

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Filipa Sośnickiego

Spectral shaping of quantum light pulses

by electro-optic phase modulation

Recenzowana dysertacja jest obszernym i kompletnym dziełem (240 stron) z dziedziny doświadczalnej optyki kwantowej. Skupia się ona na realizacji soczewek czasowych pozwalających na manipulację widmowo-czasowym stopniem swobody pojedynczych fotonów. Opisywane doświadczenia są zaawansowane, oparte na zsynchronizowanych sygnałach optycznych i radiowych, których celem jest złożona manipulacja fazy fotonów. Praca doktoranta zbiega się w czasie z budową nowego laboratorium optycznego, co dało mu możliwości współtworzenia doświadczalnego projektu naukowego praktycznie od zera. Zadanie to ambitne, zaś wykonane zostało nadzwyczaj starannie, systematycznie i z dużą dozą elastyczności, co pozwoli na łatwe wykorzystanie zbudowanych układów w przyszłych eksperymentach. Widać wyraźnie ogromny zasób wiedzy z optyki i elektroniki, który doktorant przyswoił i z sukcesem wykorzystał. Chciałbym więc zaznaczyć już na początku, że jestem pod dużym wrażeniem ocenianej rozprawy i nie mam najmniejszych wątpliwości, że spełnia ona wszystkie międzynarodowe standardy stawiane pracom doktorskim.

Opiszę teraz bardziej szczegółowo każdy z rozdziałów pracy. Napisana jest ona w języku angielskim z małą ilością polonizmów i literówek, których nie będę wymieniał. Rozprawa jest spójna, ma klarowny podział logiczny, opisy są zwarte i bezpośrednio związane z tematem. Autor świetnie używa skrótowców, które wprowadzane są wielokrotnie w tekście (ale nie za często) dzięki czemu w każdym momencie wiadomo co dany skrót oznacza. Rozprawa zredagowana jest na bardzo wysokim poziomie.

Rozdział 1 poświęcony jest motywacji, którą autor sprowadza do komunikacji kwantowej. Przedyskutowano w tym kontekście wady i zalety różnych stopni swobody fotonu. Np. polaryzacja nie jest zachowana w sieciach telekomunikacyjnych, orbitalny moment pędu jest trudny w obsłudze, zaś mody widmowo-czasowe nie mają tych problemów. Ponadto, najprawdopodobniej przyszłe sieci kwantowe będą używały fotonów do komunikacji

między różnymi platformami fizycznymi realizującymi lokalnie obliczenia kwantowe. Stąd silna potrzeba manipulacji spektralnych wymiennego światła. Rozdział ten bardzo dobrze motywuje pracę i jasno sytuuje ją w istniejącej literaturze.

Rozdział 2 skupia się na teorii rozważanych zjawisk. Przedstawiono opis impulsowych sygnałów i ważną dla doktoratu tzw. "optyczną dualność czasoprzestrzenną". Jest to analogia pomiędzy optyką w przestrzeni, a widmowo-czasowym stopniem swobody. W skrócie, równanie opisujące propagację przyosiową w przestrzeni ma tę samą matematyczną strukturę co równanie opisujące zmiany obwiedni impulsu, gdzie kierunek ortogonalny do propagacji przestrzennej jest analogiczny do (retardowanego) czasu. Za pomocą tej analogii autor wprowadza czasowe odpowiedniki przestrzennych elementów optycznych takich jak pryzmat i soczewka. Pryzmat czasowy jest więc urządzeniem przesuwającym spektrum (bez zmiany jego kształtu) poprzez nadpisanie liniowej fazy czasowej, zaś nadpisanie kwadratowej fazy ma własności kompresji spektrum podobnie do kolimujących własności soczewki. W rozdziale tym omówiono również zasadę działania soczewki czasowej gdzie faza kwadratowa otrzymana jest poprzez zsynchronizowanie sygnałów optycznych do ekstremum ciągłej fali radiowej o pojedynczej częstotliwości. Omówiono ograniczenia tego podejścia oraz inne technologie manipulujące kształtem widmowo-czasowym impulsów jednofotonowych. Na przykład, omawiane metody nie pozwalają na aperiodyczne impulsy optyczne, zaś metoda autora zaimplementowana w następnych rozdziałach obchodzi to ograniczenie.

Rozdział 3 opisuje poszczególne elementy układów doświadczalnych. Sercem metod manipulacji widmowo-czasowych, które stosuje autor, jest elektro-optyczny modulator fazy. Jego fizyka i charakterystyka rozpoczynają rozdział, w którym wprowadzono również parametry rozpraszania i transmisji szerokopasmowej elektroniki radiowej. Szczegółowy Dodatek opisuje krok po kroku metody wyznaczenia tych parametrów i szumów w układzie. Następnie kandydat przechodzi do metod pomiaru i kontroli widma światła, z których warto osobno zaznaczyć, że światło kwantowe (pojedyncze fotony) będzie, między innymi, mierzone za pomocą wnęki Farby-Perota odizolowanej termicznie. Opisano filtry spektralne (stratne) dla światła klasycznego oraz zaimplementowano filtr w konfiguracji 4f, przy czym został on zautomatyzowany dla długości 1550 nm (telekomunikacyjna). Jako silnych elementów dyspersyjnych użyto światłowodowych siatek Bragga. Rozdział kończy opis układu do generowania par fotonów i przez post-selekcję pojedynczych fotonów. Użyto zjawiska parametrycznego podziału częstotliwości w kryształ PPKTP. Autor zaznacza,

że źródło to zostało zbudowane przez innego studenta. Przy tej okazji, chciałbym zauważyć, że autor starannie opisuje swój wkład w pracy grupowej i jasne są jego indywidualne osiągnięcia. Wszystkie urządzenia w laboratorium zostały starannie scharakteryzowane i skalibrowane. Opisy tych procesów są szczegółowe i wystarczające do niezależnego powtórzenia doświadczeń. Dodatki prezentowane w rozprawie są wręcz instrukcjami obsługi dla następnych studentów czy pracowników. Dodatki te opiszę później bardziej szczegółowo, natomiast teraz warto zaznaczyć, że autor ma oryginalny wkład do aparatury charakteryzującej i kalibracji. Także już Rozdział 3 należy uznać za nowatorski.

Mam następujące drobne uwagi do prezentacji w tym rozdziale. Może warto zaznaczyć w opisie rysunku 3.6, że sygnał jest najpierw separowany na komponenty polaryzacyjne i każdy nich jest wówczas mieszany z lokalnym oscylatorem. Dla kompletu warto zaznaczyć CL obok soczewki na rysunku 3.10. Warto również poprawić notację częstości poniżej (3.24).

Nowe wyniki z fizyki opisywane są w kolejnych trzech rozdziałach. W rozdziale 4 skupiono się na aperiodycznej soczewce czasowej. Dla porównania podano szczegółowy opis metody standardowej z sinusoidalnym polem radiowym i podkreślono komplikacje związane z synchronizacją ekstremum do impulsów optycznych. Pomysł autora polega na generowaniu impulsu radiowego z impulsu optycznego, dzięki czemu te ostatnie nie muszą być periodyczne. Zanim pokazano działanie soczewki czasowej, kandydat zademonstrował czasowy pryzmat i przedyskutował źródła niedoskonałości zachowania kształtu przesuwanego widma. Soczewkę najpierw zaimplementowano na świetle klasycznym i uzyskano 10-krotny wzrost (tzw. wzmocnienie) maksymalnej intensywności poprzez kompresję spektralną. Systematyczna seria doświadczeń (np. z różnymi opóźnieniami czy mocą sygnału optycznego) przeanalizowała parametry kompresji. Oprócz kompresji opisano również aberrację soczewki czasowej, straty układu, naruszenie warunku kolimacji i czas koherencji. Następnie skompresowano widmo pojedynczych fotonów w układzie gdzie światło lasera dzielone jest by z jednej strony pompować kryształ PPKTP, a z drugiej zasilać generowanie sygnału radiowego. W układzie tym zaobserwowano 9-krotne wzmocnienie. Spektrum pojedynczych fotonów zmierzono za pomocą dyspersyjnego spektrometru Fourierowskiego. Działanie aperiodyczne zademonstrowano na świetle klasycznym z opóźnieniem pomiędzy parami impulsów sterowanym za pomocą interferometru Franson'a. Układ ten jest złożony, zrozumiałe jest więc, że obserwacja tego efektu z pojedynczymi fotonami wykracza poza ramy czasowe

doktoratu. Ponownie zmierzono 10-krotne wzmocnienie oraz podkreślono aperiodyczność — to samo wzmocnienie osiągnięto dla dowolnych opóźnień, jasno wykraczając poza możliwości dotychczasowych metod.

Co do prezentacji w tym rozdziale, warto dodać w tekście pod rysunkiem 4.7, że PM oznacza światłowód zachowujący polaryzację. Kolory na rysunku 4.8 nie odpowiadają podpisowi pod rysunkiem i głównemu tekstowi.

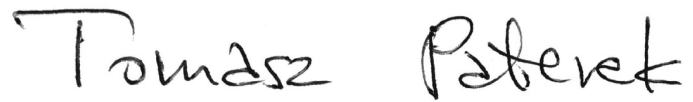
Rozdział 5 skupia się na parach fotonów generowanych w parametrycznym podziale częstości. Manipulując spektrum wiązki pompującej autor wykazał możliwość sterowania korelacjami łącznej intensywności widmowej. Między innymi wykazano, że bardziej złożone pompowanie prowadzi do wielowymiarowego splątania wygenerowanych par, co może mieć znaczenie technologiczne. Następnie zastosowano dwie soczewki czasowe, każdą niezależnie na pojedynczych fotonach z pary. W ten sposób skompresowano spektrum nieskorelowanych fotonów i wykazano możliwość manipulacji częstościami centralnymi. Na koniec wykazano, że soczewki czasowe zaaplikowane do częstościowo skorelowanych fotonów manipulują ich korelacjami i między innymi mogą zamienić fotony dodatnio skorelowane na ujemnie skorelowane.

Rozdział 6 opisuje implementację czasowej soczewki Fresnela za pomocą złożonej modulacji fazy. Jest to jeden z najważniejszych wyników pracy gdyż pozwala na przekonwertowanie fotonów generowanych w parametrycznym podziale częstości do skal czasowych łatwo absorbowanych przez pamięci atomowe. Autor opublikował najpierw pracę teoretyczną, w której symulowany jest układ implementujący taką soczewkę, a następnie zrealizował ją w laboratorium starannie biorąc pod uwagę niedoskonałości aparatury. Układ został skalibrowany za pomocą światła klasycznego, wykazano że soczewka wykorzystuje nie-paraboliczną część modulacji i, co najważniejsze, w najlepszym wypadku osiągnięto 260-krotne wzmocnienie. Wykazano również, że soczewki o wyższym rzędzie Fresnela produkują wzmocnienie liniowe w rzędzie. Aby zmierzyć tak dużą kompresję pojedynczych fotonów dotychczasowe metody pomiaru były niewystarczające. Zbudowano więc układ z wnęką Fabry-Perota. Uzyskany kształt widmowy jest konwolucją Gaussa oczekiwanego dla pojedynczych fotonów i Lorentza charakterystycznego dla wnęki rezonansowej i scharakteryzowanego niezależnie. Wyliczona stąd szerokość gaussowska wskazuje w najlepszym przypadku prawie 200-krotne wzmocnienie.

Pracę podsumowuje krótkie zakończenie, w którym autor przedstawia także możliwe przyszłe badania. Następująca po nim bibliografia jest obszerna i poprawna. Prawie połowa rozprawy została poświęcona Dodatkom, które potwierdzają dużą niezależność i kreatywność autora. Opiszę po krótku tylko najważniejsze treści. Dodatek A przedstawia publikacje (wszystkie w czołowych czasopismach) i wykłady autora. W Dodatku B autor charakteryzuje używane układy radiowe poprzez własną metodę z modulatorem elektro-optycznym. Jej zaletą jest możliwość opisanie szerokopasmowego sygnału, z szerokością przekraczającą szerokość układu pomiarowego (fotodioda + oscyloskop). Podane są również krok po kroku procedury odzyskania fazy zmiennej w czasie z interferogramów. Podobnie Dodatek D zawiera szczegółowy opis układu do modyfikowania kształtu impulsów. Bardzo możliwe, że studenci optyki na świecie będą czytać te Dodatki w czasie budowania swoich układów. Zachęcam doktoranta do upublicznienia rozprawy na arXiv. Dodatek E opisuje linię opóźniającą, zaś Dodatek F szczegóły automatyzacji wielu urządzeń pomiarowych i ich synchronizacji. W Dodatku G krótko wspomniano o modelach 3D prostych elementów do wydruku, które autor umieścił na ogólnodostępnym portalu. Na końcu wspomnę o Dodatku C, który zawiera sugestie dla przyszłych studentów i pracowników laboratoriów optycznych. Niektóre nieoczywiste, jak na przykład konieczność przygotowania się na powódź.

Podsumowując uważam, że rozprawa mgr. Filipa Sośnickiego z naddatkiem spełnia formalne i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Mam nadzieję, że doktorant zwiąże swoją przyszłość z fizyką i będzie kontynuował precyzyjne i systematyczne pomiary. Recenzowana dysertacja jasno wskazuje na bardzo zdolnego doświadczalnika, który stara się dogłębnie zrozumieć budowane układy i badane zjawiska. Praca opisuje metody manipulacji widmo-czasowych klasycznego i kwantowego światła za pomocą złożonej elektro-optycznej modulacji fazy. Przedstawione wyniki wyraźnie wychodzą poza dotychczasowe ograniczenia i na pewno będą miały duży wpływ na środowisko optycznej kwantowej komunikacji. Biorąc pod uwagę jakość uzyskanych wyników, systematyczność i staranność pracy oraz bardzo szeroki zasób wiedzy i umiejętności wymagany do jej realizacji, wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

Na zakończenie chciałbym poprosić doktoranta o komentarz w czasie obrony o tym czy równanie (2.39) może posłużyć jako baza do optycznej symulacji kwantowo-mechanicznej ewolucji nierelatywistycznych cząstek z masą. Proszę zwrócić uwagę, że równanie to ma formę równania Schrödingera z zamienioną rolą zmiennej przestrzennej i czasowej. Np. czy można uzupełnić je o potencjał?

A handwritten signature in black ink, reading "Tomasz Paterek". The script is cursive and fluid, with the first letter 'T' being large and prominent.

prof. dr hab. Tomasz Paterek
Uniwersytet Gdański