

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Michał Karpiński

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- Tytuł magistra fizyki (z wyróżnieniem), rozprawa: „Splątanie w warunkach częściowej depolaryzacji”, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2006.
- Stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki (z wyróżnieniem), rozprawa: „Inżynieria korelacji kwantowych w układach optycznych”, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2012.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

2012 – 2013 specjalista naukowo-techniczny, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki.

2013 – 2016 post-doctoral research associate, Uniwersytet Oksfordzki, Wydział Fizyki, Wielka Brytania.

od 10.2015 adiunkt, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Kształtowanie jednofotonowych impulsów światła za pomocą metod optyki czasowej

4.2 Spis prac stanowiących podstawę procedury habilitacyjnej

- H1. F. Sośnicki, M. Mikołajczyk, A. Golestani, M. Karpiński, *Interface between picosecond and nanosecond quantum light pulses*, Nature Photonics **17**, 761 (2023), 22 cytowania.
- H2. A. Golestani, A. O. C. Davis, F. Sośnicki, M. Mikołajczyk, N. Treps, M. Karpiński, *Electro-optic Fourier transform chronometry of pulsed quantum light*, Physical Review Letters **129**, 123605 (2022). 6 cytowań.

- H3. M. Karpiński, A. O. C. Davis, F. Sośnicki, V. Thiel, B. J. Smith, *Control and measurement of quantum light pulses for quantum information science and technology*, Advanced Quantum Technologies **4**, 2000150 (2021). 28 cytowań.
- H4. F. Sośnicki, M. Mikołajczyk, A. Golestani, M. Karpiński, *Aperiodic electro-optic time lens for spectral manipulation of single-photon pulses*, Applied Physics Letters **116**, 234003 (2020). 12 cytowań.
- H5. F. Sośnicki, M. Karpiński, *Large-scale spectral bandwidth compression by complex electro-optic temporal phase modulation*, Optics Express **26**, 31307 (2018). 19 cytowań.
- H6. M. Karpiński, M. Jachura (równy wkład), L. J. Wright, B. J. Smith, *Bandwidth manipulation of quantum light by an electro-optic time lens*, Nature Photonics **11**, 53 (2017). 116 cytowań.
- H7. L. J. Wright, M. Karpiński, C. Söller, B. J. Smith, *Spectral shearing of quantum light pulses by electro-optic phase modulation*, Physical Review Letters **118**, 023601 (2017). 59 cytowań.

Liczby cytowań według Web of Science.

Kopie publikacji stanowią załącznik nr 5 do wniosku.

Załącznik nr 6 zawiera oświadczenia współautorów publikacji, z wyjątkiem oświadczenia M. Jachury, którego wkład podany jest w treści publikacji H6.

4.3 Omówienie osiągnięcia naukowego

4.3.1 Wprowadzenie

Koncepcja kwantów energii pola elektromagnetycznego, nazwanych później fotonami, wysunięta została ponad 120 lat temu przez Plancka w celu wyjaśnienia widma ciała doskonale czarnego. Początkowo fotony wydawały się być jedynie pomocniczą koncepcją, umożliwiającą pogodzenie wyników doświadczalnych i teoretycznych przewidywań. Jednakże, rozwój teorii elektrodynamiki kwantowej oraz pionierskie eksperymenty dotyczące m. in. antygrupowania (ang. antibunching) fotonów, potwierdziły ostatecznie istnienie fotonów jako kwantów energii pola elektromagnetycznego niezależnych od materialnego ośrodka emitującego, bądź absorbującego [Kimble77, Mandel95]. W szczególności, pozwoliły na sformułowanie koncepcji funkcji falowej fotonu [Białynicki94, Smith07].

Foton najczęściej opisywany jest jako pojedyncze wzbudzenie fali elektromagnetycznej o dobrze określonej częstotliwości. Miałby on wtedy dokładnie określoną energię, równą iloczynowi częstotliwości fali i stałej Plancka. Jednak fizycznie nie jest możliwe istnienie fotonów o dokładnie określonej energii. Wynika to z transformaty Fouriera: sygnał o dokładnie znanej częstotliwości musi być nieskończony w czasie – a foton musiał przecież zostać wyemitowany w skończenie odległej chwili. Pełniejszym opisem fotonu jest pojedyncze wzbudzenie pewnego pakietu falowego, będącego superpozycją wzbudzeń o dobrze określonych energiach [Fedorov05, H3]. Pozwala to na opis sytuacji, w której energia fotonu nie jest jednorodnie rozłożona w czasie. W szczególności, jeśli ograniczymy się do skal czasowych znacznie dłuższych niż okres rozważanych oscylacji pola elektromagnetycznego, co można sformalizować jako tzw. przybliżenie wolnozmiennnej obwiedni (ang. *slowly varying envelope approximation*) [Fedorov05], możemy mówić o jednofotonowych impulsach światła: pakietach falowych o efektywnie skończonym czasie trwania i o widmie częstotliwości o niezerowej szerokości. Będziemy tutaj rozważać jednofotonowe impulsy o częstotliwościach w zakresie optycznym, jednakże omawiane tu

koncepty mogą mieć zastosowanie także do innych zakresów częstotliwości promieniowania elektro-magnetycznego, zarówno wyższych (promienie X, gamma), jak i niższych (fotony terahercowe i mikrofalowe) [Rosenfeld20, Adams24].

Oczywiście musimy pamiętać, że jednofotonowy impuls zawiera jeden kwant energii. Stąd, mierząc czas detekcji fotonu będącego w postaci pakietu falowego o czasie trwania, np., 50 ps, otrzymamy losową wartość czasu detekcji z zakresu około 50 ps (w zależności od konkretnego kształtu obwiedni czasowej pakietu falowego). Podobnie, mierząc częstotliwość fotonu otrzymamy pewną wartość z zakresu co najmniej ok. 9 GHz (wynika to z transformaty Fouriera impulsu o szerokości czasowej 50 ps). Dopiero wielokrotne przygotowanie jednofotonowych impulsów (w ten sam sposób) oraz wielokrotne wykonanie pomiarów może pozwolić na zarejestrowanie histogramów czasów detekcji fotonów oraz zmierzonych częstotliwości (energii) fotonów.

W ostatnich latach badania jednofotonowych impulsów światła dotyczyły z jednej strony ich fundamentalnych własności, a z drugiej strony, ich zastosowań. Obejmują m. in. metody generacji i pomiaru jednofotonowych impulsów [Cooper13, P17, Ding25], zagadnienia pomiaru czasu w mechanice kwantowej [Maccone20], zagadnień dotyczących korelacji pomiędzy fotonami w czasie i energii, w tym splątania fotonów w czasowo-widmowym stopniu swobody [Davis20]. Od strony zastosowań, trwają badania nad wykorzystywaniem impulsów jednofotonowych jako nośników informacji kwantowej [Hayat12, Humphreys13, Brecht15, Reimer16, H3], umożliwiającą jej wydajne przesyłanie na duże odległości, wydajne przekazywanie niesionej informacji kwantowej do obiektów materialnych (takich jak pamięci czy procesory kwantowe) [Awschalom21, Uppu21], uzyskiwanie informacji o badanych parametrach w optymalny sposób (metrologia kwantowa) [Donohue18, Mukamel20], a także nad przetwarzaniem informacji kwantowej (m. in. obliczenia kwantowe) wyłącznie za pomocą fotonów [Madsen22, PsiQ25].

Istotnym wyzwaniem dotyczącym, m. in., wyżej wymienionych tematów badań jest możliwość modyfikacji jednofotonowych impulsów światła, na przykład poprzez zmianę ich czasu trwania, centralnej długości fali, szerokości widmowej, czy profilu czasowo-widmowego pakietu falowego [Kimble08, Wallquist09]. Badania prowadzone do okresu formułowania przez mnie założeń niniejszego projektu habilitacyjnego w latach 2013-2015, skupiały się na rozwoju źródeł pojedynczych fotonów o określonych własnościach czasowo-widmowych [Mosley08, Takeuchi14] oraz na konwersji częstotliwości pojedynczych fotonów (ang. *quantum frequency conversion*) [Huang92, Zaske12]. W ramach projektu habilitacyjnego, skupiłem się na badaniu i rozwoju metod modyfikacji jednofotonowych pakietów falowych po ich wytworzeniu, niezależnie od ich źródła.

Wcześniejsze badania w tym zakresie były bardzo ograniczone: obejmowały, z jednej strony prace doświadczalne wykorzystujące skomplikowane doświadczalnie metody na bazie optyki nieliniowej [Lavoie13, Donohue14], z drugiej strony pojedyncze prace dotyczące elektro-optycznej modyfikacji widma pojedynczych fotonów [Rakher11, Oslager12], w szczególności za pomocą modulacji amplitudowej [Kolchin08]. Ja zidentyfikowałem zbiór metod, rozwijany i wykorzystywany do tego czasu doświadczalnie wyłącznie w kontekście optyki klasycznej, który umożliwia systematyczne podejście do doświadczalnego kształtowania jednofotonowych impulsów światła: podejście wykorzystujące metody optyki czasowej (ang. *temporal optics*) [Torres11, H3]. Ponadto, umożliwia poprawę rozdzielczości czasowej i widmowej pomiarów widma i profilu czasowego jednofotonowych impulsów światła.

Wyzwanie to obrazuje podany wcześniej przykład impulsu o czasie trwania 50 ps: jest to czas trwania niewiele dłuższy niż rozdzielczość czasowa najlepszych wydajnych detektorów pojedynczych fotonów (ok. 10 ps), natomiast jego szerokość widmowa – 9 GHz – jest porównywalna z rozdzielczością najlepszych spektrometrów optycznych umożliwiających wielokanałową detekcję (2–10 GHz, w zależności od zakresu widmowego). Zebranie przynajmniej 10 punktów doświadczalnych w czasie i częstotliwości za pomocą bezpośredniego pomiaru stanowi wyzwanie doświadczalne. Metody optyki czasowej, takie jak mapowanie czas-częstotliwość czy obrazowanie czasowe, mogą pomóc przezwyciężyć te ograniczenia [Torres11, Salem13, H3].

Przed opisaniem cyklu publikacji przedstawię krótko, czym jest optyka czasowa. Opiera się ona na analogii matematycznego opisu dyfrakcyjnej propagacji światła w przestrzeni oraz dyspersyjnej propagacji krótkich impulsów światła w dyspersyjnych ośrodkach dielektrycznych [Kolner94]. Rozpocznę od przedstawienia analogii pomiędzy soczewką przestrzenną o soczewką czasową.

Soczewka czasowa jest czasowo-widmowym analogiem tradycyjnej soczewki optycznej, którą tu będziemy nazywać „soczewką przestrzenną”. Z punktu widzenia optyki fourierowskiej [Goodman] obrazowanie za pomocą cienkiej soczewki przestrzennej (w przybliżeniu przyosiowym) odbywa się w wyniku poddawania fali emitowanej przez obiekt odpowiednim zmianom fazy w komplementarnych stopniach swobody. Fala emitowana przez świecący obiekt w wyniku dyfrakcyjnej propagacji w kierunku soczewki uzyskuje fazę, która zależy kwadratowo od poprzecznej składowej wektora falowego k_T (dla uproszczenia ograniczamy się tutaj do jednego wymiaru poprzecznego), co opisuje równanie Fresnela-Kirchhoffa. W wyniku propagacji przez soczewkę fala doznaje przesunięcia fazowego, które kwadratowo zależy od współrzędnej poprzecznej. Następnie podczas dyfrakcyjnej propagacji w kierunku płaszczyzny obrazowej fala znów doznaje przesunięcia fazowego zależnego kwadratowo od k_T . Gdy wartości owych trzech kwadratowozmiennych przesunięć fazowych odpowiadają spełnieniu warunku obrazowania, w płaszczyźnie obrazowej uzyskujemy przeskalowany obraz świecącego obiektu, przy czym powiększenie obrazu określone jest przez stosunek fazy zależnej kwadratowo od k_T nagromadzonej przez falę podczas dyfrakcyjnej propagacji przed i za soczewką (lub innymi słowy stosunkowi odległości pomiędzy płaszczyzną obrazową i przedmiotową a soczewką).

Postać matematyczna równania Helmholtza, opisującego przestrzenne własności fali świetlnej w przybliżeniu przyosiowym, i równania opisującego propagację impulsu światła w ośrodkach dyspersyjnych w przybliżeniu wolnozmiennnej obwiedni impulsu jest jednakowa:

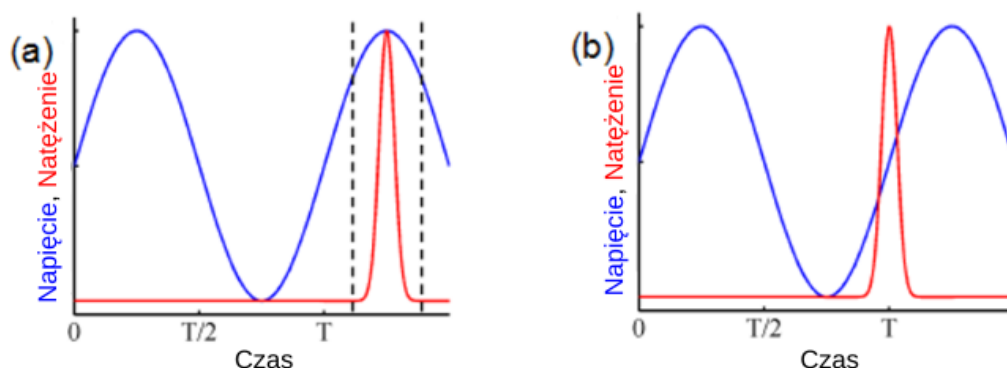
$$\frac{\partial A_s(x, z)}{\partial z} = -\frac{i}{2k} \frac{\partial^2 A_s(x, z)}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial A_t(\tau, z)}{\partial z} = \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_t(\tau, z)}{\partial \tau^2},$$

gdzie A_s to zależna od położenia amplituda wiązki ulegającej dyfrakcji, z to położenie w kierunku propagacji, x to położenie w kierunku poprzecznym, k to długość wektora falowego, A_t – zależna od czasu amplituda pola elektrycznego, β_2 – dyspersja prędkości grupowej, a τ to czas (w układzie odniesienia związanym z impulsem).

W związku z tym, możliwe jest zastąpienie w powyższym wywodzie poprzecznej składowej położenia przez zmienną czasową, a składowej poprzecznej wektora falowego (będącej transformatą Fouriera składowej porzecznej położenia), przez częstotliwość fali optycznej.

W pełnej analogii do soczewki przestrzennej można zrealizować obrazowanie czasowe profilu impulsu światła za pomocą soczewki czasowej, przez poddanie go fazie zależnej kwadratowo od częstotliwości, zależnej kwadratowo od czasu i ponownie zależnej kwadratowo od częstotliwości. Przy odpowiednim doborze proporcji tych kwadratowozmiennych faz można uzyskać pomniejszony lub powiększony „obraz” czasowego profilu impulsu [Kolner89, Foster11].

Ośrodkiem pozwalającym poddać impuls fazie zależnej kwadratowo od częstości jest zwykły ośrodek dyspersyjny – pożądana faza uzyskiwana jest w wyniku dyspersji prędkości grupowej ośrodka. Trudniejszym zagadnieniem jest realizacja samej soczewki czasowej, tj. urządzenia poddającego impuls fazie kwadratowo zależnej od czasu. W przypadku soczewek czasowych dla impulsów światła o dużym natężeniu stosuje się w tym celu optyczne oddziaływania nieliniowe z silnym impulsem pompującym o liniowo zmiennej w czasie częstotliwości (tzn. impulsem ze świergotem, ang. *chirped pulse*) [Foster11]. Jednakże, zastosowanie metod wykorzystujących silne wiązki pompujące w optyce kwantowej jest znacznie utrudnione, ze względu na trudność w jednoczesnym osiągnięciu wysokiego prawdopodobieństwa zajścia oddziaływania nieliniowego w przypadku sygnałów jednofotonowych oraz eliminacji tła fotonów pochodzących od silnej wiązki pompującej.



Rys. 1. Natężenie krótkiego impulsu światła (czerwony, jednostki umowne) na tle sinusoidalnie zmiennego napięcia (niebieski, jednostki umowne), indukującego proporcjonalną do napięcia zmianę współczynnika załamania w ośrodku elektrooptycznym. (a) Impuls podlega fazie kwadratowo zmiennej w czasie. (b) Impuls doznaje fazy liniowo zmiennej w czasie. Względna czasowa orientacja impulsu i napięcia jak w (a) odpowiada realizacji soczewki czasowej; układ jak w (b) realizuje „pryzmat czasowy”. Linie przerywane oznaczają aperturę soczewki czasowej: zakres zmienności fazy, który może być przybliżony parabolą.

Do realizacji soczewki czasowej bez wykorzystania silnych wiązek pompujących, tj. bez wykorzystania nieliniowości optycznych, użyty może zostać efekt elektrooptyczny (efekt Pockelsa). W wyniku przyłożenia napięcia do materiału wykazującego własności elektrooptyczne, w materiale tym indukowana jest zmiana współczynnika załamania proporcjonalna do napięcia. W przypadku napięcia zmiennego w czasie, otrzymuje się zmienną w czasie fazę uzyskiwaną przez impuls światła propagujący się przez ośrodek. Efekt ten może być wykorzystany do uzyskania fazy kwadratowo zależnej od czasu, czyli soczewki czasowej, tak jak przedstawiono na rys. 1 [Kolner89, Zhang13]. W tym przypadku realizacja soczewki czasowej jest deterministyczna i odbywa się bez użycia silnych pól optycznych, co czyni ją niezwykle atrakcyjną z punktu widzenia zastosowań w optyce kwantowej.

Przedstawiony cykl publikacji pn. „Kształtowanie jednofotonowych impulsów światła za pomocą metod optyki czasowej” obejmuje badania koncepcyjne oraz doświadczalne, których celem była weryfikacja możliwości wykorzystania metod optyki czasowej do realizacji przekształceń jednofotonowych impulsów światła oraz weryfikacja ich potencjału w kontekście zastosowań w zakresie optycznych technologii kwantowych.

W momencie rozpoczęcia pracy nad niniejszym cyklem publikacji opublikowane były jedynie nieliczne prace dotyczące wykorzystania metod optyki czasowej, takich jak pryzmaty czy soczewki czasowe, do badania zagadnień dotyczących optyki kwantowej. W pracach [Lavoie13, Donohue13, Donohue14] wykorzystano realizację soczewki czasowej za pomocą optycznego mieszania częstotliwości z wiązką pompującą ze świergotem. Należy zaznaczyć, że wyniki przedstawione w pracach [Lavoie13, Donohue13] nie zostały przedstawione w kontekście metod optyki czasowej, pomimo ich wykorzystywania [Salem13]. Analogicznie, w pracy [Agha14] zaproponowano zmianę szerokości widmowej pojedynczych fotonów za pomocą mieszania trzech fal z pompą ze świergotem, czyli za pomocą nieliniowej soczewki czasowej, bez odniesienia do literatury dotyczącej optyki czasowej. W pracy [Matsuda16] przedstawiono doświadczalne wyniki modyfikacji widma pojedynczych fotonów wykorzystując modulację fazy w czasie za pomocą efektów nieliniowych wykorzystujących optyczny efekt Kerra. Przed rokiem 2014 jedyne znane mi odniesienia do wykorzystania metod optyki czasowej w optyce kwantowej znajdowały się następujących pracach: w pracy [Zhu13] zawarta jest dyskusja teoretyczna kształtowania widmowego jednofotonowych impulsów światła za pomocą dwóch nieliniowych soczewek czasowych, wraz z doświadczalną implementacją za pomocą światła klasycznego o niewielkim natężeniu wraz z detekcją pojedynczych fotonów. Ponadto w pracy [Nunn13] przedstawiona jest teoretyczna koncepcja wykorzystania poprawy rozdzielczości detekcji fotonów w czasie za pomocą konwertera czas-częstotliwość opartego na elektro-optycznej parabolicznej modulacji fazy w nowym protokole kwantowej dystrybucji klucza kryptograficznego opartego na kodowaniu wielowymiarowym w czasie i częstotliwości. W pracy [Tsang06] przedstawiono koncepcję modyfikacji stanu kwantowego par fotonów splątanych w czasie przy wykorzystaniu obrazowania czasowego za pomocą elektro-optycznych soczewek czasowych. Wyniki te ujęte zostały w pracy przeglądowej [Torres11].

Podsumowując, w momencie rozpoczęcia pracy nad cyklem publikacji znane były prace pojedyncze prace doświadczalne dotyczące modyfikacji szerokości widmowej pojedynczych fotonów za pomocą metod nieliniowych oraz pojedyncze prace teoretyczne proponujące wykorzystanie metod optyki czasowej opartych na modulacji elektrooptycznej do kształtowania czasowo-widmowego impulsów światła w kontekście optyki kwantowej.

4.3.2 *Cykl publikacji*

W ramach cyklu publikacji ująłem prace dotyczące elektro-optycznego przesunięcia widmowego jednofotonowych impulsów światła (prace H7 oraz H2) oraz dotycząca modyfikacji szerokości widmowej pojedynczych fotonów (prace H6, H5, H4 i H1). W pracy H3 przedstawiony został przegląd oraz analiza zastosowań metod optyki czasowej w kontekście optyki i fotoniki kwantowej.

Badania doświadczalne ujęte w publikacjach H6 i H7 zrealizowane zostały w laboratoriach Wydziału Fizyki Uniwersytetu Oksfordzkiego w grupie badawczej prof. Briana Smitha. Dotyczyły one fotonów o centralnej długości fali w zakresie bliskiej podczerwieni, około 830 nm. Pozostałe publikacje dotyczą fotonów z telekomunikacyjnego zakresu długości

fali (około 1560 nm). Prace doświadczalne będące podstawą prac H1, H2, H4 zostały wykonane w utworzonej i kierowanej przeze mnie grupie badawczej Laboratorium Fotoniki Kwantowej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Należy podkreślić, że, chociaż podstawy teoretyczne tych dwóch grup prac są zbliżone, ich realizacja doświadczalna jest znacząco różna, ze względu na różne techniki detekcji światła oraz znacznie różną dostępność elementów światłowodowych w tych dwóch zakresach widmowych.

W sekcji 4.2 uszeregowałem publikacje tworzące cykl chronologicznie, poczynając od najnowszej. Tutaj przedstawię publikacje w kolejności wynikającej z powiązań pomiędzy nimi, poczynając od najstarszej. W kilku przypadkach kolejność ta nie jest chronologiczna.

Elektrooptyczne przesunięcie widmowe fotonów – pryzmat czasowy

(2 prace)

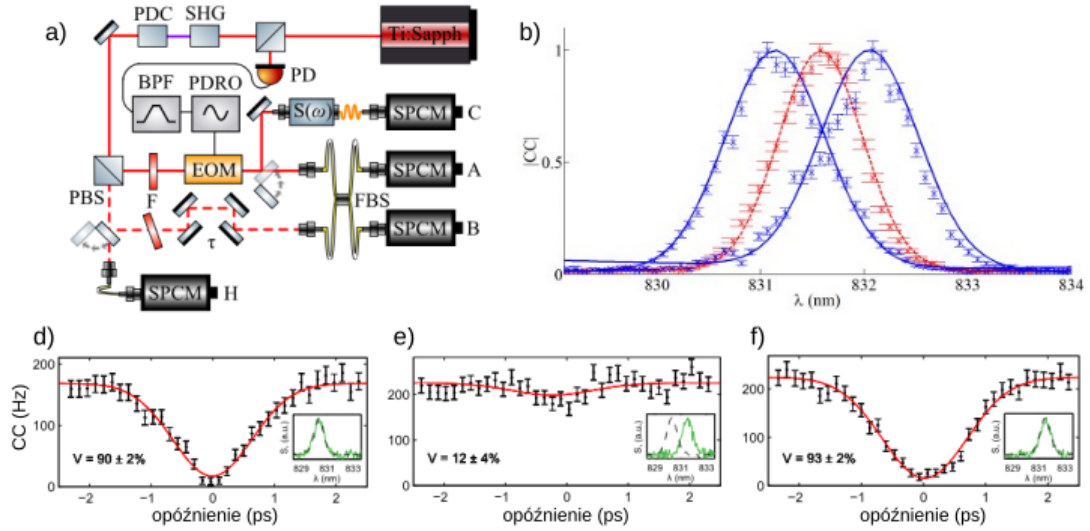
[H7] L. J. Wright, M. Karpiński, C. Söller, B. J. Smith, *Spectral shearing of quantum light pulses by electro-optic phase modulation*, Physical Review Letters **118**, 023601 (2017).

Praca przedstawia doświadczalną realizację deterministycznego i przestrajalnego w sposób ciągły przesunięcia widma pojedynczych fotonów. Jednofotonowe ultrakrótkie impulsy światła wytwarzane były za pomocą techniki ogłaszanych (sygnałizowanych) pojedynczych fotonów (ang. *heralded single photons*), poprzez detekcję jednego fotonu z pary fotonów generowanych w procesie nieliniowym spontanicznego parametrycznego podziału częstości. Dzięki wykorzystaniu źródła par fotonów zapewniającego odpowiednio symetryczne łączne widmo fotonów, ogłaszane fotony miały postać spójnego pakietu falowego o czasie trwania około 1 ps (były w stanie czystym) [Mosley08]. Fotony przesyłane były przez elektro-optyczny modulator fazy sterowany zsynchronizowanym z impulsami optycznymi sinusoidalnym mikrofalowym sygnałem elektrycznym o częstotliwości 40 GHz i mocy powyżej 2 W, co odpowiada amplitudzie ± 15 V dla impedancji 50 Ω .

Poprzez elektro-optyczny efekt Pockelsa w połączeniu z działaniem modulatora w trybie dopasowanej fazowo fali biegnącej (synchronizacja propagacji impulsu optycznego i sygnału mikrofalowego podczas propagacji wzdłuż modulatora), pole elektryczne przyłożone do elektrod modulatora skutkowało zmianą efektywnego współczynnika załamania proporcjonalną do przyłożonego napięcia.

Synchronizacja jednofotonowych impulsów z odpowiednio rosnącym lub malejącym zboczem sinusoidalnego sygnału elektrycznego skutkowałą przesunięciem widma jednofotonowych pakietów falowych. Efekt ten jest realizacją najprostszego schematu optyki czasowej: pryzmatu czasowego. Jest on analogią pryzmatu przestrzennego: pryzmat przestrzenny wprowadza drogę optyczną liniowo rosnącą wraz z położeniem w kierunku poprzecznym do kierunku propagacji wiązki światła. Efektem jest zmiana kierunku propagacji, czyli przesunięcie widma przestrzennego o stałą wartość (zależną od kąta łamiącego i materiału pryzmatu). W przypadku czasowo-widmowym, liniowo zmienna faza w czasie skutkuje przesunięciem widma sygnału. Można efekt ten rozumieć też czysto w kontekście własności transformaty Fouriera: jeśli sygnał $\psi(t)$ ma transformatę Fouriera (amplitudę widmową) $\tilde{\psi}(\omega)$, to transformatą Fouriera sygnału pomnożonego przez liniowo

zmienną fazę, $\psi(t)e^{i\Omega t}$, będzie $\tilde{\psi}(\omega - \Omega)$: sygnał przesunięty widmowo.



Rys. 2. a) Schemat układu doświadczalnego wykorzystanego w pracy H7. Impulsy femtosekundowe o centralnej długości fali 830 nm i częstotliwości powtarzania 80 MHz wytwarzane przez oscylator tytanowo-szafirowy (Ti:Sapph) kierowane są do kryształu drugiej harmonicznej (SHG). Wiązka drugiej harmonicznej (415 nm) pompuje proces spontanicznego parametrycznego podziału częstotliwości w kryształ KDP (PDC). Powstające w kryształ zdegenerowane w częstotliwości pary prostopadle spolaryzowanych fotonów rozdzielane są na kostce polaryzującej (PBS). Widmo jednego z powstających fotonów jest szersze niż drugiego fotonu. W przypadku przesunięcia widmowego ogłaszanych fotonów jeden z fotonów pary jest kierowany do detektora pojedynczych fotonów (SPCM H), natomiast drugi, po przejściu przez filtr widmowy (usuwiający wiązkę pompującą) wprowadzany jest światłowodem do elektro-optycznego modulatora fazy (EOM, użyteczne pasmo 40 GHz). Modulator sterowany jest wzmacnionym sinusoidalnym sygnałem elektrycznym o częstotliwości 40 GHz, wytwarzanym przez generator sterowany napięciem przywiązany fazowo do sygnału referencyjnego pochodzącego z fotodiody (PD) wykrywającej impulsy pochodzące z wiązki lasera Ti:Sapph, poddanego filtrowaniu za pomocą wąskopasmowego filtra mikrofalowego (BPF). Poprzez regulację fazy sygnału mikrofalowego uzyskiwane jest przekrycie w czasie impulsów jednofotonowych z liniową częścią sinusoidalnego sygnału mikrofalowego, jak na rys. 1(b). Monochromator $S(\omega)$ wraz z detektorem pojedynczych fotonów (SPCM C) umożliwiają pomiar widma, w koincydencji z detekcją fotonu na detektorze SPCM H. Zmierzone w trybie koincydencji (CC) widma przedstawione są w panelu (b). Czerwony: modulacja fazy wyłączona; niebieski: modulacja fazy włączona, synchronizacja jak na rys. 1(b) oraz przesunięta o pół okresu sygnału mikrofalowego. Widoczne dodatnie i ujemne przesunięcie widmowe. W panelach (d), (e), (f) przedstawione są wyniki pomiarów interferencji Hong-Ou-Mandla fotonów przechodzących przez modulator i fotonów referencyjnych. Widma interferowanych fotonów przedstawione są w ramkach (fotony przechodzące przez modulator – kolor czarny; fotony referencyjne – kolor zielony). W celu wykonanie pomiarów interferencji Hong-Ou-Mandla drugi foton za kostką PBS kierowano przez strojony filtr widmowy F oraz linię opóźniającą τ do światłowodowego elementu częściowo przepuszczalnego

(FBS). Do drugiego wejścia FBS kierowano fotony przechodzące przez modulator. Wyjścia FBS podłączone były do dwóch detektorów pojedynczych fotonów, SPCM A, B; rejestrowano koincydencje z dwóch liczników fotonów. W panelu (d) przedstawiono liczby koincydencji w zależności od opóźnienia dla wyłączanej modulacji elektrooptycznej oraz dla dopasowanego widma fotonu referencyjnego. W panelu (e) przedstawiono wyniki pomiarów po włączeniu modulacji elektro-optycznej: widmo fotonów sygnałowych zostaje przesunięte, przez co widzialność interferencji spada. Po dostrojeniu widma fotonu referencyjnego przez obrót filtra widmowego F uzyskuje się ponownie wysoką widzialność interferencji (f).

Widma fotonów poddawanych przesunięciom w kierunku mniejszych i większych długości fali były mierzone poprzez skanowanie wyjścia spektrometru siatkowego za pomocą detektora pojedynczych fotonów działającego w koincydencji z detektorem fotonów obwieszających. Histogramy zliczeń fotonów dla poszczególnych położenia poprzecznych detektora, odpowiadających różnym długościom fali, pozwalały zmierzyć widmo pojedynczych fotonów. Zaobserwowano wyraźne przesunięcie widmowe o ok. 0,5 nm w każdym kierunku.

Ponadto zweryfikowano nieklasyczość i spójność jednofotonowych impulsów światła poddanych przesunięciu widmowemu za pomocą elektrooptycznego pryzmatu czasowego. Wykonano pomiary dwufotonowej interferencji Hong-Ou-Mandla pomiędzy fotonami referencyjnymi (nie poddawany działaniu pryzmatu czasowego) i fotonami poddawany elektro-optycznej modulacji fazy (czyli działaniu pryzmatu czasowego). Pokazano, że dzięki przesunięciu widmowemu możliwe było zwiększenie widzialności interferencji dwufotonowej z ok. 10% (dla niedopasowanych centralnych długości fali) do 90% (poprzez dopasowanie centralnej długości fali fotonu modulowanego do centralnej długości fali referencji). Eksperyment ten potwierdził, że pryzmat czasowy zachowuje spójność przesuwanych widmowo pakietów falowych oraz że nie wprowadza szumu amplitudowego, co umożliwia nieklasyczną interferencję fotonów poddanych działaniu pryzmatu czasowego. Efekt pryzmatu czasowego ma zastosowanie w dostrajaniu centralnej długości fali jednofotonowych pakietów falowych, na przykład emitowanych z kropek kwantowych [P30].

Początkowa koncepcja pracy nie była sformułowana w kontekście optyki czasowej. W trakcie pracy nad tą publikacją zidentyfikowałem po raz pierwszy możliwość użycia opisu optyki czasowej, m. in. poprzez koncepcję pryzmatu czasowego. Początkowe badania prowadzone przez mnie w ramach tej pracy stały się jednym z głównych impulsów do sformułowania celu niniejszego cyklu publikacji.

Wkład habilitanta: *przebudowałem i udoskonaliłem elementy układu doświadczalnego: źródło par fotonów, pomiar widma fotonów. Wraz z doktorantką uruchamiałem układ zsynchronizowanej modulacji elektro-optycznej oraz testowałem jego działanie. Zaproponowałem wykonanie części eksperymentu dotyczącej interferencji dwufotonowej i opracowałem sposób jego implementacji w ramach dostępnych parametrów doświadczalnych. Nadzorowałem zbieranie ostatecznych danych doświadczalnych. Wniosłem wkład w spisanie tekstu publikacji i w przygotowanie rysunków i wykresów.*

[H2] A. Golestani, A. O. C. Davis, F. Sośnicki, M. Mikołajczyk, N. Treps, M. Karpiński, *Electro-optic Fourier transform chronometry of pulsed quantum light*, Physical Review Letters **129**, 123605 (2022).

W pracy przedstawiono i doświadczalnie zrealizowano nową metodę charakteryzacji obwiedni czasowej krótkich impulsów światła, o czasie trwania krótszym niż rozdzielczość czasowa dostępnych detektorów. Przedstawione zostało działanie metody dla światła klasycznego oraz dla ogłaszanych pojedynczych fotonów.

Metoda chronometrii fourierowskiej opiera się na zasadzie zbliżonej do spektrometrii fourierowskiej, jednakże z odwróconą rolą czasu i częstotliwości. W spektrometrii fourierowskiej rejestrowane jest natężenie światła na wyjściu z interferometru w zależności od opóźnienia czasowego pomiędzy ramionami interferometru. Transformata Fouriera tego sygnału pozwala na pomiar widma, dzięki wykorzystaniu twierdzenia Wienera-Chinczyna. W chronometrii fourierowskiej również mierzone jest natężenie (lub liczba fotonów) na wyjściu z interferometru, jednakże tym razem zmieniane jest przesunięcie widmowe pomiędzy ramionami interferometru. Pozwala to zarejestrować natężenie na wyjściu w funkcji przesunięcia widmowego. Odwrotna transformata Fouriera pozwala odzyskać profil czasowy impulsu. W eksperymencie przestrajalne przesunięcie widmowe zostało zrealizowane za pomocą elektro-optycznego pryzmatu czasowego – analogicznie do pracy H7, jednak tutaj na innej długości fali – ok. 1560 nm. Zmierzone zostało zwiększenie czasu trwania impulsu podczas propagacji w ośrodku z dyspersją prędkości grupowej). Technika może znaleźć zastosowania do charakteryzacji krótkich impulsów światła w sytuacjach, gdy pomiar widma (niezbędny dla standardowych technik, takich jak FROG lub SPIDER) jest niemożliwy, ze względu na nietypowy zakres widmowy lub niski poziom sygnału.

Wkład habilitanta: *Wniosłem wiodący wkład do części doświadczalnej pracy oraz do spisania publikacji. Zidentyfikowałem zakres parametrów doświadczalnych pozwalających na realizację eksperymentu, zaprojektowałem układ doświadczalny na podstawie teoretycznej propozycji partnerów zagranicznych. Sprawowałem nadzór nad wykonaniem eksperymentu oraz analizą danych doświadczalnych. Spisałem istotną część tekstu publikacji.*

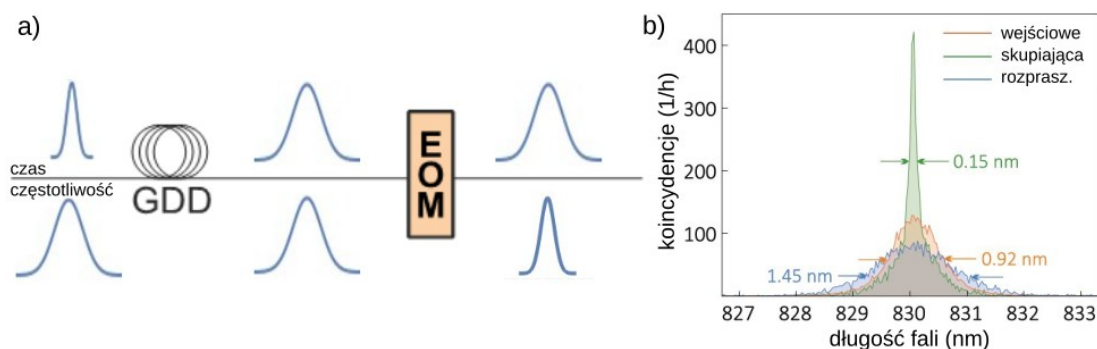
Modyfikacja szerokości widmowej fotonów za pomocą soczewek czasowych

(4 prace)

[H6] M. Karpiński, M. Jachura (równy wkład), L. J. Wright, B. J. Smith, *Bandwidth manipulation of quantum light by an electro-optic time lens*, Nature Photonics **11**, 53 (2017).

W pracy H6 zrealizowany został doświadczalnie układ wykorzystujący soczewkę czasową. Jest to układ analogiczny do układu przestrzennego kolimującego wiązkę gaussowską. Wiązka gaussowska o niewielkim przewężeniu (czyli dużej rozbieżności, a więc o szerokim widmie przestrzennym) może zostać skolimowana poprzez propagację na dystansie d oraz użycie soczewki o odpowiedniej ogniskowej (o wartości bliskiej d).

Odpowiada to nałożeniu fazy kwadratowej w widmie przestrzennym (propagacja) i fazy kwadratowej w położeniu poprzecznym (soczewka). Efektem działania układu jest poszerzenie poprzeczne wiązki wraz z zawężeniem widma przestrzennego (zmniejszony kąt rozbieżności). Analogiem czasowo-widmowym tego układu jest układ łączący propagację w ośrodku z dyspersją prędkości grupowej (odpowiednik dyfrakcyjnej propagacji w przestrzeni) oraz układ soczewki czasowej, wprowadzający kwadratowoźmienną fazę w czasie, por. rys. 1(a). Efektem działania układu na krótki impuls światła o szerokim widmie jest jego rozciągnięcie w czasie (w wyniku propagacji w ośrodku dyspersyjnym) i zawężenie widma (w wyniku działania soczewki czasowej, której działanie można rozumieć jako wprowadzanie zależnego od czasu przesunięcia



widmowego).

Rys. 3. (a) Koncepcja kompresji szerokości widmowej: krótki impuls o szerokim widmie ulega poszerzeniu w czasie w wyniku propagacji w ośrodku z dyspersją opóźnienia grupowego (GDD), uzyskując jednocześnie świergot (ang. *chirp*). Następnie, w wyniku działania elektrooptycznej soczewki czasowej, realizowanej przez zsynchronizowanie impulsu optycznego z paraboliczną modulacją fazy za pomocą elektro-optycznego modulatora fazy (EOM), por. rys. 1(a), następuje zawężenie widma impulsu. Obwiednia czasowa pozostaje bez zmian na tym etapie. (b) Wyniki pomiarów widma ogłaszanych pojedynczych fotonów: widmo bez modulacji elektrooptycznej (pomarańczowy), dla skupiającej soczewki czasowej – kompresja widmowa (zielony), dla rozpraszającej soczewki czasowej – poszerzenie widmowe (niebieski). Podano szerokości połówek.

Układ doświadczalny wykorzystywał źródło ogłaszanych fotonów opisane w pracy H7. Jednofotonowe pakiety falowe były wprowadzane do jednomodowego włókna optycznego o długości ok. 250 m, w którym impulsy były rozciągane w czasie i uzyskiwały świergot (*chirp*). Soczewka czasowa realizowana była elektrooptycznie, poprzez synchronizację impulsów optycznych z maksimum bądź minimum sinusoidalnej modulacji fazy: w ekstremum przebieg fazy w czasie jest w przybliżeniu paraboliczny. Poprzez dobranie odpowiedniej długości światłowodu do amplitudy czasowej modulacji fazy (tzw. warunek kolimacji) możliwa była realizacja zawężenia widma sygnału optycznego wraz z wydłużeniem czasu trwania impulsu. Detekcja fotonów z rozdzielczością widmową realizowana była za pomocą techniki tzw. dyspersyjnej transformaty Fouriera, przy wykorzystaniu światłowodowych siatek Bragga ze zmiennym okresem (ang. *chirped fiber Bragg gratings*). Szczegółowy opis techniki dostępny jest w pracy [P13]. Wyzwaniem doświadczalnym było zapewnienie odpowiedniej stabilności czasowej synchronizacji sygnałów optycznych jednofotonowych i sinusoidalnego sygnału napięciowego.

Wymagania dotyczące stabilności czasowej oraz mocy sygnału elektrycznego doprowadziły do podjęcia decyzji o realizacji soczewki czasowej za pomocą sygnału elektrycznego o częstotliwości 10 GHz. Zebrano dane doświadczalne potwierdzające zawężenie widma poprzez przesunięcie skrajnych składowych widmowych ku środkowym częstotliwościom, por. rys. 3. Ponadto wykonano test filtra: porównano strumień fotonów ze źródła przechodzących przez wąski filtr widmowy (zrealizowany za pomocą monochromatora) bez użycia układu kolimatora czasowego oraz strumień fotonów przechodzących przez kolimator widmowy i jednakowo ustawiony filtr widmowy. Wykazano ponad dwukrotny wzrost strumienia fotonów w drugim przypadku, co potwierdziło potencjalną praktyczną użyteczność układu do wydajnego modyfikowania szerokości widmowych, w szczególności w kontekście hybrydowych sieci kwantowych. W momencie publikacji była to pierwsza realizacja układu zmniejszania szerokości widmowej, który był wydajniejszy niż zastosowanie zwykłego filtrowania widmowego.

Wkład habilitanta: *Miałem wiodący wkład do pracy na każdym etapie jej powstawania: zaproponowałem użycie technik optyki czasowej do realizacji zagadnienia modyfikacji szerokości widmowej oraz zaproponowałem wykorzystanie testu filtra do bezpośredniej weryfikacji wydajności metody. Zaprojektowałem układ doświadczalny, w szczególności rozpoznałem konieczność zmniejszenia częstotliwości sygnału elektrycznego do 10 GHz. Zgromadziłem wszystkie niezbędne komponenty do realizacji układu doświadczalnego. Kalibrację układu, zbieranie danych doświadczalnych oraz ich analizę przeprowadziłem wspólnie z M. Jachurą. Spisałem większość tekstu publikacji oraz wniosłem istotny wkład do trudnego procesu recenzji pracy.*

Ponadto, byłem pomysłodawcą wykorzystania siatek Bragga o zmiennym okresie do realizacji dyspersyjnej transformaty Fouriera na długości fali 830 nm ze zliczaniem pojedynczych fotonów, wykorzystanej w pracy H6, a opisanej w pracy [P13].

[H4] F. Sośnicki, M. Mikołajczyk, A. Golestani, M. Karpiński, *Aperiodic electro-optic time lens for spectral manipulation of single-photon pulses*, Applied Physics Letters **116**, 234003 (2020).

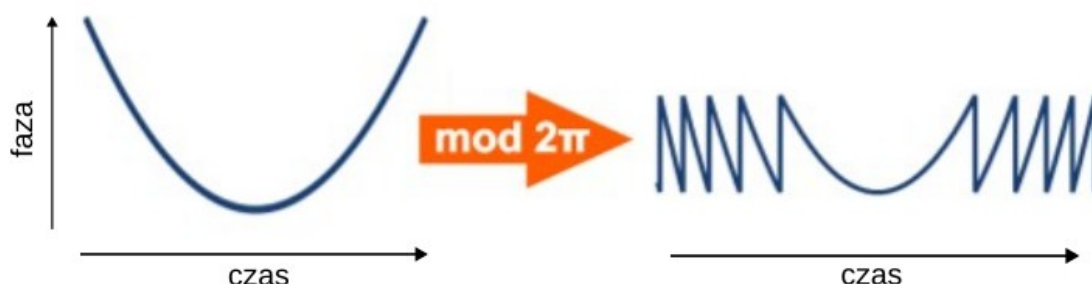
Praca przedstawia doświadczalną realizację elektro-optycznej soczewki czasowej działającej w trybie aperiodycznym. Opisana w pracy H6 paraboliczna modulacja fazy realizowana jest poprzez przybliżenie jej w okolicach maksimum bądź minimum sinusoidalnego sygnału elektrycznego sterującego modulatorem. Ogranicza to możliwość zastosowania soczewki czasowej wyłącznie do serii impulsów, które zsynchronizowane są z maksimami bądź minimami sygnału sterującego. W pracy H4 zaproponowałem schemat, w którym elektro-optyczna soczewka czasowa przybliżana jest przez maksimum impulsowej odpowiedzi szybkiej fotodiody. W tym układzie modulator elektro-optyczny sterowany jest wzmocnionym sygnałem elektrycznym z fotodiody, na którą kierowane są ultrakrótkie (sub-pikosekundowe) impulsy światła. Pozwala to na zniesienie ograniczenia na odstęp czasowy pomiędzy impulsami optycznymi poddawany działaniu soczewki czasowej wynikającemu z periodycznego charakteru elektrycznych sygnałów sinusoidalnych. Ponadto układ ten charakteryzuje się bardzo dobrą stabilnością czasową, gdyż pozwala uniknąć trudnego zadania synchronizacji generatora elektrycznego do ciągu impulsów lasera impulsowego. W pracy H4 sygnał elektryczny generowany jest bezpośrednio z impulsów laserowych. Pozwoliło to na uzyskanie długoczasowej stabilności bez konieczności aktywnej synchronizacji. W układzie aperiodycznej soczewki

czasowej poprzedzonej ośrodkiem dyspersyjnym (1,2 km światłowodu SMF-28) zrealizowana została kompresja widmowa klasycznych impulsów optycznych oraz ogłaszanych pojedynczych fotonów. Praca opublikowana została w Applied Physics Letters i została wyróżniona jako najciekawsza praca w ramach wydania czasopisma.

Wkład habilitanta: *Mój wkład do pracy obejmuje pomysł, projekt układu doświadczalnego (w tym źródła par fotonów), nadzór nad konstrukcją układu doświadczalnego (w tym źródła par fotonów), wykonaniem eksperymentu i analizą danych oraz wiodący udział w spisaniu publikacji.*

[H5] F. Sośnicki, M. Karpiński, *Large-scale spectral bandwidth compression by complex electro-optic temporal phase modulation*, Opt. Express **26**, 31307 (2018).

Paraboliczna elektrooptyczna soczewka czasowa pozwala na realizację modyfikacji szerokości widmowej jedynie w ograniczonym zakresie – o czynnik od 10 do maksymalnie 20. Wynika to z ograniczonej amplitudy parabolicznej modulacji fazy: sygnał paraboliczny rośnie, z definicji, kwadratowo w czasie, szybko napotykając na ograniczenie w postaci maksymalnego pola elektrycznego, a więc maksymalnego napięcia na modulatorze. Ograniczenie wynika to m. in. z napięcia przebicia (jonizacji) materiałów modulatora. Sposobem, pozwalającym uniknąć ograniczenia wynikającego z amplitudy modulacji jest wykorzystanie faktu, że faza jest istotna z dokładnością do jednego okresu: 2π , lub do jego całkowitej wielokrotności, por. rys. 4. W przypadku przestrzennym koncepcję tę wykorzystuje dobrze znana soczewka Fresnela.



Rys. 4. Koncepcja soczewki czasowej Fresnela: paraboliczna faza w czasie o zbyt dużej wartości (lewa strona rysunku) może być zastąpiona przez fazę „zawijaną” po osiągnięciu wartości 2π (prawa strona rysunku).

W pracy H5 za pomocą symulacji numerycznych zbadana została możliwość realizacji przekształceń szerokości widmowych i czasów trwania pojedynczych fotonów o kilka rzędów wielkości za pomocą układu wykorzystującego soczewkę czasową Fresnela. W szczególności zbadana została możliwość konwersji pomiędzy szerokościami widmowymi charakterystycznymi dla impulsów niosących informację w światłowodowej telekomunikacji optycznej, tj. ok. 100 GHz, a szerokościami widmowymi rzędu 100 MHz, zbliżonymi do szerokości linii absorpcyjnych układów wykorzystujących atomy lub jony do przetwarzania informacji kwantowej. W pracy H5, po przeprowadzeniu wstępnych obliczeń analitycznych, przeprowadzona została symulacja numeryczna. Kluczowe było zapewnienie odpowiedniego próbkowania, zapewniającego rozdzielczość czasową na poziomie dziesiątek femtosekund, a rozdzielczość widmową na poziomie dziesiątek megaherców: wymagało to objęcia symulacją ponad 7 rzędów wielkości oraz realizacji

numerycznych transformat Fouriera na 10^7 punktów. W tym celu wykorzystano programowanie na karcie graficznej (CUDA). Modelowano również zniekształcenia i szумы czasowe oraz zniekształcenia i szумы amplitudowe, oraz modulacje z zawijaniem fazy na poziomie 2π , 4π , 6π i 8π . Wyniki symulacji numerycznych wskazały na możliwości doświadczalnej realizacji wydajnej konwersji szerokości widmowej pomiędzy krótkimi fotonami telekomunikacyjnymi o szerokości widmowej rzędu 100 GHz, a długimi, nanosekundowymi fotonami o szerokości widmowej poniżej 1 GHz.

Wkład habilitanta: sformułowanie hipotezy dotyczącej możliwości realizacji konwertera szerokości widmowej za pomocą soczewki czasowej Fresnela. Przeprowadziłem wstępne obliczenia, zidentyfikowałem wyzwania dotyczące wymaganej rozdzielczości symulacji numerycznej oraz konieczność wykorzystania CUDA. Nadzorowałem realizację obliczeń numerycznych, weryfikację ich poprawności oraz interpretację ich wyników. Miałem wiodący wkład w spisanie tekstu publikacji.

[H1] F. Sośnicki, M. Mikołajczyk, A. Golestani, M. Karpiński, *Interface between picosecond and nanosecond quantum light pulses*, Nature Photonics 17, 761 (2023).

Praca przedstawia doświadczalną realizację konwertera szerokości widmowej pojedynczych fotonów za pomocą soczewki czasowej Fresnela. Realizacja znacznego rozciągnięcia impulsu w czasie i zawężenia widma wymaga (1) wykorzystania ośrodka o dyspersji opóźnienia grupowego o bardzo dużej wartości, (2) realizacji skomplikowanego przebiegu czasowego soczewki czasowej Fresnela oraz (3) pomiaru widma sygnałów jednofotonowych o szerokości widmowej rzędu 500 MHz.

Jako ośrodek dyspersyjny wykorzystano telekomunikacyjne moduły kompensujące dyspersję oparte na światłowodowej siatce Bragga o zmiennym okresie (współczynnik dyspersji 5 ns/nm oraz 10 ns/nm, co daje 15 ns/nm przy użyciu łącznym). Ogłaszane fotony ze źródła par fotonów użytego w pracy [H4] kierowane były do układu kształtowania widmowego opartego na przestrzennym modulatorze fazy, aby dopasować ich widmo do parametrów układu soczewki czasowej Fresnela. Następnie kierowane były do modułu dyspersyjnego, a następnie do elektro-optycznego modulatora fazy. Kluczowym dla realizacji sygnału soczewki czasowej Fresnela było wygenerowanie skomplikowanego sygnału napięciowego, jego wzmocnienie oraz uwzględnienie w początkowym sygnale kompensacji zniekształceń wynikających z zespolonych współczynników transmisji elementów na drodze sygnału elektrycznego: kabli koncentrycznych, wzmacniacza mikrofalowego, oraz z zespolonego współczynnika elektrooptycznego.

Należy zwrócić uwagę na bardzo szerokopasmowy charakter sygnału napięciowego soczewki Fresnela – centrum sygnału jest wolnozmiennie, odpowiadające częstotliwości około 100 MHz, natomiast skrajne fragmenty sygnału mają częstotliwości powyżej 30 GHz. W związku z tym kluczowe dla realizacji eksperymentu było wykorzystanie arbitralnego generatora sygnału o paśmie powyżej 35 GHz (Keysight M8196A) oraz wzmacniacza mikrofalowego dużej mocy (powyżej 2 W) o ultraszerokim paśmie obejmującym 100 MHz–35 GHz (RF Lambda). Charakterystyka zespolonych współczynników transmisji elementów mikrofalowych była możliwa dzięki wypożyczeniu oscyloskopu o paśmie do 64 GHz (Keysight). Odpowiedź elektro-optyczna została scharakteryzowana przez pomiary pasm bacznych w modulacji sygnału optycznego pracy ciągłej. Efekty zespolonych współczynników transmisji zostały ujęte w modelu

numerycznym i skompensowane poprzez zadanie odpowiedniego profilu wejściowego sygnału napięcia za pomocą generatora arbitralnego.

Wstępna charakteryzacja działania układu wykonana została za pomocą światła klasycznego: odpowiednio filtrowanych widmowo impulsów z femtosekundowego oscylatora erbowego. Pomiar zawężonego widma odbywał się za pomocą heterodynowego analizatora widma optycznego (Apex, rozdzielczość do 5 MHz). Uzyskano szerokości widmowe poniżej 150 MHz. Profil czasowy zawężonych impulsów, o szerokości powyżej 5 ns, zmierzono za pomocą bardzo szybkiej fotodiody (o paśmie powyżej 12 GHz).

Ze względu na niewielką szerokość widmową zawężonych widmowo impulsów jednofotonowych nie było możliwe wykorzystanie od pomiaru ich widma dyspersyjnej transformaty Fouriera (której rozdzielczość jest ograniczona do około 4 GHz). Do pomiaru widma zawężonych fotonów wykorzystano przestrajalny napięciowo rezonator Fabry'ego-Perota o szerokości rezonansu ok. 400 MHz. W wyniku przestrajania zmierzono, w trybie zliczania fotonów w koincydencji z fotonami ogłaszającymi, zwiększenie strumienia fotonów o czynnik 50 w porównaniu do braku modulacji elektrooptycznej. Zmierzono szerokość widmową 500 MHz, przy czym istotny wkład do zmierzonej szerokości miała szerokość rezonatora Fabry'ego-Perota (420 MHz). Szerokość widma fotonów na wejściu do układu wynosiła powyżej 70 GHz.

Uzyskane wyniki stanowią pierwszy wydajny interfejs łączący skalę czasową i widmową optyki kwantowej krótkich impulsów światła (o czasie trwania rzędu 1 ps) z optyką kwantową długich impulsów światła (o czasie trwania rzędu ns), mogących wydajnie oddziaływać z materialnymi ośrodkami i obiektami przetwarzającymi informację kwantową, takimi jak spulapkowane jony czy pamięci kwantowe.

Praca została opublikowana w czasopiśmie Nature Photonics oraz została wyróżniona w ramach wydania czasopisma poprzez opublikowanie towarzyszącego jej podsumowania typu „News&Views” [Donohue23].

Wkład habilitanta: *pomysł, projekt układu doświadczalnego, identyfikacja kluczowych wyzwań doświadczalnych, bieżący nadzór nad realizacją doświadczalną i konsultacja uzyskiwanych wyników doświadczalnych, nadzór nad analizą danych, kluczowy udział w spisaniu publikacji.*

[H3] M. Karpiński, A. O. C. Davis, F. Sośnicki, V. Thiel, B. J. Smith, *Control and measurement of quantum light pulses for quantum information science and technology*, Advanced Quantum Technologies 4, 2000150 (2021).

Jest to praca przeglądowa, jednakże zawierająca oryginalne opracowanie oraz nowe wnioski w postaci przedstawienia technik optyki czasowej (soczewki czasowe, dyspersyjna transformata Fouriera, obrazowanie czasowe) w kontekście ich nowych zastosowań w optyce kwantowej i kwantowym przetwarzaniu informacji. Brak możliwości wzmacniania sygnałów jednofotonowych oraz konieczność skupienia się na unikaniu strat nakłada inne wymagania i uwarunkowania dotyczące zastosowań metod optyki czasowej niż przedstawione w dotychczas dostępnej literaturze dotyczącej klasycznych zastosowań optyki czasowej. Ponadto praca przedstawia teorię tak zwanych modów czasowych (bądź impulsowych) kwantowego światła oraz zastosowania metod kształtowania impulsów światła opartych na optyce czasowej do charakteryzacji

kwantowych stanów światła w czasie i częstotliwości, kształtowania fotonów kontekście sieci kwantowych oraz kwantowej metrologii czasu i częstotliwości.

Wkład habilitanta: *Wniosłem kluczowy wkład do pracy poprzez zidentyfikowania nowych wymagań i ograniczeń dotyczących zastosowań metod optyki czasowej w optyce kwantowej oraz spisanie ponad 6 z 19 stron tekstu publikacji (bez uwzględnienia referencji), w tym większości rozdziału 3 opisującego metody optyki czasowej w kontekście optyki kwantowej.*

Podsumowując, przedstawiony cykl powiązanych tematycznie publikacji obejmuje badania weryfikujące możliwość wykorzystania metod optyki czasowej w optyce kwantowej oraz przedstawiające kilka możliwych zastosowań tych efektów. Obejmuje pierwsze elektro-optyczne eksperymenty wykorzystujące metody optyki czasowej w ramach optyki kwantowej, takich jak przesunięcie widmowe [H7] i modyfikacja szerokości widmowej fotonów [H6, H4], przez szeroką analizę możliwości zastosowań metod optyki czasowej w optycznych technologiach kwantowych [H3], po ich zastosowania w ramach interfejsu pomiędzy wąskopasmowymi i szerokopasmowymi platformami do przetwarzania informacji kwantowej [H5, H1] oraz w ramach nowej metody charakteryzacji krótkich impulsów światła [H2].

Referencje

- [Adams24] B. W. Adams, C. Buth, S. M. Cavaletto, J. Evers, Z. Harman, C. H. Keitel, X-ray quantum optics, A. Pálffy, A. Picón, R. Röhlberger, Y. Rostovtsev K. Tamasaku, *X-ray quantum optics*, J. Mod. Opt. **60**, 2–21 (2024).
- [Agha14] I. Agha, S. Ates, L. Sapienza, K. Srinivasan, *Spectral broadening and shaping of nanosecond pulses: toward shaping of single photons from quantum emitters*, Opt. Lett. **39**, 5677 (2014).
- [Aharonovich16] I. Aharonovich, D. Englund, M. Toth, *Solid-state single-photon emitters*. Nat. Photon. **10**, 631 (2016).
- [Awschalom21] D. Awschalom *et al.*, *Development of quantum interconnects (QuICs) for next-generation information technologies*, PRX Quantum **2**, 017002 (2021).
- [Białynicki94] I. Białynicki-Birula, *On the wavefunction of a photon*, Acta Phys. Polon. A **86**, 97 (1997).
- [Brecht15] B. Brecht, D. V. Reddy, C. Silberhorn, M. G. Raymer, *Photon temporal modes: a complete framework for quantum information science*, Phys. Rev. X **5**, 041017 (2015).
- [Cooper13] M. Cooper, L. J. Wright, C. Söller, B. J. Smith, *Experimental generation of multi-photon Fock states*, Opt. Express **21**, 5309 (2013).
- [Davis20] A. O. C. Davis, V. Thiel, B. J. Smith, *Measuring the quantum state of a photon pair entangled in frequency and time*, Optica **7**, 1317 (2020).
- [Ding25] X. Ding, Y.-P. Guo, M.-C. Xu, R.-Z. Liu, G.-Y. Zou, J.-Y. Zhao, Z.-X. Ge, Q.-H. Zhang, H.-L. Liu, L.-J. Wang, M.-C. Chen, H. Wang, Y.-M. He, Y.-H. Huo, C.-Y. Lu, J.-W. Pan, *High-efficiency single-photon*

source above the loss-tolerant threshold for efficient linear optical quantum computing, Nat. Photon., <https://doi.org/10.1038/s41566-025-01639-8> (2025).

- [Donohue13] J. M. Donohue, M. Agnew, J. Lavoie, K. J. Resch, *Coherent ultrafast measurement of time-bin encoded photons*, Phys. Rev. Lett. **111**, 153602 (2013).
- [Donohue14] J. M. Donohue, J. Lavoie, K. J. Resch, *Ultrafast time-division demultiplexing of polarization-entangled photons*, Phys. Rev. Lett. **113**, 163602 (2014).
- [Donohue18] J. M. Donohue, V. Ansari, J. Řeháček, Z. Hradil, B. Stoklasa, M. Paúr, L. L. Sánchez-Soto, C. Silberhorn, *Quantum-limited time-frequency estimation through mode-selective photon measurement*, Phys. Rev. Lett. **121**, 090501 (2018).
- [Donohue23] J. M. Donohue, *Fresnel time lens empowers quantum networks*, Nat. Photon. **17**, 738 (2023).
- [Fedorov05] M. V. Fedorov, M. A. Efremov, A. E. Kazakov, K. W. Chan, C. K. Law, J. H. Eberly, *Spontaneous emission of a photon: Wave-packet structures and atom-photon entanglement*, Phys. Rev. A **72**, 032110 (2005).
- [Foster11] M. A. Foster, R. Salem, A. L. Gaeta, *Ultrahigh-speed optical processing using space-time duality*, Opt. Photon. News **22**, 29 (2011).
- [Hayat12] A. Hayat, X. Xing, A. Feizpour, A. M. Steinberg, *Multidimensional quantum information based on single-photon temporal wavepackets*, Opt. Express **20**, 29174 (2012).
- [Huang92] J. Huang, P. Kumar, *Observation of quantum frequency conversion*, Phys. Rev. Lett. **68**, 2153 (1992).
- [Humphreys13] P. C. Humphreys, B. J. Metcalf, J. B. Spring, M. Moore, X.-M. Jin, M. Barbieri, W. S. Kolthammer, I. A. Walmsley, *Linear optical quantum computing in a single spatial mode*, Phys. Rev. Lett. **111**, 150501 (2013).
- [Goodman] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*, McGraw-Hill, San Francisco 1968.
- [Kimble77] J. H. Kimble, M. Dagenais, L. Mandel, *Photon antibunching in resonance fluorescence*, Phys. Rev. Lett. **39**, 691 (1977).
- [Kimble08] H. J. Kimble, *The quantum internet*, Nature **453**, 1023 (2008).
- [Kolchin08] P. Kolchin, C. Belthangady, S. Du, G. Y. Yin, S. E. Harris, *Electro-optic modulation of single photons*, Phys. Rev. Lett. **101**, 103601 (2008).
- [Kolner89] B. H. Kolner, M. Nazarathy, *Temporal imaging with a time lens*, Opt. Lett. **14**, 630 (1989).
- [Kolner94] B. Kolner, *Space-time duality and the theory of temporal imaging*, IEEE J. Quant. Electron. **30**, 1951 (1994).

- [Lavoie13] J. Lavoie, J. M. Donohue, L. G. Wright, A. Fedrizzi, K. J. Resch, *Spectral compression of single photons*, Nature Photon. **7**, 363 (2013).
- [Maccone20] L. Maccone, K. Sacha, *Quantum measurements of time*, Phys. Rev. Lett. **124**, 110402 (2020).
- [Madsen22] L. S. Madsen, F. Laudenbach, M. F. Askarani, F. Rortais, T. Vincent, J. F. F. Bulmer, F. M. Miatto, L. Neuhaus, L. G. Helt, M. J. Collins, A. E. Lita, T. Gerrits, S. W. Nam, V. D. Vaidya, M. Menotti, I. Dhand, Z. Vernon, N. Quesada, J. Lavoie, *Quantum computational advantage with a programmable photonic processor*, Nature **606**, 75 (2022).
- [Mandel95] L. Mandel, E. Wolf, *Optical coherence and quantum optics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
- [Matsuda16] N. Matsuda, *Deterministic reshaping of single-photon spectra using cross-phase modulation*. Sci. Adv. **2**, e1501223 (2016).
- [Mukamel20] S. Mukamel *et al.*, *Roadmap on quantum light spectroscopy*, J. Phys. B: Atom., Mol. Opt. Phys. **53**, 072002 (2020).
- [Mosley08] P. J. Mosley, J. S. Lundeen, B. J. Smith, P. Wasylczyk, A. B. U'Ren, C. Silberhorn, I. A. Walmsley, *Heralded generation of ultrafast single photons in pure quantum states*, Phys. Rev. Lett. **100**, 133601 (2008).
- [Nunn13] J. Nunn, L. J. Wright, C. Söller, L. Zhang, I. A. Walmsley, B. J. Smith., *Large-alphabet time-frequency entangled quantum key distribution by means of time-to-frequency conversion*, Opt. Express **21**, 15959 (2013).
- [Oslislager12] L. Oslislager, I. Mbodji, E. Woodhead, J. Cussey, L. Furfaro, P. Emplit, S. Massar, K.-P. Huy, J. M. Merolla, *Implementing two-photon interference in the frequency domain with electro-optic phase modulators*, New J. Phys. **14**, 043015 (2012).
- [PsiQ25] PsiQuantum Team, *A manufacturable platform for photonic quantum computing*, Nature, <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08820-7> (2025).
- [Rakher11] M. T. Rakher, K. Srinivasan, *Subnanosecond electro-optic modulation of triggered single photons from a quantum dot*, Applied Physics Letters **98**, 211103 (2011).
- [Reimer16] C. Reimer *et al.*, *Generation of multiphoton entangled quantum states by means of integrated frequency combs*, Science **351**, 1176 (2016).
- [Rosenfeld20] L. M. Rosenfeld, D. A. Sulway, G. F. Sinclair, V. Anant, M. G. Thompson, J. G. Rarity, J. W. Silverstone, *Mid-infrared quantum optics in silicon*, Opt. Express **28**, 37092 (2020).
- [Salem13] R. Salem, M. A. Foster, A. L. Gaeta, *Application of space-time duality to ultrahigh-speed optical signal processing*, Adv. Opt. Photon. **5**, 274 (2013).
- [Smith07] B. J. Smith, M. G. Raymer, *Photon wave functions, wave-packet quantization of light, and coherence theory*, New J. Phys. **9**, 414 (2007).

- [Takeuchi14] S. Takeuchi, *Recent progress in single-photon and entangled-photon generation and applications*, Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 030101 (2014).
 - [Tsang06] M. Tsang, D. Psaltis, *Propagation of temporal entanglement*, Phys. Rev. A **73**, 013822 (2006).
 - [Uppu21] R. Uppu, L. Midolo, X. Zhou, J. Carolan, J. P. Lodahl, *Quantum-dot-based deterministic photon–emitter interfaces for scalable photonic quantum technology*, Nat. Nanotechnol. **16**, 1308 (2021).
 - [Wallquist09] M. Wallquist, K. Hammerer, P. Rabl, M. Lukin, P. Zoller, *Hybrid quantum devices and quantum engineering*, Phys. Scripta **T137**, 014001 (2009).
 - [Zaske12] S. Zaske, A. Lenhard, C. A. Keßler, J. Kettler, C. Hepp, C. Arend, R. Albrecht, W.-M. Schulz, M. Jetter, P. Michler, C. Becher, *Visible-to-telecom quantum frequency conversion of light from a single quantum emitter*, Phys. Rev. Lett **109**, 147404 (2012).
 - [Zhang13] C. Zhang, P. C. Chui, K. K. Y. Wong, *Comparison of state-of-art phase modulators and parametric mixers in time-lens applications under different repetition rates*, Appl. Opt. **52**, 8817 (2013).
 - [Zhu13] Y. Zhu, J. Kim, D. J. Gauthier, *Aberration-corrected quantum temporal imaging system*, Phys. Rev. A **87**, 043808 (2013).
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, 2012–2013

Po obronie pracy doktorskiej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w czerwcu 2012 roku, dotyczącej generacji par fotonów w wielomodowych falowodach nieliniowych, kontynuowałem prace nad tym zagadnieniem. W szczególności współpracowałem z magistrantem Michałem Jachurą w zakresie pomiarów interferencji dwufotonowej fotonów generowanych w wielomodowym falowodzie nieliniowym [P8].

[P8] M. Jachura, M. Karpiński, C. Radzewicz, K. Banaszek, *High-visibility nonclassical interference of photon pairs generated in a multimode nonlinear waveguide*, Opt. Express **22**, 8624 (2014).

Ponadto wykonałem pomiary ilustrujące zagadnienie powiązania widzialności interferencji z informacją na temat wyboru drogi w interferometrze przez cząstkę kwantową z wewnętrznymi stopniami swobody. Eksperyment wykorzystywał polaryzacyjny stopień swobody pojedynczych fotonów. Wyniki tych prac stały się częścią publikacji [P9]:

[P9] K. Banaszek, P. Horodecki, M. Karpiński, and C. Radzewicz, *Quantum mechanical which-way experiment with internal degrees of freedom*, Nature Commun. **4**, 2594 (2013).

Pracowałem także nad analizami teoretycznymi dotyczącymi generacji splątanych par fotonów w poprzecznych modach przestrzennych w falowodach nieliniowych we

współpracy z grupą prof. Krishny Thyagarajana z Indyjskiego Instytutu Technologii w Delhi [P10, P11, P12]

[P10] D. Bharadwaj, K. Thyagarajan, M. Karpiński, K. Banaszek, *Generation of higher-dimensional modal entanglement using a three-waveguide directional coupler*, Phys. Rev. A **91**, 033824 (2015).

[P11] D. Bharadwaj, K. Thyagarajan, M. Jachura, M. Karpiński, K. Banaszek, *Scheme for on-chip verification of transverse mode entanglement using the electro-optic effect*, Opt. Express **23**, 33087 (2015).

[P12] M. Jachura, M. Karpiński, K. Banaszek, D. Bharadwaj, J. Lugani, K. Thyagarajan, *Generation and characterization of discrete spatial entanglement in multimode nonlinear waveguides*, Phys. Rev. A **95**, 032322 (2017).

Uniwersytet Oksfordzki, Department of Physics, Wielka Brytania, 2013–2016

Na Uniwersytecie Oksfordzkim pracowałem w okresie styczeń 2013 – styczeń 2016 w grupie badawczej „Optical Quantum Technologies” pod kierunkiem prof. Briana Smitha, początkowo jako stypendysta podoktorski programu Marii Curie (Marie Curie Individual Fellowship), a następnie w ramach Narodowego Programu Technologii Kwantowych Wielkiej Brytanii. Podczas pracy na Uniwersytecie Oksfordzkim powstała koncepcja i pierwsze prace przedstawionego wcześniej cyklu publikacji [H6, H7]. Ponadto w tym okresie pracowałem nad zagadnieniami przedstawionymi poniżej.

W pierwszej kolejności wymienię badanie możliwości realizacji wysokorozdzielczych pomiarów widma pojedynczych fotonów za pomocą tzw. dyspersyjnej transformaty Fouriera, zwanej również mapowanie częstotliwość-czas. Byłem pomysłodawcą wykorzystania światłowodowej siatki Bragga o zmiennym okresie w celu uzyskania dużej dyspersji prędkości grupowej, a co za tym idzie, wysokiej rozdzielczości przy niewielkich stratach. Dzięki swoim kontaktom naukowym uzyskałem dostęp do trudno dostępnych próbek światłowodowych siatek Bragga o odpowiednich parametrach. Projekt ten został zrealizowany doświadczalnie przez pozostałych członków grupy badawczej [P13]:

[P13] A. O. C. Davis, P. M. Saulnier, M. Karpiński, B. J. Smith, *Pulsed single-photon spectrometer by frequency-to-time mapping using chirped fiber Bragg gratings*, Opt. Express **25**, 12804 (2017).

Uczestniczyłem w doświadczalnych badaniach w zakresie nowych metod tomografii stanu kwantowego pola elektromagnetycznego w zmiennych ciągłych, dla modów impulsowych. Wspólnie ze współpracownikami zademonstrowaliśmy doświadczalnie, za pomocą detekcji homodynowej, nową metodę tomografii stanu kwantowego, która nie wymaga pełnej charakteryzacji detektora, czyli metodę tomografii wzorów danych (ang. *data pattern tomography*) [P14]. Ponadto za pomocą tomografii procesu kwantowego w zmiennych ciągłych scharakteryzowaliśmy doświadczalnie probabilistyczny niegaussowski proces filtrowania stanu Focka (ang. *Fock state filtering*, dla przypadku filtrowania za pomocą jednego fotonu) [P15]. Mój główny udział w tych pracach obejmował obliczenia numeryczne niezbędne do przeprowadzenia symulacji eksperymentu oraz analizy danych pomiarowych metodami tomografii kwantowej. Brałem również udział w optymalizacji eksperymentu, w tym

jednomodowego źródła ogłaszanych pojedynczych fotonów oraz zrównoważonego detektora homodynowego o dużym paśmie elektronicznym (>100 MHz).

[P14] M. Cooper, M. Karpiński, B. J. Smith, *Local mapping of detector response for reliable quantum state estimation*, Nature Commun. 5, 4332 (2014).

[P15] M. Cooper, E. Slade, M. Karpiński, B. J. Smith, *Characterization of conditional state-engineering quantum processes by coherent state quantum process tomography*, New J. Phys. 17, 033041 (2015).

Ponadto brałem udział w pracach dotyczących realizacji procesu spontanicznego parametrycznego podziału częstotliwości w falowodach w kryształach KDP (dwuwodorofosforan potasu, ang. *potassium dihydrogen phosphate*). Podczas mojego pobytu na Uniwersytecie Oksfordzkim we współpracy z grupą badawczą z Wydziału Inżynierii Uniwersytetu Oksfordzkiego opracowana została metoda wytwarzania falowodów w kryształach KDP za pomocą silnych impulsów femtosekundowych [P16]. Mój wkład do pracy obejmował badanie literaturowe w zakresie metod wytwarzania falowodów w kryształach oraz opracowanie założeń dotyczących fabrykacji falowodu.

[P16] L. Huang, P. Salter, M. Karpiński, B. Smith, F. Payne, M. Booth, *Waveguide fabrication in KDP crystals with femtosecond laser pulses*, Appl. Phys. A **118**, 831–836 (2015).

Uczestniczyłem również w pracach dotyczących pomiaru czasowo-widmowej funkcji falowej impulsów jednofotonowych za pomocą metody elektro-optycznej interferometrii z przesunięciem widmowym (ang. *electro-optic spectral shearing interferometry*) [P17, P18]. Przesunięcie widmowe realizowane było za pomocą elektro-optycznego pryzmatu czasowego opracowanego w ramach pracy H7. Uczestniczyłem w pracach koncepcyjnych i w początkowej fazie budowy i kalibracji układu doświadczalnego.

[P17] A. O. C. Davis, V. Thiel, M. Karpiński, B. J. Smith, *Measuring the single-photon temporal-spectral wave function*, Phys. Rev. Lett. **121**, 083602 (2018).

[P18] A. O. C. Davis, V. Thiel, M. Karpiński, B. J. Smith, *Experimental single-photon pulse characterization by electro-optic shearing interferometry*, Phys. Rev. A **98**, 023840 (2018).

Brałem udział w pracach teoretycznych dotyczących badania możliwości realizacji wymiany splątania pomiędzy dwoma parami fotonów splątanymi w czasowo-widmowym stopniu swobody, prowadzony we współpracy w grupą prof. M. Raymera z Uniwersytetu Oregonu (USA) oraz Karstena Rottwitta z Duńskiego Uniwersytetu Technicznego (DTU) [P19]:

[P19] D. L. P. Vitullo, M. G. Raymer, B. J. Smith, M. Karpiński, L. Mejlum, K. Rottwitt, *Entanglement swapping for generation of heralded time-frequency-entangled photon pairs*, Phys. Rev. A **98**, 023836 (2018).

Byłem także jednym z autorów pomysłu wykorzystania pryzmatu czasowego do realizacji źródła sygnalizowanych fotonów ze zwielokrotnieniem w widmowym stopniu swobody. Pomysł został zrealizowany doświadczalnie w grupie prof. I. A. Walmsleya z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Oksfordzkiego [P20]:

[P20] T. Hiemstra, T. F. Parker, P. Humphreys, J. Tiedau, M. Beck, M. Karpiński, B. J. Smith, A. Eckstein, W. S. Kolthammer, I. A. Walmsley, *Pure single photons from scalable frequency multiplexing*, Phys. Rev. Applied **14**, 014052 (2019).

We współpracy z grupą prof. I. A. Walmsleya badałem również zagadnienie optymalnego wprzęgnięcia sygnalizowanych pojedynczych fotonów do szerokopasmowej pamięci kwantowej opartej na gorących parach atomowych [P21]. Uczestniczyłem w opracowaniu założeń symulacji numerycznej tego zagadnienia.

[P21] P. S. Michelberger, M. Karpiński, I. A. Walmsley, J. Nunn, *Engineering the spectral and temporal properties of a GHz-bandwidth heralded single-photon source interfaced with an on-demand, broadband quantum memory*, J. Mod. Opt. **65**, 1668 (2018).

Ponadto podczas pobytu na Uniwersytecie Oksfordzkim uzyskałem członkostwo jednego z kolegów współtworzących Uniwersytet Oksfordzki, Kolegium Św. Hildy. W 2013 roku wygrałem konkurs na *Non-Stipendiary Junior Research Fellowship*. Członkiem Kolegium Św. Hildy byłem do roku 2015. Członkostwo znacząco poszerzyło moje horyzonty naukowe, ze względu na bardzo interdyscyplinarny charakter Kolegium.

Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, 2015 – 2024

W okresie od października 2015 r. do chwili obecnej jestem zatrudniony na stanowisku adiunkta w Zakładzie Optyki Instytutu Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (FUW). W okresie październik 2015 – styczeń 2016 byłem równolegle zatrudniony na ułamek etatu na Uniwersytecie Oksfordzkim.

Głównym celem moich badań prowadzonych w wyżej wymienionym okresie w ramach Laboratorium Fotoniki Kwantowej (LFK) na FUW była realizacja badań prowadzących do pięciu z siedmiu publikacji przedstawionego wcześniej cyklu: H1 – H5. Wymagało to stworzenia zespołu badawczego, uzyskania zewnętrznego finansowania i pozyskania odpowiedniej aparatury oraz ustanowienia współpracy międzynarodowej. Zagadnienia te opisane są w dalszej części tego punktu oraz w p. 6.

Ponadto uczestniczyłem w powiązanych tematycznie z cyklem prac badaniach dotyczących pomiaru profilu czasowego elektro-optycznej modulacji fazy o dużej częstotliwości (rzędu 10 GHz) za pomocą mapowania czas-częstotliwość oraz interferencji widmowej [P22]:

[P22] M. Jachura, J. Szczepanek, W. Wasilewski, M. Karpiński, *Measurement of radio-frequency temporal phase modulation using spectral interferometry*, J. Mod. Opt. **65**, 262 (2018).

Ponadto zapoczątkowałem i nadzorowałem badania numeryczne i doświadczalne na temat modelowania sinusoidalnych elektro-optycznych soczewek czasowych. Motywacją do podjęcia badań były zaobserwowane rozbieżności pomiędzy uzyskiwanymi wynikami doświadczalnymi dotyczącymi zmiany szerokości widmowej fotonów, a standardowym modelem teoretycznym. Podczas pracy pod moim nadzorem doktorant Sanjay Kapoor opracował nowy analityczny model elektro-optycznej soczewki czasowej oraz dokonał jego walidacji numerycznej i doświadczalnej. Wyniki zostały ujęte w pracy [arXiv1] w roku 2022, w latach 2024–2025 praca została uzupełniona o wyniki doświadczalne oraz w roku 2025 wysłana do recenzowanego czasopisma.

[arXiv1] S. Kapoor, F. Sośnicki, M. Karpiński, *Aberration-corrected time aperture of an electro-optic time lens*, arXiv preprint arXiv:2207.07618 (2022).

Uczestniczyłem również w pracach teoretycznych dotyczących wykorzystania wnęki

zawierającej soczewki czasowe do realizacji filtrowania ortogonalnych modów czasowo-częstotliwościowych, we współpracy z grupą dra Giuseppe Patera z Uniwersytetu w Lille (Francja) [P23]:

[P23] B. Dioum, S. Srivastava, M. Karpiński, G. Patera, *Temporal cavities as temporal mode filters for optical information processing*, Phys. Rev. A **111**, 033704 (2025).

Pozostałe, niebędące częścią cyklu, badania prowadzone pod moim nadzorem w ramach mojego zespołu badawczego obejmują 3 obszary tematyczne: (1) wykorzystanie światłowodowych siatek Bragga jako sensorów drgań mechanicznych oraz (2) zagadnienia związane z kwantową dystrybucją klucza kryptograficznego a także (3) badania dotyczące kształtowania widmowego pojedynczych fotonów emitowanych przez kropki kwantowe.

W ramach pierwszego zagadnienia uczestniczyłem w pracach dotyczących badania propagacji fal mechanicznych w konstrukcjach blaszanych za pomocą światłowodowych czujników optycznych we współpracy z zespołem z Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Badania wykazały możliwość lokalizowania uszkodzenia [P24] za pomocą pojedynczej światłowodowej siatki Bragga oraz odbić fal mechanicznych od brzegów struktury blaszanej oraz potwierdziły model teoretyczny optymalizacji położenia czujnika [P25]. Zaplanowałem prace w zakresie metod optycznych, nadzorowałem budowę i kalibrację optycznej części układu doświadczalnego oraz przebieg eksperymentów.

[P24] R. Soman, K. Balasubramaniam, A. Golestani, M. Karpiński, P. Malinowski, *A two-step guided waves based damage localization technique using optical fiber sensors*, Sensors **20**, 5804 (2020).

[P25] R. Soman, K. Balasubramaniam, A. Golestani, M. Karpiński, P. Malinowski, W. Ostachowicz, *Actuator placement optimization for guided waves based structural health monitoring using fibre Bragg grating sensors*, Smart Materials and Structures **30**, 125011 (2021).

Uczestniczyłem też w planowaniu i wstępnej walidacji eksperymentu, w którym zbadana została możliwość wykorzystania światłowodowych siatek Bragga we włóknach optycznych zachowujących polaryzację do rozróżniania sygnałów pochodzących od różnych modów fali mechanicznej:

[P26] R. Soman, F. O. Moaf, P. Fiborek, M. Kurpińska, S. Sarbaz, M. Karpiński, T. Wandowski, *Investigating the effect of orientation of polarization maintaining fiber Bragg grating sensor on its sensitivity to fundamental symmetric and antisymmetric guided wave modes*, Measurement **252**, 117307 (2025).

W ramach drugiego zagadnienia prowadziłem wraz moim zespołem oraz, w przypadku pracy [P27], we współpracy z grupą prof. R. Piramidowicza z Politechniki Warszawskiej, badania doświadczalne powiązane z zagadnieniami kwantowej dystrybucji klucza kryptograficznego. W pracy [P27], której pomysłodawcą był Adam Widomski, został zaprojektowany, wykonany i scharakteryzowany fotoniczny układ scalony z fosforku indu. Projekt i charakteryzacja miała na celu pokazanie możliwości wykorzystania tego typu fotonicznego układu scalonego jako nadajnika do protokołu wielowymiarowej kwantowej dystrybucji klucza kryptograficznego. Moją rolą było

opracowanie założeń projektu układu scalonego oraz nadzór nad częścią doświadczalną realizowaną w LFK.

[P27] A. Widomski, S. Stopiński, K. Anders, R. Piramidowicz, M. Karpiński, *Precise on-chip spectral and temporal control of single-photon-level optical pulses*, J. Lightwave Technol. **41**, 6255 (2023).

Ponadto opracowałem wraz z Maciejem Ogrodnikiem i Adamem Widomskim pomysł wykorzystania tzw. czasowego efektu Talbota do detekcji pojedynczych fotonów będących w superpozycji przedziałów czasowych. Zagadnienie wydajnej detekcji tego typu superpozycji jest istotne ze względu na możliwe zastosowania w odbiornikach w układach wielowymiarowej kwantowej dystrybucji klucza kryptograficznego. Pod moim nadzorem przeprowadzona została symulacja oraz weryfikacja doświadczalna. Wyniki zostały opublikowane w pracy [P28]:

[P28] A. Widomski, M. Ogrodnik, M. Karpiński, *Efficient detection of multidimensional single-photon time-bin superpositions*, Optica **11**, 926–931 (2024).

Wraz z zespołem uczestniczyłem również w pracach międzynarodowego zespołu z Niemiec, Włoch i Polski (w ramach projektu QuantERA QuICHE, por. dalej oraz p. 6.2) dotyczących nowego dowodu bezpieczeństwa wielowymiarowych protokołów kryptografii kwantowej przy braku dokładnej informacji o nierówności wydajności detekcji w dwóch komplementarnych bazach. Wraz z członkami zespołu LFK wnieśliśmy wkład dotyczący możliwych zakresów parametrów doświadczalnych, dla których dowód był weryfikowany. Praca została opublikowana w czasopiśmie Physical Review Applied [P29]:

[P29] F. Grasselli, G. Chesi, N. Walk, H. Kampermann, A. Widomski, M. Ogrodnik, M. Karpiński, C. Macchiavello, D. Bruß, N. Wyderka, *Quantum key distribution with basis-dependent detection probability*, Phys. Rev. Applied **23**, 044011 (2025).

Równolegle pod moim kierunkiem, we współpracy z partnerami w ramach projektu QuICHE, zrealizowana została doświadczalna weryfikacja wielowymiarowego protokołu QKD (4 wymiary) z kodowaniem w przedziałach czasowych, zarówno w Laboratorium Fotoniki Kwantowej oraz w miejskiej sieci światłowodowej Uniwersytetu Warszawskiego. Praca została zamieszczona w repozytorium arXiv [arXiv2] i wysłana do czasopisma.

[arXiv2] M. Ogrodnik, A. Widomski, D. Bruß, G. Chesi, F. Grasselli, H. Kampermann, C. Macchiavello, N. Walk, N. Wyderka, M. Karpiński, *High-dimensional quantum key distribution with resource-efficient detection*, preprint arXiv:2412.16782 (2024).

W ramach trzeciego ze wspomnianych wcześniej obszarów badań, we współpracy z członkami Zakładu Fizyki Ciała Stałego Wydziału Fizyki UW, przeprowadzona została pod moim kierunkiem doświadczalna weryfikacja możliwości zmiany centralnej długości fali pojedynczych fotonów emitowanych przez kropkę kwantową za pomocą elektro-optycznego pryzmatu czasowego. Praca została opublikowana w czasopiśmie Nanophotonics [P30]:

[P30] S. Kapoor, A. Rodek, M. Mikołajczyk, J. Szuniewicz, F. Sośnicki, T. Kazimierczuk, P. Kossacki, M. Karpiński, *Electro-optic frequency shift of single photons from a quantum dot*, Nanophotonics, DOI: 10.1515/nanoph-2024-0550 (2025).

W okresie zatrudnienia na stanowisku adiunkta na Wydziale Fizyki UW byłem

kierownikiem następujących projektów badawczych:

- polskiej części europejskiego konsorcjum QuICHE („Quantum Information and Communication with High-dimensional Encoding”) w ramach programu UE/NCN QuantERA, 1,3 mln zł (dla UW), 2019–2024. Konsorcjum QuICHE obejmowało, oprócz grupy badawczej pod moim kierunkiem na FUW, grupy badawcze z Niemiec (Uniwersytet w Paderborn, grupa prof. C. Silberhorn oraz Uniwersytet w Dortmundzie, grupa prof. D. Bruß), Włoch (Uniwersytet w Pawii, grupa prof. C. Macchiavello), Francji (Uniwersytet w Lille, grupa prof. M. Kolobova) oraz Wlk. Brytanii (Imperial College London, grupa prof. I. A. Walmsleya).
- Projekt First TEAM Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, „Phase-only shaping of light pulses for applications in quantum technologies, 2,95 mln zł, 2019–2023,
- Projekt HOMING Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, „Manipulating spectral entanglement by complex temporal phase modulation”, 0,75 mln zł, 2016–2018,
- Projekt SONATA Narodowego Centrum Nauki, „Spójne kształtowanie widmowe kwantowych stanów światła” 0,67 mln zł, 2015–2019.

Aktualnie jestem kierownikiem:

- projektu SONATA-BIS Narodowego Centrum Nauki, „Wielowymiarowe splątanie kwantowe na platformie optyki zintegrowanej”, 4,65 mln zł, 2024–2029,
- międzynarodowego projektu WEAVE OPUS-LAP Narodowego Centrum Nauki, we współpracy z Uniwersytetem w Innsbrucku (Austria), „Kształtowanie widmowe pojedynczych fotonów dla hybrydowych sieci kwantowych”, 1,9 mln zł (dla UW), 2024–2027,
- zespołu na FUW w ramach międzynarodowego projektu w ramach Horyzontu Europa, „Mid-Infrared Quantum Technologies for Sensing (MIRAQLS)”, współpraca UE–Wlk. Brytania–Szwajcaria–Kanada, 0,33 mln euro (2023–2025), dołączyłem do projektu w ramach mechanizmu Hop-On.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.1 Osiągnięcia dydaktyczne

6.1.1 Opieka nad studentami i doktorantami

Byłem promotorem pomocniczym dwóch doktorantów:

- dra Filipa Sośnickiego, praca pn. „Spectral shaping of quantum light pulses by electro-optic phase modulation” obroniona z wyróżnieniem na Wydziale Fizyki UW dn. 10.05.2023. Promotorem był prof. Czesław Radzewicz.

- dra Ali Golestani Shishvan, praca pn. „Temporal shaping and measurement of pulsed quantum light” obroniona na Wydziale Fizyki UW dn. 29.11.2023. Promotorem był prof. Czesław Radzewicz.

Obydwaj absolwenci kontynuują karierę naukową w ramach zagranicznych staży podoktorskich.

Aktualnie jestem promotorem pomocniczym 5 doktorantów: mgr. inż. Adama Widomskiego (który w maju 2025 złożył pracę doktorską), mgr. Michała Mikołajczyka, mgr. Macieja Ogrodnika, mgr. Jerzego Szuniewicza, mgr. Jana Krzyżanowskiego.

Ponadto byłem promotorem 7 prac magisterskich na Wydziale Fizyki UW:

- Jan Krzyżanowski, praca pn. „Enabling two-photon interference by temporal lensing”, 2024. Praca uzyskała wyróżnienie w XXXIII ogólnopolskim Konkursie im. Profesora Adama Smolińskiego na najlepsze prace dyplomowe z zakresu optoelektroniki.
- Dinara Kalkabaeva, praca pn. „Spatially-multimode waveguided electro-optic phase modulation”, 2022.
- Arifah Nurul Amaliah, praca pn. „Spectral compression using a sinusoidal electro-optic time lens”, 2021.
- Adam Widomski, praca pn. „Generation and detection of QKD symbols encoded in time and frequency”, 2019.
- Michał Mikołajczyk, praca pn. „Charakteryzacja widmowa jednofotonowych impulsów światła”, 2018.
- Maciej Gałka, praca pn. „Inżynieria korelacji widmowych par fotonów”, 2017.
- Filip Sośnicki, praca pn. „Electrooptic temporal telescope for nanosecond pulses”, 2016.

Oraz 6 prac licencjackich:

- Natalia Bednarek, praca pn. „Badanie krótkich impulsów laserowych za pomocą metody SWIFTS”, 2024.
- Michał Chrzanowski, praca pn. „Large group delay dispersion for medium-wavelength infrared optical signals”, 2024.
- Antoni Skoczypiec, praca pn. „Symulacja i projektowanie światłowodowych siatek Bragga”, 2024.
- Ksawery Mielczarek, praca pn. „To measure a laser pulse a billion times shorter than a blink of an eye – the SPIDER technique”, 2023.
- Jan Krzyżanowski, praca pn. „Dystrybucja zegara w układach kwantowej dystrybucji klucza kryptograficznego”, 2022.
- Dominika Bondar, praca pn. „Detekcja przestrzenna pojedynczych fotonów promieniowania podczerwonego wykorzystująca mapowanie położenie-czas”, 2019.

6.1.2 Opieka nad Kołem Naukowym Optyki i Fotoniki (KNOF) UW. Od 2016 roku jestem opiekunem naukowym KNOF UW. Koło prowadziło działalność popularyzatorską (m. in. pokazy na Festiwalach Nauki i Piknikach Naukowych) oraz organizowało wykłady i wyjazdy na

wydarzenia naukowe. W roku 2022 Koło uzyskało nagrodę Polskiego Stowarzyszenia Fotonicznego za wyróżniającą działalność w roku 2021.

6.1.3 Organizacja i prowadzenie zajęć dydaktycznych

Podczas zatrudnienia na Uniwersytecie Oksfordzkim skupiałem się na działalności naukowej. Mój udział w procesie dydaktycznym w Oksfordzie obejmował opiekę nad jednym licencjackim projektem grupowym (5 studentów) we współpracy z przemysłem w 2015 r.

Od października 2015 r. realizuję pensum dydaktyczne adiunkta na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w wymiarze 210 h dydaktycznych rocznie (wymiar godzin był zredukowany o 50% w okresie realizacji projektu First Team FNP, od grudnia 2019 do listopada 2023).

Prowadziłem oraz prowadzę następujące zajęcia

- wykład specjalistyczny „Instrumental optics”, corocznie od roku 2016/17 (wcześniej jako „Optyka instrumentalna”)
- pracownia technik pomiarowych, asystent, 2016/17, 2023/24 i 2024/25
- Fizyka II (elektryczność i magnetyzm), ćwiczenia, 2015/16
- Fotonika, ćwiczenia, 2015/16, 2016/17.
- Laboratorium optyki geometrycznej i instrumentalnej, asystent (2 grupy), 2015/16.
- Wstęp do optyki i fizyki materii skondensowanej, ćwiczenia, 2017/18
- Podstawy fizyki III (Optyka i elementy fizyki współczesnej), ćwiczenia, 2018/19, 2019/20.
- Opieka nad zespołowym projektem studenckim, corocznie od 2020/21
- Przygotowanie pokazów do wykładu „Termodynamika z elementami fizyki statystycznej”, 2015/16.

Ponadto opiekowałem się indywidualnymi projektami w laboratorium badawczym w ramach studiów II stopnia oraz dla studentów indywidualnych (średnio 2 studentów na semestr). Pełniłem także rolę tutora dla 8 studentów Międzyobszarowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych (MISMaP). Byłem odpowiedzialny za przygotowanie angielskojęzycznego wykładu „Instrumental optics” na bazie polskojęzycznego wykładu „Optyka instrumentalna”.

Od roku 2023/24 koordynuję i prowadzę w ramach 4-osobowego komitetu organizacyjnego środowiskowe seminarium „Optics Seminar” na Wydziale Fizyki UW. Seminarium odbywa się co tydzień w semestrze letnim i zimowym. Ponadto jestem członkiem komitetu organizującego seminarium „Joint Seminar on Quantum Technologies” (wcześniej „Seminarium Informacji Kwantowej”, od 2018/19).

6.2 Osiągnięcia organizacyjne

6.2.1 Laboratorium Fotoniki Kwantowej

W trakcie mojego zatrudnienia jako adiunkta na F UW przekształciłem i rozwinąłem Laboratorium Fotoniki Kwantowej F UW z niewielkiego laboratorium kwantowo optycznego do badań w zakresie bliskiej podczerwieni (długość fali do 1000 nm) w laboratorium wyposażone w unikalną w skali światowej aparaturę do badań kwantowo optycznych w zakresie bliskiej, telekomunikacyjnej i średniej podczerwieni (długość fali od 750 nm do 2100 nm), składającą się ze sprzętów o wysokich parametrach, łączy światłowodowych do zewnętrznych sieci optycznych oraz zbudowanych pod moim nadzorem przez członków mojego zespołu unikalnych urządzeń. Jednocześnie stworzyłem zespół ambitnych młodych ludzi, bez których wiedzy i zaangażowania Laboratorium nie mogłoby powstać i funkcjonować. Mój zespół uzyskał uznanie międzynarodowe, jest zapraszany do członkostwa w konsorcjach międzynarodowych (np. złożony został wniosek w konkursie Działania Marii Skłodowskiej Curie Doctoral Training Networks, do którego zostałem zaproszony wraz zespołem, bądź zaproszenia do konsorcjów w ramach konkursów European Innovation Council – 2 zaproszenia w 2025). Więcej szczegółów na temat mojej grupy badawczej jest dostępne na stronie [www: photon.fuw.edu.pl](http://www.photon.fuw.edu.pl).

6.2.2 Współpraca międzynarodowa

Po uzyskaniu stopnia doktora rozwinąłem szeroką współpracę naukową. W trakcie zatrudnienia na Uniwersytecie Oksfordzkim nawiązałem kontakty z moim ówczesnym opiekunem prof. Brianem Smithem, który obecnie pracuje na Uniwersytecie Oregonu (USA), z prof. Nicolasem Trepsem z Sorbony w Paryżu (Francja; wspólna publikacja H2), oraz prof. Mikhailem Kolobovem i drem Giuseppe Patera z Uniwersytetu w Lille (wspólna publikacja [P23], zebrany materiał do kolejnej publikacji), z drem Alexandrem Davisem, który obecnie jest zatrudniony na Uniwersytecie w Bath (wspólna publikacja H2) oraz z grupą prof. Petera G. R. Smitha z Optoelectronics Research Centre Uniwersytetu w Southampton (Wlk. Brytania). W ramach współpracy z Uniwersytem w Southampton otrzymaliśmy niedostępne w handlu próbki światłowodowych siatek Bragga, które aktualnie są wykorzystywane w eksperymentach w Laboratorium Fotoniki Kwantowej w Warszawie.

W ramach projektu QunatERA QuICHE w 2019 r. rozpocząłem współpracę z grupą Chiary Macchiavello z Uniwersytetu w Pawii (Włochy) oraz prof. Dagmar Bruß z Uniwersytetu w Dortmundzie (Niemcy), prowadzącą do prac [P29, arXiv2].

W roku 2024 rozpocząłem współpracę z drem Robertem Keilem z Uniwersytetu w Innsbrucku (Austria) w zakresie kształtowania

pojedynczych fotonów emitowanych przez kropki kwantowe, w ramach projektu WEAVE.

6.2.3 Organizacja szkół letnich

Byłem przewodniczącym komitetu organizacyjnego i programowego dwóch międzynarodowych szkół letnich:

- Siegman International School on Lasers, 25.06–2.07.2022, Europejskie Centrum Edukacji Geologicznej UW, Chęciny. Szkoła organizowana we współpracy z organizacją Optica, w ramach prestiżowej serii Szkół Siegmanna. Ponad 120 uczestników z całego świata, w tym wykładowcy z czołowych światowych ośrodków (m.in. ETH Zurych, Szwajcaria; Cornell University, USA).
- Summer School on Mid-Infrared Quantum Sensing and Technologies, 23-28.06.2024, Wydział Fizyki UW, Warszawa. Szkoła letnia w ramach projektu MIRAQLS, ponad 75 uczestników z całego świata, w tym wykładowcy z czołowych światowych ośrodków (m.in. ETH Zurych i EPFL, Szwajcaria; Imperial College London, Wlk. Brytania).

6.2.4 Organizacja konferencji

Ponadto brałem udział w organizacji następujących konferencji i warsztatów:

- Członek komitetu organizacyjnego „Mazowieckiego Sympozjum Fizyki Kwantowej, Optycznej i Atomowej (MaSQOT)”, Instytut Fizyki PAN, Warszawa, 10–11.06.2024.
- Członek komitetu organizacyjnego międzynarodowej konferencji „Quantum Optics X”, Toruń, 5–11.09.2021.
- Współorganizator warsztatów promujących naukę „Standing up for Science”, we współpracy z fundacją Sense about Science (Wlk. Brytania), 11.2017, Warszawa.
- Główny organizator międzynarodowej konferencji pt. „Workshop on Spectral and Spatial Engineering of Quantum Light”, 02.2016, Warszawa.
- Współorganizator warsztatów „Integrated Quantum Photonics Workshop”, 01.2015, Oksford, Wlk. Brytania
- Współorganizator warsztatów „Quantum Coherence Workshop”, 03.2013, Oksford, Wlk. Brytania.

6.2.5 Koordynacja projektu infrastrukturalnego

W ramach projektu infrastrukturalnego Programu Operacyjnego Innowacyjny Rozwój (POIR) „Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych – NLPQT”, 2019 – 2023:

- Byłem kierownikiem projektu na Wydziale Fizyki UW, odpowiedzialnym za koordynację zakupów i budowy infrastruktury

w ramach 6 grup badawczych na Wydziale Fizyki UW oraz koordynację sprawozdawczości. Projekt został zakończony z sukcesem i sprawozdany;

- Ponadto byłem koordynatorem prac w ramach Laboratoriów Technologii Kwantowych NLPQT (koordynacja prac w ramach 3 jednostek badawczych) oraz wniosłem merytoryczny wkład w budowę łącza QKD Warszawa-Poznań.

6.3 Osiągnięcia popularyzujące naukę

- 6.3.1 Prowadzę wykłady otwarte z pokazami dla uczniów (średnio 1,5 rocznie) w ramach zajęć dla uczniów organizowanych na Wydziale Fizyki UW przez Polskie Towarzystwo Fizyczne i Wydział Fizyki UW, m.in. na temat załamania światła i światłowodów.
- 6.3.2 Zorganizowałem 2-krotnie wizyty w Laboratorium Fotoniki Kwantowej w ramach Festiwalu Nauki (w 2017, 2018) wraz z pokazami Ponadto zorganizowałem wizytę uczniów szkoły podstawowej oraz liceum w Laboratorium w roku 2024.
- 6.3.3 Jestem jednym z fundatorów Fundacji Candela oraz przewodniczącym Rady Fundacji (2021 – nadal). Fundacja Candela, candela.org.pl, popularyzuje optykę i fotonikę oraz wspiera młodych naukowców w Polsce. W szczególności Fundacja prowadzi program krajowych płatnych staży wakacyjnych w laboratoriach badawczych dla zdolnych studentów pn. „Rezonatory” oraz publikuje comiesięczny „Polski Newsletter Optyki i Fotoniki” w języku polski i angielskim.
- 6.3.4 Jestem współzałożycielem i wiceprzewodniczącym polskiego oddziału organizacji Marie Curie Alumni Association wspierającej uczestników i absolwentów programów Marii Skłodowskiej Curie UE (2017 – nadal).
- 6.3.5 Przygotowuję informacje prasowe na temat ważniejszych uzyskanych przeze mnie i mój zespół wyników naukowych.
- 6.3.6 Trzykrotnie uczestniczyłem w audycjach radiowych (m.in. Radio TOK FM, Radio dla Ciebie) popularyzujących naukę, gdzie opowiadałem o badaniach prowadzonych przeze mnie i moich współpracowników i członków zespołu.

.....
(podpis wnioskodawcy)