



Uniwersytet Warszawski

Wydział Fizyki

ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

tel.: (22) 55 32 080

e-mail: sekretariat@igf.fuw.edu.pl

www.igf.fuw.edu.pl

Prof. dr hab. Tomasz Szoplik

tszoplik@mimuw.edu.pl

Tel: 22 55 32 049

Warszawa, 12 kwietnia 2021

Recenzja

pracy doktorskiej

"Mikroskopia holograficzna z modulacją frontu falowego do wyznaczania geometrii powierzchni elementów mikrooptyki" mgr inż. Marty Mikuły-Zdańkowskiej

Praca powstała pod kierunkiem profesora Tomasza Kozackiego w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Promotorem pomocniczym był dr inż. Juan Martinez-Carranza – pracownik tego samego Instytutu.

Praca doktorska pani Marty Mikuły-Zdańkowskiej zawiera wyniki opublikowane w latach 2016-2020 w 3 artykułach w czasopismach naukowych The Optical Society – OSA (dawnego Amerykańskiego Towarzystwa Optycznego), w tym 2 w Applied Optics i 1 w Optics Express; w 2 artykułach w materiałach pokonferencyjnych The Optical Society – OSA i w 4 artykułach w materiałach pokonferencyjnych SPIE – The international society for optics and photonics. W jednym ważnym artykule (App. Opt. 57, A197-A204 (2018)) i 6 artykułach pokonferencyjnych była pierwszą autorką. Ponieważ są to bardzo świeże prace, to trudno na razie mówić o ich cytowalności.

Rozprawa doktorska jest poświęcona **cyfrowej fourierowskiej mikroskopii holograficznej**, której rozwój jest związany z intensywnymi postępami mikrooptyki. Podobnie jak w profilometrii mechanicznej przedmiotem badań jest tutaj pomiar odbijających powierzchni mikroelementów o dużym gradiencie kształtu. Przykładem takiego elementu jest soczewka o aperturze numerycznej $NA = n \sin \Phi$, gdzie Φ jest kątem aperturowym (kątem widzenia) soczewki, która może być większa od apertury numerycznej cyfrowego modelu układu obrazującego. Środkiem do osiągnięcia tego celu jest stosowanie zaproponowanego przez Gustafssona oświetlenia wieloma padającymi pod dyskretnymi kątami falami płaskimi o wektorach częstości przestrzennych k_1 , takich że k_1 jest mniejsze od maksymalnej częstości przestrzennej w widmie obiektu $k_0 = 2NA/\lambda$, gdzie λ to długość fali wzbudzenia [Mats G. L. Gustafsson, Nonlinear structured-illumination microscopy: wide-field fluorescence imaging with theoretically unlimited resolution, PNAS 102, 13081–13086 (2005)]. W warunkach nieliniowego zapisu takie ustrukturyzowane przestrzennie oświetlenie teoretycznie pozwala na uzyskanie nieograniczenie wysokiej rozdzielczości. W cyfrowym mikroskopie holograficznym przedstawionym w rozprawie Autorka mierzy powierzchnię

mikroelementów o wysokim gradiencie kształtu oświetlając obiekty wiązką sferyczną o rozkładzie fazy dopasowanym do frontu falowego wiązki przedmiotowej. Drugim przedmiotem badań są pomiary wysokości obiektów z nieciągłością kształtu, czyli ze skokami wysokości powierzchni, do których autorka stosuje oświetlenie wieloma falami płaskimi.

Profilometria optyczna ma przewagę nad metodami mikroskopii skanującej typu mikroskopu elektronowego czy mikroskopu sił atomowych dzięki pomiarom w polu o dużej powierzchni (od mm^2 do cm^2), natomiast oferuje gorszą zdolność rozdzielczą. Konkurencyjna w stosunku do cyfrowej mikroskopii holograficznej jest interferometria z wykorzystaniem promieniowania spójnego jak w klasycznych interferometrach Michelsona, Twyman-Greena czy Macha-Zehndera, które miały ograniczenie maksymalnego przesunięcia fazowego do poziomu $\pi/4$. Współczesna interferometria dwuwiązkowa dzięki komputerowej analizie obrazu prążkowego pozwala na pomiar kształtu czoła falowego wiązki przedmiotowej z dokładnością do $\lambda/100$, jednakże problemem jest stabilność układu co ogranicza zakres zastosowań.

W drugim rozdziale rozprawy Autorka przedstawia zasady cyfrowej mikroskopii holograficznej, algorytmy czasowej dyskretnej zmiany fazy, w tym algorytmy Patricka Carre, Kierana G. Larkina, Marii Pirgi i Małgorzaty Kujawińskiej. W 1997 roku w swej pracy doktorskiej Maria Pirga przedstawiła zautomatyzowany system pomiaru kształtu i monitorowania jego zmian metodą projekcji prążków na przestrzennym modulatorze ciekłokrystalicznym.

W trzecim rozdziale Autorka przedstawia dotychczasowe układy cyfrowej mikroskopii holograficznej, gdzie niezbędnymi elementami omawianych układów optycznych są podlegające ciągłemu doskonaleniu przestrzenne modulatory światła i kamery CCD. Omawia układ Johannes Schwidera do wyznaczania promienia krzywizny obiektów sferycznych o dużym gradiencie kształtu z roku 1995 [49] oraz łączący interferometry Twyman-Greena i Macha-Zehndera układ Stephana Reichelta i Hansa Zappe z 2005 roku do pomiaru aberracji, ogniskowej i promienia krzywizny mikrosoczewek [50]. Dość niewiele uwagi poświęca możliwości osiągnięcia nadrozdzielczości w holografii cyfrowej dzięki oświetleniu Gustafssona, mimo że część tych prac pochodzi z Departamentu Optyki w Walencji współpracującego z Wydziałem Mechatroniki. Choć trzeba przyznać, że rzetelnie przedstawia prace swego promotora z wykorzystaniem wielokierunkowego oświetlenia falą płaską [102, 103] jak również falą sferyczną [105].

W trzecim rozdziale pojawia się omówienie podstawowych algorytmów do rekonstrukcji geometrii powierzchni obiektów o wysokim gradiencie kształtu. Autorka odnotowuje tutaj kilka prac [111-116] wykonanych w zespole prof. Kozackiego, w których pomiar powierzchni i wysokim gradiencie kształtu wykonuje się przez analizę drogi optycznej lokalnego promienia lub wykorzystanie dobrze wyznaczonego położenia płaszczyzny ogniskowania. W porównaniu z tymi metodami zaletą cyfrowej mikroskopii holograficznej jest możliwość numerycznego wyznaczania ewolucji frontu falowego poza zakres okresowo powtarzającego się przedziału $(0, 2\pi)$. Osiąga się to metodą konturowania przez wykorzystanie zmiennego współczynnika załamania światła albo oświetlenie wiązkami o różnych długościach fali padającymi pod różnymi kątami.

Krótki czwarty rozdział pracy doktorskiej omawia obiekty pomiarowe o ciągłym oraz schodkowym i nieciągłym rozkładzie kształtu.

Obszerny rozdział piąty rozprawy (str. 46-84), w swej pierwszej części 5.1, zawiera opis **fourierowskiego cyfrowego mikroskopu holograficznego**, na który składa się optyczny układ pomiarowy w geometrii zmodyfikowanego interferometru Twyman-Greena z oświetleniem monochromatycznym laserem pracy ciągłej o długości fali 532 nm, mocy 50 mW i drodze

koherencji 50 m oraz cyfrowy procesor do przetwarzania hologramów w środowisku Labview i Matlab. Wykorzystana kamera CCD miała rozdzielczość 2456×2056 pikseli o wymiarach $3,45 \times 3,45 \mu\text{m}$ i szybkości 17 ramek na sekundę. Automatyczną analizę fazy umożliwił aktuator piezoelektryczny pracujący w zakresie kątowym $\pm 73 \mu\text{rad}$ z minimalnym krokiem $0,3 \mu\text{rad}$. Program sterujący opracowała Doktoranta w środowisku Labview z wykorzystaniem stolików liniowych do zmiany położenia elementów ruchomych (obiektu i kamery CCD) i sterownika piezoelektrycznego do zmiany fazy wiązki odniesienia.

W **mikroskopie**, fala sferyczna generowana w płaszczyźnie źródła jest odbita od płaszczyzny najlepszej ostrości dla danego położenia obiektu. Następnie fala przedmiotowa jest przekierowana do gałęzi detekcji i trafia na kamerę CCD umieszczoną w obrazowej płaszczyźnie najlepszej ostrości. Sprzężone zmiany położenia obiektu i kamery CCD pozwalają na zapis powierzchni mikrosoczewek o wysokim gradiencie kształtu. Front fazowy wiązki odniesienia jest dobrany do frontu wiązki przedmiotowej dzięki ruchom zwierciadła referencyjnego położonego na przetworniku piezoelektrycznym. Kilka podrozdziałów od 5.1.2.1 do 5.1.2.7 jest poświęconych szczegółom technicznemu układowi optycznemu.

Podrozdział 5.2 przedstawia etapy rekonstrukcji kształtu obiektu. Dzięki wybranej geometrii układu wszystkie wiązki propagują się przyosiowo co pozwala zaniedbać inne aberracje poza sferyczną, która jest kompensowana numerycznie dzięki wykorzystaniu hologramu kompensacyjnego zapisanego dla obiektu w postaci zwierciadła płaskiego. Rekonstrukcji kształtu obiektu o dużej aperturze numerycznej dokonuje się algorytmem do analizy biegu lokalnego promienia optycznego opracowanym przez T. Kozackiego, K. Liżewskiego i J. Kostencką w 2014 roku [Opt. Express 22, 16991 (2014)].

Praktyczne znaczenie **fourierowskiego cyfrowego mikroskopu holograficznego** zależy starannej kalibracji układu (podrozdział 5.3) oraz analizy wpływu niedokładności justowania układu pomiarowego na błąd wyznaczania geometrii kształtu (podrozdział 5.4).

Pozostała część rozdziału piątego jest poświęcona pomiarom wykonanym na kilku różnych obiektach:

- sferycznej mikrosoczewce z krzemionki o promieniu krzywizny $120 \mu\text{m}$, średnicy $95 \mu\text{m}$ i aperturze numerycznej $NA = 0,19$. Pomiar promienia krzywizny przeprowadzony metodą czasowej dyskretnej zmiany fazy był zgodny z wartością podaną przez producenta.

- asferycznej mikrosoczewce z PMMA o średnicy $190 \mu\text{m}$ i promieniu krzywizny $72 \mu\text{m}$;

- krzemowej mikroformie do replikacji mikrosoczewek o podstawie trójkątnej z długością boku $72 \mu\text{m}$ i wysokim nachyleniu ścian. W tym przypadku Autorka zastosowała możliwą w Jej układzie rejestrację i rekonstrukcję hologramów wieloramkową (tutaj piecioramkową) metodą czasowej dyskretnej zmiany fazy a następnie potwierdziła zmierzony kształt metodą transformaty Fouriera. Zmierzony kształt mikroformy został potwierdzony w pomiarze koherencyjnym profilometrem optycznym Kontur GT-X firmy Bruker.

- ceramicznej kuli o promieniu krzywizny $1,5 \text{ mm}$ i błędzie sferyczności mniejszym niż $0,13 \mu\text{m}$. Ze względu na ograniczony przedział ruchu kamery CCD i duży promień krzywizny kuli dopasowanie płaszczyzny najlepszej ostrości do powierzchni kuli było możliwe dzięki propagacji numerycznej pola optycznego fali przedmiotowej. Hologram przedmiotu i hologram kompensacyjny, który służy do ograniczenia wpływu aberracji sferycznej, zapisano piecioramkową metodą czasowej dyskretnej zmiany fazy.

W podsumowaniu części pomiarowej (podrozdział 5.7) Autorka rozprawy stwierdza, że opracowany cyfrowy mikroskop holograficzny z dwiema wiązkami o sferycznych frontach fazowych pozwala na ilościowy pomiar kształtu powierzchni z dokładnością do nanometrów. Mikroskop jest wyposażony w automatyczną procedurę kalibracji. Dzięki oświetleniu falami sferycznymi, przy zachowaniu wszystkich pozostałych parametrów układu bez zmiany, proponowany mikroskop pozwala mierzyć w polu o średnicy 1,1 mm w porównaniu z obszarem o średnicy 0,3 mm dostępnym dla oświetlenia falami płaskimi.

Szósty rozdział rozprawy (str. 84-119) jest poświęcony pomiarom wysokości obiektów ze skokową nieciągłością kształtu w cyfrowym mikroskopie holograficznym z oświetleniem obiektu wieloma padającymi **pod dyskretnymi kątami falami płaskimi**. Przedstawiona metoda polega na połączeniu dwóch technik: znanej z prac Mitsuo Takedy holografii koherencyjnej oraz interferometrii wielokątowej. W interferometrii wielokątowej trójwymiarową rekonstrukcję obiektu otrzymuje się z serii hologramów zapisanych pod różnymi kątami oświetlenia obiektu, co pozwala odtworzyć fazę w punktach na różnej wysokości w całym polu widzenia. Szczególnie istotna jest możliwość wyznaczenia całkowitej wysokości obiektów o charakterze schodkowym, których wysokość znacznie przewyższa długość użytej fali świetlnej.

W zmodyfikowanym interferometrze Twyman-Greena (Rys. 71) płaska fala odniesienia o kontrolowanym natężeniu pada normalnie na kamerę CMOS, natomiast obiekt oświetla pod kątem 0° wiązka ugięta pierwszego rzędu kierowana pod różnymi kątami przez SLM, która odbija się od różnych poziomów wysokości obiektu i jako fala przedmiotowa pada na kamerę CMOS. W drodze wiązki przedmiotowej znajduje się układ optyczny, który sprzęga płaszczyznę kamery CMOS z badaną powierzchnią odpowiedniego schodka obiektu oraz płaszczyznę SLM.

Całkowita wysokość obiektu oświetlanego falą o długości 532 nm może sięgać 24,54 μm jeśli pomiar wykorzystuje 28 hologramów zapisanych dla równych skoków składowych podłużnych wektora falowego fali przedmiotowej. Nie znana a priori wysokość skoków w obiektach schodkowych wymaga opracowania strategii zapisywania hologramów. Pierwsza strategia polega na skanowaniu obiektu falami płaskimi o równym skoku składowej podłużnej wektora falowego i takim doborze kątów oświetlenia żeby kolejne składowe podłużne wektora falowego były rozmieszczone równomiernie. Oznacza to zwiększenie liczby hologramów na skutek zmniejszenia skoku składowej podłużnej wektora falowego. Inna strategia polega na skanowaniu obiektu falami płaskimi o równym skoku wartości kąta, wtedy liczba hologramów powinna być większa niż 10 żeby wyznaczyć funkcję skanowania wzdłużnego (LSF) z niskim poziomem szumu.

Rozdział szósty jest uzupełniony szczegółowym opisem bloków mikroskopu (Rys. 82), poszczególnych urządzeń i ich kalibracji oraz wyników pomiarowych obiektów schodkowych. Autorka rozprawy podkreśla użycie fazowego (odbiciowego), przestrzennego modulatora światła GAEA-2 (HoloEye Photonics) o najlepszej dostępnej na rynku rozdzielczości 4160×2464 pikseli (Rys. 73b).

Rozdział siódmy przedstawia sposoby kalibracji ciekłokrystalicznego modulatora światła metodami interferometrycznymi (podrozdział 7.1), dyfrakcyjnymi i polaryzacyjnymi. Do znanych metod kalibracji SLMów Autorka dokłada własną polaryzacyjno-interferometryczną metodę pomiaru nieliniowości krzywej gamma, czyli zależności $\log(\text{fazy})$ od $\log(\text{szarości})$ modulatorów, która wykorzystuje soczewkę z geometryczną fazą. W ogólności, taka soczewka rozdziela padającą na nią falę płaską o polaryzacji kołowej prawoskrętnej w falę zbieżną a falę o polaryzacji

kołowej lewoskrętnej w falę rozbieżną. W układzie przedstawionym w rozprawie półfalówka skręca liniową polaryzację wiązki światła i dopasowuje ją do osi szybkiej SLMa. Dzięki kostce światło-dzielącej fale płaska i sferyczna zbieżna interferują i są zapisane przez kamerę polaryzacyjną zdolną do jednoczesnego zapisu czterech przesuniętych w fazie hologramów. Zmiany odcieni szarości w SLMie w wybranych polach 100×100 pikseli generowane jednocześnie z obiektem fazowym położonym poza osią optyczną są zapisywane w hologramach i podlegają dalszemu przetwarzaniu.

Zaletą rozprawy jest jasne omówienie tematyki badawczej i przedstawienie ewolucji fourierowskiego cyfrowego mikroskopu holograficznego zachodzącej w wyniku ulepszania przestrzennych modulatorów światła firmy HoloEye Photonics od PLUTO-2 z 1920×1080 pikselami do GAEA-2 z 4160×2464 pikselami. W rezultacie Autorka rozprawy uzyskała wysoką dokładność pomiaru wysokości obiektów ze skokową nieciągłością kształtu dzięki bardzo dobrej dokładności zmiany kąta oświetlenia obiektu. Natomiast łatwość zmian frontu falowego pozwoliła na korekcję aberracji układu optycznego pracującego w oświetleniu pozaosiowym dzięki zapisywanym pod różnymi kątami hologramom kompensacyjnym. Pozwala to mieć nadzieję, że cyfrowa mikroskopia holograficzna ma przed sobą ciekawą przyszłość. Jest to szczególnie miłe dla kogoś kto zajmował się ilościową wizualizacją obiektów o dużym gradiencie fazy, z maksymalnym przesunięciem fazowym sięgającym 50π i stosował zmodyfikowany filtr pierwiastkowy, którego transmitancja amplitudowa proporcjonalna do pierwiastka z częstości zawartych w widmie obiektu była ograniczona do wąskiego zakresu widmowego.

Rozprawa Pani Marty Mikuły-Zdańkowskiej prezentuje udoskonalenie fourierowskiego cyfrowego mikroskopu holograficznego dzięki użyciu najlepszych przestrzennych modulatorów światła, co jednak w głównej mierze jest zasługą Promotora. Jednakże wkład Pani Zdańkowska był poważny: opracowała w środowisku Labview i Matlab kody do przetwarzania hologramów, programy sterujące stolikami do zmiany położenia obiektów, kamery CCD i sterownika piezoelektrycznego do zmiany fazy wiązki odniesienia. Jest również Autorką nowej polaryzacyjno-interferometrycznej metody pomiaru nieliniowości krzywej gamma modulatorów SLM, która wykorzystuje soczewkę z geometryczną fazą.

Nie mam zastrzeżeń redakcyjnych, jakkolwiek zwraca uwagę niestarannie przygotowana i nieuporządkowana bibliografia, co bardzo utrudnia śledzenie rozwoju cyfrowej mikroskopii holograficznej. Na przykład: ta sama praca z Optics Express występuje pod numerami 105, 109 oraz 110 i tylko w tym ostatnim miejscu ma poprawne dane bibliograficzne.

Uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marty Mikuły-Zdańkowskiej odpowiada warunkom określonym w Ustawie z dnia 3 lipca 2018 roku. Zatem rozprawa może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej. Proszę więc o dopuszczenie mgr inż. Marty Mikuły-Zdańkowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

