

**Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych w języku polskim.**

Tomasz Osuch

## Autoreferat

**1. Imię i nazwisko:** Tomasz Osuch

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania:**

- 2010 doktor nauk technicznych  
dyscyplina: telekomunikacja  
praca pt.: "Symulacje, projektowanie i wykonanie apodyzowanej maski fazowej przy  
użyciu technologii szkieł HEBS"  
promotor: prof. dr hab. Zbigniew Jaroszewicz  
Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa,
- 2004 magister inżynier  
kierunek: elektronika  
Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych,
- 2003 inżynier  
Specjalność: systemy pomiarowo-kontrolne  
Specjalność dodatkowa: optoelektronika  
Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych.

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:**

- październik 2011 – obecnie Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik  
Informacyjnych, adiunkt,  
2014 - obecnie – kierownik Zespołu Światłowodowych  
Czujników i Systemów Pomiarowych.
- lipiec 2004 – obecnie Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy  
2004 - 2007 – młodszy specjalista,  
2008 - 2010 – asystent,  
2011- obecnie – adiunkt,  
2008 - obecnie – kierownik Zespołu Metrologii  
Optoelektronicznej.

**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. nr 65, poz. 595 ze zm.):**

**a) tytuł osiągnięcia naukowego**

Cykl publikacji powiązanych tematycznie ujętych pod wspólnym tytułem:

***Wybrane metody modyfikacji właściwości spektralnych światłowodowych siatek Bragga nanoszonych metodą maski fazowej i ich zastosowania***

**b) publikacje wchodzące w skład jednotematycznego cyklu publikacji**

- [A1] **T. Osuch**, P. Gąsior, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "Development of fiber Bragg gratings technology and their complex structures for sensing, telecommunications and microwave photonics applications," Bull. Pol. Ac.: Tech. 62 (4), 627-633 (2014). **MNiSW: 25, IF: 0,914, Wkład: 65%.**
- [A2] **T. Osuch**, K. Markowski, P. Gąsior, K. Jędrzejewski, "Quasi-uniform fiber Bragg gratings," J. Lightw. Technol. 33 (23), 4849-4856 (2015). **MNiSW: 35, IF: 2,567, Wkład: 65%.**
- [A3] **T. Osuch**, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "Numerical model of tapered fiber Bragg gratings for comprehensive analysis and optimization of their sensing and strain-induced tunable dispersion properties", Appl. Opt. 54 (17), 5525-5533 (2015) **MNiSW: 30, IF: 1,598, Wkład: 65%.**
- [A4] **T. Osuch**, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "Temperature independent tapered fiber Bragg grating based inclinometer," IEEE Photon. Technol. Lett. 27 (21), 2312-2315 (2015). **MNiSW: 30, IF: 1,945, Wkład: 65%.**
- [A5] **T. Osuch**, "Tapered and linearly chirped fiber Bragg gratings with co-directional and counter-directional resultant chirps," Opt. Commun. 366, 194-199 (2016). **MNiSW: 25, IF: 1.480, Wkład: 100%.**
- [A6] K. Markowski, K. Jędrzejewski, **T. Osuch**, "Numerical analysis of double chirp effect in tapered and linearly chirped fiber Bragg gratings," Appl. Opt. 55 (17), 4505-4513 (2016). **MNiSW: 25, IF: 1,598, Wkład: 47,5%.**
- [A7] **T. Osuch**, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "Fiber optic strain sensors based on linearly chirped tapered fiber Bragg gratings with tailored intrinsic chirp," IEEE Sensors J. 16 (20), 7508-7514 (2016). **MNiSW: 30, IF: 1,889, Wkład: 65%.**
- [A8] **T. Osuch**, K. Markowski, A. Manujło, K. Jędrzejewski, "Coupling independent fiber optic tilt and temperature sensor based on chirped tapered fiber Bragg grating in double-pass

configuration,” Sens. Actuators A. 252, 76-81 (2016). **MNiSW: 35, IF: 2,201, Wkład: 65%.**

[A9] **T. Osuch**, T. Jurek, K. Markowski, K. Jędrzejewski, “Simultaneous measurement of liquid level and temperature using tilted fiber Bragg grating,” IEEE Sensors J. 16 (5), 1205-1209 (2016). **MNiSW: 30, IF: 1,889, Wkład: 60%.**

[A10] **T. Osuch**, “Numerical analysis of harmonic components of the Bragg wavelength content in spectral responses of apodized fiber Bragg gratings written by means of phase mask with variable phase step height,” J. Opt. Soc. Am. A 33 (2), 172-178 (2016). **MNiSW: 25, IF: 1,457, Wkład: 100%.**

[A11] **T. Osuch**, Z. Jaroszewicz, “Influence of optical fiber location behind an apodized phase mask on Bragg grating reflection efficiencies at Bragg wavelength and its harmonics,” Opt. Commun. 382, 36-41 (2017). **MNiSW: 25, IF: 1,480, Wkład: 95%.**

#### **pozostałe publikacje dokumentujące wskazane osiągnięcie naukowe**

[B1] **T. Osuch**, K. Jędrzejewski, L. Lewandowski, W. Jasiewicz, "Shaping the spectral characteristics of fiber Bragg gratings written in optical fiber taper using phase mask method," Photonics Letters of Poland, Vol. 4 (4), 128-130 (2012). **Wkład: 80%**

[B2] **T. Osuch**, T. Jurek, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "A dual-parameter tilted fiber Bragg grating based sensor for liquid level and temperature monitoring," Proc. SPIE vol. 10031, 100311I-1-100311I-7 (2016). **Wkład: 60%**

[B3] **T. Osuch**, "Recent advances in tapered fiber Bragg grating technology and applications," Proc. SPIE vol. 10325, 103250K-1-103250K-8 (2017). **Wkład: 100%**

#### **c) omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.<sup>1</sup>**

Wprawdzie pierwsza siatka Bragga wykonana została w 1978 roku przez Hilla [C1], intensyfikacja prac badawczo-naukowych w tej dziedzinie nastąpiła dopiero wówczas, gdy po raz pierwszy uzyskano siatki metodami interferometryczną [C2] oraz maski fazowej [C3], [C4]. Powodem tego był fakt, że w przeciwieństwie do siatki Hilla (zrealizowanej na skutek powstania fali stojącej we włóknie), siatki wytwarzane metodą maski fazowej oraz interferometrycznie mogły mieć długość fali Bragga niezależną od długości fali lasera UV zapisującego siatki, na skutek bocznego oświetlenia

---

<sup>1</sup>Organizacja odniesień literaturowych:

[A..] – pozycje autora po uzyskaniu stopnia doktora wchodzące w skład jednotematycznego cyklu publikacji

[B..] – pozostałe publikacje dokumentujące wskazane osiągnięcie naukowe (po uzyskaniu stopnia doktora)

[C..] – światowe pozycje literaturowe, kluczowe z punktu widzenia osiągnięcia

[D..] – prace dokumentujące pozostałe osiągnięcia badawczo-naukowe (po uzyskaniu stopnia doktora)

fotoczułego odcinka światłowodu. W ten sposób możliwe stało się wytwarzanie siatek o długościach fali Bragga z zakresu spektralnego wykorzystywanego w telekomunikacji światłowodowej, co natychmiast spotęgowało ich możliwości aplikacyjne. Z uwagi na dużą powtarzalność procesu zapisu siatki, mniejsze wymagania dotyczące właściwości laserów do nanoszenia siatek, metoda maski fazowej zyskała na przestrzeni ostatnich dwóch dekad przeważającą popularność nad metodą interferometryczną. Stała się ona również obiektem znaczących udoskonaleń, takich jak wprowadzenie skanowania maski wiązką UV, umożliwiającymi osiągnięcie siatek o zadanych długościach oraz złożonych profilach naświetlania [C5]. Jednocześnie postęp w technologii masek fazowych do nanoszenia siatek, przyczynił się do uzyskania masek fazowych o zmiennym okresie (tzw. chirped) [C6] oraz masek o zmiennej wydajności dyfrakcyjnej (tzw. apodyzowane) [C7]. Dodatkowo, niewątpliwy postęp w zakresie precyzyjnej mechaniki pozwala na ciągłe udoskonalanie metody maski fazowej, w celu realizacji siatek Bragga o unikalnych właściwościach.

Przedstawiony w niniejszym autoreferacie cykl publikacji powiązanych tematycznie wpisuje się właśnie w nurt prac naukowo-badawczych związanych z opracowaniem nowych rozwiązań w zakresie technologii i zastosowań siatek Bragga, które bez wątpienia na przestrzeni ostatnich dwóch dekad stały się najpopularniejszymi pasywnymi podzespołami światłowodowymi wykorzystywanymi w różnych gałęziach przemysłu i pracach badawczo-naukowych.

Głównym celem naukowym prezentowanego cyklu publikacji było ***opracowanie nowatorskich metod modyfikowania właściwości spektralnych siatek Bragga nanoszonych metodą maski fazowej, uzyskując w ten sposób siatki o unikalnej budowie i właściwościach, a także wykorzystanie siatek o kształtowanych charakterystykach spektralnych do opracowania oryginalnych rozwiązań w zakresie pomiaru wielkości fizycznych.***

Pierwsza z prac [A1] wchodząca w skład powiązanego tematycznie cyklu publikacji stanowi pewnego rodzaju usystematyzowanie wiedzy w zakresie możliwości kształtowania właściwości spektralnych siatek Bragga nanoszonych metodą maski fazowej, będąc jednocześnie podsumowaniem moich prac badawczych w tym zakresie od momentu rozpoczęcia pracy naukowej na Wydziale Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Warszawskiej w 2011 roku.

W szczególności, jednym z pierwszych zagadnień badawczych w zakresie technologii siatek Bragga było opracowanie metody uzyskiwania niekonwencjonalnych charakterystyk spektralnych odbiciowych w siatkach nanoszonych na termicznie przewężanych odcinkach światłowodów. W tym celu zastosowałem zróżnicowanie czasu oraz obszarów naświetlania na odcinku włókna przewężonego charakteryzującego się zmiennym efektywnym współczynnikiem załamania zależnym w głównej mierze od lokalnych rozmiarów przewężenia. Zależność ta przedstawiona została w sposób graficzny w [B1]. W szczególności w wyniku zapisu na przewężeniu dwóch fragmentów siatek o długości 6mm każdy i ~1mm przerwą między nimi otrzymałem strukturę braggowską z wąskim pasmem transmisyjnym w charakterystyce spektralnej odbiciowej. Dodatkowo w celu zrównania

współczynników odbicia obu sekcji wydłużony został czas naświetlania sekcji naniesionej na węższej części przewężenia. Przykład ten pokazuje, że synteza złożonego procesu naświetlania (w sensie czasu oraz obszarów naświetlenia) przewężonego odcinka włókna optycznego i jego geometryczna modyfikacja zapewnia szerokie możliwości w zakresie swobodnego kształtowania charakterystyk odbiciowych siatek.

Drugim zagadnieniem opisanym w pracy [A1] było wykorzystanie maski o zmiennym okresie (tzw. chirped) oraz złożonego procesu skanowania maski w celu uzyskania struktur wąskopasmowych o zróżnicowanych długościach fali Bragga. Poprzez odpowiedni dobór obszarów skanowania maski chirped wykazałem, że możliwe jest otrzymywanie siatek o liniowo zmiennym okresie, jednakże o charakterystykach spektralnych przypominających widmo odbiciowe siatki jednorodnej i różnych długościach fali Bragga z zakresu spektralnego zależnego od parametrów (tj. długości, chirpu i centralnego okresu) użytej maski. Do opisu tego rodzaju struktur użyłem po raz pierwszy pojęcia „**quasi-jednorodne**” siatki Bragga. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych wykazałem, że dla maski fazowej o zadanym chirpie możliwe jest wyznaczenie optymalnej długości siatki, dla której uzyskuje się minimalną możliwą do osiągnięcia szerokość spektralną. Najważniejszą zaletą proponowanej metody nanoszenia siatek quasi-jednorodnych jest fakt wykorzystania jednej maski do otrzymywania siatek na różne długości fali (zamiast wielu masek o stałym okresie). Opracowane struktury posłużyły do wykonania serii siatek braggowskich na odcinku fotoczułego włókna stanowiących element przesuwnika fazy w układzie oscylatora opto-mikrofalowego pracującego w trybie oscylatora grzebieniowego (który szerzej został opisany w punkcie 5). Wstępne wyniki dotyczące struktur quasi-jednorodnych uzyskano prowadząc badania w ramach przyznanego mi grantu dziekańskiego „*Niestandardowe struktury siatek Bragga o zmiennym okresie do zastosowań telekomunikacyjnych i czujnikowych*”, natomiast prace dotyczące siatek na przewężeniach finansowane były z grantu NCN, „*Światłowodowe siatki Bragga na przewężeniach*”, w którym byłem jednym z wykonawców.

*Zatem w publikacji [A1] zaproponowano metody modyfikacji charakterystyk spektralnych siatek Bragga przez zastosowanie: a) złożonego procesu naświetlania siatki na włóknie przewężonym z użyciem maski fazowej o stałym okresie oraz b) naświetlania odcinka włókna nieprzewężonego przez maskę chirped z uwzględnieniem optymalizacji długości siatki względem chirpu maski.*

***Jako osiągnięcie w niniejszej pracy uznać można:***

- wskazanie nowych możliwości w zakresie kształtowania widma siatek Bragga (w tym siatek na termicznie przewężanych odcinkach światłowodu).***
- wykonanie pierwszych struktur braggowskich o zmiennym okresie i różnych długościach fali Bragga realizowanych za pomocą pojedynczej maski fazowej z chirpem oraz o charakterystykach spektralnych właściwych dla siatek jednorodnych.***

Warto podkreślić, że szerokość spektralna opisanych powyżej siatek o zmiennym okresie to nie jedyny parametr, który powinien być uwzględniany w celu uzyskania wąskopasmowych siatek Bragga o wysokiej jakości. Równie istotny jest ich relatywnie duży współczynnik odbicia przy jednoczesnym zachowaniu niewielkiej szerokości spektralnej. Dodatkowo rezultaty przeprowadzonych doświadczeń wykazały konieczność uwzględnienia kształtu wiązki lasera stosowanego do wytwarzania siatek. Powyżej zdefiniowane problemy wzięłem pod uwagę w dalszych badaniach nad strukturami quasi-jednorodnymi, których efekty opublikowane zostały w pracy [A2]. Dysponując maską fazową z chirpem równym 0,35nm/mm o długości 25mm udało się uzyskać struktury o współczynniku odbicia powyżej 80%, szerokości spektralnej poniżej 1nm i o centralnej długości fali Bragga z zakresu 1531,2–1542,6nm. Otrzymane rezultaty jednoznacznie wskazują, że stosując maskę fazową o długości 150mm (najdłuższa komercyjnie dostępna) zakres spektralny długości fali Bragga wytwarzanych przy jej użyciu może zostać zwiększony do rekordowych wartości powyżej 70nm. Porównując wyniki eksperymentalne z obliczeniami numerycznymi uzyskałem dużą zgodność zarówno w wartościach współczynnika odbicia i szerokości spektralnej, jak również w kształcie uzyskanych charakterystyk transmisyjnych. Warto nadmienić, że wartości parametrów naświetlania stosowane do nanoszenia siatek uzyskano stosując optymalizację Pareto. Ponadto, w ramach mojej współpracy naukowej z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN, opracowane siatki quasi-jednorodne zostały przetestowane z sukcesem w warunkach rzeczywistych stosując komercyjny interrogator dedykowany światłowodowemu czujnikowemu opartym na siatkach jednorodnych.

***Jako kluczowe osiągnięcia w niniejszej pracy wyróżniłbym:***

- ***dopracowana koncepcja nanoszenia nowego typu struktur światłowodowych - siatek quasi-jednorodnych,***
- ***uzyskanie siatek quasi-jednorodnych o współczynniku odbicia powyżej 80%, szerokości spektralnej poniżej 1nm za pomocą pojedynczej maski fazowej o chirpie 0,35nm/mm i długości ok 25mm o długościach fali Bragga z zakresu spektralnego 11,4nm, wskazując na możliwość poszerzenia tego zakresu do rekordowych wartości wynoszących powyżej 70nm (dla dostępnej komercyjnie maski o takim samym chirpie i długości 150mm),***
- ***zastosowanie metody Pareto do optymalizacji parametrów naświetlania siatek quasi-jednorodnych o pożądanym właściwościach spektralnych.***

Metoda optymalizacji Pareto może stanowić niezwykle uniwersalne narzędzie numeryczne wspomagające proces projektowania i realizacji siatek Bragga o pożądanym właściwościach spektralnych, co zostało wykazane również w artykule [A3]. Praca ta dotyczy numerycznej analizy i optymalizacji właściwości spektralnych oraz czujnikowych siatek Bragga zapisanych na termicznie przewężanych włóknach. Zaproponowany został w niej kompletny model numeryczny siatki Bragga na przewężeniu uwzględniający między innymi takie zagadnienia jak: poszerzenie pola modowego w obszarze włókna o zredukowanej średnicy, apodyzację siatki realizowaną przez modyfikację czasu

naświetlania w procesie skanowania maski fazowej, analizę własności spektralnych (widma odbitego oraz charakterystyki opóźnienia grupowego) wynikających z przyłożonej siły rozciągającej. Model został przeze mnie zweryfikowany przez porównanie wyników numerycznych i eksperymentalnych charakterystyk spektralnych odbiciowych oraz opóźnienia grupowego siatek na przewężeniach poddanych działaniu siły rozciągającej. Dodatkowo, w pracy wykorzystany został oryginalny pomysł minimalizacji oscylacji w charakterystyce opóźnienia grupowego siatki przy jednoczesnym zachowaniu minimalnej założonej szerokości spektralnej przez zastosowanie optymalizacji Pareto do wyznaczenia optymalnych parametrów profilu apodyzacji w postaci funkcji tangensa hiperbolicznego (tanh). Zredukowany poziom oscylacji oraz relatywnie duża szerokość spektralna są szczególnie istotne w przypadku zastosowania siatki na przewężeniu jako kompensatora dyspersji chromatycznej.

*Zatem w pracy [A3] wykorzystane zostały metody kształtowania właściwości spektralnych siatek Bragga polegające na zastosowaniu złożonego profilu naświetlania (apodyzacja) oraz modyfikacji średnicy światłowodu (przewężenie).*

***Do najważniejszych osiągnięć związanych z omawianą pracą zaliczyłbym:***

- kompletny model numeryczny do analizy siatek Bragga na przewężeniach termicznych z uwzględnieniem apodyzacji oraz wpływu odkształceń .***
- zastosowanie optymalizacji Pareto jako narzędzia do projektowania apodyzowanych siatek Bragga na przewężeniach o pożądanых właściwościach spektralnych.***

Kolejna praca [A4] dotyczy praktycznego wykorzystania TFBG, gdzie zaproponowałem nowatorską konstrukcję inklinometru światłowodowego, w postaci jednorodnej siatki Bragga zapisanej na stożku termicznego przewężenia, pracującego w trybie odbiciowym. W pracy [A4] pokazano ideę, konstrukcję oraz wyniki eksperymentalne opracowanego rozwiązania. Zasada działania inklinometru bazuje na dwóch zjawiskach: stratach zgięciowych w obszarze zgięcia (w najcieńszej części przewężenia) oraz selektywnym spektralnie odbiciu (od siatki Bragga umieszczonej tuż za obszarem zgięcia). Na skutek zgięcia światłowodu w obszarze przewężenia część mocy optycznej propagującej się pierwotnie w rdzeniu wnika w obszar płaszczka i jest częściowo tracona. Pozostała część promieniowania zostaje odbita od siatki Bragga naniesionej na stożku przewężenia. Następnie po raz kolejny promieniowanie przechodzi przez obszar zgięcia i ponownie jest częściowo tracone. Pozostała część promieniowania optycznego jest mierzona. Warto zauważyć, że z uwagi na dwukrotne przejście promieniowania optycznego przez obszar przewężenia (i wynikające ze zgięcia podwójne straty), uzyskana czułość w trybie odbiciowym jest dwukrotnie większa niż w inklinometrze bez siatki pracującym w konfiguracji transmisyjnej. Zaproponowałem dwie metody pomiaru kąta ugięcia. Pierwsza z nich polegała na pomiarze widma odbitego od siatki za pomocą optycznego analizatora widma. Straty mocy optycznej występujące w zgiętym przewężeniu obserwowane były w postaci zmian poziomu mocy punktu odpowiadającego maksimum widma promieniowania odbitego od siatki i docierającego do analizatora. Z kolei zmiany temperatury mogły być niezależnie mierzone na



podstawie przesunięcia spektralnego mierzonego widma. Zatem w konfiguracji z analizatorem widma optycznego zaproponowany przeze mnie inklinometr może być stosowany do jednoczesnego pomiaru kąta ugięcia i temperatury. W drugiej konfiguracji zastąpiłem analizator widma tańszym miernikiem mocy optycznej. W tym przypadku zmiany kąta ugięcia mierzone były na podstawie zmian wartości mocy optycznej odbitej od siatki i docierającej do detektora. W tej konfiguracji jednoczesny pomiar temperatury nie był możliwy, ale z uwagi na dostateczną płaskość charakterystyki spektralnej źródła promieniowania optycznego w zakresie spektralnym widma odbitego pomiar kąta ugięcia był niezależny od temperatury w badanym przedziale 20-80°C. Opracowany inklinometr charakteryzuje się zakresem pomiarowym 0-90° oraz dokładnością pomiaru kąta ugięcia na poziomie  $\pm 1^\circ$ . Przedstawioną koncepcję inklinometru światłowodowego zaprezentowałem również na konferencji *15th Conference on Optical Fibers and Their Applications, Białystok – Lipowy Most, Poland, 29 stycznia – 1 lutego 2014.*

***W tym przypadku jako najważniejsze moje osiągnięcie zaliczyłbym nowatorską konstrukcję inklinometru, w układzie siatki Bragga na przewężeniu o zwiększonej czułości, umożliwiającego jednoczesny pomiar temperatury lub pracującego niezależnie od zmian temperatury (w zależności od konfiguracji systemu pomiarowego).***

Prace opisane w powyższych artykułach [A3], oraz [A4] finansowane były z grantu NCN „*Światłowodowe siatki Bragga na przewężeniach*”, w którym uczestniczyłem w charakterze z wykonawcy.

Opisane w [A1], [A3] oraz [A4] rozwiązania dotyczyły siatek o stałym okresie wykonanych na termicznie przewężonym światłowodzie. W strukturach tych wynikowe poszerzenie charakterystyki spektralnej jest konsekwencją zależności efektywnego współczynnika załamania włókna w obszarze przewężenia od jego średnicy i typowo wynosi nie więcej niż 3-4nm. Zwiększenie szerokości spektralnej siatek nanoszonych na termicznie przewężanych światłowodach wymagałoby większej (niż kilkukrotna) redukcji średnicy włókna. Jednak w takim przypadku przewężenie staje się delikatne, a ponadto na znacząco zredukowanej średnicy rdzenia nie udaje się uzyskać siatki o mierzalnym poziomie odbicia.

Jednocześnie z pracami w zakresie realizacji siatek jednorodnych na przewężeniach, w ramach przyznanego mi grantu dziekańskiego „*Siatki Bragga o zmiennym okresie na przewężeniach światłowodowych*” prowadziłem badania nad zastosowaniem masek o zmiennym okresie (chirped) do nanoszenia siatek na odcinkach włókna optycznego o liniowo zredukowanej średnicy. Już rezultaty pierwszych doświadczeń wykazały korzystny wpływ chirpu maski na znaczące poszerzenie widma uzyskanych struktur w przypadku, gdy wraz ze wzrostem średnicy przewężenia wzrastała wartość okresu naniesionej siatki. Zatem wyniki te wskazywały jednocześnie na fakt, że udało mi się przełamać opisane powyżej ograniczenie dotyczące szerokości spektralnej siatek o stałym okresie na

przewężeniach. Wyniki te wraz ze wstępnymi rezultatami doświadczeń nad zastosowaniem opracowanych struktur jako czujników odkształcenia i temperatury przedstawiłem na konferencji *XI Konferencja Naukowa Technologia Elektronowa, ELTE'2013, Ryn, Polska, 16 – 20 kwietnia, 2013*.

Obiecujące wyniki wstępnych prac stały się impulsem do kontynuowania badań, w ramach których w pełni opracowałem technologię nanoszenia siatek o zmiennym okresie na przewężeniach termicznych. W szczególności zaproponowałem dwie możliwe konfiguracje tego typu struktur:

- a) **siatki ze zgodnymi chirpami** – w których kierunek wzrostu średnicy stożka przewężenia (a zatem i efektywnego współczynnika załamania) jest **zgodny** z kierunkiem wzrostu okresu siatki. W tym przypadku uzyskałem siatki ze **zwiększonym chirpem wynikowym**, charakteryzujące się znacząco szerszym widmem odbiciowym w porównaniu z dotychczas znanymi siatkami jednorodnymi (o stałym okresie) na przewężeniu światłowodowym,
- b) **siatki z przeciwnymi chirpami** - w których kierunek wzrostu średnicy stożka przewężenia (a zatem i efektywnego współczynnika załamania) jest **przeciwny** do kierunku wzrostu okresu siatki. W tym przypadku uzyskałem siatki ze **zredukowanym chirpem wynikowym**, charakteryzujące się węższym widmem w porównaniu z dotychczas znanymi siatkami jednorodnymi (o stałym okresie) na przewężeniu światłowodowym.

Otrzymane oryginalne struktury braggowskie nazwałem *tapered chirped fiber Bragg gratings (TCFBG)*. Ponadto opracowałem i wykorzystałem narzędzia numeryczne do modelowania zaproponowanych przeze mnie siatek nowego typu. Porównując rezultaty obliczeń numerycznych z wynikami charakteryzacji wykonanych siatek TCFBG uzyskałem duże podobieństwo. Rezultaty powyższych badań zawarłem w autorskiej publikacji [A5].

Moje pionierskie badania nad siatkami o zmiennym okresie na przewężeniu światłowodowym wymagały jednak znacznie głębszej analizy numerycznej, uwzględniającej między innymi wzajemny wpływ parametrów przewężenia (długość stożka, minimalna średnica) oraz parametrów maski fazowej (wartość chirpu) dla obu wymienionych powyżej konfiguracji na wynikowe spektrum uzyskiwanych siatek. Zagadnieniu temu poświęcona została kolejna praca [A6]. Wyniki szczegółowej analizy numerycznej wykazały, że przed odpowiedni dobór i synteze chirpów wynikających ze zmiennego okresu maski fazowej oraz profilu i wymiarów przewężenia, istnieje możliwość kształtowania charakterystyk spektralnych siatek TCFBG w szerokim zakresie. W szczególności pokazano, że charakterystyka opóźnienia grupowego siatki TCFBG w konfiguracji zgodnych chirpów jest liniowa w zakresie spektralnym ok. 3-krotnie szerszym, niż w przypadku siatki jednorodnej na przewężeniu. Siatka taka może zatem stanowić znaczące usprawnienie w konstrukcjach podzespołów o przestrajalnej charakterystyce dyspersyjnej. Dalsze zwiększanie zakresu spektralnego jest możliwe przez zastosowanie masek fazowych o większym chirpie.

Ponadto w artykule [A6] zwróciłem uwagę na fakt, że w siatce TCFBG naniesionej w konfiguracji przeciwnych chirpów, istnieje możliwość wytworzenia struktury o minimalnej osiągalnej szerokości spektralnej wynikającej ze wzajemnej całkowitej kompensacji chirpów. W wyniku uzyskuje się strukturę naniesioną na przewężeniu światłowodowym o widnie odbitym zbliżonym do tego, jakie posiada siatka jednorodna, jednakże wykazującą odmienne właściwości w przypadku zastosowania jako czujnik odkształcenia (z uwagi na zmienną średnicę włókna, na którym jest naniesiona).

Powyższa konkluzja stała się jednocześnie motywacją do kontynuowania badań nad strukturami TCFBG w kontekście ich zastosowania jako czujniki odkształcenia. W tym celu wykonałem siatki Bragga o zmiennym okresie na przewężeniach w konfiguracji zgodnych oraz przeciwnych chirpów, które następnie zostały poddane doświadczeniom związanym z badaniem ich odpowiedzi spektralnej na działanie siły rozciągającej oraz zmian temperatury. W wyniku przeprowadzonych pomiarów szerokości spektralnych siatek w funkcji naprężenia wykazałem w publikacji [A7] kluczowe i niepodważalne zalety proponowanych rozwiązań (w odniesieniu do dotychczas znanych siatek jednorodnych na przewężeniach):

- a) stosując *siatkę TCFBG naniesioną w konfiguracji zgodnych chirpów* uzyskałem znaczne zwiększenie zakresu mierzonych wartości naprężenia (tj. ok. dwukrotnie większy zakres monotonicznej odpowiedzi odkształceniowej) w porównaniu z siatką jednorodną naniesioną na podobnym przewężeniu,
- b) stosując *siatkę TCFBG naniesioną w konfiguracji przeciwnych chirpów* (w przypadku gdy chirp pochodzący od zmiennego okresu maski fazowej jest dominujący w stosunku do chirpu wynikającego z profilu przewężenia) uzyskałem monotoniczną (a nawet liniową) odpowiedź odkształceniową w pełnym zakresie mierzonych wartości siły rozciągającej. Oznacza to, że w tej konfiguracji zakres badanych odkształceń ograniczony jest wyłącznie wytrzymałością przewężenia na zerwanie.

Jednocześnie wyniki przeprowadzonych eksperymentów wykazały, że podobnie jak w przypadku siatek jednorodnych, zmiana temperatury nie wpływa na szerokość spektralną siatek TCFBG, a jedynie powoduje przesunięcie spektralne widma odbitego. Zatem siatki te mogą być wykorzystane do jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury w zakresie odkształceń nieosiągalnym jak dotąd w tego typu konstrukcjach.

Ponadto wykazałem dużą zgodność otrzymanych rezultatów eksperymentalnych z wynikami analizy numerycznej oraz obliczeniami teoretycznymi bazującymi na opracowanych przeze mnie modelach analitycznych do analizy wpływu naprężenia na właściwości spektralne siatek.

Jedną z istotnych zalet siatek o liniowo zmiennym okresie nanoszonych na przewężeniach światłowodowych jest możliwość wykonania siatki na obu stożkach jednocześnie zachowując (z uwagi na zmienny okres struktury) separację spektralną widm odpowiadających fragmentom siatki na

poszczególnych stożkach. Fakt ten został przez mnie zauważony i wykorzystany w opracowanej konstrukcji inklinometru światłowodowego. Jednocześnie, parametry przewężenia względem chirpu maski fazowej dobrano w taki sposób, aby fragment siatki naniesiony na stożku w konfiguracji przeciwnych chirpów posiadał całkowicie skompensowany chirp. W ten sposób, relatywnie wąska część widma odbitego od tego fragmentu siatki posiadała dobrze zdefiniowane maksimum odbicia. Druga część widma (związana z odcinkiem siatki naniesionym na drugim stożku w konfiguracji zgodnych chirpów) charakteryzowała się znacznie większą szerokością spektralną, ale również z dobrze zdefiniowanym maksimum. Zaproponowałem zastosowanie takiej siatki o złożonym widmie jako inklinometru światłowodowego pracującego w trybie odbiciowym [A8]. Jego zasada działania jest następująca: część widma promieniowania optycznego z szerokopasmowego źródła (SLED) jest selektywnie odbijana przez fragment siatki ze skompensowanym chirpem występujący przed miejscem zgięcia. Pozostałe promieniowanie propagując się przez obszar zgięcia doznaje strat optycznych (straty zgięciowe) na skutek częściowego wypromieniowania do płaszcza, a następnie rozproszenia. Następnie jest ono odbijane selektywnie od fragmentu siatki naniesionego na drugim stożku przewężenia (za miejscem zgięcia), po czym ponownie doznaje strat na zgięciu i razem z częścią widma odbitą od fragmentu siatki ze skompensowanym chirpem dociera do analizatora widma. Maksymalny, mierzony analizatorem widma optycznego, poziom mocy fragmentu widma wynikającego z odbicia od części struktury braggowskiej znajdującej się za miejscem zgięcia jest zależny od kąta zgięcia (a zatem strat zgięciowych). Z kolei część widma odbita od fragmentu siatki ze skompensowanym chirpem (przed zgięciem) jest od niego niezależna. Zaproponowałem zatem, aby wartość kąta zgięcia określana była na podstawie różnicy poziomów mocy pomiędzy maksimumami w widmie mierzonym, związanymi z odbiciem promieniowania od obu fragmentów siatki. W ten sposób uzyskano inklinometr w postaci odcinka światłowodu z siatką o zmiennym okresie naniesioną na obu stożkach przewężenia, który był nieczuły na sprzężenie z układem pomiarowym, co zostało wykazane eksperymentalnie. Ponadto obserwacja zmian długości fali maksimum w widmie odbitym od siatki o skompensowanym chirpie umożliwiła jednoczesny pomiar temperatury. Zakres mierzonych inklinometrem wartości kąta ugięcia wynosił  $0^{\circ}$ – $70^{\circ}$ , a rozdzielczość pomiarową oszacowano na  $1^{\circ}$ .

*W przypadku siatek o zmiennym okresie na przewężeniach światłowodowych kształtowanie właściwości spektralnych możliwe jest w dosyć szerokim zakresie z uwagi na syntezę kilku czynników, tj. profilu periodycznych zmian współczynnika załamania (chirp), geometrii przewężenia, a także wzajemnej ich konfiguracji. Dodatkowo, w pracy [A8] wykorzystano złożony profil naświetlania (tak, aby przy braku zgięcia poziom mocy maksimumów odpowiadających obu fragmentom siatki był podobny).*

***Podsumowując, do kluczowych moich osiągnięć w zakresie badań nad siatkami o zmiennym okresie na przewężeniu światłowodowym ujętych w publikacjach [A5]-[A8] zaliczyłbym:***

***- opracowanie nowatorskich konstrukcji siatek Bragga o zmiennym okresie na przewężeniach światłowodowych o kształtowanych w szerokim zakresie właściwościach spektralnych,***

- wykazanie po raz pierwszy możliwości realizacji siatek na przewężeniu o całkowicie zredukowanym chirpie (skompensowanym), o charakterystyce spektralnej odbiciowej podobnej do tej jakie posiada siatka jednorodna, jednakże o odmiennej odpowiedzi odkształceniowej,
- wykorzystanie po raz pierwszy siatek o liniowo zmiennym okresie na przewężeniach do pomiaru odkształcenia uzyskując nową jakość w postaci znaczącego zwiększenia zakresu pomiarowego w porównaniu z czujnikami bazującymi na siatkach jednorodnych na przewężeniach,
- opracowanie nowatorskiego rozwiązania inklinometru światłowodowego, w oparciu specjalnej konstrukcji siatkę Bragga na przewężeniu, niezależnego na sprzężenie z układem pomiarowym i umożliwiającego jednoczesny pomiar temperatury.

Warto dodać, że seria prac [A5]-[A8] związanych z technologią i wykorzystaniem siatek TCFBG była tematem zaproszonego (autorskiego) referatu pt. „Recent advances in tapered fiber Bragg grating technology and applications” zaprezentowanego przeze mnie na konferencji *17th Conference on Optical Fibers and Their Applications, Supraśl, Polska, 23-27 styczeń 2017* oraz opublikowanego w materiałach pokonferencyjnych [B3].

Poza metodami kształtowania właściwości spektralnych siatek Bragga przez modyfikację periodyczności zmian współczynnika załamania oraz zróżnicowanie rozmiarów geometrycznych włókna, w siatkach skośnych (*ang. tilted gratings*) wprowadza się pochylenie prążków siatki względem osi włókna. W artykule [A9] zaproponowałem wykorzystanie skośnej siatki Bragga jako czujnika dwuparametrowego do jednoczesnego pomiaru poziomu cieczy i temperatury. Na etapie nanoszenia siatki jej kluczowy parametr, tj. kąt pomiędzy płaszczyzną prążków siatki a osią włókna (jako wypadkowa kąta elewacyjnego i azymutalnego w układzie do nanoszenia siatek skośnych) został tak dobrany, aby w siatce występowało znaczące sprzężenie propagującej się fali do modów płaszczyznych przy jednoczesnym silnym odbiciu braggowskim. Tak dobrany kąt zapewniał, że wpływ zmian temperatury oraz współczynnika załamania otoczenia (czyli de facto poziomu cieczy, w której zanurzone było włókno z siatką) na widmo transmisyjne siatki miał odmienny charakter, dzięki czemu był rozróżnialny w pomiarach spektralnych transmisyjnych. Zrealizowane siatki zostały doświadczalnie przebadane dla dwóch cieczy (olej parafinowy o współczynniku załamania  $n \approx 1,44$  oraz mieszanina wody z cukrem  $n \approx 1,38$ ), w celu określenia jakościowego charakteru zmian widma siatki w funkcji zarówno temperatury jak i poziomu cieczy. Ponadto wykazano, że zwiększenie wypadkowego kąta pochylenia prążków siatki skośnej pozwala na poszerzenie zakresu stosowalności siatki w kierunku cieczy o niższych wartości współczynnika załamania ( $n \approx 1,38$ ). W toku przeprowadzonych eksperymentów wykazane zostało, że w wyniku zmian temperatury obserwowane było jedynie przesunięcie spektralne całego widma transmisyjnego siatki. Zatem temperatura cieczy może być określana na podstawie przesunięcia spektralnego długości fali minimum braggowskiego. Z kolei poziom zanurzenia siatki w cieczy wpływał jedynie na „głębokość” minimum transmisyjnych

modów płaszczowych (bez jakiegokolwiek wpływu na minimum związane z długością fali Bragga). Zaproponowałem dwie metody pomiaru poziomu cieczy: (1) przez obserwację zmian amplitudy wybranego piku związanego z konkretnym modem płaszczowym, oraz (2) przez obserwację zmian pola powierzchni ograniczonej obwiedniami całego obszaru widma związanego z modami płaszczowymi. Zależność amplitudy modu płaszczowego (w skali dB) oraz wspomnianego pola powierzchni w funkcji poziomu cieczy miały charakter liniowy w niemal całym zakresie pomiarowym bliskim długości badanych siatek (tj. 8 mm i 10mm). Zależność długości fali minimum braggowskiego w funkcji temperatury zmierzona w zakresie temperatur 30-60°C również okazała się liniowa. Rezultaty badań nad zastosowaniem siatki skośnej do pomiaru poziomu cieczy i temperatury przedstawiłem w referacie pt. „*A dual-parameter tilted fiber Bragg grating based sensor for liquid level and temperature monitoring*” na konferencji *XXXVIII-th IEEE-SPIE Joint Symposium on Photonics, Web Engineering, Electronics for Astronomy and High Energy Physics Experiments, Wilga, Poland, 30 May – 5 June 2016*, które zostały również opublikowane w materiałach pokonferencyjnych [B2].

***Podsumowując, jako kluczowe swoje osiągnięcie związane z niniejszą pracą wskazałbym pierwsze zastosowanie siatki skośnej (o odpowiednio kształtowanej charakterystyce spektralnej transmisyjnej) do jednoczesnego pomiaru poziomu cieczy i temperatury.***

Powyżej opisane prace [A1]-[A9] koncentrują się wokół kształtowania odpowiedzi widmowej światłowodowych siatek Bragga dla podstawowej długości fali Bragga (pierwszego rzędu). Jednakże, w swojej pracy badawczej zajmowałem się zagadnieniem modyfikacji odpowiedzi spektralnej siatek w szerszym zakresie, tj. również w zakresie harmonicznym długości fali Bragga.

W autorskiej pracy [A10] zaproponowałem wykorzystanie maski fazowej o zmiennej wydajności dyfrakcyjnej realizowanej poprzez zmienną wysokość stopnia fazowego do wytwarzania apodyzowanych siatek Bragga o znacząco wzmocnionych harmonicznym braggowskich i zredukowanej składowej podstawowej w charakterystykach spektralnych odbiciowych. W szczególności przedmiotem badań numerycznych był wpływ kształtu funkcji apodyzacji maski fazowej (a zatem rozkładu natężenia w nieparzystych rzędach ugięcia) na efektywność odbicia dla braggowskiej długości fali  $\lambda_B$  (pierwszego rzędu) i poszczególnych harmonicznym (w szczególności  $2\lambda_B$  oraz  $\lambda_B/3$ ). Przyczyną tych odbić jest złożony rozkład pola dyfrakcyjnego za maską fazową apodyzowaną, który zostaje odwzorowany w rdzeniu światłowodu podczas tworzenia siatki. Zatem rozkład współczynnika załamania wzdłuż osi włókna jest w zasadzie superpozycją rozkładów periodycznych o okresach równych  $\Lambda = \Lambda_{PM}/(m+n)$ , wynikających z interferencji  $m$ -tych i  $n$ -tych rzędów ugięcia, gdzie  $\Lambda_{PM}$  jest okresem maski fazowej. Wykazałem, że efektywność odbicia długości fali Bragga i harmonicznym braggowskich wynikają z wydajności dyfrakcyjnych w poszczególnych rzędach dyfrakcyjnych. Ponadto, porównując wyniki analizy numerycznej siatek o profilach

apodyzacji opisanych funkcją gaussowską oraz  $\tanh$  z wynikami dla siatki jednorodnej (nieapodyzowanej) dowiodłem, że przez dobór odpowiedniego profilu apodyzacji maski fazowej możliwe jest wpływanie w sposób kontrolowany na skuteczność odbicia podstawowej długości fali Bragga i poszczególnych harmonicznych braggowskich. Jednakże w przypadku zastosowania maski fazowej apodyzowanej zmienną wysokością stopnia fazowego możliwości kształtowania odpowiedzi harmonicznej siatki Bragga nadal są ograniczone z uwagi na zerową (teoretycznie) wydajność dyfrakcyjną w parzystych rzędach ugięcia (tj.  $\pm 2$ , oraz  $\pm 4$ ).

Sposób na pozbycie się powyższego ograniczenia zaproponowałem w pracy [A11], gdzie postuluję zastosowanie maski fazowej o zmiennej wydajności dyfrakcyjnej realizowanej za pomocą zmiennego współczynnika wypełnienia do wytwarzania apodyzowanych siatek Bragga. Maskę tego rodzaju cechuje niezerowa wartość wydajności dyfrakcyjnej w każdym z rzędów ugięcia (tj.  $0, \pm 1, \dots, \pm 4$ ). Przeprowadzając odpowiednie obliczenia numeryczne wykazałem, że rozkład pola dyfrakcyjnego za taką maską (odwzorowany w rdzeniu światłowodu w postaci zmian współczynnika załamania wzdłuż osi włókna) jest bardziej złożony, a uzyskana siatka apodyzowana wykazuje odbicie dla podstawowej długości fali Bragga i każdej z harmonicznych, tj. dla długości fali  $\lambda = 2\lambda_B/p$ , przy czym  $p = 1, 2, \dots, 8$ . Drugim ważnym aspektem, na który zwróciłem uwagę w pracy [A11] okazała się silna i periodyczna zależność efektywności odbicia dla poszczególnych harmonicznych braggowskich od położenia włókna (podczas naświetlania) względem sąsiadujących płaszczyzn samoobrazu w polu dyfrakcyjnym za maską fazową. Bazując na wynikach przeprowadzonych obliczeń numerycznych wykazałem, że periodyczność ta może być opisana zaproponowaną przeze mnie formułą analityczną i zależy od odległości Talbota związanej z interferencją poszczególnych rzędów ugięcia.

Osiągnięcia prezentowane w pracach [A10] i [A11] były również tematem referatu pt. „*Review of phase masks used for the exposure of the fiber Bragg gratings*”, prezentowanego na konferencji *IX Ibero-American Optics Meeting (RIO) and the XII Latino-American Meeting of Optics, Lasers and Applications (OPTILAS)*, Pucón, Chile, 21-25 November 2016.

*W powyższych dwóch publikacjach zaproponowana metoda modyfikacji nie tyle kształtu charakterystyki odbiciowej dla długości fali Bragga, a efektywności odbicia dla  $\lambda_B$  i harmonicznych polega na indukowaniu złożonego rozkładu periodycznych zmian współczynnika załamania siatek przez zastosowanie masek fazowych o odpowiednio dobranych profilach apodyzacji.*

***Do najważniejszych moich osiągnięć w pracach [A10] i [A11] należy zaliczyć:***

- prekursorskie prace w zakresie zastosowania apodyzacji jako metody kształtowania odpowiedzi harmonicznej siatek Bragga***
- wykazanie po raz pierwszy wpływu położenia włókna względem sąsiednich płaszczyzn samoobrazu podczas naświetlania siatki apodyzowanej metodą maski fazowej na efektywności odbicia dla długości fali Bragga i poszczególnych harmonicznych oraz opisanie tej zależności formułą analityczną.***

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

### Prace dokumentujące pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

- [D1] K. Madziar, B. Galwas, **T. Osuch**, "Fiber Bragg Gratings Based Tuning of an Optoelectronic Oscillator", 20th International Conference on Microwaves Radar and Wireless Communication (MIKON), pp. 1-4, 2014. – publikacja w bazie IEEEExplore
- [D2] K. Madziar, B. Galwas, **T. Osuch**, "Optoelectronic comb oscillators with FBG based frequency control," German Microwave Conference (GeMiC), pp. 347-350, 2015 - publikacja w bazie IEEEExplore
- [D3] **T. Osuch**, T. Kossek, K. Markowski, "Impact of Fiber Ring Laser Configuration on Detection Capabilities in FBG Based Sensor Systems", Proc. of SPIE Vol. 9290, 92900Y-1-92900Y-7 (2014)
- [D4] **T. Osuch**, K. Jędrzejewski, L. Lewandowski, K. Anders, P. Gdula, R. Piramidowicz, "Charakteryzacja światłowodowych siatek Bragga metodą reflektometrii optycznej w dziedzinie częstotliwości", Elektronika - technologie, konstrukcje, zastosowania, nr 11/2012, 17-20.
- [D5] S. Stopiński, A. Jusza, K. Anders, **T. Osuch**, P. Szczepański, K. Różanowski, J. Lewandowski, R. Piramidowicz, "Photonic Integrated Circuit for interrogating FBG-based sensing network", The 8th Conference on Integrated Optics - Sensors, Sensing Structures and Methods, Szczyrk, Poland, 3-7 March 2014.
- [D6] A. Kaźmierczak, S. Stopiński, A. Jusza, K. Anders, K. Markowski, **T. Osuch**, K. Różanowski, J. Lewandowski, and R. Piramidowicz, "Development of photonic sensing system for patient condition monitoring during MRI diagnostics", 18th European Conference on Integrated Optics, ECIO 2016, Warsaw, Poland, 18-20 May 2016
- [D7] **T. Osuch**, M. Koba, P. Szczepański, Z. Jaroszewicz, "Badania własności spektralnych i generacyjnych złożonych struktur quasi-periodycznych jednowymiarowych kryształów fotonicznych," XI Konferencja Naukowa Technologia Elektronowa, ELTE'2013, Ryn, Polska, 16 – 20 kwietnia, 2013
- [D8] M. Koba P. Szczepański, **T. Osuch**, T. Kossek, "Progowy model generacji promieniowania w laserach posiadających ośrodek aktywnej w postaci kryształu fotonicznego o symetrii kwadratowej i trójkątnej," XI Konferencja Naukowa Technologia Elektronowa, ELTE'2013, Ryn, Polska, 16 – 20 kwietnia, 2013.
- [D9] M. Koba, P. Szczepański, **T. Osuch**, "Nonlinear analysis of a photonic crystal laser," J. Mod. Opt. 58 (17), 1538-1550 (2011)



- [D10] M. Koba, M. P. Szczepański, **T. Osuch**, “Threshold Mode Analysis of 2-D Squarer and Triangular Lattice Gain and Index Coupled Photonic Crystal Lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.* 50 (7), 554-562 (2014).

Poza zagadnieniami związanymi z kształtowaniem właściwości spektralnych siatek Bragga, ujętymi w powiązonym tematycznie cyklu publikacji, tematyką światłowodowych siatek Bragga zajmowałem się w znacznie szerszym kontekście badawczym.

Opracowałem i wykonałem siatki Bragga do realizacji światłowodowej linii opóźniającej o dyskretnie przestrajalnej wartości opóźnienia grupowego. Siatki wykonano metodą maski fazowej odpowiednio dobierając odległości między nimi i względem krańca włókna celem uzyskania pożądanych wartości opóźnienia grupowego. Uzyskana w ten sposób linia opóźniająca stanowiła element przesuwnika fazy układu przestrajania częstotliwości oscylatora opto-mikrofalowego [D1], [D2]. Prace w zakresie projektowania i realizacji siatek do tego celu zostały sfinansowane w ramach przyznanego mi grantu dziekańskiego pt. „*Niestandardowe struktury siatek Bragga o zmiennym okresie do zastosowań telekomunikacyjnych i czujnikowych*”. Ponadto, rezultaty pracy wskazują na możliwość realizacji optycznej linii opóźniającej przestrajalnej w sposób ciągły w przypadku zastosowania odpowiednio długiej siatki typu chirped o liniowo zmiennym okresie zamiast serii siatek jednorodnych o różnych długościach fali.

Kolejnym tematem badawczym, w którym łączyłem zagadnienia z zakresu fotoniki z techniką mikrofalową, było opracowanie i badanie interrogatora w postaci światłowodowego lasera pętlowego do zastosowania w sieciach czujnikowych opartych na siatkach Bragga [D3]. Celem było przebadanie różnych konfiguracji lasera z ośrodkiem wzmacniającym w postaci wzmacniacza półprzewodnikowego (SOA) lub światłowodowego wzmacniacza erbowego (EDFA). Dodatkowo badania przeprowadzone zostały dla wzmacniacza EDFA w układzie z aktywną synchronizacją modów (ang. active mode-locking). W prezentowanych konfiguracjach lasera, długości fali generacji zdeterminowane są długościami fali Bragga kaskadowego połączenia dwóch siatek pracujących jako czujniki, i które wraz z pętlą światłowodową tworzyły rezonator. W szczególności prace miały na celu ocenę użyteczności wymienionych konstrukcji lasera w przypadku interrogacji dwóch siatek Bragga, z których jedna pracowała w układzie czujnika odkształcenia reagującego również na zmiany temperatury, a druga jedynie jako czujnik temperatury, umożliwiając tym samym jednoczesny pomiar obu wielkości. W przypadku zastosowania wzmacniacza SOA w pętli lasera uzyskano stabilną generację na dwóch długościach fali nawet wówczas, gdy widma odbiciowe siatek częściowo na siebie nachodziły. To pozwala twierdzić, że interrogator w konfiguracji lasera pętlowego ze wzmacniaczem SOA umożliwia prawidłowy odczyt długości fali Bragga z obu siatek, a zatem możliwy jest jednoczesny pomiar temperatury i odkształcenia. Z kolei konfiguracja oparta na wzmacniaczu EDFA wykazywała skłonność do pracy jednoczęstotliwościowej i występował silny efekt konkurencji modowej. Jednakże, zastosowanie aktywnej synchronizacji modów zapewniło

stabilną pracę jednoczęstotliwościową. Natomiast przełączanie pomiędzy dwiema siatkami zrealizowano przez odpowiedni dobór częstotliwości modulacji sygnału optycznego, która wynikała z długości rezonatora lasera.

W swojej działalności naukowej zajmowałem się również charakteryzacją różnego rodzaju struktur braggowskich metodą reflektometrii optycznej w dziedzinie częstotliwości (*ang. OFDR – optical frequency domain reflectometry*). W pracy [D4] zaprezentowałem i omówiłem wyniki pomiarów metodą OFDR siatek na termicznie przewężanych odcinkach włókna, siatek skośnych, struktur braggowskich naniesionych na światłowodzie dwójłomnym oraz szeregu czterech siatek jednorodnych o tej samej długości fali Bragga naniesionych na jednym odcinku włókna. Dla każdej z wymienionych siatek uzyskałem charakterystyczne krzywe reflektometryczne, które umożliwiły nie tylko wyznaczenie charakterystyk spektralnych, ale również pozwalały na uzyskanie dodatkowych parametrów siatek, nieosiągalnych w tradycyjnych pomiarach spektralnych. W szczególności, wykazałem, że bezsprzeczną zaletą metody OFDR jest możliwość pomiaru charakterystyk spektralnych odbiciowych poszczególnych siatek o tej samej długości fali Bragga naniesionych szeregowo na jednym odcinku włókna (pod warunkiem relatywnie niewielkiej reflektancji poszczególnych siatek). Ponadto zróżnicowane wyniki reflektometryczne pomiaru siatki na przewężeniu dla obu kierunków wprowadzania promieniowania optycznego do struktury jednoznacznie wskazują na możliwość zastosowania metody OFDR do badania efektów rozpraszania wstecznego promieniowania w strukturach braggowskich wykonanych na termicznie przewężanych odcinkach włókna. Kolejną zaletą metody OFDR, wykazaną w [D4], jest możliwość precyzyjnego określenia długości struktury braggowskiej oraz jej położenia we włóknie z sub-milimetrową dokładnością. Rezultaty pracy zostały również przedstawione na konferencji *XIV Konferencja i III Szkoła "Światłowody i ich zastosowania", TAL 2012, Lublin i Nałęczów, Polska, 8 -12 października 2012.*

Jednym z obecnie realizowanych przeze mnie przedsięwzięć o charakterze aplikacyjnym jest wykorzystanie siatek Bragga w monitoringu do bezinwazyjnych pomiarów podstawowych parametrów fizjologicznych (rytmu serca, częstości oddechu i temperatury ciała) pacjentów w silnym polu magnetycznym w ramach projektu finansowanego przez NCBiR – PBS III, pt. „*Optoelektroniczny monitoring stanu pacjenta w rezonansie magnetycznym (OPTO-SPARE)*”. Jako wykonawca i kierownik jednego z dwóch zespołów badawczych z Politechniki Warszawskiej, odpowiedzialny jestem za projekt, optymalizację i wykonanie czujników światłowodowych bazujących na strukturach braggowskich do realizacji sieci czujnikowej mierzącej parametry życiowe pacjenta podczas rezonansu magnetycznego. Biorę również aktywny udział w tworzeniu oryginalnego rozwiązania układu interrogatora do systemu sieci czujników braggowskich realizowanego w technologii fonicznych układów zintegrowanych (PIC – *ang. photonic integrated circuits*), [D5], [D6].

Moje dotychczasowe prace wykraczały również poza zakres periodycznych struktur światłowodowych. Zajmowałem się także badaniem właściwości spektralnych i generacyjnych jednowymiarowych kryształów fonicznych zarówno periodycznych (PC) jak i quasi-periodycznych (QPC) [D7]. W szczególności, moje zainteresowania naukowe skupiłem wokół jednowymiarowych *złożonych* struktur fonicznych bazujących na prostych sekwencjach deterministycznych: Fibonacciego (F) oraz typu fraktalnego Cantora (C). Złożoność struktur prostych (F lub C) uzyskiwałem przez ich powielenie (gdzie  $C^N$  oznacza N-krotne powielenie), lustrzane odbicie ( $C_{\text{MIRR}}$ ), inwersję współczynników załamania warstw ( $C^*$ ) i wzajemną ich syntezę. W przeciwieństwie do typowych kryształów fonicznych składających się z naprzemiennie ułożonych warstw o wysokim i niskim współczynniku załamania, struktury quasi-periodyczne charakteryzują się nieco bardziej skomplikowaną budową. W przypadku QPC kolejne warstwy ułożone są zgodnie z pewnymi charakterystycznymi sekwencjami, którymi mogą być struktury fraktalne (sekwencja Cantora) lub ciąg rekurencyjny (Fibonacciego). Pierwszym z badanych przeze mnie jednowymiarowych quasi-periodycznych kryształów fonicznych była zmodyfikowana struktura Cantora  $C_1^N(C_1^N)^*$ , gdzie podstawowa struktura rzędu pierwszego  $C_1$  została najpierw N-krotnie powielona (uzyskując strukturę  $C_1^N$ ), a następnie dodano no niej drugą, która powstała przez inwersję jej współczynników załamania warstw. Struktura ta posiadała wąskie pasmo transmisyjne w środku fonicznej przerwy zabronionej, które ulegało znaczącemu zawężeniu wraz ze wzrostem współczynnika powielenia N struktury podstawowej  $C_1$ . Ponadto w obszarze pasma transmisyjnego występowało znaczne zmniejszenie prędkości grupowej fali elektromagnetycznej, co w przypadku zastosowania struktury jako ośrodka aktywnego lasera powoduje wzrost efektywności oddziaływania fali elektromagnetycznej z ośrodkiem, a zatem wzrost efektywności generacji laserowej. Druga z badanych struktur  $F(5)F(5)_{\text{MIRR}}$ , w postaci sekwencji Fibonacciego piątego rzędu (F5) złożonej z jej lustrzanym odbiciem  $F(5)_{\text{MIRR}}$ , wykazywała znacząco lepsze właściwości filtracyjne (strome zbocza i płaskie maksimum w charakterystyce spektralnej odbiciowej) w stosunku do struktury podstawowej F(5). Najważniejszym wnioskiem wypływającym z przeprowadzonych prac w zakresie jednowymiarowych quasi-periodycznych kryształów fonicznych jest fakt, że realizacja *złożonych* struktur daje możliwość uzyskiwania unikalnych właściwości spektralnych nieosiągalnych w strukturach podstawowych. Poza badaniami nad jednowymiarowymi strukturami periodycznymi, brałem udział w pracach dotyczących analizy właściwości generacyjnych w laserach z ośrodkiem aktywnym w postaci dwuwymiarowego kryształu fonicznego [D8], [D9], [D10].

## Literatura

- [C1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, 32 (10), 647-649 (1978).
- [C2] G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, 14 (15), 823-825 (1989).
- [C3] D. Z. Anderson, V. Mizrahi, T. Erdogan, A. E. White, "Production of in-fibre gratings using a diffractive optical element," *Electron. Lett.*, 29 (6), 566-568 (1993).
- [C4] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.*, 62 (10), 1035-1037 (1993).
- [C5] W. H. Loh, M. J. Cole, M. N. Zervas, S. Barcelos, R. I. Laming, "Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber-scanning beam technique," *Opt. Lett.* 15 (20), 2051-2053 (1995).
- [C6] C. Rogers, D. Goodchild, R. Baulcomb, M. Butler, P. Hoyle, S. Kanellopoulos, S. Clement, B. Pugh, "High perfection chirped grating phase masks by electron-beam definition," *J. Vac. Sci. Technol. B* 17 (6), 3217-3221 (1999).
- [C7] J. Albert, K.O. Hill, B. Malo, S. Thériault, F. Bilodeau, D. C. Johnson, L. E. Erickson, "Apodisation of the spectral response of fibre Bragg gratings using phase mask with variable diffraction efficiency," *Electron. Lett.* 31 (3), 222-223 (1995).

*Tomasz Osuch*