

Warszawa, 16 lipca 2025 r.

Prof. dr hab. inż. Mateusz Śmietana
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
Tel. 22 234 6364
Fax. 22 234 6063
e-mail: Mateusz.Smietana@pw.edu.pl

RECENZJA

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

wykonana na wniosek Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne
Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 15.05.2025 r.

Praca doktorska pana mgr Adama Widomskiego wpisuje się w bardzo dynamicznie rozwijany obszar badawczy dotyczący technologii kwantowych, w szczególności badania w zakresie zabezpieczenia niepowołanego dostępu do informacji przesyłanej w sieciach telekomunikacyjnych. Autor rozprawy zauważa, że kodowanie w dziedzinie czasu i fazy pozwala generować kubity oraz wielkowymiarowe stany kwantowe. Dodatkowo, uznaje kodowanie czasowo-fazowe za szczególnie atrakcyjne ze względu na kompatybilność z istniejącą infrastrukturą telekomunikacyjną i odporność na dryf polaryzacji. Szczególną uwagę zwraca na kwantową dystrybucję klucza (ang. Quantum Key Distribution, QKD), uznając rozwiązanie jako mogące sprostać rosnącemu zapotrzebowaniu na bezpieczne systemy/sieci telekomunikacyjne w obliczu potencjalnych zagrożeń związanych z rozwojem komputerów kwantowych. Autor pracy kieruje swoje rozważania na korzyści wynikające z rozszerzenia kodowania czasowo-fazowego w QKD na stany o wysokiej wymiarowości w celu zwiększenia tolerancji na szumy oraz poprawy efektywności generowania kluczy. Jako technologię umożliwiającą QKD mgr Adam Widomski wybrał fotoniczne układy scalone (ang. Photonic Integrated Circuits, PIC) w ich formie nakierowanej na zastosowanie (ang. Application Specific PIC, ASPIC), argumentując wybór przede wszystkim możliwością miniaturyzacji wymiarów nadajnika i odbiornika. Tematyka pracy jest aktualna i istotna z punktu widzenia rozwoju nauk, w szczególności w ich zakresie fizycznym i inżyniersko-technicznym.

Przed wszystkim należy zauważyć, że praca nie ma typowego charakteru rozprawy nakierowanego na udowodnienie zdefiniowanej na początku tezy. Przyjęty układ pracy ma raczej charakter przemyślanego opracowania danych uzupełnionego niezbędnymi do zrozumienia przedstawionych wyników treściami teoretycznymi. Praca składa się

z 7 rozdziałów. We wstępie (Rozdział 2.1) Autor omawia kluczowe elementy niezbędne do zrozumienia treści pracy, w tym przede wszystkim rodzaje modulacji i multipleksacji sygnałów optycznych, a także podejścia technologiczne wykorzystywane do realizacji PIC. Warto podkreślić, że przeglądowi i opisowi towarzyszy krytyczne podejście Autora do każdej z omawianych tematów. Następnie (Rozdział 2.2) omówiono koncepcję QKD zwracając uwagę na założenia i ograniczenia w praktycznych realizacjach. Szczegółowo omówiono protokół BB84 wraz z przykładami wykorzystania, w tym również przy wsparciu PIC. Nieco niedosytnie pozostawia brak szczegółowego opisu wspomnianych przykładów, gdyż te wydają się kluczowe z punktu widzenia docenienia wkładu Autora do stanu wiedzy. Kolejną część pracy (Rozdział 3) poświęcono opisowi wykorzystanych metod badawczych. Omówiono zagadnienie modulacji elektro-optycznej wraz z przywołaniem podstawowych konstrukcji modulatorów. Następnie poruszono tematykę kluczowych elementów z punktu widzenia realizacji części eksperymentów na potrzeby pracy, w szczególności źródeł światła i siatek Bragga. Opis elementów uzupełniono o efekty fizyczne, które są bezpośrednio związane z tematyką pracy. Rozdział 4 obejmuje opis PIC nakierowany na wykorzystanie tej technologii do kodowania wielowymiarowego. Autor przedstawił wykorzystaną na potrzeby pracy realizację PIC w technologii fosforu indu zawierającą przede wszystkim siatki Bragga, modulatory elektro-optyczne, lasery i fotodiody. Wraz z uzasadnieniem wyboru technologii mgr Widomski opisuje szczegółowy sposób postępowania z otrzymanym układem, który wynika z technologii jego wytworzenia, a także metodykę badania jego elementów. Następnie opisuje sposób generacji i detekcji symboli w domenie czasowej i częstotliwościowej z wykorzystaniem opisanego PIC. Treść przedstawionego do oceny materiału nie pozostawia wątpliwości co do aktualności przeglądu i świadomości Autora w zakresie istnienia problemów konstrukcyjnych, jak również potwierdza jego wiedzę ekspercką i swobodne poruszanie się w zakresie tematycznym pracy. Kolejno, Rozdziały 5 i 6 poświęcone zostały kluczowym elementom pracy, a mianowicie odpowiednio możliwości zastosowania efektu Talbota w dziedzinie czasu na potrzeby realizacji celu pracy oraz konstrukcji linii światłowodowej zdolnej do realizacji QKD. W ramach Rozdziału 5 wyniki analiz numerycznych zostały porównane z wynikami pomiarowymi zauważając zadawalającą ich zgodność. Z kolei w ramach Rozdziału 6 opisano wyniki eksperymentu obejmującego wykorzystanie skonstruowanego systemu do przesyłania informacji na odległość 13 km. Dobór zarówno metodologii jak i wykorzystanej aparatury są poprawne.

Głównym celem pracy była konstrukcja systemu QKD wykorzystującego kodowanie czasowo-fazowe. Z udziałem Autora rozprawy opracowano system umożliwiający transmisję i detekcję kwantowych symboli o wysokiej wymiarowości. System ten pozwalał na kodowanie wielu bitów informacji w pojedynczym fotonie. Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny i dotyczy zarówno części sprzętowej jak i programowej systemu kwantowego. Tak kompleksowe podejście wymagało współpracy w ramach zespołu badawczego. Mając ten fakt na uwadze, Autor sumiennie i precyzyjnie identyfikuje wkład licznych współpracowników w elementy badawcze przedstawione w ramach pracy. Swoją wkład w badania identyfikuje w ramach wstępu do Rozdziału 6, przede wszystkim jako

opracowanie rozwiązania programowego na potrzeby automatyzacji pomiaru, zestawienie i kalibrację układu badawczego, a także towarzyszące pomiarom analizy numeryczne. Z lektury rozprawy wynika, że kluczowy wkład Autora to implementacja w ramach systemu nowej metody detekcji wysokowymiarowych czasowych superpozycji kwantowych, opartej na efekcie Talbota w dziedzinie czasu jako odpowiednika efektu samoobrazowania obiektów periodycznych związanego z dyfrakcją w strefie bliskiego pola. Dobór parametrów czasowych oraz własności dyspersyjnych pozwolił na mapowanie częstotliwość-czas przy znacznie niższych wymaganiach dotyczących dyspersji w porównaniu do standardowych metod. Mimo szerokiego zakresu tematycznego pracy, Autor w pełni zapanował nad poprawnym przedstawieniem uzyskanego materiału badawczego i jego szczegółową analizą.

Najważniejszym osiągnięciem niniejszej pracy jest eksperymentalna demonstracja QKD z wykorzystaniem dwu- i czterowymiarowych superpozycji kwantowych, wykrywanych za pomocą nowo wprowadzonej metody opartej na efekcie Talbota w dziedzinie czasu. Uzyskane wyniki zweryfikowano wykorzystując przybliżone mapowania czasu na widmo zrealizowane przy wykorzystaniu ośrodka dyspersyjnego i techniki dyspersyjnego przekształcenia Fouriera oraz skorelowanego czasowo zliczania pojedynczych fotonów. Przeprowadzono kontrolowane testy laboratoryjne oraz rozszerzono walidację systemu o pomiary z wykorzystaniem infrastruktury światłowodowej Uniwersytetu Warszawskiego. W trakcie badań wykazano, że kodowanie wysokowymiarowe zwiększa odporność na szумы oraz podnosi entropię informacji przypadającą na pojedyncze zdarzenie detekcji. Wyniki eksperymentalne zostały przeanalizowane w oparciu o dwa modele bezpieczeństwa, zarówno uwzględniające, jak i pomijające niezrównoważoną wydajność detekcji, ujawniając istotne różnice w osiągalnych wartościach informacyjnych generowanych kluczy. W konsekwencji potwierdzono możliwość zastosowania wybranych PIC do osiągnięcia celu pracy.

Autor pracy odwołuje się do 168 pozycji literaturowych, w znaczącej większości opublikowanych w ciągu ostatnich kilkunastu lat. Zachowano bardzo dobrą proporcję publikacji aktualnych do publikacji historycznych. Wśród pozycji literaturowych znalazły się również publikacje współautorskie powstałe z udziałem Autora pracy. Wyniki badań zostały opublikowane w dobrze rozpoznawalnych w środowisku naukowym czasopismach, takich jak *Journal of Lightwave Technology* (publikacja z roku 2023) i *Optica* (2024), gdzie w obu przypadkach mgr Widomski jest pierwszym autorem, a także *Physical Review Applied* (2025). Publikacja materiału badawczego w czasopismach cieszących się wysoką reputacją pośrednio potwierdza oryginalność uzyskanych wyników.

Rolą recenzenta rozprawy jest przede wszystkim zwrócenie uwagi na wady i słabe strony ocenianego materiału. Wypełnienie tej roli w przypadku rozprawy p. mgr Adama Widomskiego postrzegam jako zadanie trudne. Realizacja badań jest w pełni przemyślana, a wyniki istotne z punktu widzenia obszaru tematycznego rozprawy. Nawet pod względem edycyjnym, rozprawa ma charakter wyróżniający. Przedstawienie treści jest na najwyższym

poziomie estetycznym i z dbałością o szczegóły. Od strony edycyjnej praca jest przygotowana w sposób wyróżniający. Należy również zauważyć, że została ona napisana w języku angielskim i także z językowego punktu widzenia jest na najwyższym poziomie. Doszukałem się jedynie następujących drobnych uchybień o charakterze edycyjnym:

1. Podrozdział 2.1.5 Autor poświęcił ogólnemu opisowi koncepcji PIC. Już na wstępie zostały wyróżnione zalety tego podejścia w odniesieniu do układów wykorzystujących elementy dyskretne. Podając dane liczbowe w tym odnośnie powierzchni układów i ich poboru prądu, Autor nie odniósł się do konkretnych pozycji literaturowych, z których pochodzą te dane. W związku z intensywnym rozwojem koncepcji PIC takie odwołania wydają się być konieczne, choćby ze względu na szybkie przedawnienie przytaczanych informacji. Analogiczna uwaga dotyczy również innych fragmentów pracy, np. opisu modulatorów. Jestem przekonany, że co najmniej w tych przypadkach przytaczanym wartościom powinny towarzyszyć odwołania literaturowe;
2. Skróty np. DI i DD nie zostały rozwinięte kiedy pojawiają się w tekście po raz pierwszy (Podrozdział 2.2.1). Ta sama uwaga dotyczy później też skrótu IQ w opisie rozwiązań technicznych modulatorów;
3. Inne drobne błędy edycyjne, jak brak odstępu między wartościami i jednostkami (str. 33 i 36).

Powyższe uchybienia nie umniejszają w żaden istotny sposób wartości pracy, ale zwracając na nie uwagę mam nadzieję, że mogą korzystnie wpłynąć na przyszłą działalność redakcyjną Autora.

Mimo, że nie dostrzegam wad czy słabych stron pracy, jej lektura nasuwa kilka możliwości usprawnień, do których Autor powinien odnieść się w ramach dalszych etapów postępowania.

1. W ramach pracy Autor deklaruje, że obecne systemy QKD oparte na kubitach zostały szeroko zademonstrowane, szczególnie z wykorzystaniem czasowo-fazowego oraz polaryzacyjnego stopnia swobody. Nie ulega wątpliwości, że realizacja prac badawczych w ramach rozprawy zakończyła się sukcesem. Nieco niedosytu pozostawia więc brak porównania osiągnięć notowanych w literaturze do uzyskanych w ramach realizacji pracy. Takiego odniesienia czytelnik oczekuje choćby w ramach Rozdziału 7, będącego podsumowaniem wyników i propozycją kontynuacji prac. Porównanie wyników literaturowych z wynikami uzyskanymi w ramach pracy pozwoliłoby bardziej docenić osiągnięcia Autora i jego wiedzę ekspercką. Porównanie stanowiłoby wsparcie m.in. dla stwierdzenia, że uzyskane wyniki otwierają drogę do budowy bezpiecznych systemów QKD opartych zarówno na stanach wysokowymiarowych, jak i na kubitach.
2. Przeprowadzenie testu transmisji QKD na odległości 13 km z wykorzystaniem sieci Uniwersytetu Warszawskiego zakończyło się powodzeniem. Jakie są ograniczenia

realizacji takiego połączenia przy założeniu dłuższych odległości transmisji? W jakich warunkach przewidywane jest poprawne działanie, a jakie warunki z pewnością takie działanie uniemożliwią?

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska p. mgr Adama Widomskiego ma istotne znaczenie poznawcze i obejmuje opracowanie oraz analizę rozwiązań oryginalnych i przydatnych w zakresie konstrukcji systemów kwantowych. Autor wykazał dostateczną wiedzę teoretyczną oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawę oceniam pozytywnie i dodatkowo jako wyraźnie wykraczającą poza poziom przeciętny (spełniającą wymagania z nadmiarem). Mając powyższe na uwadze, stwierdzam, że rozprawa doktorska odpowiada warunkom określonym w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r., poz. 742 ze zm.) o wnoszę o dopuszczenie pana mgr Adama Widomskiego do dalszych etapów postępowania.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long horizontal stroke at the end.

