

## **[BayesOM] Bayesowskie wnioskowanie w metrologii optycznej** **Kierownik projektu: dr hab. inż. Maciej Trusiak, Politechnika Warszawska**

Przemysł półprzewodnikowy odgrywa kluczową rolę we współczesnym rozwoju nauki i techniki. Metody metrologiczne są niezastąpione w zapewnieniu udanej produkcji i weryfikacji jakości. Optyczne techniki metrologiczne są niezwykle interesujące, ponieważ zapewniają nieinwazyjne środki do precyzyjnych i szybkich pomiarów z dokładnością do nanoskali. Metody bezskaningowe, takie jak interferometria szerokiego pola, mają kluczowe znaczenie, ponieważ umożliwiają jednoczesne pomiary prowadzone we wszystkich pikselach kamery. Informacja dotycząca geometrii elementu półprzewodnikowego i rozkładu współczynnika załamania światła jest zakodowana w składniku fazowym generowanego interferometrycznego obrazu prążkowego (interferogramu). Centralnym aspektem tej techniki metrologii optycznej jest demodulacja mapy fazowej z zarejestrowanego rozkładu intensywności światła koherentnego. Metody analizy obrazów prążkowych są w ciągłym rozwoju, ponieważ coraz trudniejsze warunki, takie jak produkcja addytywna, nakładają rygorystyczne wymagania metrologiczne. Najbardziej popularna i niezawodna technika demodulacji fazowej opiera się na rejestracji trzech lub więcej interferogramów z przesunięciem fazowym (zmianą poprzecznego położenia poszczególnych prążków). Generuje to konieczność posiadania precyzyjnego modułu przesunięcia fazowego w interferometrze, co czyni go bardziej skomplikowanym i kosztownym. Ponadto procedura demodulacji fazy poprzez przesunięcie fazowe obrazu prążkowego wydłuża proces pomiarowy. Dokładność techniki zależy od precyzji przesunięcia fazowego, jakości zarejestrowanych interferogramów (stosunek sygnału do szumu) oraz samego algorytmu demodulacji fazowej. Ogólne ograniczenie detekcji przesunięcia fazowego dotyczy przemieszczenia prążka co najmniej o wielkości piksela. Dodatkowo, miejsce gwałtownej zmiany wysokości profilu półprzewodnikowej struktury badanej jest pełne błędów fazowych, powiększonych zwłaszcza przez szum intensywnościowy.

W projekcie [BayesOM] zbadamy nowatorską koncepcję algorytmicznej demodulacji fazy z wykorzystaniem pojedynczego obrazu prążkowego. Dotychczasowe algorytmy jednoramkowej demodulacji fazy wykorzystywały transformatę Fouriera, Hilberta lub falkową i były ograniczone silnymi błędami, szczególnie w obszarze nagłej zmiany wysokości mierzonego obiektu schodkowego, np. struktury falowodu (dolnoprzepustowa filtracja kroku fazowego i silny szum fazowy). Zgodnie z naszą najlepszą wiedzą, naszym nowatorskim w skali światowej pomysłem jest zastosowanie wnioskowania Bayesowskiego w metrologii optycznej. Będziemy badać jak różne modele Bayesowskie mogą być zastosowane do estymacji „posteriorów”, w których zakodowane będą parametry geometrii badanych struktur falowodowych (wysokość, szerokość, nachylenie, itp.). Świetną wartością dodaną statystycznej analizy Bayesowskiej jest automatyczna estymacja wartości oczekiwanej parametru, ale także rygorystyczna analiza błędu tej estymacji, co ma niebagatelne znaczenie w precyzyjnej metrologii optycznej. Wstępne badania pokazują, że możemy łatwo osiągnąć subpikselową czułość zmian profilu wysokości, co w połączeniu z oświetleniem laserem fioletowym (długość fali 405 nm) i układem interferometrycznym typu Twyman-Green lub Linnik może dać pionierską czułość i precyzję pomiarów optycznych w pełnym polu na poziomie pojedynczych Angströmów (dziesiątych części nanometra, lub setek pikometrów). Będziemy badać wiele modeli w wymagających warunkach symulacyjnych i eksperymentalnych, biorąc pod uwagę różne obiekty (kształty, odbicia, wartości wysokości kroku, itp.), poziomy szumu i kontrastu prążków (koherentne i częściowo koherentne źródła światła) oraz dodatkowe algorytmy numeryczne do minimalizacji szumu i zwiększenia kontrastu prążków. Zakładając rzeczywisty profil struktury półprzewodnikowej uwolnimy się od utraty rozdzielczości związanej z fizycznymi (apertura numeryczna obiektu mikroskopowego) i numerycznymi (błędy algorytmiczne) ograniczeniami.

Planowane innowacje są szczególnie ważne w metrologii półprzewodników, podkreślając możliwe zastosowania w pomiarach falowodowych kluczowych dla nanoskopii fluorescencyjnej na czipie fotonicznym pioniersko opracowanej przez grupę profesora Balpreeta Ahluwalii z The Arctic University of Norway (Tromsø). Badania podstawowe są potrzebne, aby ocenić, w jakim stopniu wnioskowanie Bayesowskie może być zastosowane w metrologii optycznej do statystycznej estymacji mapy fazowej. Przewiduje się, że doktorant spędzi 6 miesięcy w laboratorium profesora Ahluwalii w Tromsø opanowując falowodowe procedury pomiarowe i wdrażając wnioskowanie bayesowskie. Grupa Ahluwalii jest pionierem w rozwoju technologii optycznej nanoskopii fluorescencyjnej „on-chip”, gdzie falowody są innowacyjnie wykorzystywane do oświetlania próbek w reżimie fal ewanescentnych, a ich szybkie i wiarygodne pomiary mają kluczowe znaczenie.