

Dr hab. Piotr Kolenderski, prof. UMK

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

e-mail: kolenderski@umk.pl

tel. +48 510 459 791

Recenzja pracy doktorskiej

pod tytułem Ultrafast Quantum Optics with Spectral Resolution
napisanej przez pana magistra Michała Lipkę.

Praca doktorska pana magistra Michała Lipki składa się z sześciu rozdziałów, poprzedzonych wstępem i zakończonych krótkim podsumowaniem. Każda część pracy oparta jest na jednej z wybranych przez autora publikacji, w których pan Michał Lipka pełni rolę wiodącego autora. Dodatkowo w pracy znajdują się dwa obszerne dodatki, zawierające dokumentację projektu kamery oraz schemat wzmacniacza obrazu. Dodatki te odnoszą się do dwóch problemów technicznych, które Autor rozwiązał w celu umożliwienia przeprowadzenia swoich eksperymentów.

Praca była realizowana w ramach projektu „Quantum Optical Technologies”, finansowanego przez program Międzynarodowych Agend Badawczych Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, oraz otrzymała także wsparcie z Narodowego Centrum Nauki i Ministerstwa Edukacji i Nauki w ramach programu „Diamentowy Grant”. Na szczególną uwagę zasługuje ten ostatni, ponieważ jest on przyznawany naukowcom na bardzo wczesnym etapie kariery, którzy wyróżniają się już dużymi osiągnięciami. Ponadto projekty finansowane w ramach tego programu muszą wykazywać wybitny potencjał badawczy. Pan Michał Lipka otrzymał także prestiżowe stypendium START, przyznawane przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej. Dobre finansowanie badań wraz z bardzo dużym potencjałem Doktoranta zakończyły się znaczącymi osiągnięciami naukowymi opublikowanymi w wiodących czasopismach międzynarodowych.

Kolejne rozdziały pracy doktorskiej stanowią odrębne wątki, które łączą się w spójną całość. Postaram się omówić każdy z nich oraz zwrócić uwagę na kwestie, które moim zdaniem wymagają szczególnej uwagi.



Wstęp pracy jest bardzo zwięzły, ale jednocześnie precyzyjnie wprowadza kluczowe pojęcia dotyczące pakietów falowych oraz stanów pola elektromagnetycznego. Autor omawia w nim m.in. stany Foka oraz stany koherentne, które stanowią istotny fundament teoretyczny dla dalszych analiz. Wprowadzenie to cechuje się dobrze przygotowanym językiem i klarownym zestawem pojęć, które w kolejnych rozdziałach są konsekwentnie wykorzystywane, tworząc spójną bazę teoretyczną dla całej pracy.

W pierwszym rozdziale pan Michał Lipka przedstawia urządzenie pomiarowe które zostało wykorzystane w jego badaniach. Zaczyna od kilku zdań motywacji do podjęcia badań oraz szczegółowo opisuje zasady działania kamery wyposażonej w wzmacniacz obrazu („image intensifier”). Celem było opracowanie wydajnej metody kontrolowania układu doświadczalnego, bazującej na sprzężeniu zwrotnym opartym na rejestrowanych zliczeniach. Kluczowym parametrem był czas reakcji, czyli opóźnienie między detekcją a generacją sygnału wyjściowego, które miało decydujące znaczenie dla efektywności układu.

Do tej części pracy mam dwie uwagi oraz pytania, na które chciałbym, aby Doktorant ustosunkował się podczas obrony:

1. Jak zostały ustalone napięcia +50V dla stanu zamkniętego i -200V dla stanu otwartego? Czy te wartości wynikały ze specyfikacji producenta, czy były podyktowane możliwościami elektroniki, która musiała umożliwiać bardzo szybkie przełączanie się między tymi stanami? Jakie napotkano ograniczenia i trudności w tym zakresie?
2. W każdym z kolejnych rozdziałów pan Michał Lipka opisuje swój wkład w badania przedstawione w pracy. Jaki był dokładny wkład Doktoranta w tę część dotyczącą kamery z wzmacniaczem obrazu?

Rozdział 2, zatytułowany „Hybrid correlations of photon pairs”, oparty jest na publikacji "M. Lipka and M. Parniak, *Fast imaging of multimode transverse–spectral correlations for twin photons**, Opt. Lett. **46**, 3009–3012 (2021)", której Doktorant jest wiodącym autorem. Tematem rozdziału są korelacje między fotonami generowanymi w procesie spontanicznego parametrycznego dzielenia częstotliwości. Pan Michał Lipka opisuje ten proces w sposób niezwykle elegancki, unikając powtarzania treści, które są już szeroko omawiane w literaturze tematu i replikowane w wielu pracach dyplomowych. W mojej opinii, ta część jest opracowana bardzo starannie – Autor zawarł wszystkie niezbędne informacje, nie dodając zbędnych szczegółów. Na koniec opisuje na czym polegał



eksperyment, w którym zademonstrowano nowoczesną metodę charakteryzacji korelacji przestrzenno-spektralnych, z wykorzystaniem narzędzia pomiarowego opisanego w poprzednim rozdziale.

W tym rozdziale jest kilka kwestii, do których chciałbym, aby Doktorant odniósł się podczas obrony pracy:

3. Jakie znaczenie ma spektralnie szerokopasmowa pompa dla efektów obserwowanych w eksperymencie? Jakie byłyby rezultaty, gdyby pompa była bardzo wąska ale nadal byłby to laser impulsowy?
4. Zauważyłem, moim zdaniem, istotne nadużycie notacji zaraz na początku rozdziału 2.3.1, w równaniu 2.1. Wyrażenie po prawej stronie opisuje dwa całkowicie zdekorelowane fotony, podczas gdy cały ten rozdział poświęcony jest korelacom.
5. Kluczową częścią tego rozdziału są wyniki pomiarów kowariancji, które Doktorant zestawia z rezultatami numerycznymi uzyskanymi z modelu teoretycznego. Jakościowa zgodność jest widoczna na wykresach, ale czy istnieją jakieś ilościowe oszacowania, na przykład oparte na funkcji $\langle \chi^2 \rangle$ lub innej metodzie statystycznej?
6. Na końcu wniosków Doktorant wspomina o możliwości charakteryzacji orbitalnego momentu pędu. Czy są jakieś plany lub przeprowadzono analizy dotyczące możliwości przeprowadzenia takich eksperymentów?

Dodatkowo, zwracam uwagę na kilka pomniejszych kwestii:

7. W tekście pojawia się określenie "Hilbert state", które powinno być poprawione na "Hilbert space".
8. Zdanie wprowadzające do równania 2.6 zaczyna się od "Let's integrate Eq. 2.5". W tym miejscu nie chodzi o scałkowanie niedopasowania fazowego, lecz o inną funkcję.
9. Moim zdaniem warto byłoby unikać sformułowania "photon number covariance", ponieważ uwaga skupia się na korelacjach między dwoma fotonami, w szczególności korelacjach spektralno-przestrzennych. Mówimy więc o dwóch fotonach, a nie o liczbie fotonów.



Rozdział 3 oparty jest na pracy "M. Lipka and M. Parniak, *Single-Photon Hologram of a Zero-Area Pulse*, Phys. Rev. Lett. **127**, 163601 (2021)". Autor przedstawia w nim metodę pomiaru widma, opartą na wyznaczaniu korelacji spektralnych w parze fotonów generowanych w procesie spontanicznego parametrycznego dzielenia częstotliwości (SPDC). W tej metodzie jeden z fotonów pełni rolę odniesienia, podczas gdy drugi oddziałuje z ośrodkiem. Wykorzystywane jest tutaj zjawisko Hong-Ou-Mandla, które stanowi kluczowy efekt w tych pomiarach. Do przeprowadzenia eksperymentów zastosowano spektrometr czuły na pojedyncze fotony, oparty na siatce dyfrakcyjnej i detektorze macierzowym, który został szczegółowo opisany w rozdziale 1.

Doktorant bardzo szczegółowo omawia zarówno kwestie teoretyczne, jak i szczegóły eksperymentu. Był to, moim zdaniem, stosunkowo trudny eksperyment, który wymagał dużej uwagi oraz, najprawdopodobniej, sporej cierpliwości. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo dobre zrozumienie przez Autora całości doświadczenia, parametrów z nim związanych oraz charakterystycznych wielkości. Na podstawie zawartości tego rozdziału można odnieść wrażenie, że Doktorant dogłębnie rozumiał szczegóły eksperymentu, co świadczy o jego wysokich kompetencjach badawczych.

Celem eksperymentu było wyznaczenie fazy spektralnej, która została zmodyfikowana podczas propagacji jednego z fotonów w parach rubidu. Widma fotonów generowanych w procesie parametrycznym są spektralnie o kilka rzędów szersze niż linia absorpcyjna typowego ośrodka atomowego. W związku z tym, jedynym efektem, który można realistycznie zaobserwować, jest zmiana fazy, ponieważ modyfikacja amplitudy jest bardzo niewielka ze względu na niemal całkowity brak absorpcji. Zagadnienie to zostało szczegółowo omówione w rozdziale 3.3.3.

10. Czy w opisywanym eksperymencie można by zaobserwować jakąś różnicę, gdyby częstotliwość centralna pakietu falowego pojedynczego fotonu pokrywała się z częstotliwością linii absorpcyjnej rubidu? Jakie zmiany mogłyby wtedy wystąpić w wynikach?
11. Poza sekcją 3.3.1 i podsumowaniem nie widzę odniesień do teorii impulsów o zerowej powierzchni, co sprawia, że trudno dostrzec wyraźne powiązanie ze sposobem interpretacji wyników eksperymentu.
12. Bardzo podoba mi się opisana metoda pomiaru fazy wprowadzonej przez propagację. Pozostaje jednak pytanie, czego konkretnie można się dowiedzieć na



podstawie tego pomiaru? Jakie informacje o charakterystyce ośrodka lub samej propagacji można uzyskać dzięki tej metodzie?

13. Mam też pytanie techniczne: jak kalibrowano układ pomiarowy? Czy komórka była wyjmowana, czy zmieniana była temperatura, a tym samym gęstość rubidu?

Rozdział 4, zatytułowany "Variable shearing interferometry," oparty jest na pracy "S. Kurzyna, M. Jastrzębski, N. Fabre, W. Wasilewski, M. Lipka, and M. Parniak, *Variable electro-optic shearing interferometry for ultrafast single-photon-level pulse characterization*, Opt. Express 30, 39826–39839 (2022)." Zgodnie z deklaracją, Autor nadzorował prace nad projektem, uczestniczył w analizie danych pomiarowych, a także odegrał wiodącą rolę w przygotowaniu artykułu.

W rozdziale omówiono nową metodę charakteryzacji ultrakrótkich impulsów, nazwaną Variable Shearing Interferometry (VarSI). Metoda, która pierwotnie służyła do charakteryzacji impulsów klasycznych, została zaadaptowana do badania pakietów falowych pojedynczych fotonów. W eksperymencie wykorzystano pary fotonów generowane w procesie SPDC oraz detektory pojedynczych fotonów. Dodatkowo, przeprowadzono eksperymenty również dla klasycznych impulsów.

Doktorant przedstawił kompleksowy opis tego zagadnienia, zaczynając od motywacji, poprzez szczegóły eksperymentalne oraz wyniki. Metody teoretyczne zostały omówione w osobnym rozdziale, co ułatwia zrozumienie zawartości tej części pracy.

Mam tutaj jedno pytanie i drobną uwagę:

14. Zrekonstruowana faza wydaje się być bardzo płaska, podczas gdy w wyniku propagacji, na skutek efektów dyspersyjnych, powinna pojawić się faza kwadratowa. Dlaczego w tym przypadku tak jest?

15. W równaniu 4.24 zauważyłem błąd edytorski w drugiej całce.



Rozdział 5, zatytułowany *Ultrafast Fractional Fourier Transform*, oparty jest na pracy "M. Lipka and M. Parniak, *Ultrafast electro-optic time-frequency fractional Fourier imaging at the single-photon level*, Opt. Express 32, 9573–9588 (2024)." Doktorant opisuje w nim tzw. ułamkową transformatę Fouriera, która naturalnie pojawia się w zagadnieniach związanych z propagacją światła, np. w sytuacjach, gdy opisywana jest ewolucja pola elektromagnetycznego podczas propagacji za soczewką. Doktorant szczegółowo omawia kwestie dotyczące ewolucji w domenie czasu i częstotliwości.

Wstęp do tego rozdziału jest bardzo dobrze napisany, co świadczy o doskonałym zrozumieniu podstaw teoretycznych oraz zakresu stosowalności opisywanych metod. Układ optyczny został przedstawiony w sposób bardzo szczegółowy i klarowny. Odnoszę wrażenie, że na podstawie tych opisów można by bez większych trudności odtworzyć układ eksperymentalny, co jest kluczowe w pracy naukowej.

Do tej pory zagadnienia opisywane w pracy łączą się ze sobą w sposób bardzo spójny, a prezentowana metoda również wpisuje się w ten ciąg. Niemniej jednak, w tym przypadku, mamy do czynienia z charakteryzacją klasycznych impulsów, a nie pakietów falowych pojedynczych fotonów. Pojawia się zatem pytanie:

16. Jakie problemy należałoby rozwiązać, aby tę metodę zaadaptować do pracy na poziomie pojedynczych fotonów?

W ostatnim, szóstym, rozdziale pt. "*Super-resolution of ultrafast pulses via spectral inversion*", opartym na pracy M. Lipka and M. Parniak, "*Super-resolution of ultrafast pulses via spectral inversion*", arXiv preprint arXiv:2403.12746 (2024), Autor opisuje nowatorską metodę super-rozdzielczego pomiaru impulsów ultrakrótkich, zainspirowaną analogicznymi technikami opracowanymi dla zmiennych przestrzennych. Z dużą klarownością przedstawiono tutaj kluczowe założenia metody oraz omówiono podejście oparte na teorii estymacji i informacji Fishera. Rozdział obejmuje także wyniki doświadczeń oraz szczegółowy opis elementów układu eksperymentalnego. Całość została zaprezentowana w sposób jasny i przystępny, co ułatwia zrozumienie wprowadzonych koncepcji i zastosowanych technik pomiarowych.

Pojawia się parę pytań:



17. Obserwacja "ciemnego portu" może wiązać się z problemami praktycznymi, szczególnie z uwagi na efekty takie jak ciemne zliczenia detektorów pojedynczych fotonów oraz dodatkowy szum związany z rozproszonym światłem. Wpływ tych zakłóceń na pomiary może być znaczący, co warto ocenić ilościowo. W jakim stopniu Autor uwzględnił te efekty w analizie wyników oraz jak wpływają one na jakość i dokładność pomiarów?
18. Pomiar dotyczy stanów klasycznych, a jego głównym celem jest rozróżnienie dwóch impulsów oraz ocena jakości tej metody. Jaka jest różnica w sytuacji gdy na wejście interferometru pada foton w stanie Foka, a nie w stanie koherentnym przy założeniu że widmo jest takie samo jak dla stanu koherentnego?

Podsumowując, stwierdzam że praca stanowi istotny wkład w dziedzinę eksperymentalnej optyki kwantowej oraz potwierdza także ogólną wiedzę teoretyczną i doświadczalną doktoranta. Dlatego też stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe wymagania dotyczące tego typu prac naukowych. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie pana Michała Lipki do kolejnych etapów procesu przewodu doktorskiego.

Jest to jedna z najlepszych prac jaką miałem możliwość do tej pory recenzować. Ze względu na wysoką jakość przedstawionych wyników potwierdzoną publikacjami wnioskuję także o wyróżnienie.

Piotr Koleenderski

