

Dr hab. Piotr Kolenderski, prof. UMK
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
e-mail: kolenderski@umk.pl
tel. +48 510 459 791

prof. dr hab. Wojciech Satuła
Przewodniczący Rady Naukowej
Dyscypliny Nauki Fizyczne
Uniwersytet Warszawski

Recenzja pracy doktorskiej
pt. „Temporal Shaping and Measurement of Pulsed Quantum Light”
napisanej przez Pana Magistra Alego Golestaniego Shishvana.

Uwaga ogólna nie dotycząca bezpośrednio rozprawy doktorskiej na przykładzie doktoratu Pana Alego Golestaniego Shishvana. W mojej ocenie wymóg zamieszczania abstraktu w języku polskim mimo że praca jest napisana przez osobę nie władającą językiem polskim mogłby być usunięty.

Praca składa się z pięciu rozdziałów. Wstęp został napisany w bardzo przystępny sposób, co ma ułatwić zrozumienie kolejnych trzech rozdziałów. Opisują one trzy zadania badawcze, które zostały wcześniej streszczone w abstrakcie. W wstępie doktorant przywołuje klasyczne prace z zakresu optyki, z którymi związana jest jego praca. Można w nim odnaleźć 50 źródeł literaturowych spośród łącznej liczby 95 znajdujących się w bibliografii. To może świadczyć o tym, że doktorant świadomie wybierał prace, które są istotne z punktu widzenia dydaktycznego.

Dodatkowo, ilustracje pełnią istotną rolę, ułatwiając zrozumienie przedstawionych zagadnień. W niektórych miejscach, do których jeszcze powrócę, wykresy mogą wprowadzać w błąd. W rozdziale 2 doktorant przedstawia podstawy i techniki modulacji fazy. Część tych technik można odnaleźć w pracy "Appl. Phys. Lett. **116**, 234003 (2020)", gdzie pan Golestani jest współautorem. Rozdział 3 zawiera wyniki opublikowane w pracy "Phys. Rev. Lett. **129**, 123605 (2022)", której doktorant jest pierwszym autorem. Domniemam, że opracowane techniki mogą być także związane z znakomitą pracą opublikowaną w "Nature Photonics (2023)" w bieżącym roku przez grupę, w której pracuje pan Ali Golestani.

Kolejny rozdział przedstawia metodę opracowania światłowodowej siatki Bragga w celu czasowego kształtowania impulsu optycznego w sposób pasywny. Praca kończy się krótkim podsumowaniem zawartym w piątym rozdziale.



Za centralną część rozprawy uważam eksperyment, w którym dokonano pomiaru profilu czasowego pojedynczego fotonu w sposób obwieszczony. W tym celu doktorant, zgodnie z tym, co oświadczył w pracy: (A) Wykorzystał układ oparty na parametrycznym podziale częstości, zbudowany przez pana Michała Mikołajczyka, do generowania fotonów w stanie zbliżonym do stanu Foka o obsadzeniu jeden. Ten generator został przez doktoranta zmodyfikowany. (B) Skorzystał z układu pomiarowego własnego autorstwa, na którym wcześniej przeprowadził pomiar profilu czasowego światła klasycznego. Autor informuje o tym w rozdziale 3.10, na stronie 71. Natomiast na końcu rozdziału 3.6 doktorant podaje, że zautomatyzował układ, w którym dokonuje się pomiaru profilu czasowego. Informację o wkładzie w przeprowadzone badania odnaleźć można także na końcu rozdziału 1.9.1, na stronie 31. Nieco odrębnym, lecz powiązaniem zagadnieniem, jest projektowanie, wytwarzanie i charakteryzacja światłowodowej siatki Bragga. Doktorant opisał zakres swojego wkładu w rozdziale 4.8.3. Zebranie tych informacji w jednym miejscu, na przykład we wstępie, mogłoby być pomocne.

Muszę przyznać, że czytanie rozprawy utrudnia wiele usterk językowych, które można było uniknąć poprzez edycję przy wykorzystaniu odpowiedniego oprogramowania. Niemniej jednak, mimo tych niedociągnięć, oceniam pracę bardzo wysoko. Teraz przechodzę do komentarzy i uwag krytycznych odnoszących się do opisanych badań.

W rozdziale 1.9.1 Doktorant stwierdza: „*The output profile of the generated photons can be engineered by modifying the phase matching bandwidth of the nonlinear crystal and the input pump bandwidth.*” To jest też istotnym wątkiem w rozdziale 3.10, gdzie znajduje się opis metody pomiaru profilu czasowego obwieszczanego fotonu. Rezultatem, opisanej dosyć lakonicznie, modyfikacji parametrów źródła par fotonów jest uzyskanie obwieszczanego stanu czystego o szerokości spektralnej 0.5 nm. W tym celu szerokość spektralna pompy została ustalona na 1.7 nm. Z tego co wiadomo, fotony spektralnie zdekorelowane można uzyskać poprzez wstawienie odpowiednich filtrów widmowych co i tak się częściowo stało się w układzie służącym do pomiaru profilu czasowego. Rodzi się pytanie o powód optymalizacji własności widmowych generowanych par fotonów. Ciekawi mnie też jaka jest szerokość spektralna fotonów generowanych bezpośrednio ze źródła. Ta wielkość byłaby przydatna w ocenie strat w układzie pomiarowym. Nawiązuję tutaj do zawartości rozdziału 3.10. Ponadto, wiadomo też, że widmo par fotonów pochodzących z procesu SPDC zależy w istotny sposób od dopasowania fazowego w kryształach nieliniowych. Natomiast dużo mniej od szerokości spektralnej pompy. Czy optymalizacja charakterystyk lasera pompującego dotyczyła głównie korelacji?

Przyjrzyjmy się teraz rozdziałowi 1.9, w którym znajduje się jeden podrozdział – 1.9.1. W tym miejscu można znaleźć uproszczone i bardzo eleganckie przedstawienie praktycznych aspektów generowania par fotonów w procesie SPDC. Ten rozdział uważam za szczególnie przydatny dla osób początkujących w dziedzinie optyki doświadczalnej, które pragną zrozumieć teoretyczne podstawy źródeł par fotonów. Niemniej jednak, dostrzegam pewną usterkę na rysunkach 1.17 i 1.18. Funkcja opisująca impuls pompujący w zmiennych będących częstościami pary fotonów ma przekrój, który przyjmuje postać funkcji Gaussa w kierunku diagonalnym, jednocześnie rozciągając



się od wartości ujemnych do dodatnich nieskończoności w kierunku anty-diagonalnym. W związku z tym transformata Fouriera przyjmuje postać funkcji Gaussa w kierunku diagonalnym oraz delty Diraca w kierunku anty-diagonalnym. Skupmy uwagę na wykresie 1.17. Moim zdaniem w tym przypadku transformata Fouriera została poprawnie obliczona numerycznie. Niemniej jednak, ograniczenie funkcji na panelu po lewej stronie doprowadziło do nieodpowiedniego kształtu funkcji na panelu po prawej stronie.

Ten rozdział wydaje się być obciążony jeszcze jednym dość poważnym błędem. Mam nadzieję, że jest to kwestia opisu w warstwie językowej. Mianowicie, w mechanice kwantowej relacja między funkcją falową zależną od czasu a funkcją zależną od częstotliwości jest określona przez transformatę Fouriera. Zatem, transformatę należy wykonać na poziomie amplitud (funkcji falowych), a w kolejnym kroku można obliczyć odpowiednie kwadraty modułów w celu otrzymania intensywności. Cytuję zdanie ze strony 29: „*The joint spectral intensity (JSI) of the pump function $|\alpha(f_s, f_i)|^2$ and its Fourier transformation, joint temporal intensity (JTI), are shown in Figure 1.17.*” Może to świadczyć o usterce przy obliczeniach JSI i JTI. Uprzejmie proszę Doktoranta o obszerny komentarz dotyczący tej kwestii oraz wyjaśnienie interpretacji fizycznej, która stoi za transformacją Fouriera w kontekście impulsów laserowych.

Rozdział kolejny to znowu opis, bardzo dobrze dobranych i adekwatnych do dalszej części pracy, zestawu technik modulacji fazy amplitud impulsów optycznych. Metody te mogą być stosowane zarówno do impulsów klasycznych, gdzie określona jest średnia liczba fotonów jak i takich czysto kwantowych a w szczególności do stanów Foka. Tutaj Pan Ali Golestani opisuje metodę wykorzystania charakterystyki impulsu elektrycznego z diody o wysokim pasmie. Jest to bardzo dobra metoda, która jest ekonomiczną alternatywą dla stosowania generatorów. Zastanawiam się jaka byłaby zaleta wykorzystania generatora analogowego lub arbitralnego w tej aplikacji. Czy byłaby jakaś poza wygodą? Do tego rozdziału mam także następującą uwagę: Równanie 2.12 nie wyraża liniowej superpozycji w klasycznym rozumieniu. Jest to opis propagacji z wykorzystaniem funkcji Greena. Są to dwie różne rzeczy.

Jak już wcześniej wspomniałem, w rozdziale trzecim dostrzegam wyniki opublikowane w pracy "Phys. Rev. Lett. **129**, 123605 (2022)", której doktorant jest pierwszym autorem. Ta część pracy ukazuje w wielu szczegółach tło eksperymentalne, które zostało wykorzystane w trakcie badań. Tutaj można dowiedzieć się zarówno, jak układy doświadczalne były skonstruowane, jak przeprowadzono ich kalibrację, a także jak przebiegały pomiary. Oczywiście, Doktorant przedstawił również uzyskane wyniki. W tym miejscu mam kilka drobnych komentarzy i pytań:

1. W rozdziale 3.1 pada stwierdzenie: "In addition, these methods still are not applicable in quantum regime due to using nonlinear interaction that can destroy quantum state of single photons." W opisanych przez Doktoranta metodach pomiaru profilu impulsu (pakietu falowego) pojedynczego fotonu nie widzę pomiarów niedestrukcyjnych. Wykorzystując efekty interferencyjne, w których, jak to jest cytowane, "*the optical pulse is employed to measure itself*", i mimo to na końcu pojedynczy foton musi zostać zarejestrowany, co prowadzi do nieodwracalnej utraty. Klasyfikacja tych metod pod kątem ich przydatności w pomiarach jednofotonowych impulsów optycznych (inaczej pakietów falowych) dotyczy praktycznej możliwości przeprowadzenia takich pomiarów. Choć konieczność



- wykorzystania zjawiska nieliniowego nie stanowi fundamentalnego ograniczenia dla zastosowania tych metod w charakteryzacji pojedynczych fotonów, to jednakże stwarza istotne wyzwania praktyczne.
2. Podrozdział 3.4 to też opis metody kalibracji układu pod względem przesunięcia fazowego, które wprowadza on do pakietu falowego. Oczywiście interferometr musi być zbalansowany, ale czy trzeba było wyznaczać napięcia odpowiadające kolejnym „równo oddalonym od siebie” przesunięciom fazowym? Czy można było przeprowadzić eksperyment dla kolejnych równomiernie oddalonych od siebie natężeń tak jak na rysunku 3.5 i to wykorzystać w analizie danych? Wydaje mi się, że mogłoby to zmniejszyć niepewności pomiarowe.
 3. Rysunek 3.9: Jeśli interferometr jest w ramce o kontorze zaznaczonym linia przerywana to wówczas kontur ten powinien obejmować także FPBS.
 4. Podrozdział 3.10: Z czego wynika okno koincydencji 10 ns? Wydaje mi się że można to okno istotnie ograniczyć, pewnie do szerokości odpowiadającej rozrzutowi czasowemu (timing jitter) całego układu pomiarowego. To mogłoby pomóc w pozbyciu się przypadkowych koincydencji. Być może to nie było potrzebne ze względu na bardzo niskie wartości ciemnych zliczeń użytych detektorów SSPD oraz umiejętne pozbycie się rozproszonych fotonów.

Rozdział czwarty przedstawia metodę opracowania światłowodowej siatki Bragga w celu czasowego kształtowania impulsu optycznego w sposób pasywny. Z tej części pracy możemy dowiedzieć się na czym polega działanie takiego urządzenia, ponieważ pan Ali Golestani dobrze przedstawia zagadnienie ze strony teoretycznej jak i praktycznej. W końcu co równie istotne, chociaż ma charakter bardziej inżynierski niż naukowy, zaprezentowane są metody przygotowywania takich struktur. To nie jest procesem łatwym. W ostatniej sekcji tego rozdziału pan Ali Golestani deklaruje zakres prac jaki wykonał w ramach tego zadania.

Rozprawa jest dobrze przemyślana pod względem dydaktycznym. Szkoda jednak, że nie ma dodatku, w którym Doktorant zawarłby informacje dotyczące warsztatu eksperymentalnego dotyczącego zwłaszcza technik związanych z wysokimi częstotliwościami. To nie jest powszechna wiedza w środowisku zajmującym się optyką kwantową. Ponadto, wysokie częstotliwości -- mam tu na myśli zakres powyżej 3 GHz -- wiążą się z wieloma problemami, które Doktorant prawdopodobnie musiał rozwiązać. Taka wiedza ma duże znaczenie.

Mam jeszcze listę wybranych uwag drobnych:

1. W abstrakcie jest literówka: “electro=optic”
2. Można było pominąć wyodrębnianie podsekcji jeśli jest ona jedyną w sekcji.
3. Niepotrzebne jest wcięcie po równaniu 1.58. Takich usterek jest wiele w tekście rozprawy.
4. Na przykład na stronie 7, nad równaniem 1.10 powinno być: „by THE following equations”.
5. Inny przykład to strona 8: „We continue to study how its temporal and spectral widths CHANGE when...”
6. Rozdział o numerze 1.3 mógłby być nieco lepiej zredagowany. Definicje różnych wielkości pojawiają się w nieco odwróconym porządku.
7. Przed równaniem 1.40 powinien być dwukropek. Takich usterek też jest wiele.





8. Czy w równaniach 1.43 i 1.44 powinien być znak równości czy proporcjonalności?
9. Po równaniach powinny być przecinki lub kropki a następujący po równaniu tekst nie powinien zaczynać się wcięciem.
10. W rozdziale 1.7.1: powinno być „In consequence”.
11. W rozdziale 1.8 są dwa symbole oznaczające to częstość kołową.
12. Pogłębiona analiza zawarta w równaniach 1.59-1.61 wydaje się być powtórzeniem tego co można znaleźć w formułach 1.15-1.17.
13. Czy na rysunku 2.5 brakuje światłowodów otrzymujących polaryzację?

Podsumowując, pan Ali Golestani nie uniknął usterek językowych i edytorskich. Prawdę mówiąc można odnieść wrażenie że w ogóle problem poprawności językowej był trzecioplanowy w procesie tworzenia rozprawy. Jednakże stwierdzam że praca przedstawia istotny wkład w dziedzinę optyki kwantowej. Doktorant uczestniczył w tworzeniu metod kontroli fazy pakietów falowych z wykorzystaniem modulatorów elektro-optycznych. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną i doświadczalną kandydata w dyscyplinie. Dlatego też stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe wymagania dotyczące tego typu prac naukowych. Z tej przyczyny, wnioskuję o dopuszczenie Pana Alego Golestaniego Shishvana do kolejnych etapów procesu przewodu doktorskiego.

Piotr Koleszowski

