

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Tadeusz Martynkien

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

- stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki, 21.11.2000, nadany uchwałą Rady Naukowej Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej na podstawie rozprawy „Spektralne właściwości włókien o wysokiej dwójłomności”, promotor: prof. dr hab. inż. Waclaw Urbańczyk.
- tytuł zawodowy magistra inżyniera na kierunku: Inżynieria Biomedyczna, specjalność: Inżynieria Biomedyczna – Optyka Biomedyczna, 26.09.1996.

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

1.10.2001 - obecnie	adiunkt naukowo-dydaktyczny, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska
1.10.2000 - 30.09.2001	asystent naukowo-dydaktyczny, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska

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.).

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych pt.: „WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI DWÓJŁOMNYCH ŚWIATŁOWODÓW MIKROSTRUKTURALNYCH”.

Na cykl składają się następujące publikacje:

H1	T. Martynkien, M. Szpulak, W. Urbańczyk: Modeling and measurement of temperature sensitivity in birefringent photonic crystal holey fibers, Applied Optics 44(36), 7780-7788 (2005) https://doi.org/10.1364/AO.44.007780 ; Impact Factor: 1.637
H2	T. Martynkien, G. Statkiewicz, M. Szpulak, J. Olszewski, G. Gołojuch, W. Urbańczyk, J. Wojcik, P. Mergo, M. Makara, T. Nasiłowski, W. Berghmans, H. Thienpont: „Measurements of polarimetric sensitivity to temperature in birefringent holey fibers,” Measurement Science & Technology 18, 3055-3060 (2007) http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/18/10/S02 ; Impact Factor: 1.297

H3	T. Martynkien, A. D. Anuszkiewicz, G. Statkiewicz-Barabach, J. Olszewski, G. Gołojuch, M. Szczurowski, W. Urbańczyk, J. Wojcik, P. Mergo, M. Makara, T. Nasiłowski, F. Berghmans, H. Thienpont: „ <i>Birefringent photonic crystal fibers with zero polarimetric sensitivity to temperature</i> ,” Applied Physics B-Lasers and Optics 94(4), 635-640 (2009) http://dx.doi.org/10.1007/s00340-009-3394-2 ; Impact Factor: 1.992
H4	M. Szpulak, T. Martynkien, W. Urbańczyk “Effects of hydrostatic pressure on phase and group modal birefringence in microstructured holey fibers,” Applied Optics 43(24), 4739-4744 (2004) https://doi.org/10.1364/AO.43.004739 ; Impact Factor: 1.799
H5	A. D. Anuszkiewicz, T. Martynkien, J. Olszewski, P. Mergo, W. Urbańczyk: “ <i>Polarimetric sensitivity to hydrostatic pressure and temperature in a Side-Hole fiber with squeezed microstructure</i> ,” Journal of Optics 17, art. 125609, 1-6 (2015) http://dx.doi.org/10.1088/2040-8978/17/12/125609 ; Impact Factor: 1.847
H6	T. Martynkien, G. Statkiewicz-Barabach, J. Olszewski, J. Wojcik, P. Mergo, T. Geernaert, C. Sonnenfeld, A. D. Anuszkiewicz, M. Szczurowski, K. L. Tarnowski, M. Makara, K. Skorupski, J. Klimek, K. Poturaj, W. Urbańczyk, T. Nasiłowski, F. Berghmans, H. Thienpont: „ <i>Highly birefringent microstructured fibers with enhanced sensitivity to hydrostatic pressure</i> ,” Optics Express 18(14), 15113-15121 (2010) http://dx.doi.org/10.1364/OE.18.015113 ; Impact Factor: 3.753
H7	G. J. Soboń, T. Martynkien, D. Tomaszewska, K. L. Tarnowski, P. Mergo, J. Sotor: “ <i>All-in-fiber amplification and compression of coherent frequency-shifted solitons tunable in the 1800–2000 nm range</i> ,” Photonics Research 6(5), 368-372 (2018) http://dx.doi.org/10.1364/PRJ.6.000368 ; Impact Factor: 5.522
H8	T. Martynkien, P. Mergo, W. Urbańczyk: “ <i>Sensitivity of birefringent microstructured polymer optical fiber to hydrostatic pressure</i> ,” IEEE Photonics Technology Letters 25(16), 1562-1565 (2013) http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2013.2271240 ; Impact Factor: 2.176
H9	P. Mergo, T. Martynkien, W. Urbańczyk: Polymer optical microstructured fiber with birefringence induced by stress-applying elements,” Optics Letters 39(10), 3018-3021 (2014) http://dx.doi.org/10.1364/OL.39.003018 ; Impact Factor: 3.292
H10	T. Martynkien, G. Wójcik, P. Mergo, W. Urbańczyk: “ <i>Highly birefringent polymer Side-Hole fiber for hydrostatic pressure sensing</i> ,” Optics Letters 40(13), 3033-3036 (2015) http://dx.doi.org/10.1364/OL.40.003033 ; Impact Factor: 3.040

4.1. Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej

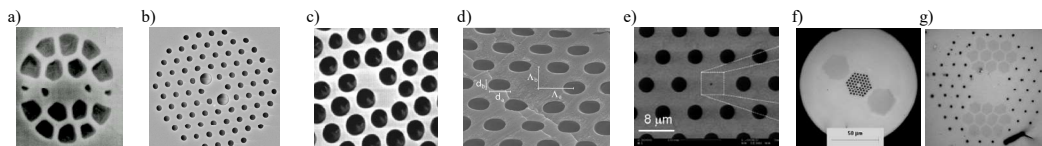
Światłowody o wysokiej dwójłomności, których najważniejszą cechą jest utrzymanie stanu polaryzacji wprowadzonego światła, stanowią ważną klasę tradycyjnych włókien specjalnych. Intensywne badania nad różnymi konstrukcjami takich światłowodów oraz ich własnościami przypadają na lata 80 XX wieku. Spośród różnych konstrukcji najbardziej popularne stały się – i są one produkowane do dziś – włókna z eliptycznym rdzeniem, włókna typu *Panda* oraz włókna typu *Bow-Tie*. Tradycyjne światłowody dwójłomne znalazły zastosowanie między innymi we wzmacniaczach i laserach światłowodowych oraz czujnikach wielu parametrów fizycznych i chemicznych¹⁻².

Opracowanie metod wytwarzania kryształów fonicznych wywarło ogromny wpływ na rozwój technologii światłowodów. Do roku 1995 światłowody krzemionkowe były wytwarzane, w taki sposób, że zwiększanie współczynnika załamania rdzenia, uzyskiwano poprzez domieszkowanie: i) rdzenia materiałem zwiększającym jego współczynnik załamania w stosunku do płaszczu (np.: rdzeń $\text{GeO}_2+\text{SiO}_2$ – płaszcz SiO_2) lub ii) obniżenia współczynnika załamania płaszczu poprzez domieszki F lub B_2O_3 w stosunku do niedomieszkowanego

1 J. Noda, et al., “Polarization-maintaining fibers and their applications,” J. Lightwave Technol. 4(8), 1071–1089 (1986).

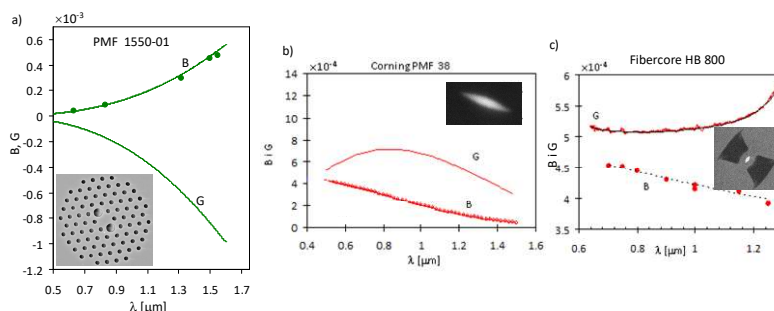
2 T. R. Woliński, “Polarimetric optical fibers and sensors,” Progress in Optics 40, 1-75 (2000).

rdzenia (np. rdzeń SiO_2 – płaszcz SiO_2+F lub B_2O_3). Światłowody mikrostrukturalne mają w płaszczu układ regularnie ułożonych, zazwyczaj powietrznych, kanałów (o pewnym typie symetrii, najczęściej ograniczonej przestrzennie sieci o trójkątnej komórce elementarnej) biegnących wzdłuż osi światłowodu; rolę rdzenia pełni obszar, w którym brak jest jednego lub więcej kanałów (tj. defekt struktury), rys. 1.



Rys. 1. Przekroje poprzeczne światłowodów fotonicznych o dużej dwójfomności. Włókna o różnych średnicach kanałów powietrznych w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia (a-b), światłowod z podwójnym defektem (c), światłowod z eliptycznymi dziurami w płaszczu (d), światłowod z kanałem powietrznym o eliptycznym kształcie w środku rdzenia (e), włókna ze strefami naprężającymi (f-g).

W pierwszej dekadzie XXI pojawiało się wiele nowych konstrukcji światłowodów fotonicznych, w których szczególnie intensywnie badano możliwości kształtowania charakterystyk spektralnych dyspersji chromatycznej oraz nieliniowości. W rezultacie tych badań w ofercie komercyjnej kilku firm (np.: NKT Photonics A/S, LEUKOS), znalazły się źródła światła typu *superkontinuum*^{3,4}, w których do efektywnej nieliniowej konwersji częstotliwości wykorzystuje się odcinek światłowodu mikrostrukturalnego.



Rys. 2. Zależności spektralne fazowej (B) oraz grupowej (G) dwójfomności modowej dla modu podstawowego: w światłowodzie mikrostrukturalnym PMF 1550-01 (a), w światłowodzie z eliptycznym rdzeniem Corning PMF-38 (b) oraz typu *Bow-Tie* (c).

Pierwszy światłowod mikrostrukturalny utrzymujący stan polaryzacji światła (HBMOF - Highly Birefringent Microstructured Optical Fiber) został wytworzony w roku 2000⁵ (rys. 1a) i w początkowej fazie rozwoju tej klasy włókien MOF (Microstructured Optical Fiber) zaproponowano szereg konstrukcji, głównie opartych: na zmianie rozkładu kanałów powietrznych o różnych średnicach w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia (rys. 1a-b)⁵⁻⁶, na wprowadzeniu dodatkowych defektów (rys. 1c)⁷, modyfikacji kształtu kanałów np. eliptyczne dziury (rys. 1d)⁸, strukturyzacja rdzenia np. kanał powietrzny o eliptycznym kształcie w środku rdzenia (rys. 1e)⁹. Warto zwrócić uwagę na włókna HBMOF, w których dwójfomność uzyskano analogicznie do włókien typu *Panda/Bow-Tie* poprzez wprowadzenie

3 J. K. Ranka, et al., "Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm," *Opt. Lett.* 25(1), 25–27 (2000).

4 J. M. Dudley, et al., "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," *Rev. Mod. Phys.* 78(4), 1135–1184 (2006).

5 A. Ortigosa-Blanch, et al. *Opt. Lett.* 25, 1325 (2000).

6 K. Suzuki, et al., *Opt. Express*, 676 (2001).

7 T.P. Hansen et al., *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 588 (2001).

8 N.A. Issa, et al., *Opt. Lett.*, 1336 (2004).

9 W. Belardi et al., *IEEE J. Quantum Electron.* 41, 1558–1564 (2005).

stref naprężających ze szkła $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$ na zewnątrz mikrostrukturalnego płaszczu (rys. 1f)¹⁰ lub jako integralną część mikrostruktury w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia (rys. 1g)¹¹.

Cechą charakterystyczną dwójłomnych światłowodów mikrostrukturalnych jest silna zależność fazowej dwójłomności modowej (B) od długości fali światła, co skutkuje ujemnym znakiem dwójłomności grupowej (G). Typową zależność B i G w funkcji długości fali światła w komercyjnie dostępnym krzemionkowym dwójłomnym włóknie fonicznym PMF 1550-01 firmy Blaze Photonics (obecnie NKT Photonics A/S) pokazano na rys. 2a. W przypadku światłowodów tradycyjnych z eliptycznym rdzeniem lub typu *Bow-Tie* czy typu *Panda*, B oraz G mają takie same znaki, rys. 2b,c. Z punktu widzenia zastosowań czujnikowych, fakt, że dwójłomne światłowody mikrostrukturalne typu *index guided* (w których propagacja światła odbywa się w oparciu o zmodyfikowane zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia) mogą być wykonane z jednorodnego materiału, łatwym do przewidzenia był fakt, że ich czułość na temperaturę będzie znacznie mniejsza niż tradycyjnych światłowodów dwójłomnych. Dlatego moim pierwszym celem związanym z badaniami nad włóknami mikrostrukturalnymi było sprawdzenie teoretyczne i eksperymentalne odpowiedzi włókien HBMOF na temperaturę oraz ciśnienie hydrostatyczne. W dalszej części autoreferatu omówiłem wyniki moich prac, opisując swój wkład w opublikowane artykuły. Prace, podzieliłem na 4 grupy:

- Modelowanie podatności dwójłomności na temperaturę światłowodów HBMOF wykonanych z jednego materiału. Opracowanie tego modelu i walidacja poprawność jego działania pozwoliła na teoretyczne i eksperymentalne zademonstrowanie światłowodów HBMOF o różnych konstrukcjach nie czułych na temperaturę dla wybranej długości fali [H1-H3].
- Opracowanie modelu pozwalającego na obliczenie podatności dwójłomności we włóknach HBMOF na ciśnienie hydrostatyczne [H4], co pozwoliło na zaprojektowanie światłowodów o podwyższonej czułości na ciśnienie hydrostatyczne i zredukowanej czułości na temperaturę [H5-H6].
- Opracowanie metody obliczania dwójłomności modowej w strukturach hybrydowych, w których domieszkowany rdzeń otoczony jest mikrostrukturalnym płaszczem oraz podatności dwójłomność modowej na czynniki zewnętrzne. W konsekwencji pokazanie możliwości wykorzystania tego typu struktur w metrologii [H6] jak i do efektywnej generacji efektów nieliniowych w szczególności nieliniowej konwersji częstotliwości solitonów [H7].
- Modelowanie oraz eksperymentalna charakterystyka światłowodów dwójłomnych wykonanych z materiałów polimerowych takich jak poli(metakrylan metylu) (PMMA) oraz polistyren (PS) [H8-H10].

4.2. Omówienie osiągniętych wyników prac badawczych

W przypadku tradycyjnych włókien z eliptycznym rdzeniem dwójłomność modowa jest sumą dwójłomności geometrycznej związanej z eliptycznym kształtem rdzenia oraz dwójłomności materiałowej, którą poprzez efekt elastoptyczny indukują naprężenia będące konsekwencją różnych współczynników rozszerzalności termicznej rdzenia i płaszczu. Składowa naprężeniowa dwójłomności w szczególności w zakresie krótko falowym może mieć stosunkowo duży, przekraczający 50%, wkład do dwójłomności całkowitej. Również

¹⁰ J. R. Folkenberg, et al., Opt. Lett. 30, 1446–1448 (2005);

¹¹ T. Schreiber, et al., Opt. Express 13, 7621-7630 (2005).

podatność dwójłomności na temperaturę w tego typu włóknach jest głównie związana ze zmianą rozkładu naprężeń w przekroju włókna. Konsekwencją tego jest stosunkowo duża podatność dwójłomności modowej na temperaturę (dB/dT) we włóknach tradycyjnych, a co za tym idzie czułość polarymetrycznej na temperaturę K_T . Dla włókien typu *Panda* lub *Bow-Tie* czułość polarymetryczna osiąga wartości $K_T = -2 \div 4$ rad/m/K, a w światłowodach z eliptycznym rdzeniem $K_T = -0,5$ rad/m/K. Charakterystyczny dla światłowodów tradycyjnych jest ujemny znak czułość na temperaturę, który oznacza, że fazowa dwójłomność modowa maleje wraz ze wzrostem temperatury (co jest związane z faktem, że składowa naprężeniowa dwójłomności całkowitej maleje ze wzrostem temperatury). Modelowanie charakterystyk dwójłomności modowej, a także jej podatności na temperaturę oraz ciśnienie hydrostatyczne we włóknach tradycyjnych z eliptycznym rdzeniem było przedmiotem moich badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej.

W przypadku światłowodów HBMOF wykonanych z jednorodnego materiału w strukturze nie powstają naprężenia będące konsekwencją różnych współczynników rozszerzalności termicznej. Niemniej naprężenia termiczne, mogą występować w strukturach fotonicznych dzięki: "zamrożeniu" siły z jaką wyciągany jest światłowód, jednak w przypadku światłowodów dominująca składowa naprężenia ma kierunek równoległy do osi światłowodu dlatego ma zaniedbywalny wpływ na dwójłomność modową. Naprężenia mogą być również wywołane gradientem rozkładu temperatury podczas zestalania się szkła. W przypadku włókien tradycyjnych naprężenia związane z gradientem temperatury wynoszą zero na osi włókna i rosną parabolicznie w funkcji odległości od rdzenia. Gdy zaniedba się naprężenia resztkowe, dwójłomność światłowodów fotonicznych typu *index-guided* można przedstawić jako funkcję pięciu parametrów: $B(\lambda/\Lambda, n_{glass}, n_{hole}, \Lambda, d_{cl}/\Lambda)$, gdzie Λ jest odległością pomiędzy otworami, λ/Λ jest znormalizowaną długością fali, n_{glass} i n_{hole} to współczynniki załamania odpowiednio szkła i materiału wewnątrz otworów, d_{cl} jest średnicą otworów w płaszczu, a d_{cl}/Λ jest współczynnikiem wypełnienia otworów w płaszczu. W modelu, który opracowałem, wpływ na dwójłomność mają tylko zmiany temperatury związane ze współczynnikami załamania n_{glass} i n_{hole} oraz zmiana Λ związana z termicznym rozszerzaniem szkła. Zatem czułość dwójłomności fazowej na temperaturę dB/dT może zostać wyrażona jako¹²⁻¹³:

$$\frac{dB}{dT}(\lambda) = \frac{dB}{dn_{glass}} \gamma_{glass} + \frac{dB}{dn_{hole}} \gamma_{hole} + \frac{dB}{d\Lambda/\Lambda} \alpha_{glass}, \quad (1)$$

gdzie $\gamma_{glass} = dn_{glass}/dT$ i $\gamma_{hole} = dn_{hole}/dT$ są współczynnikami termooptycznymi szkła i materiału wewnątrz otworów, a $\alpha_{glass} = (d\Lambda/\Lambda)/dT$ jest współczynnikiem liniowej rozszerzalności termicznej szkła. Czułość polarymetryczną K_T opisuje zależność:

$$K_T(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{dB}{dT}(\lambda) + B(\lambda) \alpha_{glass} \right). \quad (2)$$

Dla światłowodów wykonanych ze szkła kwarcowego i mających otwory wypełnione powietrzem współczynniki materiałowe równe są odpowiednio: $\gamma_{SiO_2} = 1,1 \times 10^{-5}$ 1/K, $\gamma_{air} = -9 \times 10^{-7}$ 1/K oraz $\alpha_{SiO_2} = 5,5 \times 10^{-7}$ 1/K. Należy jednak wspomnieć, że współczynniki termooptyczne dla szkieł wieloskładnikowych mogą przyjmować zarówno wartości dodatnie jak i ujemne.

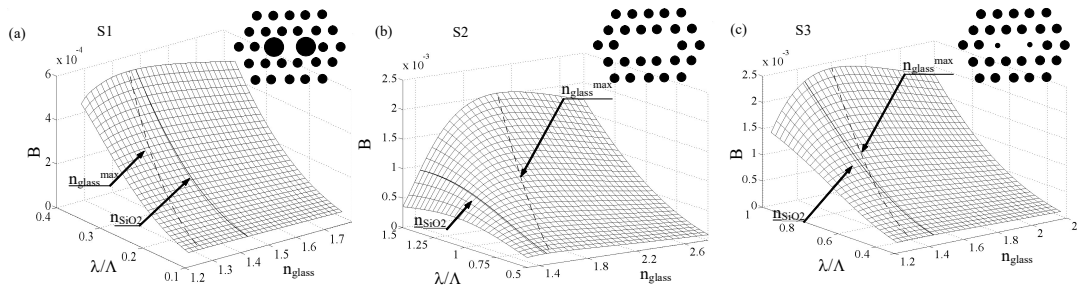
Obliczenia polegały na wyznaczeniu stałych propagacji β_x i β_y , a następnie dwójłomności fazowej (B) w funkcji długości fali λ , współczynnika załamania szkła (n_{glass}) oraz

12 M. Szpulak, et al. "Influence of temperature on birefringence and polarization mode dispersion in photonic crystal holey fibers," in Proc. of 2002 4th International Conference on Transparent Optical Networks, 89–92 (2002).

13 R. Kotynski, et al., "Sensitivity of holey fiber based sensors," in Proc. of 5th International Conference on Transparent Optical Networks ..., 340–343 (2003)

współczynnika załamania materiału wypełniającego otwory (n_{hole}) przy uwzględnieniu parametrów geometrycznych danej struktury. Aby wyznaczyć dB/dn_{glass} , obliczano B w funkcji n_{glass} oraz λ/Λ zakładając, że materiałem wypełniającym otwory jest powietrze ($n_{hole}=n_{air}$), rys. 3. W celu wyznaczenia składowej dB/dn_{air} obliczano zależność B w funkcji n_{hole} i λ/Λ przy założeniu, że włókno jest wykonane z czystego szkła kwarcowego ($n_{glass}=n_{SiO_2}$). W następnym kroku zaproponowanej procedury obliczano pochodne $dB/dn_{glass}(n_{glass}, n_{air}, \lambda/\Lambda)$ i $dB/dn_{hole}(n_{SiO_2}, n_{hole}, \lambda/\Lambda)$. Ostatecznie wyznaczono $dB/dn_{SiO_2}(\lambda/\Lambda)$ oraz $dB/dn_{air}(\lambda/\Lambda)$ podstawiając $n_{glass}=n_{SiO_2}$ and $n_{hole}=n_{air}$ i interpolując wartości poszczególnych pochodnych.

Czynnik $dB/(d\lambda/\Lambda)$ reprezentujący efekt rozszerzalności termicznej włókna, wyznaczono różniczkując $B(n_{SiO_2}, n_{air}, \lambda/\Lambda)$ względem λ/Λ i uwzględniając zależność $dB/(d\lambda/\Lambda) = -(\lambda/\Lambda)(dB/d(\lambda/\Lambda))$. Na rys. 3, przedstawiono obliczone wartości funkcji $B(n_{glass}, n_{air}, \lambda/\Lambda)$ dla analizowanych struktur. Warto podkreślić, że we wszystkich analizowanych strukturach, dla wszystkich wartości znormalizowanej długości fali λ/Λ funkcja $B(n_{glass}, n_{air}, \lambda/\Lambda)$ osiąga maksimum dla pewnej wartości $n_{glass}=n_{glass}^{max}$. Położenie tego maksimum względem n_{SiO_2} , zależy od geometrii włókna, rys. 3.



Rys. 3. Funkcja $B(n_{glass}, n_{air}, \lambda/\Lambda)$ dla włókna HBMOF PM 1550-01 (NKT Photonics) (a), światłowodu z potrójnym defektem (b) oraz światłowodu z dziurami o małej średnicy w pobliżu rdzenia (c).

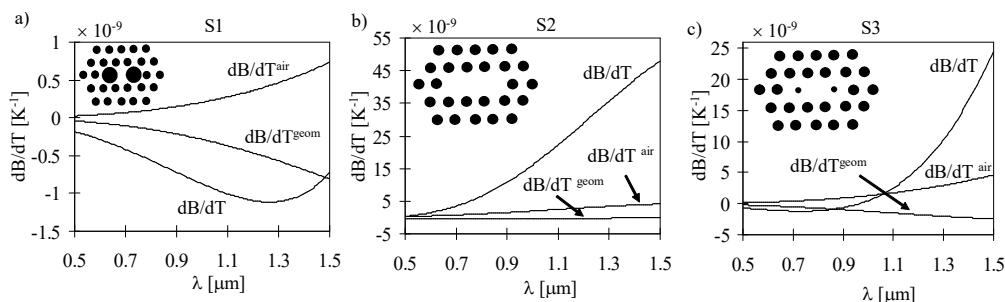
Przedstawiona metoda modelowania oraz symulacje numeryczne podatności dwójłomności modowej na temperaturę dla 3 dwójłomnych światłowodów mikrostrukturalnych (Struktury S1, S2, S3) zostały przedstawione w pracy:

[H1] **T. Martynkien, M. Szpulak, W. Urbańczyk: „Modeling and measurement of temperature sensitivity in birefringent photonic crystal holey fibers,” *Applied Optics* 44(36), 7780-7788 (2005).**

We wszystkich strukturach czynniki spowodowany zmianą współczynnika załamania powietrza w otworach (dB/dT_{air}) oraz efekt rozszerzania się struktur po wpływie temperatury (dB/dT_{geom}) miały zbliżone wartości bezwzględne, ale przeciwne znaki, rys. 4. Dlatego głównym czynnikiem odpowiedzialnym za podatność dwójłomności dB/dT był czynnik związany ze zmianami współczynnika załamania szkła wywoływany termicznie (dB/dn_{glass}). W strukturze S1, w której dwójłomność uzyskano poprzez zwiększenie średnicy dwóch otworów w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia, podatność dB/dT miała znak ujemny, a jej wartość bezwzględna dB/dT nie przekracza $1,2 \times 10^{-9}$ 1/K w badanym zakresie spektralnym ($K_T = -0,006$ rad/K/m). W strukturze S2, w której dwójłomność uzyskano poprzez eliminację otworów (potrójny defekt), dB/dT miała znak dodatni i osiągnęła wartość $+5 \times 10^{-8}$ 1/K dla 1500 nm, co odpowiada czułości polarymetrycznej rzędu $K_T = +0,2$ rad/K/m. W trzeciej z analizowanych struktur (S3), w której dwójłomność uzyskano poprzez zmniejszenie średnicy 2 otworów powietrznych w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia,

podatność dB/dT zmieniała znak dla długości fali $\lambda_{KT=0} = 940$ nm, co oznacza, że podatność a co za tym idzie czułość polarymetryczna K_T dla tej długości fali wynosi zero.

W dalszej części pracy przy pomocy analizatora stanu polaryzacji i lasera przestrajalnego zmierzylem czułość na temperaturę w dwóch strukturach S1 oraz S2: z dwoma dużymi otworami oraz z potrójnym defektem. Wyniki pomiarów czułości K_T , oraz symulacji numerycznych były w relatywnie dobrej zgodności mimo, że obliczenia przeprowadzono dla struktur wyidealizowanych. Co najważniejsze, wykorzystując przestrajalne źródło światła i fakt, że zmiana fazy indukowana zmianą długości fali ma znak dodatni we włóknach HBMOF pozwoliła na potwierdzenie, że zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi w obu zmierzonych strukturach dB/dT oraz K_T ma przeciwny znak.



Rys. 4. Symulacje numeryczne składowych podatności dwójłomności na temperaturę (dB/dT_{air} , dB/dT_{geom}) oraz podatności całkowitej dB/dT dla włókna HBMOF PM 1550-01 (NKT Photonics) S1 (a), światłowodu z potrójnym defektem S2 (b) oraz światłowodu z dziurami o małej średnicy w pobliżu rdzenia S3 (c).

Opracowana przeze mnie metodologia pozwala na estymację czułości włókien wykonanych z innych materiałów, dla których znana jest zależność $n(\lambda)$ oraz współczynnik termooptyczny. Na przykład struktura S2 z potrójnym defektem, wykonana ze szkła krzemionkowego ma relatywnie dużą czułość na temperaturę. Może być jednak nieczuła gdy zostanie wykonana z innego szkła np. BK7.

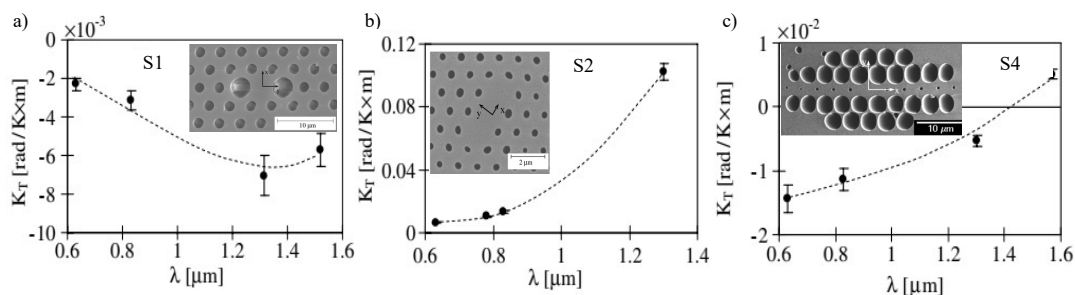
Mój wkład w pracę [H1] polegał na opracowaniu modelu numerycznego czułości światłowodów mikrostrukturalnych o wysokiej dwójłomności na temperaturę. Przeprowadzeniu obliczeń numerycznych, w szczególności $B(\lambda/\Lambda, n_{glass})$ oraz $B(\lambda/\Lambda, n_{hole})$ dla dwóch wybranych konstrukcji światłowodów (S1, S3). Obliczeniu zależności spektralnej czułości polarymetrycznej oraz podatności dwójłomności na temperaturę, jej składowej geometrycznej oraz składowych związanych ze współczynnikami termooptycznymi (szkła oraz powietrza). Przeprowadzeniu pomiarów czułości na temperaturę struktury PMF 1550-01 (Blaze Photonics) oraz włókna z potrójnym defektem (PTŚ UMCS). Napisanie artykułu.

Analizę numeryczną przeprowadzono w szerokim zakresie spektralnym od 500 do 1500nm. Aby potwierdzić wyniki symulacji numerycznych celem nadrzędnym badań eksperymentalnych był pomiar K_T w szerszym zakresie spektralnym niż to pokazano w pracy [H1], co przedstawiono w pracy::

[H2] T. Martynkien, G. Statkiewicz, M. Szpulak, J. Olszewski, G. Gołojuch, W. Urbańczyk, J. Wojcik, P. Mergo, M. Makara, T. Nasiłowski, W. Berghmans, H. Thienpont: „Measurements of polarimetric sensitivity to temperature in birefringent holey fibers,” *Measurement Science & Technology* 18, 3055-3060 (2007).

W pracy [H2] pomiary przeprowadzono w zakresie spektralnym 630-1570nm, rys. 5. Wyniki eksperymentalne $K_T(\lambda)$ dla struktury S1 (z dwoma dużymi dziurami (Blaze Photonics)-rys. 5a) oraz struktury S2 z potrójnym defektem (PTŚ UMCS)- rys. 5b) były zgodne z wynikami

symulacji numerycznych prezentowanymi w pracy [H1]. Struktura S4 miała geometrię zbliżoną do struktury S3 z pracy [H1]), a wysoką dwójłomność uzyskano w niej poprzez redukcję średnicy kanałów powietrznych na osi x, co doprowadziło do powstania struktury z rzędem małych dziur (PTŚ UMCS), pokazanej na rys. 5c. W przypadku S4 po raz pierwszy eksperymentalnie zademonstrowano, HBMOF nie czuły na temperaturę dla pewnej długości fali tj. czułość polarymetryczna była równa zero dla $\lambda_{KT=0}=1440$ nm. Struktura S4 miała średnicę zewnętrzną płaszczka $D_z=110\ \mu\text{m}$ a wartości średnie pozostałych parametrów wynosiły odpowiednio: $\Lambda=3,99\ \mu\text{m}$, średnica dużych otworów $D=3,77\ \mu\text{m}$, a średnica małych otworów $d=0,79\ \mu\text{m}$.



Rys. 5. Wyniki pomiaru zależności spektralnej czułości polarymetrycznej K_T w strukturze S1 (a), S2 (b) oraz S4 (c).

Układ pomiarowy, który skonstruowałem pozwalając na pomiar zmiany różnicy fazy z rozdzielczością $2\pi/50$ dzięki zastosowaniu kompensatora *Soleil-Babineta* oraz półfalówki umieszczonej w taki sposób, że obraz prążkowy na ekranie monitora (powstający dzięki wykorzystaniu pryzmatu Wollastona oraz polaryzatora) był podzielony na dwie części, w których prążki interferencyjne poruszały się w przeciwnych kierunkach przy zmianie temperatury. A kompensacja ułamka zmiany fazy indukowanej zmianą temperatury polegała na redukcji tych przemieszczeń do pierwotnego położenia. Ponadto dzięki wykorzystaniu laserów półprzewodnikowych (LD) możliwe była identyfikacja znaków K_T dla poszczególnych długości fali (wykorzystano fakt, że zmiana temperatury lasera LD powodowała zmianę długości emitowanej fali).

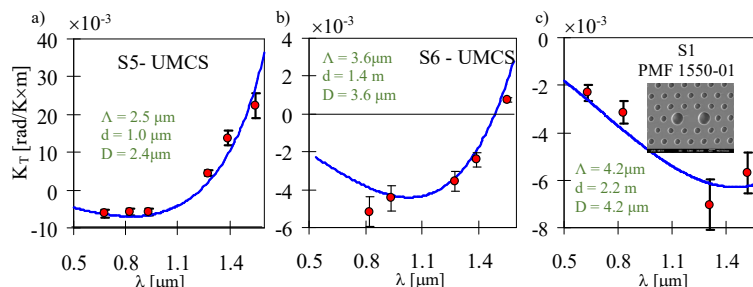
Mój wkład w pracę [H2] polegał na skonstruowaniu układu pomiarowego i jego wykalibrowaniu, zaplanowaniu i przeprowadzeniu pomiarów czułości na temperaturę światłowodów mikrostrukturalnych. W pracy tej po raz pierwszy zademonstrowano światłowód HBMOF, w którym czułość polarymetryczna zmienia znak dla określonej długości fali co oznacza, że podatność dwójłomność na temperaturę dla tej długości fali wynosi zero. Napisanie artykułu.

Struktury z rzędem małych otworów w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi [H1] były nieczułe na temperaturę dla pewnej długości fali. Dlatego kolejnym wyzwaniem stało się zaprojektowanie struktur HB, w których dwójłomność jest indukowana poprzez umieszczenie dwóch dużych otworów w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia. Światłowody o takiej konstrukcji ze względów technologicznych tj. powtarzalności wytwarzanych struktur oraz kontroli ich parametrów były łatwiejsze do wytworzenia w PTŚ UMCS. Dlatego głównym celem pracy:

[H3] T. Martynkien, A. D. Anuszkiewicz, G. Statkiewicz-Barabach, J. Olszewski, G. Gołojuch, M. Szczurowski, W. Urbańczyk, J. Wojcik, P. Mergo, M. Makara, T. Nasiłowski, F. Berghmans, H. Thienpont: „Birefringent photonic crystal fibers with

zero polarimetric sensitivity to temperature," *Applied Physics B-Lasers and Optics* 94(4), 635-640 (2009),

było pokazanie, że struktury, w których fazowa dwójłomność modowa wyindukowana poprzez zwiększenie średnicy dwóch dziur, mogą być nieczułe na temperaturę dla określonej długości fali.



Rys. 6. Wyniki pomiaru spektralnych zależności czułości polarymetrycznej K_T badanych struktur. Liniją ciągłą pokazano wyniki symulacji numerycznych $K_T(\lambda)$.

W pracy zaprezentowano 2 struktury wytworzone w PTŚ UMCS w Lublinie (S5 oraz S6) o stałych sieci $\Lambda=2,55 \mu\text{m}$ oraz $\Lambda=3,55 \mu\text{m}$, w których czułość na temperaturę wynosiła zero dla $\lambda_{KT=0}=1150 \text{ nm}$ oraz $\lambda_{KT=0}=1530 \text{ nm}$, rys 6a,b. Jako strukturę odniesienia pokazano strukturę S1 - PMF 1550-01 (Blaze Photonics), rys. 6c. Wytworzenie struktur poprzedzone zostało przeprowadzeniem szeregu obliczeń numerycznych. Ostatecznie przeprowadzono obliczenia dwójłomności modowej oraz czułości polarymetrycznej na temperaturę dla struktur rzeczywistych, których geometrię zrekonstruowano na bazie zdjęć z mikroskopu SEM. Na rys 6 pokazano bardzo dobrą zgodność wyników eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych.

Mój wkład w pracę [H3] polegał na zaprojektowaniu mikrostrukturalnych światłowodów dwójłomnych nieczułych na temperaturę dla określonej długości fali. Przeprowadziłem również obliczenia czułości struktur rzeczywistych i porównałem z wynikami eksperymentu. Bardzo dobra zgodność pomiarów i symulacji ostatecznie potwierdziła poprawność założeń modelu numerycznego. Aktywnie uczestniczyłem w pomiarach. Napisanie artykułu.

Światłowody o wysokiej dwójłomności wykorzystuje się do pomiaru wielu innych parametrów fizycznych, do których zaliczyć można ciśnienie hydrostatyczne. Czułość polarymetryczną na ciśnienie hydrostatyczne K_p definiuje zależność:

$$K_p = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{dB}{dp} + \frac{dL}{Ldp} B \right), \quad (3)$$

gdzie dB/dp jest podatnością dwójłomności modowej B na ciśnienie hydrostatyczne, natomiast drugi czynniki związany jest ze zmianą długości włókna poddanego działaniu ciśnienia.

Ciśnienie hydrostatyczne działające na dwójłomny światłowod fotoniczny indukuje specyficzny rozkład naprężeń oraz deformacje geometrii włókna. Oba czynniki mają wpływ na fazową dwójłomność modową, zatem muszą zostać wzięte pod uwagę podczas obliczania podatności dB/dp . Naprężenia indukowane ciśnieniem hydrostatycznym powodują, że początkowo izotropowy materiał, z którego wykonano włókno staje się dwójłomny. W ogólnym przypadku tensor rozkładu współczynnika załamania w przekroju poprzecznym włókna nie jest diagonalny i ma następującą postać:

$$n = \begin{bmatrix} n_{xx} & n_{xy} & 0 \\ n_{xy} & n_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & n_{zz} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Elementy tensora (4) można obliczyć korzystając z wyrażenia opisującego efekt elastooptyczny:

$$\begin{aligned} n_{xx} &= n_0 + C_1 \sigma_{xx}(p) + C_2 (\sigma_{yy}(p) + \sigma_{zz}(p)) \\ n_{yy} &= n_0 + C_1 \sigma_{yy}(p) + C_2 (\sigma_{xx}(p) + \sigma_{zz}(p)) \\ n_{zz} &= n_0 + C_1 \sigma_{zz}(p) + C_2 (\sigma_{xx}(p) + \sigma_{yy}(p))' \\ n_{xy} &= (C_1 - C_2) \sigma_{xy} \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie C_1 i C_2 to stałe piezooptyczne, σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , to naprężenia normalne a, σ_{xy} to naprężenia ścinające indukowane ciśnieniem hydrostatycznym.

Pierwszym etapem wyznaczania czułości na ciśnienie hydrostatyczne włókien dwójłomnych jest obliczenie fazowej dwójłomności modowej $B(\lambda)$ w funkcji długości fali dla włókna nie poddanego działaniu ciśnienia ($p=0$). W obliczeniach uwzględniano fakt, że współczynnik załamania materiału, z którego wykonano światłowód zależy od długości fali i opisuje ją zależność Sellmeiera. W drugim etapie, w celu wyznaczenia rozkładu poprawek współczynnika załamania w przekroju poprzecznym włókna, oblicza się składowe normalne i ścinające tensora naprężeń indukowane ciśnieniem hydrostatycznym $p \neq 0$ (np. $p=20\text{MPa}$). Co pozwala ostatecznie wykorzystując równania (5) wyznaczyć rozkład współczynnika załamania w przekroju światłowodu. W obliczeniach mechanicznych dla włókien fotonicznych wykorzystuje się metodę elementów skończonych (uproszczone rozwiązania analityczne są znane tylko dla włókien tradycyjnych np.: struktur z kołowym lub eliptycznym rdzeniem lub dla struktur typu *PANDA*, *Bow-Tie*).

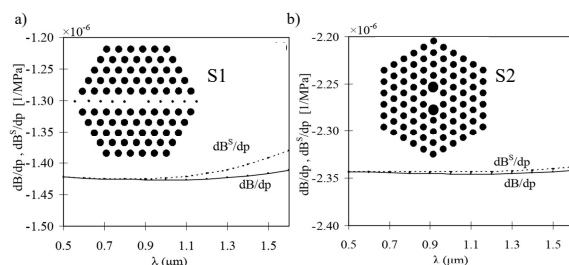
Po wyznaczeniu deformacji włókna i poprawek do współczynnika załamania, wykorzystuje się te dane jako informacje wejściowe w metodzie elementów skończonych, która pozwala obliczyć stałe propagacji β_x i β_y modów światłowodu. W takim podejściu, zarówno obliczenia mechaniczne jak i elektromagnetyczne są przeprowadzane na wspólnej dyskretnej siatce trójkątów. Umożliwia to bezpośredni transfer początkowej jak i zdeformowanej siatki pomiędzy modułami do obliczeń mechanicznych i elektromagnetycznych a w konsekwencji zwiększa dokładność i skraca czas obliczeń. Dodatkowo, umożliwia niezależną analizę wpływu poszczególnych czynników tj. deformacji struktury (dB^G/dp) oraz naprężeń (dB^S/dp) na całkowitą podatność na ciśnienie fazowej dwójłomności modowej (dB/dp). Ostatecznie wartość pochodnej $dB/dp(\lambda)$ przybliża się wzorem dwu punktowym:

$$\frac{dB}{dp} = \frac{B_{p=20\text{MPa}} - B_{p=0}}{p}. \quad (6)$$

Wyniki analizy numerycznej podatności dwójłomności fazowej i grupowej światłowodów mikrostrukturalnych (MOF) na ciśnienie hydrostatyczne dla dwóch struktur fotonicznych zostały przedstawione w pracy:

[H4] M. Szpulak, T. Martynkien, W. Urbańczyk „Effects of hydrostatic pressure on phase and group modal birefringence in microstructured holey fibers,” *Applied Optics* 43(24), 4739-4744 (2004).

Przeprowadzona analiza numeryczna objęła obliczenia charakterystyk spektralnych podatności dwójłomności na ciśnienie hydrostatyczne dB/dp oraz jej składowych: składowej naprężeniowej dB^S/dp oraz geometrycznej dB^G/dp .



Rys. 7. Stymulacje numeryczne podatności dwójtłomności fazowej na ciśnienie hydrostatyczne.

Efekt związany z naprężeniami indukowanymi ciśnieniem hydrostatycznym jest dominującym czynnikiem odpowiedzialnym za podatność dwójtłomności na ciśnienie. Składnik naprężeniowy podatności na ciśnienie dB^S/dp jest proporcjonalny do dwójtłomności materiałowej indukowanej przyłożonym ciśnieniem. W obu analizowanych w pracy [H4] włóknach dwójtłomność materiałowa była ujemna w obszarze rdzenia i oscylowała wokół zera w obszarze płaszczka, stąd $dB^S/dp < 0$. Zmiany dB^S/dp w funkcji długości fali są bardzo małe i nie przekraczają 2% w zakresie długości fali od 500 do 1600 nm.

Za składnik geometryczny podatności dwójtłomności na ciśnienie dB^G/dp tj. deformację indukowaną przez przyłożone ciśnienie odpowiedzialne są dwa efekty. Pierwszy jest związany ze zmniejszaniem się stałej sieci Λ i powoduje wzrost fazowej dwójtłomności modowej. Drugi jest związany z asymetrią deformacji w kierunku X i Y oraz deformacją niektórych dziur prowadząc do tego, że ich przekrój staje się eliptyczny. Drugi efekt zmniejsza fazową dwójtłomność modową i jest silniejszy niż pierwszy. W konsekwencji, składnik geometryczny podatności na ciśnienie dB^G/dp jest ujemny w obu analizowanych włóknach.

Efekty naprężeniowe indukowane ciśnieniem są głównym czynnikiem odpowiedzialnym za zmiany fazowej dwójtłomności modowej. Z tego powodu asymetria właściwości mechanicznych włókna spowodowana niejednakową średnicą dziur płaszczowych jest najważniejszym czynnikiem określającym czułość włókna na ciśnienie. W konsekwencji wyższą podatność dB/dp jest obserwowana w strukturze S2, która ma parę dużych dziur w pobliżu rdzenia włókna. Z powodu dominującego wkładu efektów naprężeniowych, całkowite czułości na ciśnienie dB/dp są słabo zależne od długości fali i równe dla $dB/dp = -1,43 \times 10^{-6}$ 1/MPa (struktura S1) oraz $dB/dp = -2,34 \times 10^{-6}$ 1/MPa (struktura S2) w całym zakresie spektralnym dla struktury S2. Wartości te odpowiadają następującym czułościom polarymetrycznym: $K_p = -11,1$ rad/MPa \times m dla struktury S1 i $K_p = -18,4$ rad/MPa \times m dla struktury S2, dla długości fali $\lambda = 800$ nm. Warto zwrócić uwagę, że te wartości bezwzględne K_p znacznie przekraczają czułości w standardowych włóknach dwójtłomnych np. $K_p = +1.5$ rad/MPa \times m we włóknach z eliptycznym rdzeniem, $K_p = +8.5$ rad/MPa \times m we włóknie typu *Bow-Tie*.

Mój wkład w prace [H4] polegał na opracowaniu modelu numerycznego pozwalającego na obliczenia czułości światłowodów mikrostrukturalnych o wysokiej dwójtłomności na ciśnienie hydrostatyczne. Obliczeniu metodą elementów skończonych naprężeń normalnych oraz ścinających oraz obliczeniu deformacji struktur włókna mikrostrukturalnego wywołanej ciśnieniem. Interpretacji uzyskanych wyników. W szczególności obliczenia dwójtłomności materiałowej oraz przeprowadzenie analizy deformacji mikrostruktur co pozwoliło na wyjaśnienie znaku składowej geometrycznej podatności na ciśnienie hydrostatyczne. Udział w napisaniu artykułu.

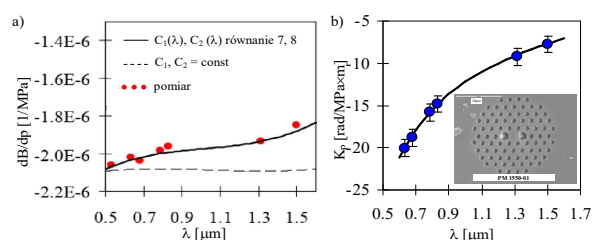
Wyniki symulacji numerycznych przeprowadzone w szerokim zakresie spektralnym pokazane w pracy [H4] wymagały weryfikacji eksperymentalnej. Dlatego przeprowadzenie

pomiarów czułości polarymetrycznej na ciśnienie hydrostatyczne w szerokim zakresie spektralnym 600-1600 nm dla różnych struktur HBMOF stało się celem późniejszych prac. Zostały one zaprezentowane w trzech pracach spoza cyklu dla włókna z potrójnym defektem¹⁴, dla włókna z dwoma dużymi dziurami w sąsiedztwie rdzenia¹⁵ oraz dla włókna z rzędem małych dziur¹⁶. Dzięki tym pomiarom stwierdzono, że aby uzyskać dobrą zgodność między pomiarami i symulacjami konieczne jest uwzględnianie zależności spektralnych stałych piezooptycznych $C_1(\lambda)$ i $C_2(\lambda)$ ¹⁷:

$$C_2(\lambda) = \frac{1}{2}n_0^3(\lambda)(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})), \quad (7)$$

$$C_1(\lambda) = \frac{1}{2}n_0^3(\lambda)(p_{11} - 2\nu p_{12}), \quad (8)$$

gdzie p_{11} oraz p_{12} to stałe Pockelsa, a ν jest liczbą Poissona. Na rys. 8, zaprezentowano porównanie wyników pomiarów i symulacji numerycznych podatności dB/dp oraz K_p w światłowodzie fotonicznym PMF 1550-01 (firmy NKT Photonics A/S)¹⁵.



Rys. 8. Spektralne zależności dB/dp oraz K_p we włóknie PMF 1550-01. Wyniki symulacji numerycznych zaznaczono liniami, pomiary zaznaczono punktami. Linia przerywaną zaznaczono wyniki obliczeń, w których nie wzięto pod uwagę zależności C_1 oraz C_2 od długości fali.

By zwiększyć podatność efektywnego współczynnika załamania modu lub dwójłomności modowej na ciśnienie hydrostatyczne, w 1986 roku zaproponowano światłowody typu *Side-Hole(SH)*¹⁸. W tego typu włóknach wzdłuż rdzenia biegły symetryczne ułożone kanały powietrzne o dużej średnicy. W późniejszym okresie włókna o podobnej konstrukcji, lecz pod nazwą *Twin-Hole* były używane do efektywnej generacji drugiej harmonicznej (SH-Second Harmonic Generation)¹⁹. W PTŚ UMCS (dr Jan Wójcik oraz dr hab. Paweł Mergo) w współpracy z prof. Wacławem Urbańczykiem z PWr oraz z prof. Wojtkiem Bockiem (Université du Québec an Outaouais, Gatineau w Kanadzie) technologia wytwarzania włókien *Side-Hole* została zoptymalizowana, a miarą sukcesu była osiągnięcie zarówno dużej wartości $K_p = -180 \text{ rad}/(\text{MPa} \times \text{m})$ oraz dużej wartości stosunku czułości $K_p/K_T = 150\text{--}250 \text{ K}/\text{MPa}$. W roku 2012 dr hab. Paweł Mergo podjął dalsze kroki związane z rozwijaniem tej technologii co pozwoliło na opracowanie światłowodów typu *SH* o ciekawych charakterystykach

14 T. Martynkien, et al., "Pressure sensitivity of the birefringent photonic crystal fiber with triple defect," In: Proc. of Photonic crystal materials and nanostructures. Eds. Richard M. De La Rue et al., Strasbourg, 27-29 April 2004, Proc SPIE. vol. 5450, 550-556 (2004).

15 G. Statkiewicz, et al., "Measurements of modal birefringence and polarimetric sensitivity of the birefringent holey fiber to hydrostatic pressure and strain," Opt. Commun. 241, 339-348, 2004.

16 T. Martynkien, et al. "Measurements of sensitivity to hydrostatic pressure and temperature in highly birefringent photonic crystal fibers", Opt. Quant. Electron. 39, 481-489 (2007).

17 C. Ryan, et al., "Pockels coefficients in multicomponent oxide glasses," Int. J. Appl. Glass Sci. 6(4), 387-396 (2015).

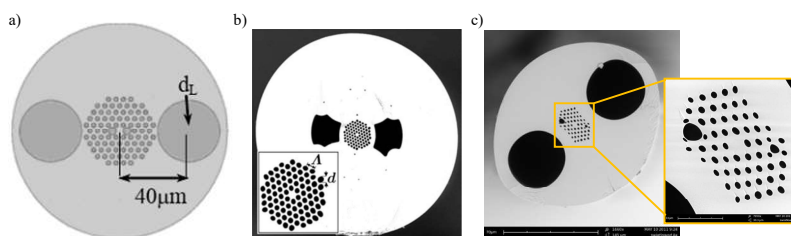
18 H. M. Xie, et al. "Side-hole fiber for fiber-optic pressure sensing," Opt. Lett. 11, 333-355 (1986).

19 P. Blazkiewicz, et al., "Modification of Thermal Poling Evolution Using Novel Twin-Hole Fibers," J. Lightwave Technol. 19(8), 1149-1155 (2001)

spektralnych fazowej i grupowej dwójłomności modowej zbliżonych do włókien mikrostrukturalnych²⁰.

Można łatwo przewidzieć, że czułość włókien fotonicznych powiększy się znacząco, jeśli w obszarze płaszczki umieszczone zostaną otwory o dużych średnicach, które wprowadzą silną asymetrię właściwości mechanicznych włókna. W pracy²¹ po raz pierwszy przedstawiono symulacje numeryczne czułości polarymetrycznej K_p włókien mikrostrukturalnych z umieszczonymi na zewnątrz mikrostruktury dodatkowymi kanałami powietrznymi o dużej średnicy. Analiza pokazała, że K_p może osiągać wartość -21 rad/m/MPa dla $\lambda=1550$ nm. Ponadto takie struktury mogą być nie czułe na temperaturę. Pierwszą realizacją praktyczną włókna mikrostrukturalnego typu *Side-Hole* pokazano w pracy²² (rys. 9b), jednak uzyskana czułość K_p na poziomie -11 rad/m/MPa dla $\lambda=1550$ nm była tylko o ok 3 rad/m/MPa większa niż czułości we włóknie PMF 1550-01. Dlatego moim kolejnym celem badawczym było zaprojektowanie włókna HBMOF typu *Side-Hole*, które zostało wytworzone w PTŚ UMCS i charakteryzowane eksperymentalnie w pracy:

[H5] A. D. Anuszkiewicz, T. Martynkien, J. Olszewski, P. Mergo, W. Urbańczyk: „Polarimetric sensitivity to hydrostatic pressure and temperature in a Side-Hole fiber with squeezed microstructure,” *Journal of Optics* 17, art. 125609, 1-6 (2015).



Rys. 9. Struktury HBMOF typu *Side-Hole*: struktura zaproponowana w pracy [19], realizacja praktyczna przedstawiona w pracy [20], struktura zaproponowana w pracy [H5].

W zaprojektowanym światłowodzie wziąłem pod uwagę fakt, że podczas wyciągania mikrostrukturalny płaszcz się zdeformuje, co będzie prowadzić do modyfikacji sieci heksagonalnej i powstania sieci skośnej (*squeezed lattice*). W omawianym włóknie uzyskano dużą dwójłomność modową $B=3,33 \times 10^{-4}$ oraz $G=-6,62 \times 10^{-4}$ dla $\lambda=1550$ nm potwierdziło, że B i G zależą od eliptyczności otworów oraz stopnia „ściśnięcia” takiej struktury. Dodatkowym kryterium wziętym przeze mnie pod uwagę, podczas projektowania włókna był mały współczynnik wypełnienia powierzchniowego f (stosunek powierzchni dziury do kwadratu średniej odległości między dziurami) oraz wielkość dużych dziur umieszczonych w stałej części płaszczki poza mikrostrukturą. Mała wartość $f < 0,15$ oraz 4 pierścienie dziur zapewniły jednomodowy tryb pracy w szerokim zakresie spektralnym oraz dużą asymetrię rozkładu naprężeń generowanych ciśnieniem hydrostatycznym w obszarze rdzenia co za tym idzie zwiększoną podatność dwójłomności na ciśnienie hydrostatyczne. Ostatecznie we włóknie

20 P. Hlubina, et al., "Spectral-Domain Measurement of Strain Sensitivity of a Two-Mode Birefringent Side-Hole Fiber," *Sensors* 12(9), 12070-12081 (2012).

21 M. Szpulak, T. Martynkien, and W. Urbańczyk, "Highly birefringent photonic crystal fibre with enhanced sensitivity to hydrostatic pressure," in *Proceedings of 2006 8th International Conference on Transparent Optical Networks with 5th European Symposium on Photonic Crystals* (Nottingham, UK, June 18–22, 2006) Vol. 4 / [Ed. M. Marciniak]. Piscataway, NJ: IEEE, cop. 2006, pp. 174–177.

22 J. H. Osório, et al. "Photonic-crystal fiber-based pressure sensor for dual environment monitoring," *Appl. Opt.* 53, 3668-3672 (2014).

uzyskano $K_T = -9,2 \times 10^{-3}$ rad/(K×m) oraz $K_p = -25,6$ rad/(MPa×m) dla długości fali $\lambda = 1550$ nm, a stosunek czułości osiągnął wartość $K_p/K_T = 2790$ K/MPa. Czynnikiem, który prowadzi do nawet dwukrotnego zwiększenia K_p jest umieszczenie dziur w taki sposób by odległość między mikrostrukturą a krawędzią dużej dziury była jak najmniejsza, czego nie udało się zrealizować ze względu na ograniczenia technologiczne.

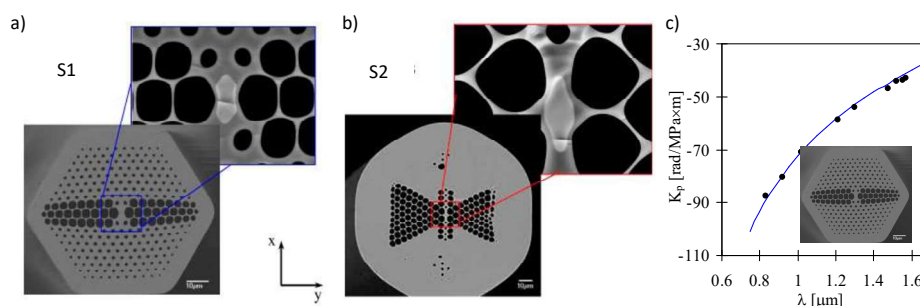
Mój wkład w pracę [H5] polegał na opracowaniu modelu numerycznego pozwalającego na obliczenia dwójłomności modowej oraz jej podatności na ciśnienie i temperaturę. Przeprowadzeniu optymalizacji czułości polarymetrycznej struktury na ciśnienie poprzez odpowiedni dobór eliptyczności, wielkości oraz rozmieszczeniu otworów powietrznych w przekroju włókna a także ilości pierścieni z kanałami powierzchniowymi. Przeprowadzeniu części pomiarów i wyselekcjonowaniu najlepszego włókna. Aktywna kontrola nad przebiegiem pozostałych pomiarów. Współudział w pisaniu pracy.

Drugim ze sposobów pozwalających na uzyskanie światłowodu o podwyższonej czułości na ciśnienie hydrostatyczne jest modyfikacja mikrostrukturalnego płaszczu poprzez zwiększenie średnicy wybranych otworów powietrznych. W pracy:

[H6] T. Martynkien, G. Statkiewicz-Barabach, J. Olszewski, J. Wojcik, P. Mergo, T. Geernaert, C. Sonnenfeld, A. D. Anuszkiewicz, M. Szczurowski, K. L. Tarnowski, M. Makara, K. Skorupski, J. Klimek, K. Poturaj, W. Urbańczyk, T. Nasiłowski, F. Berghmans, H. Thienpont: „Highly birefringent microstructured fibers with enhanced sensitivity to hydrostatic pressure,” *Optics Express* 18(14), 15113-15121 (2010),

zaproponowano struktury, w których w mikrostrukturalnym płaszczu wprowadzono dużą asymetrię rozkładu dziur o większej średnicy, rys. 10.

Czułość na ciśnienie hydrostatyczne praktycznie była jednakowa w obu wytworzonych światłowodach, pokazanych na rys. 10a-b i dla $\lambda = 1550$ nm K_p wyniosła około -43 rad/MPa×m. Należy podkreślić, że uzyskane wartości K_p są niemal 2 razy większe niż we włóknie pokazanym na rys. 9.c. Co oznacza, że modyfikacja mikrostrukturalnego płaszczu jest bardzo efektywną metodą zwiększania czułości na ciśnienie hydrostatyczne światłowodów. Należy tu jednak podkreślić, że włókna zaprezentowane na rys. 10 miały dodatkowo domieszkowany rdzeń GeO_2 , co pozwala zapisać w ich rdzeniach siatki Bragga, w konwencjonalnym układzie z laserem UV i maską fazową.



Rys. 10. Struktury o podwyższonej czułości na ciśnienie hydrostatyczne analizowane w pracy [H6](a-b). Zależność spektralna K_p w strukturze S1 (c).

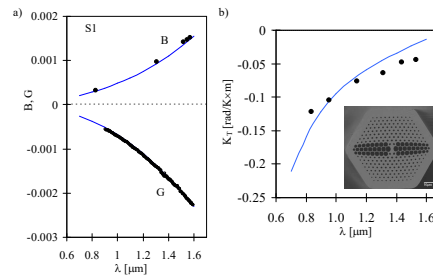
Wprowadzenie domieszkowanego rdzenia powoduje konieczność uwzględnienia obok składowej geometrycznej składowej naprężeniowej dwójłomności. Jest ona związana z naprężeniami jakie pojawiają się w przekroju włókna po jego wyciągnięciu, a które są

konsekwencją różnych współczynników rozszerzalności termicznej czystego szkła krzemionkowego oraz domieszkowanego GeO₂.

Podobnie jak we włóknach klasycznych domieszkowanie rdzenia ma wpływ na odpowiedź włókien tego typu na temperaturę. Aby wziąć pod uwagę efekt związany z naprężeniami w pierwszym kroku oblicza się składowe tensora naprężeń $\sigma_{xx}(\Delta T)$, $\sigma_{yy}(\Delta T)$, $\sigma_{zz}(\Delta T)$ oraz $\sigma_{xy}(\Delta T)$ a następnie poprawki współczynnika załamania opisane zależnościami:

$$\begin{aligned} n_{xx} &= n_0 + C_1 \sigma_{xx}(\Delta T) + C_2 [\sigma_{yy}(\Delta T) + \sigma_{zz}(\Delta T)] \\ n_{yy} &= n_0 + C_1 \sigma_{yy}(\Delta T) + C_2 [\sigma_{xx}(\Delta T) + \sigma_{zz}(\Delta T)] \\ n_{zz} &= n_0 + C_1 \sigma_{zz}(\Delta T) + C_2 [\sigma_{xx}(\Delta T) + \sigma_{yy}(\Delta T)] \\ n_{xy} &= (C_1 - C_2) \sigma_{xy}(\Delta T) \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie C_1 oraz C_2 to stałe piezooptyczne, natomiast ΔT to różnica temperatur pomiędzy temperaturą mięknienia szkła a temperaturą otoczenia $T_0=293\text{K}$.



Rys. 11. Spektralne zależności fazowej i grupowej dwójłomności modowej (a) oraz czułości polarymetrycznej na temperaturę (b) w strukturze S1.

W przypadku obliczania czułości na temperaturę konieczne jest dodatkowe uwzględnienie zmiany współczynnika załamania rdzenia i płaszczka oraz materiału wypełniającego dziury związanego z efektem termooptycznym: $\Delta n_{air} = \gamma_{air}(T_1 - T_0)$ oraz $\Delta n_{glass} = \gamma_{glass}(T_1 - T_0)$. Ostatecznie podatność dwójłomności na temperaturę można obliczyć korzystając z przybliżenia różnicy dwupunktowej:

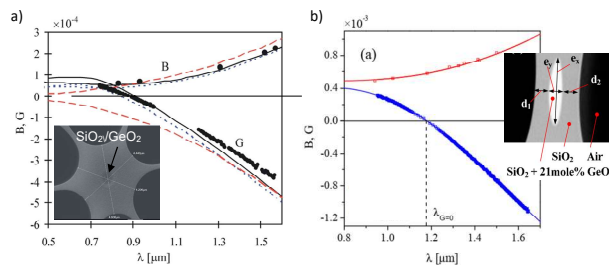
$$\frac{dB}{dT} = \frac{B_{T_1=59} - B_{T_0=29}}{T_1 - T_0}. \quad (10)$$

Dla obu struktur fazowa dwójłomność modowa dla długości fali $\lambda = 1550 \text{ nm}$ osiągnęła wartości rzędu $B=1,5 \times 10^{-3}$. Czułość K_T dla obu struktur była porównywalna jednak przypadku struktury S1 dzięki silniejszej dyspersji czułość na temperaturę osiągnęła dla $\lambda = 1550 \text{ nm}$ wartość $K_T=-0,044 \text{ rad/K/m}$, natomiast w drugiej strukturze osiągnęła wartość $K_T=-0,08 \text{ rad/K/m}$. Należy tu podkreślić, że te wartości są o rząd większe niż we włóknach HBMOF bez domieszki w rdzeniu. I jest to koszt jaki musi zostać poniesiony aby zapisać siatkę Braga przy pomocy standardowych metod zapisu laserami UV. Z drugiej strony wartości czułości są o około rząd mniejsze niż w dwójłomnych włóknach tradycyjnych. W tym przypadku stosunek K_p/K_T dla 1550 nm , dla S1 wyniósł 980 K/MPa a dla drugiego włókna 540 K/MPa .

Mój wkład w pracę [H6] polegał na opracowaniu modelu numerycznego pozwalającego na obliczenia dwójłomności modowej, w którym uwzględniłem składową naprężeniową dwójłomność wynikającą z różnych współczynników rozszerzalności termicznej szkła rdzenia i płaszczka. Opracowaniu modelu czułości na temperaturę, w którym obok współczynników termooptycznych szkła powietrza uwzględniono deformację struktury oraz zmianę naprężeń. Przeprowadzenie optymalizacji czułości polarymetrycznej struktury na ciśnienie poprzez odpowiedni dobór wielkości oraz rozmieszczenia otworów powietrznych o zwiększonej średnicy w przekroju włókna,

a także ilości pierścieni i kształtu inkluzji w rdzeniu. Przeprowadzeniu pomiarów czułości polarymetrycznej na temperaturę. Kontrola nad przebiegiem pozostałych pomiarów. Napisanie manuskryptu.

Jak wspomniano jedną z motywacji by badać struktury hybrydowe była możliwość stosunkowo łatwego zapisu siatek Bragga przy pomocy lasera UV. Trzeba jednak wspomnieć, że w tego typu strukturach połączenie właściwości charakterystycznych dla włókien tradycyjnych oraz włókien mikrostrukturalnych mogą prowadzić do bardzo interesujących efektów. Jednym z nich jest możliwość kształtowania charakterystyk spektralnych fazowej bądź grupowej dwójłomności modowej poprzez odpowiednie kształtowanie składowej naprężeniowej i geometrycznej dwójłomności całkowitej. Na przykład w pracy²³ bazując na symulacjach numerycznych pokazano, że umieszczenie stref naprężających wykonanych z B_2O_3 w mikrostrukturalnym płaszczu sprawia, że dla pewnej długości fali dwójłomność fazowa zmienia znak ($B=0$). Efekt ten może być wykorzystany do zwiększenia relatywnie małych wartości fazowej dwójłomności modowej w krótko falowym zakresie we włóknach fotonicznych.



Rys. 12. Charakterystyki spektralne fazowej i grupowej dwójłomności modowej we światłowodzie IPHT z eliptycznym rdzeniem (a) oraz w światłowodzie typu *Side-Hole* (b). w Obu strukturach grupowa dwójłomność modowa zmienia znak ($G=0$) dla pewnej długości fali $\lambda_{G=0}$.

Na rys. 12a pokazano przykład włókna z eliptyczną inkluzją w środku rdzenia, w którym wartość fazowej dwójłomności modowej w zakresie krótko falowym jest większa niż w przypadku włókna bez inkluzji GeO_2 ²⁴. Główny wpływ na przebieg spektralny $B(\lambda)$ ma silnie dyspersyjna składowa geometryczna co powoduje, że grupowa dwójłomność modowa dla pewnej długości fali zmienia znak ($\lambda_{G=0}$). Zmianę znaku G po raz pierwszy pokazano we włókninie wytworzonym przez IPHT Jena Niemcy (rys. 12a). W konsekwencji pozwoliło na zaprojektowanie i wytworzenie włókien typu *Side-Hole* (rys. 12b), w których $G=0$ dla pewnej długości fali²⁵.

Umieszczenie otworów powietrznych w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia ma wpływ nie tylko na przebieg spektralny dwójłomności modowej, ale również na inne właściwość propagacyjne, które determinują potencjalne obszary zastosowania tego typu światłowodów. Jednym z nich jest możliwość kształtowania przebiegu spektralnego dyspersji chromatycznej (D_{ch}). Na przykład w przypadku konwencjonalnego włókna telekomunikacyjnego SMF (np. Corning SMF-28), dyspersja chromatyczna w krótko falowym zakresie jest ujemna (zakres dyspersji normalnej) i dla długości fali $\lambda_{ZDW}=1310nm$ (dla λ_{ZDW}

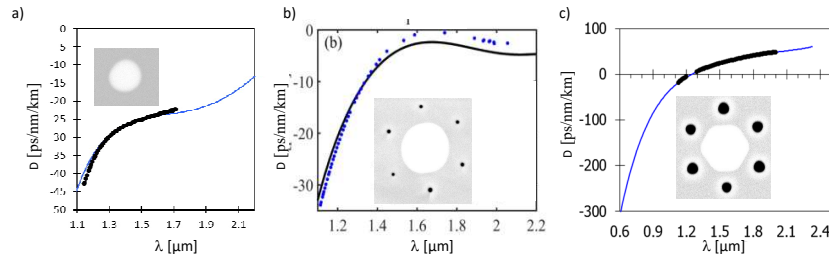
23 A. Tonello, et al., "Control of modulation and soliton polarization instabilities in photonic crystal fibers with birefringence management", *Opt. Quant. Electron.* 39, 435–453 (2007).

24 T. Martynkien, et al., "Birefringence in microstructure fiber with elliptical GeO_2 highly doped inclusion in the core," *Opt. Lett.* 33, 2764-2766 (2008).

25 A. Anuszkiewicz, et al., "Sensing and transmission characteristics of a rocking filter fabricated in a side-hole fiber with zero group birefringence," *Opt. Express* 21, 12657-12667 (2013).

$D_{ch}=0$) zmienia znak na dodatni ($\lambda > \lambda_{ZDW}$ anomalny zakres dyspersji). Zwiększanie domieszki GeO_2 w rdzeniu i zmniejszanie jego średnicy (by zachować jednomodowość) prowadzi do przesuwania się λ_{ZDW} w kierunku długofalowym. Jednocześnie efektywne pole modu (A_{eff}) zmniejsza się, co prowadzi do wzrostu wartości współczynnika nieliniowości światłowodu ($\gamma \sim 1/A_{eff}$). Dalsze zwiększenie poziomu domieszki może jednak spowodować, że w użytecznym zakresie 1100nm – 2000nm włókno będzie miało dyspersję normalną.

Wprowadzenie mikrostruktury na zewnątrz rdzenia pozwala na precyzyjną kontrolę położenia λ_{ZDW} w szczególności jej przesunięcie, przy zachowaniu wysokiej wartości γ , czego konsekwencją jest możliwość efektywnej generacji efektów nieliniowych, na przykład solitonów.



Rys. 13. Charakterystyki dyspersyjnych światłowodów o dużym poziomie domieszkowania rdzenia GeO_2 : do kompensacji dyspersji (a), do generacji supercontinuum (b) oraz do generacji solitonów (c).

Charakterystyki dyspersyjne oraz przekroje poprzeczne światłowodów nie dwójtłomnych o wysokiej nieliniowości z dyspersją normalną w zakresie spektralnym 1100nm – 2000nm pokazano na rys. 13a,b: światłowód do kompensacji dyspersji wyciągnięty w PTŚ UMCS oraz światłowód (ANDI - All Normal Dispersion) do generacji supercontinuum²⁶. Na rys. 13c pokazano zależność $D_{ch}(\lambda)$ i przekrój światłowodu o niskiej dwójtłomności modowej do generacji solitonów²⁷.

Dalszym krokiem w rozwoju światłowodów do generowania solitonów i konwersji ich częstotliwości było wytworzenie włókien o dużej dwójtłomności utrzymujących stan polaryzacji, co zaprezentowano w pracy:

[H7] G. J. Soboń, T. Martynkien, D. Tomaszewska, K. L. Tarnowski, P. Mergo, J. Sotor: „All-in-fiber amplification and compression of coherent frequency-shifted solitons tunable in the 1800–2000 nm range,” *Photonics Research* 6(5), 368-372 (2018).

W pracy tej sprawdzono ponadto możliwość skrócenia czasu impulsu generowanego solitonu za pomocą, zaprojektowanego światłowodu dwójtłomnego z eliptycznym rdzeniem o dyspersji normalnej w zakresie spektralnym 1550-2100nm.

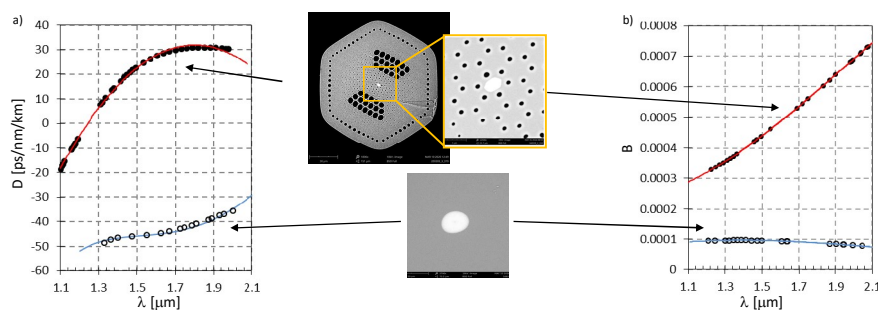
Na wejściu tego sytemu zastosowano laser światłowodowy o mocy średniej $P_a=120$ mW, czasie trwania impulsu $T=27$ fs z częstotliwością repetycji impulsów $f=45$ MHz. Wyjście lasera było dopawane do włókna PM-HNLF o długości ok 2,3m pozwalającego na konwersję częstości solitonu w sposób ciągły w zakresie 1600- 2100 nm. Następnie solitony były poszerzane do ok. 8 ps a w tym celu wykorzystano włókna o dyspersji normalnej PM-DCF, o długości ok. 8 m. Rozciągnięte w czasie impulsy były następnie wzmacniane za pomocą wzmacniacza tulowego i kompresowane włóknem komercyjnym o dyspersji anomalnej. Pozwoliło to uzyskać impulsy na wyjściu całego sytemu w zakresie spektralnym 1800-

26 K. Tarnowski, et al., "Polarized all-normal dispersion supercontinuum reaching 2.5 μm generated in a birefringent microstructured silica fiber," *Opt. Express* 25, 27452-27463 (2017).

27 G. Soboń, et al., "Generation of sub-100 fs pulses tunable from 1700 to 2100 nm from a compact frequency-shifted Er-fiber laser," *Photon. Res.* 5, 151-155 (2017).

2000nm o mocy średniej przekraczającej 100mW o czasie trwania 100fs oraz energiach przekraczających wartości 4nJ.

Oba światłowody PM-HNLF oraz PM-DCF zostały wyciągnięte w PTŚ UMCS. Światłowód PM-HNLF miał domieszkowany rdzeń z koncentracją molową domieszki GeO₂ $d=18\%$. Dodatkowo eliptyczny rdzeń (o wymiarach osi $3,9 \times 2,53 \mu\text{m}$) otoczony był kilkoma pierścieniami otworów powietrznych co pozwoliło na uzyskanie anomalnej dyspersji chromatycznej dla dł. fali 1560 nm wynoszącej $D=26 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ i współczynnika nieliniowości wynoszącego $\gamma=11,7 \text{ W}^{-1}\times\text{km}^{-1}$. Jednocześnie umieszczenie w płaszczu kilku rzędów dziur o większej średnicy pozwoliło na „ściśnięcie” sieci podczas procesu wyciągania i wytworzenie eliptycznego rdzenia, a w konsekwencji wysokiej dwójłomności fazowej przekraczającej wartość $B>4 \times 10^{-4}$ dla zakresu spektralnego 1550-2000 nm. Należy podkreślić, że kanały powietrzne leżące w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia pozwoliły na uzyskanie dyspersji anomalnej w zakresie 1,3-2,1 μm , wysokiej nieliniowości oraz wysokiej dwójłomności, rys. 14a. Dwójłomny światłowód do kompensacji dyspersji (PM-DCF) również miał eliptyczny rdzeń (o wymiarach $3,14 \times 2,7 \mu\text{m}$) przy koncentracji molowej GeO₂ wynoszącej $d=31\%$. W rezultacie fazowa dwójłomność modowa światłowodu DCF wyniosła $B=1 \times 10^{-4}$ dla dł. fali 1550nm. Wartości dyspersji chromatycznej nieznacznie rosła od wartości -45 ps/nm/km dla 1550nm do -38 ps/nm/km dla 2000nm, rys 14b.



Rys. 14. Zdjęcia SEM przekrojów włókien PM-HNLF oraz PM-DCF do generacji i kompresji solitonów. Spektralne charakterystyki dyspersji chromatycznej (a) oraz fazowej dwójłomności modowej (b).

Należy podkreślić, że najważniejszą cechą zaprojektowanego światłowodu PM-HNLF była wysoka nieliniowość pozwalająca na generację solitonów w relatywnie krótkich odcinkach włókna. W przypadku włókien konwencjonalnych zakresy przestrajania solitonów powyżej 2000nm uzyskiwano we włóknach HB o długościach przekraczających 150-220 m²⁸ przypadku włókna PM-HNLF prezentowanego w publikacji wystarczyła długość 2,3m. Należy podkreślić również, że światłowód PM-DCF był w chwili jego zademonstrowania jedynym światłowodem utrzymującym stan polaryzacji dla pasma 2000nm obok komercyjnego dostępnego światłowodu PM2000D firmy Nufern, który jednak nie nastęrczał problemów z utrzymywaniem stanu polaryzacji światła po jego zespawaniu z innymi światłowodami. W obu światłowodach przesłuchy między modami polaryzacyjnymi nie przekraczały -20dB na metr włókna.

Mój wkład w pracę [H7] polegał na zaprojektowaniu obu światłowodów o wysokiej dwójłomności tj światłowodu PM-HNLF o wysokiej nieliniowości do generacji oraz przestrajania solitonów, oraz światłowodu PM-DCF o dyspersji normalnej utrzymującego stan polaryzacji w zakresie 1550-2100nm. Eksperymentalnym scharakteryzowaniu w szerokim zakresie spektralnym zarówno dyspersji chromatycznej, dwójłomności

28 N. Nishizawa et al., "Widely wavelength-tunable ultrashort pulse generation using polarization maintaining optical fibers," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 7, 518-524 (2001).

modowej a także przesłuchów między modami polaryzacyjnymi. Ostatecznie wstępnie zweryfikowałem możliwość generacji i przestrajania solitonów we włóknie PM-HNLF za pomocą lasera fs. Udział w pisaniu artykułu.

Włókna mikrostrukturalne projektowane i charakteryzowane przeze mnie wytwarzane były głównie ze szkła krzemionkowego. Rozpoczęcie współpracy z prof. R Buczyńskim (Uniwersytet Warszawski oraz IMIF (dawniej ITME)) sprawiło, że włączyłem do obszaru badań światłowody wykonane ze szkła wieloskładnikowych np. telurkowych czy bizmutowych. Do światłowodów dwójłomnych ze szkła wieloskładnikowych, które badałem eksperymentalnie i numerycznie mogę zaliczyć światłowody dwójłomne z eliptycznymi dziurami²⁹ oraz światłowód ze strukturyzowanym anizotropowym rdzeniem³⁰. Najciekawszym jednak projektem było badanie światłowodów dwuszkłanych o dyspersji normalnej, gdzie matrycę stanowiło szkło F2 (katalog Schotta), natomiast inkluzje biegnące wzdłuż rdzenia wykonane były ze szkła NC21 wyprodukowanego w IMIF³¹.

Całkiem inną klasą światłowodów wykonanych z innych materiałów niż szkło krzemionkowe były światłowody wykonane przez PTŚ UMCS ze szkła organicznych, głównie z poli(metakrylanu metylu) –PMMA oraz polistyrenu (PS). W początkowej fazie badań nacisk został położony na opracowanie i zoptymalizowanie technologii wytwarzania włókien mikrostrukturalnych nie dwójłomnych. Wybór optymalnej technologii, innej niż w przypadku włókien ze szkła nieorganicznych, a polegającej na wierceniu i polerowaniu ścian kanałów powietrznych w preformie PMMA, związany był z wykonaniem przeze mnie szeregu pomiarów tłumienności wytworzonych włókien i przekazaniu informacji zwrotnej do grupy PTŚ UMCS. Ostatecznie udało się zredukować straty we włóknach mPOF (microstructured Polymer Optical Fiber) do poziomu kilku dB/m w zakresie VIS/NIR. Sama metoda redukcji strat została opatentowana [P4]. Przede wszystkim jednak te działania otworzyły drogę do wytworzenia włókien o wysokiej dwójłomności i niskich stratach zarówno mikrostrukturalnych (HB mPOF) jak i włókien typu *Side-Hole*.

Po raz pierwszy polimerowy dwójłomny światłowód mikrostrukturalny (HB mPOF) został pokazany w 2004³² jednak dopiero w pracy³³ z 2010 roku zaprezentowano właściwość czujnikowe obejmujące czułość polarymetryczną na ciśnienie hydrostatyczne, rozciąganie i temperaturę w komercyjnie dostępnym HB mPOF (Kiriyama Pty Ltd., Sydney, Australia), a jego zdjęcie SEM pokazano na rys 15a. Jednak ze względu na bardzo małą odległość między dużymi dziurami w sąsiedztwie rdzenia, światłowód stał się dwurdzeniowy, na rys. 15a pokazano natężenia światła na wyjściu tego światłowodu przy pobudzeniu obu supermodów.

W pracy:

[H8] T. Martynkien, P. Mergo, W. Urbańczyk: „Sensitivity of birefringent microstructured polymer optical fiber to hydrostatic pressure,” *IEEE Photonics Technology Letters* 25(16), 1562-1565 (2013),

29 I. Kujawa, et al., "Multiple defect core photonic crystal fiber with high birefringence induced by squeezed lattice with elliptical holes in soft glass," *Opt. Fib. Technol.* 18, 220–225 (2012).

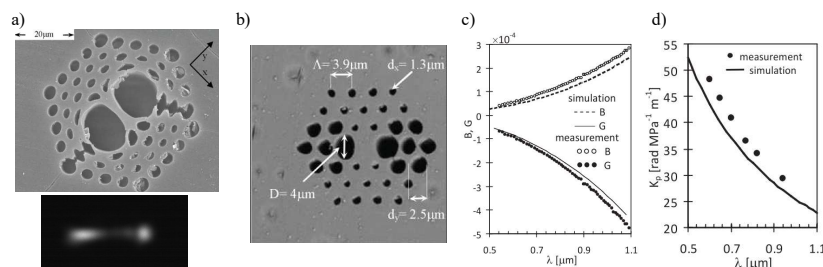
30 G. Stępniewski, et al., "Artificially anisotropic core fiber with ultra-flat high birefringence profile," *Opt. Mater. Express* 6, 1464-1479 (2016).

31 T. Martynkien, et al., "All-solid microstructured fiber with flat normal chromatic dispersion," *Opt. Lett.* 39, 2342-2345 (2014).

32 N. A. Issa, et al., "Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes," *Opt. Lett.* 29(12), 1336–1338 (2004)

33 M. K. Szczerowski, et al. "Measurements of polarimetric sensitivity to hydrostatic pressure, strain and temperature in birefringent dual-core microstructured polymer fiber," *Opt. Express* 18, 12076-12087 (2010).

zaprezentowano jednomodowy światłowód HB mPOF, ze zwiększoną podatnością dwójfomności modowej na ciśnienie hydrostatyczne. Przekrój wytworzonego w PTŚ UMCS pokazano na rys 15b. Dużą dwójfomność uzyskano przez zwiększenie średnicy otworów powietrznych w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia (D). Dodatkowo by zwiększyć czułość na ciśnienie hydrostatyczne zwiększono również średnice wybranych otworów. Ze względów technologicznych, ale również by zapewnić jednomodowość ograniczono liczbę pierścieni kanałów powietrznych do trzech.



Rys. 15. Przekrój poprzeczny światłowodu Kiriyama Pty Ltd. of Sydney, Australia oraz rozkład natężenia światła na jego wyjściu (a). Przekrój światłowodu HB mPOF wytworzonego przez PTŚ UMCS (b). Spektralne zależności fazowej i grupowej dwójfomności modowej (c) oraz czułości polarymetrycznej na ciśnienie (d).

Zależność fazowej i grupowej dwójfomności modowej w funkcji długości fali w zakresie 600-1100nm pokazano na rys. 15c. Dla $\lambda=800\text{nm}$ B osiągnęła wartość $1,2 \times 10^{-4}$, a dla $\lambda=1100\text{nm}$ B wyniosła $B = 3 \times 10^{-4}$. Dzięki tak dużej wartości dwójfomności fazowej nie zaobserwowano w badanym zakresie spektralnym istotnych przestuchów między modami polaryzacyjnymi ($PER \sim -20$ dB na 1 metr włókna). Zależność zmiany różnicy faz między modami polaryzacyjnymi wywołana ciśnieniem hydrostatycznym była liniowa w zakresie zmian ciśnienia 0-8,5 MPa. Czułość K_p badanego światłowodu miała największą wartość $K_p=48$ rad/MPa/m dla dł. fali 600 nm a jej wartość malała do 30 rad/MPa/m dla dł. fali 940nm, rys. 15d. Należy zwrócić uwagę, że włókna wykonane z PMMA mają przeciwny znak czułości K_p w stosunku do włókien o takiej samej geometrii, ale wykonanych ze szkła krzemionkowego, co jest konsekwencją różnych znaków różnicowej stałej elastooptycznej ΔC w obu materiałach. Bardzo dobra zgodność obliczeń fazowej i grupowej dwójfomności modowej oraz czułości K_p z pomiarami świadczy o poprawności przyjętych założeń. W szczególności chodzi tu o wartość różnicowej stałej elastooptycznej ΔC , która w przypadku światłowodów wykonanych z PMMA mogą przyjmować wartości z przedziału $\Delta C = -4,5 - -1,5 \times 10^{-12} \text{Pa}$ i są zależne od siły z jaką wyciągano włókno, co zostało uwzględnione w modelowaniu oraz zmierzone w pracy spoza cyklu ³⁴.

Symulacje pokazały, że we włóknie z PMMA składowa dB_G/dp może stanowić nawet 6% podatności całkowitej, natomiast we włóknach krzemionkowych składowa dB_G/dp jest o dwa rzędy wielkości mniejsza niż składowa dB_S/dp . Ponadto większa wartości bezwzględnej wartości ΔC powoduje, że całkowita podatność włókna z PMMA jest o ok. 15% większa niż takiego samego światłowodu z SiO_2 . W pracy zaprezentowano również wpływ temperatury na różnicę faz pomiędzy modami polaryzacyjnym i *podkreślono fakt, że odpowiedź ta nie jest liniowa.*

Mój wkład w pracę [H8] polegał na opracowaniu modelu numerycznego i przeprowadzeniu wszystkich pomiarów i symulacji numerycznych struktury

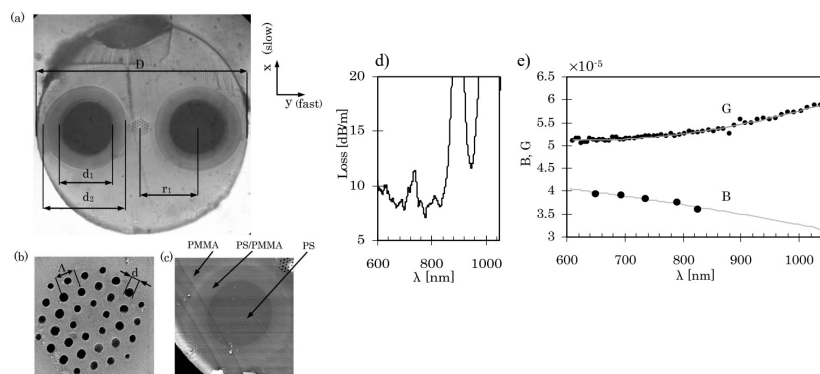
³⁴ M. K. Szczeniowski, et al., "Measurements of stress-optic coefficient in polymer optical fibers," Opt. Lett. 35, 2013-2015 (2010).

wyidealizowanej oraz rzeczywistej. Ponadto przeprowadzeniu symulacji numerycznych dla struktury wykonanej SiO_2 . Napisanie manuskryptu.

W światłowodach klasycznych typu *Panda* lub *Bow-Tie* by wytworzyć włókno o wysokiej dwójłomności z kołowym rdzeniem, którego średnica jest zbliżona do rdzenia włókna SMF, jako materiał stref naprężających stosuje się domieszki obniżające współczynnik załamania. W tego typu światłowodach, dwójłomność modowa jest tym większa im bardziej strefy naprężające są zbliżone do rdzenia, stąd zabieg obniżenia wsp. załamania stref w stosunku do płaszczu i rdzenia, prowadzi do redukcji strat transmisyjnych. W przypadku włókien polimerowych z PMMA dostępnym materiałem wprowadzającym naprężenia był kopolimer PMMA/PS, który ma większy współczynnik załamania niż czyste PMMA. Dlatego by zredukować wyciekanie światła z rdzenia do stref i przewidywane straty transmisyjne włókien polimerowych z tradycyjnym rdzeniem, koniecznym było zaprojektowanie światłowodu polimerowego z mikrostrukturalnym płaszczem, co pozwoliło zredukować straty transmisyjne. Wyniki pomiarów w światłowodzie mikrostrukturalnym PMMA ze strefami naprężającymi z kopolimeru PMMA/PS, wytworzonym w PTŚ UMCS w Lublinie zademonstrowano w pracy:

[H9] P. Mergo, T. Martynkien, W. Urbańczyk: „Polymer optical microstructured fiber with birefringence induced by stress-applying elements,” *Optics Letters* 39(10), 3018-3021 (2014).

W badanym włóknie mikrostrukturalnym płaszcz składał się z 3 pierścieni otworów o średnicy w przybliżeniu $d=1.43\mu\text{m}$ i stałej sieci $\Lambda=3.3\mu\text{m}$, co zapewniło poziom strat transmisyjnych 8-10 dB/m w zakresie spektralnym 600-850nm, rys. 16. Włókno charakteryzowało się fazową dwójłomnością modową na poziomie $3-4 \times 10^{-5}$. Przebiegi spektralne fazowej i grupowej dwójłomności modowej były zbliżone do charakterystyk spektralnych włókien typu *Panda* i przede wszystkim wartości B i G nieznacznie się różniły a ich znak był jednakowy. Należy jednak podkreślić że fazowa dwójłomność modowa we włóknie PMMA była o rząd mniejsza, w stosunku do takiego samego włókna wykonanego z SiO_2 . Najprościej można to wytłumaczyć faktem, że B jest proporcjonalna do wyrażenia $B \sim \Delta C E \Delta \alpha \Delta T$ i mimo, że iloczyn $\Delta C \Delta \alpha \Delta T$ jest zbliżony dla PMMA i SiO_2 , to dla SiO_2 moduł Younga (E) jest ok 15 razy większy niż w PMMA. Ostatecznie eksperymentalnie potwierdzono, że osie polaryzacyjne światłowodu PMMA (oś szybka i wolna), są odwrotnie zorientowane niż we włóknie typu *Panda* wykonanym z SiO_2 .



Rys. 16. Zdjęcie mikroskopowe przekroju włókna (a), zdjęcie SEM mikrostruktury (b) oraz zdjęcie strefy naprężającej (c). Zależność strat (d) oraz fazowej i grupowej dwójłomności modowej (e) w funkcji długości fali.

Dodatkowo w pracy pokazano, że zmiany różnicy faz między modami polaryzacyjnymi dla grzania i chłodzenia włókna, charakteryzują się dużą histerezą, która jednak może zostać praktycznie wyeliminowana po 3 cyklach grzania światłowodu. Ostatecznie pokazano, że w przypadku włókien polimerowych ze strefami naprężającymi kilkukrotne wygrzanie włókna w temperaturze ok. 85°C prowadzi po kilku cyklach do trwałej reedukacji dwójłomności modowej o ok 25%.

Mój wkład w pracę [H9] polegał na zaplanowaniu i przeprowadzeniu pomiarów właściwości włókna: fazowej i grupowej dwójłomności modowej, strat transmisyjnych, sprzęgania się modów polaryzacyjnych (współczynnik PER), znaków dwójłomności oraz orientacji osi polaryzacyjnych. A także zaplanowanie oraz wykonanie eksperymentów demonstrujących odpowiedź włókna na temperaturę oraz analiza zmian zachodzących we włóknie po wygrzewaniu. Aktywny udział w napisaniu artykułu.

Kolejnymi włóknami polimerowym poddanymi badaniom są włókna typu *Side-Hole*. A przeprowadzone przeze mnie badania zostały opublikowane w pracy:

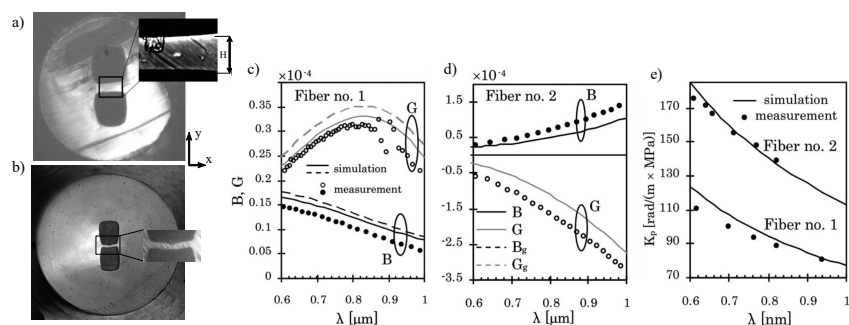
[H10] T. Martynkien, G. Wójcik, P. Mergo, W. Urbańczyk: „Highly birefringent polymer Side-Hole fiber for hydrostatic pressure sensing,” *Optics Letters* 40(13), 3033-3036 (2015).

Światłowody SH wykonane w PTŚ UMCS miały płaszcz wykonany z czystego PMMA a rdzenie wykonane były z kopolimeru PMMA/PS (5% molowych PS). Badane światłowody różniły się odlegością dziur powietrznych od krawędzi rdzenia, rys 17a,c. Dlatego w pierwszym włóknie przebiegi spektralne fazowej i grupowej dwójłomności modowej miały podobny charakter jak w światłowodach tradycyjnych ($B > 0$ i $G > 0$). Natomiast w drugim światłowodzie charakterystyki $B(\lambda)$ i $G(\lambda)$ były takie jak dla światłowodu HBMOF ($B > 0$ i $G < 0$), rys.17b,d.

Ze względu na brak danych literaturowych dla stałych materiałowych kopolimerów PMMA/PS w funkcji stężenia molowego PS, założono, że stałe materiałowe kopolimeru zależą linowo od stężenia i obliczono je na bazie danych dla czystego PMMA oraz PS. W przypadku różnicowej stałej elastoptycznej założono, że stała ta jest taka sama dla PMMA jak i kopolimeru PMMA/PS, a jej wartość zależy od siły z jaką wyciągnięto badane światłowody. Obliczeniach uwzględniono naprężenia wynikające z różnych współczynników rozszerzalności termicznej płaszczu i rdzenia.

Symulacje numeryczne poszczególnych składowych dwójłomności całkowitej tj składowej B_G (geometrycznej) oraz B_S (naprężeniowej) pokazały że B_S jest stosunkowo mała i nie przekracza 10% wartości dwójłomności całkowitej. Dodatkowo składowa B_S ma znak ujemny co powoduje, że obniża ona wartość dwójłomności całkowitej w przeciwieństwie do włókien ze szkła krzemionkowego gdzie składowa B_G , $B_S > 0$. Jest to związane z przeciwnymi znakami różnicowej stałej elastoptycznej rozważanych materiałów ponieważ składowa naprężeniowa opisuje zależność $B_S \sim \Delta C \Delta \alpha E \Delta T / (1 - \nu)$. W wytworzonych włóknach polimerowych typu *Side-Hole* znaki czułości K_p są przeciwne w stosunku do włókien o takiej samej orientacji rdzenia wykonanych ze szkła krzemionkowego, co jest związane z różnymi znakami różnicowej stałej elastoptycznej dla PMMA oraz PMMA/PS oraz SiO₂. Należy jednak podkreślić, że wartości bezwzględne czułości K_p są bardzo zbliżone do włókien *Side-Hole* ze szkła krzemionkowego i w przypadku włókna o najmniejszej szerokości mostka wyniosły 175 rad/MPa×m dla 600nm, rys. 17e. Dodatkowo warto podkreślić, że w tym

samym włóknie czułość polarymetryczna na temperaturę nie przekraczała wartości 2-3rad/K/m.



Rys. 17. Zdjęcia mikroskopowe badanych światłowodów S1 (a) oraz S2 (b). Charakterystyki spektralne fazowej i grupowej dwójłomności modowej dla struktury S1 (c) oraz S2 (d). Charakterystyki spektralne czułości polarymetrycznej na ciśnienie hydrostatyczne (e).

W przypadku włókien typu *Side-Hole*, zademonstrowano, że poprzez odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych, w szczególności odległość pomiędzy krawędziami kanałów powietrznych i rdzenia, można w szerokim zakresie kształtować zależności spektralne dwójłomności modowej. Ponadto pokazano, że możliwe jest wytworzenie włókien polimerowych typu *Side-Hole* o zbliżonych wartościach czułości polarymetrycznej na ciśnienie hydrostatyczne $K_p=100-175$ rad/m/MPa i stosunku $K_p/K_T > 50$ K/MPa jak we włóknach szklanych. Należy podkreślić, że odpowiednie ułożenie kanałów powietrznych spowodowało, że włókno polimerowe *SH* uzyskało charakterystyki spektralne *B* i *G* takie jak w światłowodach HBMOF.

Mój wkład w pracę [H10] polegał na zaplanowaniu i przeprowadzeniu wszystkich pomiarów. Przeprowadzeniu symulacji numerycznych struktur rzeczywistych. Wyjaśnieniu znaków poszczególnych składowych dwójłomności całkowitej a także czułości na ciśnienie hydrostatyczne. Po raz pierwszy zademonstrowano, że zbliżenie kanałów powietrznych do rdzenia prowadzi do we włóknie. Napisaniu manuskryptu.

4.3. Podsumowanie

Cykl publikacji omówiony powyżej stanowiący osiągnięcie dotyczy prac badawczych nad właściwościami i zastosowaniami światłowodów mikrostrukturalnych o dużej dwójłomności. W mojej ocenie opublikowane prace stanowią istotny wkład w reprezentowaną dyscyplinę i pozwoliły na poszerzenie istniejącego stanu wiedzy. Do najważniejszych osiągnięć w przedstawionym cyklu publikacji zaliczyć trzeba:

- Badania nad zastosowaniami czujnikowymi dwójłomnych światłowodów mikrostrukturalnych, w szczególności prace skupiły się na opracowaniu poprawnego modelu teoretycznego wyjaśniającego małą podatność dwójłomności modowej na temperaturę w światłowodach HBMOF [H1] oraz porównaniu tego modelu z wynikami eksperymentalnymi [H2-H3]. Zrozumienie wszystkich efektów związanych z odpowiedzią na temperaturę włókien HBMOF pozwoliło ostatecznie zaprojektować, wyprodukować i eksperymentalnie scharakteryzować włókna o zerowej czułości polarymetrycznej na temperaturę dla określonej długości fali [H3].
- Badania teoretyczne i eksperymentalne nad wpływem ciśnienia hydrostatycznego na dwójłomność włókien MOF [H4] pozwoliły na zaprojektowanie, wytworzenie i charakteryzację eksperymentalną światłowodów HBMOF o podwyższonej czułości

polarymetrycznej na ciśnienie hydrostatyczne i jednocześnie zredukowanej czułości polarymetrycznej na temperaturę [H5-H6].

- Ostatecznie opracowałem model teoretyczny fazowej dwójłomności modowej oraz czułości na temperaturę włókien hybrydowych tj. światłowodów z mikrostrukturalnym płaszczem i rdzeniem domieszkowanym GeO_2 , w których mogą zostać zapisane siatki Braga [H6], a dodatkowo wykorzystano tego typu włókna do generacji solitonów i przestrajania ich centralnej długości fali [H7].
- Kolejnym wątkiem badawczym przedstawionym w cyklu stanowiącym osiągnięcie są badania nad właściwościami światłowodów o wysokiej dwójłomności wytworzonych z poli(metakrylan metylu) (PMMA), polistyrenu (PS) oraz kopolimeru (PMMA/PS). Opracowane przeze mnie modele numeryczne lub przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły pokazać, że podatność dwójłomność na ciśnienie we włóknie z PMMA jest o ok. 15% większa niż takiego samego światłowodu wykonanego ze szkła SiO_2 [H8]. W pracy [H9] pokazano po raz pierwszy polimerowe włókno dwójłomne ze strefami naprężającymi. Dodatkowo w przypadku włókien *Side-Hole* z eliptycznym rdzeniem (z PMMA/PS), składowa geometryczna i naprężeniowa dwójłomności mają inne znaki co powoduje obniżenie wartości dwójłomności całkowitej w przeciwieństwie do włókien tego typu wykonanych ze szkła krzemionkowych. Dodatkowo w pracy [H10] pokazano, że umieszczenie odpowiednio blisko eliptycznego rdzenia kanałów powietrznych pozwala na ograniczenie wpływu tego efektu na wartość dwójłomności modowej, a charakterystyki spektralne dwójłomności modowych stają się podobne do włókien mikrostrukturalnych. Wątek ten biorąc pod uwagę biokompatybilność polimerów, otwiera możliwość stosowania tego typu włókien jako aktywnych elementów czujników ciśnień hydrostatycznych do zastosowań *in vivo*.

Bliska współpraca z grupami technologicznymi, przede wszystkim z grupą PTŚ UMCS oraz grupą prof. Dr hab. R. Buczyńskiego z IMiF w Warszawie sprawiła, że z jednej strony miałem możliwość podejmowania się realizacji wielu ambitnych i nowatorskich wątków badawczych, wykraczających poza możliwości stwarzane przez włókna dostępne komercyjnie. Z drugiej strony, dzięki informacjom zwrotnym skierowanym do grup technologicznych, przyczyniłem się do rozwoju technologii światłowodów mikrostrukturalnych a w szczególności światłowodów o wysokiej dwójłomności zarówno w Polsce jak i na świecie.

Mimo, że ostatnia praca [H7] w omawianym cyklu jest z roku 2018, to jestem wciąż aktywny naukowo. Między innymi byłem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim dr inż. Katarzyny Gąsior, która obroniła w roku 2020 pracę zatytułowaną „Światłowodowe czujniki do pomiaru współczynnika załamania światła wykorzystujące efekt powierzchniowego rezonansu plazmonowego”. Publikacje naukowe związane z tym doktoratem objęły 4 artykuły [B37, B43, B45, B50]. Obecnie pełnię funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim pana mgr inż. Piotra Pali, który zajmuje się tematyką związaną ze sprzęgaczami siatkowymi w układach optyki zintegrowanej. W szczególności pracujemy nad siatkami reliefowymi, które można zapisać na czole światłowodu. Temu wątkowi badawczemu doktoratu poświęciliśmy jak dotąd 3 artykuły [B66, B68, B69]. Doktorant planuje złożyć pracę w nadchodzącym roku.

Bardzo ważnym aspektem, którym zajmowałem się w przeciągu ostatnich 5 lat jest współpraca z grupą prowadzoną przez dr hab. inż. Jarosława Sotora i dr hab. inż. Grzegorza Sobonia i realizacja dwóch ważnych z praktycznego punktu widzenia tematów badawczych do których, zaliczyć muszę opracowanie modułów do generacji solitonów i przestrajania ich częstotliwości, gdzie prace [B46, H7, B48, B52] stanowiły podstawę mocnego dowodu

świadczącego o wysokim poziomie gotowości technologicznej (TRL >4) oraz umożliwiły zdobycie finansowania grantu [G9], którego byłem kierownikiem na PWr i który zakończył się sukcesem polegającym na tym, że opracowane moduły znalazły się w ofercie sprzedaży firmy FIBRAIN z O.O. Dodatkowo wspólne prace dotyczące włókien do kompensacji dyspersji, w szczególności przeprowadzona przeze mnie charakterystyka eksperymentalna włókien dostępnych komercyjnie [B52], pozwoliła na zaprojektowanie i zademonstrowanie w pracach [H7, B52] włókna do kompensacji dyspersji, co także stanowiło dowód wysokiego TRL (TRL>4) i stało się podstawą do ubiegania się z sukcesem o finansowanie projektu: “Światłowody utrzymujące polaryzację o kształtowanej dyspersji w zakresie spektralnym 1500-2000 nm” (POIR.04.01.01-00-0024/19) realizowanego w latach 2021 – 2023 w konsorcjum: FIBRAIN sp. z O.O. (lider), PWr oraz PTŚ UMCS, którego celem było opracowanie i wdrożenie nowego typu światłowodów specjalnych o dyspersji normalnej w szerokim zakresie spektralnym, obejmujących pasmo 1500 – 2000 nm oraz utrzymujących stan polaryzacji światła i przeznaczonych do zastosowań w ultraszybkich laserach i wzmacniaczach światłowodowych.

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

Od 1 października 2000 jestem pracownikiem Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej początkowo byłem zatrudniony na stanowisku asystenta, a od 1 października 2001 pracuję na stanowisku adiunkta.

Jeszcze w trakcie studiów doktoranckich odbyłem trzy miesięczny staż naukowy w Optoelectronics Laboratory, Université du Québec an Outaouais, Gatineau, Kanada gdzie realizowałem część prac eksperymentalnych związanych bezpośrednio z realizacją doktoratu. Do tego samego ośrodka naukowego wyjechałem ponownie w roku 2004, gdzie odbyłem półroczny staż podoktorski (15.04.2004-15.10.2004) podczas którego zajmowałem się konstrukcją czujników temperatury bazujących na włóknach dwójfomnych do monitorowania temperatury wody morskiej.

W roku 2002 rozpocząłem współpracę z prof. Petrem Hlubiną ramach, której odbyłem szereg krótkich staży naukowych ok. 7-10 dniowych, finansowanych ze środków na współpracę dwustronna pomiędzy Polską a Republiką Czeską. Pierwsze dwa staże w latach 2002 oraz 2003 objęły wizyty w Optoelectronics Laboratory, Institute of Physics, Silesian University at Opava, Czech Republic a następne 4 w latach 2008-2012 w Laboratory of Interferometry and Fiber Optics, Department of Physics, Technical University Ostrava, Czech Republic. Wymiernym efektem współpracy z prof. P. Hlubiną 9 artykułów z listy JCR [B1, B2, B4, B5, B12, B17, B23, B29, B34]. Współpraca ta miała duży wpływ na mój rozwój naukowy w szczególności poszerzyła moje umiejętności pomiarowe o techniki interferencji w świetle polichromatycznym z detekcją w dziedzinie spektralnej.

W roku 2006 wyjechałem na dwuletni staż podoktorski w Department of Applied Physics and Photonics, Vrije Universiteit Brussel, Bruksela (w grupie prof. Hugo Thienpont). Wyjazd ten został z finansowany dzięki stypendium FWO „Fonds voor Wetenschappelijc Onderzoek”. Efektem tej aktywności jest 15 artykułów z listy JCR: [H2, H3, H6 oraz B8, B9, B13, B14, B16, B18, B22, B24, B25, B28, B31]. Ponadto wymiernym efektem był wspólny projekt zatytułowany: Fotoniczna skóra do zastosowań w metrologii optycznej (Photonic Skins For Optical Sensing – PHOSFOS), realizowany w ramach 7 Programu Ramowego Uni Europejskiej (Small or medium-scale focused research project-STREP), po moim powrocie na

Politechnikę Wrocławską. Opracowane w ramach realizacji projektu struktury światłowodów zostały opatentowane [P2].

W roku 2006 w ramach projektu europejskiego Cost Action P11, którego byłem uczestnikiem, uzyskałem grant na tzw. krótką misję naukową (STSM- Short Term Scientific Mission) w grupie Prof. Stefana Wabnitza w Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne, DIJON, FRANCJA. W trakcie wizyty (20.03– 2.04 2006) zrealizowałem projekt pod tytułem: „Investigation of polarization and intermodal modulation instability in highly birefringent photonic crystal fibers”. Moja pierwsza wizyta w Dijon 2006 przyczyniła się do rozpoczęcia długoletniej współpracy pomiędzy grupą prowadzoną przez Prof. W. Urbańczyka a grupą Optyki Nieliniowej z Université de Bourgogne, Dijon. W ramach programu Polonium (2007-2008 „Nonlinear effects in photonic crystal fibers”) odbyłem kolejny staż krótko terminowy (wizyta 3–14.11.2008 roku Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne) co pozwoliło na rozpoczęcie współpracy z prof. Bertrandem Kiblerem, która trwa do dziś i jest koordynowana przez dr hab. inż. Karola Tarnowskiego. Współpraca z Francją zaowocowała 4 artykułami z listy JCR [B11, B15 ,B21, B49].

W roku 2009 w ramach projektu europejskiego COST 299, uzyskałem grant na tzw. krótką misję naukową (STSM- Short Term Scientific Mission) w grupie prof. José Luís Santosa w INESC Porto, Porto, Portugal. W trakcie wizyty (2-21.02.2009) zrealizowałem projekt pod tytułem: „ Study of an Optimized Refractive Index Sensing Head Based on fibre Bragg Gratings written in H-shape Fibre”. Moja pierwsza wizyta w Porto 2009 przyczyniła się do rozpoczęcia współpracy pomiędzy grupą prowadzoną przez Prof. W. Urbańczyka a grupą czujników światłowodowych INESC PORTO, która zaowocowała projektem na współpracę dwustronną pomiędzy Portugalią i Polską 2011-2012 (Optical sensors based on novel microstructured fibers) oraz publikacją [B20].

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

- a) Byłem opiekunem 13 prac magisterskich oraz 17 inżynierskich.
- b) Pełniłem funkcję promotora pomocniczego:
 - w pracy doktorskiej dr inż. Katarzyny Gąsior - Światłowodowe czujniki do pomiaru współczynnika załamania światła wykorzystujące efekt powierzchniowego rezonansu plazmonowego, praca obroniona: 03.06.2020,
 - obecnie pełnię funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim mgr inż. Piotra Pali. Przewidywany termin złożenia pracy 30.09.2024.
- c) Praca na rzecz zaplecza laboratoryjnego i technicznego Pracowni Światłowodów w Katedrze Optyki i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. Pełnię funkcję kierownika pracowni od 2010 roku.
- d) Prowadziłem następujące zajęcia dydaktyczne:
 - Laboratorium Fizyki Ogólnej – kurs ogólnouczelniany;
 - *Wstęp do optyki inżynierskiej* – laboratorium dla kierunku Inżynieria Biomedyczna
 - *Wstęp do optoelektroniki* – laboratorium dla kierunku Fizyka Techniczna.
 - Światłowodowy - laboratorium dla kierunków Inżynieria Biomedyczna, Inżynieria Optyczna, Fotonika, Fizyka Techniczna
 - *Światłowodowy i struktury fotoniczne* – laboratorium dla kierunku Inżynieria Kwantowa
 - Interferometria i holografia – laboratorium dla kierunku Inżynieria Optyczna oraz Optometria

- Metody obliczeniowe w optyce - laboratorium dla kierunku Inżynieria Optyczna oraz Optometria
- Laboratory 2-Condensed Matter (w latach 2010 oraz 2012) - zajęcia laboratoryjne w j. angielskim ze światłowodów dla studentów z Uniwersytetu w Strasburgu oraz studentów PWr w ramach wymiany Erasmus.
- Wybrane zagadnienia optyki inżynierskiej - wykład (15h).
- e) Wykłady na szkołach i warsztatach dla studentów:
 - Szkoła letnia NEMO - Mikrooptyka - Pomiary i charakteryzacja, Politechnika Warszawska, Warszawa 3-14 Wrzesień 2007, Wykład nr 9 T. Martynkien, R. Buczyński *“Characterisation of photonic crystal fibers”*.
 - Cykl wykładów w ramach „Metrologia Optyczna” w semestrze zimowym roku akademickiego 2019/2020 w ramach projektu „Zintegrowany UMCS” dla kierunku Chemia, specjalność Technologie fotoniczne i światłowodowe (II rok II st.) (Semestr zimowy 2019/2020). Projekt realizowany w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój na lata 2014-2020, Oś priorytetowa III Szkolnictwo wyższe dla gospodarki i rozwoju, Działanie 3.5 Kompleksowe programy szkół wyższych współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, istotne informacje, ważne z mojego punktu widzenia, dotyczące mojej kariery zawodowej.

7.1. Współpraca z ośrodkami naukowymi w Polsce

Na moją karierę zawodową niewątpliwie bardzo duży wpływ miała współpraca z ważnymi ośrodkami naukowymi w Polsce. Do grona najważniejszych ośrodków muszę zaliczyć: PTŚ UMCS z Lublina(grupa prowadzona obecnie przez dr hab. Pawła Mergo wcześniej dr Jana Wójcika), Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki (IMIF) z Warszawy prowadzona przez prof. dr hab. inż. Ryszarda Buczyńskiego oraz grupę Elektroniki Laserowej i Światłowodowej prowadzona przez dr hab. inż. Jarosława Sotora i dr hab. inż.. Grzegorz Sobonia.

PTŚ UMCS z Lublina

W ramach realizacji wspólnych projektów oprócz prac wymienionych jako cykl stanowiący osiągnięcie, współpraca z UMCS objęła zagadnienia związane m. in. z projektowaniem i charakteryzacją mikrostrukturalnych światłowodów polaryzujących, światłowodów typu D do zastosowań w czujnikach bazujących na efekcie fali zanikającej w tym efekcie powierzchniowego rezonansu plazmonowego (SPR), włóknami nieliniowymi o różnych charakterystykach dyspersyjnych np. do generacji supercontinuum. Wymiernym efektem tej współpracy są między innymi 33 wspólne publikacje spoza cyklu stanowiącego osiągnięcie: [B3, B8, B9, B11, B16, B20, B21, B23, B25, B28, B29, B31, B32, B34, B43, B44, B45, B46, B47, B48, B49, B50, B52, B53, B57, B58, B59, B60, B61, B62, B63, B64, B67].

Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki z Warszawy

Bardzo istotna dla mojego rozwoju naukowego była współpraca z prof. dr hab. inż. Ryszardem Buczyńskim (IMIF Warszawa oraz Uniwersytet Warszawski). Współpracę rozpoczęliśmy od wspólnych pomiarów generacji supercontinuum podczas mojej wizyty na VUB w Belgii i objęła ona w pierwszym etapie charakteryzację eksperymentalną włókien wytworzonych w ITME między innymi związaną z nieliniową konwersją częstotliwości by przerodzić się w charakteryzację właściwości dyspersyjnych szkieł wytwarzanych w IMIF oraz

eksperymentalną i numeryczną charakteryzację fonicznych światłowodów nieliniowych całoszklanych oraz światłowodów z nanostrukturyzowanym rdzeniem. Wymiernym efektem tej współpracy jest między innymi 10 wspólnych publikacji z listy JCR spoza cyklu stanowiącego osiągnięcie [B22, B24, B30, B33, B35, B36, B38, B39, B40, B42].

Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej PWR

Współpraca z grupą prowadzoną przez dr hab. inż. Jarosława Sotora i dr hab. inż. Grzegorza Sobonia spowodowała rozszerzenie moich zainteresowań naukowych o światłowodowy do kompensacji dyspersji we wnękach laserów światłowodowych oraz światłowodów o odpowiednio ukształtowanych charakterystykach grupowego efektywnego współczynnika załamania oraz dyspersji chromatycznej do nieliniowej konwersji częstotliwości. Wymiernym efektem tej współpracy jest między innymi 18 wspólnych publikacji z listy JCR spoza cyklu stanowiącego osiągnięcie [B33, B35, B41, B44, B46, B47, B48, B51, B52, B55, B57, B58, B59, B61, B62, B63, B64, B67].

7.2. Współpraca z sektorem gospodarczym

Moja współpraca z UMCS oraz grupą z PWR, której efektem były prace dotyczące generacji i przestrajania solitonów oraz prace pokazujące wykorzystanie tego efektu do generacji częstotliwości różnicowej (DFG) stanowiły dowód wysokiego poziomu gotowości technologicznej (TRL), co pozwoliło na uzyskanie finansowania projektu obejmującego badania przemysłowe pt.: „*Moduły światłowodowe o kształtowanej charakterystyce dyspersyjnej do zastosowań w przestrajalnych źródłach promieniowania optycznego*” którego byłem kierownikiem na Politechnice Wrocławskiej (2018-2020), a realizowanego we współpracy z firmą FIBRAIN sp. z O.O. z Rzeszowa. W ramach tego projektu opracowano moduły światłowodowe do przestrajalnych źródeł laserowych, które produkowane są przez firmę FIBRAIN sp. z O.O..



Tadeusz Martynkien