



## Metody i aparatura do badania parametrów powierzchni przy wykorzystaniu zjawiska rozpraszania światła

dr inż. ROMUALD SYNAK, mgr inż. JAN RYŻKO

Instytut Maszyn Matematycznych, Warszawa

Zjawisko rozpraszanie światła jest już od dość dawna wykorzystywane do pomiarów chropowatości i innych parametrów powierzchni, np. refleksyjności. Na rozwój metod opartych na tym zjawisku wpłynęły takie ich cechy jak: bezstykowy sposób pomiaru, możliwość pomiaru nawet skrajnie małych wysokości nierówności, mały czas pomiaru. Zalety te sprawiają, że metody rozproszeniowe (nazywane też skaterometrycznymi) znajdują liczne zastosowania w dziedzinach zaliczanych do tzw. wysokiej technologii. W elektronice są wykorzystywane w badaniach i kontroli podłożowych płytek krzemowych, warstw cienkich, dysków magnetycznych, podłoży szklanych i ceramicznych itp. [3, 7, 9, 10], a w optyce w ocenie zwierciadeł, soczewek i innych podzespołów [2, 4, 10]. Również w pomiarach powierzchni bardzo gładkich elementów mechanicznych, np. płytek wzorcowych metody rozproszeniowe mogą być korzystniejsze niż standardowe (warsztatowe) profilometry składowe ze względu na ich niewystarczającą wtedy rozdzielczość. Bezstykowy sposób pomiaru może też być cenną zaletą, gdy chodzi o kontrolę elementów w czasie ich ruchu.

### Metody pomiarowe

Obszerne omówienie różnych metod pomiarowych powierzchni można znaleźć w pracach [4, 5]. Przy wykorzystaniu zjawiska rozpraszania najczęściej stosowane są metody reflektometryczne (odbiciowe), integracyjne i różniczkowe [6].

Przy metodach reflektometrycznych do obliczania wysokości nierówności powierzchni wykorzystuje się zależność między odchyleniem standardowym tej wysokości  $\sigma$ , a stosunkiem refleksyjności zwierciadlanej  $R_s$  do refleksyjności całkowitej  $R_o$ :

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

gdzie  $R_s$  jest stosunkiem mocy wiązki odbitej  $P_s$  do mocy wiązki padającej  $P_i$ ,  $R_o$  – sumą refleksyjności odbitej i dyfuzyjnej  $R_o = P_o/P_i$ ,  $\theta_i$  – kątem padania, a  $\lambda$  – długością fali. Zależność tę można stosować zakładając, że  $\sigma$  jest znacznie mniejsze, a odstępy między nierównościami znacznie większe od  $\lambda$ . Stosując tę metodę mierzymy moc wiązki odbitej, a także moc wiązki rozproszonej w jednym, lub kilku kierunkach.

Z metodami reflektometrycznymi związane są ściśle metody integracyjne, przy których mierzymy całkowitą moc promieniowania rozpraszanego we wszystkich kierunkach. W języku angielskim stosuje się tu określenie *total integrated scatter* (lub *scattering*) i oznacza się symbolem  $TIS = R_o/R_s$ , czyli stosunek refleksyjności dyfuzyjnej do zwierciadlanej [10], wówczas:

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

Dla przeprowadzenia tego pomiaru wykorzystuje się specjalne układy jak: półkuliście zwierciadło wklęsłe zwane zwierciadłem Coblentza [3], kulę całkującą (nazywaną też kulą Ulbrichta), której wewnątrz pokryte jest materiałem rozpraszającym [10], lub inne rozwiązania jak np. zintegrowaną głowicę pomiarową [12].

Z kolei metody różniczkowe, zwane też ARS od *Angle-Resolved-Scatter*, wymagają pomiaru rozkładu kąтового mocy promienistej światła rozproszonego. Jeśli pomiaru dokonujemy tylko w płaszczyźnie padania światła, to rozkład ten będzie funkcją jednej zmiennej, zwykle kąta rozproszenia  $\theta_\phi$  dając tzw. indykatory rozproszenia. Jeśli wyznaczymy rozkład przestrzennie, będzie on także funkcją azymutalnego kąta rozproszenia  $\phi$  i wówczas uzyskamy rozkłady oznaczone symbolami *BRDF* (*Bidirectional Reflectance Distribution Function* – dwukierunkowa funkcja rozkładu refleksyjności) lub *BSDF* (*Bidirectional Scatter Distribution Function* – dwukierunkowa funkcja rozkładu rozproszenia). Ta pierwsza została określona [8] jako stosunek mocy zawartej w elementarnym kącie bryłowym do mocy promienistej padającej na jednostkę powierzchni:

$$BRDF = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos \theta_i \cos \theta_\phi Q S(f_x, f_y) \quad (3)$$

gdzie  $\theta_\phi$  – kąt rozproszenia,  $Q$  – bezwymiarowy czynnik zależny od azymutalnego kąta rozproszenia  $\phi$ , uwzględniający także polaryzację światła padającego i optyczne właściwości powierzchni,  $S(f_x, f_y)$  – dwuwymiarowa funkcja gęstości widmowej nierówności powierzchni odbijającej, a  $f_x, f_y$  – częstości przestrzenne nierówności.

Opisane metody różniczkowe są stosowane do bardzo małych nierówności powierzchni. Można je również stosować do większych nierówności, co jednak wymaga kalibracji urządzeń pomiarowych przy wykorzystaniu odpowiednich wzorców. Rozkład natężenia światła rozproszonego mierzy się często metodą goniometryczną lub za pomocą linijek fotodetektorów, z których sygnały są analizowane za pomocą komputera, a wyniki przedstawiane w postaci indykatory rozproszenia.

Oprócz wyżej stosowanych metod stosowane są jeszcze metody wykorzystujące optyczne przekształcenie Fouriera. Tu również określa się rozkład kątowy światła rozproszonego, ale rejestracji dokonuje się tylko w niewielkim zakresie kątów rozproszenia. Przekształcenie Fouriera może być realizowane za pomocą specjalnych soczewek, aby odległość obiektu od obszaru Fraunhofera nie była zbyt duża. Zaletą jest tu nieznaczny wpływ ruchu powierzchni na postać i położenie obszaru dyfrakcyjnego.

### Aparatura

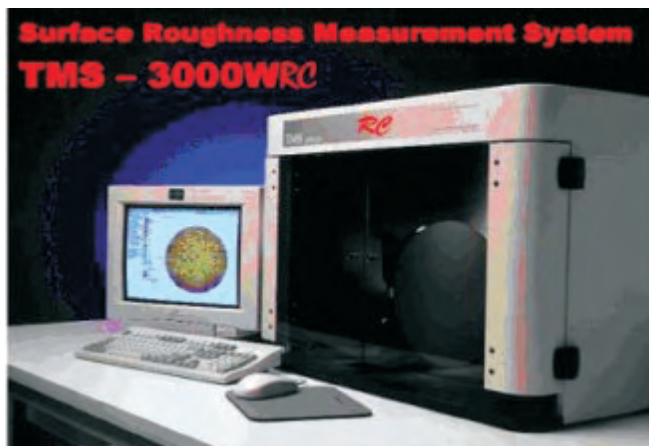
Obecnie najczęściej stosowane są metody integracyjne i różniczkowe. Dlatego ograniczymy się do pokazania kilku urządzeń pomiarowych działających tymi metodami na przykładach firm z USA: Schmitt Measurement Systems Inc. (SMS) [14] i PerkinElmer [13]. Pierwsza z nich, mająca swą siedzibę w Portland, stan Oregon, ma w swym katalogu całą gamę systemów zarówno uniwersalnych jak i przeznaczonych do określonych zastosowań.

### Urządzenia wykorzystujące metody integracyjne

Na rysunku 1. [14] pokazano urządzenie TMS-2000RC, które wykorzystywane jest przez producentów twardych dysków komputerowych do pomiarów chropowatości ich powierzchni. Jako źródło



Rys. 1. Urządzenie TMS-2000RC firmy Schmitt Measurement Systems do pomiarów dysków  
Fig. 1. TMS-2000RC device for magnetic disc measurement



Rys. 2. Urządzenie TMS-3000WRC do płytek krzemowych  
Fig. 2. TMS-3000WRC device used for silicon wafer



Rys. 3. Uniwersalny zestaw do pomiaru refleksyjności firmy Perkin-Elmer  
Fig. 3. The Universal Reflectance Accessory of Perkin-Elmer

światła stosowany jest tu laser o długości fali 670 nm. Pozwala ono określać średnią wysokość nierówności  $R_a$  lub odchylenie standardowe nierówności powierzchni  $\sigma$ , a także refleksyjność: zwierciadlaną, dyfuzyjną i całkowitą, oraz parametr TIS. Dokonuje 100 pomiarów na sekundę. Dokładność przy obrocie wynosi 0,05 stopnia, a przy przesuwie 0,03 mm. Firma SMS twierdzi, że zastosowanie tego urządzenia pozwala na 4-krotne zwiększenie wydajności przy produkcji dysków.

Następną grupą przyrządów specjalizowanych są urządzenia TMS 2000W-RC i TMS 3000W-RC przeznaczone do kontroli produkcji płytek krzemowych. Już wcześniej [7, 9] zwracano uwagę na przydatność tego rodzaju urządzeń pomiarowych w tych zastosowaniach. Większość ich parametrów jest zbliżona do tych, jakie podano wyżej dla TMS-2000RC. Drugie z wymienionych urządzeń pokazano na rys. 2. [14]. Jest interesującym, że przednia strona tych płytek kontrolowana jest dla znacznie mniejszych nierówności powierzchni (średnio około 0,3nm), aniżeli strona tylna – około 9 nm.

Kule integracyjne (Ulbrichta) wykorzystywane są również w systemach pomiarowych firmy Perkin-Elmer [13] wraz z spektrofotometrami LAMBDA 650 i 850 UV/Vis oraz LAMBDA 950 UV/Vis/NIR. Stanowią one bardzo wszechstronne wyposażenie do precyzyjnych pomiarów refleksyjności i transmitancji zarówno ciał stałych jak i cieczy i mogą być wykorzystywane do pomiarów przy kontroli jakości i opracowywania nowych wyrobów (tkanin, barwników, papieru i szkła). Uniwersalne zestawy pomiarowe tej firmy składają się z szeregu wymiennych modułów, co pozwala na szybkie dostosowanie zestawu do rodzaju przeprowadzanych pomiarów, a także wielkości mierzonych próbek. Na przykład kule integracyjne mogą mieć średnicę 60 lub 150 mm. Rysunek 3 pokazuje taki zestaw pomiarowy.

#### Przyrządy wykorzystujące metody różniczkowe

Przedstawimy tu dwa urządzenia tego rodzaju, oba oferowane przez Schmitt Measurement Systems, ale znacznie różniące się rodzajem przyrządu. Pierwszy z nich to pokazany na rys. 4. skaterometr CASI (*Complete Angle Scatter Instrument* – instrument mierzący rozproszenie pod wszystkimi kątami) [14] wykorzystujący promieniowanie laserowe od ultrafioletu (0,325  $\mu\text{m}$ ) do podczerwieni (10,6  $\mu\text{m}$ ). Próbkę jest mocowana w uchwycie, który może przesunąć się wzdłuż osi x i y, a także obracać się, przy czym kątowność ustawienia wynosi 0,05 stopnia, a liniowa 0,01 mm.

Kąt padania może zmieniać się od 0 do 85 stopni. Detektor przesuwają się dokoła próbki w płaszczyźnie padania światła mierząc światło rozproszone i odbite. W czasie badania komputer steruje zmianami wzmocnienia, filtrowania i apertury w sposób określony przez użytkownika. Oprogramowanie ułatwia analizę danych rozproszenia. Mierzone są wspomniane funkcje BRDF i BSDF, a także funkcja rozkładu transmitancji BTDF, co pozwala na obliczenie TIS, THR (*Total Semispherical Reflectance* – całkowitej refleksyjności półkulistej), PSD i średnią kwadratową wysokość nierówności. Wyniki mogą być drukowane w żądanej postaci. Zwraca uwagę bardzo wysoka rozdzielczość – 0,001 stopnia.

Zupełnie inną klasę przyrządów reprezentuje podręczne urządzenie do pomiaru nierówności powierzchni i rozproszenia noszące nazwę  $\mu\text{Scan}$  (rys. 5) [14], które składa się z jednostki sterującej, wymiennej głowicy pomiarowej i oddzielnej jednostki zasilającej. Głowicę tę umieszcza się na powierzchni mierzonej i inicjuje pomiar przy pomocy przycisku. Każdy pomiar trwa mniej niż 5 sekund. Wynik jest wyświetlany i zapamiętany (pamięć systemu może przechować do 700 wyników). Z pojedynczego pomiaru użytkownik może określić chropowatość powierzchni (w zakresie 1...100 nm), refleksyjność i poziom rozproszonego promieniowania (BRDF) w dowolnych warunkach oświetlenia.



Rys. 4. Skaterometr CASI firmy Schmitt Measurement Systems Inc  
Fig. 4. The Schmitt measurement Systems Inc. Casi Scatterometer



Rys. 5. Podręczny przyrząd Mikro-Skan  
Fig. 5. Hand-held Micro-Skan System

Dokładność pomiaru refleksyjności wynosi 2%, a rozproszenia – 3%. Przyrząd ten może służyć do różnych zastosowań.

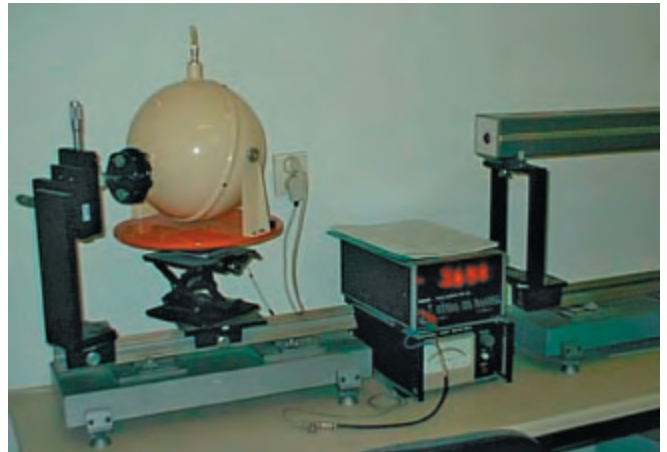
## Aparatura opracowana w kraju

### Urządzenia działające na zasadzie pomiaru parametru TIS

Prace nad aparaturą do pomiaru chropowatości metodą integracyjną podjęto dość wcześnie m.in. w Centralnym Ośrodku Aparatury Badawczej i Dydaktycznej oraz w Instytucie Konstrukcji Przyrządów Optycznych i Precyzyjnych (obecnie Instytut Mikro-mechaniki i Fotoniki) Politechniki Warszawskiej. Opracowano zestaw pomiarowy zawierający kulę Ulbrichta o średnicy 28 cm, a jako źródło światła laser He-Ne o mocy wiązki światła 10 mW. Badane próbki materiałów były umieszczane na stoliku przesuwym sterowanym za pomocą komputera. Zakres pomiarowy średniego kwadratowego odchylenia wysokości nierówności wynosił 0,5...10 nm.

Podobny zestaw wykorzystujący analogiczną kulę o podobnym zakresie pomiarowym został zbudowany również w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej (rys. 6)

Udaną próbę stworzenia nowego typu głowicy pomiarowej TIS podjęto w Instytucie Maszyn Matematycznych w Warszawie [12]. Głowica stanowi samodzielny zespół zawierający nie tylko elementy optyczne, ale również laser półprzewodnikowy i układy elektroniczne. Odnacza się ona małymi rozmiarami, co jest widoczne na (rys. 7). Może być zamontowana w uchwycie umożliwiającym jej pozycjonowanie (skanowanie) względem powierzchni mierzonej. Razem z modułem sterującym tworzy przyrząd p.n. Skaterometr Laserowy SL 31 o bogatych funkcjach wyboru trybu pomiaru, gromadzenia danych i połączenia z urządzeniami zewnętrznymi [11].



Rys. 6. Aparatura do pomiaru TIS z kulą integracyjną (Politechnika Koszalińska)

Fig. 6. Equipment for measurement TIS parameter with integrating spheres (Koszalin University of Technology)



Rys. 7. Skaterometr SL 31 opracowany w Instytucie Maszyn Matematycznych

Fig. 7. SL-31 scatterometer developed in Institute of Mathematical Machines

Przyrząd jest przystosowany głównie do pomiaru nierówności powierzchni od powyżej 1...2 nm do ok. 200 nm. Tak dużą górną granicę pomiarową uzyskano dzięki opracowaniu specjalnej metody kalibrowania wskazań za pomocą wzorców chropowatości. Przyrząd mierzy też refleksyjność zwierciadlaną i dyfuzyjną powierzchni.

Nietypowy w stosunku do standardowych rozwiązań przyrząd opracowano również w Instytucie Optyki Stosowanej w Warszawie [1]. Urządzenie nazwane Skateroskopem łączy w sobie funkcję pomiaru chropowatości powierzchni z jednoczesną obserwacją stanu jej powierzchni na monitorze ekranowym, umożliwiającą identyfikację i eliminację wpływu zanieczyszczeń na pomiar. Przyrząd, pokazano na rys. 8, odznacza się też oryginalną, opatentowaną zasadą pomiaru.

Zasadniczą część światła rozproszonego jest skupiana, a następnie rozdzielana na część kierowaną do kamery CCD i część podawaną do fotodetektora, co umożliwi obliczenie wysokości nierówności. Z uwagi na tę zasadę pomiaru przyrząd wymaga kalibracji przy użyciu elementów wzorcowych. Zakres pomiarowy parametru  $\sigma$  wynosi 0,2...200 nm.



Rys. 8. Skateroskop opracowany w Instytucie Optyki  
Fig. 8. Scatteroscope developed in Institute of Applied Optics

### Urządzenia działające na zasadzie pomiaru rozkładu promieniowania rozproszonego

O możliwościach wykorzystania promieniowania rozproszonego do oceny chropowatości powierzchni detali będących w ruchu wskazują rezultaty uzyskane w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej w dziedzinie badania powierzchni metali za pomocą metody pomiaru kąтового rozkładu światła rozproszonego [5]. Na rys. 9 przedstawiono aparaturę służącą do tego celu.

Głowica pomiarowa i powierzchnia mierzona przemieszczają się względem siebie ze stałą niewielką prędkością. Światło padające na powierzchnię jest przez nią rozpraszane i pada na linię CCD, z którego sygnały są rejestrowane w komputerze i wykorzystane do wyświetlenia na monitorze indykatory rozproszenia światła, a także do obliczenia pewnego parametru, który jest skorelowany ze średnim odchyleniem profilu chropowatości powierzchni Ra. Urządzenie umożliwia pomiar Ra w zakresie 10...1000 nm. Cenną zaletą urządzenia jest również możliwość wyznaczenia zarysu kształtu i falistości powierzchni.

W kraju podjęto wiele prac nad opracowaniem zestawów służących do wyznaczenia funkcji BRDF, np. w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej i Instytucie Fizyki Politechniki Krakowskiej. Układ wykonany w tej ostatniej placówce opiera się na wykorzystaniu stolika goniometrycznego, na osi którego umieszcza się badaną próbkę. Na próbkę kieruje się wiązkę światła lasera półprzewodnikowego po uprzednim przejściu przez filtr przestrzenny. Promieniowanie rozproszone jest mierzone za pomocą fotodetektora krzemowego, a zmiana kąta rozproszenia następuje za pomocą silnika krokowego ze skokiem 0,01 stopnia. Bardziej szczegółowe dane, a także opis innych przyrządów opracowanych w IF PK (m.in. profilometru fourierowskiego podano w pracy [4].

### Podsumowanie

Metody polegające na wykorzystaniu zjawiska rozpraszania światła umożliwiają bezstykowy i szybki pomiar parametrów powierzchni odznaczających się dużą gładkością. Dzięki temu znajdują szczególnie zastosowanie w technologiach elektronicznych, optycznych i mechanicznych, a także w pracach badawczych dotyczących np. nowych materiałów. Najczęściej są stosowane obecnie dwie metody pomiarowe: integracyjna i różniczkowa. Pierwsza polega na pomiarze całkowitej mocy promieniowania rozproszonego przez fragment powierzchni, na który skierowano wiązkę światła i mocy wiązki odbitej od niej zwierciadlanie. Wysokość nierówności oblicza się na podstawie stosunku tych wielkości, nazywanego parametrem TIS. W drugiej metodzie przedmiotem pomiaru jest rozkład mocy promieniowania rozproszonego (BRDF), przy czym często mierzy się go tylko w wybranym przekroju promieniowania.



Rys. 9. Stanowisko do badania powierzchni metali za pomocą pomiaru rozkładu światła rozproszonego wykonane w Politechnice Koszalińskiej  
Fig. 9. Stand for investigation of metal surfaces with measurement of scattered light layout

Przykłady aparatury skaterometrycznej stosującej wymienione metody podano w artykule. Opisano w nim również wyniki prac krajowych nad taką aparaturą. Można stwierdzić, że duża część z niej odznacza się oryginalnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi.

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

### Literatura

- [1] Chabros W., Gawlas J.: Nano-Skateroskop. II Konferencja Optoelektronika 2003, Komunikaty, Poznań, 110–112, 2003.
- [2] Choi N., Harvey J., Krywonos A.: New capabilities for predicting image degradation from optical surface metrology data. Proc. of SPIE Vol. 7801, 78010E-1-8.
- [3] Duparre A.: Light scattering techniques for the inspection of micro-components and microstructures (w:) Optical Inspection of Microsystems, W. Osten (ed.), Optical Science and Engineering, vol. 102, 103–139, 2007.
- [4] Jaglarz J.: Metody optyczne w badaniach powierzchni i powłok rzeczywistych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Seria: Podstawowe Nauki Techniczne, Monografia 348, Kraków 2008.
- [5] Łukianowicz C.: Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.
- [6] Łukianowicz C.: Skaterometria powierzchni nierównych. Problemy Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 165–222, 2009.
- [7] McNeil J.: Scatterometry Applied to Microelectronics Processing, <http://photonicsociety.org/newsletters/oct00/scatter.htm>.
- [8] Nicodemus F.: Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity. Applied Optics, vol. 19, June, 1474–1475, 1970.
- [9] Scatterometry: Measuring Ever-Smaller Chip Production. ScienceDaily (Mar. 9, 2 010); <http://photonicsociety.org/newsletters/oct00/scatter.htm>.
- [10] Stover J.: Optical Scattering. Measurement and Analysis. SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1995.
- [11] Synak R. i inni: Laserowy przyrząd do oceny chropowatości powierzchni na podstawie pomiaru parametru TIS. Techniki Komputerowe IMM, XLI, nr 1, 67–75, 2006.
- [12] Synak R., Pawełczak M.: Zintegrowana głowica pomiarowa do badania chropowatości powierzchni bardzo gładkich. Elektronika, nr 11, 266–271, 2008.
- [13] <http://www.perkinelmer.com/CMS Resources>.
- [14] <http://www.schmitt-ind.com/products-services-measurement-systems.shtml>.