

Intensywny rozwój współczesnej nauki, przemysłu oraz biomedycyny stał się przyczyną, dla której jesteśmy świadkami nagłego wzrostu zainteresowania nowymi metodami obrazowania fazowego, które umożliwiają analizę niewidocznych fragmentów różnego typu obiektów. Tego typu pomiary, znane jako ilościowe pomiary fazy (QPI - quantitative phase imaging) pozwalają m.in. na wizualizację oraz pomiar nieznanych procesów biologicznych, a także opracowywanie zaawansowanych nano- mikro- technologii. Pierwszym historycznym krokiem, który pozwolił na wizualizację przezroczystych przedmiotów fazowych było opracowanie metody kontrastu fazowego Zernike we wczesnych latach trzydziestych ubiegłego wieku. Metoda Zernike nie zapewniała jednak podstawowej cechy QPI - otrzymane pomiary mają charakter jakościowy, a nie ilościowy, co wykluczało możliwość przeprowadzenia dokładnych badań różnego rodzaju procesów technicznych czy biologicznych. Prawdziwy przełom w dziedzinie obrazowania fazowego nastąpił wraz z rozwojem technik interferencyjnych oraz holograficznych, które pozbawione są podstawowej wady metody kontrastu fazowego, a więc umożliwiają pomiary ilościowe. Współcześnie, metodą, który ma szczególnie potencjał w dziedzinie QPI jest cyfrowa mikroskopia holograficzna (DHM – digital holographic microscopy) będąca synergicznym połączeniem holografii, mikroskopii oraz metod numerycznych. Ta unikalna technika pozwala na rejestrację i rekonstrukcję informacji o rozkładzie zespolonego frontu falowego, co daje teoretyczną możliwość idealnego odwzorowania dowolnej trójwymiarowej (3D) sceny, tj. uzyskania trójwymiarowej kopii obrazu przedmiotu.

Niestety obrazowanie w DHM daje jedynie wrażenie trójwymiarowości obiektu, i tak naprawdę nie daje możliwości charakteryzacji próbki w trzech wymiarach. Brak możliwości obrazowania 3D jest efektem silnie ograniczonego zakresu przenoszonych częstotliwości przestrzennych 3D przez układ mikroskopowy. Dlatego też DHM jest często nazywany techniką obrazowania $2\frac{1}{2}$ D.

Naukowe wyzwania projektu są oparte na zmodyfikowanej konfiguracji DHM wykorzystującej dynamiczną modulację frontu falowego wiązki oświetlającej, która pozwala na zwiększenie przenoszonego zakresu częstotliwościowego i w konsekwencji umożliwienie obrazowania 3D. Jest one realizowane poprzez zastosowanie cyfrowej mikroskopii tomograficznej (DTHM - digital holographic tomographic microscopy), w której rejestrowane są hologramy z dynamiczną modulacją oświetlenia czoła fali, a następnie stosowany jest dedykowany algorytm rekonstrukcji tomograficznej. Wzrost potencjału obrazowania 3D DHM, który będzie efektem niniejszego projektu, jest odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie na badania obiektów technologicznych i biologicznych w mikroskali, a przede wszystkim na pomiary mikro topografii i rozkładu współczynnika załamania 3D.

QPI realizowany za pomocą DHM ma ogromny potencjał badawczy, o którym świadczy kilka kluczowych technik ważnych dla projektu:

- obrazowanie z rozszerzoną głębią ostrości (EFI - extended focus imaging), w którym na podstawie pojedynczego hologramu uzyskiwany jest ostry obraz wielu obiektów znajdujących się na różnych głębokościach,
- metody automatycznego ogniskowania (autofocusing), które pozwalają na automatyczną detekcję płaszczyzny ostrego zogniskowania badanego obiektu lub jego elementów,
- dokładne metody pomiaru kształtu mikro-przedmiotów,
- możliwość obrazowania zmian współczynnika załamania 3D.

Niestety potencjał DHM wciąż nie jest w pełni wykorzystany, co jest związane z istnieniem szeregu podstawowych ograniczeń: niska dokładność EFI; niska dokładność metod automatycznego obrazowania i jej zależność od własności badanego obiektu; dokładność metod rekonstrukcji kształtu, która jest ograniczona błędem wyznaczania płaszczyzny ostrości; konieczność realizacji pomiarów w odniesieniu do określonej płaszczyzny referencji; niska wartość niejednoznacznego zakresu pomiarowego (NZP) odpowiadająca długości fali. W zakresie 3D QPI uzyskanej za pomocą techniki tomograficznej główne wyzwanie stanowi konieczność rejestracji ogromnej ilości danych, zazwyczaj 100 - 1000 hologramów, dla różnej modulacji oświetlenia czoła fali. Co więcej, zastosowana modulacja oświetlenia musi być szybka i precyzyjna, co łącznie powoduje, że poprzeczka wobec eksperymentalnych układów DHTM jest postawiona niezwykle wysoko. Powyższe aspekty stanowią wąskie gardło dla szerokiego zastosowania 3D QPI i jego komercjalizacji na masową skalę.

Usunięcie wszystkich wymienionych ograniczeń DHM i DHTM stanowi główny cel projektu. Realizacja tego ambitnego celu pozwoli wykorzystać pełen potencjał tych technik oraz otworzy możliwość ich wykorzystania w wielu dziedzinach nauki i techniki.

Zadeklarowany w projekcie rozwój technik holograficznych zostanie uzyskany dzięki realizacji nowego konceptu DHM, który pozwali na pełne wykorzystanie zwiększonego zakresu informacyjnego poprzez zastosowanie dynamicznej modulacji frontu falowego. Rozwój ten będzie bazował na szeregu teoretycznych rozwiązań odzyskiwania informacji 3D/4D (3D + czas) o badanym przedmiocie, która jest zakodowana w serii hologramów zarejestrowanych dla różnych warunków oświetlenia.

Proponowane rozwiązania pozwolą na powstanie nowych możliwości obrazowania oraz pomiaru mikro geometrii powierzchni i grubości mikroelementów:

- nowe metody pomiaru mikro-topografii o dużych skokach wysokości,
- nowe metody autofocusingu o zwiększonej dokładności i rozszerzonym zakresie lokalizacji obrazu oparte na trzech różnych podejściach: rozszerzenie zakresu pokrycia częstotliwościowego, analiza współzależności fazowych między zarejestrowanymi hologramami, konstrukcji i propagacji sztucznego hologramu częściowo koherentnego,
- nowe poza-osiowe metody pomiaru mikro-topografii niewymagające dostępu do płaszczyzny referencyjnej.

Zaproponowane w projekcie rozwiązania tomograficzne będą charakteryzować się uproszczoną konstrukcją, która potencjalnie umożliwi zwiększenie dostępności technik obrazowania rozkładu współczynnika załamania 3D mikrostruktur oraz procesów dynamicznych. Deklarowany rozwój techniki DHTM zostanie uzyskany dzięki zaproponowaniu nowatorskich i kompleksowych rozwiązań tomograficznych (systemy + algorytmy) wykorzystujących:

- rozwiązanie tomograficzne z multipleksowaniem przestrzennym dla obrazowania 4D obiektów dynamicznych pozwalających na uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji tomograficznej dla minimalnej liczby zarejestrowanych obrazów,
- opracowanie koncepcji tomograficznej bazującej na poprzecznym przesuwie badanego przedmiotu oświetlonego wysokoaperturową falą sferyczną, która pozwala na znaczne uproszczenie i obniżenie kosztów konstrukcji układu DHTM.

Dla celów realizacji rozwiązania bazującego na poprzecznym przesuwie przedmiotu zostanie opracowany dedykowany algorytm rekonstrukcji tomograficznej uwzględniający efekty dyfrakcji oraz skanowania falą sferyczną. Naukowe wyzwanie obrazowania dynamicznego 4D zostanie osiągnięte dzięki opracowaniu nowych iteracyjnych algorytmów rekonstrukcji tomograficznych

pozwalających na uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji tomograficznej 3D dla minimalnej liczby zarejestrowanych obrazów. Aby zminimalizować efekt wpływu brakujących komponentów częstotliwościowych planujemy zastosować dwa główne podejścia: 1) rozplot (deconvolution) 3D oraz 2) algorytmy iteracyjne wykorzystujące dokładne metody symulacji rozpraszania 3D. W tym celu, w projekcie zostaną opracowane odpowiednie narzędzia umożliwiające szybką i dokładną symulację rozchodzenia się światła w niejednorodnych mikrostrukturach 3D.