



Toruń, 15.07.2025

Prof. dr hab. Roman Ciuryło
Instytut Fizyki
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Adama Widomskiego pt. : „High-dimensional quantum key distribution with time-phase encoding”.

Mgr Adam Widomski przedstawił do oceny rozprawę doktorską poświęconą czasowo-fazowemu kodowaniu na potrzeby kwantowej dystrybucji kluczy kryptograficznych, napisaną pod kierunkiem prof. dr. hab. Czesława Radzewicza oraz dr. Michała Karpińskiego. Te badanie świetnie się wpisują w aktualny nurt prac rozwijających technologie kwantowe i fotoniczne na potrzeby komunikacji kwantowej. Dla kryptografii przełomem było wykorzystanie stanów kwantowych i możliwości ich splątania w celu zabezpieczenia dystrybucji klucza kryptograficznego. Od tego czasu kryptografia kwantowa stała się bardzo dynamicznie rozwijającą gałęzią współczesnej fizyki, która zaowocowała rozwiązaniami technologicznymi o kluczowym znaczeniu dla komunikacji, bankowości czy obronności. Gro technologicznych rozwiązań stosowanych w kwantowej komunikacji uzależniona jest od efektywnego a co za tym idzie odpornego na za kłócenia przekazywania klucza kwantowego (QKD – quantum key distribution).

Wybrane przez mgr. Adama Widomskiego czasowo-fazowe kodowanie q-bitów ma szereg niezaprzeczalnych zalet: względna łatwość implementacji w istniejącej światłowodowej infrastrukturze telekomunikacyjnej, nie wrażliwość na fluktuacje polaryzacji światła oraz możliwość użycia relatywnie szybkich a co za tym idzie i wydajnych protokołów. Zasadniczym celem Doktoranta było opracowanie systemu umożliwiające jednoczesne kodowanie wielu q-bitów w jednym fotonie oraz jego transmisję i detekcję.



Rozprawa doktorska jest napisana w języku angielskim i składa się z siedmiu rozdziałów obejmując 123 strony. Opatrzona jest bogatą bibliografią zawierającą 168 pozycje. Rozprawa wzbogacona jest przez 95 ilustracji i 3 tabele. Zarówno układy jak i redakcja rozprawy nie budzą zastrzeżeń. Jedynie z racji bycia recenzentem wskażę nie istotne dla oceny całości usterki, np. w referencji [13] napisano „wdm” oraz „Cwdm” a pewnie miało być „WDM” oraz „CWDM”; podobnie w referencji [14] napisano „wdm” oraz „Dwdm” a pewnie miało być „WDM” oraz „DWDM”; w referencji [61] napisano „2.5 ghz” a pewnie miało być „2.5 GHz”, podobnie w referencji [62] napisano „5 ghz” a pewnie miało być „5 GHz”. Rozprawa jest bardzo dobrze napisana i powyższe marginalne uwagi w żaden sposób nie wpływają na bardzo wysoką ocenę prezentacji: merytorycznej poprawności, klarowności i estetyki.

Pierwszy rozdział zatytułowany „Motivation” zwięźle nakreśla wielowymiarowy kontekst prowadzonych badań uwzględniający nie tylko aspekty ściśle naukowe ale również: społeczne, ekonomiczne, infrastrukturalne i technologiczne.

Drugi rozdział zatytułowany „Introduction” stanowi przejrzyste wprowadzenie podstawowych idei wykorzystywanych w optycznej komunikacji i dystrybucji klucza kwantowego. W pierwszej części tego rozdziału wprowadzane są elementarne pojęcia takie jak: kodowanie informacji przy pomocy zmiany pozycji impulsu światła w czasie (PPM – pulse position modulation), kodowanie informacji poprzez zmianę względnej fazy pulsu światła (DPSK – differential phase shift keying), kodowanie informacji poprzez zmianę częstotliwości pulsu światła (FSK – frequency shift keying), multipleksowanie informacji (WDM – wavelength division multiplexing, TDM – time-division multiplexing). Druga część rozdziału wprowadza: podstawowe założenia leżące u podstaw dystrybucji klucza kwantowego, protokół BB84, jego czasowo-fazowej implementacji, korzyści z wykorzystania wielowymiarowości przestrzeni Hilberta podczas kodowania informacji.

Trzeci rozdział zatytułowany „Methods” wprowadza stosowane techniki doświadczalne. Jednym z głównych narzędzi tu opisywanym są modulatory elektro-optyczne umożliwiające modulację fazy oraz, w odpowiednie konfiguracji, amplitudy światła. Wykorzystywane mogą być w połączeniu z kolejnym urządzeniem zwanym generatorem arbitralnych przebiegów elektrycznych w czasie. W dalszej części rozdziału znajdziemy opis technik jedno fotonowych obejmujący: detekcję pojedynczych fotonów, precyzyjny pomiar momentu detekcji pojedynczego fotonu. Ostatnia część tego rozdziału porusza zagadnienia związane z dyspersyjną fourierowską transformacją pulsów światła obejmując ściągające światłowodowe siatki braggowskie (CFBG – chirped fiber Bragg grating) oraz techniki zmiany szerokości impulsów w domenie czasu.

Czwarty rozdział zatytułowany „Photonic integrated circuit as a platform for symbol generation” w pewnym sensie jest kontynuacją rozdziału trzeciego, choć na dużo większym poziomie

złożoności. Jednocześnie otwiera zasadniczą część rozprawy prezentującą dokonania mgr. Adama Widomskiego. Wielowymiarowe kodowanie stanów kwantowych stanowi wyzwanie eksperymentalne ze względu na konieczność stosowania wielu podzespołów fotonicznych. Doktorant stawiał mu czoła wybierając technologię zintegrowanych obwodów fotonicznych (PIC – photonic integrated circuit). Przesyłając informacje wybrał M -wymiarowe kodowanie poprzez częstotliwość centralną pulsu lub czas jego przybycia. Zintegrowany obwód fotoniczny został wykonany w technologii SMART Photonics bazującej na InP przez Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki (IMiO) w ramach współpracy z Quantum Photonics Laboratory (QPL) Uniwersytetu Warszawskiego. Należy podkreślić, że ta współpraca została zainicjowana przez mgr. Adama Widomskiego. Doktorant odegrał kluczową rolę w projektowaniu eksperymentu, charakteryzacji układu PIC oraz jego wykorzystaniu w pomiarach kwantowych. Wyniki tych badań zostały opublikowane w *Journal of Lightwave Technology* w pracy [114], której pierwszym autorem był mgr. Adam Widomski. Zademonstrowane zostało kodowanie poprzez częstotliwość centralną pulsu (separacja około 3-4 GHz, szerokość około 4 GHz) oraz czas jego przybycia (separacja około 40-50 ps, szerokość około 40 ps).

Piąty rozdział zatytułowany „Measuring high-dimensional superpositions with temporal Talbot effect” opisuje zastosowanie efektu Talbota w dziedzinie czasu do poprawy ostrości pików interferujących wielu pulsów. Takie podejście znacznie poprawiło kontrast obserwowanych pików w przypadku wielowymiarowego kodowania. Nowatorstwo tego podejścia zostało docenione przez redakcję prestiżowego czasopisma *Optica*, w którym opublikowane zostały wyniki badań przedstawione w tym rozdziale. Adam Widomski wraz z Maciejem Ogrodnikiem byli autorami wiodącymi tej publikacji [130].

Szósty rozdział zatytułowany “Urban quantum key distribution link based on high-dimensional time-phase encoding” stanowi zwieńczenie rozprawy doktorskiej. Wyniki przedstawione w tym rozdziale zostały w części opublikowane *Physical Review Applied*, praca [162]. Pozostałe wyniki wciąż czekają na publikację, choć są już dostępne publicznie dzięki manuskryptowi [163] umieszczonemu w serwisie arXiv. Ponownie na podkreślenie zasługuje fakt, że wiodącymi autorami tego manuskryptu są Maciej Ogrodnik oraz Adam Widomski. Spektakularnym wynikiem mgr. Adama Widomskiego jest demonstracja kwantowej dystrybucji klucza kryptograficznego z wykorzystaniem 2- i 4-wymiarowego wariantu protokołu BB84. Ważnym krokiem przedstawionym w tej rozprawie było wyjście z przestrzeni laboratoryjnej i demonstracja kwantowej komunikacji z wykorzystaniem ciemnego światłowodu w obrębie miasta Warszawa.

Siódmy rozdział zatytułowany „Final conclusions and outlook” stanowi klarowne podsumowanie wyników badań przeprowadzonych przez doktoranta.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska prezentuje bardzo wysoki poziom naukowy i technologiczny. Na podkreślenie zasługują zarówno opracowanie i charakteryzacja zintegrowanych

obwodów fotonicznych na potrzeby realizacji wielowymiarowych protokołów kwantowej dystrybucji klucza kryptograficznego jak zastosowanie efektu Talbota w domenie czasu dla poprawy kontrastu obserwowanych pulsów światła. Duże wrażenie robi demonstracja kwantowej dystrybucji klucza kryptograficznego z wykorzystaniem 2- i 4-wymiarowego wariantu protokołu BB84. Niezaprzeczalnymi atutami tej rozprawy są nowatorstwo, technologiczne zaawansowanie oraz potencjał aplikacyjny. Mgr. Adam Widomski zademonstrował imponującą biegłość eksperymentalną, świetną umiejętność posługiwania się najnowszymi technologiami fotonicznymi, dogłębne zrozumienie zagadnień związanych z praktyczną realizacją komunikacji kwantowej oraz bardzo dobry warsztat statystycznej charakteryzacji uzyskanych wyników.

Podsumowując zarówno rozprawę doktorską jak i umiejętności mgr. Adama Widomskiego oceniam bardzo wysoko. Przedłożona rozprawa w pełni spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane w postępowaniu doktorskim. To też z pełnym przekonaniem stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. Adama Widomskiego do publicznej obrony jego rozprawy.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'L. J. 20' or similar, written in a cursive style.