

Wojciech KAPŁONEK¹, Robert TOMKOWSKI²¹ POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI, ZAKŁAD METROLOGII I JAKOŚCI² POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA MECHANIKI PRECYZYJNEJ**Analiza topografii powierzchni dyfrakcyjnych elementów optycznych z wykorzystaniem interferometrii światła białego****Mgr inż. Wojciech KAPŁONEK**

Autor jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (2003 r.). W latach 2003-2007 był słuchaczem studiów doktoranckich, a od 2007 r. jest pracownikiem Zakładu Metrologii i Jakości w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej. Jego zainteresowania naukowe skupiają się wokół zagadnień związanych z pomiarami struktury geometrycznej powierzchni metodami optycznymi oraz wykorzystaniem technik przetwarzania i analizy obrazu.



e-mail: wojciech.kaplonek@tu.koszalin.pl

Mgr inż. Robert TOMKOWSKI

Autor jest od 2008 roku pracownikiem na stanowisku Samodzielny Technik w Laboratorium Mikro- i Nano-inżynierii w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się modelowaniem i symulacją procesów obróbki oraz metrologią powierzchni technicznych. Obecnie autor przygotowuje rozprawę doktorską pt. "Podstawy klasyfikacji cech stereometrycznych powierzchni po obróbce ścierniej z wykorzystaniem nowych parametrów oceny".



e-mail: robert.tomkowski@tu.koszalin.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości oceny i analizy topografii powierzchni dyfrakcyjnych elementów optycznych za pomocą jednej z metod interferometrii światła białego. W badaniach wykorzystano próbkę zawierającą 8 elementów dyfrakcyjnych generujących wzory optyczne o kształtach linii, zbioru linii (poziomych i pionowych) oraz krzyża. Elementy oceniano pod względem geometrii ukształtowania powierzchni za pomocą systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson. Zarejestrowane dane pomiarowe analizowano korzystając z oprogramowania Talymap Platinum. Wyniki badań potwierdziły dużą przydatność metody pomiarowej, jak i zastosowanego urządzenia w ocenie tego typu powierzchni posiadających złożoną, wielowarstwową strukturę.

Słowa kluczowe: dyfrakcyjne elementy optyczne, interferometria światła białego, topografia powierzchni.

Analysis of the surface topography of diffractive optical elements by white light interferometry**Abstract**

The paper presents the method based on white light interferometry - SBI (Scanning Broadband Interferometry). SBI uses a correlation algorithm to find the coherence peak and phase position of an interference pattern produced by a selectable bandwidth light source. It provides both high resolution and excellent sensitivity of the returning light. This method can be applied to ultra precision assessment of wide range of surfaces. Measurements of different types of materials, including glass, metal, photo resist, polymer, liquid inks are also possible to be taken. In experimental investigations there was assessed the surface topography of DOEs (Diffractive Optical Elements). A sample containing 8 diffractive optical elements generating optical patterns in the form of single line, multi-lines and crosshair was used for measurements. The surfaces of the all DOEs were measured by an advanced measurement system Talysurf CCI 6000 produced by Taylor Hobson. The measurement data recorded were analysed by Talymap Platinum software. The investigation results confirmed the usefulness both of the measuring method and the applied measurement system for assessment of this type of multilayered surfaces.

Keywords: diffractive optical elements, white light interferometry, surface topography.

1. Wstęp

Wśród wielu rodzajów elementów optycznych produkowanych obecnie przez wiodące firmy z branży optycznej dużą grupę stanowią dyfrakcyjne elementy optyczne [1]. Pozwalają one na przekształcenie określonego frontu falowego we wzór optyczny widoczny w płaszczyźnie obserwacji. Uzyskanie precyzyjnej struktury dyfrakcyjnej wymaga stosowania zaawansowanych metod projektowania [2], wytwarzania [3] i kontroli [4]. Proces kontroli realizowany jest przez nowoczesne systemy pomiarowe wykorzystujące zazwyczaj różnego rodzaju metody optyczne o dużej

dokładności (interferometria, mikroskopia). Ich cechą charakterystyczną jest to, iż pomiar przeprowadzany jest w sposób bezstykowy, w szerokim zakresie pomiarowym i w stosunkowo krótkim czasie. Dodatkową zaletą jest możliwość przestrzennej oceny topografii badanej powierzchni oraz wykonywania wielokryterialnych analiz z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania komputerowego.

W artykule pokazano, iż za pomocą metod interferencyjnych można analizować topografię powierzchni optycznych elementów dyfrakcyjnych. Zaproponowano odpowiednią metodykę badań oraz przedstawiono możliwości oceny tego typu powierzchni przez system pomiarowy Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson.

2. Dyfrakcyjny element optyczny

Niezwykle dynamiczny postęp w dziedzinie miniaturyzacji układów optycznych (zarówno w zastosowaniach badawczych jak i przemysłowych) doprowadził do powstania nowoczesnej gałęzi przemysłu precyzyjnego wytwarzającego elementy mikrooptyczne [5]. Są to elementy o strukturze submilimetrowej lub submikrometrowej, produkowane z wykorzystaniem różnych metod [3, 6, 7], charakteryzujące się strukturą macierzową. Do elementów mikrooptycznych pracujących w wolnej przestrzeni zalicza się m.in. mikroszoczewki, dzielniki wiązek, siatki i elementy dyfrakcyjne.

Dyfrakcyjne elementy optyczne (ang. *DOE – Diffractive Optical Elements*) [8], są pasywnymi komponentami optycznymi wykorzystującymi jedno z podstawowych zjawisk optycznych – dyfrakcję światła [9]. Wiązka światła przechodząca przez element ulega ugięciu (dyfrakcji) w wyniku, czego tworzony jest wzór optyczny (ang. *pattern*) [10] w kształcie punktu, linii, krzyża, siatki, okręgu (lub dowolnej kombinacji tych kształtów) widoczny w płaszczyźnie obserwacji. Wzór ten może być prosty lub skomplikowany, zależy to od złożoności struktury geometrycznej powierzchni elementu generującego.

Teoria dyfrakcji [11], która stanowi podstawę teoretycznego opisu zjawiska wykorzystywanego w omawianych elementach optycznych może posłużyć do ustalenia tego, jak dowolna wiązka światła o określonej długości fali, będzie zmieniona podczas propagacji. Do obliczania kąta dyfrakcji dla najprostszej postaci wzoru optycznego stosuje się poniższe zależności:

$$m\lambda = d(\sin \theta_m), \quad (1)$$

lub

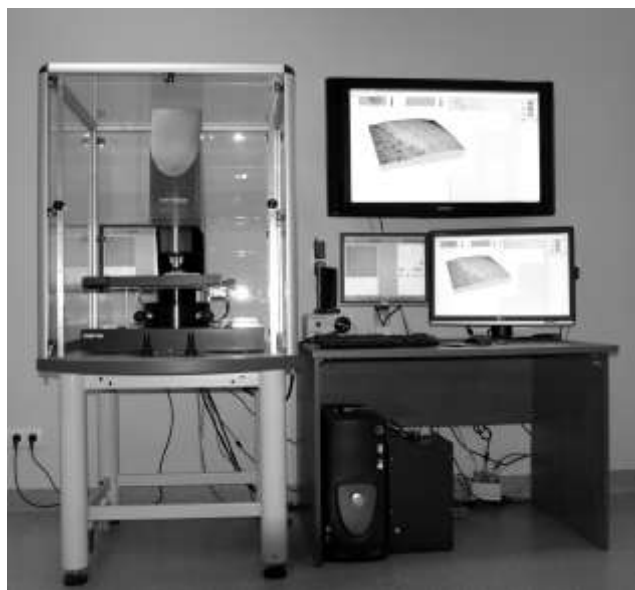
$$\theta_m = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{d}\right), \quad (2)$$

gdzie: d – okres elementu dyfrakcyjnego, θ_m – kąt dyfrakcji, m – rząd dyfrakcji, λ – długość fali światła.

Dyfrakcyjne elementy optyczne znalazły szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki [12]. Obszary, w których są one wykorzystywane obejmują m.in. biologię [13], biotechnologię, medycynę [14], farmaceutykę [15], systemy widzenia maszynowego [16], optyczne procesy informatyczne [17].

3. Charakterystyka systemu CCI 6000

System pomiarowy Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson jest obecnie jednym z najbardziej zaawansowanych bezstykowych systemów optycznych posiadających możliwość przestrzennej oceny topografii powierzchni. Widok ogólny systemu użytkownego w Laboratorium Mikro- i Nanoinżynierii Katedry Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Koszalińskiej pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Widok ogólny systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson
Fig. 1. General view of Talysurf CCI 6000 produced by Taylor Hobson

Zasada działania urządzenia oparta jest na wykorzystaniu jednej z odmian interferometrii światła białego (ang. *WLI – White Light Interferometry*) [18] tzw. szerokopasmowej interferometrii skaningowej (ang. *SBI – Scanning Broadband Interferometry*) [19].

Światło białe generowane przez zewnętrzne źródło (lampa kwarcowa dużej mocy) doprowadzane jest do urządzenia światłowodem. Wewnątrz głowicy pomiarowej strumień światła pada na dzielnik wiązki, gdzie zostaje rozdzielony na dwie równoległe wiązki. Jedna z nich podąża w kierunku niewielkiej powierzchni odniesienia znajdującej się na spodzie soczewki obiektywu, druga natomiast w kierunku powierzchni próbki. Wiązki rekombinują, dając w rezultacie miejscowy obraz interferencyjny. W celu rejestracji wiązki światła odbitego od powierzchni próbki i akwizycji danych stosowana jest kamera z matrycowym detektorem fotoelektrycznym typu CCD. Ponieważ światło białe zawiera wszystkie barwy składowe (jest światłem w szerokim paśmie spektralnym), to interferencja jest obserwowana tylko wtedy, kiedy dwie drogi optyczne są jednakowej długości. Poprzez przesunięcie soczewki obiektywu pionowo (wzdłuż osi układu optycznego), ustalane jest położenie, w którym występuje maksimum stopnia koherencji czasowej [20], [21]. Metodę pomiarową oparto na algorytmie [22], który producent określa jako tzw. interferometrię korelacji koherencji (ang. *CCI – Coherence Correlation Interferometry*) [23]. Rejestrowany obraz prążków interferencyjnych przetwarzany jest przez komputer z procesorem klasy Xeon. Na podstawie przetworzonych danych tworzona jest precyzyjna mapa przestrzenna topografii powierzchni o wysokiej rozdzielczości. Urządzenie pozwala na uzyskanie rozdzielczości pionowej do 10 pm (0,1 Å), przy zakresie pomiarowym (w osi Z) do 10 mm. Niezależnie od zastosowanego powiększenia mapa topografii

może zawierać ponad 1 mln punktów pomiarowych (1024 × 1024 punkty). Wybrane parametry techniczne systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson zestawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Charakterystyka systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000
Tab. 1. Characteristics of measurement system Talysurf CCI 6000

Parametry pomiaru	
Technika pomiaru	Zaawansowana technologia interferometrii korelacji koherencji
Pionowy zakres pomiarowy (Z)	100 μm (standard), 400 μm / 10 mm (opcja), 10 pm (0,1 Å)
Rozdzielczość pionowa (dla zakresów większych niż 100 μm)	50 pm (0,5 Å)
Zakłócenia podłoża	0,1 nm (25 nm krok) / 0,03% (50 μm krok)
Powtarzalność przesuwu (kroku dyskretnego)	3 pm (0,03 Å)
Powtarzalność powierzchni (średnie odchylenie standardowe Z)	360 μm ² – 7,0 mm ²
Obszar pomiarowy (X,Y)	1.048.576 (tablica pikseli 1024 × 1024)
Liczba punktów pomiarowych	0,4 μm – 0,6 μm (zal. od rodzaju powierzchni)
Rozdzielczość optyczna	0,03% wartości zmierzonej
Liniiowość (Z)	0,3% – 100%
Refleksyjność powierzchni	5 – 20 sekund
Czas pomiaru	
Parametry systemu pomiarowego	
Rozmiary elementów (max)	X i Y = 300 mm; Z = 100 mm
Masa dopuszczalna (max)	10 kg
Stolik ręczny X–Y	25 × 25 mm
Stolik mechaniczny X–Y (mały)	75 × 100 mm
Stolik automatyczny X–Y (średni)	150 × 150 mm
Stolik automatyczny X–Y (duży)	250 × 200 mm
Ręczny przesuw w osi Z	100 mm
Automatyczny przesuw w osi Z	100 mm (z autofokusem)
Warunki pracy	
Temperatura / wilgotność	15 – 30 °C / 80% nie skondensowana
Wibracje	Pneumatyczny system antywibracyjny
Wymiary	750 mm (szerokość) × 500 mm (głębokość)

Wraz z urządzeniem producent dostarcza dedykowane oprogramowanie komputerowe [24]. Są to dwie aplikacje: Talysurf CCI w wersji 2.0.7.3 (sterowanie elementami systemu, wykonywanie pomiarów) oraz Talymap Platinum w wersji 4.0.5.3985 (wizualizacja i zaawansowana analiza danych). Ostatnia z wymienionych aplikacji pozwala na kompleksową analizę badanej powierzchni na podstawie dostępnych ok. 120 parametrów profilu i ok. 40 parametrów przestrzennych.

System pomiarowy Talysurf CCI 6000 dzięki dużej elastyczności posiada szerokie spektrum zastosowań obejmujących m.in. inżynierię materiałową (analiza materiałów polimerowych), mechanikę (pomiar topografii precyzyjnie obrabianych powierzchni technicznych, pomiary powierzchni gładkich i supergładkich), elektronikę (pomiar podłoża układów półprzewodnikowych, analiza struktur MEMS, MOEMS), mikrooptykę (mikrosoczewki, optyka dyfrakcyjna), biomedycynę (implanty, endoprotezy). Porównanie różnych technik pomiarowych (interferometria, mikroskopia konfokalna, profilometria stykowa) stosowanych we współczesnej metrologii powierzchni przedstawiono w pracy [25].

4. Badania doświadczalne

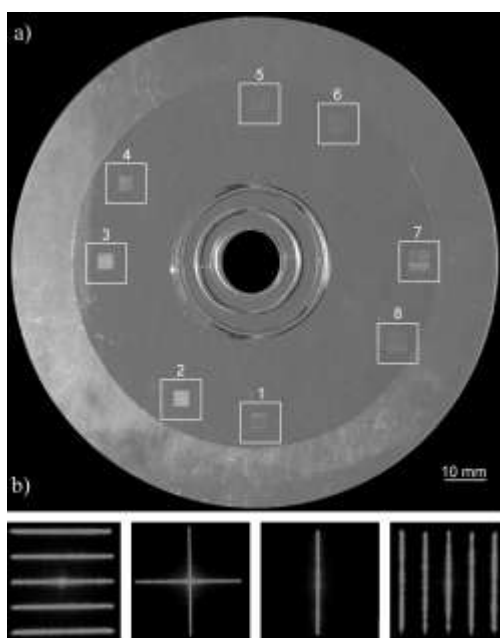
Celem badań doświadczalnych było przeanalizowanie topografii dyfrakcyjnych elementów optycznych oraz pokazanie możliwości pomiaru tego typu powierzchni przez zaawansowany system pomiarowy Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson.

Badaniem poddano poliwęglanową próbkę w kształcie dysku o średnicy ø115 mm, wyprodukowaną przez firmę Thorlabs Inc. pod oznaczeniem DOE-220-635. Próbkę posiadała 8 elementów dyfrakcyjnych i umożliwiała generowanie wzorów światła strukturalnego w kształcie pojedynczej linii, zbioru linii (poziomych i pionowych) oraz krzyża. Elementy dyfrakcyjne przeznaczone były do pracy z wiązką światła laserowego o długości fali $\lambda = 635$ nm. Parametry elementów dyfrakcyjnych użytych w badaniach zestawiono w tablicy 2, natomiast na rysunku 2

pokazano widok ogólny próbki oraz kształty generowanych wzorów światła strukturalnego.

Tab. 2. Parametry elementów dyfrakcyjnych użytych w badaniach
Tab. 2. Parameters of diffractive elements used in tests

Nr wzoru	Wymiary apertury [mm]	Ilość punktów tworzących wzór	Kąt [°]	Wielkość wzoru z odl. 1 m [mm]	Kształt wzoru
1	3,84×3,84	±64	1,8	±31	zbiór linii
2	3,84×3,84	±128	±3,6	±63	krzyż
3	3,84×3,84	±126	±3,6	±63	linia
4	3,69×3,69	±32	±1,9	±33	zbiór linii
5	5,12×5,12	±64	1,8	±31	zbiór linii
6	5,12×5,12	±128	±3,6	±63	krzyż
7	5,12×5,12	±126	±3,6	±63	linia
8	4,92×4,92	±32	±1,9	±33	zbiór linii



Rys. 2. Próbką używaną w badaniach: a) widok ogólny, b) kształty generowanych wzorów światła strukturalnego

Fig. 2. Tested sample: a) general view, b) structured light patterns

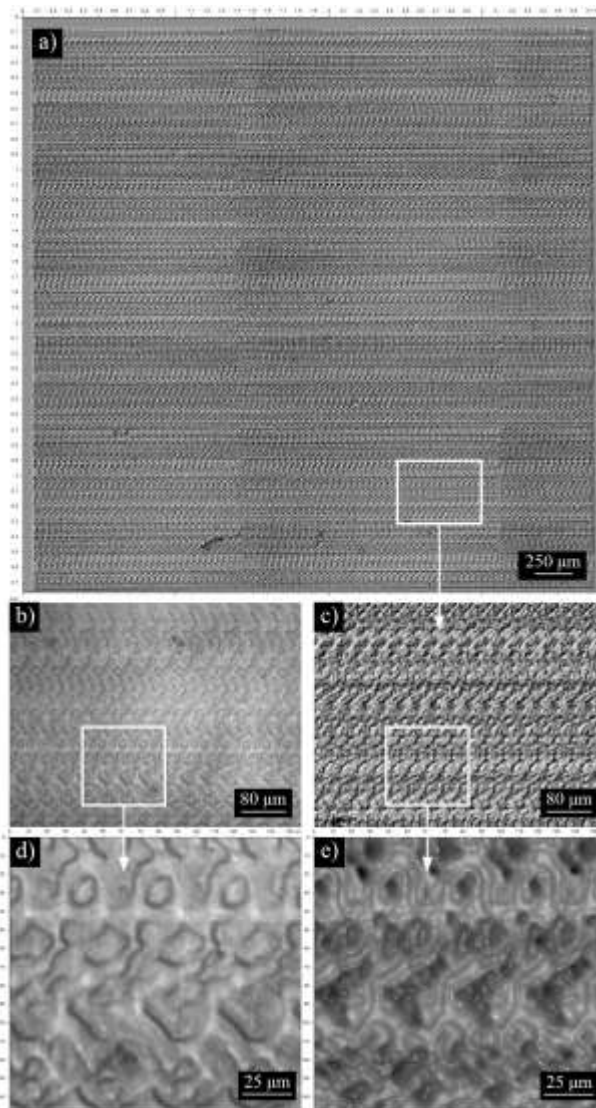
Przed przystąpieniem do pomiarów topografii zarejestrowano mikroskopowe obrazy powierzchni elementów dyfrakcyjnych. W tym celu wykorzystano mikroskop metalograficzny Epityp 2 firmy Carl Zeiss Jena, wyposażony w obiektyw Planachromat 12,5 × / 0,25. Akwizycji obrazów mikroskopowych dokonano korzystając z systemu wizyjnego, w którego skład wchodziła monochromatyczna kamera TV z matrycowym przetwornikiem CCD typu 3713, firmy COHU, karty akwizycji obrazu TV AVer Media E501R firmy AVerMedia Technologies, Inc. oraz laptop Satellite M60 firmy Toshiba wraz z oprogramowaniem do akwizycji obrazu TV AVer Media E501R.

Pomiar topografii przeprowadzono za pomocą systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson. Głowica pomiarowa wyposażona była w obiektyw ze zintegrowanym interferometrem Mirau – powiększenie nominalne 10×, pole widzenia 1,8 × 1,8 mm, rozdzielczość pozioma 1,8 μm, odległość pracy (dystans obiektywu od badanej próbki) 7,4 mm.

Po dokonaniu pomiarów przeprowadzono szereg analiz z wykorzystaniem oprogramowania Talymap Platinum. Obraz topografii powierzchni został poddawany poziomowaniu i uzupełnianiu o punkty niezmierzone, powodujące nieciągłości w zarejestrowanej powierzchni. Są one spowodowane najczęściej stromymi zboczami wyniesień lub wgłębieniami na badanej powierzchni, które uniemożliwiają poprawne zarejestrowanie wiązki światła odbitego. Następnie dla każdej z powierzchni wyznaczono: profil wraz

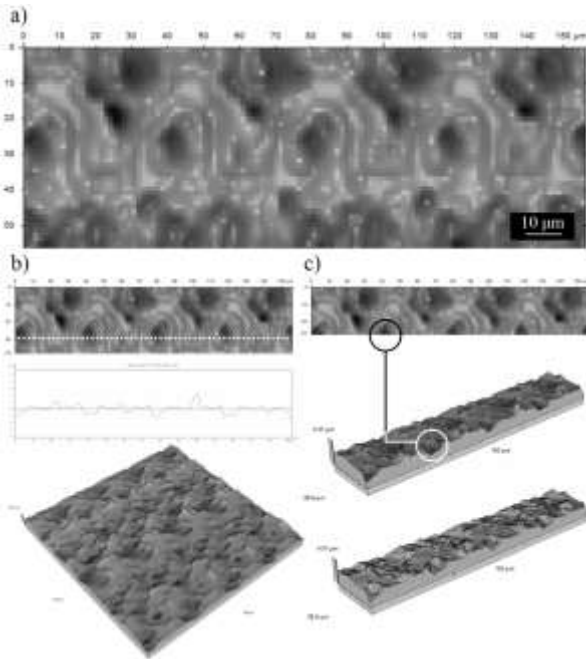
z parametrami, funkcję autokorelacji, mapę warstwicową chropowatości powierzchni wraz z diagramem konturu i foto symulacją. Przeprowadzono także analizę fraktalną, oraz dokonano przestrzennej wizualizacji badanej powierzchni.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe obrazy powierzchni elementu dyfrakcyjnego nr 6 (generowany wzór światła strukturalnego – krzyż) uzyskane za pomocą wymienionych urządzeń. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono wybrane wyniki analizy przeprowadzonej na obrazie z rysunku 3e (wydzielenie profilu, przestrzenną wizualizację powierzchni oraz analizę charakterystycznych elementów powierzchni w ujęciu przestrzennym).



Rys. 3. Obrazy powierzchni zarejestrowane dla elementu dyfrakcyjnego nr 6 (generowany wzór światła strukturalnego – krzyż) uzyskane za pomocą systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson (a, c, e) oraz mikroskopu metalograficznego Epityp 2 firmy Carl Zeiss Jena (b, d): a) foto symulacja obrazu powierzchni (obszar 3700 μm × 3700 μm), b) obraz mikroskopowy (obszar 553 μm × 414 μm), c) powiększony fragment obszaru wydzielonego z foto symulacji (obszar 553 μm × 414 μm), d) powiększony fragment obszaru wydzielonego z obrazu mikroskopowego (obszar 155 μm × 145 μm), e) powiększony fragment obszaru wydzielonego z foto symulacji (obszar 155 μm × 145 μm)

Fig. 3. Images of surface acquired for DOE No. 6 (crosshair) obtained by measurement system Talysurf CCI 6000 produced by Taylor Hobson (a, c, e) and metallographic microscope Epityp 2 produced by Carl Zeiss Jena (b, d): a) photo simulation of surface (area 3700 μm × 3700 μm), b) microscopic image (area 553 μm × 414 μm), c) enlarged detail of image extracted from photo simulation (area 553 μm × 414 μm), d) enlarged detail of image extracted from microscopic image (area 155 μm × 145 μm), e) enlarged detail of image extracted from photo simulation (area 155 μm × 145 μm)



Rys. 4. Rezultaty analiz uzyskanych dla obrazu z rysunku 3e za pomocą oprogramowania Talymap Platinum: a) obraz wejściowy b) wydzielenie profilu i wizualizacja przestrzenna powierzchni c) analiza elementów powierzchni w ujęciu przestrzennym

Fig. 4. Analysis results for image of Fig. 3e by Talymap Platinum: a) input image b) extracting the profile and 3D view of surface, c) analysis of surface elements in 3D

5. Wnioski

Przeprowadzone badania i analizy skłaniają do stwierdzenia, iż za pomocą przedstawionego systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson można dokonywać oceny topografii powierzchni dyfrakcyjnych elementów optycznych posiadających złożoną, wielowarstwową strukturę. Należy stwierdzić jednak, że potrzebne jest w przyszłości opracowanie odpowiedniej metodyki badań tego typu elementów. Wynika to z odmiennego ukształtowania powierzchni elementu dyfrakcyjnego niż typowych powierzchni części maszyn obrabianych mechanicznie.

Zaproponowana metoda pomiaru charakteryzuje się wieloma zaletami takimi jak: bezstykowy sposób pomiaru, krótki czas przeprowadzenia oceny w porównaniu do metod stykowych (średni czas pomiaru to ok. 45 s – jest to równoważne ok. 1 tys. profili, gdzie w każdym z profili znajduje się ponad 1000 punktów), wysoka rozdzielczość, duża liczba punktów pomiarowych (ponad 1 mln). Dla przykładu czas pomiaru struktury o podobnym rozmiarze metodą stykową zajmuje ok. 4 – 7 godzin, w zależności od parametrów pomiaru.

Do wad natomiast należałoby zaliczyć m.in. dużą trudność w poprawnym ustawieniu powierzchni mierzonej i uzyskaniu poprawnego obrazu interferencyjnego. W przypadku niewłaściwego ustawienia powierzchni, uzyskuje się obraz topografii powierzchni usytuowany pod kątem. Należy wtedy dokonywać cyfrowego przekształcenia powierzchni i jej wyrównania (poziomowanie). Innym znaczącym problemem jest trudność w pomiarze elementów o powierzchni matowej. Powierzchnia taka powinna posiadać współczynnik odbicia światła większy od 0,3%.

6. Literatura

- [1] J. Nowak, K. Pietraszkiewicz, M. Zając: Dyfrakcyjne elementy odwzorowujące. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [2] D. C. O'Shea, T. J. Suleski, A. D. Kathman, D. W. Prather: Diffraction Optics: Design, Fabrication and Test. SPIE Publications, Washington, 2004.
- [3] V. A. Soifer (ed.): Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements (Wiley series in Lasers and Applications). John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [4] S. Tamulevicius, G. Janusas, A. Guobiene, A. Palevicius, V. Ostasevicius, M. Andrulevicius: Optical Characterization of Diffractive Optical Elements Replicated in Polymers. Journal of Micro/ Nanolithography, MEMS, and MOEMS, Vol. 5, 013004, 2006.
- [5] R. Józwicki: Podstawy inżynierii fotonicznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.
- [6] J. Saarinen, M. Rossi: Current Trends of Fabrication Technologies of DOE's and New Applications. Heptagon [online] <http://www.heptagon.fi/downloads/Trends%20of%20Fabrication%20Technologies%202003.pdf>
- [7] N. Mirchin, A. Peled, I. Baal-Zedaka, R. Margolin, M. Zagon, I. Lapsker, A. Verdyan, J. Azoulay: Photodeposited Diffractive Optical Elements of Computer Generated Masks. Applied Surface Science, No. 248, 2005, 509–513.
- [8] J. Bohdanowicz: Dyfrakcyjne elementy optyczne. Systemy alarmowe, Nr 3, 2001, 17–26.
- [9] B. E. A. Saleh, M. C. Teich: Fundamentals of Photonics (2nd Ed.), (Wiley series in Pure and Applied Optics, B. E. A. Saleh ed.), John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007.
- [10] A. Hermerschmidt, S. Krüger: Diffractive Optics: Diffractive Elements Generate Complex Light Patterns. Laser Focus World [online], <http://www.laserfocusworld.com/displayarticle/279856/12/none/none/Feat/Diffractive-Optics:-Diffractive-elements-generate-complex-light-patterns.html>
- [11] O. K. Ersoy: Diffraction, Fourier Optics and Imaging, (Wiley series in Pure and Applied Optics, B. E. A. Saleh ed.), John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007.
- [12] H. Ichikawa: Research Trends and Future View of Diffractive Optics Field. O plus E, No. 234, 1999, 511–519.
- [13] E. Ferrari, V. Emiliani, D. Cojoc, V. Garbin, M. Zahid, C. Durieux, M. Coppey-Moisan, E. Di Fabrizio: Biological Samples Micro-manipulation by Means of Optical Tweezers. Microelectronic Engineering, No. 78–79, 2005, 575–581.
- [14] R. Silvennoinen, V. Vetterl, S. Hason, H. Tuononen, M. Silvennoinen, K. Myller, L. Cvrcek, J. Vanek, P. Prachar: Sensing of Human Plasma Fibrinogen on Polished, Chemically Etched and Carbon Treated Titanium Surfaces by Diffractive Optical Element Based Sensor. Optics Express Vol. 16, 2008, 10130–10140.
- [15] V. Hyvärinen, R. Silvennoinen, K.-E. Peiponen, T. Niskanen: Diffractive Optical Element Based Sensor for Surface Quality Inspection of Concave Punches. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, No. 49, 2000, 167–169.
- [16] R. Silvennoinen, K. Myller, K.-E. Peiponen, J. Salmi, E. J. Pääkkönen: Diffractive optical sensor for gloss differences of injection molded plastic products. Sensors and Actuators A, Vol. 112 (2004), 74–79.
- [17] K. Kodate: Utilization of Diffraction Optical Element in Optical Information Processing. O plus E, No. 234, 1999, 528–535.
- [18] C. J. Want: White light interferometry. [online], http://www.optics.arizona.edu/jcwant/pdf/meeting_papers/whitelightinterferometry.pdf
- [19] Talysurf CCI 6000 – The world's highest resolution automated optical 3D profiler. Brochure, Taylor Hobson, 2005.
- [20] B. Ziętek: Optoelektronika. Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2004.
- [21] K. Patorski, M. Kujawińska, L. Salbut: Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu (K. Patorski red.). Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [22] A. Bankhead: UK Patent Application 0206023.4
- [23] R. T. Blunt: White Light Interferometry – a production worthy technique for measuring surface roughness on semiconductor wafers. Proceedings of CS MANTECH Conference, April 24–27, 2006, British Columbia, Canada, 59–62.
- [24] R. Cincio, W. Kacalak, Cz. Łukianowicz: System Talysurf CCI 6000-metodyka analizy cech powierzchni z wykorzystaniem TalyMap Platinum. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Vol. 54, nr 4, 2008, 187–191.
- [25] M. Conroy, J. Armstrong: A comparison of surface metrology techniques. 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Journal of Physics: Conference Series 13 (2005) 458–465.