

15.01.2024, Warszawa

dr hab. inż. Maciej Trusiak, prof. uczelni
Zakład Inżynierii Fotonicznej
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki
Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej

Recenzja pracy doktorskiej pani mgr Sanjukty Kundu

Opiniowana rozprawa doktorska pani magister Sanjukty Kundu zatytułowana "*Spatial characterization of single photons and entangled photon pairs*" została wykonana pod promotorską naukową opieką dr. hab. Piotra Fity i dr. Radka Łapkiewicza w dyscyplinie nauki fizyczne na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Rozprawa doktorska składa się z pięciu rozdziałów i skupia się na różnych aspektach optyki kwantowej i fotoniki. Rozdział pierwszy to wstęp, w którym pani magister Sanjukta Kundu umiejętnie i ciekawie wprowadza skomplikowaną tematykę rozprawy oraz wszystkie najważniejsze pojęcia. Doktorantka słusznie zwraca uwagę na silną potrzebę analizy przestrzennych parametrów pojedynczych fotonów i par fotonów, co może mieć bardzo istotne znaczenie dla przyszłej komunikacji kwantowej, obrazowania kwantowego i obliczeń kwantowych. Rozdziały nr 2, 3 i 4 stanowią merytoryczną oś rozprawy i koncentrują się na eksperymentalnym badaniu przestrzennych profili pojedynczych fotonów i przestrzennego splątania w parach fotonów. Rozdział nr 5 kończy rozprawę podsumowując przeprowadzone badania oraz wskazując na potencjalne przyszłe interesujące kierunki rozwoju tematyki rozprawy.

Praca doktorska, w swojej warstwie merytorycznych nowości naukowych, obejmuje trzy główne zagadnienia:

- (1) Ilościowa charakterystyka przestrzennych własności pojedynczych fotonów: pani mgr Sanjukta Kundu wprowadza interferometryczną technikę bez dodatkowej wiązki referencyjnej (interferencja pojedynczego fotonu z samym sobą) do kompleksowej charakterystyki dwuwymiarowego rozkładu amplitudy zespolonej (fazy i amplitudy) pojedynczego fotonu.

- (2) Pomiary przestrzennych korelacji kwantowych za pomocą adaptacyjnie sterowanej hybrydowej kamery jednofotonowej: Doktorantka rozwija hybrydową kamerę do obserwacji przestrzennych korelacji w parach fotonów.
- (3) Nieklasyczna interferencja przestrzennie splątanych par fotonów: Doktorantka bada obrazowanie kwantowe z niewykrytymi fotonami w celu analizy korelacji par fotonów.

W rozdziale nr 2 Doktorantka opracowała „samo-referencyjną” metodę interferometryczną (foton interferuje z samym sobą), która umożliwia skuteczną rekonstrukcję zarówno przestrzennej fazy, jak i profilu amplitudy (pełnej amplitudy zespolonej) niezidentyfikowanego fotonu. Kluczowym aspektem tej techniki jest jej niezależność od fotonu referencyjnego, co zapewnia systemowi mniejsze skomplikowanie, odporność i ułatwia jego zastosowanie nawet w warunkach niskiego sygnału. Opracowana metoda jest wrażliwa na fluktuacje fazowe interferometru, jednak problem ten, zdaniem Doktorantki można rozwiązać poprzez zastosowanie interferometrycznych układów wspólnej drogi. Doktorantka sugeruje także możliwość wykorzystania interferometrii shearingowej (z poprzecznym rozdzieleniem czoła fali). Metoda opracowana i z powodzeniem zaimplementowana eksperymentalnie przez Doktorantkę wykazuje wszechstronność, nie ogranicza się do rekonstrukcji fazy jednowymiarowej i jest zdolna do charakteryzowania dowolnej nieznanej struktury przestrzennej pojedynczego fotonu, w tym także modów orbitalnego momentu pędu. Ze względu na swoją prostotę, proponowany schemat pomiaru ma duży potencjał zastosowania w zakresie komunikacji i obrazowania kwantowego. Techniki analogiczne do tej opracowanej przez Doktorantkę mogą znaleźć zastosowanie w charakteryzowaniu spektralnych stopni swobody fotonów i w interferometrii fal materii. Zdaniem Doktorantki, ważnym kierunkiem przyszłych badań będzie rozszerzenie metody na stany mieszane lub splątane.

Warto odnotować, iż badania przeprowadzone przez panią mgr Sanjuktę Kundu opisane w rozdziale nr 2 zostały opublikowane w czasopiśmie Quantum: Wiktor Szadowiak, Sanjukta Kundu, Jerzy Szuniewicz, Radek Lapkiewicz, „Self-referenced hologram of a single photon beam,” Quantum 5, 516 (2021).

Po interesującej lekturze rozdziału nr 2 chciałbym przedstawić następujące komentarze i pytania.

2.1. Ile czasu trwa generacja interferogramu/hologramu? Pytanie wiąże się z ewentualną stosownością układu do badania zjawisk zmiennych w czasie. W pracy doktorskiej

opisano badania efektów statycznych, czy rozdzielczość czasowa metody pozwala na badania zjawisk dynamicznych?

2.2. Od czego zależy stosunek sygnału do szumu rejestrowanego laboratoryjnie interferogramu/hologramu oraz wyznaczonego rozkładu fazy i amplitudy? Czy Doktorantka rozważała numeryczne lub eksperymentalne metody poprawy stosunku sygnału do szumu w dziedzinie intensywności/fazy/amplitudy?

2.3. Czy po wyznaczeniu amplitudy zespolonej Doktorantka rozważała holograficzną propagację numeryczną takiego zespolonego frontu falowego?

2.4. Jaka jest estymowana przestrzenna rozdzielczość opracowanego układu interferencyjnego (ta teoretyczna i ta eksperymentalnie potwierdzona np. z wykorzystaniem testu USAF)? Jaka jest estymowana czułość fazowa (minimalna zmiana wprowadzona przez obiekt – np. płytkę spiralnej fazy – która będzie odróżnialna od tła i szumu)?

2.5. Komentarz do metody Fouriera: czynnik liniowy można usunąć także bez dodatkowego pomiaru – wystarczy w widmie przesunąć pik informacyjny na środek. Dodatkowo, wysoki kontrast prążków w metodzie Fouriera nie jest sprawą kluczową, głównie dlatego, że transformacja Fouriera globalnie wylicza pojedynczy piksel widma korzystając ze wszystkich pikseli obrazu prążkowego.

W rozdziale nr 3 Doktorantka przedstawia innowacyjne badania dotyczące hybrydowej kamery rejestrującej pojedyncze fotony, umożliwiającej adaptacyjną kontrolę wzmacniacza obrazu w celu wyboru liczby wykrywanych fotonów. Kluczową zaletą tego podejścia jest znaczne zwiększenie szybkości akwizycji danych w porównaniu do standardowych, nieadaptacyjnych metod. Doktorantka demonstruje również możliwość dostosowania czasu bramkowania do tempa detekcji fotonów za pomocą szybkiej pętli sprzężenia zwrotnego opartej na FPGA, zapewniając lepszą kontrolę nad procesem akwizycji. Innowacyjność tej bardzo ciekawej metody głównie polega na ciągłym zliczaniu fotonów w czasie rzeczywistym i wykorzystywaniu informacji o ich liczbie do zakończenia bieżącego procesu akwizycji. Ta nowa technika umożliwia precyzyjne dostosowanie czasu akwizycji bezpośrednio po wykryciu fotonu przez szybki detektor. Prace pani mgr Sanjukty Kundu wykazały również skuteczność techniki detekcji w obserwacji efektów optyki kwantowej, takich jak proces SPDC, podkreślając potencjał kamery w fundamentalnych naukach o informacji kwantowej i jej przyszłych zastosowaniach, w tym w kwantowym obrazowaniu i kwantowych korelacjach w ośrodkach rozpraszających. Doktorantce udało

się pokonać ograniczenia nowoczesnych wzmacnianych kamer CMOS i CCD poprzez opracowanie hybrydowej kamery z dodaną szybką pętlą sprzężenia zwrotnego i zaoferowanie ogromnej efektywnej liczby pikseli nieosiągalnej dla obecnych detektorów typu SPAD. Unikalna zdolność nowej hybrydowej kamery do wykrywania pojedynczych zdarzeń fotonowych z wysoką rozdzielczością przestrzenną i czasową czyni ją wysoce atrakcyjną w kontekście obrazowania kwantowego.

Po ciekawej lekturze rozdziału nr 3 chciałbym przedstawić następujące pytania.

3.1. Czy opracowana hybrydowa kamera może zostać w mało kłopotliwy sposób przeniesiona do innego laboratorium i tam wykorzystywana, np. do mikroskopii fluorescencyjnej (np. typu ISM Image Scanning Microscopy jak wykorzystywane są detektory matrycowe SPAD)?

3.2. Jaka jest przyczyna występowania, na Fig. 3.7. obraz (b), horyzontalnego artefaktu w okolicy środka obrazu?

3.3. Skąd wynika różnica w doświetleniu obrazów (a) i (b) na Fig. 3.9.? Obraz (b) ma wyraźnie ciemniejszy region, przy czym obraz (a) wygląda na bardziej jednorodnie doświetlony.

W czwartym rozdziale pracy Doktorantka skupia się na mierzeniu korelacji między fotonami SPDC: signal i idler. Doktorantka przeprowadziła także pomiar rozdzielczości przestrzennej w QIUP (Kwantowej Interferometrii z Użyciem Nierejestrowanych Fotonów). Istotnym wynikiem eksperymentu było wykazanie, że znany obiekt może być wykorzystany do wnioskowania o właściwościach par fotonów. Podejście to pozwoliło uzyskać informacje o jednym fotonie poprzez rejestrowanie i analizowanie wyłącznie jego partnera, co otwiera nowe perspektywy w zakresie obrazowania opartego na parach fotonów. Dodatkowo, zdaniem Doktorantki, badanie to może być rozszerzone o mierzenie korelacji pozycji wraz z korelacją pędu w zagadnieniu splątania typu pozycja-pęd. Doktorantka zbadała rolę korelacji przestrzennej w nieliniowych interferometrach (Zou-Wang-Mandel i Frustrated Two-Photon) i obrazowaniu z niewykrytymi fotonami. Celem było scharakteryzowanie rozdzielczości przestrzennej systemu, w którym zarówno obiekt, jak i kamera znajdowały się w dalekim polu źródła par fotonowych (nieliniowego kryształu). Metoda ta może być również rozszerzona na dyskretne stopnie swobody, aby potwierdzić splątanie wysokowymiarowe (OAM).

Po lekturze rozdziału nr 4 chciałbym przedstawić następujące komentarze i pytania.

4.1. Od czego zależy stosunek sygnału do szumu rejestrowanych prążków interferencyjnych w technice QUIP?

4.2. Czy Doktorantka podjęła próby wykorzystania amplitudowego i/lub fazowego testu rozdzielczości przestrzennej, np. typu USAF?

4.3. Dlaczego w tym rozdziale Doktorantka nie zdecydowała się na przedstawienie rozkładów fazy i obliczanie amplitudy zespolonej? Wspomniana jest metoda przesuwu fazy, ale także metoda transformacji Fouriera, wykorzystana w rozdziale nr 2, mogłaby okazać się tutaj przydatna, oczywiście przy odpowiedniej modulacji prążków interferencyjnych (wystarczająco stromy liniowy człon fazowy).

Przechodząc do krytycznej oceny rezultatów badań pragnę zaznaczyć, iż rozprawa doktorska pani mgr Sanjukty Kundu wnosi imponujący wkład w dziedzinę eksperymentalnej optyki kwantowej, demonstrując głębokie zrozumienie i innowacyjne podejście do zagadnień związanych z interferometrią, holografią i mikroskopią kwantową. Praca pani mgr Sanjukty Kundu koncentruje się na eksperymentalnych badaniach nad przestrzennymi profilami/strukturami (głównie w dziedzinie amplitudy zespolonej) pojedynczych fotonów oraz par fotonów splątanych, co ma ogromne znaczenie dla rozwoju technologii kwantowych.

W zakresie interferometrii, pani mgr Sanjukta Kundu prezentuje nowatorskie techniki, które umożliwiają precyzyjną charakterystykę amplitudy zespolonej (amplitudy i fazy) pojedynczych fotonów. Jej metodyka łączy zaawansowane techniki interferometryczne z nowoczesnymi rozwiązaniami w dziedzinie optoelektroniki w zakresie generacji i detekcji fotonów, co pozwala na bardzo ciekawe badania nad kwantową naturą światła. Praca pani mgr Sanjukty Kundu wyróżnia się także nowym podejściem do badania przestrzennego splątania fotonów. Eksperymenty z użyciem spontanicznej parametrycznej konwersji w dół (SPDC) demonstrują, jak zaawansowane techniki obrazowania mogą być wykorzystane do analizy i zrozumienia złożonych zjawisk kwantowych. Jej metodyka łączy elementy optyki stosowanej, optoelektroniki, fizyki kwantowej i przetwarzania obrazu, demonstrując jak te dziedziny mogą współdziałać w celu uzyskania nowych ważnych wyników.

Pani mgr Sanjukta Kundu umiejętnie wykorzystuje zaawansowane techniki optoelektroniki, w tym specjalizowane metody generacji promieniowania kwantowego i hybrydowe układy detekcyjne, które łączą wysoką rozdzielczość przestrzenną z wysoką rozdzielczością czasową. To połączenie otwiera nowe możliwości w badaniu pojedynczych

fotonów i par fotonów splątanych, niezwykle ważnych w dziedzinie optyki kwantowej, bazując na dobrze znanych klasycznych układach holograficznych i interferometrycznych. Ta nowa kwantowa jakość klasycznej interferometrii, wydobyta przez panią mgr Sanjukę Kundu dzięki nowoczesnej technologii optoelektronicznej, świetnym koncepcją i doskonałej realizacji eksperymentalnej, zasługuje na podkreślenie.

W kontekście obecnego stanu wiedzy, praca pani mgr Sanjuky Kundu jest znaczącym krokiem naprzód. Nie tylko rozwija (eksperymentalnie weryfikuje) istniejące teorie i metody, ale także wprowadza nowe koncepcje i uniwersalne techniki pomiarowe, które mają potencjał znaleźć wiele zastosowań. Jej praca jest ważna zarówno z perspektywy teoretycznej, jak i praktycznej, oferując istotne implikacje dla przyszłych badań i zastosowań technologii kwantowych. Rozprawę doktorską pani mgr Sanjuky Kundu oceniam bardzo wysoko. Jej wkład w „stosowaną” optykę kwantową, zwłaszcza w kontekście generacji, detekcji i analizy przestrzennej amplitudy zespolonej pojedynczych fotonów oraz par fotonów splątanych, jest imponujący i potwierdza bardzo wysokie umiejętności eksperymentalne i głębokie zrozumienie tematyki dysertacji.

Biorąc pod uwagę powyższe bez wątpliwości stwierdzam, że rozprawa doktorska pani mgr Sanjuky Kundu prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie nauki fizyczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z obrazowaniem pojedynczych fotonów i par fotonów.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska pani mgr Sanjuky Kundu w pełni spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz wyróżnienie pracy za wprowadzenie nowych, uniwersalnych, eksperymentalnych metod badania przestrzennych własności pojedynczych fotonów i par fotonów.

**Warsaw University
of Technology**

Łączę wyrazy szacunku

