

Autoreferat

1. **Imię i Nazwisko:** Paweł Mergo
2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

1997r. magister

Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Chemii, Pracownia Technologii Światłowodów, (kierunek: chemia, specjalność: chemia analityczna), tytuł pracy magisterskiej „Optymalizacja struktury światłowodów side-hole”

2003r. doktor nauk chemicznych

Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Chemii, (dziedzina: nauki chemiczne, dyscyplina: chemia), tytuł pracy doktorskiej: „Wpływ powłok ochronnych światłowodów na ich właściwości mechaniczne i optyczne”

3. **Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.**

2003 – 2004 – asystent naukowy, Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Chemii, Pracownia Technologii Światłowodów

2004 – 2011 – adiunkt, Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Chemii, Pracownia Technologii Światłowodów

od 2011 – adiunkt, Kierownik Pracowni Technologii Światłowodów, Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Chemii

4. **Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):**

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe zgodnie z wymienioną wyżej Ustawą wskazuję cykl publikacji na temat „Technologie wybranych klasycznych i mikrostrukturalnych światłowodów ze szkła krzemionkowego i polimerów”

b) Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Poniżej przedstawiono listę 14 publikacji wchodzących w skład przedstawionego osiągnięcia naukowego. Publikacje opublikowano w recenzowanych czasopismach z Listy Filadelfijskiej. Przedstawiono w nich wybrane charakterystyki światłowodów mikrostrukturalnych których oryginalne technologie opracowano w Pracowni Technologii Światłowodów UMCS. Podstawowymi materiałami konstrukcyjnymi

wytworzonych włókien było: szkło krzemionkowe, szkła typu high silica oraz polimery (głównie polimetakrylan metylu PMMA oraz jego kopolimery z polistyrenem PMMA/PS).

Lista publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe:

[H1]. Geernaert T., Becker M., **Mergo P.**, Nasilowski T., Wojcik J., Urbanczyk W., Rothhardt M., Chojetzki Ch., Bartelt H., Terryn H., Berghmans F., Thienpont H., "Bragg Grating Inscription in GeO₂-Doped Microstructured Optical Fibers", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol 28, no. 10, p. 1459, 2010 (doi 10.1109/JLT.2010.2043414)

Mój wkład w pracę polegał na wykonaniu obliczeń właściwości optycznych prezentowanych włókien, opracowaniu projektu technologicznego oraz wykonaniu pomiarów tłumienia spektralnego. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 20%

[H2]. Nasilowski T., Martynkien T., Statkiewicz G., Szpulak M., Olszewski J., Golojuch G., Urbanczyk W., Wojcik J., **Mergo P.**, Makara M., Berghmans F., Thienpont H., "Temperature and pressure sensitivities of the highly birefringent photonic crystal fiber with core asymmetry", APPLIED PHYSICS B-LASERS AND OPTICS, Vol 81, no. 2-3, p. 325, 2005 (doi 10.1007/s00340-005-1900-8)

Mój wkład w pracę polegał na wykonaniu obliczeń właściwości optycznych prezentowanych włókien, opracowaniu projektu technologicznego oraz wykonaniu pomiarów ich właściwości optycznych. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 15%

[H3]. Karimi M., Fabian M., Jaroszewicz L. R., Schuster K., **Mergo P.**, Sun T., Grattan K., "Lateral force sensing system based on different photonic crystal fibres", SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICAL, Vol 205, no. 86, p. 91, 2014 (doi 10.1016/j.sna.2013.10.028)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 40%

[H4]. Ferreira M. S., Becker M., Bartelt H., **Mergo P.**, Santos J. L., Frazao O., "A vibration sensor based on a distributed Bragg reflector fibre laser" LASER PHYSICS LETTERS, Vol 10, no. 9, art. no. 095102, 2013, (doi 10.1088/1612-2011/10/9/095102)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów aktywnych domieszkowanych jonami Er³⁺. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 40%.

[H5]. Ferreira M. S., Santos J. L., **Mergo P.**, Frazao O., "Torsion sensor based on a figure-of-eight cavity fibre laser", LASER PHYSICS LETTERS, Vol 10, no. 4, art. no. 045105, 2013 (doi 10.1088/1612-2011/10/4/045105)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów aktywnych domieszkowanych jonami Er³⁺. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 40%.

[H6]. Anuszkiewicz A., Martynkien T., **Mergo P.**, Makara M., Urbanczyk W., „Sensing and transmission characteristics of a rocking filter fabricated in a side-hole fiber with zero group birefringence”, OPTICS EXPRESS, Vol 21, no. 10, p. 12657, 2013

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów typu side-hole. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 15%.

[H7]. Hlubina P., Kadulova M., Mergo P. „Chromatic dispersion measurement of holey fibres using a supercontinuum source and a dispersion balanced interferometer”, OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING, Vol 51, no. 4, p. 421, 2013 (doi 10.1016/j.optlaseng.2012.11.011)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów mikrostrukturalnych. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 40%.

[H8]. Andre R. M., Marques M. B., **Mergo P.**, Frazao O., “Large range linear torsion sensor based on a suspended-core fiber loop mirror”, OPTICAL ENGINEERING, Vol 52, no. 2, art. no. 020501, 2013 (doi 10.1117/1.OE.52.2.020501)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów mikrostrukturalnych z zawieszonym rdzeniem. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 40%.

[H9]. Napierala M., Nasilowski T., Beres-Pawlik E., **Mergo P.**, Berghmans F., Thienpont H., “Large-mode-area photonic crystal fiber with double lattice constant structure and low bending loss”, OPTICS EXPRESS, Vol 19, no. 23, p. 22628, 2011

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów mikrostrukturalnych. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 25%.

[H10]. Tefelska M., Ertman S., Wolinski T. R., **Mergo P.**, Dąbrowski R., "Large Area Multimode Photonic Band-Gap Propagation in Photonic Liquid-Crystal Fiber", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol 24, no. 8, p. 631, 2012 (doi 10.1109/LPT.2012.2184278)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii substratów umożliwiających wytworzenie mikrostrukturalnych światłowodów ciekłokrystalicznych. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 35%.

[H11]. **Mergo P.**, Martynkien T., Urbanczyk W., „Polymer optical microstructured fiber with birefringence induced by stress-applying elements”, OPTICS LETTERS, Vol 39, no. 10, p. 3018, 2014 (doi 10.1364/OL.39.003018)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionego światłowodu. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 55%

[H12]. Kowal D., Statkiewicz-Barabach G., **Mergo P.**, Urbanczyk W., "Microstructured polymer optical fiber for long period gratings fabrication using an ultraviolet laser beam" OPTICS LETTERS, Vol 39,no. 8, p. 2242, 2014 (doi 10.1364/OL.39.002242)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów polimerowych. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 25%.

[H13]. Martynkien T., **Mergo P.**, Urbanczyk W., "Sensitivity of Birefringent Microstructured Polymer Optical Fiber to Hydrostatic Pressure", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol 25, no. 16, p. 1562, 2013, (doi 10.1109/LPT.2013.2271240)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów polimerowych. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 40%.

[H14]. Olszewski J., **Mergo P.**, Gasior K., Urbanczyk W., „Highly birefringent microstructured polymer fibers optimized for a preform drilling fabrication method”, JOURNAL OF OPTICS, Vol 15, no. 7, art. no. 075713, 2013 (doi 10.1088/2040-8978/15/7/075713)

Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu technologii przedstawionych w pracy światłowodów polimerowych. Mój wkład w niniejszą pracę oceniam na 30%.

Zgodnie z definicją mianem technologii określa się zazwyczaj metodę przygotowania i przeprowadzenia procesu wytwarzania lub przetwarzania jakiegoś dobra. W rozumieniu ogólnym w definicji technologii mieszczą się opisy surowców, półproduktów, wyrobów gotowych, metod produkcji wraz z teorią procesów i operacji jednostkowych, metod kontroli jakości wraz z aparaturą i metodyką pomiarów, infrastruktury budowlanej i technicznej, linii technologicznych do produkcji oraz maszyn i urządzeń pomocniczych. W niniejszym autoreferacie przedstawiono zbiór najważniejszych artykułów dotyczących kilku rodzajów światłowodów o wybranych właściwościach wykonanych ze szkła krzemionkowego, szkła high silica (domieszkowanych germanem i pierwiastkami ziem rzadkich) oraz polimerów dla których w kierowanym przeze mnie zespole opracowano ich technologie. Najważniejszym źródłem użytecznych w pracy badawczej informacji są moje własne doświadczenia (nabyte know how) wynikające z dwudziestopięcioletniej pracy w kilkunastu osobowym zespole technologicznym Pracowni Technologii Światłowodów Uniwersytetu Marii Curie Skłodowskiej (PTŚ UMCS) a w ostatnich kilku latach kierowania całym zespołem PTŚ UMCS co pozwoliło na mój bezpośredni kontakt z ogólnie rozumianą technologią światłowodów a więc z surowcami, półproduktami, metodami produkcji, aparaturą i metodyką pomiarów wraz z kontrolą jakości wytwarzanych światłowodów. W pierwszym okresie pracy naukowej głównym moim zadaniem było opracowanie technologicznie użytecznej metody teoretycznej analizy sensorowych właściwości światłowodów specjalnych, w szczególności włókien side-hole, optymalizacja ich konstrukcji pod kątem sensorów ciśnienia oraz charakterystyka ich właściwości sensorowych. Bezpośredni codzienny kontakt z zespołem technologicznym oraz własnoręcznie wykonane pomiary pozwalają mi w chwili obecnej na krytyczną pod względem technologicznym analizę samodzielnie opracowywanych struktur światłowodów.

Wyniesione z tego okresu doświadczenie pozwala w chwili obecnej na krytyczną i technologiczną ocenę projektów nowych włókien opracowywanych we współpracujących z PTŚ UMCS krajowych i zagranicznych zespołach badawczych. Kolejnym etapem pracy naukowej było autorskie opracowanie technologii nanoszenia on-line zewnętrznych cienkich warstw metalu na włókno optyczne w trakcie jego wyciągania wraz z opracowaniem sposobu oceny właściwości mechanicznych takich światłowodów. Równolegle uczestniczyłem w opracowaniu technologii różnych typów światłowodów specjalnych głównie mikrostrukturalnych poprzez aktywny udział w projektowaniu procesów i dostosowywaniu warunków technologicznych niezbędnych dla wytworzenia konkretnego typu światłowodu. Doświadczenie wyniesione z tego okresu w chwili obecnej pozwala mi na opracowanie całego cyklu technologicznego wytwarzania światłowodu począwszy od warunków wytwarzania preformy a skończywszy na kontroli jakości docelowego włókna. Wiedza zdobyta przez dwadzieścia pięć lat pracy w zespole technologicznym pozwala również na krytyczną analizę i wskazanie błędów popełnianych w kolejnych krokach technologicznych. Uczestniczyłem w pracach związanych z modernizacją linii technologicznych co pozwoliło na zdobycie doświadczenia związanego z ogólnie rozumianą infrastrukturą technologiczną (maszyny i urządzenia technologiczne) oraz właściwościami jakie powinna spełniać infrastruktura technologiczna i budowlana by nie wpływała niekorzystnie na technologię i właściwości wytwarzanych światłowodów.

W pracach stanowiących mój główny dorobek naukowy przedstawiono wybrane rodzaje światłowodów mikrostrukturalnych. Brałem czynny udział w opracowaniu ich technologii począwszy od opracowania ich teoretycznych modeli technologicznych, opracowania warunków poszczególnych etapów technologicznych a skończywszy na charakteryzacji półproduktów i wytworzonych światłowodów. Przedstawione struktury stanowią podsumowanie części prowadzonych przeze mnie prac technologicznych. Jednocześnie były one punktem wyjścia dla technologii kolejnych rodzajów światłowodów mikrostrukturalnych. Przedstawione prace można ze względu na materiał konstrukcyjny opracowanych światłowodów podzielić na dwie części. Prace [H1] – [H10] przedstawiają klasyczne i mikrostrukturalne światłowody ze szkła krzemionkowego i szkła typu high silica a prace [H11] – [H14] przedstawiają klasyczne i mikrostrukturalne światłowody polimerowe.

W chwili obecnej zdecydowana większość światłowodów klasycznych i mikrostrukturalnych wytwarzana jest z materiałów ogólnie określanych jako szkła. Wyjątek stanowią tutaj tzw. światłowody szafirowe czyli cienkie kilkumetrowej długości monokryształy szafiru hodowane typowymi technikami wzrostu monokryształów. Włókna te ze względu na dość duże tłumienie (kilkaset a nawet kilka tysięcy dB/km) mają znacznie marginalne. Ich produkcja jest na tyle mała że nie jest uwzględniana w całkowitej światowej produkcji światłowodów. Uogólniając znane w technice definicje szkła można stwierdzić że szkło to amorficzne ciało stałe powstałe przez stopienie a następnie przechłodzenie surowców używanych do jego wyrobu.

W ponad czterdziestoletniej historii światłowodów opracowano technologie różnych typów włókien w oparciu o cztery główne materiały konstrukcyjne którymi są: szkła krzemionkowe wraz ze szkłami typu high silica, szkła organiczne potocznie zwane szkłami plastikowymi, szkła wieloskładnikowe tlenkowe i szkła wieloskładnikowe nietlenkowe. Poziom rozwoju technologii światłowodów z tych materiałów limitowany jest przede wszystkim możliwościami syntezy ultraczystych szkieł. Z porównania stosunku tłumienia

najlepszych wytworzonych włókien do teoretycznie przewidywanej granicy tłumienia każdego z materiałów wynika że tylko w przypadku włókien ze szkła krzemionkowego i zaliczanych do tej grupy szkieł high silica praktycznie została osiągnięta granica teoretycznego tłumienia. Dlatego zasadne jest stwierdzenie że w chwili obecnej najwyższej jakości światłowody wytwarzane są ze szkła krzemionkowego.

Wytwarzanie szkła krzemionkowego przypomina typowy proces ceramiczny w którym z drobnego proszku formuje się porowatą kształtkę, a następnie poprzez odpowiednią obróbkę termiczną (typowo suszenie, usuwanie chemicznie związanej wody i spiekanie) uzyskuje się przezroczyste szkło. We wszystkich metodach otrzymywania technicznego szkła krzemionkowego materiałami wyjściowymi są naturalny kwarc lub lotne związki krzemu takie jak SiCl_4 . Wszystkie znane i rozpowszechnione w technice metody jego wytwarzania można podzielić na cztery grupy. Limitują one właściwości otrzymywanego szkła przez co można podzielić je na cztery podstawowe typy.

Typ 1 szkła krzemionkowego wytwarzany jest przez topienie naturalnego kwarcu (minerału zwanego kwarcem brazylijskim) w piecu elektrycznym, zazwyczaj w próżni lub obojętnej atmosferze. Szkło to charakteryzuje się niską zawartością wody (poniżej 10ppm), oraz dużą zawartością Al i Fe (zwykle kilka lub kilkanaście ppm).

Typ 2 szkła krzemionkowego uzyskuje się przez topienie naturalnego kwarcu w palniku tlenowo-wodorowym w konfiguracji Verneuil'a. To podejście pozwala na zwiększenie jednorodności szkła ale jednocześnie powoduje wzrost zawartości grup OH (typowo do ok. 200ppm).

Szklą krzemionkowe typu 3 i 4 otrzymuje się z SiCl_4 . Szklą te charakteryzują się zdecydowanie niższą zawartością zanieczyszczeń tlenkami metali w porównaniu do szkieł typu 1 i 2. W przypadku szkła typu 3, otrzymywanego metodą hydrolizy płomieniowej, zawartość grup OH jest wysoka i wynosi 1000 - 2000ppm. Zastosowanie do syntezy szkła palnika plazmowego (szkło krzemionkowe typu 4) pozwala na znaczne obniżenie zawartości wody poniżej 5ppm a nawet 1ppm.

Spotyka się również modyfikacje przedstawionych wyżej metod polegające min. na zastąpieniu w metodzie wytopu próżniowego i topienia w palniku tlenowo-wodorowym naturalnego kwarcu, kwarcem syntetycznym lub amorficzną krzemionką wytworzoną metodą hydrolizy płomieniowej lub metoda plazmową.

Przedstawiona klasyfikacja metod otrzymywania technicznego szkła krzemionkowego nie uwzględnia nowych metod otrzymywania SiO_2 . Należy do nich metoda zol-żel, której rozwój przyczynił się do powstania nowych typów szkła krzemionkowego tj. typu 5 i 6. Przezroczyste szkło krzemionkowe typu 5 może być używane do wytwarzania światłowodów. Natomiast porowate szkło typu 6 może stanowić porowatą ceramiczną półprodukt do otrzymywania materiałów o specjalnych właściwościach, zwłaszcza optycznych.

W 1996 roku pojawiło się doniesienie o wytworzeniu pierwszego światłowodu mikrostrukturalnego (zwanego ówczesznie światłowodami fonicznymi). Do dziś technologia tych włókien rozwija się intensywnie zarówno pod kątem minimalizacji tłumienia światłowodów jak też, a może przede wszystkim, w kierunku opracowywania nowych rodzajów włókien.

W początkowej fazie rozwoju technologii włókna mikrostrukturalne wytwarzane były z niedomieszkowanego szkła krzemionkowego. Zarówno płaszcz światłowodu jak i jego rdzeń wytwarzano z syntetycznego szkła krzemionkowego typu IV w przypadku najlepszych

światłowodów lub ze szkła typu III w przypadku włókien o gorszych parametrach. W kolejnych latach pojawiły konstrukcje włókien zawierające w swej strukturze kilka rodzajów szkieł, na przykład płaszcz włókna wykonany ze szkła krzemionkowego a rdzeń ze szkła krzemionkowego domieszkowanego dwutlenkiem germanu, czyli szkła typu high silica. Obecnie materiały konstrukcyjne światłowodów mikrostrukturalnych można podzielić na takie same cztery grupy jak materiały konstrukcyjne światłowodów klasycznych tj: szkło krzemionkowe wraz ze szklami typu high silica, szkła krzemianowe niskotopliwe, szkła organiczne (głównie polimetakrylan metylu), szkła niekrzemianowe tlenkowe i nietlenkowe.

Podobnie jak dla włókien klasycznych tylko światłowody mikrostrukturalne ze szkła krzemionkowego i szkieł typu high silica mają niskie tłumienie. Światłowody mikrostrukturalne ze wszystkich innych materiałów mają znacznie większe tłumienie. Stąd zrozumiałym jest fakt, że poważna oferta rynkowa (i realne zastosowania) dotyczą wyłącznie światłowodów mikrostrukturalnych ze szkła krzemionkowego. Niestety technologia wytwarzania światłowodów mikrostrukturalnych ze tego typu szkła jest trudniejsza w porównaniu do technologii wytwarzania włókien mikrostrukturalnych z innych szkieł. Wynika to z faktu, że stosunek napięcia powierzchniowego szkła krzemionkowego do jego lepkości w trakcie wytwarzania włókna jest przynajmniej o rząd większy niż dla pozostałych szkieł. W konsekwencji wymagana względna precyzja utrzymania parametrów procesów technologicznych przy produkcji włókien ze szkła krzemionkowego jest relatywnie bardzo wysoka a dodatkowo temperatura przetwarzania szkła krzemionkowego we włókno wynosi około 2000°C, co jest równoznaczne z ekstremalnie małą długością technologiczną tego materiału. Stąd możliwości wytwarzania „egzotycznych” struktur światłowodów mikrostrukturalnych są dla technologii włókien ze szkła krzemionkowego znacznie skromniejsze niż dla technologii tego typu włókien z innych materiałów. Ta wada jest jednak z nawiązką kompensowana przez wspomnianą wcześniej ich wysoką jakość.

Opracowana w PTŚ UMCS metoda wytwarzania światłowodów mikrostrukturalnych z niedomieszkowanego szkła krzemionkowego i szkieł typu high silica polega na przeprowadzeniu kolejnych procesów w dobranych na ogół doświadczalnie warunkach:

1. Zakup rur i prętów ze szkła krzemionkowego
2. Kalibracja rur dla uzyskania odpowiedniej grubości ścianek i ewentualnie kolaps rur dla uzyskania z nich prętów. Te procesy przeprowadzane są zwykle w obrabiarce preform linii technologicznej MCVD
3. Wyciąganie kapilar z rur i pręcików z prętów na wyciągarce światłowodów
4. Układanie kapilar i/lub pręcików wewnątrz rury ze szkła kwarcowego – ręcznie w pomieszczeniu o wysokiej klasie czystości (100) – clean room
5. Wygrzewanie „układanki” w temperaturze od 400 do 800°C w atmosferze czynników chlorujących i tlenu dla usunięcia heterogenicznych zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych w obrabiarce preform linii technologicznej MCVD
6. Wstępne przetopienie struktury dla połączenia elementów strukturalnych w obrabiarce preform MCVD i uzyskanie w ten sposób prapreformy I
7. Wygrzewanie strefowe z regulacją ciśnienia w celu dokładnego przytopienia wzajemnego elementów struktury w piecu grafitowym a następnie przecienienie uzyskanej prapreformy I w wyciągarce światłowodów i uzyskanie w ten sposób prapreformy II

8. Overcladding, czyli wtopienie prapreformy II do rury ze szkła krzemionkowego dla korekty wartości stałej sieci oraz średnicy otworów w kontekście projektowanej średnicy zewnętrznej włókna
9. Wyciąganie światłowodu wraz z nałożeniem powłok ochronnych utwardzanych UV w wyciągarce światłowodów przy użyciu nadciśnienia lub podciśnienia w poszczególnych strefach otworów

Do wytworzenia światłowodów mikrostrukturalnych przedstawionych w wyżej wymienionych pracach używane było handlowo dostępne szkło krzemionkowe (rury i pręty) typu IV o nazwie Suprasil F300 oferowane przez firmę Hereaus. Szkło high silica (domieszkowane GeO_2) wytwarzano w Pracowni Technologii Światłowodów UMCS poprzez syntezę z fazy gazowej metodą MCVD.

Jest oczywistym że przytoczony powyżej ogólny schemat technologii światłowodów mikrostrukturalnych podlega modyfikacjom w zależności od rodzaju wytwarzanego włókna. Innymi słowy dla każdego nowo wytwarzanego światłowodu konieczne jest opracowanie jego szczegółowej technologii. Szczególnie istotny jest dobór parametrów w punktach od 4 do 8 tak by na końcowym etapie technologii (wyciąganie włókna) możliwe było uzyskanie struktury zgodnej z projektem

W ramach przeprowadzonych przeze mnie badań opracowane zostały technologie:

- światłowodów mikrostrukturalnych o niskiej dwójłomności
- światłowodów mikrostrukturalnych o niskiej dwójłomności z rdzeniem domieszkowanym GeO_2
- światłowodów mikrostrukturalnych o wysokiej dwójłomności indukowanej asymetrią współczynnika wypełnienia
- światłowodów mikrostrukturalnych o wysokiej dwójłomności indukowanej asymetrią współczynnika wypełnienia z rdzeniem domieszkowanym GeO_2
- mikrostrukturalnego światłowodu side-hole
- światłowodów mikrostrukturalnych z zawieszonym rdzeniem
- mikrostrukturalnych substratów światłowodów ciekłokrystalicznych

Technologia światłowodów mikrostrukturalnych ze szkła krzemionkowego i szkła typu high silica jest stale rozwijana w Pracowni Technologii światłowodów. Świadczą o tym liczne projekty i prace publikowane w najlepszych czasopismach naukowych.

W pracach [H4], [H5] przedstawiono światłowody ze szkła krzemionkowego domieszkowanego w rdzeniu pierwiastkami ziem rzadkich (tzw włóknach „aktywnych”). W artykułach przedstawiono wykorzystanie wytworzonego w Pracowni Technologii Światłowodów klasycznego jednorodnego światłowodu ze szkła krzemionkowego domieszkowanego w rdzeniu jonami erbu w konstrukcji światłowodowych czujników skręcenia i wibracji. Mimo iż technologię światłowodów aktywnych opracowano w połowie lat 80-tych ubiegłego wieku do chwili obecnej nie jest znana technologia pozwalająca na wytwarzanie dużych ilości jednorodnego szkła high silica domieszkowanego pierwiastkami ziem rzadkich. Przełomem wydawała się być opracowana i opatentowana przez firmę Liekki metoda DND (direct nanoparticle deposition). Wprawdzie jakość takiego szkła jest lepsza od szkła wytwarzanych innymi znanymi metodami ale znaczne ograniczenie ilości wytwarzanego szkła nie pozwala na efektywną produkcję światłowodów „aktywnych” tą

metodą. Z technologią tego typu światłowodów zetknąłem się przy realizacji w latach 2002 – 2003 Grantu KBN 8T11B00722 „Preparatyka światłowodów aktywnych do laserów włóknowych dużej mocy dla uzyskania dużej efektywności pompowania optycznego” którego byłem kierownikiem. Wynikiem jego realizacji było opracowanie techniki wytwarzania jednorodnego szkła high silica domieszkowanego pierwiastkami ziem rzadkich o jakości i ilości pozwalającej na wytworzenie preformy. Opiera się ona na wykorzystaniu procesu impregnacji z fazy ciekłej wytworzonej w procesie MCVD porowatej warstwy $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$ którą dla uzyskania przezroczystego szkła poddaje się procesowi konsolidacji. Podstawowym warunkiem wytworzenia jednorodnej warstwy szkła „aktywnego” jest by porowata warstwa $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$ składała się z kulek o prawie jednakowej wielkości. Po konsolidacji warstwy porowatej zbudowanej z kulek o różnej wielkości ze względu na ich złe dopasowanie zwykle pozostają niewielkie pęcherzyki gazów dyskwalifikujące takie szkło z dalszych procesów technologicznych. Drugim warunkiem jest by budujące porowatą warstwę kulki zawierały na swojej powierzchni odpowiedniej wielkości pory (dziury) w które w procesie impregnacji wdyfundują jony pierwiastka „aktywnego” gwarantując homogeniczne rozmieszczenie domieszki w całej objętości szkła. Oba warunki udało się spełnić poprzez odpowiedni dobór parametrów technologicznych przy wytwarzaniu porowatej warstwy. Dla zapobiegnięcia agregowania się atomów domieszki „aktywnej” w większe struktury zwane klastrami w trakcie impregnacji do szkła wprowadzono również atomy glinu.

W chwili obecnej technologia włókien aktywnych jest w PTŚ UMCS intensywnie rozwijana. Opracowane zostały kompletne technologie światłowodów jednomodowych oraz włókien typu double i tripple-clad domieszkowanych w rdzeniu jonami Nd^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} , Dy^{3+} . Od października 2018 roku w PTŚ UMCS realizowany jest projekt „Nowe związki kompleksowe lantanowców dla technologii światłowodów do laserów włóknowych i wzmacniaczy optycznych REEPHOT”. Jednym z jego celów naukowych jest opracowanie technologii bezpośredniego (z pominięciem impregnacji warstwy porowatej) domieszkowania szkła krzemionkowego atomami pierwiastków ziem rzadkich w trakcie jego wytwarzania z fazy gazowej.

Z odmienną sytuacją spotykamy się przy technologii światłowodów polimerowych. Nie chodzi tu jedynie o różny charakter chemiczny szkła i polimeru. Pomimo dość bogatej oferty dobrej jakości klasycznych włókien polimerowych oferta dobrej jakości polimerów umożliwiających bezpośrednio wytwarzanie światłowodów jest dość uboga. Jedynie kilka firm oferuje polimery (granulat, rury, pręty) o podwyższonej czystości nie gwarantującej wytworzenia dobrej jakości światłowodów polimerowych. Powodem jest tutaj fakt iż tylko w przypadku najprostszej technologii tj. wytłaczania z granulatu możliwe jest wytwarzanie polimeru poza miejscem wytwarzania światłowodu. Pozostałe metody w szczególności ciągłej polimeryzacji i wytłaczania ze stopu oraz okresowej polimeryzacji i wytłaczania ze stopu wymagają syntezy polimeru w miejscu wytwarzania światłowodu. Dlatego prace badawcze związane z technologiami światłowodów polimerowych rozpoczęto od opanowania techniki oczyszczania handlowo dostępnego metakrylanu metylu (MMA) i jego polimeryzacji. Najlepsze wyniki oczyszczania otrzymuje się przy zastosowaniu destylacji w wysokiej próżni. Opracowana technika polimeryzacji blokowej umożliwiła w wytwarzanie bloków PMMA. Stwierdzono że wytworzony w PTŚ PMMA przewyższał właściwościami dostępny handlowo PMMA. Przede wszystkim charakteryzuje się on wysoką stabilnością i odpornością termiczną co w znaczący sposób wpłynęło na jakość wytwarzanych światłowodów. Badania

prowadzone w ramach opracowania technologii różnych rodzajów klasycznych i mikrostrukturalnych światłowodów polimerowych koncentrowały się głównie na opracowaniu dwóch technologii wytwarzania preform tj. metodę składania pręcików i kapilar oraz metodę nawiercania litego bloku PMMA. We wszystkich procesach technologicznych stosowano techniczny PMMA w postaci rur i prętów oraz PMMA o podwyższonej czystości spolimeryzowany w UMCS.

Stosując metodę składania wytworzono preformy i nisko dwójłomne światłowody typu index-guided. Opracowana technologia składa się z następujących procesów cząstkowych:

- kalibracja zakupionych rur z technicznego PMMA w celu dostosowania do planowanego w docelowym światłowodzie ich współczynnika wypełnienia,
- wytworzenie odpowiednich kapilar i pręcików,
- wykonanie prapreformy I wraz ze wstępnym połączeniem kapilar i pręcików,
- wykonanie prapreformy II poprzez przeciągnięcie prapreformy I z równoczesnym procesem overcladding w rurę z technicznego PMMA o odpowiednim współczynniku wypełnienia,
- przeciągnięcie prapreformy II na pręt o średnicy zewnętrznej ok 10mm,
- wyciągnięcie światłowodu.

Mikrostrukturalne włókna polimerowe wytworzone metoda składania charakteryzowały się znacznymi stratami. Ich wysoki poziom strat był spowodowany zanieczyszczeniami technicznego PMMA użytego do wytworzenia preform. Dodatkowo zaobserwowano dużą ilość defektów pojawiających się losowo w mikrostrukturze włókna wzdłuż jego długości. Początkowo zakładano, że główną przyczyną ich powstawania są nieregularności w wymiarach (średnica zewnętrzna i grubość ścianki) pręcików i kapilar stosowanych do wytwarzania preform. W celu poprawy powtarzalności wymiarów kapilar i prętów odpowiednio zmodyfikowano piec wyciągarki. Dzięki temu znacznie poprawiono jakość wytwarzanych pręcików i kapilar. Okazało się jednak, że poprawa dokładności procesu wytwarzania kapilar i pręcików nie prowadzi do istotnej redukcji ilości defektów w wytworzonych włóknach. Po przeprowadzeniu kolejnych badań, uznano, że najbardziej prawdopodobną przyczyną powstawania defektów we włóknach jest zła jakość powierzchni kapilar i pręcików stosowanych do wytwarzania preform. Niestety wykonane badania wykazały że nie jest możliwa istotna poprawa jakości powierzchni wytworzonych rur i prętów. Główną przyczyną jest stosunkowo małe napięcie powierzchniowe polimerów, przez co nie dochodzi do „samozabliźniania” się defektów w trakcie końcowego polerowania termicznego. Również stosowanie „czyszczenia chemicznego” powierzchni nie przyniosło zadowalających efektów.

Równolegle prowadziłem badania zmierzające do opracowania metody wytwarzania polimerowych światłowodów mikrostrukturalnych poprzez nawiercanie struktury fotonicznej w bloku polimeru (tzw. metoda wiercenia). W ramach prowadzonych badań wytworzono kilkanaście serii nisko i wysoko dwójłomnych światłowodów o różnej stałej sieci i różnym współczynniku wypełnienia.

Opracowana technologia składa się z następujących cząstkowych procesów:

- nawiercenie struktury fotonicznej w technicznym lub spolimeryzowanym w UMCS pręcie z PMMA wiertłami do plastiku – prapreforma I,

- przeciągnięcie nawierconego pręta z jednoczesnym overcladdingiem w rurę z technicznego PMMA o dobranym współczynnikiem wypełnienia – prapreforma II,
- przeciągnięcie prapreformy II z jednoczesnym overcladdingiem w rurę z technicznego PMMA o dobranym współczynnikiem wypełnienia – preforma
- wyciąganie światłowodu.

Włókna mikrostrukturalne wytworzone metodą wiercenia charakteryzowały się znacznie mniejszą ilością defektów, a przez to lepszymi parametrami transmisyjnymi od włókien wytworzonych metodą składania o podobnej geometrii. Przeprowadzono również badania jakości powierzchni wywierconych otworów, które wskazały, że w technologii wiercenia konieczne jest stosowanie specjalnych wiertel do plastików o możliwie dużej średnicy (oczywiście akceptowalnej technologicznie). Zidentyfikowano również przyczyny zwiększonego poziomu tłumienia polimerowych włókien mikrostrukturalnych wykonanych w technologii wiercenia. Są to:

1. Obecność w otworach drobin PMMA pozostałych po procesie wiercenia, ich rozkład we włóknie jest statystycznie jednorodny wzdłuż długości i nie tłumaczy skokowych wzrostów tłumienia obserwowanych w niektórych odcinkach włókien.
2. Obecność zlokalizowanych zaburzeń mikrostruktury powodujących znaczne rozpraszanie światła propagującego w rdzeniu. Zaburzenia tego rodzaju są związane z obecnością drobin PMMA które całkowicie zamykały otwory mikrostruktury. W tym przypadku następuje lokalne zaburzenie stanu równowagi podczas wyciągania włókna, co prowadzi do powstania defektów.

Wykazano również konieczność polerowania powierzchni wewnętrznej otworów po wierceniu. Światłowody z wypolerowanymi otworami wykazują mniejszą tłumienność oraz są znacznie bardziej jednorodne po długości. Przeprowadzone badania doprowadziły do opracowania sposobu polerowania wewnętrznych powierzchni otworów w nawierconej kształtce. Opracowany sposób polerowania składa się z dwóch etapów. W pierwszym (polerowanie wstępne) przez nawiercone otwory przepuszczana jest pod dużym ciśnieniem zawiesina pisaku kwarcowego w wodzie. Przepływający przez otwory piasek uderza w ścianki powodując wygładzenie nierówności. W drugim etapie (polerowanie dokładne) przeprowadzane jest polerowanie powierzchni otworów specjalnym wrzecionem. Dzięki polerowaniu usunięte zostają również drobiny pozostałe po procesie wiercenia.

Porównanie właściwości włókien wytworzonych metodą składania i wiercenia prowadzi do następujących wniosków:

- ze względu na liczne defekty mikrostruktury, we wszystkich włóknach wykonanych metodą składania pomiar tłumienności był możliwy tylko dla wyselekcjonowanych odcinków włókien.
- w światłowodach wykonanych technologią składania zaobserwowano duże wahania tłumienności mierzonej po kolejnych obcięciach, co świadczy o dużych fluktuacjach parametrów konstrukcyjnych wzdłuż długości włókien
- w światłowodach wykonanych metodą wiercenia obserwowano znacznie mniejszą ilość defektów i deformacji powodujących skokowe zmiany tłumienia.
- znaczną poprawę jakości światłowodów wytwarzanych metodą wiercenia osiągnięto po opracowaniu metody polerowania dzięki której znacznie zmniejsza się powstałe nierówności powierzchni oraz usuwa się drobiny pozostałe w otworach po wierceniu.

Opracowana metoda wiercenia jest dość uniwersalna. W ramach badań tą metodą wytworzono kilkadziesiąt serii światłowodów. Były wśród nich włókna o niskiej dwójłomności, włókna o wysokiej dwójłomności, światłowody uczulone na promieniowanie UV, włókna do zastosowań w czujnikach wykorzystujących rezonans plazmonowy. W ramach badań opracowano technologię polimerowych światłowodów mikrostrukturalnych o prostokątnej komórce elementarnej oraz serię włókien dwójłomnych z tzw. offsetem czyli przesunięciem rzędu otworów w stosunku do całości struktury. Wytworzenie tego typu włókien nie jest możliwe metodą składania prętów i kapilar

W ramach przeprowadzonych prac opracowano technologię wytwarzania polimeru o nieznacznie większym współczynniku załamania od PMMA, który może stanowić materiał na rdzeń klasycznych i mikrostrukturalnych jedno i wielomodowych światłowodów polimerowych. Jako domieszkę zwiększającą współczynnik załamania zastosowano styren. Wytworzono dwa kopolimery PS-PMMA o różnym stosunku wagowym (9:1 i 19:1 PMMA-PS). Z tak przygotowanych materiałów wytworzono kilka serii jedno- i wielomodowych włókien typu step-index.

Wykonałem również badania związane z opracowaniem technologii wytwarzania światłowodów mikrostrukturalnych domieszkowanych substancjami zwiększającymi wrażliwość PMMA na promieniowanie UV (tzw. fotouczulaczami). Zbadano możliwość wytwarzania włókien z domieszkowanym rdzeniem, domieszkowanym obszarem struktury fotonicznej oraz domieszkowaną dodatkową zewnętrzną warstwą płaszczą. W ramach prac wytworzono również włókna dwójłomne typu side-hole z eliptycznym rdzeniem domieszkowanym polistyrenem (kopolimer PMMA-PS 19:1 w/w), włókna z elementami naprężającymi w postaci inkluzji z czystego polistyrenu ulokowanych w pobliżu kołowego rdzenia domieszkowanego polistyrenem (kopolimer PMMA-PS 19:1 w/w), włókna z elementami naprężającymi w postaci inkluzji z czystego polistyrenu ulokowanych w pobliżu części mikrostrukturalnej płaszczą.