

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Karol Tarnowski

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

- tytuł zawodowy **magistra inżyniera** na kierunku **Fizyka** w specjalności Fizyczne Podstawy Informatyki, **06.07.2007** (Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska),
- tytuł zawodowy **magistra inżyniera** na kierunku **Informatyka** w specjalności Algorytmy i Systemy Informatyczne, **25.02.2010** (Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska),
- stopień **doktora nauk fizycznych** w zakresie **fizyki**, **23.10.2012**, nadany uchwałą Rady Instytutu Fizyki Politechniki Wroclawskiej na podstawie **wyróżnionej** rozprawy „Wybrane procesy konwersji częstotliwości w strukturyzowanych włóknach optycznych”.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

od 01.10.2012 do 30.09.2014	asystent naukowo-dydaktyczny,	Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska
od 01.10.2014	adiunkt naukowo-dydaktyczny,	Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy.

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych pt. „Wykorzystanie zjawisk liniowych i nieliniowych do kontrolowania właściwości światła w światłowodach specjalnych.”

Na cykl składają się następujące publikacje (wymienione w porządku chronologicznym):

- [1] K. Tarnowski, W. Urbańczyk, *Origin of Bragg reflection peaks splitting in gratings fabricated using a multiple order phase mask*, Optics Express, vol. 21(19), pp. 21800-21810 (2013) DOI: 10.1364/OE.21.021800;
- [2] K. Tarnowski, A. Anuszkiewicz, J. Olszewski, P. Mergo, B. Kibler, W. Urbańczyk, *Nonlinear frequency conversion in a birefringent microstructured fiber tuned by externally applied hydrostatic pressure*, Optics Letters, vol. 38(24), pp. 5260-5263 (2013) DOI: 10.1364/OL.38.005260;
- [3] K. Tarnowski, A. Anuszkiewicz, K. Poturaj, P. Mergo, W. Urbańczyk, *Birefringent optical fiber with dispersive orientation of polarization axes*, Optics Express, vol. 22(21), pp. 25347-25353 (2014) DOI: 10.1364/OE.22.025347;
- [4] K. Tarnowski, A. Anuszkiewicz, P. Mergo, B. Frisquet, B. Kibler, W. Urbanczyk, *Nonlinear mode coupling in a birefringent microstructured fiber tuned by externally applied hydrostatic pressure*, Journal of Optics, vol. 17(3), 035506 (2015) DOI: 10.1088/2040-8978/17/3/035506;
- [5] K. Tarnowski, W. Urbanczyk, *All-normal dispersion hole-assisted silica fibers for generation of supercontinuum reaching midinfrared*, IEEE Photonics Journal, vol. 8(1), 7100311 (2016) DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2524550;
- [6] K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, G. Soboń, W. Urbańczyk, *Coherent supercontinuum generation up to 2.2 μm in an all-normal dispersion microstructured silica fiber*, Optics Express, vol. 24(26), pp. 30523-30536 (2016) DOI: 10.1364/OE.24.030523;
- [7] K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, A. Anuszkiewicz, P. B ejot, F. Billard, O. Faucher, B. Kibler, W. Urbanczyk, *Polarized all-normal dispersion supercontinuum reaching 2.5 μm generated in a birefringent microstructured silica fiber*, Optics Express, vol. 25(22), pp. 27452-27463 (2017) DOI: 10.1364/OE.25.027452;
- [8] J. Biedrzycki, K. Tarnowski, W. Urbańczyk, *Optimization of microstructured fibers with germanium-doped core for broad normal dispersion range*, Opto-Electronics Review, vol. 26(1), pp. 57-62 (2018) DOI: 10.1016/j.opelre.2018.01.004;
- [9] G. Statkiewicz-Barabach, K. Tarnowski, D. Kowal, P. Mergo, *Experimental analysis of Bragg reflection peak splitting in gratings fabricated using a multiple order phase mask*, Sensors, vol. 19(2), 433 (2019) DOI: 10.3390/s19020433;
- [10] K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, J. Sotor, G. Soboń, *Compact all-fiber source of coherent linearly polarized octave-spanning supercontinuum based on normal dispersion silica fiber*, Scientific Reports, vol. 9, 12313 (2019) DOI: 10.1038/s41598-019-48726-9.

Światłowody telekomunikacyjne oplatają obecnie cały świat gęstą siecią, bez której współczesne społeczeństwo informacyjne nie mogłoby istnieć. Jednocześnie, zastosowania telekomunikacyjne nie są jedynym obszarem wykorzystania światłowodów. Światłowody specjalne są wykorzystywane w medycynie, metrologii, optoelektronice. Wiele nowych zastosowań pojawiło się w ostatnim dziesięcioleciu w wyniku opracowania technologii wytwarzania światłowodów mikrostrukturalnych¹. W tego typu światłowodach, prowadzenie światła uzyskuje się dzięki obecności elementów strukturalnych o wymiarach rzędu mikrometra (np. otworów powietrznych o takiej średnicy). Duża różnica współczynników załamania szkła i powietrza umożliwia elastyczne kształtowanie właściwości światłowodów, a w konsekwencji pozwala na kontrolowanie właściwości propagującego się w nich światła. Ponadto, dzięki dużej koncentracji mocy optycznej na małej powierzchni i długiej drodze propagacji, w światłowodach mogą zachodzić nie tylko zjawiska liniowe, ale także nieliniowe. Wykorzystanie tych zjawisk do kontrolowania właściwości światła było przedmiotem moich badań, których wyniki zostały przedstawione w cyklu publikacji naukowych pt. „*Wykorzystanie zjawisk liniowych i nieliniowych do kontrolowania właściwości światła w światłowodach specjalnych.*”

Opis teoretyczny propagacji światła w światłowodach bazuje na równaniach Maxwella, z których wyprowadza się równanie Helmholtza oraz nieliniowe równanie Schrödingera. Równanie Helmholtza pozwala wyznaczać mody prowadzone w światłowodzie, natomiast nieliniowe równanie Schrödingera pozwala opisywać propagację światła z uwzględnieniem zjawisk nieliniowych². W ramach prowadzonych przeze mnie badań stosowałem zaawansowane narzędzia numeryczne do rozwiązywania tych dwóch równań. W przypadku równania Helmholtza było to komercyjne oprogramowanie Comsol Multiphysics implementujące metodę elementów skończonych, a w przypadku równania Schrödingera rozwinąłem własne implementacje numeryczne w środowisku Matlab do rozwiązywania uogólnionego nieliniowego równania Schrödingera oraz układu sprzężonych nieliniowych równań Schrödingera dla modów polaryzacyjnych. Wykorzystanie tych narzędzi numerycznych pozwoliło mi zaproponować innowacyjne konstrukcje światłowodów specjalnych, które wykazują nieosiągalne wcześniej właściwości lub poszerzają zakres wykorzystania znanych już zjawisk.

W dalszej części autoreferatu omówiłem szczegółowo uzyskane wyniki, opisując swój wkład w opublikowane prace. Podzieliłem opublikowane w ramach cyklu prace na dwie grupy zawierające wyniki dotyczące:

- zjawisk liniowych, w tym:
 - filtracji spektralnej z użyciem światłowodowych siatek Bragga (prace [1], [9]),
 - propagacji światła w światłowodach dwójłomnych o dyspersyjnej orientacji osi polaryzacyjnych (praca [3]),
- zjawisk nieliniowych, w tym:
 - konwersji częstotliwości i sprzęgania modów polaryzacyjnych w światłowodach dwójłomnych (prace [2], [4])
 - generacji koherentnego superkontinuum w światłowodach o dyspersji normalnej (prace [5-8], [10]).

¹ J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell, D. M. Atkin, “All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding,” *Optics Letters* **21**(19): 1547 (1996)

² G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, Academic Press, wyd. 5 (2013).

Zjawiska liniowe

Filtracja spektralna z użyciem światłowodowych siatek Bragga

Światłowodowe siatki Bragga pozwalają na filtrację spektralną światła propagującego się w światłowodzie. Siatkę Bragga stanowi poosiowa modulacja właściwości włókna o danym okresie (Λ), która powoduje odbicie światła o długości fali ($\lambda^{(p)}$) spełniającej warunek³:

$$\lambda^{(p)} = \frac{2}{p} n(\lambda^{(p)}) \Lambda, \quad (1)$$

gdzie $n(\lambda)$ określa zależność efektywnego współczynnika załamania modu od długości fali, natomiast p jest rzędem odbicia. Najbardziej popularną metodą wytwarzania siatek Bragga jest metoda maski fazowej⁴, w której oświetla się światłowód bocznie przez maskę fazową (siatkę dyfrakcyjną) promieniowaniem elektromagnetycznym z zakresu ultrafioletu. Wzór interferencyjny wytworzony za maską fazową, na skutek zjawiska fotoczułości szkła krzemionkowego domieszkowanego GeO_2 , przekłada się na poosiową modulację współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu. W idealnym przypadku, światłowód jest ułożony równoległe do maski fazowej o okresie Λ_d , która generuje dwa rzędy dyfrakcji: pierwszy oraz minus pierwszy. W rdzeniu włókna wytwarzana jest wtedy periodyczna modulacja współczynnika załamania o okresie $\Lambda = \Lambda_d/2$. Rzeczywiste maski fazowe generują kilka rzędów dyfrakcji wiązki UV zapisującej siatkę Bragga. W konsekwencji, wzór interferencyjny powstający za maską fazową jest bardziej złożony. W takim przypadku pochylenie włókna względem maski fazowej powoduje rozdwojenie pików Bragga. Związek między kątem pochylenia włókna, obecnością kilku rzędów dyfrakcji i rozdwojeniem pików Bragga był znany, ale bez opisu ilościowego i fizycznego wyjaśnienia przyczyny tego zjawiska⁵. Oryginalnym wynikiem przedstawionym w pracy:

- [1] K. Tarnowski, W. Urbańczyk, *Origin of Bragg reflection peaks splitting in gratings fabricated using a multiple order phase mask*, Optics Express, vol. 21(19), pp. 21800-21810 (2013)

jest wyjaśnienie fizycznej przyczyny obserwowanego eksperymentalnie rozdwojenia pików Bragga w pochylonym włóknie. Wykazałem, że jest ono spowodowane nakładaniem się siatek Bragga o różnych okresach, które powstają w wyniku interferencji wiązek UV ugiętych na masce fazowej w różne rzędy dyfrakcji (pochylenie włókna różnicuje okresy siatek powstających w rdzeniu włókna w wyniku interferencji poszczególnych par wiązek). Przykładowo, dla maski fazowej o okresie Λ_d uginającej wiązkę UV w rzędy dyfrakcji: -2 , -1 , 0 , $+1$, $+2$, w pochylonym włóknie zapisywane będą cztery różne siatki Bragga o okresach około Λ_d związane z interferencjami par wiązek: $(-2, -1)$, $(-1, 0)$, $(0, +1)$, $(+1, +2)$; trzy różne siatki Bragga o okresie około $\Lambda_d/2$ związane z interferencjami par

³ K. O. Hill, G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Light. Technol.* **15**(8): 1263-1276 (1997).

⁴ tamże

⁵ S. A. Wade, W. G. A. Brown, H. K. Bal, F. Sidirolou, G. W. Baxter, S. F. Collins, "Effect of phase mask alignment on fiber Bragg grating spectra at harmonics of the Bragg wavelength," *J. Opt. Soc. Am. A* **29**(8): 1597-1605 (2012).

wiązek: $(-2, 0)$, $(-1, +1)$, $(0, +2)$; dwie siatki o okresie około $\Lambda_d/3$ związane z interferencjami par wiązek: $(-2, +1)$, $(-1, +2)$ oraz siatka o okresie około $\Lambda_d/4$ związana z interferencją pary wiązek: $(-2, +2)$. Ogólniej, interferencja pary wiązek odchylonych do rzędów (m, q) daje wkład do siatki Bragga o okresie około $\Lambda_d/|m-q|$.

Sformułowany przeze mnie opis teoretyczny umożliwił przewidywanie długości fal, dla których pojawią się odbicia rezonansowe od nakładających się siatek Bragga zapisanych w pochylonym włóknie. Parametrami tego opisu są (oznaczenia zgodne z pracą [1]):

- kąt odchylenia fali zapisującej od normalnej do maski fazowej (α),
- kąt odchylenia płaszczyzny padania od płaszczyzny wyznaczonej przez normalną do maski fazowej i jej wektora odwrotnego (β),
- kąt pochylenia włókna względem maski fazowej (φ),
- kąt obrotu włókna względem normalnej do maski fazowej (θ).

Korzystając z tego opisu, wyjaśniłem ilościowo raportowane we wcześniejszych pracach rozdawanie pików Bragga⁶. Wynika ono z różnych okresów siatek powstających przez interferencje par wiązek: $(-1, 0)$ oraz $(0, +1)$ w pochylonym włóknie. Ponadto, przewidziałem możliwość powstawania dodatkowych pików Bragga pochodzących od interferencji par wiązek UV odchylonych przez maskę fazową w wyższe rzędy dyfrakcyjne. Przykładowo, w pobliżu pików Bragga siatki wytworzonej przez interferencję pary wiązek $(-1, 1)$ mogą być obecne dwa piki boczne związane z interferencjami par wiązek $(-2, 0)$ oraz $(0, +2)$.

Teoretyczne przewidywania dotyczące możliwości powstawania wielokrotnych pików Bragga (a nie tylko znanego wcześniej rozdwojenia) w wyniku pochylenia włókna zostały potwierdzone eksperymentalnie w pracy:

- [9] G. Statkiewicz-Barabach, K. Tarnowski, D. Kowal, P. Mergo, *Experimental analysis of Bragg reflection peak splitting in gratings fabricated using a multiple order phase mask*, Sensors, vol. 19(2), 433 (2019).

Założenia tej pracy sformułowaliśmy wspólnie z dr hab. inż. Gabriellą Statkiewicz-Barabach. Dodatkowo, mój wkład w tę pracę obejmował przeprowadzenie analizy teoretycznej danych pomiarowych. Pomiar pokazał rozdzielanie pików braggowskiego obserwowanego dla długości fali 1560 nm na pięć pików, których spektralna separacja była liniowo zależna od kąta pochylenia włókna. Wykorzystując opracowany model teoretyczny wskazałem pochodzenie poszczególnych pików Bragga: główny pik jest związany z odbiciem pierwszego rzędu od siatki powstałej przez interferencję rzędów $(-1, +1)$; natomiast dwie pary pików zlokalizowanych symetrycznie względem pików głównych związane są z: (i) odbiciem drugiego rzędu od siatek powstałych przez interferencję rzędów $(0, +1)$ oraz $(-1, 0)$; (ii) odbiciem pierwszego rzędu od siatek powstałych przez interferencję rzędów $(0, +2)$ oraz $(-2, 0)$.

W podsumowaniu, w pracach [1, 9] został podany i zweryfikowany eksperymentalnie model teoretyczny umożliwiający projektowanie siatek Bragga o kilku pikach odbiciowych, których położenie jest kontrolowane pochyleniem włókna względem maski fazowej. W ten

⁶ S. A. Wade, W. G. A. Brown, H. K. Bal, F. Sidirolou, G. W. Baxter, S. F. Collins, "Effect of phase mask alignment on fiber Bragg grating spectra at harmonics of the Bragg wavelength," *J. Opt. Soc. Am. A* **29**(8): 1597-1605 (2012).

sposób można kształtować widmo odbiciowe siatek Bragga i kontrolować długość fali światła propagującego się w światłowodzie.

Propagacja światła w światłowodach dwójłomnych o dyspersyjnej orientacji osi polaryzacyjnych

Inną właściwością światła, którą można kontrolować w światłowodach jest stan polaryzacji. Wykorzystuje się w tym celu światłowody dwójłomne⁷ oraz polaryzujące⁸, których pierwsze konstrukcje były opracowane na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Ogólnie, rozwój technologii światłowodów specjalnych umożliwił obserwację i praktyczne wykorzystanie w układach światłowodowych zjawisk występujących wcześniej jedynie w układach objętościowych.

W celu uzyskania dwójłomności należy złamać symetrię cylindryczną typową dla światłowodów telekomunikacyjnych. Można to osiągnąć poprzez wytworzenie eliptycznego rdzenia, umieszczenie elementów naprężających w płaszczu lub wprowadzenie elementów mikrostrukturalnych w pobliżu rdzenia (np. bocznych kanałów powietrznych w światłowodach typu side-hole). Wszystkie wymienione sposoby prowadzą do złamania symetrii cylindrycznej światłowodu, jednak przy zachowywaniu symetrii płaszczyznowej. W ten sposób uzyskuje się dwójłomność liniową, a kierunki osi polaryzacyjnych pokrywają się z płaszczyznami symetrii światłowodu i nie zależą od długości fali światła. Podobny charakter, czyli stałą orientację osi polaryzacyjnych w funkcji długości fali, ma dwójłomność w wielu objętościowych ośrodkach optycznych. Jednocześnie, w kryształach optycznych o układach jednoskośnym i trójskośnym znana jest zależność orientacji osi polaryzacyjnych od długości fali („dispersion of the axes”). Ciekawym zagadnieniem badawczym było przeanalizowanie możliwości uzyskania takiego efektu w światłowodzie. Moim oryginalnym wynikiem jest projekt światłowodu dwójłomnego o dyspersyjnych osiach polaryzacyjnych opublikowany w artykule:

- [3] K. Tarnowski, A. Anuszkiewicz, K. Poturaj, P. Mergo, W. Urbańczyk, *Birefringent optical fiber with dispersive orientation of polarization axes*, *Optics Express*, vol. 22(21), pp. 25347-25353 (2014).

W tej pracy zaproponowałem konstrukcję światłowodu typu side-hole o eliptycznym rdzeniu, w której osie symetrii rdzenia nie pokrywają się z osiami symetrii płaszcza. Taka konstrukcja pozwala uzyskać zależność orientacji osi polaryzacyjnych od długości fali. W zakresie krótkofalowym mod światłowodowy jest dobrze związany w rdzeniu. W takim przypadku osie polaryzacyjne światłowodu są wyznaczone przez osie symetrii elipsy rdzenia. Wraz ze wzrostem długości fali rośnie udział otworów powietrznych w przewodzeniu modu. Z tego powodu osie polaryzacyjne światłowodu obracają się stopniowo w kierunku osi symetrii płaszcza. Pozwala to uzyskać dyspersyjną orientację osi polaryzacyjnych.

Dodatkowo, mój wkład w tę pracę polegał na przeprowadzeniu obliczeń właściwości liniowych światłowodów wyidealizowanych (dwójłomność fazowa, dwójłomność grupowa,

⁷ R. B. Dyott, J. R. Cozens, D. G. Morris, “Preservation of polarisation in optical-fibre waveguides with elliptical core,” *Electron. Lett.* **15**(13): 380–382 (1979).

⁸ M. P. Varnham, D. N. Payne, R. D. Birch, E. J. Tarbox, “Single-polarisation operation of highly birefringent bow-tie optical fibres,” *Electron. Lett.* **19**(7): 246–247 (1989).

orientacja osi polaryzacyjnych). Wykorzystując narzędzia numeryczne, przeanalizowałem wpływ naprężeń termicznych związanych z różnicą współczynników rozszerzalności cieplnej czystego szkła krzemionkowego (płaszcz) oraz szkła domieszkowanego (rdzeń) na właściwości włókien. Obliczenia pokazały, że naprężenia termiczne dają znaczący wkład do dwójłomności fazowej. Należy podkreślić, że zmiana materiałowych współczynników załamania indukowana naprężeniami była obliczana w układzie odniesienia związanym z lokalnymi kierunkami naprężeń głównych, a następnie tensor przenikalności elektrycznej był transformowany do kartezyjańskiego układu odniesienia na potrzeby obliczeń elektromagnetycznych.

Ostatecznie, włókno o dyspersyjnych osiach polaryzacyjnych zostało wytworzone w Pracowni Technologii Światłowodów Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie i scharakteryzowane eksperymentalnie oraz numerycznie. Obliczenia numeryczne przeprowadziłem na podstawie obrazu przekroju włókna uzyskanego w skaningowym mikroskopie elektronowym. Pomiary i symulacje dały zgodne wyniki, potwierdzające uzyskanie pożądanego efektu – zmianę orientacji osi polaryzacyjnych o $14,5^\circ$ w zakresie spektralnym 500 nm – 1100 nm.

Tego typu światłowody mogą być wykorzystywane do kontrolowania stanu polaryzacji propagującego się w nich światła. Zmiana stanu polaryzacji światła może być wykorzystana w metrologii. Przykładowo, orientacja osi polaryzacyjnych może być zmieniana czynnikiem zewnętrznym (np. ciśnieniem hydrostatycznym), co będzie indukowało lokalne sprzężanie modów polaryzacyjnych, które można zmierzyć wykorzystując technikę polaryzacyjnej reflektometrii w dziedzinie czasu (p-OTDR polarization optical time-domain reflectometry).

Podsumowując, w pracy [3] zaproponowałem zweryfikowaną eksperymentalnie koncepcję światłowodu dwójłomnego o dyspersyjnej orientacji osi polaryzacyjnych, który można wykorzystać do kontrolowania stanu polaryzacji propagującego się w nim światła i pomiarów rozłożonych metodą polaryzacyjnej reflektometrii.

Zjawiska nieliniowe

Konwersji częstotliwości i sprzężanie modów polaryzacyjnych w światłowodach dwójłomnych

Jak wspomniano wcześniej, duża intensywność światła propagującego się w światłowodach sprzyja zachodzeniu zjawisk nieliniowych prowadzących do generowania nowych częstotliwości. W ogólności, procesy liniowe i nieliniowe zależą od właściwości światłowodów, zatem poprzez odpowiednie zaprojektowanie światłowodu można wpływać na zachodzące w nich zjawiska. Dodatkowo, można sprawić, aby te zjawiska były czułe na parametry zewnętrzne. Z jednej strony pozwala to czynnikiem zewnętrznym kontrolować właściwości propagującego się w światłowodzie światła, z drugiej strony pozwala wnioskować o zewnętrznym czynniku na podstawie mierzonych właściwości światła. Takie zależności leżą u podstaw działania czujników światłowodowych. Najczęściej wykorzystują one zjawiska liniowe, natomiast wykorzystanie zjawisk nieliniowych w czujnikach światłowodowych było pokazane w ograniczonym zakresie, np. do detekcji substancji

biologicznych⁹ i pomiaru współczynnika załamania cieczy¹⁰. W ramach prowadzonych badań przedstawiłem sposób wykorzystania zjawiska niestabilności modulacyjnej w światłowodzie specjalnym do pomiaru ciśnienia hydrostatycznego. Wyniki tych prac zostały opublikowane w artykule:

- [2] K. Tarnowski, A. Anuszkiewicz, J. Olszewski, P. Mergo, B. Kibler, W. Urbańczyk, *Nonlinear frequency conversion in a birefringent microstructured fiber tuned by externally applied hydrostatic pressure*, *Optics Letters*, vol. 38(24), pp. 5260-5263 (2013).

Mój wkład w tę pracę polegał na sformułowaniu jej założeń oraz przeprowadzeniu symulacji nieliniowej propagacji światła w światłowodzie dwójłomnym z wykorzystaniem własnej implementacji solwera układu sprzężonych nieliniowych równań Schrödingera dla modów polaryzacyjnych. W światłowodach o anomalnej dyspersji chromatycznej przy pompowaniu falą ciągłą obserwuje się niestabilność modulacyjną polegającą na konwersji energii fali pompującej (o częstości bezwzględnej ω_0) do dwóch pasm. Pasma skalarnej niestabilności modulacyjnej są położone symetrycznie względem częstości fali pompującej, a maksimum wzmocnienia obserwuje się dla częstości $\omega_0 \pm \Omega_s$. Częstość względna Ω_s zależy od nieliniowości włókna (γ), mocy fali pompującej (P_0) oraz dyspersji chromatycznej (β_2 , druga pochodna stałej propagacji względem częstości)¹¹:

$$\Omega_s = \sqrt{\frac{2\gamma P_0}{|\beta_2|}}. \quad (2)$$

W światłowodach dwójłomnych obserwuje się wektorową niestabilność modulacyjną. W tym przypadku maksima wzmocnienia generowanych pasm wektorowej niestabilności modulacyjnej pojawiają się dla częstości $\omega_0 \pm \Omega_v$. Częstość względna Ω_v zależy od dwójłomności grupowej (G) oraz dyspersji chromatycznej (β_2) światłowodu¹²:

$$\Omega_v = \frac{G}{c|\beta_2|}. \quad (3)$$

Zauważyłem, że proces wektorowej niestabilności modulacyjnej może być kontrolowany ciśnieniem hydrostatycznym w opracowanym wcześniej światłowodzie specjalnym o wysokiej czułości dwójłomności na ciśnienie hydrostatyczne¹³. W tym włóknie ciśnienie hydrostatyczne wpływa na wartość dwójłomności grupowej, bez istotnej modyfikacji dyspersji prędkości grupowej. Co za tym idzie, ciśnienie hydrostatyczne przestraja pasma wektorowej niestabilności modulacyjnej, nie modyfikując jednocześnie pasm skalarnej niestabilności modulacyjnej.

⁹ J. R. Ott, M. Heuck, C. Agger, P. D. Rasmussen, O. Bang, "Label-free and selective nonlinear fiber-optical biosensing," *Opt. Express* **16**(25): 20834 (2008).

¹⁰ M. H. Frosz, A. Stefani, O. Bang, "Highly sensitive and simple method for refractive index sensing of liquids in microstructured optical fibers using four-wave mixing," *Opt. Express* **19**(11): 10471 (2011).

¹¹ G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, Academic Press, wyd. 5 (2013).

¹² tamże

¹³ T. Martynkien, G. Statkiewicz-Barabach, J. Olszewski, J. Wojcik, P. Mergo, T. Geernaert, C. Sonnenfeld, A. Anuszkiewicz, M. Szczurowski, K. Tarnowski, M. Makara, K. Skorupski, J. Klimek, K. Poturaj, W. Urbańczyk, T. Nasilowski, F. Berghmans, H. Thienpont, "Highly birefringent microstructured fibers with enhanced sensitivity to hydrostatic pressure," *Opt. Express* **18**(14): 15113 (2010).

Powyższe przewidywania zostały potwierdzone eksperymentalnie, a wyniki przedstawiono w pracy [2]. W odcinku światłowodu specjalnego (o długości 80 cm), przy pompowaniu laserem o pracy kwazi-ciągłej na długości fali 1,064 μm , generowano pasma skalarnej oraz wektorowej niestabilności modulacyjnej. Środkowa część włókna o długości 38 cm była umieszczona w komorze ciśnieniowej wypełnionej olejem. W zakresie ciśnień od 0,1 MPa do 5 MPa obserwowano przestrojenie anty-stokesowskiego (stokesowskiego) pasma wektorowej niestabilności modulacyjnej o 324 GHz/MPa (-341 GHz/MPa). Przeprowadzone przeze mnie symulacje nieliniowej propagacji światła dały zbliżone wyniki, a dodatkowo pozwoliły uzyskać wgląd w ewolucję położenia maksimum wzmocnienia wraz z dystansem propagacji.

Zaproponowany schemat działania czujnika ciśnienia hydrostatycznego wykorzystującego zjawiska optyki nieliniowej nie wymaga dodatkowej strukturyzacji włókna w odróżnieniu od schematów działania światłowodowych czujników ciśnienia wykorzystujących siatki Bragga lub siatki typu rocking-filter. Natomiast, zakres pracy tego czujnika jest ograniczony do ciśnień, dla których dwójłomność fazowa jest niezerowa.

Gdy dwójłomność fazowa dla długości fali pompy jest bliska zeru, istotne stają się efekty nieliniowego sprzęgania modów polaryzacyjnych, które w przypadku wysokiej dwójłomności są zanedbywalne. W związku z tym, zaproponowałem przeprowadzenie badań zjawiska nieliniowego sprzęgania modów polaryzacyjnych w szerszym zakresie ciśnień, niż w poprzedniej pracy. Zakres pomiarowy został dobrany tak, aby obejmował ciśnienie, dla którego dwójłomność fazowa zmienia znak. Wyniki badań zostały opublikowane w kolejnej pracy cyklu:

- [4] K. Tarnowski, A. Anuszkiewicz, P. Mergo, B. Frisquet, B. Kibler, W. Urbanczyk, *Nonlinear mode coupling in a birefringent microstructured fiber tuned by externally applied hydrostatic pressure*, Journal of Optics, vol. 17(3), 035506 (2015).

Dodatkowo, mój wkład w tę pracę obejmował przeprowadzenie symulacji propagacji nieliniowej fali ciągłej w światłowodzie o dwójłomności przestrajanej ciśnieniem. Rozwiązywałem równanie różniczkowe postaci:

$$\frac{d\mathbf{S}}{dz} = \mathbf{W} \times \mathbf{S}, \quad (4)$$

opisujące ewolucję stanu polaryzacji światła wzdłuż drogi propagacji (z) z wykorzystaniem wektora Stokesa $\mathbf{S} = [S_1, S_2, S_3]$. Wektor $\mathbf{W} = \mathbf{W}_L + \mathbf{W}_{NL}$ reprezentuje sumaryczny wkład

efektów liniowych – wyrażanych wektorem $\mathbf{W}_L = \left[\frac{2\pi}{\lambda} B, 0, 0 \right]$, gdzie B oznacza

dwójłomność fazową – oraz efektów nieliniowych wyrażanych wektorem $\mathbf{W}_{NL} = \left[0, 0, -\frac{2}{3} \gamma S_3 \right]$. Przeprowadzone symulacje pokazały, że gdy dwójłomność fazowa

włókna poddanego działaniu ciśnienia hydrostatycznego jest bliska zeru, to znacząco rośnie okres w periodycznym procesie sprzęgania modów polaryzacyjnych. Zatem, odpowiednio dobierając długość odcinka światłowodu poddanego działaniu ciśnienia, moc fali pompującej oraz wartość ciśnienia można kontrolować stan polaryzacji na wyjściu włókna lub, charakteryzując stan polaryzacji światła, wnioskować o ciśnieniu. Zaletą takiego

rozwiązania jest uproszczony pomiar właściwości światła, gdyż zamiast widma promieniowania (rejestrowanego np. optycznym analizatorem widma) mierzymy tylko moc optyczną.

W przeprowadzonych pomiarach nie zauważono zależności sprzężenia modów polaryzacyjnych od mocy fali pompującej. Zaproponowałem wyjaśnienie tej obserwacji, które pozwoliło uzyskać dobrą zgodność wyników pomiarów i obliczeń. Efekt nieliniowej konwersji energii między modami polaryzacyjnymi był niewidoczny w dostępnym w eksperymencie zakresie mocy ze względu na liniowe sprzężenie modów polaryzacyjnych w przejściach do komory ciśnieniowej. Sprzężenie modów jest związane z lokalnymi naprężeniami indukowanymi w miejscach mocowania włókna w komorze ciśnieniowej z użyciem kleju epoksydowego.

Podsumowując, w pracach [2] i [4] zaproponowałem wykorzystanie zjawisk konwersji energii w światłowodach dwójłomnych: wektorowej niestabilności modulacyjnej oraz nieliniowego sprzężenia modów polaryzacyjnych do pomiarów ciśnienia hydrostatycznego. Przeprowadzone symulacje numeryczne zostały odniesione do wyników pomiarowych oraz pokazały zalety i ograniczenia zaproponowanych rozwiązań.

Generacja koherentnego superkontinuum w światłowodach o dyspersji normalnej

Narzędzia numeryczne rozwinięte do modelowania nieliniowej propagacji światła w światłowodach – w szczególności własne oprogramowanie do rozwiązywania układu sprzężonych nieliniowych równań Schrödingera dla modów polaryzacyjnych – zostało przeze mnie wykorzystane do przeprowadzenia badań generacji superkontinuum w światłowodach.

Superkontinuum, czyli płaskie i szerokie widmo jest generowane dzięki interakcji wielu zjawisk nieliniowych. Generacja superkontinuum w światłowodach jest bardzo efektywna ze względu na dalekie dystanse propagacji oraz koncentrację mocy optycznej na małej powierzchni. W zależności od reżimu pompowania (od impulsów femtosekundowych do pracy ciągłej) oraz od przebiegu dyspersji chromatycznej światłowodu, istotne dla generacji superkontinuum są różne zjawiska nieliniowe, a uzyskiwane widmo charakteryzuje się różnymi właściwościami¹⁴. Najszersze zakresy spektralne uzyskuje się przy pompowaniu impulsami femtosekundowymi w pobliżu zera dyspersji¹⁵. Widmo generowane w takich warunkach nie zachowuje jednak koherencji spektralnej, a impuls pompujący rozpada się w trakcie propagacji na wiele impulsów. Z drugiej strony, praca w reżimie dyspersji normalnej pozwala zachować pojedynczy impuls, utrzymać koherencję spektralną i wygenerować płaskie spektralnie superkontinuum, choć generowane widmo nie jest tak szerokie¹⁶. Zaletą tak wygenerowanego superkontinuum jest możliwość jego kompresji czasowej do bardzo krótkiego impulsu i wykorzystania w ultraszybkiej spektroskopii. Do zastosowań spektroskopowych przydatne jest osiągnięcie zakresu średniej podczerwieni, w którym wiele związków chemicznych ma charakterystyczne pasma absorpcyjne. W pierwszych pracach dotyczących superkontinuum generowanego w reżimie dyspersji

¹⁴ J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," *Rev. Mod. Phys.* **78**(4): 1135 (2006).

¹⁵ J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz, "Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm," *Opt. Lett.* **25**(1): 25 (2000).

¹⁶ A. M. Heidt, "Pulse preserving flat-top supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers," *J. Opt. Soc. Am. B* **27**(3): 550–559 (2010).

normalnej (ANDi – all-normal dispersion) w światłowodach krzemionkowych jego zakres był ograniczony do $1,5 \mu\text{m}$ ¹⁷. W celu przesunięcia zakresu pracy w stronę fal dłuższych wykorzystywano inne szkła wieloskładnikowe o przesuniętym w stronę średniej podczerwieni oknie transmisyjnym.

Okno transmisyjne szkła krzemionkowego sięga powyżej $2,5 \mu\text{m}$, zatem zbadanie możliwości przesunięcia dyspersji normalnej powyżej $1,5 \mu\text{m}$ w światłowodach krzemionkowych było istotne dla pełnego wykorzystania ich potencjału. Ponadto, światłowody krzemionkowe jest łatwo łączyć ze standardowymi elementami światłowodowymi. Opracowanie światłowodów krzemionkowych o dyspersji normalnej przesuniętej w stronę fal dłuższych było celem kierowanego przez mnie projektu „Generacja superkontinuum w bliskiej podczerwieni w reżimie dyspersji normalnej w dwójłomnych mikrostrukturalnych włóknach krzemionkowych.” Projekt był finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w ramach programu SONATA 7 (nr 2014/13/D/ST7/02090). Pozycje [5-8] cyklu artykułów prezentują wyniki uzyskane w ramach tego projektu.

Moim osiągnięciem przedstawionym w pracy:

- [5] K. Tarnowski, W. Urbanczyk, *All-normal dispersion hole-assisted silica fibers for generation of supercontinuum reaching midinfrared*, IEEE Photonics Journal, vol. 8(1), 7100311 (2016),

są projekty krzemionkowych światłowodów mikrostrukturalnych o dyspersji normalnej pozwalających na generację koherentnego superkontinuum przy pompowaniu laserami impulsowymi pracującym na długości fali $1,55 \mu\text{m}$ oraz $1,97 \mu\text{m}$. Zaproponowałem konstrukcje włókien typu hole-assisted o sześciu kanałach powietrznych i rdzeniu domieszkowanym szkłem germanowym. Przy odpowiednio dobranych parametrach geometrycznych i poziomie domieszki uzyskuje się pożądaną przebieg dyspersji.

Wykorzystując narzędzia numeryczne bazujące na metodzie elementów skończonych przeprowadziłem obliczenia właściwości światłowodów (dyspersja chromatyczna, efektywne pole modu). Następnie przeprowadziłem symulacje nieliniowej propagacji światła w zaprojektowanych włóknach. Obliczenia pokazały, że możliwe jest przesunięcie długofalowej granicy widma superkontinuum generowanego w światłowodach krzemionkowych powyżej $2,5 \mu\text{m}$. Dodatkowo, przeprowadzając serię symulacji z uwzględnieniem szumu (wykorzystując model szumu jednofotonowego), potwierdziłem koherencję generowanych widm.

W kolejnej pracy cyklu:

- [6] K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, G. Soboń, W. Urbańczyk, *Coherent supercontinuum generation up to $2.2 \mu\text{m}$ in an all-normal dispersion microstructured silica fiber*, Optics Express, vol. 24(26), pp. 30523-30536 (2016),

przedstawiono dwa włókna krzemionkowe o dyspersji normalnej wytworzone w Pracowni Technologii Światłowodów Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie oraz potwierdzono eksperymentalnie możliwość generacji superkontinuum sięgającego do $2,2 \mu\text{m}$. Mój wkład w tę pracę polegał na opracowaniu koncepcji badań i przeprowadzeniu

¹⁷ A. Hartung, A. M. Heidt, H. Bartelt, “Design of all-normal dispersion microstructured optical fibers for pulse-preserving supercontinuum generation,” *Opt. Express* **19**(8): 7742 (2011).

obliczeń numerycznych. Modelowanie obejmowało wyznaczenie właściwości włókien rzeczywistych na podstawie obrazów przekrojów włókien uzyskanych w skaningowym mikroskopie elektronowym oraz przeprowadzenie symulacji procesu generacji superkontinuum w obu włóknach na odcinku 80 cm, przy pompowaniu laserami impulsowymi pracującymi na długości fali 1,56 μm i generującymi impulsy o czasach trwania (szerokość połówkowa) 23 fs oraz 460 fs. W symulacjach nieliniowej propagacji światła uwzględniłem zależność efektywnego pola modu od długości fali. Dodatkowo, przeprowadziłem analizę wpływu nieidealnego kształtu impulsu na charakterystyki zarejestrowanych widm, wskazując przyczynę ich niejednorodności.

W omówionych pracach [5-6], modelowanie zjawisk nieliniowych bazowało na skalarnym nieliniowym równaniu Schrödingera. W kolejnym etapie badań prowadziłem symulacje wykorzystując również układ sprzężonych nieliniowych równań Schrödingera dla modów polaryzacyjnych. Pozwoliło to opisać propagację światła i zamodelować generację spolaryzowanego superkontinuum w światłowodzie dwójłomnym o dyspersji normalnej.

Mój wkład w kolejną pracę cyklu:

- [7] K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, A. Anuszkiewicz, P. Béjot, F. Billard, O. Faucher, B. Kibler, W. Urbanczyk, *Polarized all-normal dispersion supercontinuum reaching 2.5 μm generated in a birefringent microstructured silica fiber*, Optics Express, vol. 25(22), pp. 27452-27463 (2017),

polegał na opracowaniu jej założeń, zaprojektowaniu włókna dwójłomnego oraz przeprowadzeniu modelowania numerycznego. W ramach zrealizowanych badań zaprojektowałem dwójłomny krzemionkowy światłowod mikrostrukturalny o rdzeniu domieszkowanym tlenkiem germanu. Dwójłomność światłowodu indukowana była przez ściśnięcie sieci mikrostruktury w jednym kierunku (squeezed lattice). Zaprojektowany światłowod został następnie wytworzony w Pracowni Technologii Światłowodów Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Uzyskano bardzo dobrą zgodność dyspersji chromatycznej wyznaczonej z pomiarów oraz obliczonej na podstawie mikroskopowego obrazu przekroju włókna. Dyspersja chromatyczna (D [ps/km/nm]) jest ujemna dla długości fali mniejszych niż 2,56 μm , osiągając maksymalną wartość -2 ps/km/nm dla długości fali 1,6 μm , a jej przebieg jest płaski w szerokim zakresie spektralnym (wartość dyspersji nie spada poniżej -20 ps/km/nm dla zakresu spektralnego od 1,23 μm do 2,56 μm). Jednocześnie, włókno wykazuje dużą dwójłomność fazową rzędu 10^{-4} .

W kolejnym kroku, wygenerowano superkontinuum w krótkim odcinku włókna (48 mm) poprzez pompowanie impulsami o czasie trwania 70 fs i długości fali przestrajalnej od 1,8 μm do 2,4 μm oraz mocy szczytowej około 400 kW. Zbadano zależność generowanych widm od mocy impulsu i długości fali pompy. Dla wszystkich kombinacji parametrów eksperymentalnych przeprowadziłem symulacje numeryczne odtwarzając zarejestrowane widma.

Dla wybranej długości fali przeprowadzono również pomiary czystości polaryzacyjnej generowanych widm. W pomiarach wprowadzano światło do wybranego modu polaryzacyjnego, a następnie rejestrowano widma w tym modzie oraz w modzie o ortogonalnej polaryzacji. Pomiary pokazały, że pompowanie w modzie szybkim jest mniej korzystne dla stopnia polaryzacji widma, niż pompowanie w modzie wolnym. Przy

pompowaniu w modzie wolnym współczynnik wygaszenia polaryzacji jest większy, niż przy pompowaniu w modzie szybkim i znacząco przekracza 10 dB w całym zakresie spektralnym. Przeprowadziłem symulacje numeryczne, w których odtworzyłem ten efekt, uzyskując jakościową zgodność z wynikami eksperymentu. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowałem wyjaśnienie obserwowanego efektu. Przy pompowaniu w modzie wolnym, zmiana współczynnika załamania związana z nieliniowością ośrodka powiększa niedopasowanie fazowe ortogonalnych modów wynikające z dużej dwójłomności fazowej. Przy pompowaniu w modzie szybkim, nieliniowa zmiana współczynników załamania powoduje zmniejszenie niedopasowania fazowego i umożliwia sprzęganie modów polaryzacyjnych.

Najważniejszymi wynikami przedstawionymi w pracy [7] są: (i) przesunięcie długofalowej krawędzi widma superkontinuum generowanego w reżimie dyspersji normalnej w światłowodach krzemionkowych do $2,56 \mu\text{m}$, (ii) generacja spolaryzowanego superkontinuum typu ANDi (PoLAND – polarized all-normal dispersion).

W pracy [7] długofalowe ograniczenie zakresu widma superkontinuum typu ANDi wynikało z położenia zera dyspersji chromatycznej. W związku z tym zaproponowałem przeprowadzenie optymalizacji konstrukcji krzemionkowych włókien mikrostrukturalnych o domieszkowanym rdzeniu ze względu na położenie zera dyspersji chromatycznej. Dodatkową cechą, którą powinny posiadać optymalizowane włókna jest wysoka nieliniowość. W tym celu narzuciłem warunek utrzymania efektywnego pola modu poniżej $30 \mu\text{m}^2$. Wspólnie z mgr. inż. Jędrzejem Biedrzyckim opracowaliśmy modele numeryczne krzemionkowych światłowodów mikrostrukturalnych o rdzeniu domieszkowanym szkłem germanowym. Wyniki obliczeń uzyskanych z wykorzystaniem tych modeli zostały przedstawione w kolejnej pracy cyklu:

- [8] J. Biedrzycki, K. Tarnowski, W. Urbańczyk, *Optimization of microstructured fibers with germanium-doped core for broad normal dispersion range*, Opto-Electronics Review, vol. 26(1), pp. 57-62 (2018).

Dodatkowo, mój wkład w tę pracę polegał także na weryfikacji uzyskanych wyników numerycznych. W omawianej pracy pokazano, że zwiększenie poziomu domieszkowania jest korzystne dla rozszerzenia zakresu dyspersji normalnej. Ostatecznie, zaproponowano kilka konstrukcji światłowodów o różnych geometriach płaszcza, z których najlepsza charakteryzuje się normalną dyspersją chromatyczną i małym efektywnym polem modu dla długości fali poniżej $2,81 \mu\text{m}$.

Ważną cechą wszystkich opracowanych i wytworzonych światłowodów krzemionkowych jest możliwość łatwego łączenia ich z innymi elementami optoelektronicznymi, np. z laserami światłowodowymi. Światłowod dwójłomny o dyspersji normalnej opisany w pracy [7] został dospawany do wyjścia lasera światłowodowego opracowanego na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej¹⁸.

¹⁸ J. Sotor, G. Sobon, "24 fs and 3 nJ pulse generation from a simple, all polarization maintaining Er-doped fiber laser," *Laser Phys. Lett.* **13**(12): 125102 (2016).

W ten sposób powstało w pełni światłowodowe źródło koherentnego superkontinuum. Źródło to zostało przedstawione w ostatniej pracy cyklu:

[10] K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, J. Sotor, G. Soboń, *Compact all-fiber source of coherent linearly polarized octave-spanning supercontinuum based on normal dispersion silica fiber*, Scientific Reports, vol. 9, 12313 (2019).

Założenia tej pracy opracowaliśmy wspólnie z dr hab. inż. Grzegorzem Soboniem. Dodatkowo, mój wkład w tę pracę polegał na zaprojektowaniu światłowodu nieliniowego, przeprowadzeniu symulacji nieliniowej propagacji światła oraz opracowaniu wyników eksperymentalnych. Charakterystyka eksperymentalna wsparta symulacjami numerycznymi pokazała, że opracowane źródło światła daje widmo superkontinuum o szerokości jednej oktawy (od 1,1 μm do 2,2 μm); o współczynniku koherencji sięgającym 1 (na podstawie interferencji kolejnych impulsów); stosunku sygnału do szumu powyżej 10 dB w całym zakresie spektralnym, a osiagającym maksimum o wartości 20 dB oraz liniowo spolaryzowanym spektrum (współczynnik wygaszenia polaryzacji na poziomie 1:57).

Podsumowując: (i) zaproponowałem osiągalne technologicznie konstrukcje mikrostrukturalnych światłowodów krzemionkowych o szerokim zakresie dyspersji normalnej [5, 8], (ii) zamodelowałem przebieg procesu generacji superkontinuum w wytworzonych włóknach w bezpośrednim odniesieniu do eksperymentu, przewidując wysoką koherencję widm [6], (iii) zaproponowałem konstrukcję światłowodu o wysokiej dwójłomności i dyspersji normalnej [7], (iv) zamodelowałem generację superkontinuum spolaryzowanego w powiązaniu z eksperymentem, wyjaśniając fizyczne przyczyny różnej czystości polaryzacyjnej (stopnia polaryzacji) widm w zależności od polaryzacji pompowanego modu [7]. W ten sposób, pokazałem możliwość wykorzystania światłowodów specjalnych do kontrolowania koherencji i stopnia polaryzacji generowanych widm superkontinuum.

Ostatecznie, pokazałem praktyczne wykorzystanie opracowanych włókien dwójłomnych do budowy w pełni światłowodowego źródła superkontinuum, emitującego koherentne i spolaryzowane widmo [10]. Takie źródło światła może być wykorzystywane w badaniach spektroskopowych, detekcji gazów, szerokopasmowej interferometrii w podczerwieni, charakteryzacji spektralnej systemów telekomunikacyjnych i diagnostyce medycznej (OCT).

Podsumowanie

Wyniki przedstawione w cyklu publikacji naukowych pokazują różnorodne sposoby kontrolowania właściwości światła z wykorzystaniem światłowodów specjalnych. Wspólny mianownik mojego wkładu w opisane prace stanowią:

- opracowanie narzędzi teoretycznych (wykorzystujących podejście analityczne oraz numeryczne) do modelowania propagacji światła w światłowodach specjalnych;
- innowacyjne konstrukcje światłowodów specjalnych;
- koncepcje badań eksperymentalnych potwierdzających skuteczność przedstawionych sposobów kontrolowania właściwości światła.

Eksperymentalna weryfikacja sformułowanych przeze mnie przewidywań niezaprzeczalnie podniosła wagę opublikowanych prac naukowych. Uzyskanie wyników

eksperymentalnych nie byłoby możliwe bez mojej współpracy z eksperymentatorami w ramach **Grupy Optyki Światłowodów** (Katedra Optyki i Fotoniki, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wrocławska). Ponadto, istotny wkład w badania eksperymentalne przedstawione w pracach wchodzących w cykl publikacji mieli współpracownicy z **Pracowni Technologii Światłowodów** (Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie), **Grupy Elektroniki Laserowej i Światłowodowej** (Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki, Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławska) oraz **Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne** (Université Bourgogne Franche-Comté, Dijon).

Jednocześnie, na podkreślenie zasługuje fakt, że we wszystkich wątkach, poruszonych w ramach cyklu pt. „Wykorzystanie zjawisk liniowych i nieliniowych do kontrolowania właściwości światła w światłowodach specjalnych,” motywacją do przeprowadzonych prac eksperymentalnych były uzyskane przeze mnie wyniki teoretyczne i numeryczne. W zakresie zjawisk liniowych są to:

- model teoretyczny umożliwiający projektowanie siatek Bragga o kilku pikach odbiciowych, których położenie jest kontrolowane pochyleniem włókna względem maski fazowej [1, 9],
- koncepcja światłowodu dwójłomnego o dyspersyjnej orientacji osi polaryzacyjnych [3];

natomiast w zakresie zjawisk nieliniowych:

- propozycja wykorzystania zjawisk wektorowej niestabilności modulacyjnej [2] oraz nieliniowego sprzęgania modów polaryzacyjnych w światłowodach dwójłomnych [4] do pomiarów ciśnienia hydrostatycznego,
- wykazanie możliwości przesunięcia długofalowej granicy koherentnego widma superkontinuum generowanego w światłowodach krzemionkowych o dyspersji normalnej [5, 6, 8] oraz uzyskania spolaryzowanego koherentnego widma superkontinuum w dwójłomnych światłowodach krzemionkowych o dyspersji normalnej [7, 10].

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

Podstawowym miejscem prowadzenia mojej działalności naukowej jest Wydział Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej, z którym jestem związany od roku akademickiego 2002/2003, w którym rozpocząłem jednolite studia magisterskie na kierunku Fizyka. Od roku akademickiego 2007/2008, byłem doktorantem Wydziału, a stopień naukowy doktora nadała mi 23 października 2012 Rada Instytutu Fizyki. Od 1 października 2012 jestem pracownikiem Wydziału – początkowo byłem zatrudniony na stanowisku asystenta, a od 1 października 2014 pracuję na stanowisku adiunkta.

Jednocześnie wykazywałem się aktywnością naukową realizowaną w dwóch zagranicznych instytucjach naukowych. W trakcie I roku studiów III stopnia odbyłem trzymiesięczny staż naukowy (luty-maj 2008) – praktyki w ramach programu Leonardo da Vinci – w **Institute Fresnel** (Marsylia, Francja) pod opieką prof. Gilles’a Renversez. Natomiast od roku 2010 dziesięciokrotnie gościłem w **Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne** w Dijon. Były to krótkie staże naukowe i konsultacje realizowane w ramach polsko-francuskiej współpracy dwustronnej Polonium. Początkowo byłem uczestnikiem projektów koordynowanych przez prof. Wacława Urbańczyka („Konwersja częstotliwości w nieliniowych światłowodach fotonicznych” w ramach programu Polonium 2010-2011; „Od nieliniowej konwersji częstotliwości w zewnętrznie przestrajalnych światłowodach fotonicznych do nieliniowych czujników światłowodowych” w ramach programu Polonium 2013-2014), a następnie byłem koordynatorem dwóch kolejnych projektów („Źródło supercontinuum z wykorzystaniem światłowodów ANDi do zastosowań w ultraszybkiej spektroskopii absorpcyjnej w zakresie średniej podczerwieni” w ramach programu Polonium 2016-2017; „Nieliniowa propagacja światła w światłowodach wielomodowych” w ramach programu Polonium 2019-2020). Opisana aktywność zagraniczna zaowocowała łącznie sześcioma publikacjami naukowymi, w tym: dwoma publikacjami przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora¹⁹ oraz czterema publikacjami po uzyskaniu stopnia naukowego doktora²⁰, a ponadto dziewięcioma prezentacjami konferencyjnymi w tym: trzema referatami przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora²¹ oraz trzema referatami i trzema plakatami po uzyskaniu stopnia naukowego doktora²².

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

6.1 Informacja o osiągnięciach dydaktycznych

Moja podstawowa działalność dydaktyczna od zatrudnienia na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki obejmuje prowadzenie kursów metod numerycznych i podstaw programowania dla studentów Wydziału. W tym czasie przygotowałem i byłem opiekunem oraz głównym prowadzącym siedmiu kursów dydaktycznych: *Analiza numeryczna*, *Metody numeryczne w fizyce*, *Wstęp do obliczeń naukowych w języku C*, *Wstęp do programowania* (Fizyka Techniczna

¹⁹ pozycje [A.8], [A.10] wykazu w pkt. II.4.1, zał. 7

²⁰ pozycje [B.3], [B.7], [B.12], [B.15] wykazu w pkt. II.4.2, zał. 7

²¹ pozycje [C.9], [C.11], [C.14] wykazu w pkt. II.7.1, zał. 7

²² pozycje [D.1], [D.4], [D.5], [D.12], [D.13], [D.14] wykazu w pkt. II.7.2, zał. 7

i Optyka), *Programowanie proceduralne, Wstęp do programowania* (Inżynieria kwantowa), *Techniki programowania*. Prowadziłem także inne kursy podstawowe dla studentów różnych Wydziałów (ćwiczenia rachunkowe z Fizyki) i specjalistyczne dla studentów Wydziału Podstawowych Problemów Techniki (*Studenckie laboratorium obliczeniowe, Metody numeryczne w optyce*). Szczegółowe zestawienie wszystkich kursów, które prowadziłem zawarłem w Tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie prowadzonych kursów dydaktycznych w latach akademickich od 2012/13 do 2019/20 (wyłuszczone nazwy kursów, których byłem opiekunem).

Kurs	forma ²³	stopień studiów	kierunek studiów ²⁴
2012/2013 sem. zimowy			
Fizyka 1.2	C	I	SKP
Fizyka 1.3A	C	I	IB
Metody numeryczne w optyce	L	II	Opt
2012/2013 sem. letni			
Analiza numeryczna	W, C	I	Fiz, FT, Opt
Studenckie laboratorium obliczeniowe	P	I	Fiz
Fizyka	C	I	IS
Metody numeryczne w fizyce	C	II	FT, Opt
2013/2014 sem. zimowy			
Fizyka 1.1	C	I	Bud
Fizyka 1.3A	C	I	IB
2013/2014 sem. letni			
Analiza numeryczna	W, C	I	Fiz, FT, Opt
Studenckie laboratorium obliczeniowe	P	I	Fiz
Metody numeryczne w fizyce	W, C, L	II	FT, Opt
2014/2015 sem. zimowy			
Fizyka 1.3A	C	I	IB
Fizyka F1	C	I	Opt
Metody numeryczne w optyce	L	II	Opt
2014/2015 sem. letni			
Analiza numeryczna	W, C	I	Fiz, FT, Opt
Studenckie laboratorium obliczeniowe	P	I	Fiz
Metody numeryczne w fizyce	W, C, L	II	FT, Opt
Wstęp do obliczeń naukowych w języku C	W, C	I	FT, Opt
2015/2016 sem. zimowy			
Fizyka 1.3A	C	I	IB
Wstęp do programowania	L	I	FT, Opt
Metody numeryczne w optyce	L	II	Opt
2015/2016 sem. letni			
Metody numeryczne w fizyce	W, C, L	II	FT, Opt
Programowanie proceduralne	W, L	I	FT, Opt
2016/2017 sem. zimowy			
Wstęp do programowania	L	I	FT, Opt
Wstęp do informatyki i programowania	C, L	I	IKw

²³ W – wykład, C – ćwiczenia, L – laboratorium, P - projekt

²⁴ Bud – Budownictwo, Fiz – Fizyka, FT – Fizyka techniczna, IB – Inżyniera biomedyczna, IKw – Inżynieria kwantowa, IS – Inżyniera środowiska, Opt – Optyka, SKP – Studium Kształcenia Podstawowego.

2016/2017 sem. letni			
Metody numeryczne w fizyce	W, C, L	II	FT, Opt
Programowanie proceduralne	W, L	I	FT, Opt
2017/2018 sem. zimowy			
Wstęp do programowania	L	I	FT, Opt
Wstęp do programowania	W, C, L	I	IKw
2017/2018 sem. letni			
Metody numeryczne w fizyce	W, C, L	II	FT, Opt
Programowanie proceduralne	W, L	I	FT, Opt
Techniki programowania	W, L	I	IKw
2018/2019 sem. zimowy			
Wstęp do programowania	L	I	FT, Opt
Wstęp do programowania	W, C, L	I	IKw
2018/2019 sem. letni			
Metody numeryczne w fizyce	W, C, L	II	FT, Opt
Programowanie proceduralne	W, L	I	FT, Opt
Techniki programowania	W, L	I	IKw
Inżynierskie systemy informatyczne	P	I	IKw
2019/2020 sem. zimowy			
Wstęp do programowania	L	I	FT, Opt
Wstęp do programowania	W, C, L	I	IKw
2019/2020 sem. letni			
Metody numeryczne w fizyce	W, C, L	II	FT, Opt
Programowanie proceduralne	W, L	I	FT, Opt
Techniki programowania	W, L	I	IKw
Inżynierskie systemy informatyczne	P	I	IKw

Osiągnięciem związanym z prowadzonymi zajęciami jest **współautorstwo skryptu** pt. „Studenckie laboratorium obliczeniowe,” który był wykorzystywany w trakcie kursu Studenckie laboratorium obliczeniowe (J. Olszewski, R. Orlik, G. Pawlik, K. Tarnowski, W. Salejda, *Studenckie laboratorium obliczeniowe*, Politechnika Wrocławska, 2011).

Szczególnym dla mnie wyróżnieniem są **Nagrody dla najlepszego dydaktyka** przyznane przez studentów Wydziału Podstawowych Problemów Techniki. W konkursie organizowanym przez Samorząd Studencki Wydziału Podstawowych Problemów Techniki od 2016 zostałem czterokrotnie nagrodzony w kategorii *Mistrz uśmiechu* (w latach: 2017, 2018, 2019, 2020).

Byłem także promotorem prac dyplomowych. Pod moją opieką 4 osoby uzyskały **tytuł zawodowy inżyniera**:

- Wiktor Włodarski (2014/2015),
- Sylwia Majchrowska (2015/2016),
- Barbara Belec (2018/2019),
- Bartłomiej Bogajewicz (2019/2020),

natomiast 7 osób uzyskało **tytuł zawodowy magistra**:

- Wiktor Włodarski (2015/2016),
- Łukasz Łabędź (2016/2017),
- Sylwia Majchrowska (2016/2017),

- Jakub Pabisiak (2016/2017),
- Anna Żelazo (2016/2017),
- Anna Mazurkiewicz (2019/2020),
- Karolina Stefańska (2019/2020).

W przewodzie doktorskim Sylwii Majchrowskiej (promotor: prof. Wacław Urbańczyk) pełnię rolę **promotora pomocniczego**.

6.2 Informacja o osiągnięciach organizacyjnych.

W ramach działalności organizacyjnej prowadzonej na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki:

- byłem **członkiem Rady Wydziału** – przedstawicielem z grona nauczycieli akademickich nie będących samodzielnyimi pracownikami naukowymi (od 2016 do 2019),
- byłem **delegatem** z grona nauczycieli akademickich, zatrudnionych na stanowiskach innych niż profesor lub profesor uczelni na **wybory do Senatu Uczelni** w 2020,
- brałem udział w przygotowaniu i obsłudze w trakcie **akredytacji kierunków Fizyka Techniczna i Optyka** w roku akademickim 2016/2017 przez Polską Komisję Akredytacyjną,
- prowadziłem **hospitacje** w ramach Wydziałowego Systemu Zapewniania Jakości Kształcenia (lata akademickie 2016/17, 2017/2018, 2018/2019),
- brałem udział w przygotowaniu, przeprowadzeniu, ocenianiu oraz analizie wyników **egzaminów z kursów Fizyki Ogólnej** w latach 2007-2020,
- brałem udział w **przygotowaniu i obsłudze konferencji**: XIX Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Wojanów 2014,
- byłem **członkiem komitetu naukowego konferencji**: Nonlinear Optics Applications, XIV International Workshop, Wrocław 2018.

6.3 Informacja o osiągnięciach popularyzatorskich.

- prowadziłem **prezentacje** kierunku Fizyka Techniczna (specjalność Fotonika) w ramach **Dni Otwartych** na Politechnice Wrocławskiej (lata 2014 – 2019),
- wygłosiłem **wykład zaproszony** w ramach IV Ogólnopolskiej Studenckiej Fizyczno-Optycznej Konferencji FOKA 2019, (07.12.2019),
- byłem gościem Akademii Młodych Odkrywców PWr (13.12.2019) – współprowadziłem zajęcia popularyzatorskie skierowane do dzieci.

7. Inne ważne informacje dotyczące kariery zawodowej

W mojej ocenie korzystny wpływ na dorobek wypracowany w trakcie kariery zawodowej miały liczne współprace naukowe, które zaowocowały publikacjami naukowymi. Mój wkład w te publikacje dotyczył modelowania numerycznego oddziaływania światła z materia, a ich zakres często wykraczał poza optykę światłowodów. Poniżej umieściłem zestawienie instytucji, z którymi współpracowałem ze wskazaniem wspólnych publikacji w wykazie opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych (zał. 7):

- **Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej** (Lublin, Polska),
14 wspólnych publikacji (pozycje: [A.5], [A.6], [B.1], [B.3], [B.6], [B.7], [B.13], [B.14], [B.15], [B.17], [B.18], [B.20], [B.21], [B.22]);
- **Université Bourgogne Franche-Comté** (Dijon, Francja),
6 wspólnych publikacji (pozycje: [A.8], [A.10], [B.3], [B.7], [B.12], [B.15]);
- **Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki, Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej** (Wrocław, Polska),
5 wspólnych publikacje (pozycje: [B.10], [B.13], [B.14], [B.17], [B.21]);
- **Politechnika Wroclawska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Katedra Fizyki Teoretycznej** (Wrocław, Polska),
4 wspólne publikacje (pozycje: [A.11], [B.5], [B.8], [B.11]);
- **Politechnika Wroclawska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Katedra Fizyki Doświadczalnej** (Wrocław, Polska),
3 wspólne publikacje (pozycje: [B.8], [B.11], [B.19]);
- **Pennsylvania State University** (Pensylwania, USA),
2 wspólne publikacje (pozycje: : [A.11], [B.5]);
- **Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki** (Wrocław, Polska),
2 wspólne publikacje (pozycje: [A.7], [A.9]);
- **Vrije Universiteit Brussel** (Bruksela, Belgia),
2 wspólne publikacje (pozycje: [A.5], [A.6]);
- **Uniwersytet Warszawski** (Warszawa, Polska),
wspólna publikacja (pozycja [B.22]);
- **Universität Bern** (Berno, Szwajcaria),
wspólna publikacja (pozycja [B.22]);
- **Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych** (Warszawa, Polska),
wspólna publikacja (pozycja [B.22]);
- **Universidad de Cantabria** (Santander, Hiszpania)
wspólna publikacja (pozycja [A.4]).

W trakcie kariery zawodowej zostałem nagrodzony licznymi nagrodami i stypendiami. Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora:

- **stypendium** projektu „Rozwój potencjału dydaktyczno-naukowego młodej kadry akademickiej Politechniki Wrocławskiej” finansowane z Europejskiego Funduszu Społecznego w II edycji konkursu (kwiecień-wrzesień 2010);
- **stypendium** z funduszu własnego Politechniki Wrocławskiej – semestr letni roku akademickiego 2010/11;

- **stypendium** w ramach subsydium profesorskiego prof. Wacława Urbańczyka Fundacji na rzecz Nauki Polskiej MISTRZ lata 2010-12;
- **stypendium** projektu „Rozwój potencjału dydaktyczno-naukowego młodej kadry akademickiej Politechniki Wrocławskiej” finansowane z Europejskiego Funduszu Społecznego w IV edycji konkursu (kwiecień-wrzesień 2011);
- **stypendium** z funduszu własnego Politechniki Wrocławskiej – semestr letni roku akademickiego 2011/12;

po uzyskaniu stopnia naukowego doktora:

- **stypendium** programu stypendialnego Fundacji na rzecz Nauki Polskiej Start 2013;
- **nagroda Rektora** Politechniki Wrocławskiej 2013;
- **stypendium** programu stypendialnego Fundacji na rzecz Nauki Polskiej Start 2014;
- **stypendium** Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców, lata 2015-2018;
- **nagroda Rektora** Politechniki Wrocławskiej 2017;
- **nagroda Rektora** Politechniki Wrocławskiej 2018;
- **nagroda Rektora** Politechniki Wrocławskiej 2019;
- **nagroda Rektora** Politechniki Wrocławskiej 2020.

Karol Tarnowski

.....

(podpis wnioskodawcy)