



Analiza dokładności pomiarów nanometrycznych wzorców mikrogeometrii powierzchni za pomocą mikrointerferometru i profilometru stykowego

ŁUKASZ ŚLUSARSKI

Główny Urząd Miar, Samodzielne Laboratorium Długości,
ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, l.slusarski@gum.gov.pl

Streszczenie. W pracy zostały zbadane i przeanalizowane możliwości pomiarowe Samodzielnego Laboratorium Długości GUM w obszarze pomiarów wzorców wysokości nierówności powierzchni (o wysokości nierówności poniżej $1\ \mu\text{m}$) — tzw. nanowzorców, charakteryzujących powierzchnię w dwóch (2D) i trzech wymiarach (3D). Pomiary wykonano za pomocą mikrointerferometru oraz profilometru stykowego. W toku pomiarów określono możliwy dolny zakres pomiarowy i niepewność dla obu stanowisk.

Słowa kluczowe: nanometrologia, wzorce schodkowe, mikrointerferometr, profilometr stykowy
DOI: 10.5604/01.3001.0012.8503

Wprowadzenie

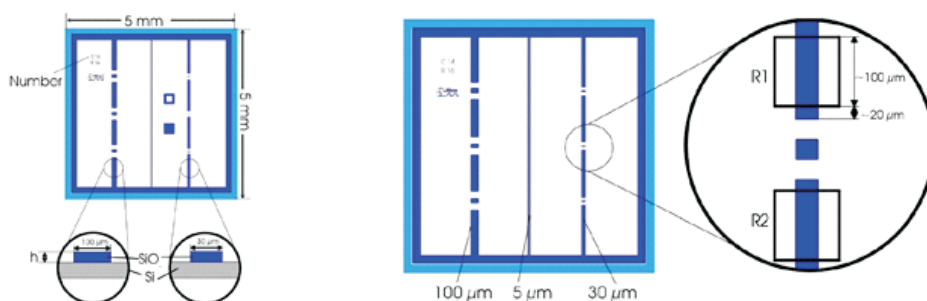
W pracy zostały zbadane i przeanalizowane możliwości pomiarowe Samodzielnego Laboratorium Długości GUM w obszarze pomiarów wzorców wysokości nierówności powierzchni (o wysokości nierówności poniżej $1\ \mu\text{m}$) — tzw. nanowzorców, charakteryzujących powierzchnię w dwóch (2D) i trzech wymiarach (3D). Celem było określenie dolnej granicy zdolności pomiarowych laboratorium oraz praktyczne wyznaczenie niepewności pomiaru. Nanowzorce należą do grupy wzorców materialnych stosowanych w dynamicznie rozwijającej się nanometrologii wymiarowej. Chociaż obecnie nie ma jeszcze dużej liczby zgłoszeń ze strony przemysłu na wzorcowanie tego typu wzorców, to na pewno w niedalekiej przyszłości to zapotrzebowanie wzrośnie z uwagi na tempo rozwoju tak nowoczesnej dyscypliny naukowej, jaką jest nanometrologia. Coraz większe zapotrzebowanie na elementy

o wysokiej precyzji wykonania, np. lustra interferencyjne o odchyleniu od płaskości powierzchni rzędu kilkunastu nanometrów, powoduje ogromne zainteresowanie tą tematyką na świecie. Również w budowie różnorodnych urządzeń badawczych i przemysłowych, gdzie występują układy odbiciowe, pojawia się potrzeba mierzenia mikrogeometrii w zakresach mikro- i pikometrycznych. Zajęcie się tym tematem odpowiada aktualnym trendom w rozwoju nanotechnologii.

Strukturą geometryczną powierzchni nazywa się ogólnie zbiór wszystkich jej nierówności, wliczając w to odchyłki kształtu, falistość i chropowatość, uznawaną za jeden z najistotniejszych wyróżników stanu powierzchni. Praca odnosi się właśnie do tego obszaru topografii powierzchni — mianowicie chropowatości.

W celu zbadania możliwości Samodzielnego Laboratorium Długości, w odniesieniu do pomiarów powierzchni wzorców chropowatości o wysokości nierówności poniżej $1\ \mu\text{m}$, w zakresie pomiarów parametrów 2D, wybrano pięć wzorców tzw. *step height* o wysokościach nierówności powierzchni (wysokościach schodka) wynoszących 7 nm, 20 nm, 70 nm, 300 nm oraz 800 nm (rys. 1). Wybrane wzorce reprezentują prawie cały obszar badanego zakresu pomiarowego. Wzorcami tego typu wzorcuje się przyrządy do wzorcowania chropowatości powierzchni.

W pracy badawczej przeprowadzono analizę dokładności pomiaru w oparciu o parametr 2D będący wysokością nierówności mierzonego profilu. Przeanalizowano wszystkie otrzymane wyniki pomiarów w celu przekonania się, na jakim poziomie dokładności Samodzielne Laboratorium Długości jest w stanie wykonać pomiary w zakresie wzorców chropowatości o wysokości nierówności powierzchni poniżej $1\ \mu\text{m}$.



Rys. 1. Kształt wzorców i miejsce wykonania pomiarów

2. Problem badawczy i metoda badawcza

Jak podano we wstępie, do wyznaczenia wartości wysokości nierówności wzorców tzw. *step height* wybrano pięć wzorców o nominalnych wartościach wysokości nierówności 7 nm, 20 nm, 70 nm, 300 nm oraz 800 nm. Pomiary wykonano za

pomocą dwóch stanowisk będących na wyposażeniu laboratorium: mikrointerferometru oraz profilometru stykowego.

Mikrointerferometr dwupromieniowy Linnika typu MII-4 bazuje na schemacie interferometru Michelsona [1], lecz jest dostosowany do pomiarów w dużym powiększeniu (ok. $500\times$). Stanowisko interferometru przedstawia rysunek 2. Mikrointerferometr umożliwia pomiar metodą interferencyjną. Zastosowanie kamery CCD oraz karty Frame-Grabber umożliwia przesłanie obrazu prążków interferencyjnych z mikrointerferometru do komputera i jego ilościową analizę za pomocą programu FringeApp, który do obliczeń wykorzystuje metodę czasowej dyskretnej zmiany fazy (CDZF). Metoda czasowej dyskretnej zmiany fazy, zastosowana do analizy obrazów prążkowych (interferogramów), wymaga zarejestrowania pięciu interferogramów przesuniętych względem siebie o $\pi/2$ radiana. Przesunięcie to uzyskuje się, przesuając, przy użyciu piezoprzesuwnika, obiektyw mikrointerferometru względem mierzonej powierzchni. Następuje to przez uruchomienie piezokontrolera MDT694A, sterowanego komputerem PC, o określony wcześniej krok fazowy (tworzą one tzw. przesuwnik fazy). Kierunek przesuwu obiektywu jest realizowany zawsze w jedną stronę (rosnącego napięcia na piezoelemencie), aby luzy układu nie zmieniły wymaganego przesunięcia interferogramów o $\pi/2$ radiana [2].

Słabą stroną jest niewielkie pole widzenia obiektywu kamery, obejmujące obszar wzorca $0,16\text{ mm} \times 0,24\text{ mm}$. Oprogramowanie interferometru nie umożliwia składania uzyskanych obrazów fragmentów mierzonej powierzchni w większą całość. Ogranicza to możliwość pomiaru do elementów mieszczących się w polu widzenia kamery.

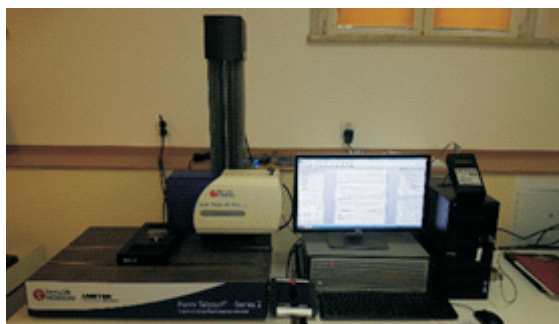


Rys. 2. Stanowisko mikrointerferometru

W celu poprawienia wartości otrzymanych wyników, a tym samym likwidacji krzywizn obrazu fazowego mierzonych powierzchni wzorca, powstałych przez zastosowanie dodatkowej soczewki w tubusie, oddzielono ten błąd poprzez odjęcie otrzymanych dwóch obrazów fazowych, tj. od mapy fazowej otrzymanej po przeprowadzeniu pomiaru wzorca odjęto mapę fazową wzorcowej powierzchni szklanej płytki interferencyjnej. Było to możliwe dzięki zastosowaniu dodatkowego

programu FitSurf, pozwalającego na wykonanie operacji odejmowania od siebie dwóch obrazów. W każdym wzorcu zmierzono po dwie wysokości nierówności, oznaczone na wzorcu kreską grubą oraz kreską cienką.

Profilometr stykowy Form Talysurf i-Series to profilometr stacjonarny mierzący nierówności powierzchni za pomocą głowicy pomiarowej zakończonej igłą z diamentową końcówką o promieniu $2\ \mu\text{m}$. Stanowisko profilometru przedstawia rysunek 3. Ruch końcówki pomiarowej zamieniany jest następnie w sygnał elektryczny za pomocą przetwornika indukcyjnego [3]. Dzięki wyposażeniu w przesuwany stolik pozwalający na ruch wzorca wzdłuż osi Y urządzenie ma możliwość dokonywania pomiarów 3D. Dane zbierane przez głowicę są następnie analizowane za pomocą oprogramowania Taylor Hobson Ultra. Istnieje również możliwość ich eksportu do programu do analizy 3D TalyMap pozwalającego na dalszą analizę i obróbkę, w tym m.in. tworzenie raportów, obrazów mierzonej powierzchni, czy zastosowaną tu automatyczną metodę wyznaczania wysokości schodka.



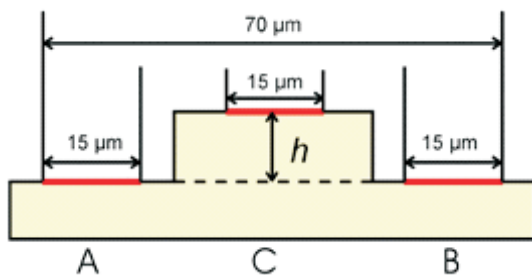
Rys. 3. Stanowisko profilometru kontaktowego

Oba stanowiska znajdują się w klimatyzowanym pomieszczeniu laboratoryjnym. Pomiary przeprowadzono w temperaturze $20\pm 1^\circ\text{C}$, zaś wahania temperatury nie przekraczały $0,2^\circ\text{C}$.

Wysokość nierówności powierzchni (schodka) h wzorca jest definiowana następująco: przez wierzchołek nierówności poprowadzona (rys. 4) jest linia średnia jako ciągła linia prosta, o długości równej trzem szerokościom nierówności, która przedstawia górny poziom powierzchni, a druga linia średnia, poprowadzona przez dno powierzchni, przedstawia poziom dolny. Aby uniknąć wpływu zaokrągleń naroży na górnej powierzchni po obu stronach nierówności wzorcowej, nie należy brać pod uwagę długości równych $1/3$ szerokości nierówności, natomiast powierzchnia dna nierówności wzorcowej jest oceniana tylko w jej środkowej części na odcinku $1/3$ szerokości nierówności. Wysokość nierówności wzorcowej h jest określana prostopadle od górnej linii średniej do punktu środkowego dolnej linii średniej [4].

Przy pomiarze interferometrem, we wzorcach o wysokościach schodka większych od połowy długości fali światła zielonego użytego do pomiarów ($536,6\ \text{nm}$),

z uwagi na specyfikę przyrządu oraz oprogramowania (metoda reszt ułamkowych), z braku możliwości bezpośredniego pomiaru całej wysokości schodka, przyjęto podział schodka na dwie części. Tak więc w tym przypadku wysokość schodka jest sumą n długości $\lambda/2$ oraz wyniku pomiaru schodka. Dlatego wskazane jest, aby znać wymiar nominalny wysokości schodka, żeby nie popełnić błędu grubego.



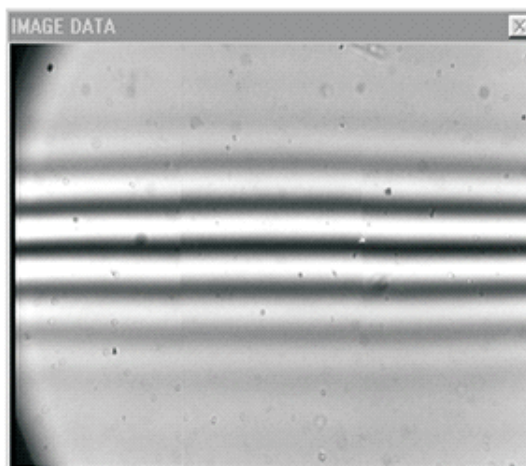
Rys. 4. Sposób wyznaczenia wysokości schodka h

3. Wyniki

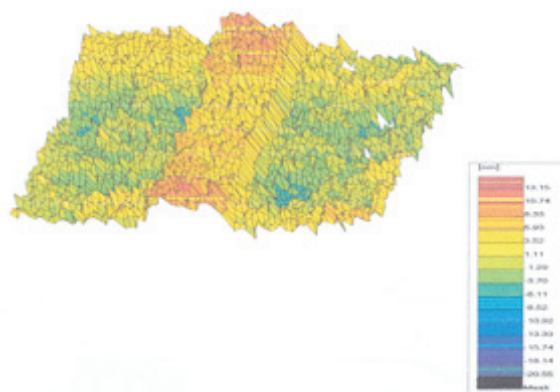
Za pomocą interferometru dokonano pomiaru zarówno szerokich, jak i wąskich schodków na każdym wzorcu. Za pomocą profilometru dokonano pomiarów i analizy dla wszystkich schodków z wyjątkiem szerokiego schodka o wysokości $7\ \text{nm}$. W tym przypadku szum profilometru okazał się zbyt duży, aby program mógł określić położenie schodka i obliczyć jego wysokość. Z kolei analiza wąskiego schodka $7\ \text{nm}$ stała się możliwa dopiero po wygładzeniu uzyskanego obrazu przez usunięcie mikrochropowatości, tj. składowej profilu o długościach fali $\lambda_s < 25\ \mu\text{m}$, zawierającej w sobie szum urządzenia, co pozwoliło oprogramowaniu na wykrycie schodka.

Obrazy uzyskane przez kamerę mikroiinterferometru (rys. 5) zostały poddane analizie za pomocą programu FringeApp. W jej wyniku otrzymano obraz 3D mierzonej powierzchni (rys. 6), z którego możliwe było wybranie przekrojów do dalszej analizy wysokości schodka za pomocą tego samego programu (rys. 7). Wyniki pomiarów powierzchni wzorca za pomocą profilometru zostały poddane obróbce w programie TalyMap. Program ten umożliwia uzyskanie obrazu 3D mierzonej powierzchni za pomocą złożenia wyników wielokrotnych równoległych pomiarów liniowych (rys. 8), a także pozwala na analizę wysokości schodka dla wybranych przekrojów (rys. 9).

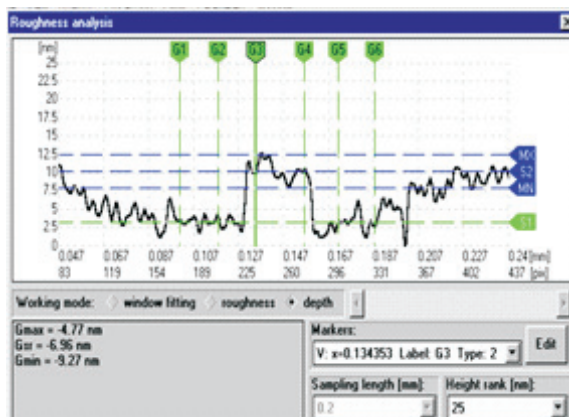
Rezultaty pomiarów obiema metodami zamieszczone zostały w tabeli 1. Wyniki pomiarów wysokości schodka D podano wraz z niepewnościami $U(D)$ i powtarzalnością ΔD .



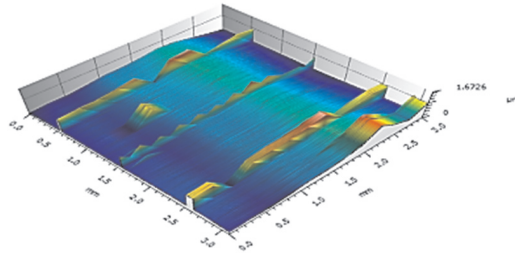
Rys. 5. Przykładowy obraz schodka 7 nm z kamery mikroiinterferometru



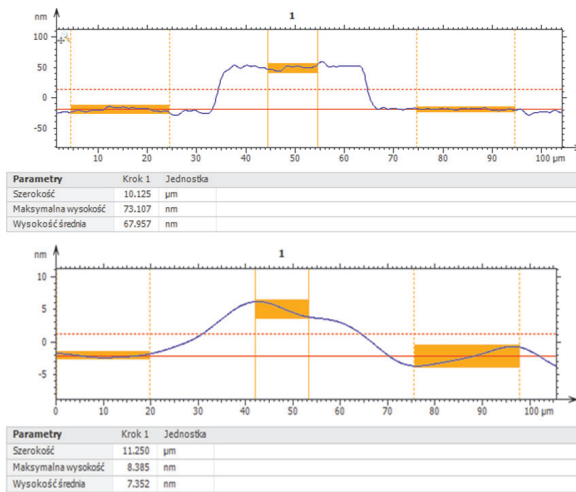
Rys. 6. Obraz 3D schodka 7 nm wygenerowany w programie FringeApp



Rys. 7. Analiza wysokości schodka 7 nm za pomocą programu FringeApp



Rys. 8. Obraz 3D wzorca wygenerowany w programie TalyMap



Rys. 9. Analiza wysokości schodków 7 nm i 70 nm za pomocą programu TalyMap. Dla schodka 7 nm profil został dodatkowo wygładzony przez usunięcie mikrochropowatości

Wyniki pomiarów

TABELA 1

Schodek	Pomiar interferometrem		Pomiar profilometrem	
	D±U(D) (nm)	ΔD (nm)	D±U(D) (nm)	ΔD (nm)
7 nm szeroki	7,1±2,4	0,6	—	—
7 nm wąski	7,0±2,4	0,2	7,7±14,3	4,0
20 nm szeroki	20,1±2,4	0,5	20,2±14,3	4,8
20 nm wąski	20,1±2,4	1,1	19,9±14,2	3,3
70 nm szeroki	69,8±2,4	0,6	63,3±14,2	3,1
70 nm wąski	70,3±2,4	1,0	69,4±14,3	4,3
300 nm szeroki	289,1±2,4	1,1	286,6±14,3	4,7
300 nm wąski	289,0±2,4	1,3	290,4±14,4	6,5
800 nm szeroki	774,3±2,5	1,5	769,6±14,3	4,8
800 nm wąski	775,1±2,5	2,0	778,6±14,3	5,8

4. Analiza niepewności pomiarów

Podane niepewności rozszerzone wzorcowania wzorca kreskowego określone zostały jako niepewności standardowe pomiaru pomnożone przez współczynnik rozszerzenia $k = 2$, przy prawdopodobieństwie rozszerzenia ok. 95% [5]. Niepewności standardowe wyznaczono na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa wartości wielkości wejściowych, opartego albo na obserwacjach, albo na analizie naukowej równania pomiaru, bazując na wszystkich dostępnych źródłach informacji, przypisując im odpowiednio rozkład normalny lub prostokątny, zgodnie z wewnętrznymi instrukcjami wzorcowania laboratorium dla pomiarów interferometrem i profilometrem.

Przy pomiarze interferometrem zasadniczym czynnikiem odpowiadającym za ponad 90% wartości niepewności okazała się poprawka, która wynika z nieliniowości mechanicznego przesuwника fazy. Natomiast na wartość niepewności przy pomiarze profilometrem złożyły się przede wszystkim dwa czynniki: niepewność schodkowego wzorca odniesienia, za pomocą którego wzorcowany był profilometr, oraz niepewność odchylenia od prostoliniowości przesuwu czujnika, wynikająca z niepewności płaskości płytki interferencyjnej użytej do wzorcowania profilometru.

5. Wnioski i podsumowanie

Z analizy przeprowadzonych pomiarów wynika, że oba stanowiska umożliwiają pomiary nierówności powierzchni z niepewnościami rzędu kilku nanometrów przy wykorzystaniu mikrointerferometru do kilkunastu nanometrów przy użyciu profilometru. Wartość niepewności dla pomiarów profilometrem wynika głównie z niepewności wzorców odniesienia użytych do kalibracji profilometru, choć zbieżność wyników pomiaru obiema metodami wskazuje na to, że rzeczywista dokładność pomiarów za pomocą profilometru jest większa i wartość niepewności mogłaby zostać zmniejszona przez użycie dokładniejszych wzorców do jego wzorcowania.

Pomiary prowadzone za pomocą mikrointerferometru obciążone są mniejszą niepewnością, a jednocześnie pojedynczy pomiar 3D umożliwia wybór przekroju powierzchni do dalszej analizy, co może być wygodne przy np. bardzo zniszczonej powierzchni wzorca.

Źródło finansowania — praca badawcza w ramach działalności Laboratorium Długości Głównego Urzędu Miar.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na konferencji „XI Szkoła-Konferencja MWK '17 — Metrologia Wspomagana Komputerowo”, Waplewo, 23-26 maja 2017 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 13.02.2018 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 12.10.2018 r.

LITERATURA

- [1] WIECZOROWSKI M., *Metrologia nierówności powierzchni: metody i systemy*, Szczecin: ZAPOL, 2013, s. 142-145.
- [2] SMERECZYŃSKA B., SAŁBUT L., *Linnik's microinterferometer with a computer analysis of interference fringes for calibration of roughness standards*, 1st International Conference Euspen (Brema), 1999.
- [3] WIECZOROWSKI M., *Metrologia nierówności powierzchni: metody i systemy*, Szczecin: ZAPOL, 2013, s. 70-80.
- [4] *Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa; wzorce — Część 1: Wzorce materialne*, Polska Norma PN-EN ISO 5436-1, s. 14.
- [5] *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*, Warszawa: GUM, 1999, s. 14-15.

Ł. ŚLUSARSKI

**Measurement accuracy analysis for microgeometry nanostandards
with microinterferometer and stylus profilometer**

Abstract. The goal of the work, described in this paper, was to examine and analyse measurement capabilities of GUM Length and Angle Department in measurements of step height/depth standards with the values below 1 μm (nanostandards), with 2D, and 3D surface characteristics. Measurements were performed with microinterferometer and stylus profilometer.

Keywords: nanometrology, depth/height standards, microinterferometry, contact profilometry

DOI: 10.5604/01.3001.0012.8503

