

dr hab. inż. Grzegorz Soboń, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
grzegorz.sobon@pwr.edu.pl

Wrocław, dn. 21.08.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Alego Golestaniego Shishvana

zatytułowanej:

„Temporal Shaping and Measurement of Pulsed Quantum Light”

Recenzję wykonano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego, nr BRN-XII/531/54/2023, z dnia 20.06.2023.

1. Wprowadzenie

Zagadnienia generacji pojedynczych fotonów, a następnie ich manipulacji, modyfikacji i charakteryzacji stanowią obecnie jeden z najdynamiczniej rozwijających się obszarów fotoniki. Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat uwaga wielu fizyków, zajmujących się wcześniej światłem w ujęciu klasycznym, zwróciła się w kierunku optyki kwantowej. Rozwój najróżniejszych technik generacji pojedynczych fotonów, przetwarzania informacji czy bezpiecznej komunikacji kwantowej przyniósł nam wiele fantastycznych odkryć naukowych. Badania te motywowane są rzeczywistymi aplikacjami, które powoli przechodzą ze środowiska laboratoryjnego do realnych zastosowań, takich jak np. generacja klucza kwantowego. Oceniana praca doktorska mgr. Alego Golestaniego Shishvana bardzo dobrze wpisuje się w bieżący nurt badań dotyczący modyfikacji parametrów słabych wiązek (składających się z pojedynczych fotonów) oraz pomiaru parametrów pojedynczych fotonów. Praca została zrealizowana na Uniwersytecie Warszawskim, w zespole badawczym kierowanym przez dra Michała Karpińskiego, którego działalność naukowa stanowi zauważalny wkład w rozwój fotoniki kwantowej na świecie.

2. Zawartość pracy

Celem pracy było opracowanie i opanowanie metod modyfikacji czasowo-spektralnej pojedynczych fotonów, z wykorzystaniem modulacji elektrooptycznej. Opracowane techniki eksperymentalne Autor wykorzystał następnie do praktycznej realizacji układu do pomiaru czasu trwania impulsu pojedynczego fotonu. Wykazał jednoznacznie przekonująco, iż zaproponowany układ z dużą dokładnością potrafi mierzyć profil czasowy takich impulsów.

Nieco odrębnym wątkiem opisanym w pracy, pozornie niezwiązanym z częścią dotyczącą pomiaru pojedynczych fotonów, jest zagadnienie wytwarzania szerokopasmowych, dyspersyjnych siatek Bragga (ang. Chirped Fiber Bragg Grating, CFBG). Siatki tego typu są niezastąpionym elementem w najróżniejszych układach laserowych generujących ultrakrótkie impulsy. Pozwalają na pasywne kształtowanie profilu impulsów laserowych, co czyni je również użytecznymi w zastosowaniach kwantowych.

Praca liczy 113 stron jest podzielona na 5 rozdziałów merytorycznych. Rozdział 1 pracy stanowi zwięzły wstęp do zagadnień reprezentacji czasowo-spektralnej impulsów światła. Omawiane zagadnienia są poruszane bardzo ogólnie i w większości dotyczą elementarnych podstaw optyki nieliniowej (np. propagacja impulsu przez medium dyspersyjne i nieliniowe, techniki pomiaru impulsów, metody nieliniowej konwersji, wpływ dyspersji światłowodu na impulsy), a więc dotyczących światła klasycznego, a nie pojedynczych fotonów. Poza bardzo krótkim pierwszym podrozdziałem, dotyczącym kodowania informacji kwantowej w domenie czasowej i spektralnej, brak jest przedstawienia nieco szerszego kontekstu, jakie znaczenie dla optyki kwantowej mają metody prezentowane w dalszej części pracy.

W Rozdziale 2 Autor szczegółowo wprowadza czytelnika w zagadnienie modulacji fazy impulsów laserowych z użyciem modulatora elektrooptycznego (EOM). Rozważane są dwa szczególne przypadki, w których modulowany impuls znajduje się na zboczu sygnału sterującego modulatorem (liniowa modulacja fazy czasowej), oraz gdy maksimum impulsu laserowego pokrywa się z maksimum sinusoidalnego sygnału modulującego (mamy wtedy do czynienia z modulacją kwadraturową, skutkującą również zmianą kształtu spektrum impulsu). Następnie, Autor przedstawia swoją autorską koncepcję wykorzystania sygnału napięciowego generowanego przez szybki fotodetektor pobudzany ultrakrótkim impulsem laserowym, jako sygnału sterującego modulator EOM. Pozwala to na uniknięcie konieczności stosowania szybkiego generatora sygnałowego, gdyż odpowiedź fotodetektora zawiera w sobie charakterystyczne cechy, pożądane przez Autora, tj. liniowe zbocze oraz bardzo krótki fragment nieliniowy. Zaproponowany układ eksperymentalny, zawierający modulator elektrooptyczny sterowany sygnałem z fotodetektora oraz interferometr polaryzacyjny, pozwala na odtworzenie profilu fazy czasowej nałożonej na impuls laserowy. Ponieważ technika ta jest w pełni liniowa i nie wykorzystuje żadnych zjawisk optyki nieliniowej (jak np. generacja drugiej harmonicznej, wykorzystywana w innych technikach odtwarzania fazy jak SPIDER czy FROG), może być zastosowana do pojedynczych fotonów.

Rozdział 3 zawiera wyniki będące, w mojej opinii, najważniejsze dla całej pracy. Zawiera opis zaproponowanej przez Autora nowej metody pomiaru czasu trwania impulsów pojedynczych fotonów. Mimo niełatwej implementacji eksperymentalnej, Autor dość zwięźle i zrozumiale wyjaśnia zasadę działania metody, nazwanej chronometrią Fourierowską, będącej pewnego rodzaju analogią spektroskopii Fourierowskiej. W spektroskopii Fourierowskiej, rejestrowany jest sygnał interferencyjny między wiązką referencyjną, a przesuniętą w czasie. Następnie, w wyniku transformacji Fouriera interferogramu czasowego otrzymywany jest kształt spektrum impulsu. Natomiast tutaj, zamiast opóźnienia czasowego w jednym z ramion wprowadzane jest przesunięcie spektralne. Jako mechanizm przesunięcia spektralnego Autor wykorzystał właśnie opisaną w poprzednim rozdziale metodę, polegającą na takiej modulacji fazy impulsu za pomocą EOM, która wywołuje kontrolowane przesunięcie widma. Otrzymywany jest zatem interferogram w funkcji przesunięcia spektralnego. Transformacja Fouriera tego przebiegu daje w wyniku profil czasowy impulsu. Autor zweryfikował metodę mierząc impulsy pochodzące z lasera femtosekundowego, a następnie również impulsy pochodzące ze źródła pojedynczych fotonów typu SPDC (ang. spontaneous parametric down-conversion). Ze względu na ograniczenia techniczne, metoda ta ma bardzo wąski zakres pomiarowy. Umożliwia mierzenie impulsów o szerokości spektralnej do ok. 0,6 nm, czyli dość wąskopasmowych, a co za tym idzie – relatywnie długich (kilka pikosekund). Podsumowanie rozdziału zawiera jedynie bardzo krótką i ogólną dyskusję na temat ograniczeń technicznych prezentowanej metody. Metoda działa dla bardzo wąskiego zakresu parametrów impulsów. Autor mógłby pokusić się o określenie absolutnych limitów technicznych i skalowalności tej metody, zakładając aktualnie osiągalne parametry techniczne modulatorów i innych komponentów.

Rozdział 4 dotyczy drugiego zagadnienia, jakim zajmował się Autor podczas realizacji doktoratu, tj. wytwarzania światłowodowych dyspersyjnych siatek Bragga. Autor zwięźle, na kilku stronach wprowadza podstawowe pojęcia i wzory, oraz opisuje układ optyczny służący do wytwarzania siatek. Ta część pracy została zrealizowana przez Autora w laboratoriach Optoelectronic Research Centre w Southampton w Wielkiej Brytanii. W ramach badań Autor wykonał i scharakteryzował dwie siatki Bragga: na długość fali 1553 nm, oraz wysoce dyspersyjną siatkę na środkową długość fali 2065 nm. Rozdział kończy teoretyczne rozważanie na temat wytworzenia siatki o nieliniowym profilu opóźnienia grupowego. Według symulacji numerycznych przeprowadzonych przez Autora, siatka taka mogłaby zostać zastosowana w układzie tzw. soczewki czasowej (inna koncepcja rozwijana w grupie badawczej, w której pracował Autor).

3. Wartość naukowa prezentowanych rezultatów

Za najważniejsze osiągnięcie Autora należy niewątpliwie uznać zaprezentowanie nowej metody pomiaru profilu czasowego impulsów, która może zostać z powodzeniem zastosowana do pojedynczych fotonów. Klasyczne, powszechnie stosowane techniki pomiaru impulsów ultrakrótkich (tj. autokorelacja intensywności, FROG oraz SPIDER) opierają się na zjawisku nieliniowym: generacji drugiej harmonicznej impulsów. Z tego względu, zupełnie nie nadają się do słabych wiązek. Zaproponowana przez Autora metoda nie wykorzystuje żadnego efektu nieliniowego. Wymaga jedynie modulatora elektrooptycznego, kilku elementów optycznych, detektora (w przypadku pomiaru słabych wiązek jest to detektor pojedynczych fotonów) i relatywnie prostej obróbki sygnału.

Eksperymentalna realizacja tej metody świadczy o bardzo dobrym zrozumieniu teoretycznym zagadnienia kształtowania czasowo-spektralnego impulsów. Jest to niewątpliwie osiągnięcie o dużym znaczeniu dla środowiska naukowego. O dużym wpływie tych badań świadczy fakt, iż praca prezentująca te wyniki została opublikowana w czasopiśmie *Physical Review Letters*, uważanym za jedno z najbardziej prestiżowych czasopism w dziedzinie nauk fizycznych, publikująca jedynie wyniki o najwyższej jakości i dużym wpływie na rozwój fizyki.

Wyniki uzyskane przez Autora w zakresie wytwarzania siatek Bragga nie stanowią, w mojej opinii, tak dużego osiągnięcia jak to omówione wcześniej. Wytwarzanie siatek CFBG jest procesem znanym. Komercyjnie dostępne są siatki CFBG na najróżniejsze zakresy spektralne, których profil odbicia może być kształtowany niemal dowolnie pod konkretne wymagania klienta. Proces wytwarzania siatek CFBG jest oczywiście wyjątkowo pracochłonny i kłopotliwy, ze względu na konieczność wodorowania światłowodu i wytworzenia odpowiedniej maski fazowej. Zaprezentowane rezultaty w zakresie wytwarzania siatek nie stanowią więc tak dużej wartości naukowej, niemniej jednak, potwierdzają iż Autor jest pracowitym i samodzielnym badaczem, nie bojącym się stawianych przed nim wyzwań. Za rzecz dużo ciekawszą z naukowego punktu widzenia uznać należy koncepcję siatki o nieliniowym profilu opóźnienia grupowego, zaprezentowaną w samej końcówce pracy, w rozdziale 4.8. Badania zakończono na etapie obliczeń i w pracy nie zaprezentowano realizacji praktycznej takiej siatki.

Osiągnięcie w zakresie kształtowania czasowo-spektralnego impulsów jednofotonowych z wykorzystaniem modulatora elektrooptycznego, a następnie opracowanie techniki pomiaru impulsów jednofotonowych, uważam za osiągnięcie o ogromnym znaczeniu dla optyki kwantowej. Osiągnięcie to świadczy o dużych umiejętnościach eksperymentatorskich Autora, ale połączonych z dogłębnym zrozumieniem teoretycznym poruszanych zagadnień. Wyraźnie widoczny jest również swego rodzaju spryt eksperymentatorski, niezwykle wymagany w tego typu badaniach.

4. Uwagi szczegółowe

Wartość naukowa prezentowanych wyników nie ulega żadnej wątpliwości. Niemniej jednak, Autor nie ustrzegł się pewnych błędów oraz nieścisłości. Poniżej przedstawiono kilka uwag szczegółowych:

Rozdział 2

- 1) Jednym z najważniejszych zastosowanych autorskich rozwiązań jest użycie sygnału elektrycznego odpowiedzi z fotodetektora na pobudzenie ultrakrótkim impulsem, jako sygnału sterującego modulator elektrooptyczny. Jest to rozwiązanie dość sprytnie i pozwalające na uniknięcie zastosowania generatora arbitralnego, jednak sens jego stosowania nie jest do końca dobrze wyjaśniony. Autor motywuje to rozwiązaniem niższymi szumami (str. 41, „*To avoid the noise resulting from the waveform generator, (...), an amplified electronic signal from a photodiode is used to modulate the short light pulses passing through the phase modulator*”). Jednakże, brak jest w pracy jakiegokolwiek dowodu, że rozwiązanie to cechuje się niższymi szumami. Nie znajdujemy w pracy żadnych liczb, pożądanych wartości szumu, ani wzmianek na temat metod obniżenia szumów. Nie wiadomo też, o jaki szum w zasadzie chodzi (amplitudowy – RIN, czy fazowy – timing jitter?). Ponadto, w eksperymencie Autor wzmacnia sygnał z fotodetektora komercyjnie dostępnym wzmacniaczem, który nie jest szczególnie niskoszumny.
- 2) Rysunek 2.4: prezentowany jest przebieg odpowiedzi fotodiody. Rysunek podpisany jest w sposób sugerujący, że jest to sygnał zarejestrowany prosto z fotodetektora. Natomiast napięcie ($>10\text{ V}$) sugeruje, że jest to jednak sygnał już po wzmacnieniu.
- 3) Na rysunku 2.8 przedstawiono układ eksperymentalny do pomiaru profilu fazowego impulsów. Rysunek ten jest niezgodny z opisem przedstawionym na stronie 47. Według opisu, impulsy z lasera są sprzęgane do światłowodu, następnie dzielone sprzęgaczem światłowodowym na dwa tory. Natomiast na Rys. 2.8 przedstawiona jest objętościowa kostka światłodziela. Rysunek sugeruje, że jedynym elementem światłowodowym układu jest modulator EOM, oraz kontroler polaryzacji i dzielnik polaryzacyjny przed fotodetektorem. Co do zasady, układ ten mógłby być bez większych trudności zrealizowany całkowicie światłowodowo. Ponadto, prawdopodobnie przez błąd edytorski, nie do końca zrozumiale opisany jest wpływ EOM na obie polaryzacje światła: *“In this temporal phase modulation process, one of the polarization states in the EOPM is mainly modulated and the polarization state is attenuated”*.
- 4) Do detekcji sygnału użyto fotodetektora o paśmie 1 GHz. Takie pasmo przekłada się na czas narostu/opadania na poziomie rzędu 500 ps. Natomiast cały rejestrowany sygnał ma tutaj 200 ps. Czy nie byłoby korzystne dla eksperymentu użycie dużo szybszej fotodiody?

Rozdział 3

- 5) Na Rys. 3.12 przedstawiono zmierzony sygnał interferencyjny między sygnałem referencyjnym a przesuniętym spektralnie. Ponieważ przesunięcie spektralne dokonane jest tylko w jedną stronę (krótkofalową), odtworzony jest interferogram połowy impulsu. Aby odtworzyć cały przebieg, Autor pisze: *“Then we mirror the pattern to get full fringe pattern that is illustrated in Figure 3.13.”*. Zatem lewa część interferogramu (przesunięcie długofalowe) jest lustrzanym odbiciem prawej części. Nie opisano w jaki sposób takie uproszczenie wpływa na wynik pomiaru.
- 6) W procedurze odtwarzania profilu czasowego impulsu, Autor nie opisał w jaki sposób odtwarza skalę czasową. W przypadku klasycznej spektrometrii Fourierowskiej, do odzyskania osi długości fali stosuje się drugi laser referencyjny (o bardzo dobrze znanej długości fali; najczęściej stabilizowany). Dzięki temu kalibrowane jest przesunięcie czasowe jednej z wiązek w interferometrze. W tym przypadku Autor ogranicza się do ogólnikowego stwierdzenia: *“By taking a fast Fourier transform of the fringe pattern and defining the proper time scale, the temporal profile of the optical pulse is achieved as shown in*

Figure 3.14.". Zastosowana metoda wymaga przesunięcia spektralnego w krokach z rozdzielczością 0,01 nm. Autor przedstawił metodę kalibracji z użyciem analizatora widma optycznego. Jest to zatem procedura dość kłopotliwa gdyż wymaga wysokorozdzielczego analizatora. Czy krzywa kalibracji zmienia się w czasie? Czy kalibracja będzie wymagana przy każdorazowym pomiarze innego impulsu?

- 7) Zmierzony czas trwania impulsu na Rys. 3.14 wynosi 7,48 ps, i wg Autora jest bliski przewidywaniom teoretycznym („(...) which is relatively close to theoretical expectations for the optical pulse with 0.5 nm spectral bandwidth calculated based on the RMS pulse width calculation”). Nie uściślono o jakie przewidywanie teoretyczne chodzi – czy Autor ma na myśli limit Fourierowski (ang. time bandwidth product, TBP)? Nie skomentowano również niesymetrycznego kształtu impulsu (dlaczego taki jest, skoro interferogram jest symetryczny?)
- 8) Dość wyraźnym brakiem jest brak pomiaru impulsu jakąkolwiek standardową techniką, choćby autokorelacją intensywności. Taki pomiar stanowiłby jednoznaczną weryfikację, że układ działa poprawnie. Obecnie poprawność działania układu weryfikowana jest na podstawie zgodności z limitem Fourierowskim. Pewną próbę pokazania, iż metoda działa dla impulsów niekoniecznie ograniczonych Fourierowsko jest pomiar przedstawiony w rozdziale 3.9, tj. dla impulsów rozciągniętych w długich odcinkach światłowodu. Niestety, mimo dostępności w laboratorium wysokorozdzielczego analizatora widma optycznego APEX, Autor nie pokazał, że propagacja impulsu przez 160 metrów światłowodu na pewno nie zmienia jego spektrum. Zawarto jedynie komentarz na stronie 70: „In this approach, the same spectral bandwidth of the optical pulse is sent through specific length of optical fiber which leads to pulse broadening in temporal domain without change in spectral domain.” Ponieważ nie jest znana wprowadzona do światłowodu moc optyczna, nie można jednoznacznie stwierdzić, czy aby na pewno widmo nie uległo poszerzeniu. Czy Autor weryfikował przy pomocy analizatora widma, że spektrum po przejściu przez 160 m światłowodu nadal ma 0,5 nm szerokości?

Rozdział 4

- 9) W obliczeniach parametrów siatek CFBG Autor przyjął wartość współczynnika załamania światła równy 1,444. Brak jest źródła tej wartości. Czy przyjmowany jest współczynnik załamania rdzenia, czy współczynnik grupowy?
- 10) Drobne uwagi: na wykresie 4.10 oś Y podpisana jest jako „Reflection”, a wyrażona w jednostkach dBm. W przypadku pomiaru współczynnika odbicia, wygodne byłoby przeliczenie na % odbicia. Na stronie 94 pojawia się literówka w jednostce długości fali: 2070 μ m zamiast 2070 nm.

5. Podsumowanie

Podsumowując, praca mgra Alego Golestaniego Shishvana niewątpliwie prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Autora w dyscyplinie Nauki Fizyczne, oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Autor w swojej pracy rozwiązał istotny problem naukowy, dotyczący manipulacji fazowo-spektralnej impulsów laserowych pod kątem zastosowań w optyce kwantowej, doprowadzając do opracowania nowej techniki pomiaru kształtu impulsów jednofotonowych. Moja ocena wartości naukowej przedstawionej do recenzji pracy jest **jednoznacznie pozytywna**. Wymienione uwagi krytyczne nie podważają wysokiej wartości naukowej prezentowanych wyników. W mojej opinii, praca spełnia warunki określone w §5 ust. 1-2 Załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 29 czerwca 2022 r. w sprawie określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora oraz stopnia doktora habilitowanego na Uniwersytecie Warszawskim. W związku z tym może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Grega Lideos