

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Filipa Sośnickiego (Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego)

Praca doktorska Pana Filipa Sośnickiego dotyczy doświadczalnego kształtowania kwantowych impulsów światła poprzez wykorzystanie optycznego dualizmu czasoprzestrzennego i zastosowanie elektrooptycznej modulacji fazy do kształtowania i modyfikacji czasowych obwiedni i widm jednofotonowych impulsów.

Problematyka ta jest bardzo ważna i aktualna za względu na rosnące znaczenie technik wykorzystywania i przetwarzania informacji kwantowej. W rozwoju tego kierunku szczególną uwagę badaczy skupia ostatnio czasowo-widmowy stopień swobody kwantowych impulsów światła. W stosunku bowiem do standardowych metod wykorzystujących polaryzacyjne i przestrzenne stopnie swobody, właściwości czasowo-widmowe umożliwiają wielowymiarowe kodowanie informacji kwantowej i przesyłanie jej na duże odległości za pomocą sieci światłowodowych. Wykorzystanie takich stopni swobody wymaga jednak możliwości kontroli obwiedni czasowej oraz widma impulsów optycznych, zgodnego z wymaganiami kwantowymi (brak wzmacniaczy czy odpowiednio niski poziom strat).

Recenzowana praca poświęcona jest praktycznym, doświadczalnym aspektom i świetnie wpisuje się w ten nurt. Została ona wykonana pod kierunkiem profesora Czesława Radzewicza i doktora Michała Karpińskiego na Wydziale Fizyki UW. Praca zawiera 218 stron, z czego zasadnicza praca obejmuje 6 rozdziałów i 137 stron a reszta to bardzo obszerny i ciekawy dodatek.

Po zwięzłym przedstawieniu w pierwszym rozdziale tematyki pracy i motywacji jej podjęcia, w drugim znajdujemy omówienie podstawowych właściwości impulsów optycznych i analogii czasoprzestrzennej opartej na transformacji Fouriera. Trzeci rozdział zawiera opis zastosowanych metod i technik doświadczalnych (modulacja elektro-optyczna, szybka elektronika, aparatura spektralna, etc.). Te trzy pierwsze rozdziały stanowią doskonałe wprowadzenie do zasadniczego tematu rozprawy, jaki znajduje się w rozdziałach 4, 5 i 6. Praca napisana jest po angielsku. O ile jej początek czyta się bardzo dobrze, o tyle rozdziały 4 -6 czyta się już niestety dużo gorzej, głównie z powodu zbyt silnej dominacji polskiej składni.

Rozdział 4 pracy opisuje zasadę, realizację i uzyskane parametry aperiodycznej soczewki czasowej i pryzmatu czasowego. W tych podstawowych układach impulsy optyczne są soczewkowane przez sterowanie modulatora EOM sygnałem radiowym odpowiednio zsynchronizowanym z impulsami świetlnymi. Autor pokazuje, że modulację RF można zastąpić przez sygnał fotonicznie wygenerowany z wykorzystaniem szybkiej fotodiody i wzmacniacza. Przez dobranie odpowiedniej synchronizacji faz możliwa jest realizacja albo soczewki, albo pryzmatu czasowego przesuwającego widmo w kontrolowany sposób. Ważnym i ciekawym zastosowaniem takiej soczewki czasowej jest zawężanie spektralne impulsów świetlnych. Wiąże się ono nie tylko ze zmniejszeniem szerokości widmowej, ale także z istotnym wzrostem natężenia tak kontrolowanych impulsów. Autor bardzo szczegółowo dyskutuje właściwości modyfikowanych impulsów (szerokość spektralna, natężenie, stabilność, czas koherencji, a także możliwość mapowania czas-częstotliwość i przestrajalność) zarówno dla klasycznych wiązek, jak też i dla pojedynczych obwieszczanych (*heralded*) fotonów.

W rozdziale 5 autor opisuje rozszerzenie metod modulacji elektrooptycznej na pary fotonów. Demonstruje także manipulację spektralnie skorelowanych par fotonowych przez modyfikację widma światła pompującego w procesie nieliniowej konwersji. Bardzo ciekawym wynikiem są opisane w tym rozdziale próby zwiększenia wymiarowości modyfikowanych wiązek świetlnych przez zastosowanie modów Hermite'a-Gaussa, a także soczewkowanie czasowe par fotonów – zarówno skorelowanych, jak i nieskorelowanych. W szczególności autor zademonstrował możliwość regulacji parametru nazywanego łącznym spektralnym natężeniem (*joint spectral intensity*) z regulowanymi korelacjami (przez odpowiednią modyfikację widma pompy, impulsy mogą być albo skorelowane, albo anty-korelowane). Uzyskał też możliwość mierzenia w pojedynczym układzie zarówno *joint spectral* jak i *joint temporal intensity*, ważną dla charakteryzacji spektralno-czasowego splątania stanów dwufotonowych.

W mojej opinii najważniejszym osiągnięciem Filipa Sośnickiego jest opisane w rozdziale 6 stworzenie czasowej soczewki Fresnela i zbadanie jej charakterystyk. Stało się to możliwe przez pomysłowe ominięcie ograniczenia napięcia dostępnego do parabolicznej modulacji fazy i jej odpowiednie sterowanie z ograniczeniem do wartości 2π z odpowiednimi powtórzeniami. Mimo że sam przepis jest w zasadzie prosty, to jego realizacja w dostatecznie szerokim zakresie wymagała bardzo starannej kompensacji wszelkich niedoskonałości aparatury i zapewnienia wysokiej stabilności termicznej i spektralnej, a także odpowiedniego selekcionowania wybranych impulsów pracującego z częstotliwością 80 MHz lasera. Starania te zakończyły się pełnym sukcesem, jakim było 90-krotne wzmocnienie impulsów świetlnych i ich zawężenie spektralne o przeszło dwa rzędy wielkości.

Rozprawa ma bardzo obszerną bibliografię (280 pozycji). Poza głównym, omówionym powyżej członem, ważną jej częścią stały się dodatki dorobek autora (dodatek A), a także omówienie szczegółowych zagadnień doświadczalnych. I tak, dodatek B dokładnie omawia metodykę interferencyjnego elektrooptycznego charakteryzowania krótkich impulsów świetlnych z opisem metod radzenia sobie z szumem i niestabilnościami (*jitter*). Czytałem ten opis z dużym zainteresowaniem i przyjemnością. Dodatek C formułuje bardzo dojrzałe wnioski i rady, stanowiące rodzaj przesłania dla współpracowników i następców w pracy laboratoryjnej, dodatek D omawia szczegółowo budowę, justowanie i kalibrację *pulse shapera*. Dodatek E opisuje długą (5 m) linię optyczną dającą 16 ns opóźnienia. Dodatek F omawia zastosowane oprogramowanie LabView a dodatek G regulatory polaryzacji wykonane techniką druku trójwymiarowego. Te obszerne dodatkowe strony świetnie ilustrują i dokumentują trudności jakie autor musiał pokonać, zwracają uwagę na szereg praktycznych kwestii stanowiących *sól pracy* laboratoryjnej i – co najważniejsze – stanowić będą, jak sądzę, znakomitą pomoc dla kolejnych adeptów tej wiedzy.

Wykonane przez p. Sośnickiego badania przyczyniły się do powstania sześciu innych publikacji w bardzo dobrych czasopismach, w tym trzech, w których był on pierwszym autorem a także 11 doniesień konferencyjnych.

W podsumowaniu swojej opinii chcę podkreślić, że rozprawa mgr. Sośnickiego bardzo się wyróżnia spośród większości prac jakie recenzowałem. Przede wszystkim ilustruje ona bardzo głęboką wiedzę kandydata na temat fizyki związanej z przetwarzaniem informacji kwantowej a także praktycznych zagadnień dotyczącej elektroniki i optyki krótkich impulsów.

Badania mgr. Sośnickiego rozszerzają standardową optykę przestrzenną na domenę czasowo-widmową. Autor w swej pracy stworzył odpowiednią platformę eksperymentalną z laserami femtosekundowymi, specjalną aparaturą detekcyjną i spektralną oraz szybką elektroniką impulsową. Na tej platformie zbudował szereg podstawowych elementów – różnych soczewek czasowych pozwalających na modulację widma optycznych impulsów kwantowych, a więc na poziomie

pojedynczych fotonów. W oparciu o tę platformę, mgr. Sośnicki opracował dwa nowe typy elektrooptycznych soczewek czasowych: aperiodyczną soczewkę czasową oraz czasową soczewkę Fresnela, które znoszą techniczne ograniczenia soczewek czasowych zademonstrowanych do tej pory i umożliwiają nowe zastosowania.

Wyraźnie widoczny jest silny osobisty stosunek autora do omawianych zagadnień. Bardzo też podoba mi się dokładne i systematyczne omówienie części doświadczalnej, stanowiące znakomite wprowadzenie do szczegółowych badań opisanych w dalszych częściach rozprawy. Doskonałe zorganizowanie autora i jego dojrzałość badawczą ilustruje także zamieszczony na końcu dodatek C, w którym odsłania on przyświecające mu przy pracy zasady warsztatu naukowego badacza. Rozprawa w moim odczuciu świetnie ilustruje dojrzałość autora jako fizyka i jego całościowe podejście do fizyki bez mechanicznego rozdzielania aspektów teoretycznych i doświadczalnych.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr. Filipa Sośnickiego spełnia z nawiązką wszelkie ustawowe wymagania, wnioskuję o jej wyróżnienie i dopuszczenie autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Kraków, 13. 04. 2023

Prof. dr hab. Wojciech Gawlik
Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego
Uniwersytet Jagielloński