mierzenia promieniowania rozproszonego w zakresie kątów $0...360^\circ$ w kierunku azymutalnym i $0...90^\circ$ w kierunku biegunowym. Jakkolwiek pierwszy warunek jest łatwy do spełnienia, to nawet niepełne zrealizowanie drugiego wymaga zastosowania specjalnych urządzeń.

Najwcześniej wykorzystano do tego celu półkuliste zwierciadło wklęsłe Coblenza [1]. Wiązka światła pada na powierzchnię badaną przez otwór, a promienie rozproszone przez nią odbijają się od powierzchni zwierciadła i skupiają się na detektorze (fotodiodzie) umieszczonym w ognisku zwierciadła. Promień odbity zwierciadlanie od badanej powierzchni przechodzi przez otwór i pada na inny detektor. Sygnały elektryczne na wyjściu detektorów są proporcjonalne do mocy promienistej, co umożliwia łatwe obliczenie chropowości zgodnie ze wzorem (4).

Druga metoda mierzenia światła rozproszonego polega na zastosowaniu sfery całkującej (kuli Ulbrichta). Ponieważ do badań zastosowano aparaturę wykorzystującą ten sposób, na rys. 1 pokazano układ pomiarowy z takim urządzeniem.



Rys. 1. Układ do pomiaru parametru TIS z kulą Ulbrichta
Fig. 1. Unit for measuring TIS parameter with the Ulbricht sphere



Rys. 2. Układ do pomiaru parametru TIS z integratorem fotodiodowym
Fig. 2. Unit for measuring TIS parameter with the photodiode integrator

Wnętrze kuli jest pokryte materiałem o dużej refleksyjności dyfuzyjnej i charakterystyce lambertowskiej [13], w wyniku tego promieniowanie rozproszone przez próbkę odbija się dyfuzyjnie wielokrotnie od powierzchni wewnętrznej kuli. W rezultacie światło pada równomiernie na tę powierzchnię. Część mocy jest mierzona za pomocą detektora światła rozproszonego. Jeżeli wiązka światła pada na próbkę pod pewnym kątem Θ , światło odbite zwierciadlanie przechodzi na zewnątrz kuli przez oddzielny otwór i pada na detektor tego światła. Jeżeli natomiast kąt padania jest bliski normalnemu wraca ona przez ten sam otwór w kuli, co wiązka padająca i za pomocą odpowiedniego układu światłodzielnicy jest kierowana do detektora. Układ światłodzielnicy umożliwia ponadto wydzielenie części wiązki z lasera, dzięki czemu możliwe jest wyznaczenie mocy wiązki padającej i obliczenie refleksyjności powierzchni.

Zarówno jeden jak i drugi układ, umożliwiają pomiar promieni rozproszonych w zakresie kątów biegunowych od ok. 2° do $70-80^\circ$. Dolny kąt jest ograniczony do tej wartości z powodu potrzeby wydzielenia promienia odbitego zwierciadlanie za pomocą otworu w sferze. Zbyt duża jego wartość powoduje, że tracona jest część światła rozproszonego znajdująca się blisko wiązki odbitego zwierciadlanie, przez co może powstawać duży błąd pomiaru przy badaniu powierzchni bardzo gładkich. Duża wartość kąta górnego zakresu zapewnia natomiast pomiar mocy rozproszonej nawet przez powierzchnie o bardzo dużej chropowości.

Nowym układem do pomiaru chropowości powierzchni jest integrator fotodiodowy [20], którego główne elementy są pokazane na rys. 2.

Podstawowym zespołem układu jest fotodioda krzemowa o dużej średnicy zawierająca otwór, przez który przechodzi wiązka światła laserowego do elementu badanego. Promienie rozproszone przez powierzchnię padają na powierzchnię czynną fotodiody wywołując powstanie prądu o natężeniu proporcjonalnym do mocy promieniowania rozproszonego. Moc promieniowania padającego na powierzchnię badaną i odbitego od niej zwierciadlanie określa się analogicznie, jak w poprzednim układzie.

Jak można zauważyć, zakres górny kątów obejmujących promieniowanie rozproszone jest mniejszy niż w układach tradycyjnych. Można go zwiększyć przez zbliżenie integratora do próbki, ale wówczas promienie rozproszone padają pod większym kątem na powierzchnię fotodiody, co powoduje zmniejszenie sygnału pomiarowego. Ponadto przy zbliżeniu integratora zwiększa się wartość dolnego kąta, co może wpłynąć na błąd pomiaru chropowości. Jak wynika z przeprowadzonych analiz [21] i eksperymentów [20] można uzyskać odpowiednie warunki pracy układu, przy których dolna granica kątowa jest nie większa niż przy stosowaniu elementów sferycznych, a górna w przedziale $30...40^\circ$.

Wyniki badań porównawczych chropowości powierzchni przy zastosowaniu sfery integracyjnej i integratora fotodiodowego

Badania wykonano przy użyciu modelu integratora fotodiodowego oznaczonego symbolem IF 30, którego zewnętrzna średnica obszaru czynnego wynosi 30 mm, a średnica otworu wewnętrznego 2 mm. Do badań została opracowana kula integracyjna o średnicy 200 mm z warstwą rozpraszającą wykonaną z siarczanu baru. Zawiera ona dwa otwory: wejściowy o średnicy 10 mm i wyjściowy o średnicy 12 mm, które są usytuowane na osi kuli. Wartość minimalna zakresu kątowego wynosi $1,43^\circ$, a maksymalna ok. 80° . Do detekcji promieniowania rozproszonego służy fotodioda krzemowa wyposażona w układ wzmacniający. Kula została osadzona na regulowanej podstawie umożliwiającej jej pozycjonowanie liniowo w dwu kierunkach x i y i prostopadłych do osi wiązki światła i obrotowo. Kulę oznaczono symbolem K 20.



Do przeprowadzenia badań wykonano zestaw pomiarowy umożliwiający badanie próbek materiałowych zarówno przy użyciu integratora fotodiodowego jak i kuli integracyjnej. Jest on wyposażony w laser półprzewodnikowy wraz z układem kształtującym wiązkę światła, układ światłodzielnicy wraz z fotodiodami krzemowymi i ich obciążeniem oraz uchwyt próbki. Elementy te są zamocowane na przesuwnych podstawach umożliwiających również pozycjonowanie w dwu lub więcej kierunkach (np. badana próbka oprócz przesuwu w kierunku x lub y może być również obracana lub pochylana). Laser charakteryzuje się następującymi parametrami: moc wyjściowa ok. 3 mW, długość fali 635 nm, średnica wiązki 1 mm.

W badaniach wykorzystano następujące rodzaje próbek:

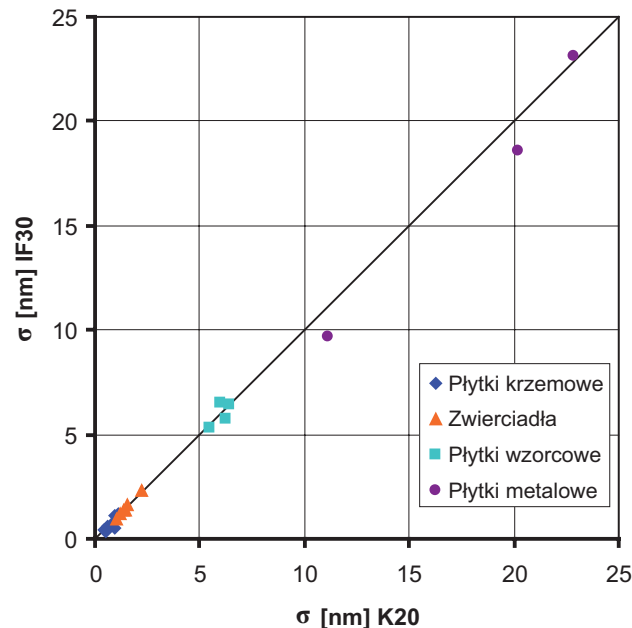
1. Płytki krzemowe (podłoża dla układów mikroelektronicznych), polerowane mechanicznie.
2. Zwierciadła optyczne o bardzo dużym współczynniku odbicia z warstwami naporowywanymi.
3. Płytki wzorcowe ze stali ŁH15, polerowane ręcznie.
4. Płytki metalowe z węgla wolframu, docierane mechanicznie.

Średnica próbek wynosi 25 lub 50 mm. Próbkę zostały zamontowane na podstawkach umożliwiających ich powtarzalne pozycjonowanie w uchwycie zestawu pomiarowego.

Wyniki badań średniego kwadratowego odchylenia wysokości nierówności σ

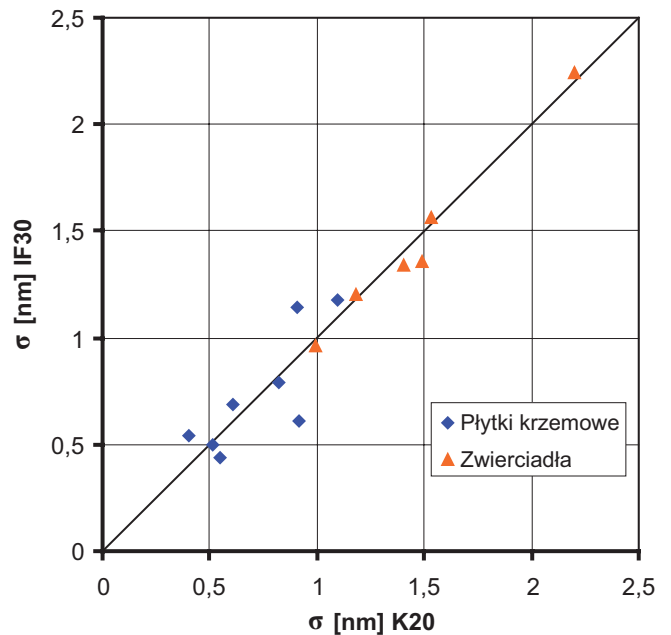
Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono porównanie wyników pomiarów chropowatości próbek uzyskanych za pomocą kuli integracyjnej K 20 i integratora fotodiodowego IF 30. Wartość dolna zakresu kąтового integratora wynosiła 2° , a górnego ok. 30° .

Jak wynika z porównania uzyskano dobrą zgodność wyników pomiarów wykonanych za pomocą kuli integracyjnej i integratora fotodiodowego. Większe różnice dotyczyły tych próbek, które charakteryzowały się znaczną zmiennością chropowatości na całej swojej powierzchni. W związku z przyjętym w badaniach sposobem pozycjonowania próbek w nominalnym położeniu pomiarowym powodowało to zwiększony rozrzut wyników.



Rys. 3. Porównanie wyników pomiarów chropowatości próbek uzyskanych za pomocą kuli integracyjnej K 20 i integratora fotodiodowego IF 30 dla zakresu $\sigma < 25$ nm

Fig. 3. Comparison of r.m.s. roughness measurements obtained using the integrating sphere K 20 and photodiode integrator IF 30 for $\sigma < 25$ nm



Rys. 4. Porównanie wyników pomiarów chropowatości próbek uzyskanych za pomocą kuli integracyjnej K 20 i integratora fotodiodowego IF 30 dla zakresu $\sigma < 2,5$ nm

Fig. 3. Comparison of r.m.s. roughness measurements obtained using the integrating sphere K 20 and photodiode integrator IF 30 for $\sigma < 2,5$ nm

Podobne wyniki chropowatości próbek uzyskano też na drugim stanowisku pomiarowym TIS zawierającym kulę Ulbrichta o średnicy 250 mm i wyposażonym w laser He-Ne mocy 8 mW.

Zestawienie zmierzonych parametrów zestawów próbek wykorzystanych w badaniach zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie parametrów próbek

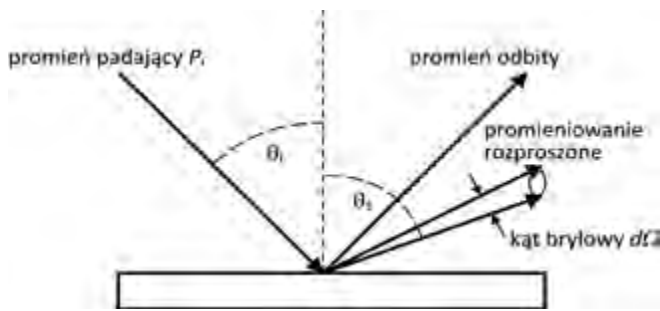
Tabl.1. Summary of sample parameters

Zestaw próbek	Chropowatość powierzchni σ [nm]	Reflektancja zwierciadłana R_r [%]	Reflektancja dyfuzyjna R_s [%]
Płytki krzemowe	0,44 – 1,18	35,0 – 35,9	0,003 – 0,021
Zwierciadła optyczne	0,95 – 2,24	93,9 – 98,7	0,033 – 0,176
Płytki wzorcowe	5,28 – 6,50	51,8 – 55,3	0,438 – 0,626
Płytki metalowe	9,70 – 23,14	36,5 – 44,2	1,445 – 4,447

Badanie powierzchni metodą pomiaru kąтового rozkładu promieniowania rozproszonego (ARS)

Badanie właściwości powierzchni na podstawie pomiaru kąowego rozkładu natężenia promieniowania rozproszonego odbywa się najczęściej przy wykorzystaniu układu mierzącego parametry określone na rys. 5.

Wiązka promieniowania laserowego o mocy P_i pada na badaną powierzchnię przy ustalonym kącie padania θ_i . W wyniku tego pod takim samym kątem propaguje się promień odbity zwierciadłanie, a pod kątami θ_s we wszystkich kierunkach nad powierzchnią promieniowanie rozproszone. Zależności między natężeniem promieniowania rozproszonego a mocą wiązki padającej jest wyrażane za pomocą dwukierunkowej funkcji rozkładu reflektancji BRDF [2, 16]:



Rys. 5. Parametry promieniowania mierzone przy badaniu metodą ARS

Fig. 5. Radiation parameters measured in ARS method

$$BRDF = \frac{dP / d\Omega}{P_i \cos \theta_s} \quad (5)$$

gdzie: dP – moc promienista rozproszona wewnątrz elementarnego kąta bryłowego, $d\Omega$ – elementarny kąt bryłowy.

Schemat ideowy układu do badania funkcji BRDF opracowanego w IF PK pokazano na rys. 6 [8].

Badana próbka jest umieszczona na stoliku goniometrycznym w którym można zmieniać kąt obrotu z krokiem $0,01^\circ$. Układ jest w pełni zautomatyzowany i umożliwia wykonywanie pomiarów w zakresach kątów padania, rozproszenia i odbicia od 8 do 88 stopni. Jako źródło światła zastosowano diodę laserową emitującą światło o długości fali 650 nm. Światło przechodzi przez filtr przestrzenny a następnie przez polaryzator, którego płaszczyzna polaryzacji może być zmieniana z dokładnością $0,1^\circ$. Natężenie światła rozproszonego przez próbkę jest rejestrowane na detektorze krzemowym lub za pomocą fotopowielacza półprzewodnikowego Hamamatsu. Zmianę kąta rozproszenia θ_s uzyskuje się za pomocą silnika krokowego. W trybie pomiarów BRDF przy ustalonym kącie padania, zmieniany jest w ustalonych granicach kąt rozpraszania. Powierzchnia oświetlana wynosi ok. 4 mm^2 co determinuje minimalne rozmiary próbki. Obszar o takim polu powierzchni jest wystarczająco duży do jej statystycznego opisu. Wyniki pomiarów prezentowane w pracy były wykonane dla polaryzacji „s” ze względu prostszą interpretację tych wyników. Aparatura

umożliwia badanie powierzchni o długości fali przestrzennej od 0,1 do kilkunastu mikrometrów [8]

Wyniki uzyskane z pomiarów promieniowania rozproszonego na powierzchni pozwalają na wyznaczenie funkcji widmowej gęstości mocy PSD [18], dzięki której uzyskuje się statystyczny opis topografii powierzchni. Funkcja PSD jest określona w dziedzinie częstotliwości przestrzennych f i zdefiniowana jako transformata Fouriera kwadratu profilu wysokości nierówności powierzchni $h(x,y)$ [2]. Przez fale przestrzenne rozumie my zmiany nierówności zachodzące w płaszczyźnie badanej powierzchni, natomiast przez częstotliwość przestrzenną f rozumie się liczbę fal przestrzennych na jednostkę skanowanej długości. Funkcja PSD wyraża moc sygnału wyznaczanego z pomiarów topografii powierzchni w funkcji częstotliwości przestrzennej.

Związek między funkcjami PSD i BRDF został wyprowadzony w oparciu o teorię wektorową Rayleigh'a – Rice'a [4], w której uwzględniana jest również zmiana polaryzacji fali świetlnej po rozproszeniu od nierówności. Wyraża go równanie:

$$BRDF = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos \theta_i \cos \theta_s Q S(f_x, f_y) \quad (6)$$

gdzie θ_s – kąt rozproszenia, Q – bezwymiarowy czynnik zależny od azymutalnego kąta rozproszenia φ , uwzględniający także polaryzację światła padającego i optyczne właściwości powierzchni, $S(f_x, f_y)$ – dwuwymiarowa funkcja PSD powierzchni odbijającej, a f_x, f_y – częstotliwości przestrzenne nierówności.

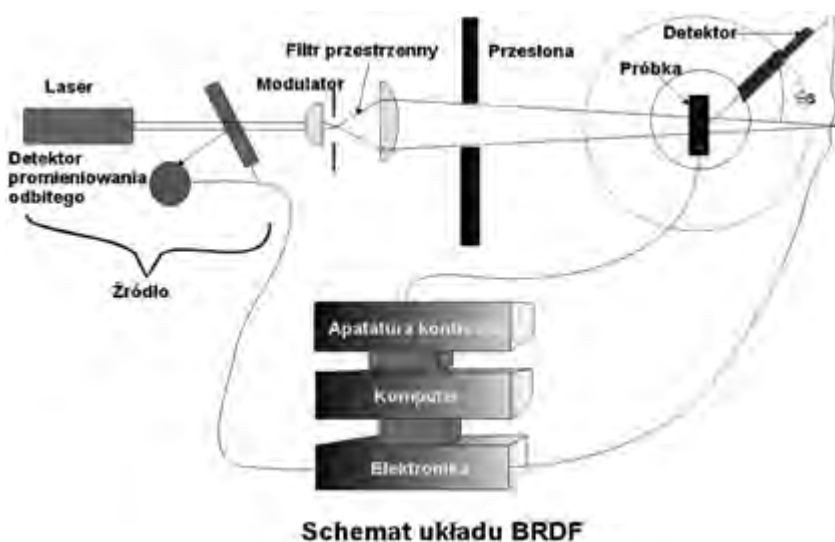
Znalezienie funkcji widmowej gęstości mocy dla badanych powierzchni i warstw w możliwie jak największym zakresie częstotliwości przestrzennych pozwala na obliczenie najważniejszych parametrów makroskopowych charakteryzujących tę powierzchnię. Należą do nich: chropowatość σ , nachylenie profilu, długość autokorelacji l i inne. W praktyce najczęściej się ją wykorzystuje w przypadku powierzchni jednokierunkowych lub izotropowych, gdy PSD jest funkcją jednej częstotliwości przestrzennej f . Wówczas dla powierzchni o losowym rozkładzie wysokości nierówności przyjmuje się, że jest on opisany funkcją Gaussa lub Lorentza, a funkcję PSD przedstawia na wykresie o współrzędnych logarytmicznych i aproksymuje za pomocą następującej zależności (tzw. model ABC) [2]:

$$PSD(f) = A[1 + (Bf)^2]^{-C/2} \quad (7)$$

gdzie A jest wartością funkcji PSD dla małych częstotliwości przestrzennych, B jest punktem przegięcia, a C nachyleniem funkcji przy dużych częstotliwościach. Znając te wielkości ze wzoru $B/(2\pi)$ oblicza się długość korelacji l rozkładu nierówności, a ze wzoru $(\pi/A)^{1/2}$ wartość σ .

Wyniki badań

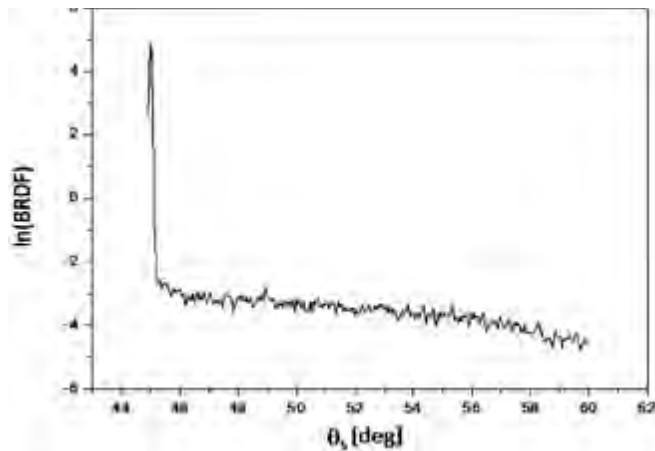
Opisana aparatura i przedstawione zależności zostały wykorzystane do pomiaru kątowych rozkładów chropowatości powierzchni wybranych próbek materiałowych oraz parametrów powierzchni: chropowatości σ i długości autokorelacji l . Badania przeprowadzono dla próbek opisanych w poprzednim rozdziale, a m.in. płytek krzemowych i metali, gdyż charakteryzują się one skrajnymi wartościami parametru σ .



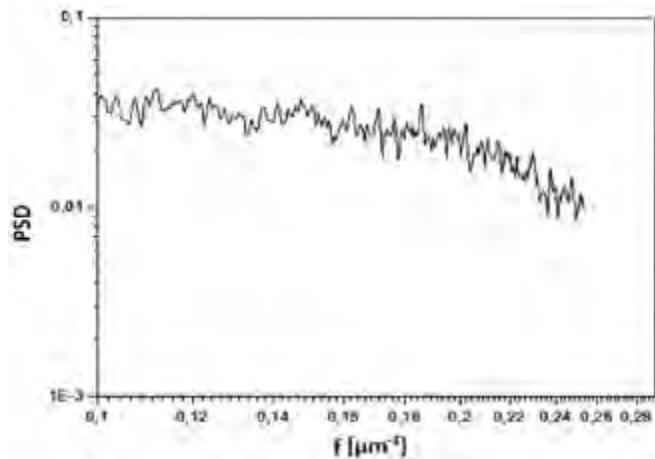
Rys. 6. Schemat ideowy układu do pomiaru funkcji BRDF
Fig. 6. Schematic diagram of the unit for BRDF measurement



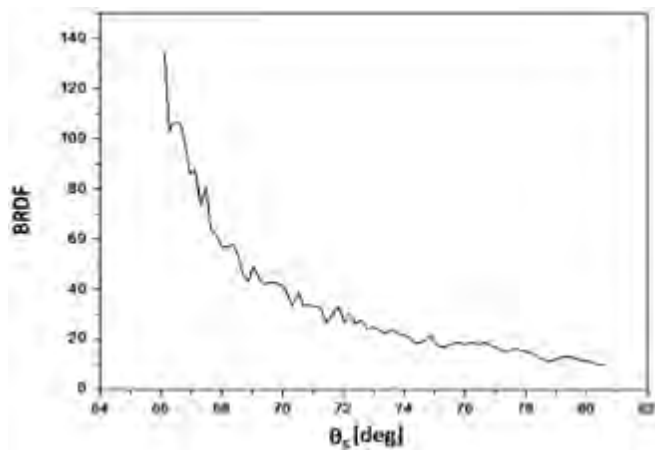
Na rysunkach pokazano przebiegi funkcji BRDF i BSDF dla niektórych powierzchni. Na rys. 7 pokazano charakterystykę BRDF płytki krzemowej, a na rys. 8 obliczoną na jej podstawie funkcję PSD.



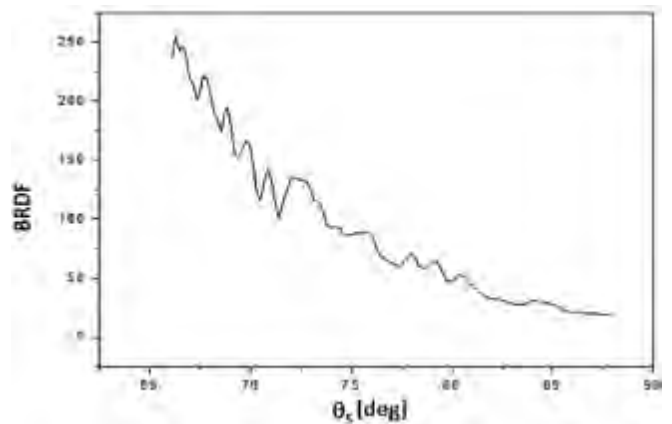
Rys. 7. Wykres funkcji BRDF dla płytki krzemowej (próbka Si 47)
Fig. 7. BRDF of the silicon wafer sample no. Si 47



Rys. 8. Wykres funkcji PSD dla płytki krzemowej (próbka Si 47)
Fig. 8. PSD of the silicon wafer sample no. Si 47



Rys. 9. Wykres funkcji BRDF (jednostki umowne) dla powierzchni metalowej (próbka M 11)
Fig. 9. BRDF (conventional units) of the metal surface sample no. M 11



Rys. 10. Wykres funkcji BRDF (jednostki umowne) dla powierzchni metalowej (próbka M 22)
Fig. 10. BRDF (conventional units) of the metal surface sample no. M 22

Na kolejnych rysunkach 9 i 10 pokazano przebieg funkcji BRDF dla dwóch płytek metalowych.

Jak należało oczekiwać dla powierzchni metalowych zakresy kątów θ_s , w których zawiera się istotna dla wyznaczenia parametru σ część promieniowania rozproszonego są znacznie większe niż dla płytek krzemowych. Na podstawie wykresów można stwierdzić, że nie przekraczają one jednak 30° dla badanych próbek (ich parametr σ wynosi ok. 20 nm).

W tabeli 2 przedstawiono wartości chropowatości i długości korelacyjnych wyznaczonych przez dopasowanie modelu ABC do funkcji PSD. Pokazano w niej również wyniki pomiarów chropowatości uzyskane za pomocą sfery integracyjnej.

Tab. 2. Zestawienie wyników pomiarów

Tabl. 2. Summary of measurement results

Próbka	l [nm]	σ [nm] (ARS)	σ [nm] (TIS)
Si 47	1970	1,1	0,79
Si 77	1760	1,45	1,36
Z 64	–	5,6	2,3
M 11	720	15	21
M 21x	1060	8,7	11,4
M 21y	1130	11,6	
M 22x	660	15	22,1
M 22y	590	12,9	

Jak wynika z tabeli powierzchnie o większej gładkości charakteryzują się większą długością autokorelacji wynoszącą ok. 2000 nm. Powierzchnie metali docieranych mechanicznie mają wartość tego parametru poniżej 1000 nm. Porównując wielkości parametru σ mierzonego metodą ARS i TIS można stwierdzić, że są one dość zgodne, jeżeli uwzględni się takie czynniki, jak rozrzuty tej wielkości na powierzchni, odmienność warunków badań i różne sposoby ich obliczania.

Badanie powierzchni zmodyfikowaną metodą pomiaru kątownego rozkładu natężenia promieniowania rozproszonego (ARS)

Pomiary skaterometryczne, w których wykorzystuje się metody ARS, mogą być zastosowane do oceny szerokiej gamy powierzchni, charakteryzujących się różną wysokością nierówności.



Zazwyczaj odnosi się to do dwóch grup takich powierzchni:

- o małych wysokościach nierówności, charakteryzujących krzemowe podłoża układów scalonych, powierzchnie elementów optycznych i metale po precyzyjnej obróbce gładkościowej [5, 6],
- o wysokościach nierówności występujących w precyzyjnie obrabianych częściach maszyn, np. w procesach szlifowania, polerowania, precyzyjnego toczenia [22].

Oprócz opisanej w poprzednim rozdziale metody polegającej na goniometrycznym pomiarze funkcji BRDF, stosowane są także inne sposoby badania światła rozproszonego, w której do pomiaru natężenia promieniowania stosuje się fotodiody i matryce CCD [12]. Zmodyfikowaną metodę ARS opracowano też w WM PK w zespole prof. Cz. Łukianowicza. Polega ona na wykorzystaniu cyfrowego obrazu światła rozproszonego rejestrowanego w sposób statyczny [9] lub dynamiczny [10] i jego odpowiedniej komputerowej analizy za pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania komputerowego. W tym przypadku obraz optyczny światła rozproszonego jest nośnikiem informacji o stanie badanej powierzchni. Interpretacja otrzymanych wyników może posłużyć do wnioskowania o parametrach powierzchni, a w niektórych przypadkach również umożliwić korelację parametrów obrazu (geometrycznych, fotometrycznych) z wybranymi parametrami struktury geometrycznej powierzchni. Metodę zastosowano do oceny powierzchni metalicznych i innych, m. in. ściernych [11].

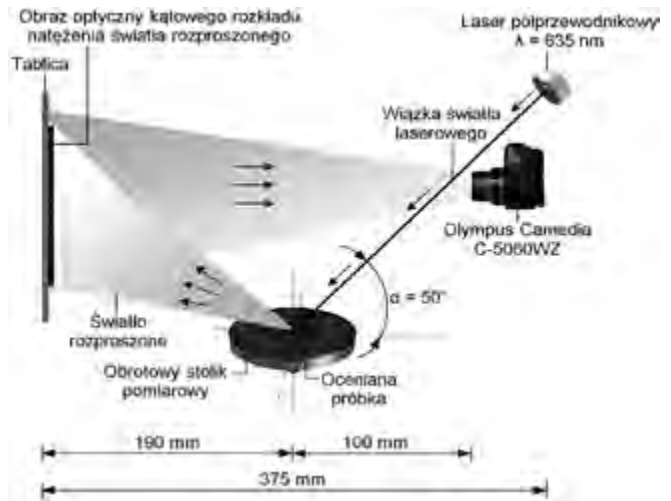
W niniejszym przypadku metoda została zastosowana do oceny próbek materiałów, szerzej scharakteryzowanych w pierwszym rozdziale artykułu. Akwizycja obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dokonywana była na stanowisku pomiarowym wykorzystującym obrotowy stolik pomiarowy z uchwytem do mocowania próbek oraz uchwyt do mocowania źródła światła i cyfrowego aparatu fotograficznego. Stolik pomiarowy umożliwiał realizację precyzyjnych przemieszczeń próbki o dany kąt z dokładnością ustawienia i odczytu wynoszącą 0,01 mm. W uchwycie do mocowania źródła światła osadzono laser półprzewodnikowy CPS180 firmy Thorlabs, Inc. (USA) emitujący w sposób ciągły wiązkę światła z zakresu widzialnego o długości fali 635 nm. Wiązka skierowana pod kątem padania równym 50° , oświetla badaną powierzchnię tworząc na niej plamkę o średnicy 1 mm.

Fala światła padającego na powierzchnię odbija się od niej i częściowo rozprasza tworząc w płaszczyźnie obserwacji obraz optyczny światła rozproszonego. Płaszczyzną obserwacji jest matowy ekran, z naniesioną podziałką służącą do wstępnego szacowania wymiarów geometrycznych powstającego obrazu.

Akwizycji dokonano za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego Camedia C-5060WZ firmy Olympus ze zdalnym wyzwalaczem migawki RM-2 IR. Aparat wyposażony był w zmiennoogniskowy obiektyw 5,7...22,9 mm zapewniający 4-krotny zoom optyczny. Elementem detekcyjnym był matrycowy detektor fotoelektryczny typu CCD o wymiarach 1/1,8" i efektywnej liczbie 5.1 miliona pikseli. Aparat ustawiony był na statywie i skierowany w stronę płaszczyzny obserwacji. Na rysunku 11 przedstawiono schematycznie układ stanowiska pomiarowego wraz z podstawowymi wymiarami.

Akwizycja obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dokonywana była dla trzech ustawień próbki względem padającej wiązki światła laserowego, wynoszących odpowiednio 0° , 45° i 90° . We wszystkich przypadkach obszar oświetlany znajdował się w centralnej części próbki.

Zarejestrowane obrazy poddano przetwarzaniu i analizie korzystając ze specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Program ImageJ 1.42 posłużył do przeprowadzenia procesu bi-



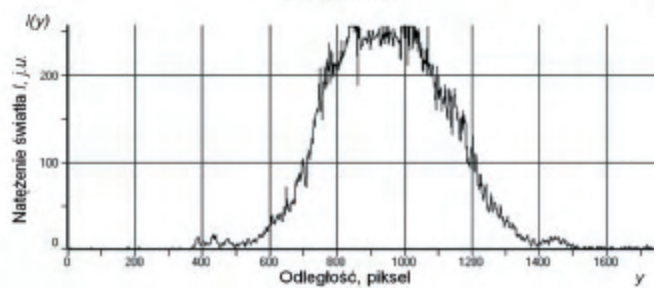
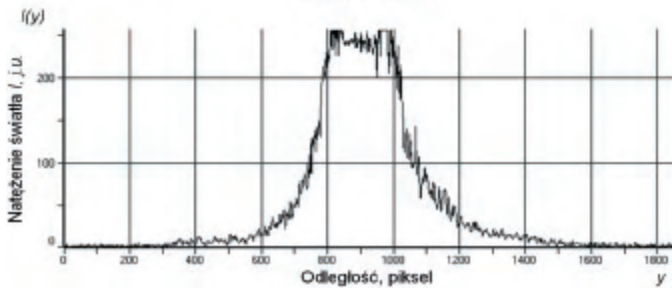
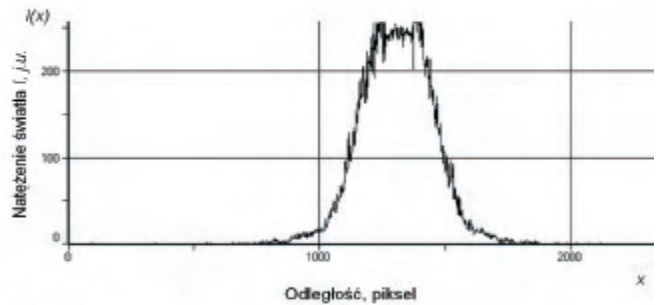
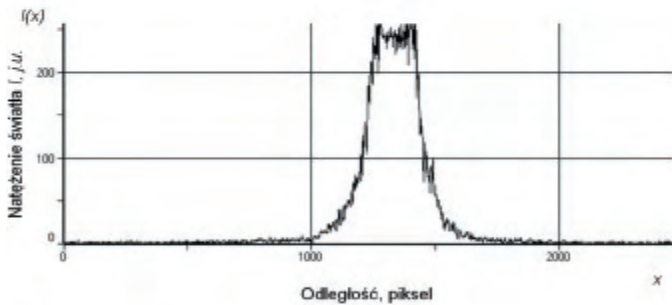
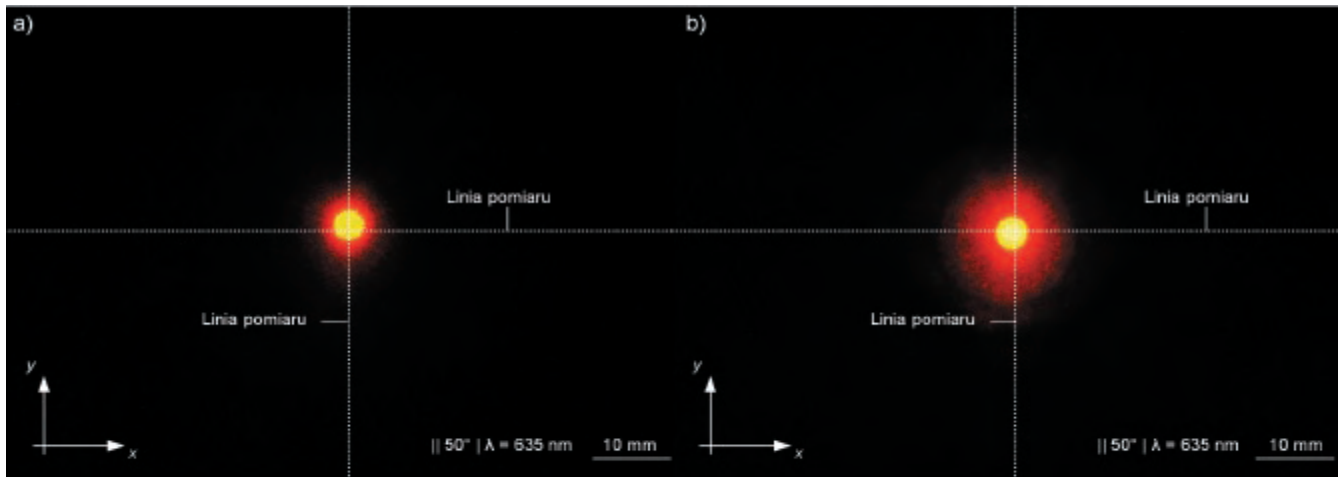
Rys. 11. Schemat stanowiska pomiarowego przeznaczonego do akwizycji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego Fig. 11. Schematic diagram of measurement setup for acquisition of images of angular distribution of the scattered light intensity

naryzacji obrazów, natomiast Image-Pro® Plus 5.1 do wyznaczenia średnich wartości wybranych parametrów geometrycznych obiektów w ocenianych obrazach, takich jak pole powierzchni i średnica obrazu optycznego światła rozproszonego. Dodatkowo oprogramowanie Image-Pro® Plus 5.1 posłużyło do przeprowadzenia analizy densytometrycznej. Jest ona przydatna dla prac nad nowym układem pomiarowym TIS i dlatego na rys. 12 przedstawiono przykładowe wyniki takiej analizy przeprowadzonej dla próbek S1 i Z2. Pokazane profile przedstawiają zależność natężenia światła $I(j, \text{umowna})$ w funkcji odległości (piksele).

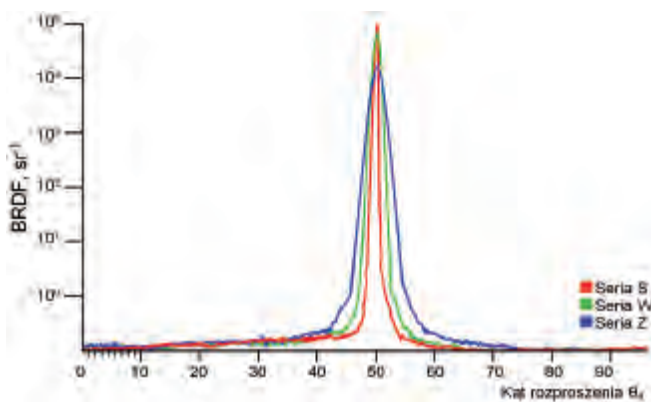
Obrazy światła rozproszonego na rysunku 12 zostały dobrane tak, aby przedstawić przypadki w których natężenie światła jest małe (rys. 12a) oraz względnie duże (rys. 12b). Obserwacja wizualna obrazów może być w tym przypadku wsparta analizą densytometryczną. Jak można zaobserwować na powyższym zestawieniu pewne ograniczenia w takiej analizie mogą wynikać m.in. z nasycenia centralnych obszarów obrazów światła rozproszonego. Powoduje ono spłaszczenie górnych części indykatorów rozproszenia uzyskiwanych w wybranych przekrojach, a tym samym utratę pewnej części informacji o natężeniu światła. W rozpatrywanym przypadku wynika to głównie z zastosowanego detektora CCD o niewielkim zakresie dynamicznym, wykorzystanego w elektronice użytkowej.

Uzyskane z analizy densytometrycznej horyzontalne $I(x)$ i wertykalne $I(y)$ profile rozkładów światła rozproszonego w funkcji odległości można przedstawić również w funkcji kąta. W tym celu korzysta się z zależności, opisującej dwukierunkową funkcję rozkładu refleksyjności BRDF. Na rysunku 13 przedstawiono rezultaty uzyskane z wykorzystaniem tej funkcji dla próbek serii S, W i Z, oświetlanych wiązką światła laserowego pod kątem padania równym 50° .

Analizując powyższy wykres, można zauważyć, że dla wszystkich rozpatrywanych powierzchni zachodzi silne odbicie zbliżone do zwierciadlanego. Tylko w niewielkim stopniu odbicie to zaburzone jest składowymi dyfuzyjnymi oraz szumami koherentnymi źródła światła. Uzyskane rezultaty potwierdzają bardzo dobre właściwości odbiciowe analizowanych powierzchni charakteryzujących się stosunkowo niewielkimi wysokościami nierówności z zakresu 0,5...25 nm, a także wykazują, że maksymalne kąty rozproszenia światła mieszczą się zależnie od próbki w granicach 15–25°.



Rys. 12. Przykładowa analiza densytometryczna przeprowadzona dla próbek: a) S1, b) Z2. Zestawienie przedstawia (od góry): obraz rzeczywisty, wydzielony profil horizontalny $I(x)$, wydzielony profil wertykalny $I(y)$
 Fig. 12. Exemplary of densitometric analysis carried out for images of scattered light acquired for tested samples: a) S1, b) Z2. The analysis shows (from top): the real image, extracted horizontal profile $I(x)$, extracted vertical profile $I(y)$



Rys. 13. Zależność dwukierunkowej funkcji rozkładu reflektancji BRDF od kąta rozproszenia θ_d dla powierzchni próbek serii S, W i Z
 Fig. 13. Dependence of BRDF on scatter angle θ_d for surface of the sample series S, W and Z

Zakończenie

Głównym celem opisanych prac było sprawdzenie zgodności wyników pomiarów chropowatości powierzchni gładkich uzyskiwanych za pomocą nowego urządzenia działającego na zasadzie metody TIS – integratora fotodiodowego z wynikami otrzymanymi przy użyciu jednego z obecnie stosowanych rozwiązań – sfery całkującej. Zadanie takie zrealizowano przez zbudowanie zestawu pomiarowego, w którym mierzono chropowatość próbek materiałowych za pomocą modelu integratora o średnicy zewnętrznej 30 mm i sfery o średnicy 200 mm. Próbkę były wykonane z płytek krzemowych, zwierciadeł optycznych i precyzyjnie polerowanych płytek metalowych, których zakres wartości średniego kwadratowego odchylenia wysokości nierówności σ wynosił od ok. 0,5 do ok. 25 nm. Badania wykazały dużą zgodność wyników uzyskanych za pomocą obu przyrządów. Zgodne z nimi były też wyniki pomiarów niektórych próbek otrzymane za pomocą drugiej metody – ARS na laboratoryjnym stanowisku do goniometrycznego badania funkcji BRDF.



Drugim celem prac było doświadczalne sprawdzenie poprawności założeń przyjmowanych przy projektowaniu integratora, a szczególności dotyczących jego pasma kątownego, które w stosunku do sfer integracyjnych jest ograniczone od góry i może być przyczyną błędów pomiaru powierzchni mniej gładkich. Dlatego zbadano rozkłady kątów rozproszenia promieniowania odbitego od powierzchni za pomocą metody ARS przy użyciu goniometru i zmodyfikowanej metody ARS polegającej na rejestracji fotograficznej obrazu światła rozproszonego. Badania wykazały, że kąty te mieszczą się w granicach zakładanych dla integratora. Przeprowadzono także badania długości korelacji nierówności powierzchni w wyniku, których można stwierdzić, że przyjęta dolna wartość zakresu kątownego jest też właściwa.

Integrator fotodiodowy jest znacznie mniejszym elementem pomiarowym niż sfera integracyjna, jak widać z porównania ich gabarytów, co umożliwia budowę podręcznego przyrządu przeznaczonego do kontroli powierzchni gładkich. Jego górna granica pomiaru σ przez zwiększenie średnicy integratora mogłaby być nawet ok. 40 nm, tj. osiągać wartość uważaną często jako granicę stosowalności metody TIS przy użyciu źródła światła czerwonego, a laser diodowy emitujący takie światło najlepiej nadaje się do wskazanych zastosowań przyrządu.

Autorzy z Instytutu Maszyn Matematycznych składają serdeczne podziękowanie Panu mgr. Henrykowi Mrozińskiemu za opracowanie stanowiska badawczego TIS z laserem He-Ne i przeprowadzenie na nim badań oraz za liczne rady dotyczące techniki pomiarów skaterometrycznych.

Artykuł został opracowany w ramach projektu sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań.

Literatura

- [1] Bennett H. E., Porteus J. O.: Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence, *J. of the Opt. Soc. of Am.*, Vol. 51, No. 2, 123–129, 1961.
- [2] Bennett J. M., Mattsson L.: *Introduction to Surface Roughness and Scattering*, Optical Society of America, 2 nd. ed. Washington, DC, 1999.
- [3] Church E. L., Jenkinson A. A., Zavada J. M.: Measurement of the finish of diamond-turned metal surfaces by differential light scattering, *Opt. Eng.*, Vol. 16, No. 4, 360–374, 1977.
- [4] Church E. L., H. A. Jenkinson H. A., J. M. Zavada J. M.: Relationship between surface scattering and microtopographic features, *Opt. Eng.*, Vol. 18, No. 2, 125–136, 1979.
- [5] Ding P., Díaz R.E., Hirlman E. D.: Light scattering study of roughness and dishing on post-CMP wafers (in:) *Chemical Mechanical Planarization IV*, Opila R. L. (ed.), 56–75, 2000.
- [6] Duparré A.: Light scattering techniques for the inspection of microcomponents and microstructures (in:) *Optical Inspection of Microsystems*, W. Osten (ed.), CRC Press, New York, 103–119, 2006.
- [7] Finck, von, A., Hauptvogel A., Duparré A.: Instrument for close-to-process light scatter measurements of thin film coatings and substrates, *Appl. Opt.* 50, C321–C328, 2011.
- [8] Jaglarz J.: *Metody optyczne w badaniach powierzchni i powłok rzeczywistych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Seria Podstawowe Nauki Techniczne, Monografia 348, Kraków 2007.
- [9] Kapłonek W., Łukianowicz Cz.: Ocena mikronierówności powierzchni obrobionych na podstawie obrazu światła rozproszonego, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 56, Nr 1, 28–29, 2010.
- [10] Kapłonek W., Łukianowicz Cz.: Assessment of surface roughness in movement by image stacking (in:) *Proceedings of the 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces*, Rzeszów, 295–299, 2009.
- [11] Kapłonek W., Łukianowicz Cz., Nadolny K.: Methodology of the assessment of the abrasive tool's active surface using laser scatterometry. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 36, No. 1, 49–66, 2012.
- [12] Łukianowicz Cz.: *Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001.
- [13] Polska Norma: *Optyka i przyrządy optyczne. Metody badania promieniowania Rozproszonego przez elementy optyczne*. PN-EN ISO 13698, 2005.
- [14] Schröder S., Trost M., Herfurth T., von Finck A., Duparré A.: Sophisticated light scattering techniques from the UV to IR regions, *Proc. SPIE* 8495, 84950V, 2012.
- [15] Seewig J., Beichart G., Brodmann R., Bodschnwinna H., Wendel M.: Extraction of shape and roughness using scattering light, *Proc. SPIE* 7389, 73890N, 2009.
- [16] Stover J.C.: *Optical Scattering. Measurement and Analysis*. 3rd. ed., SPIE Press, Bellingham, WA, 2012.
- [17] Stover J. C., Skurdal V., J. Bender, Chausse J. P.: Design review of a hand held scatterometer, *Proc. SPIE* 1331, 195–199, 1990.
- [18] Synak R., Ryżko J.: Metody i aparatura do badania parametrów powierzchni przy wykorzystaniu zjawiska rozpraszania światła, *Elektronika*, nr 11, 97–100, 2011.
- [19] Synak R. i inni: Laserowy przyrząd do oceny chropowatości powierzchni na podstawie pomiaru parametru TIS, *Techniki Komputerowe IMM, XLI*, nr 1, 67–75, 2006.
- [20] Synak R., Lipinski W, Pawelczak M.: Roughness evaluation of very smooth surfaces using a novel method of scatter measurement, *Proc. SPIE* 8495, 849512, 2012.
- [21] Synak R.: Analysis and optimization of a total integrating scatter measuring unit based on a photodiode integrator, *Opt. Eng.*, Vol. 51, No. 11, 113601, 2012.
- [22] Valliant J. G., Foley M. P., Bennett J. M.: Instrument for on-line monitoring of surface roughness of machined surfaces. *Opt. Eng.*, Vol. 39, No. 12, 3247–3254, 2000.
- [23] Wang S., Tian Y., Tay C. J., Quan C.: Development of a laser scattering based probe for on-line measurement of surface roughness, *Appl. Opt.*, Vol. 42, No. 7, 1318–1324, 2003.