

**WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA**  
**im. Jarosława Dąbrowskiego**



**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**Przetworniki wielkości fizykochemicznych na bazie  
długookresowych siatek światłowodowych**

mgr inż. Renata Zawisza

Promotor:

prof. dr hab. inż. Leszek R. JAROSZEWICZ  
czł. koresp. PAN

Warszawa 2020

*Serdeczne podziękowania dla mojego promotora Pana prof. dr hab. inż. Leszka R. Jaroszewicza za opiekę naukową, wyrozumiałość, cierpliwość oraz wszelką pomoc na każdym etapie mojej kariery naukowej.*

*Dziękuję całemu zespołowi Photonics Research Center, Université du Québec en Outaouais w Kanadzie za współpracę podczas wykonywania badań laboratoryjnych*

*Szczególne podziękowania dla dr Anny Celebańskiej za życzliwość, pełne wsparcie podczas przeprowadzania badań oraz cenne dyskusje naukowe.*

*Dziękuję wszystkim pracownikom i doktorantom Zakładu Technicznych Zastosowań Fizyki Instytutu Fizyki Technicznej WAT za współpracę, cenne rady oraz koleżeńską atmosferę.*

*Największe podziękowania należą się mojej Rodzinie, która na każdym kroku motywowała mnie do osiągnięcia swojego celu.*

*Praca została zrealizowana w ramach projektów:*

- Nowe materiały foniczne i ich zaawansowane zastosowania  
(POIG.01.03.01-14-016/08)*
- Senior Industrial Research Chair in Photonics Sensing Technologies for Safety and Security Monitoring (SPI/NSERC), Québec, Kanada*

## Spis treści

Lista akronimów i symboli .....	5
<b>1. Wprowadzenie .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Długookresowe siatki światłowodowe.....</b>	<b>13</b>
2.1 Właściwości widmowe długookresowych siatek światłowodowych.....	14
2.2 Właściwości dyspersyjne długookresowych siatek światłowodowych .....	17
2.3 Technologia wytwarzania długookresowych siatek światłowodowych .....	19
2.3.1 Geometryczna modulacja jako metoda wytwarzania LPG.....	20
2.3.2 Optyczna modulacja jako metoda wytwarzania LPG.....	22
2.4 Czułość długookresowych siatek światłowodowych.....	26
2.4.1 Czułość temperaturowa długookresowej siatki światłowodowej .....	28
2.4.2 Czułość długookresowej siatki światłowodowej na naprężenia.....	30
2.4.3 Czułość długookresowej siatki światłowodowej na zmianę współczynnika załamania otoczenia.....	32
<b>3. Światłowodowy interferometr pętlowy .....</b>	<b>36</b>
3.1 Zasada działania światłowodowego interferometru pętlowego .....	36
3.2 Światłowodowy interferometr pętlowy jako przetwornik pomiarowy .....	39
3.3 Zmiana stanu polaryzacji wiązki propagującej się w światłowodowym interferometrze pętlowym .....	41
<b>4. Charakterystyka platformy złożonej z długookresowej siatki światłowodowej umieszczonej w pętli interferometrycznej .....</b>	<b>44</b>
4.1. Koncepcja platformy do przetwarzania wielkości fizykochemicznych.....	45
4.2. Dopasowanie widma transmisyjnego długookresowej siatki światłowodowej z podwójnym pasmem absorpcyjnym i światłowodowego interferometru pętlowego 46	
4.2.1. Podstawy zmiany stanu polaryzacji w światłowodowej pętli interferencyjnej .....	47
4.2.2. Przestrzajanie widma transmisyjnego platformy pomiarowej.....	50
4.3. Charakterystyka platformy jako przetwornika wybranych wielkości fizykochemicznych .....	53
4.3.1. Czułość na zmianę temperatury .....	53
4.3.2. Czułość na zmianę naprężenia .....	59
4.3.3. Czułość na zmianę zewnętrznego współczynnika załamania.....	62
4.3.4. Stabilność przetwornika wielkości fizykochemicznych.....	67
<b>5. Dwupunktowy przetwornik parametrów fizykochemicznych na bazie długookresowej siatki światłowodowej umieszczonej w pętli interferometrycznej .....</b>	<b>72</b>

<b>6. Zastosowanie platformy do przetwarzania sygnału pochodzącego z materiału biologicznego .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Podsumowanie i wnioski .....</b>	<b>84</b>
<b>8. Spis Rysunków .....</b>	<b>90</b>
<b>9. Spis Tabel .....</b>	<b>94</b>
<b>10. Bibliografia .....</b>	<b>95</b>

## Lista akronimów i symboli

DRLPG	– długookresowa siatka światłowodowa z podwójnym pasmem absorpcyjnym
FBG	– światłowodowa siatka Bragg’a
FOS	– czujnik światłowodowy
LPG	– standardowe długookresowe siatki światłowodowe
OFG	– optyczne struktury periodyczne
PMC	– warunek dopasowania fazowego
PMF	– włókno utrzymujące polaryzację
RI	– współczynnik załamania badanego ośrodka
SOP	– stan polaryzacji
TAP	– punkt zwrotny dyspersji długookresowej siatki światłowodowej
$\Lambda$	– okres siatki
$\alpha_\Lambda$	– współczynnik rozszerzalności cieplnej materiału włókna światłowodowego
$\beta_{0,1}$	– stała propagacji dla modu podstawowego
$\beta_{pl,(m)}$	– stała propagacji dla modu $m$ -tego rzędu
$\beta_{PMF}$	– dwójłomność fazowa włókna utrzymującego polaryzację
$\kappa$	– liniowy współczynnik sprzężenia,
$L$	– długość siatki
$l_{PMF}$	– długość włókna utrzymującego polaryzację
$L_B$	– długość drogi dudnień
$n_g$	– zmodyfikowany współczynnik załamania
$n_{modul}$	– okresowa modulacja współczynnika załamania rdzenia włókna
$n_{zew}$	– współczynnik załamania ośrodka zewnętrznego
$\lambda_0$	– centralna długość fali

$\lambda_{LPG(m)}$	– długość fali rezonansowej pasma absorpcyjnego w warunkach dopasowania fazowego
$n_{rdz}^{eff}$	– efektywny współczynnik załamania rdzenia (dla modu podstawowego)
$n_{pł(m)}^{eff}$	– efektywny współczynnik załamania płaszczka (dla modu $m$ -tego rzędu)
$n_{pł}$	– współczynnik załamania płaszczka światłowodu
$\Delta T$	– zmiana temperatury
$\Delta \varepsilon$	– zmiana natężenia
$\Delta n_{zew}$	– zmiana współczynnika załamania ośrodka zewnętrznego,
$\Delta \lambda$	– szerokość pasma absorpcyjnego
$\Delta \lambda_{LPG}$	– przesunięcie długości fali pasma absorpcyjnego
$\Delta \varphi$	– różnica faz pomiędzy liniowo spolaryzowanymi modami w kierunku $x$ oraz $y$
$\xi_{rdz}$	– współczynnik termo-optyczny materiału rdzenia światłowodu
$\xi_{pł}$	– współczynnik termo-optyczny materiału płaszczka światłowodu
$\eta_{rdz}$	– współczynnik fotosprężysty materiału rdzenia światłowodu
$\eta_{pł}$	– współczynnik fotosprężysty materiału płaszczka światłowodowego
$\gamma$	– dyspersja
$S_T$	– czułość temperaturowa
$u_m$	– $m$ -ty pierwiastek pierwszego rzędu zerowej funkcji Bessela
$r_{pł}$	– średnica płaszczka światłowodu
$\theta$	– różnica kątową pomiędzy azymutami SOP fali cw i ccw
$\Delta \phi_{PMF}$	– przesunięcie fazowe wiązki między ramieniem pomiarowym a ramieniem odniesienia

## 1. Wprowadzenie

Żyjemy w czasach dynamicznego rozwoju technologicznego, gdzie czwarta rewolucja przemysłowa (I4, ang. Industry 4.0), internet rzeczy (IoT, ang. Internet of Things), sztuczna inteligencja (AI, ang. Artificial Intelligence) oraz rozwój sieci 5G prowadzi do konieczności dopracowania technik wytwórczych, automatyzacji oraz przetwarzania i wymiany danych. Sprostanie temu zadaniu jest możliwe między innymi poprzez stałe i efektywne dopracowywanie istniejących już platform, w tym urządzeń do przetwarzania zewnętrznych sygnałów pomiarowych według określonej zależności i w granicach określonej dokładności [1]. Do rozwoju technologicznego systemów detekcyjnych, pomiarowych, monitorujących itp., prowadzą dwa motory gospodarcze: pierwszym z nich jest potrzeba przewidywania sytuacji zagrażających zdrowiu i bezpieczeństwu życia ludzkiego, natomiast drugim jest mechanizm konkurencji, spowodowany kapitalistycznym i konsumpcjonistycznym pragnieniem podniesienia jakości życia ludzkiego. Silnie rozwijające się laboratoria państwowe oraz niepubliczne badania prowadzone w korporacyjnych departamentach badań i rozwoju (R&D, ang. Research and Development) skupiają się na skomplikowanych procesach zarówno w skali makro, jak i mikro, a więc na procesach niewidocznych gołym okiem. Doskonałym przykładem są prace prowadzone nad przetwornikami fotonicznymi wykorzystującymi do pomiaru wybranego czynnika lub pola fale elektromagnetyczne, przypadające na obszar tzw. promieniowania optycznego. Stosowanie zjawisk optycznych do urządzeń spełniających funkcję pomiarową oraz przetwornikową stworzyło możliwość miniaturyzacji układów optoelektronicznych oraz możliwość redukcji zarówno poziomu szumów, jak i eliminacji wpływu niekorzystnych parametrów fizycznych badanego otoczenia [2].

Spośród szerokiego zakresu zalet układów optoelektronicznych, można wyróżnić ich możliwości pomiarowe uzyskiwane dzięki licznym badaniom poświęconym tematyce przetwarzania wielkości fizykochemicznych na sygnał optyczny. Konieczność precyzyjnego pomiaru wartości badanego obiektu bądź stanu, wymusza projektowanie oraz konstruowanie złożonych przetworników, przekształcających daną wielkość na niezwykle czułe parametry fali elektromagnetycznej wykorzystywanej do przenoszenia informacji, na przykład jej fazę, częstotliwość lub właściwości polaryzacyjne. Doskonałym medium dla transmisji fali, uwrażliwionym na zmiany warunków brzegowych, jest światłowód, który dzięki odporności na działanie pola magnetycznego pozwala na przetworzenie zmian parametrów sygnału optycznego, a następnie na jego wizualizację w postaci sygnału cyfrowego [3]. Prace nad

czujnikami światłowodowymi (FOS, ang. Fiber Optic Sensors) zaczęły się zaraz po wynalezieniu komercyjnego światłowodu przez firmę Corning Glass Works w 1970 roku (obecnie Corning Incorporated), która jako pierwsza wyprodukowała włókno o stratach poniżej 20 dB/km. W ówczesnym czasie, urządzenia optoelektroniczne, takie jak laser, fotodetektor i światłowody były trudnodostępne, a ich cena ograniczała możliwości prowadzenia badań rozwojowych przez instytuty państwowe i prywatne przedsiębiorstwa. Po latach 80., kiedy światłowody stawały się coraz bardziej powszechne, urządzenia do transmisji oraz detekcji sygnału stały się tańsze, co sprzyjało rozwojowi czujników światłowodowych [4]. Pomimo eksponencjalnego rozwoju i zainteresowań w tej dziedzinie, wiele kierunków nie zostało jeszcze zbadanych i rozpowszechnionych, zarówno w aspekcie teoretycznym jak i eksperymentalnym. W tym miejscu należy podkreślić, iż nie tylko relatywistyczne właściwości światła, jego bezmasowość oraz korpuskularne zachowanie jako fotonu, są istotne w kontekście poznania i ulepszenia świata. Nadal istnieje duża ilość nieopisanych układów oraz niezbadanych struktur, również w zakresie optyki, inżynierii materiałowej, chemii czy optoelektroniki, które oparte na włóknach światłowodach pozwalają na uzyskanie niezwykle czułych przetworników mogących znaleźć zastosowania w układach przemysłowych, medycynie, jak również w obronności państwa [5]. Celowe wprowadzenie określonego zaburzenia centro-symetrycznej struktury włókna światłowodowego nadaje jej nowe własności fizyczne, głównie determinujące czułość na zewnętrzne zmiany fizykochemiczne otoczenia pomiarowego. Zaburzenia te mogą być podłużne (względem kierunku rozchodzenia się światła w strukturze), jak na przykład we włóknach utrzymujących polaryzację (PMF, ang. Polarization Maintaining Fiber) [6], gdzie zaburzenia symetryczności spowodowane są poprzez wprowadzenie wzdłuż rdzenia dodatkowych obszarów o odmiennym współczynniku załamania (RI, ang. Refractive Index). Drugi rodzaj celowego wprowadzenia defektu struktury to zaburzenia poprzeczne, powstałe poprzez okresową zmianę współczynnika załamania rdzenia włókna krzemionkowego na określonej długości. Zakładając, iż takie struktury rozpatrujemy jako zbiór równoległych płaszczyzn atomowych, możliwe było zastosowanie prawa Bragga, gdzie przy spełnieniu określonych warunków następuje interferencja fal kulistych powstałych na poszczególnych płaszczyznach [7]. Jeżeli różnica dróg optycznych nałożonych na siebie fal jest równa całkowitej wielokrotności długości fali, następuje ich wzmocnienie, w przeciwnym razie fale ulegają wygaszeniu. W przypadku struktury włókna krzemionkowego, propagujące się fale spełniające warunek Bragga sumują się i ulegają odbiciu dla pewnych dyskretnych długości fali [8].



Zjawisko propagacji fali świetlnej w okresowo, podłużnie zaburzonych strukturach zostało szczegółowo podsumowane i przeanalizowane w roku 1997 przez Amnon Yariv i Michiharu Nakamura [9]. W zależności od odległości pomiędzy okresowo pojawiającymi się zaburzeniami, struktury takie dzielimy na „krótkookresowe” światłowodowe siatki Bragga (FBG, ang. Fiber Bragg Grating) oraz długookresowe siatki światłowodowe (LPG, ang. Long Period Grating). Różnica pomiędzy nimi sprowadza się przede wszystkim do mechanizmów fizycznych zachodzących podczas propagacji wiązki świetlnej, a w szczególności do sposobu sprzężenia modów [10]. Światłowodowe LPG są bardziej czułe na zaburzenie środowiska zewnętrznego, co w zależności od zastosowania można traktować jako wadę lub zaletę. W zastosowaniach telekomunikacyjnych najczęściej stosowane są FBG, umieszczone na przestrzeni kilkukilometrowej infrastruktury światłowodowej, celem pomiarów głównie temperatury i ciśnienia drogą monitoringu naprężeń powstałych w wyniku oddziaływania czynnika fizycznego na cząsteczki krzemionki. W przypadku zastosowań struktur okresowych jako przetwornika nie tylko wielkości fizycznych, ale również wielkości chemicznych, głównie stosowane są LPG ze względu na ich unikatową funkcjonalność - wrażliwość na programowalną zmianę zewnętrznego współczynnika załamania [11], [12]. Konieczność uzyskania w tym wypadku detekcji ekstremalnie małych zmian wymusiła dalsze prace nad technologią LPG, w konsekwencji czego w 1999 roku Shu i inni [13] opublikowali badania dotyczące „ultraczułej” siatki światłowodowej, tzw. długookresowej siatki światłowodowej z podwójnym pasmem absorpcyjnym (DRLPG, ang. Dual Resonance Long Period Grating). Siatki tego typu charakteryzują się znacznie wyższą czułością niż uprzednio określone jako standardowe, jednakże ich produkcja wymaga wieloetapowego i skomplikowanego procesu technologicznego [14].

Należy podkreślić, iż istotna bariera, która często pojawia się podczas konstrukcji czujników na bazie długookresowych siatek światłowodowych to brak ich selektywności. Na przykład, podczas pomiaru zmian RI, struktura okresowa czuła jest również na zmiany zarówno naprężenia, jak i temperatury. Zagadnienie eliminacji wpływu naprężeń jest już rozwiązane na zadawalającym poziomie, głównie poprzez konstrukcyjne zabezpieczenie głowicy pomiarowej. Komplikacje pojawiają się przy eliminacji zaburzeń realnego sygnału poprzez wpływ temperatury na zmianę RI, ponieważ jego wartość jest silnie zależna od średniej energii kinetycznej drgań cząsteczek [15]. Badania nad rozwiązaniem tego zagadnienia prowadzone są od lat, a sposobów podejścia do efektywnego rozdzielenia tych

dwóch sygnałów jest wiele [16] [17] [18], również przy zastosowaniu jako głowicy czujnika parametrów fizykochemicznych struktur LPG. Ze względu, iż temat niniejszej pracy dotyczy również przetwarzania sygnału chemicznego, czyli czułości struktury na ekstremalnie niską zmianę zewnętrznego RI, autorka w części eksperymentalnej skupiła się na analizie długookresowych siatek światłowodowych.

Szukając optymalnych rozwiązań dochodzi się do wniosku, iż zarówno wady jak i zalety stanowią jednakowy element rozważań, a różnica polega na przyjętym punkcie odniesienia. Dlatego też, brak bezpośredniej selektywności czujników opartych na LPG może posłużyć jako mechanizm do konstrukcji czujników wielopunktowych i rozłożonych, gdzie sygnał już przetworzony będzie rozdzielony na poszczególne wielkości fizyczne oraz chemiczne [19]. W zależności od zastosowania, istnieje wiele koncepcji rozwiązujących to zagadnienie, natomiast główny podział konstrukcji takich czujników to:

- 1) nanoszenie na powierzchnię LPG cienkich warstw metalu [20], bądź selektywnie czułego na poszukiwany materiał molekularnie znakowanego polimeru [21],
- 2) łączenie dwóch lub więcej LPG i/bądź FBG o różnych parametrach fizycznych w sposób szeregowy lub równoległy [22],
- 3) łączenie LPG ze światłowodowymi interferometrami Sagnaca [23], Macha-Zendera [24], Fabry-Perota [25] oraz Michelsona [26].

Ostatnia grupa czujników niesie za sobą wiele korzyści, między innymi poprzez w pełni zamkniętą konstrukcję światłowodową i szeroki zakres długości fal, w którym funkcjonują. Zasada działa interferometru opiera się na interferencji dwóch rozdzielonych w sprzęgaczu wiązek światła uzyskanego ze spójnego źródła [27]. Wielkość mierzona wpływa na fazę fali w ramieniu pomiarowym interferometru, co powoduje, iż obserwowany na wyjściu obraz interferencyjny ulega zmianie [28]. Niestety, możliwości wykorzystania interferometrów światłowodowych jako czujników są ograniczone ze względu na silną temperaturową zależność ich parametrów oraz nieliniową charakterystykę przetwarzania. Jednakże ograniczenie to może być wykorzystane w czujnikach wieloparametrowych, gdzie dokonywany jest pomiar także temperatury, jak na przykład w czujnikach dedykowanych do pomiaru zmian RI. Kolejnym ograniczeniem, które nierzadko pojawia się w konstrukcji czujników, są różne warunki środowiskowe, w których znajdują się ramie pomiarowe oraz odniesienia, co może znacząco wpływać na błąd pomiarowy. Zagadnienie to często poruszane jest w konstruowanych platformach pomiarowych, gdzie temperatura ma istotne

znaczenie podczas pomiaru danego parametru. W tym wypadku, zastosowanie pętli interferometrycznej (FLM, ang. Fiber Loop Mirror), często utożsamianej z interferometrem Sagnaca [29], może wyeliminować błędy systematyczne, co jest niezwykle ważne w kontekście pomiarów o mikronowej czy nanometrowej skali dokładności.

Przetworniki oparte na konstrukcjach długookresowych siatek światłowodowych połączonych z interferometrem pętlowym stały się zatem odrębnym kierunkiem badań w dziedzinie czujników światłowodowych [30]. W chwili rozpoczęcia badań związanych z niniejszą pracą doktorską (czerwiec 2015), tematyka połączenia DRLPG z pętlą interferometryczną do zastosowań jako przetwornik sygnału optycznego nie została przebadana i opisana, co było bezpośrednią motywacją podjęcia tych prac. Jednakże obszerność zagadnień związanych z niniejszą tematyką, spowodowała zawężenie metod pomiarowych do przetwarzania takich wielkości jak: temperatura, naprężenia oraz współczynnik załamania otoczenia głowicy pomiarowej. Osobny rozdział został również poświęcony rozwiązaniom algorytmicznym oraz układowym prowadzącym do eliminacji niepożądanego sygnału zakłócającego realny wynik przetwarzanego sygnału, tj. rozróżnienie głównego badanego sygnału od sygnału pochodzącego ze zmieniającej się temperatury. Tym samym celem niniejszej pracy jest udowodnienie tezy, że:

***Długookresowa siatka światłowodowa z podwójnym pikiem rezonansowym może być stosowana jako przetwornik wielkości fizykochemicznych umożliwiający jednoczesną kompensację niepożądanego wpływu czynników zewnętrznych.***

Najbardziej istotnym rezultatem badań przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy było skonstruowanie platformy pomiarowej oraz optymalizacja parametrów układu, znacząco wpływających na rząd czułości skonstruowanego przetwornika. Analityczny i eksperymentalny dobór odpowiednich elementów optycznych układu pozwolił na opracowanie metody kalibracji przetwornika, a w szczególności kalibracji widma transmisyjnego wiązki świetlnej propagującej się przez układ dwóch głównych składowych przetwornika, tj. pętli światłowodowej (FLM) z odcinkiem PMF oraz DRLPG. Badania te zostały przedstawione w rozdziale 4.2 i po raz pierwszy opublikowane w [31]. Rozdział 4.3 został poświęcony analizom przetworzonego sygnału pochodzącego od zmian poszczególnych wielkości nieelektrycznych, tj. osobno RI [31], temperatury [32] oraz naprężeń [33]. Ta część badań pozwoliła również wykazać, iż zastosowanie odpowiedniego algorytmu matematycznego skutkuje zwiększeniem czułości pomiarowej

bazującej na wykorzystaniu różnicowej metody pomiarowej w konfiguracji interferometrycznej. Metoda ta została wykorzystana we wszystkich eksperymentach opisanych w niniejszej rozprawie.

Rozdział 5 został poświęcony analizie uwarunkowań zmiany współczynnika załamania substancji ciekłej przy jednoczesnym pomiarze temperatury w platformie skonstruowanej ze struktury DRLPG umieszczonej w FLM. Warto podkreślić, iż ze względu na precyzyjną kalibrację układu oraz zastosowanie różnicowej metody pomiarowej, badany przetwornik charakteryzował się o rząd wielkości większą czułością na zmianę zewnętrznego RI przy stałej kontroli temperatury. W ostatnim rozdziale zawierającym wyniki eksperymentalne udowodniono, że istnieją możliwości aplikacyjne proponowanej platformy przetwornikowej, tj. wykazano możliwości zastosowania sfunkcjonalizowanej struktury DRLPG umieszczonej w FLM do pomiarów substancji biologicznych na podstawie interakcji biotyna-awidyna [34]. Badania te otwierają możliwości detekcji substancji biologicznych oraz chemicznych w środowisku o zmiennych warunkach termicznych.

Reasumując, niniejsza rozprawa prezentuje syntetyczne ujęcie konstrukcji i charakteryzacji platformy będącej przetwornikiem wybranych wielkości fizykochemicznych przy wykorzystaniu LPG jako głowicy pomiarowej w układzie FLM jako elemencie pasywnym służącym głównie do kontroli zmian temperatury i działającym jako swoisty filtr optyczny. Przetworzony sygnał pochodzący z mierzonej wielkości rejestrowano jako zmiana charakterystyki widmowej, a czułość definiowano przy użyciu różnicowej metody pomiarowej. Całość badań sprowadza się do uwzględnienia wpływu zależności temperatury od mierzonej wielkości zmiany RI. Tym samym wskazano na celowość rozwijania i udoskonalania innowacyjnych optycznych platform czujnikowych, bazujących na przetwornikach wielkości fizykochemicznych. Uzyskane w niniejszej rozprawie wyniki zostały opublikowane w 4 artykułach recenzowanych oraz w 14 komunikatach konferencyjnych.

## 2. Długookresowe siatki światłowodowe

Możliwość wytworzenia fotonicznej struktury rezonansowej bądź ośrodka optycznego sprzęgającego wybrane mody wiązki świetlnej stało się początkiem nowego podejścia do metrologii światłowodowej. Rok 1978 można uznać za moment odkrycia światłowodowych struktur periodycznych, ówczesnie nazywanych przestrajalnym filtrem optycznym oraz siatkami hillowskimi [35]. To wtedy po raz pierwszy zdefiniowano i opisano metodę wytworzenia siatki optycznej, będącej czułą strukturą, wrażliwą na fluktuacje wielu parametrów środowiska zewnętrznego. Tym samym moment ten zapoczątkował istną lawinę badań nad dwoma rodzajami periodycznych struktur światłowodowych (OFG, ang. Optical Fiber Grating), których technologiczną podstawą jest okresowo zmodulowany współczynnik załamania rdzenia światłowodu na odcinku rzędu kilku centymetrów. Pierwszy rodzaj struktur periodycznych to FBG, gdzie odległość pomiędzy kolejnymi modulacjami  $\Lambda$  (tzw. okres siatki) jest rzędu setek nanometrów, zaś sama siatka pracuje w trybie odbiciowym. Większym okresem siatki, bo rzędu setek mikrometrów, charakteryzują się LPG pracujące w trybie transmisyjnym [36]. Praca w trybie transmisyjnym jest uwarunkowana faktem, iż mody płaszczowe są mocno tłumione i szybko zanikają. Różnice w parametrach technologicznych obydwu rodzajów siatek okresowych (zmodyfikowany współczynnik załamania -  $n_g$ , okres -  $\Lambda$  i długość siatki -  $L$  oraz metoda wytwarzania) przekładają się na dwa odmienne zjawiska fizyczne zachodzące podczas propagacji wiązki świetlnej w zmodyfikowanym włóknie, a co za tym idzie za właściwościami widmowymi, syntetycznie porównanymi w Tabeli 1.

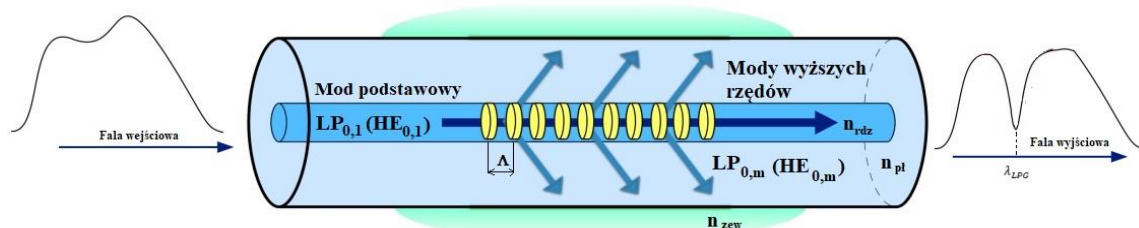
W ujęciu ogólnym, brak sprzężenia z modami płaszczowymi w przypadku FBG, eliminuje możliwości przetwarzania sygnału pochodzącego ze zmiany współczynnika załamania otoczenia. Dlatego też, dalsza część pracy zostanie całkowicie poświęcona LPG.

**Tabela 1.** Porównanie głównych parametrów i właściwości siatki Bragga (FBG) i długookresowej siatki światłowodowej (LPG) [37].

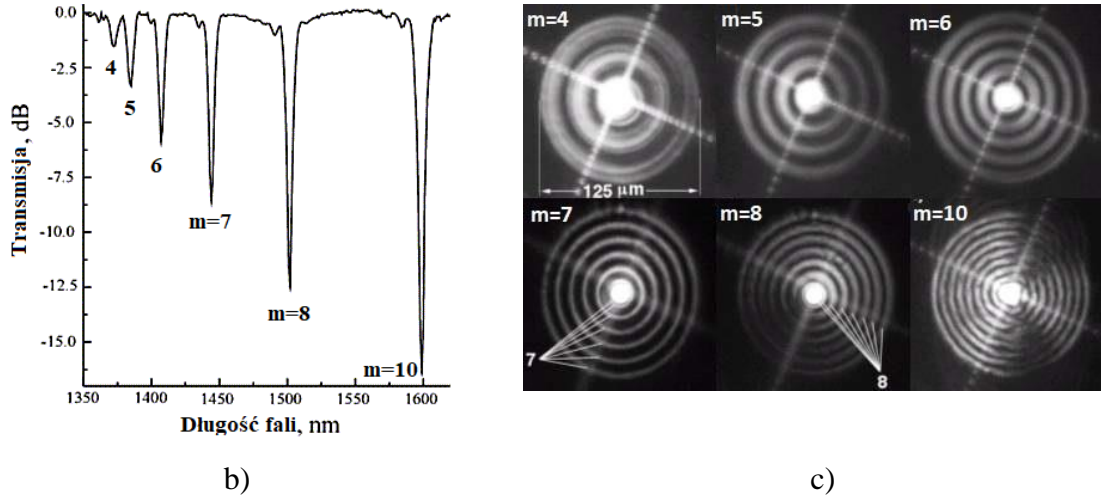
Właściwość	FBG	LPG
Okres $\Lambda$	Poniżej 0,1 mm, zazwyczaj 0,5 $\mu\text{m}$ .	Pomiędzy 0,1 – 1 mm, zazwyczaj 200 – 300 $\mu\text{m}$ .
Długość L	Kilka centymetrów (2 - 4 cm).	
Sprzężenie modów	Sprzężenie modu rdzeniowego propagującego w kierunku dodatnim (od źródła światła do drugiego końca włókna) z modem rdzeniowym z przeciwnym kierunkiem propagacji.	Sprzężenie modu rdzeniowego propagującego w kierunku dodatnim z modami płaszczowymi propagującymi również w kierunku dodatnim.
Charakterystyka widmowa	Na widmie transmisyjnym istnieje tłumienie dla pojedynczej długości fali spełniającej warunek dopasowania fazowego (długość fali Bragga) [38].	Widmo transmisyjne składa się z szeregu pasm absorpcyjnych dla różnych długościach fali.
Czułość	Brak czułości na zmianę zewnętrznego współczynnika załamania otoczenia.	Możliwość uzyskania „ultraczułych” siatek, poprzez modyfikację warunków brzegowych. Wysoka czułość na zmianę zewnętrznego RI.

## 2.1 Właściwości widmowe długookresowych siatek światłowodowych

Zasadniczo, zasada działania długookresowych siatek światłowodowych sprowadza się do sprzężenia modu podstawowego ( $LP_{0,1}$ ) propagującego się w rdzeniu światłowodu z modami wyższych rzędów ( $LP_{0,m}$ ) propagującymi się w płaszczu światłowodu (Rysunek 1a). Te ostatnie charakteryzują się silnym tłumieniem, zatem sprzężenie modu podstawowego z modem wyższego rzędu ( $m$ -rzędu) powoduje powstanie pasm absorpcyjnych na widmie transmisyjnym (Rysunek 1b). Im wyższy rząd modu płaszczowego, z którym następuje sprzężenie modu  $LP_{0,1}$ , tym większe tłumienie dla długości fali odpowiadającej pasmu absorpcyjnemu. Rysunek 1c przedstawia rozkład intensywności wiązki świetlnej propagującej się przez LPG dla przykładowych rzędów modów płaszczowych. Rozkład został zmierzony techniką pola bliskiego. Wszystkie mody mają wyraźną symetrię osiową odpowiadającą liczbie azymutalnej  $l=1$  [39].



a)



**Rysunek 1.** Schemat długookresowej siatki światłowodowej [40] - a), przykładowe widmo transmisyjne LPG (dla sprzężenia z modami rzędu  $m=4, 5, 6, 7, 8, 10$ ) - b) oraz rozkład natężenia wiązki świetlnej dla LPG - c) mierzony techniką pola bliskiego dla sprzężenia modów rzędu  $m=4, 5, 6, 7, 8, 10$  [39].

Tak jak w przypadku siatek Bragga, warunek dopasowania fazowego wynikający z zasady zachowania pędu (PMC, ang. Phase-Matching Condition) musi być również spełniony dla LPG, aby nastąpiło sprzężenie modów i wygaszenie dla dedykowanej długości fali. Rozważając włókno jednomodowe ze stałą propagacji  $\beta_{0,1}$  dla modu podstawowego i  $\beta_{pł,(m)}$  dla modów wyższych rzędów ( $m$ ), warunek dopasowania fazowego można wyrazić poprzez:

$$\beta_{0,1} - \beta_{pł,(m)} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.1)$$

Z definicji stałej propagacji  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n^{eff}$  otrzymujemy warunek dopasowania fazowego dla LPG wyrażony poprzez różnicę efektywnych współczynników załamania pomiędzy modem podstawowym a modami płaszczowymi  $m$ -rzędu jako [41]:

$$\lambda_{LPG(m)} = \Lambda \cdot (n_{rdz}^{eff} - n_{pł,(m)}^{eff}) = \Lambda \cdot \Delta n^{eff}, \quad (2.2)$$

gdzie:  $\lambda_{LPG(m)}$  – długość fali rezonansowej pasma absorpcyjnego w warunkach dopasowania fazowego,  $n_{rdz}^{eff}$  i  $n_{pł,(m)}^{eff}$  – odpowiednio efektywny RI modu podstawowego oraz modów wyższych rzędów ( $m$ -rzędu) [14]. Należy podkreślić, iż wartości  $n_{rdz}^{eff}$  i  $n_{pł,(m)}^{eff}$  są silnie zależne od współczynnika załamania rdzenia włókna  $n_{rdz}$  oraz współczynnika załamania płaszczka włókna  $n_{pł}$  co jest spowodowane dyspersją falowodową [42]. Ponadto, wartości  $n_{rdz}^{eff}$  i  $n_{pł,(m)}^{eff}$  są ściśle zależne od współczynnika załamania ośrodka zewnętrznego

$n_{zew}$ , w którym znajduje się falowód. Innymi słowy, efekt wygaszenia dla dedykowanej długości fali może pojawić się, gdy światłowód umieszczony jest w ośrodku o RI  $n_{zew} \cong 1,333$  (teoretycznie współczynnik załamania wody), podczas gdy w ośrodku o innym RI, na przykład  $n_{zew} \cong 1$  (współczynnik załamania dla próżni, w przybliżeniu powietrza), warunek dopasowania fazowego nie będzie spełniony.

Jak wynika z równania (2.2) długość okresu siatki zasadniczo wpływa na długość fali rezonansowej. Im krótszy okres zmian współczynnika załamania rdzenia LPG, tym sprzężenie następuję z modami wyższych rzędów, a co za tym idzie wygaszenie następuje dla niższych częstotliwości fali elektromagnetycznej. Z teorii modów sprzężonych wynika, iż minimum transmisji jest opisane za pomocą funkcji harmoniczej i jest definiowana jako [43]:

$$(T_{LPG})_{min} = 1 - \sin^2 \kappa L, \quad (2.3)$$

gdzie:  $\kappa = \frac{\pi n_{modul}}{\lambda_{LPG}}$  jest liniowym współczynnikiem sprzężenia,  $n_{modul}$  jest wprowadzoną modulacją współczynnika załamania rdzenia włókna, w które została wpisana siatka długookresowa.

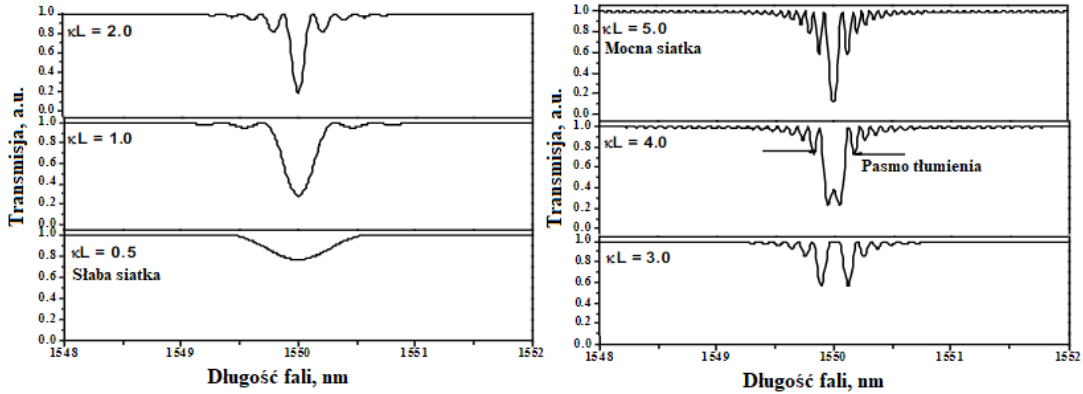
Wiele zastosowań LPG opiera się na założeniu, iż jest to wąskopasmowy filtr optyczny, gdzie obok długości fali rezonansowej bardzo istotnym parametrem jest szerokość połówkowa pasma absorpcyjnego  $\Delta\lambda$ . Przy założeniu, iż istnieje wymiana mocy między przynajmniej dwoma modami szerokość ta zdefiniowana jest jako [44]:

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda_{LPG}^2}{\Delta n^{eff} L} \sqrt{1 - \left(\frac{\kappa L}{\pi}\right)^2}. \quad (2.4)$$

Dopasowując odpowiednie parametry w zależności od zastosowania LPG, należy wziąć pod uwagę siłę sprzężenia modów siatki (Rysunek 2). Jeżeli  $\kappa L \leq 1$  (lewa kolumna na Rysunku 2) to długookresowa siatka światłowodowa jest słaba i szerokość pasma tłumienia głównie zależy od długości LPG. Kształt pasma tłumienia określana jest funkcją *sinc* (pierwsza sferyczna funkcja Bessela) [45]. Ten przypadek jest najmniej pożądany przy projektowaniu siatki jako filtru optycznego „wycinającą” dedykowana długość fali (będącego podstawą przetwornika fizykochemicznego), ponieważ częściowo transmituje sygnał wejściowy dla długości fali rezonansowej. LPG o kształcie pasma tłumienia typu *sinc* znajdują zastosowanie w binarnych systemach łączności. Rozważając przypadek, gdy  $\kappa L > 1$ , (prawa kolumna na Rysunku 2) na widmie transmisyjnym pojawiają się dwa



lub więcej wąskich pasm absorpcyjnych. Poza tym pasmem, pojawia się szereg niepożądaných spadków transmisji.



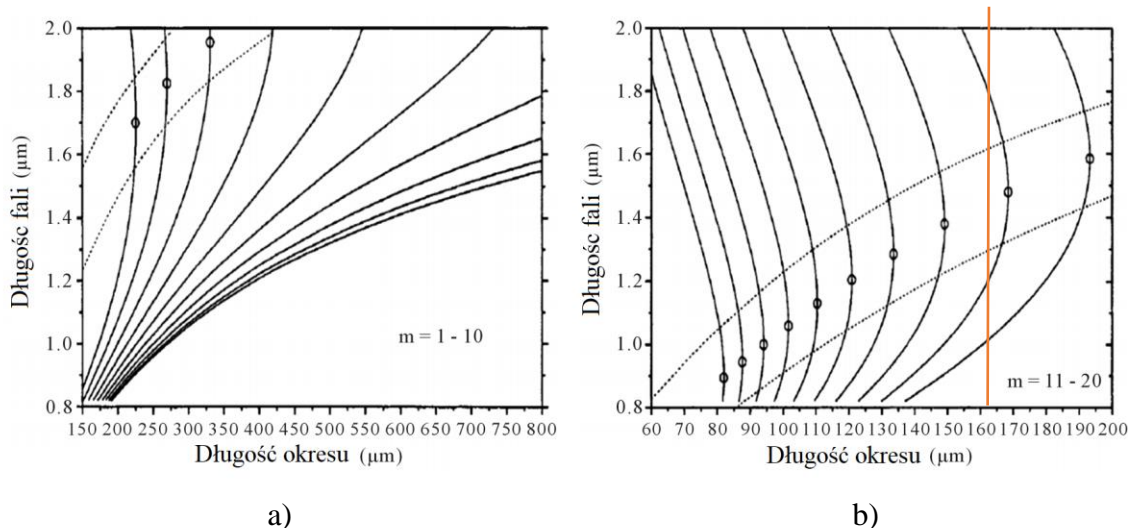
**Rysunek 2.** Teoretyczna zależność szerokości pasma tłumienia w zależności od współczynnika sprzężenia modów LPG [44].

## 2.2 Właściwości dyspersyjne długookresowych siatek światłowodowych

Zależność efektywnych współczynników załamania  $n_{rdz}^{eff}$  i  $n_{pł(m)}^{eff}$  od długości fali jest spowodowana dyspersją falową oraz materiałową. Zależność położenia długości fali rezonansowej od okresu siatki LPG wyrażana jest następująco [46]:

$$\frac{d\lambda_{LPG}}{d\Lambda} = \frac{n_{rdz}^{eff}(\lambda) - n_{pł(m)}^{eff}(\lambda)}{1 - \Lambda \left[ \frac{n_{rdz}^{eff}(\lambda)}{d\lambda} - \frac{n_{pł(m)}^{eff}(\lambda)}{d\lambda} \right]}. \quad (2.5)$$

Zakładając, iż dyspersja materiałowa ma taki sam wpływ na obydwa efektywne współczynniki załamania  $n_{rdz}^{eff}$  i  $n_{pł(m)}^{eff}$ , ich różnica  $\Delta n^{eff}$  nie ulega zmianie, a co za tym idzie długość fali rezonansowej pasma absorpcyjnego  $\lambda_{LPG}$  (wzór 2.4) pozostaje niezależna od dyspersji materiałowej. Innymi słowy, dyspersja falowa jest dominującym czynnikiem wpływającym na widmo transmisyjne siatki długookresowej. Zależność  $\frac{d\lambda_{LPG}}{d\Lambda}$  dla włókna domieszkowanego B/Ge została przedstawiona za pomocą krzywych dopasowania fazowego na Rysunku 3.

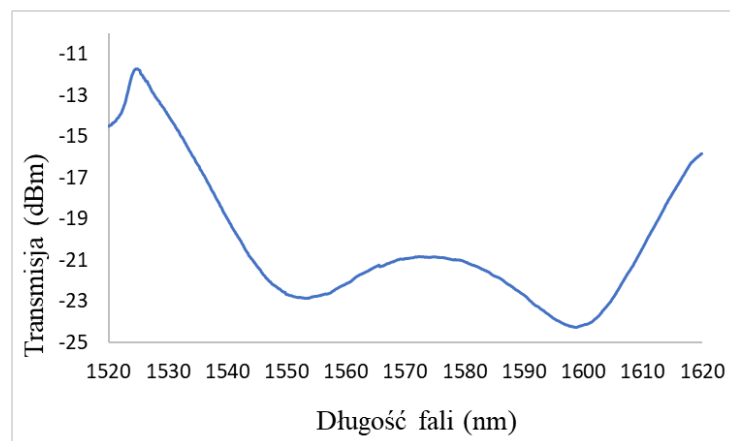


**Rysunek 3.** Przykładowe krzywe dopasowania fazowego dla sprzężenia modu podstawowego z modami wyższych rzędów  $m=1-10$  - a) oraz  $m=11-20$  - b) [14]. Przerywane linie określają obszar „ultraczyły”. Pomarańczowa linia wskazuje przykładowy okres LPG, dla którego występuje podwójne pasmo tłumienia dla sprzężenia z tym samym modem wyższego rzędu.

Dla modów rzędu  $m=8-20$  krzywe dopasowania fazowego zmieniają swój znak z dodatniego na ujemny w pewnym charakterystycznym punkcie, zwanym punktem zwrotnym (TAP, ang. Turn Around Point) [47]. Na Rysunku 3 punkty te zostały zaznaczone czarnymi kółkami. Punkty te charakteryzują się „ultraczyłością”, ponieważ zmiana długości fali odpowiadająca zmianie okresu siatki jest nieograniczona. Okres siatki może ulec zmianie, gdy zmianie ulegają efektywne współczynniki załamania, które są ściśle zależne od współczynnika załamania otoczenia. Dlatego, nawet nieznaczna zmiana warunków brzegowych, będzie miała znaczący wpływ na położenie pasma absorpcyjnego, czyli na długość fali rezonansowej. Każdemu okresowi siatki odpowiadają dwie wartości długości fali rezonansowej dla każdego modu płaszczowego. Zjawisko to spowodowane jest dyspersyjnym charakterem efektywnych współczynników załamania rdzenia i płaszcza światłowodu z wpisaną siatką długookresową.

Jeżeli okres siatki  $\Lambda$  jest mały, poniżej  $\Lambda = 250 \mu\text{m}$  (Rysunek 3b), krzywe dopasowania fazowego przyjmują kształt paraboli dla długości fali z zakresu w jakim zazwyczaj pracują czujniki oparte na LPG, tj. 800-2000 nm. Stąd istnieje możliwość zaprojektowania i wytworzenia LPG z takimi parametrami, które umożliwiają wystąpienie dwóch pasm absorpcyjnych dla dedykowanych długości fali rezonansowej (Rysunek 4), wynikających ze sprzężenia z jednym modem wyższego rzędu. W kontekście zastosowań LPG jako platformy przetwornikowej, najbardziej pożądanym jest, aby obydwa pasma absorpcyjne pojawiły się w bardzo bliskim obszarze dyspersyjnego punktu zwrotnego (na

Rysunku 3 zaznaczony przerywanymi liniami), ponieważ obszar ten jest bardzo czuły na dowolną zewnętrzną zmianę parametrów fizykochemicznych siatki. Innymi słowy, nawet nieznaczna zmiana warunków brzegowych, będzie miała znaczący wpływ na położenie tych pasm. Jednakże pojawienie się dwóch pasm absorpcyjnych jest możliwe tylko w momencie, gdy sprzężenie modu podstawowego następuje z modami płaszczowymi powyżej modu  $LP_{0,11}$  [48]. Pojedyncze pasmo absorpcyjne po zanurzeniu w medium o współczynniku załamania innym niż 1 ulega podziałowi na dwa niezależne, zaś jakakolwiek zmiana zewnętrznego współczynnika załamania powoduje przesunięcie długości fali rezonansowej. S. Kher i inni [49] przedstawili technologię LPG, której parametry ( $\Lambda = 205 \mu\text{m}$ ) dostosowane są do sprzężenia modu  $LP_{0,1}$  z modem  $LP_{0,11}$ . Z kolei okres siatki wynoszący  $\Lambda = 165 \mu\text{m}$  umożliwia sprzężenie modu podstawowego z modem  $LP_{0,12}$  [50]. Uzyskanie sprzężenia z modem jeszcze wyższego rzędu jest możliwe poprzez zmniejszenie długości okresu siatki. Niestety pojawia się bariera technologiczna, znacząco utrudniająca technologię siatek o ekstremalnie niskich okresach. Jednakże wykazano, iż zmniejszenie średnicy włókna światłowodowego z wpisana LPG umożliwia sprzężenie z modami rzędu nawet  $LP_{0,15}$ , co znacząco podnosi czułość LPG [38]. Szczegółowe warunki technologiczne LPG zostaną omówione rozdziale 2.3.



**Rysunek 4.** Przykładowa charakterystyka widmowa długookresowej siatki światłowodowej z podwójnym pasmem absorpcyjnym.

### 2.3 Technologia wytwarzania długookresowych siatek światłowodowych

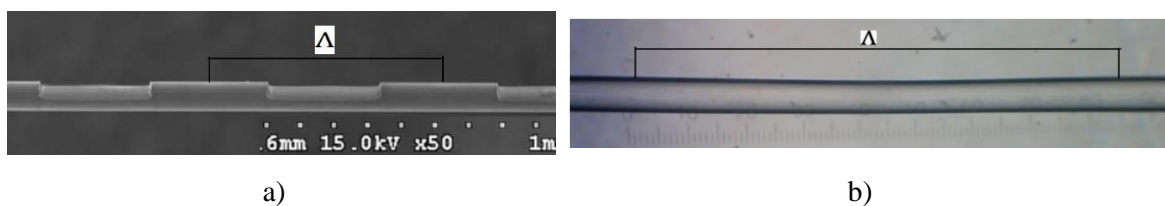
Lokalna modulacja rdzenia światłowodu, wprowadzona w celu wytworzenia LPG, może odbywać się poprzez:

- 1) optyczną modulację: zmiana współczynnika załamania materiału rdzenia włókna światłowodowego wywołana wprowadzeniem okresowych naprężeń, lub/i
- 2) geometryczną modulację: okresowe zmniejszenie średnicy włókna światłowodowego.

Pierwsza technika wymaga, dla uwrażliwienia materiału na wykorzystywaną długość fali światła, zastosowania procesu uwodornienia włókna będącego podstawą LPG [51]. Wymagania te nie są konieczne w przypadku technologii wytwarzania LPG poprzez okresowe przewężenie włókna, gdzie przewężenie może odbywać się poprzez miejscowe rozgrzanie materiału włókna do temperatury mięknięcia, a następnie rozciągnięcie włókna do określonej średnicy przewężenia. Okresowe przewężenie włókna może odbywać się również poprzez miejscowe trawienie płaszcza do określonej średnicy włókna [52]. Wytwarzanie LPG za pomocą okresowego mikro-przewężania włókna jest najtańszą metodą, wymagającą stanowiska do wytwarzania przewężeń bazującego na: wyładowaniu łuku elektrycznego [53] lub ogrzewaniu materiału włókna umieszczonego w spawarce żarnikowej (żarnik wolframowy o kształcie „ $\Omega$ ”) [54].

### 2.3.1 Geometryczna modulacja jako metoda wytwarzania LPG

Wytworzenie LPG przez zmniejszenie średnicy włókna światłowodowego może odbywać się przez częściowe wytrawienia kwasem fluorowodorowym [55], albo przez punktowe mikro-przewężenie światłowodu. Główna różnica polega na poprodukcyjnej geometrii miejsc o zredukowanej średnicy przekroju poprzecznego: miejscowe wytrawienie zmniejsza średnicę tylko płaszcza włókna (Rysunek 5a), natomiast w przypadku mikro-przewężeń, zmniejszeniu ulega zarówno średnica rdzenia, jak i płaszcza światłowodu (Rysunek 5b).

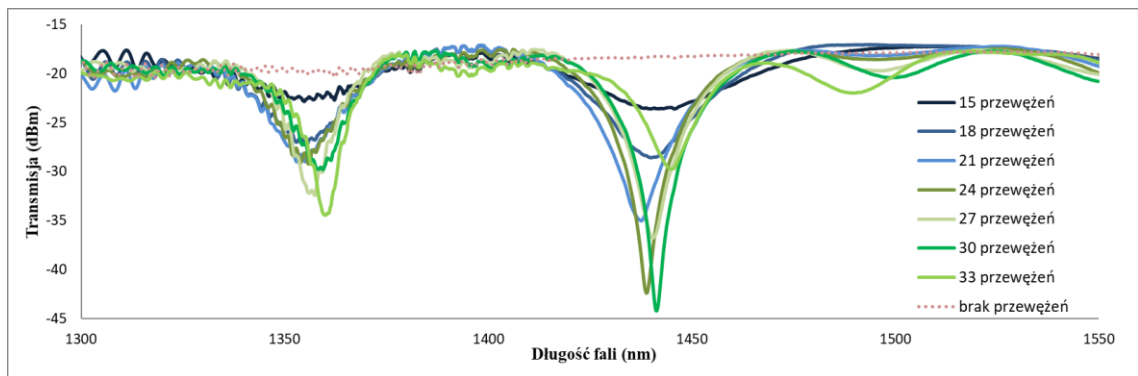
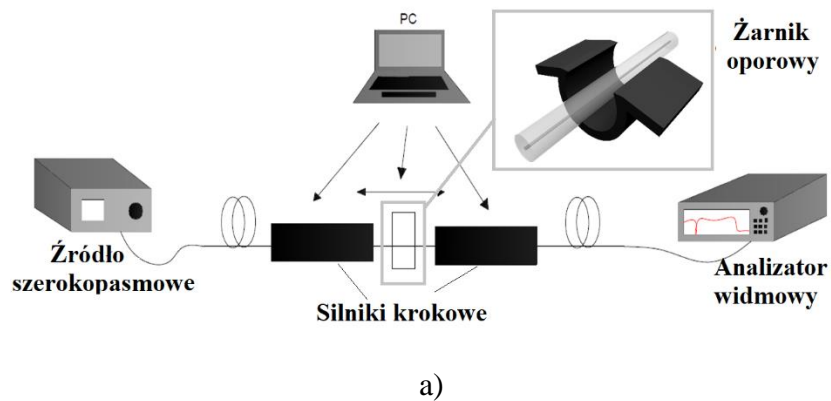


**Rysunek 5.** Zdjęcia mikroskopowe LPG wytworzonej poprzez: okresowe trawienie płaszcza włókna - a) [56], okresowe przewężanie włókna - b).

Innym podziałem technik wytwarzania LPG jest sposób ich zapisywania: metoda interferometryczna [57], metoda punkt po punkcie [58] oraz metoda maski fazowej [59]. Do wytwarzania LPG opartych na mikro-przewężeniu [60] lub częściowym trawieniu płaszcza stosuje się technikę punkt po punkcie, gdzie struktura światłowodu modelowana jest w kolejnych punktach przesuniętego i pozycjonowanego włókna światłowodowego. Należy zaznaczyć, iż redukcja średnicy włókna powinna być nieznaczna, tj. nie większa niż 15% średnicy całego włókna [54]. Przy większej redukcji średnicy płaszcza, propagująca się

wiązka świetna we włóknie ulega „wyciekaniu” na zewnątrz struktury, przez co nie następuje sprzężenie z modami propagującymi się wewnątrz płaszczka włókna.

Warto zauważyć, iż technika wytwarzania LPG poprzez okresową zmianę geometrii światłowodu nie wymaga specjalnego przygotowywania włókna przed procesem modulacji struktury. Tym samym, technika ta zapewnia niski koszt technologiczny przy zastosowaniu dowolnego rodzaju włókna. Na Rysunku 6a przedstawiono schemat układu do wytwarzania długookresowych siatek światłowodowych przy użyciu platformy do modyfikacji geometrii włókna szklanego GPX-3400 firmy Vytran. Włókno, unieruchomione w stolikach z „V- rowkami” przymocowanych do silników krokowych, zostało umieszczone w żarniku oporowym wykonanym z wolframu w kształcie „ $\Omega$ ” i średnicy wewnętrznej 1000  $\mu\text{m}$ . Kształt żarnika zapewnia równomierne ogrzewanie włókna podczas jego wyciągania na określoną odległość. Newralgicznym punktem podczas wykonywania LPG tą metodą, jest prawidłowe pozycjonowanie włókna, w celu zachowania równomiernej odległości pomiędzy kolejnymi przewężeniami, gdzie odległość ta może być utożsamiona z okresem siatki  $\Lambda$ . Wpisanie siatek omawianą metodą w standardowe włókna telekomunikacyjne zostały już dobrze przebadane oraz opisane [61], [62]. Istnieje natomiast szereg włókien, które nie zostały jeszcze przebadane. Rysunek 6b przedstawia widma transmisyjne w zależności od liczby okresowo wykonanych przewężeń. Zaprezentowane badania przeprowadzono na LPG wykonanej na standardowym włóknie 1550-HP-80 o średnicy płaszczka 80  $\mu\text{m}$  oraz średnicy rdzenia 9  $\mu\text{m}$ . Średnica włókna przewężana wynosiła 70  $\mu\text{m}$ , natomiast geometria przewężenia to 0,2 x 0,3 x 0,2 mm, gdzie 0,2 to obszar przejściowy, a 3 to obszar właściwy przewężenia. Istotnym etapem podczas dobierania odpowiednich parametrów technologicznych jest optymalizacja takich parametrów jak: prędkość wyciągania – 0,7 mm/s, moc żarnika oporowego – 95 W, czas nagrzewania materiału włókna – 0,1 s, ilość gazu (argonu) w jednostce czasu jaka zostaje użyta podczas zmiany geometrii włókna - 0,35 l/min. Okres LPG został ustalony na  $\Lambda = 400 \pm 5 \mu\text{m}$ . Dobrane parametry różnią się w zależności od zastosowanego włókna, a powyższe dotyczą tylko włókna 1550- HP-80.



**Rysunek 6.** Schemat układu do wytwarzania LPG punkt po punkcie metodą przewężeń wykonanych za pomocą żarnika oporowego - a). oraz widma transmisyjne dla różnych ilości przewężeń wykonanych na włóknie 1550-HP-80 – b) [54].

Głębokość pasma absorpcyjnego dla LPG o powyższych parametrach wynosi  $-24,5$  dBm dla długości fali  $1438,8$  nm. Optymalna ilość dla zadanych parametrów została oszacowana na 24 przewężeń. Ilość przewężeń wpływa na głębokość pasma absorpcyjnego i ściśle zależy od rodzaju włókna, na którym wpisywana jest LPG.

Należy zauważyć, iż metoda punkt po punkcie ze zmianą geometrii włókna ogranicza możliwość konstrukcyjne LPG o parametrach  $\Lambda < 250$   $\mu\text{m}$ . Oznacza to, iż metoda ta nie pozwala na wytworzenie LPG z podwójnym pasmem absorpcyjnym, zapewniająca sprzężenie modu podstawowego z modem wyższym niż  $LP_{0,11}$ . Konstrukcja LPG, zapewniająca pojawienie się dwóch pasm absorpcyjnych dla sprzężenia z jednym modem wyższego rzędu, jest możliwa przy użyciu technologii maski fazowej.

### 2.3.2 Optyczna modulacja jako metoda wytwarzania LPG

Optyczna modulacja struktury włókna światłowodowego sprowadza się do zmiany współczynnika załamania rdzenia włókna na wskutek naprężeń wywołanych: implementacją jonową [63], napromieniowaniem impulsami femtosekundowymi w podczerwieni [64], napromieniowaniem laserem  $\text{CO}_2$  [65], wyładowaniem elektrycznym [66], dyfuzją

domieszek do rdzenia [67], naświetlaniem światłem UV [68], [69]. Ta ostatnia zasługuje na szczególną uwagę, ponieważ jest obecnie najpowszechniejszą metodą wytwarzania LPG na standardowych włóknach domieszkowanych germanem. Należy zaznaczyć, iż modulacja optyczna jest możliwa tylko na włóknach wykazującą wysoką czułość na światło i dla większości włókien proces wpisywania LPG jest poprzedzony uwodornianiem włókna, o czym wspomniano we wstępie tego rozdziału. Proces ciśnieniowego uwodorniania włókna pozwala na zwiększenie wielkości zmian współczynnika załamania rdzenia o rząd wielkości z około  $5 \cdot 10^{-5}$  do  $10^{-4}$ . Dyfuzja wodoru do rdzenia światłowodu, a co za tym idzie oddziaływanie atomów germanu z atomami wodoru, skutkuje zwiększeniem absorpcji w rejonie widmowym 240 nm. Proces dyfuzji trwa 15 dni w warunkach temperatury pokojowej przy ciśnieniu 150 bar. Wydłużenie czasu dyfuzji przy jednoczesnym obniżeniu ciśnienia wpływa pozytywnie na tłumienność światłowodu, natomiast dla zastosowań czujnikowych nie zarejestrowano negatywnego wpływu wydłużenia czasu uwodorniania na otrzymane wyniki. Ponadto nienaświetlone miejsca włókna uwodornionego, ulegają samoistnemu uwolnieniu wodoru [70].

Mechanizmy zachodzące podczas naświetlania włókna, prowadzące do zmian współczynnika załamania rdzenia, wciąż nie są całkowicie zrozumiałe i opisane. Można jednak stwierdzić, iż podczas zapisywania siatki LPG, we włóknie zachodzi jednocześnie wiele procesów [71]. Wspólnym mianownikiem przyjętych teorii jest zauważenie wpływu stężenia defektów tlenku germanu GeO na zmianę współczynnika załamania rdzenia. Defekty te nazywane są centrami barwnymi, a ich zakres absorpcyjny mieści się w granicach 180 nm – 350 nm [72]. Przyjmując strukturę idealnie krystalicznego szkła kwarcowego SiO<sub>2</sub>, gdzie atomy Si tworzą strukturę czworościanu powiązaną mostkami tlenowymi, powstanie centrów barwnych jest spowodowane: 1) konsekwencją produkcji włókien z krzemionkowej preformy, 2) miejscowym brakiem atomów tlenu w strukturze krzemionki podczas domieszkowania rdzenia germanem. Uważa się, iż za światłoczułość materiału odpowiadają wiązania Si-Ge oraz Ge-Ge. Zatem po naświetleniu włókna światłowodowego promieniowaniem przypadającym na częstotliwość rezonansową tych wiązań, ulegną one rozpadowi, a co za tym idzie, lokalnej zmianie ulegnie wartość współczynnika załamania (prawo Kramersa–Kroninga) [73].

W przypadku wytwarzania LPG metodą fotoindukcji z wykorzystaniem lasera UV, podział siatek dokonywany jest w zależności od ich odporności na temperaturę, co zostało sumarycznie przedstawione w poniższej Tabeli 2.



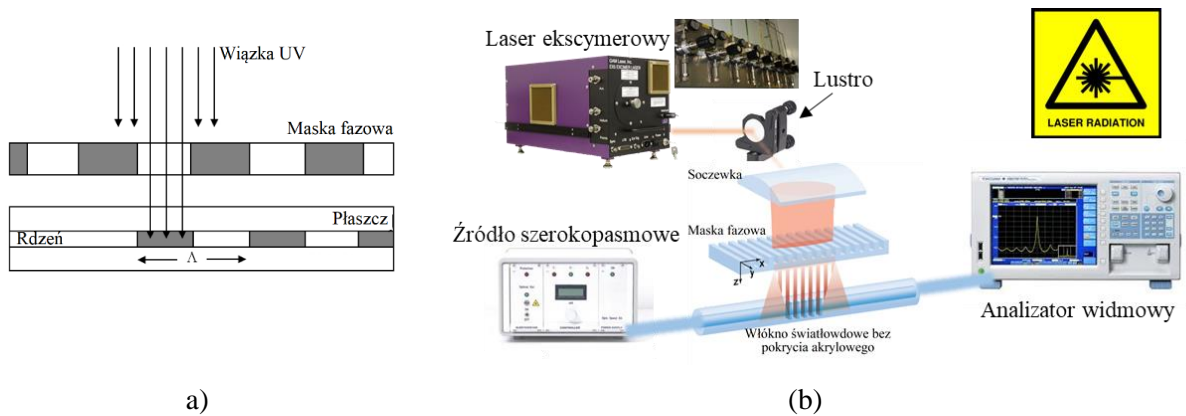
**Tabela 2.** Podział LPG wytwarzanych metodą fotoindukcji laserem UV [74], [75].

Typ LPG Własność	Typ I	Typ In	Typ II
Próg temperaturowy, powyżej którego mechanizm sprzężania modów zanika.	320 °C	500 – 800 °C	1000 – 1200 °C dla włókien standardowych, nawet do 1700 °C dla włókien szafirowych
Rodzaj lasera	Np. laser argonowy	Laser ekscymerowy	Laser femtosekundowy
Zjawisko zachodzące podczas fotoindukcji	Wprowadzenie naprężeń poprzez naświetlanie.	Stopniowe zmniejszanie się naprężenia struktury szkła.	Ablacja szkła w rejonie rdzenia włókna.

LPG poddane badaniom w ramach niniejszej rozprawy zostały zaprojektowane oraz wytworzone w Photonics Research Center, Université du Québec en Outaouais (PRC-UQO) w Kanadzie. Do konstrukcji „ultraczułych” przetworników fizykochemicznych wykorzystano DRLPG wytworzone metodą naświetlania wiązką UV przy użyciu maski fazowej, ze względu na wysoką powtarzalność i precyzję technologii. Szczegółowa procedura wytwarzania LPG nie zostanie opisana w tej pracy, w ramach utrzymania „know-how” instytutu badawczego, stąd poniżej podano jedynie najistotniejsze parametry technologii dyktujące parametry wytworzonych siatek.

Wykorzystywane struktury długookresowe, zostały zapisane na standardowym włóknie światłowodowym SMF-28 firmy Corning, którego rdzeń domieszkowany jest germanem. Procedurę wpisania LPG poprzedził proces uwodornienia materiału opisany na początku tego rozdziału. Następnie, wiązka wysokiej mocy lasera ekscymerowego KrF (Pulse Master®-840, GSI Lumonics, Rugby, UK), emitującego promieniowanie na długości fali 248 nm ze stałą energią impulsu laserowego równą 340 nJ, częstotliwością impulsu 100 Hz oraz czasem trwania impulsu 12 ns, pada na maskę fazową reprezentującą element dyfrakcyjny. Czas trwania naświetlania to około 7 minut. Parametry maski fazowej zostały dobrane w taki sposób, aby w rzędach  $\pm 1$  energia lasera była transmitowana powyżej 35%, natomiast w rzędach 0 poniżej 2%, co zapewniało wytworzenie LPG o wysokiej jakości. Wiązka świetlna po przejściu przez układ szczelin przecina się w rzędach  $\pm 1$ , a następnie tworzy wzór interferencyjny odwzorowany w fotoczułym rdzeniu włókna na odcinku 5 cm. Tak powstała modulacja współczynnika rdzenia włókna światłowodu charakteryzuje się okresem równym połowie okresowi maski fazowej [38]. Uproszczony schemat wpisywania jednorodnej LPG ze stałym okresem we włókno światłowodowe przedstawia Rysunek 7a.





**Rysunek 7.** Uproszczony schemat wytwarzania DRLPG przy użyciu maski fazowej i promieniowania UV - a) oraz laboratoryjne stanowisko PRC-UQO do wytwarzania LPG z podwójnym pikiem rezonansowym - b).

Proces wpisywania struktury okresowej we włókno światłowodowe odbywa się pod stałą obserwacją w czasie rzeczywistym, gdzie przez włókno transmitowana jest wiązka świetlna ze źródła szerokopasmowego (1100 – 1700 nm), natomiast sygnał po przejściu przez siatkę całkowany jest przez detektor optyczny i rejestrowany przez analizator optyczny (OSA, ang. Optical Spectrum Analyzer) z rozdzielczością 0,01 nm (Rysunek 7b). Po zakończonym procesie naświetlania włókno, na którym została wpisana LPG wygrzewane jest w temperaturze 150 °C przez około 4 godziny. Odprężanie włókna stabilizuje właściwości optyczne krzemionki domieszkowanej germanem, natomiast zjawiska jakie zachodzą podczas procesu wygrzewania to: 1) pozbawienie struktury niewykorzystanych w procesie naświetlania cząsteczek  $H_2$ , które podniosłyby średni współczynnik załamania materiału włókna i spowodowałyby tymczasowe przesunięcie pasma absorpcyjnego w stronę fal dłuższych i/lub 2) odprężenie zmodulowanych promieniowaniem UV miejsc w rdzeniu światłowodu, które mogłyby być niestabilne termicznie w warunkach pracy przetwornika, do którego zostały wytworzone [76].

LPG wytworzone w warunkach i parametrach opisanych powyżej zapewniają pojedyncze pasmo absorpcyjne, wynikające ze sprzężenia modu podstawowego z modem płaszczowym rzędu  $LP_{0,9}$  [77]. W celu zwiększenia czułości wytworzonych struktur, tym samym zapewnienia podwójnego pasma absorpcyjnego na charakterystyce widmowej wytworzonej struktury, średnica włókna na pięciocentymetrowym zmodyfikowanym odcinku została dodatkowo zredukowana do uzyskania warunków brzegowych powodujących sprzężenie modu  $LP_{0,1}$  z modem co najmniej  $LP_{0,15}$ . Redukcja średnicy płaszcza odbyła się poprzez wytrawienie części krzemionki LPG umieszczonej w kwasie fluorowodorowym o stężeniu 10% (10% HF), w warunkach ciągłego monitorowania, tj.

obserwacji charakterystyki widmowej na analizatorze optycznym do czasu, aż powstanie podwójne pasmo absorpcyjne. Tempo trawienia krzemionkowego płaszcza LPG przyjmuje się na  $\sim 0.21 \mu\text{m}/\text{min}$  [78]. Powstałe struktury DRLPG stanowiły głowicę układu eksperymentalnego do przetwarzania wybranych wielkości fizykochemicznych. Wszystkie DRLPG rozważane w ramach niniejszej pracy charakteryzowały się okresem  $\Lambda = 217 \mu\text{m}$ , zaś ich podstawowe parametry zestawiono w Tabeli 3.

**Tabela 3.** Parametry charakteryzujące DRLPG użyte w ramach pracy.

Lp.	$\lambda_{\text{LPG},1}$ (nm)	$\lambda_{\text{LPG},2}$ (nm)	Długość fali punktu zwrotnego (nm)	Głębokość pasma absorpcyjnego (dBm)
1	1547	1595	1568	-21
2	1554	1603	1576	-17
3	1549	1596	1572	-17
4	1548	1598	1574	-23
5	1547	1598	1580	-24
6	1552	1601	1579	-17
7	1553	1599	1576	-19
8	1552	1598	1571	-24

## 2.4 Czulość długookresowych siatek światłowodowych

Zasadniczo, periodyczne struktury są czułe na zmiany zewnętrznych parametrów fizycznych, a przede wszystkim na zmianę: naprężenia  $\Delta\varepsilon$ , temperatury  $\Delta T$  oraz RI otoczenia siatki  $\Delta n_{zew}$ . Wyróżnikiem LPG na tle struktur periodycznych jest względnie wysoka czulość na zewnętrzną zmianę RI, z powodu interakcji modu podstawowego z modami propagującymi się w płaszczu włókna, na które środowisko zewnętrzne ma bezpośredni wpływ. Tym samym ze względu na fakt, iż zmiana RI może być spowodowana przyłączeniem czynnika chemicznego bądź biologicznego do powierzchni DRLPG struktury te stają się platformami do detekcji związków chemicznych i czynników biologicznych, co w dalszej części pracy pozwala na użycie terminu oddziaływania fizykochemicznego. Wszystkie czynniki fizykochemiczne działające na strukturę periodyczną, powodują albo zmianę wartości okresu siatki, albo zmianę warunków brzegowych mających wpływ na efektywny RI. Zmiana okresu siatki (zazwyczaj ulega wydłużeniu) spowodowana jest naprężeniami wywołanymi mechanicznie bądź temperaturowo co jest determinowane odpowiednio efektem fotosprężystym i termo-optycznym. W kategorii wpływu naprężeń na czulość LPG można również rozpatrywać zginanie, gdzie odpowiedź przetwornika jest

spowodowana zaburzeniem cylindrycznej symetrii struktury. W przypadku przetworników chemicznych, zmiana warunków brzegowych odbywa się również poprzez zmianę grubości medium otaczającego siatkę. Szczególnie ma to miejsce w przypadku, gdy do sfunkcjonalizowanej powierzchni siatki dołączają się cząsteczki, materiał biologiczny tudzież inny element zmieniający grubość i RI danego medium [79].

Biorąc pod uwagę dyspersję falową (równanie 2.6), spowodowaną zanikającym polem modu w płaszczu światłowodu z wpisaną strukturą okresową, istotnym elementem jest zdefiniowanie ogólnego współczynnika czułości, który wyrażony jest jako [80]:

$$\gamma = \frac{\frac{d\lambda_{LPG}}{d\Delta}}{n_{rdz}^{eff} - n_{pl(m)}^{eff}}, \quad (2.6)$$

gdzie:  $n_{rdz}^{eff}$  i  $n_{pl(m)}^{eff}$  są wartościami silnie zależnymi od zmian  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta T$  oraz  $\Delta n_{zew}$ .

Projektując czujniki fizykochemiczne oparte na LPG, niezwykle ważne jest przeanalizowanie braku selektywności na wybrany parametr. W ujęciu ogólnym, wpływ wyżej wymienionych parametrów na strukturę siatki skutkuje zmianą widma transmisyjnego, a w szczególności przesunięcia położenia pasm absorpcyjnych, gdzie kierunek przesunięcia uwarunkowany jest dominacją jednej z pośród trzech poniższych składowych [81]:

$$\Delta\lambda_{LPG} = \left(\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{\Delta T}\right)\Delta T + \left(\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{d\varepsilon}\right)d\varepsilon + \left(\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{dn_{zew}}\right)\Delta n_{zew}, \quad (2.7)$$

gdzie:  $\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{\Delta T}$ ,  $\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{d\varepsilon}$ ,  $\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{dn_{zew}}$  oznacza zmianę długości fali rezonansowej pasma absorpcyjnego przy zmianie odpowiednio: temperatury, naprężenia oraz RI otoczenia siatki.

Przesunięcia mogą być tzw. niebieskie (przesunięcie w kierunku krótszych długości fal) lub tzw. czerwone (przesunięcie w kierunku fal dłuższych). Dla siatek zaprojektowanych w taki sposób, aby pracowały blisko punktu zmiany znaku dyspersji, czyli DRLPG, pasma tłumienia odpowiadające sprzężeniu modu  $LP_{0,1}$  z jednym modem wyższego rzędu przesuwają się w przeciwnych kierunkach, tj. albo ku sobie, albo od siebie, w zależności od dominującej wielkości fizycznej. Należy zaznaczyć, iż wartości liczbowe dotyczące przesunięć są silnie zależne od wartości dyspersyjnych włókna światłowodowego, a co za tym idzie od jego rodzaju. W niniejszej pracy zajmowano się jedynie jednomodowym włóknem telekomunikacyjnym SMF-28.

### 2.4.1 Czulość temperaturowa długookresowej siatki światłowodowej

Czulość LPG na zmiany temperatury można rozważać dwojako. Z jednej strony czujniki temperaturowe oparte na strukturach światłowodowych są obiecujące ze względu na czulość rzędu nawet  $10^{-4}$  °C, z drugiej zaś wrażliwość na temperaturę wpływa na pomiary innych wielkości fizycznych czujnika opartego na LPG, np. na zmianę RI. Z punktu widzenia technologicznego, nie ma możliwości zaprojektowania takiej struktury, która całkowicie niweluje wpływ temperatury na przetwarzany sygnał. Jednym z obiecujących rozwiązań danego zagadnienia, jest łączenie kilku struktur optycznych, pozwalających na rozróżnienie przetwarzanego sygnału za pomocą np. algorytmów matematycznych.

Człon pierwszy równania (2.7), opisujący czulość temperaturową LPG wyrażany jest następująco:

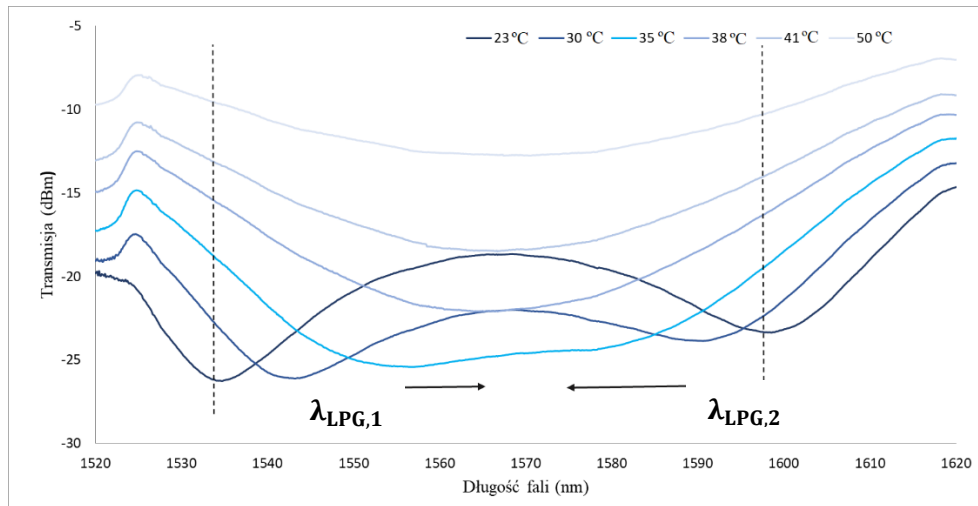
$$\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{dT} = \gamma\lambda_{LPG} \left( \alpha_{\Lambda} + \frac{\xi_{rdz} n_{rdz}^{eff} - \xi_{pl} n_{pl(m)}^{eff}}{n_{rdz}^{eff} - n_{pl(m)}^{eff}} \right), \quad (2.8)$$

gdzie:  $\alpha_{\Lambda}$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej materiału danego włókna światłowodowego na którym wpisano LPG,  $\xi_{rdz}$  i  $\xi_{pl}$  to współczynniki termo-optyczne odpowiednio: materiału rdzenia oraz płaszczka włókna światłowodowego z wpisaną LPG.

Zasadniczo, dla włókien wykonanych ze szkła krzemionkowego (w tym SMF-28) współczynnik rozszerzalności cieplnej jest dużo niższy ( $\sim 0,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ ) niż efekt termo-optyczny, reprezentowany jako drugi sumy człon w równaniu (2.8). Nie oznacza to jednak, iż parametr ten można pominąć w dalszych rozważaniach, zwłaszcza przy precyzyjnych pomiarach wielkości fizykochemicznych. Dla standardowych włókien światłowodowych, drugi człon w równaniu (2.8) zazwyczaj jest większy od zera, natomiast dla włókien domieszkowanych B/Ge wartość ta jest ujemna. Domieszkowanie rdzenia włókna borem (w celu podwyższenia współczynnika załamania) powoduje znaczne obniżenie wartości współczynnika termo-optycznego [82], [83]. Należy się zatem spodziewać, iż odpowiedź czujników na zmianę temperatury będzie różna, w zależności od rodzaju włókna, na którym wpisana została LPG.

Na Rysunku 8 przedstawiono charakterystyki widmowe LPG o okresie  $\Lambda = 217 \mu m$  w zależności od zmian temperatury. Szczegółowe parametry technologiczne badanej LPG zostały opisane w rozdziale 2.3, poświęconym technikom wytwarzania LPG. Z uwagi na

temat niniejszej rozprawy, badaniom temperaturowym została poddana LPG z podwójnym pasmem absorpcyjnym (DRLPG). Wzrost temperatury otoczenia siatki powoduje przesunięcie dwóch pasm absorpcyjnych (odpowiadającym sprzężeniu z jednym modem płaszczowym) ku sobie (na Rysunku 8 kierunek zaznaczony czarnymi strzałkami), aż do pewnej temperatury krytycznej, w której następuje złączenie w jedno szerokie pasmo absorpcyjne. Wartość temperatury krytycznej zależy od parametrów technologicznych samej LPG.



**Rysunek 8.** Wpływ zmiany temperatury na DRLPG. Przerywane linie pionowe oznaczają położenie długości fali rezonansowej w temperaturze pokojowej 23 °C. Strzałkami zaznaczono kierunek przesuwania się pasm absorpcyjnych wraz ze wzrostem temperatury.

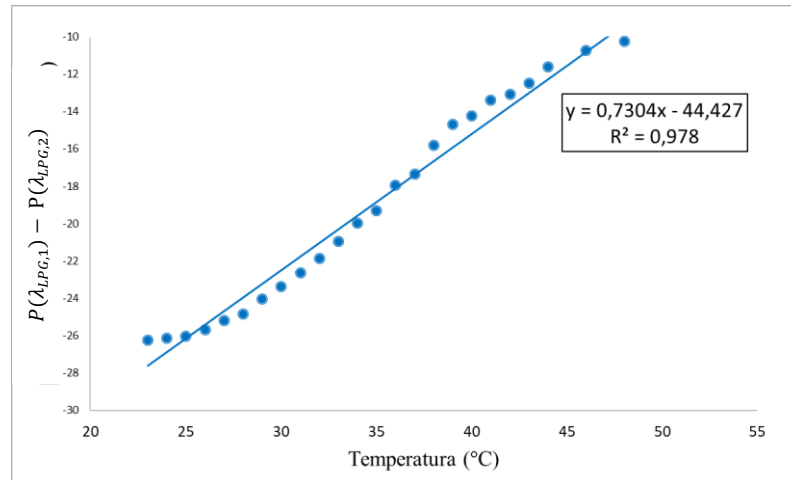
Dla większości aplikacyjnych dziedzin, czułość  $S$  standardowych LPG z pojedynczym pasmem absorpcji wyraża się jako uśrednione przesunięcie pasma absorpcyjnego na jednostkowy parametr zmiany. W przypadku DRLPG czułość wyznacza się poprzez różnicę mocy optycznej w zmianie transmisji podczas przesunięcia pasm absorpcji  $\lambda_{LPG,1}$  i  $\lambda_{LPG,2}$  przypadającą na jednostkową zmianę temperatury. Stąd wyrażenie to przyjmuje postać:

$$S_T = \frac{P(\lambda_{LPG,1}) - P(\lambda_{LPG,2})}{\Delta T}, \quad (2.9)$$

gdzie:  $S_T$  - czułość temperaturowa,  $P(\lambda_{LPG,1})$  i  $P(\lambda_{LPG,2})$  - wartość mocy optycznej w zależności od położenia  $\lambda_{LPG,1}$  i  $\lambda_{LPG,2}$ .

Czułość  $S_T$  wyznacza się również eksperymentalnie za pomocą interpolacji liniowej punktów pomiarowych  $P(\lambda_{LPG,1})$  i  $P(\lambda_{LPG,2})$ . Wykres z Rysunku 9 przedstawia interpolację

liniową danych z Rysunku 8, gdzie wyznaczona czułość termiczna wynosi  $S_T = 0,7304 \text{ dB/}^\circ\text{C}$  wraz ze współczynnikiem korelacji  $R^2 = 0,978$ .



**Rysunek 9.** Czułość temperaturowa  $S_T$  DRLPG o parametrach dla siatki nr 1 z Tabeli 3. Czułość została wyznaczona metodą interpolacji liniowej.

#### 2.4.2 Czułość długookresowej siatki światłowodowej na naprężenia

Czujniki bazujące na strukturach okresowych na nowo zdefiniowały „materiały inteligentne” [84], gdzie platforma detekcyjna oparta na włóknie światłowodowym jest ściśle zintegrowana z systemem stanowiącym bezpośredni kontakt z elementem generującym naprężenia. Umożliwia to monitorowanie zmian w czasie rzeczywistym, takich parametrów jak: obciążenia, naprężenia lub wibracje, z których może wynikać stan eksploatacji konstrukcji lub nawet stan ludzkiego zdrowia.

Rozważmy odkształcenie osiowe  $\Delta\varepsilon$  wynikające z podłużnych zaburzeń nałożonych na czuły obszar zmodyfikowanego włókna światłowodowego. Tutaj  $\Delta\varepsilon$  jest wielkością bezwymiarową, ponieważ jest to stosunek zmiany długości włókna do jego pierwotnej długości oraz przyjmuje się, iż odkształcenie osiowe jest równe zaburzeniom nałożonym na obszar DRLPG [85]. W przypadku LPG reakcja na odkształcenia powstaje w wyniku fizycznego wydłużenia włókna spowodowanego efektem Poissona, czego konsekwencją jest zmiana okresu siatki oraz różnica w efektywnych współczynnikach załamania rdzenia i płaszczka. Zmianie ulega również warunek dopasowania fazowego skutkując zmianą położenia pasm absorpcyjnych, natomiast czułość na odkształcenie osiowe wyrażane jest wzorem [14]:

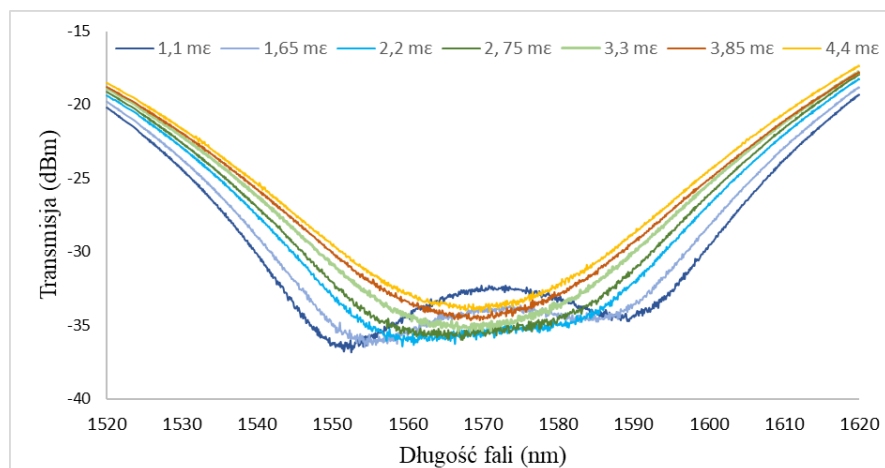
$$\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{d\varepsilon} = \gamma\lambda_{LPG} \left( \alpha_{\Lambda} + \frac{\eta_{rdz} n_{rdz}^{eff} - \eta_{pi} n_{pi,(m)}^{eff}}{n_{rdz}^{eff} - n_{pi,(m)}^{eff}} \right), \quad (2.10)$$

gdzie:  $\eta_{rdz}$  i  $\eta_{pi}$  to odpowiednio współczynniki fotosprężyste materiału rdzenia oraz płaszczka włókna światłowodowego w które została wpisana DRLPG.

Zasadniczo, z równania (2.10) wynika, iż na czułość naprężeniową LPG mają wpływ takie parametry jak: współczynniki fotosprężyste materiału rdzenia i płaszczka włókna, właściwości falowodowe (dyspersja)  $\gamma$ , pośrednio okres LPG, a co za tym idzie numer modu płaszczowego sprzężonego z modem podstawowym. Gdy okres siatki mieści się w granicach od 400  $\mu\text{m}$  do 600  $\mu\text{m}$  czułość na odkształcenia osiowe jest dodatnia i relatywnie niezależna od dokładnej wartości okresu LPG, przy czym zjawisko to jest prawdziwe dla  $\eta_{pi} > 0,22$  (dla włókna SMF-28 firmy Corning). Czułość naprężeniowa zmienia znak na ujemny i ulega zmniejszeniu proporcjonalnie do zmniejszenia okresu siatki [86].

Możliwość zdefiniowania poziomu czułości światłowodowych struktur periodycznych ze względu na ich okresowość, gdzie LPG z  $\Lambda < 100 \mu\text{m}$  są odporne na odkształcenia wzdłużne zaś LPG z  $\Lambda > 100 \mu\text{m}$  są niewrażliwe na zmianę temperatury, umożliwia wygodną metodę izolacji odpowiedzi LPG na jeden lub drugi przetwarzany parametr fizyczny. Możliwość odseparowania tych dwóch sygnałów daje również odpowiednia konstrukcja platformy do jednoczesnego pomiaru dwóch lub większej ilości parametrów fizykochemicznych [87], [88], [89].

W przypadku DRLPG, dla których czułość jest znacznie wyższa w odniesieniu do standardowych LPG, zakres pomiarowy odkształcenia osiowego jest relatywnie mały [90]. Ogólnie, standardowe LPG mają możliwość detekcji naprężeń przekraczających nawet 10  $m\varepsilon$  [91], podczas gdy DRLPG przetwarzają sygnał o rząd wielkości mniejszy [92]. Dla przykładu, na Rysunku 10 zestawiono charakterystyki widmowe dla DRLPG o okresie  $\Lambda = 217 \mu\text{m}$ , gdzie po przekroczeniu wartości 2,2  $m\varepsilon$ , pasma absorpcyjne odpowiadające sprzężeniu modu podstawowego z jednym modem wyższego rzędu, zaczynają łączyć się w jedno wypłaszczone pasmo [33]. Stąd, po przekroczeniu wartości krytycznej naprężenia, obserwacja przesunięcia długości fali rezonansowych z dużą dokładnością staje się praktycznie niemożliwa.



**Rysunek 10.** Charakterystyki widmowe DRLPG na zadane odkształcenie osiowe.

### 2.4.3 Czulość długookresowej siatki światłowodowej na zmianę współczynnika załamania otoczenia

Odpowiedź układu na zmianę RI jest niewralgicznym aspektem przetworników fizykochemicznych. W przypadku światłowodowych struktur periodycznych monitorowanie zarówno substancji chemicznych, jak i wielu parametrów fizycznych i/lub biologicznych opiera się na obserwacji zmiany RI otoczenia. I tak na przykład, czujniki biologiczne wymagają umiejętności przetwarzania zmian RI w zakresie od  $10^{-4}$  do  $10^{-7}$ , gdzie zmiana RI następuje poprzez zaistniałe wiązanie atomowe lub reakcję fizyczną lub chemiczną. W przypadku LPG, gdzie efektywny RI ściśle zależy od grubości warstwy medium otaczającego zmodyfikowany odcinek włókna, osadzona cienka warstwa biologiczna może powodować widoczne przesunięcie pasma absorpcyjnego [93]. Czulość LPG na zmianę zewnętrznego RI opisuje się następującym wyrażeniem [14]:

$$\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{dn_{zew}} = \gamma\lambda_{LPG} \left( \frac{u_m^2 \lambda_{LPG}^3 n_{zew}}{8\pi r_{pł}^3 n_{pł} (n_{rdz}^{eff} - n_{pł(m)}^{eff}) (n_{pł}^2 - n_{zew}^2)^{2/3}} \right), \quad (2.11)$$

gdzie:  $u_m$  jest  $m$ -tym pierwiastkiem pierwszego rzędu zerowej funkcji Bessela,  $r_{pł}$  oraz  $n_{pł}$  to odpowiednio promień oraz współczynnik załamania płaszczka włókna, w które wpisano LPG. Powyższa zależność dowodzi, iż zwiększenie czulości następuje poprzez zmniejszenie średnicy płaszczka LPG oraz sprzężenie z wyższymi modami płaszczowymi.

Wyrażenie w nawiasie z równania (2.11) będzie prawdziwe tylko w warunkach  $n_{zew} < n_{pł}$ . Wówczas, na granicy załamania dwóch ośrodków (płaszczka i otoczenia



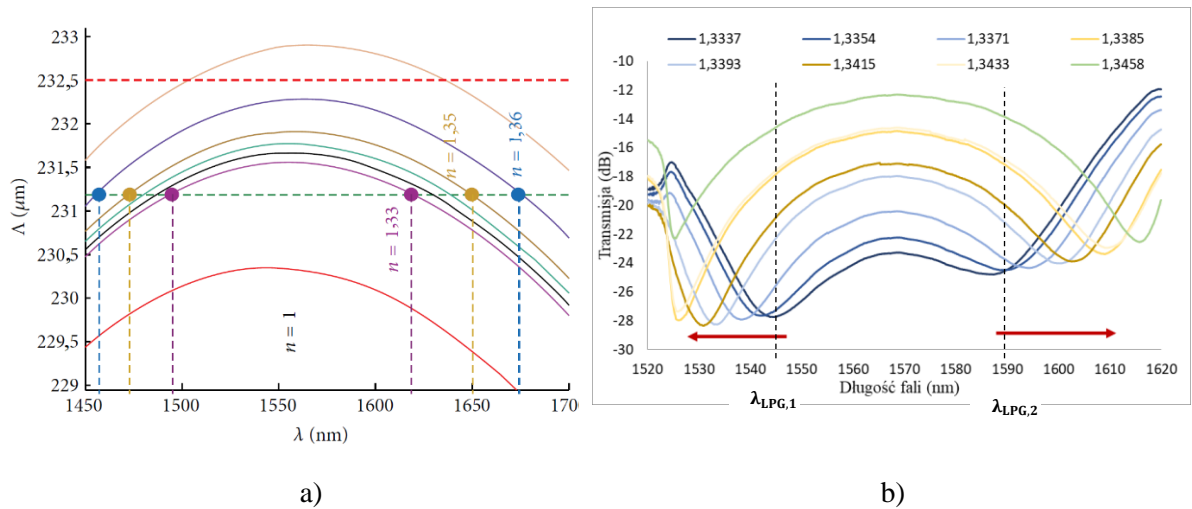
zewnątrznego włókna) następuje zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia (TIR, ang. Total Internal Reflection). Czułość LPG na zmianę zewnętrznego RI skutkuje zatem przesunięciem się pasma absorpcyjnego w stronę fal krótszych oraz zmniejszeniem jego głębokości. W układach z LPG często zmiany parametrów zewnętrznych mogą być monitorowane poprzez pomiar zmian mocy optycznej wiązki świetlnej dla konkretnej długości fali [94]. W niektórych zastosowaniach, może być to podstawą konstrukcji przetworników niewymagających zaawansowanego i drogiego analizatora widmowa. W ramach niniejszej pracy, zjawisko to również zostanie szczegółowo opisane i przebadane.

Gdy  $n_{zew} = n_{pl}$ , promień płaszczka teoretycznie będzie nieskończony i zjawisko TIR nie występuje. W konsekwencji, na charakterystyce widmowej nie będzie widocznych pasm absorpcyjnych. Natomiast w przypadku, gdy  $n_{zew} > n_{pl}$ , mody płaszczkowe są częściowo radiacyjne i propagują się tylko poprzez odbicia Fresnela. Wówczas, pole modów wyciekających znacząco maleje, ponieważ różnica pomiędzy RI światła otoczenia a płaszczka staje się coraz większa. W tym wypadku siła sprzężenia pomiędzy modem podstawowym a modami płaszczkowymi staje się coraz większa, tym samym zwiększa się głębokość pasma absorpcyjnego. Należy zauważyć, że dla warunków, w których RI otoczenia jest większy niż płaszczka, długość fali rezonansowej pozostaje stała lub zmienia się nieznacznie [95], [96].

W zastosowaniach, gdzie niezbędne jest monitorowanie wysokich wartości RI często stosuje się nanoszenie cienkich warstw na powierzchnię LPG [97], [98] (m.in. odmianami alotropowymi węgla, tlenków metali, polimeru czy innych materiałów organicznych). Osadzanie cienkiej warstwy na strukturach periodycznych jest obecnie najpowszechniejszym tematem prac naukowych [99]. Okazuje się bowiem, że oprócz możliwości monitorowania substancji o RI większym niż płaszcz włókna z wpisaną LPG, takie metody znacząco zwiększają czułość LPG, nawet o kilka rzędów wielkości [100]. Istnieją również platformy DRLPG, na które naniesione jest kilka funkcyjnych cienkich warstw, gdzie pierwsza odpowiada za wzmocnienie czułości, natomiast pozostałe pełnią funkcję np. elementu selektywnego badanej substancji chemicznej lub biologicznej [101], [102].

Zasadniczo, czułość na zmianę zewnętrznego RI zależna jest od sprzężenia modu podstawowego z modem wyższego rzędu. Na Rysunku 11a przedstawiono krzywe

dopasowania fazowego dla DRLPG wpisanej w standardowe włókno SMF-28 o okresie  $\Lambda=232,5 \mu\text{m}$ .



**Rysunek 11.** Krzywe dopasowania fazowego dla modu  $LP_{0,10}$  dla wybranych zewnętrznych współczynników załamania [99] - a) oraz zależności od zewnętrznego współczynnika załamania przesunięcie pasm absorpcyjnych dla DRLPG nr 1 z Tabeli 3 – b).

Na Rysunku 11a czerwoną krzywą zaznaczono dopasowanie fazowe DRLPG umieszczonej w powietrzu ( $n = 1$ ). W tym wypadku, sprzężenie modu podstawowego z modem  $LP_{0,10}$  lub wyższym nie występuje. Wraz ze wzrostem współczynnika załamania otoczenia siatki krzywa dopasowania fazowego przesuwa się ku górze. Pomimo, iż krzywa dopasowania fazowego i linia okresu siatki (zaznaczona na Rysunku 11a czerwoną linią przerywaną) nie przecinają się, sprzężenie  $LP_{0,1}$  z modem wyższego rzędu występuje dla współczynnika załamania równego wodzie ( $n = 1,33$ ). Wówczas, pomimo iż pomiędzy krzywą dopasowania (linia fioletowa na Rysunku 11a) a linią okresu siatki występuje jeszcze przerwa, na widmie transmisyjnym pojawia się pasmo absorpcyjne o głębokości około 2 dBm. Zwiększając wartość zewnętrznego RI, konsekwentnie krzywe dopasowania fazowego zbliżają się do linii okresu siatki, gdzie przecinają się w dwóch miejscach. Jest to równoważne z tzw. krytycznym sprzężeniem, a na widmie transmisyjnym widoczne są dwa pasma absorpcyjne dla sprzężenia z jednym modem wyższego rzędu. Rysunek 11b przedstawia widma transmisyjne DRLPG o parametrach siatki nr 1 z Tabeli 3 dla różnych RI otoczenia. Czerwonymi strzałkami zaznaczono kierunek przesuwania się poszczególnych pasm absorpcyjnych przy wzroście RI otoczenia. Pasma te przesuwiają się w przeciwnym kierunku od siebie, czyli odmiennie niż miało to miejsce dla zmian temperatury oraz naprężeń (Rysunek 9 i Rysunek 10), gdzie pasma te przesuwiają się do siebie. Powyższa właściwość stanowi podstawę do konstrukcji czujników dwu- lub wieloparametrowych,

bądź czujników chemicznych/biologicznych z możliwością kompensacji wpływu temperatury, ciśnienia bądź naprężeń wzdłużnych i poprzecznych.

Podstawa działania głowicy pomiarowej może być oparta na rejestracji przesunięcia pasm absorpcyjnych DRLPG (mierzone w nm) lub na pomiarze zmian głębokości poszczególnych pasm absorpcyjnych (mierzone w dBm) [103]. W przypadku pomiaru głębokości pasm absorpcyjnych występuje pewne ograniczenie związane z wyborem konkretnych długości fali, dla których poziom transmisji będzie mierzony. Jest to spowodowane właściwością pasm absorpcyjnych, które w zakresie długości fali rezonansowej są względnie płaskie. Rozwiązaniem tego zagadnienia, może być wprowadzenie dodatkowego elementu optycznego, który będzie stanowił filtr optyczny dla konkretnych długości fali, przypadającej dla rejonu długości fali pasm absorpcyjnych DRLPG. Właściwości takie posiadają niektóre interferometry światłowodowe, stąd pojawia się możliwość pomiaru parametrów fizykochemicznych poprzez platformę pomiarową bazującą na rejestracji zmian mocy optycznej dla wybranej długości fali.

### 3. Światłowodowy interferometr pętlowy

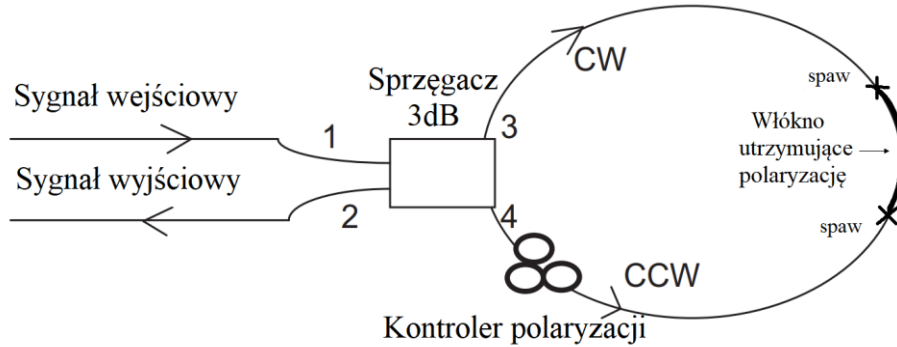
#### 3.1 Zasada działania światłowodowego interferometru pętlowego

Światłowodowy interferometr pętlowy (FLM, ang. Fiber Loop Mirror), będący pochodną interferometru Sagnaca, działa jak doskonały reflektor, pracujący niezależnie od stanu polaryzacji (SOP, ang. State of Polarization) wiązki wejściowej [104]. W najprostszym ujęciu, do konstrukcji tego układu używa się tylko jednomodowego włókna i szerokopasmowego sprzęgacza 3 dB, gdzie zakłada się, iż SOP dwóch oddziaływujących w pętli wiązek świetlnych nie ulega zmianie. Dwie wiązki świetlne, propagujące się w pętli w przeciwnym kierunku, stanowią ramię pomiarowe (ang. mesurand) i ramię odniesienia (ang. reference). Ponieważ większość wielkości fizycznych działa jednakowo na obydwie ramiona, zmiana fazy jest jednakowa. Zatem interferometr ten jest czuły tylko na wielkości, powodujące zaburzenie symetrii konstrukcji, np. na prędkość kątową obrotu. Takie konstrukcje stanowią podstawę do budowy żyroskopu światłowodowego, które wykorzystują efekt Sagnaca: dwie wiązki świetlne, propagujące się w przeciwnych kierunkach po tej samej zamkniętej drodze optycznej (włóknie jednomodowym), wykazują różnice faz, która jest proporcjonalna do prędkości kątowej obrotu układu [105].

Wprowadzenie do podstawowej konstrukcji FLM włókna utrzymującego polaryzację (PMF, ang. Polarization Maintaining Fiber) klasyfikuje go do interferometrów modowych, gdzie interferencja między modami zachodzi w jednym włóknie światłowodowym. Ze względu na m. in. zwartą budowę i szeroki zakres długości fal, w którym pracują, konstrukcje te są podstawą przetworników pomiarowych zarówno quasi statycznych jak i zmiennych dla szeregu wielkości fizycznych, głównie temperatury oraz naprężeń [106], [107], [108]. Ze względu na charakter prowadzonych badań w ramach niniejszej rozprawy, dalsza część pracy zostanie poświęcona tylko FLM z odcinkiem PMF.

Rysunek 12 przedstawia schemat FLM z odcinkiem PMF. Wiązka świetlna, emitowana przez dowolne źródło szerokopasmowe, wprowadzana jest do sprzęgacza w ramieniu 1. Szerokopasmowy sprzęgacz 3 dB dzieli amplitudowo wiązkę świetlną na dwie w stosunku 1:1, które wprowadzone są w pętlę światłowodową w ramieniu 3 (CW, ang. Clockwise - propagacja wiązki świetlnej zgodnie ze wskazówkami zegara) i 4 (CCW, ang. Counterclockwise - propagacja wiązki świetlnej przeciwnie do ruchu wskazówek zegara). W tym przypadku, ramię odniesienia jest tym samym torem wiązki świetlnej co ramię pomiarowe, zatem zostaje wyeliminowany problem różnicy dróg optycznych oraz różnicy warunków

środowiskowych ramienia odniesienia i pomiarowego [109]. Ze względu na dwójłomność umieszczonego w pętli odcinka PMF, dwie wiązki światła propagujące się przeciwnie do siebie w dwóch modach polaryzacyjnych, ulegają przesunięciu fazowemu, a następnie ulegają złożeniu interferencyjnemu po ponownym przejściu przez sprzęgacz na wyjściu 2. Dzięki kontrolerowi polaryzacji (PC, ang. Polarization Controller) możliwe jest szczególne dopasowanie SOP tych wiązek do dwójłomnościowych osi zastosowanego PMF [110].



**Rysunek 12.** Schemat FLM z odcinkiem PMF oraz PC umożliwiającym kontrolę SOP oddziałujących wiązek. CW- wiązka świetlna propagująca się zgodnie ze wskazówkami zegara, CCW – wiązka świetlna propagująca się przeciwnie do ruchu wskazówek zegara.

Przy założeniu, iż 3 dB sprzęgacz, spawy pomiędzy PMF a włóknom jednomodowym oraz tłumienność światłowodów nie wnoszą istotnych strat w bilans mocy, funkcja transmisji  $T$  (oraz w uzupełnieniu odbicia  $R$ ) przyjmuje postać [109]:

$$T = 1 - R = \left[ \sin\theta \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right]^2, \quad (3.1)$$

przy czym:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot l_{PMF} \cdot \beta_{PMF}(\lambda)}{\lambda} + \Delta\phi_{PMF}, \quad (3.2)$$

gdzie:  $\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_y$  - różnica faz dla propagacji fali w dwóch modach polaryzacyjnych (x oraz y) odcinka PMF,  $\theta$  - różnica azymutów liniowych SOP dla CW i CCW w miejscach 3 i 4 (Rysunek 12) ustawiona przez PC,  $l_{PMF}$  - długość odcinka PMF,  $\lambda$  - długość fali, na której pracuje PMF,  $\beta_{PMF}$  - dwójłomność fazowa PMF. Ogólnie, dwójłomność PMF jest zależna od długości fali, jednak w ramach niniejszej pracy będzie uważana za stałą dla pracy układu wokół centralnej długości fali  $\lambda_0$ . W niektórych przypadkach zamiast terminu dwójłomność, używa się pojęcia „długość drogi dudnień”, a więc długość drogi, w jakiej występuje całkowita wymiana między modami polaryzacji i jest wyrażana jako  $L_B = \frac{\lambda_0}{\beta_{PMF}}$

[111]. Drugi człon sumy z równania (3.2) -  $\Delta\phi_{PMF}$  to przesunięcie fazowe wiązki CW, względem wiązki CCW, wywołane przez zewnętrzne perturbacje, tj. zmianę temperatury, ciśnienia lub naprężenia. Z równania (3.1) wynika, iż funkcja transmisji  $T$  (tym samym odbicia  $R$ ) idealnego FLM jest funkcją periodyczną, silnie zależną od SOP wiązek świetlnych propagujących się wewnątrz pętli, a maksima transmisji widmowej pojawiają przy spełnieniu warunku:

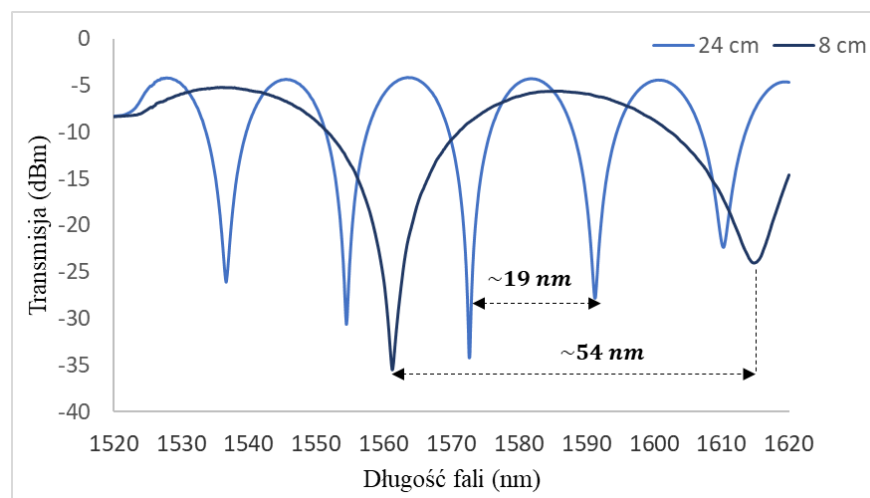
$$2\pi \cdot \beta_{PMF} \cdot l_{PMF} = (2k_p + 1) \cdot \pi, \quad (3.3)$$

gdzie:  $k_p$  jest liczbą całkowitą określającą dopasowanie interferencyjne w FLM.

Natomiast odległości pomiędzy poszczególnymi ekstremami (maksimami bądź minimami) transmisji widmowej FLM (nazywane również okresem oscylacji widma) wyraża się jako [104]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{\beta_{PMF} \cdot l_{PMF}}. \quad (3.4)$$

Tym samym odległości pomiędzy kolejnymi ekstremami interferencyjnymi są ściśle zależne od wartości dwójłomności oraz długości zastosowanego PMF. Wiadomym jest, iż im większa wartość dwójłomności, tym PMF jest bardziej czułe na zmianę temperatury oraz naprężenia. Na Rysunku 13 przedstawiono widmo transmisyjne dla FLM z odcinkami PMF (Fibercore HB1500, włókno typu „bow-tie” pracujące na długości fali 1550 nm) o długości 24 cm oraz 8 cm.



**Rysunek 13.** Widmo transmisyjne FLM z odcinkiem PMF o długości 24 cm oraz 8 cm.

Doświadczenie własne wykazuje, iż newralgicznym punktem w konstrukcji czujników wieloparametrowych jest umiejętne łączenie FLM z innymi strukturami optycznymi, pozwalające na świadomą kontrolę widma transmisyjnego FLM z posiadaną charakterystyką widmową zastosowanej struktury LPG. W przypadku połączenia FLM z DRLPG zmiana SOP wiązki świetlnej propagującej się wewnątrz włókna pozwala na dostosowania minimów widma interferencyjnego do pasm absorpcyjnych DRLPG. Procedura dopasowania widm zostanie szczegółowo omówiona w rozdziale 4.2.

### 3.2 Światłowodowy interferometr pętlowy jako przetwornik pomiarowy

Jeżeli na PMF działa dana wielkość fizyczna  $X$  to różnica faz propagujących się w nim wiązek w dwóch modach własnych (wzdłuż osi  $x$  oraz  $y$ ) ulega zmianie. Na podstawie równania (3.2) zmianę tę można opisać następująco [112]:

$$d\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ l_{PMF} \frac{\partial\beta_{PMF}}{\partial X} dX + \beta_{PMF} \frac{\partial l_{PMF}}{\partial X} dX \right]. \quad (3.5)$$

Zatem, jeżeli PMF zostanie poddane działaniu wielkości  $X$ , nastąpi przesunięcie widma interferencyjnego o  $d\lambda$  (przy założeniu stałego SOP):

$$d\lambda = \frac{\Delta\lambda \cdot d\Delta\varphi}{2\pi}. \quad (3.6)$$

Zasadniczo, przy pomiarach zewnętrznych wielkości fizycznych głowicą pomiarową FLM jest odcinek PMF. Ponieważ propagujące się w pętli światło nie interferuje z modami płaszczowymi, interakcja PMF ze zmianą zewnętrznego współczynnika załamania otoczenia jest całkowicie zerowa. Innymi słowy, PMF jest niewrażliwe na zewnętrzne czynniki biologiczne i/lub chemiczne, stąd w ramach niniejszej pracy umieszczony on w FLM będzie stanowił głowicę pomiarową temperatury oraz naprężeń, zaś DRLPG zostanie wykorzystana do pomiaru RI.

Z równania (3.5) można wnioskować, iż działające czynniki na PMF zmieniają wartość dwójłomności fazowej oraz długość PMF. Jeżeli zmiana długości i dwójłomności PMF jest wywołana przez zmianę temperatury  $\Delta T$ , w taki sposób, że:  $\Delta l_{PMF} = \alpha_{PMF} \Delta T$  i  $\Delta\beta_{PMF} = \xi_{PMF} \Delta T$ , gdzie  $\alpha_{PMF}$  to współczynnik rozszerzalności cieplnej PMF i  $\xi_{PMF}$  jest współczynnikiem termo-optycznym parametrów wewnętrznych PMF, to z równania (3.5) wynika [113]:

$$\Delta\lambda = \frac{[l_{PMF}\xi_{PMF}\Delta T + \beta_{PMF}\alpha_{PMF}\Delta T + \xi_{PMF}\alpha_{PMF}(\Delta T)^2]}{k_p}, \quad (3.7)$$

gdzie  $k_p$  to liczba całkowita określona we wzorze (3.3).

Dla standardowego PMF można przyjąć, że:  $\alpha_{PMF} \sim 5 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}$  oraz  $\xi_{PMF} \sim -3,47 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}$ . Zatem bazując na równaniu (3.7) trzeci składnik sumy jest tak niewielki (siedem rzędów mniejszy od dwóch pierwszych), iż w niniejszych rozważaniach można go pominąć. Wówczas, równanie (3.7) przyjmuje postać:

$$\Delta\lambda = \frac{[l_{PMF}\xi_{PMF} + \beta_{PMF}\alpha_{PMF}]\Delta T}{k_p}. \quad (3.8)$$

Rozważając wpływ naprężeń wzdłużnych  $\Delta\varepsilon$  (pochodzących od rozciągania włókna) działających na PMF i przy założeniu, iż wydłużenie PMF wynosi  $\Delta l_{PMF} = l_{PMF1} - l_{PMF}$ , przy czym  $l_{PMF1}$  to długość na jaką zostało wyciągnięte włókno, otrzymujemy odpowiednio:

$$\Delta\lambda = \frac{[l_{PMF}\eta_{PMF}\Delta\varepsilon + \beta_{PMF}C_{PMF}\Delta\varepsilon + \eta_{PMF}\alpha_{PMF}(\Delta\varepsilon)^2]}{k_p}, \quad (3.9)$$

gdzie:  $\eta_{PMF}$  to parametr charakterystyczny dla PMF, zależny od współczynnika Poissona, współczynnika fotosprężystego, geometrii PMF oraz wpływu naprężeń na dwójłomność włókna [106]. Przyjmując parametry dla typowego PMF,  $C_{PMF}$  oraz  $\eta_{PMF} \sim -1,75 \cdot 10^{-9}/\text{mm}$ , trzeci człon sumy z wyrażenia (3.9) jest dużo mniejszy od dwóch pozostałych (dziewięć rzędów), zatem w dalszych rozważaniach także może zostać pominięty. Równanie (3.9) przyjmuje postać:

$$\Delta\lambda = \frac{[l_{PMF}\eta_{PMF} + \beta_{PMF}C_{PMF}l_{PMF1}]\Delta\varepsilon}{k_p}. \quad (3.10)$$

Stąd, jeżeli na PMF działa jednocześnie temperatura oraz naprężenia, a współczynniki: rozszerzalności cieplnej, termo-optyczny oraz fotosprężysty są stałe, to zmiana położenia ekstremów widma transmisyjnego FLM opisana jest zależnością [114]:

$$\Delta\lambda = K_T\Delta T + K_\varepsilon\Delta\varepsilon, \quad (3.11)$$

gdzie:  $K_T$  oraz  $K_\varepsilon$  to odpowiednio czułość temperaturowa oraz naprężeniowa PMF umieszczonego w FLM.



Przy wzroście naprężeń indukowanych na PMF, widmo transmisyjne (rozważane z punktu widzenia położenia minimów interferencyjnych) przesuwa się w stronę fal dłuższych [115], natomiast podczas wzrostu temperatury widmo transmisyjne przesuwa się w stronę fal krótkich. Przeciwna odpowiedź układu na zmianę powyższych parametrów fizycznych, może posłużyć do zbudowania przetwornika dwuparametrowego. Jednakże powstaje pewna trudność, podczas rozróżnienia czułości osobno temperaturowej oraz naprężeniowej. Wówczas, stosuje się platformy hybrydowe, zawierające w swojej konstrukcji dwa lub więcej elementów czułych, stanowiących głowicę pomiarową.

### 3.3 Zmiana stanu polaryzacji wiązki propagującej się w światłowodowym interferometrze pętlowym

Polaryzacyjne właściwości FLM zostaną dokładniej opisane w pkt. 4.2 poświęconym prawidłowemu justowaniu układu FLM z DRLPG i odcinkiem PMF za pomocą PC. Tutaj, przytoczone zostaną jedynie ogólne dane zaczerpnięte z literatury bazujące na rozprawie habilitacyjnej prof. L. Jaroszewicza [116].

Dokonując opisu elementów układu na bazie formalizmu macierzowego Jonesa, wejściowa wiązka jest scharakteryzowana poprzez wektor Jonesa [117]:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos\beta \\ \sin\beta e^{i\Delta} \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

gdzie parametry SOP (azymut – kąt  $\theta$ , eliptyczności – kąt  $\varepsilon$ ) określone są jako:

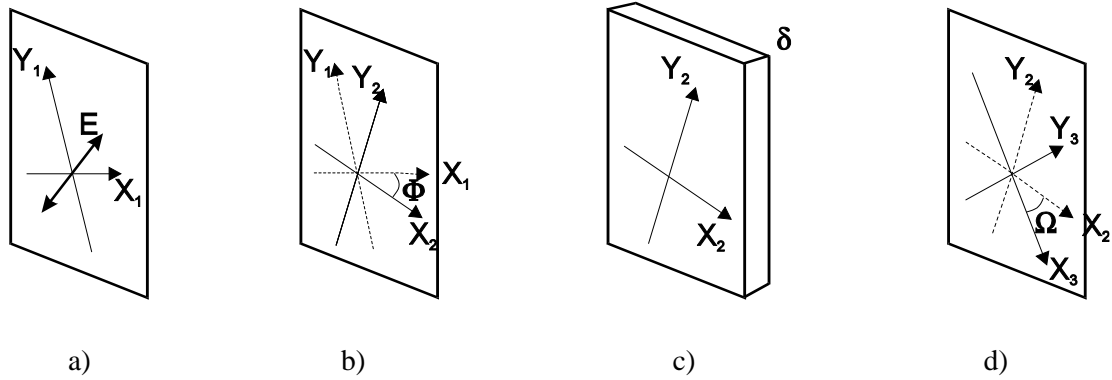
$$\theta = \frac{1}{2} \arctg[\tg(2\beta)\cos\Delta], \quad \varepsilon = \arcsin[\sin(2\beta)\sin\Delta]. \quad (3.13)$$

Natomiast dowolny element światłowodowy, na bazie twierdzenia o ekwiwalentności układu optycznego Kaprona [118] opisuje macierz Jonesa w postaci:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\Omega, \delta, \Phi) &\stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{R}(\Omega)\mathbf{G}(\delta)\mathbf{R}(\Phi) \\ &= \begin{bmatrix} \cos\Omega & -\sin\Omega \\ \sin\Omega & \cos\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\frac{i\delta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{i\delta}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Phi & -\sin\Phi \\ \sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Tym samym dowolny element lub układ światłowodowy, z punktu widzenia jego wpływu na polaryzację wiązki świetlnej, może być traktowany jako zespół trzech dyskretnych elementów: rotatora  $\mathbf{R}$  o osiach  $\Phi$  (niedopasowanie kątowe osi elementu do osi przyjętego

układu, np. wspomniane przy równaniu (3.1) niedopasowanie kątowe  $\theta$ ), liniowego opóźniacza fazowego  $G$  o opóźnieniu  $\delta$  (dwójłomność liniowa wprowadzana przez element) oraz rotatora  $R$  dającego obrót o kąt  $\Omega$  (dwójłomność kołowa wprowadzająca obrót płaszczyzny polaryzacji o ten kąt) co schematycznie pokazano na Rysunku 14.



**Rysunek 14.** Ilustracja zasady ekwiwalentności Kaprona: a) wejściowe światło  $E$  i jego osie odniesienia  $X_1$ - $Y_1$ , b) obrót osi o kąt  $\Phi$  do osi liniowego opóźniacza fazowego  $X_2$ - $Y_2$ , c) liniowy opóźniacz o dwójłomności liniowej  $\delta$ , d) wyjściowe światło z opóźniacza doznające dodatkowego obrotu płaszczyzny polaryzacji o kąt  $\Omega$  [118].

Przyjmując następnie idealną konfigurację układu FLM z 3 dB symetrycznym sprzęgaczem, jego funkcja przenoszenia (natężenie na wyjściu 2 w konfiguracji z Rysunku 12) może być zapisana jako [116]:

$$I = 0,5\{1 - \text{abs}(m)\cos[2\phi + \text{arg}(m)]\}, \quad (3.15a)$$

przy czym:

$$m = E^+ R(\Omega)G(-\delta)R(\Phi + \Omega)G(\delta)R(\Phi)E, \quad (3.15b)$$

zaś  $+$  oznacza sprzężenie hermitowskie, a  $\phi$  ogólne zaburzenie fazowe mierzone przez układ. W zapisie (3.15a) parametr  $\text{abs}(m)$  określa widzialność zwaną także ekstynkcją obrazu interferencyjnego i ma bezpośredni wpływ na czułość układową, zaś  $\text{arg}(m)$  jest niezrównoważonym przesunięciem fazowym – tzw. bias, wpływającym na dryft układu [116].

Z powyższej zależności wynika, że jeśli FLM zawiera wyłącznie włókno powodujące skręt płaszczyzny polaryzacji ( $\delta=0$ ), to uzyskuje się następującą prostą zależność analityczną:

$$I = 0,5 \left\{ 1 - \sqrt{\cos^2 \chi + \sin^2 \chi \sin^2 2\beta \sin^2 \Delta} \cos[2\phi + \operatorname{arctg}(tg \chi \sin 2\beta \sin \Delta)] \right\}, \quad (3.16a)$$

gdzie:

$$\chi = 2(\Phi + \Omega). \quad (3.16b)$$

Stąd, jeśli wejściowa wiązka ma liniowy SOP ( $\Delta=0$ ) to funkcja przenoszenia przyjmuje postać:

$$I = 0,5 \{ 1 - \cos [2(\Phi + \Omega)] \cos (2\phi) \}, \quad (3.17)$$

Co oznacza, iż układ FLM jest nieczuły na zmiany kierunku liniowej polaryzacji wejściowej do układu przy czułości (zmianie kontrastu interferencyjnego) zarówno na występujące w pętli niedopasowanie osiowe ( $\Phi$ ) jak i wprowadzaną przez włókno skrętność płaszczyzny polaryzacji ( $\Omega$ ).

Natomiast gdy układ FLM ma jedynie dwójłomność liniową z dopasowanymi osiami na wejściu do pętli  $\theta=0$  ( $\Omega=\Phi=0$ ), to proste przekształcenie algebraiczne prowadzi równanie (3.15) do postaci:

$$I = 0,5 \left\{ 1 - \sqrt{(\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \cos 2\Delta)^2 + \sin^2 \beta \sin^2 2\Delta} \cos \left[ 2\phi + \operatorname{arctg} \left( \frac{\sin^2 \beta \sin 2\Delta}{\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \sin 2\Delta} \right) \right] \right\}, \quad (3.18)$$

Dla liniowej wiązki pobudzającej ( $\Delta=0$ ) powyższa funkcja przenoszenia FLM przyjmuje postać:

$$I = 0,5 [1 - \cos(2\phi)], \quad (3.19)$$

Co oznacza brak wrażliwości układu FLM na czystą dwójłomność liniową włókna oraz stałość jego działania przy pobudzeniu wiązką o liniowym SOP.

Przyczyną powyższych szczególnych właściwości tej konfiguracji, jak konkluduje prof. Jaroszewicz w [116], jest fakt wykorzystania jednego włókna jako toru dla obu oddziałujących wiązek. Ze względu na przeciwbieżny kierunek ich propagacji zachodzi znoszenie wpływu dwójłomności liniowej, gdyż bez względu na SOP wiązki pobudzającej, w dowolnym punkcie wzdłuż pętli, oddziałujące wiązki mają jednakowe SOP, co zgodnie z opisem fenomenologicznym Fresnela-Arago, daje maksymalny kontrast interferencyjny.

Natomiast wystąpienie we włóknie czynnika powodującego skręcenie płaszczyzny polaryzacji wpływa jednakowo na obie wiązki. Zatem jeśli skręt/niedopasowanie wejściowe osi lub oba te czynniki ( $\Omega+\Phi$ ) dają  $\pi/4$ , to oddziałujące wiązki są na wyjściu wzajemnie prostopadłe i wówczas zgodnie z warunkami Fresnela-Arago, czułość (widzialność obrazu interferencyjnego) spada do zera. Powyższe rozważania mają dwa istotne aspekty:

1. z zasady należy przyjąć, iż FLM jest mało czułe na SOP wiązki pobudzającej, zaś dla pobudzenia przez wiązkę o liniowym SOP o dowolnym azymucie układ FLM jest stabilny,
2. z punktu widzenia wpływu polaryzacji istnieje możliwość wykorzystania dwójłomnościowych własności pętli ( $\delta$ ) oraz umiejętnego prowadzenia w pętli wiązek CW i CCW o liniowym SOP ( $\Phi\neq 0$ ) do budowy czujnika optymalizowanego na działanie wybranego czynnika fizykochemicznego, co jest przedmiotem tej rozprawy omawianym w dalszej części.

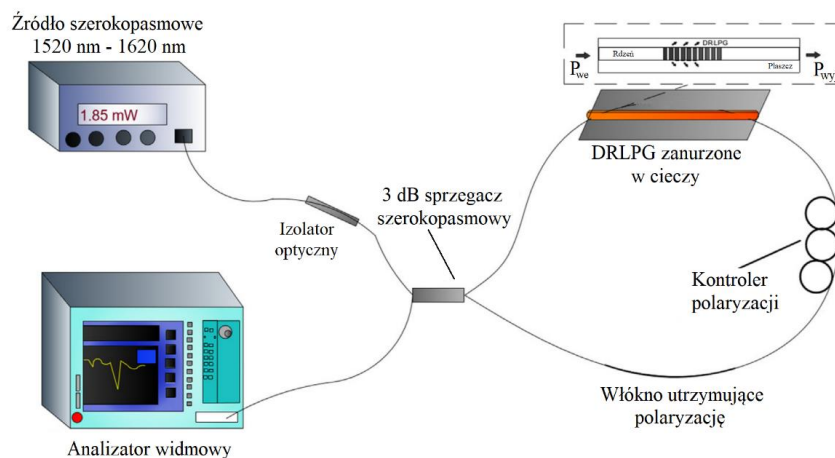
#### **4. Charakterystyka platformy złożonej z długookresowej siatki światłowodowej umieszczonej w pętli interferometrycznej**

Na przestrzeni ostatnich kilku dekad, połączenie FLM wraz ze strukturami periodycznymi stało się obiecującym rozwiązaniem do stworzenia bardzo czułej platformy do przetwarzania więcej niż jednego parametru fizykochemicznego [119], [120], [121]. Jednak jak zostało wspomniano w rozdziale 2, połączenie „ultraczułej” struktury periodycznej, tj. LPG, gdzie mod podstawowy sprzęga się z modem równym lub wyższym od  $LP_{0,15}$  z interferometrem nie zostało jeszcze przebadane i scharakteryzowane. W poniższym rozdziale zaprezentowana zostanie nowatorska, autorska konstrukcja oraz charakterystyka platformy przetwornikowej składającej się ze FLM z odcinkiem PMF oraz DRLPG. Cechą charakterystyczną DRLPG jest czułość na wiele parametrów jednocześnie, zatem newralgicznym aspektem jest odseparowanie sygnału pochodzącego od przetwarzanego czynnika od sygnałów pochodzącego od wielu parametrów zewnętrznych. Tym samym, możliwość kompensacji wpływu np. temperatury podczas przetwarzania sygnału pochodzącego od zmiany zewnętrznego RI w zastosowaniach platformy jako czujnika chemicznego/biologicznego, pozwala na wyeliminowanie negatywnego wpływu tego czynnika traktowanego jako tzw. czułość współzależna (ang. cross-sensitivity) przy jednoczesnym zachowaniu możliwie najwyższej czułości platformy na zmiany RI. Poza dokładnością elektronicznego sprzętu detekcyjnego oraz wysoką czułością platformy przetwornikowej, istotny wpływ na mierzony sygnał mają także matematyczne metody

analizy uzyskanego sygnału, jak na przykład różnicowa metoda pomiarowa. Metoda ta, zostanie wykorzystana w analizie przetwarzanego sygnału skonstruowanego przetwornika wielkości fizykochemicznych. Dzięki tej metodzie, w odróżnieniu od standardowego monitorowania zmian widma transmisyjnego, tj. obserwacji przesunięcia pasma absorpcyjnego lub/i minimów interferencyjnych, przetwarzany sygnał będzie śledzony jako różnica w zmianie poziomu transmisji dla poszczególnych minimów. Powyższa transmisja jest wypadkową sygnału, zmodyfikowanego głównie przez interferometr oraz strukturę periodyczną. W rozdziale tym, zostanie opisana kalibracja platformy w odniesieniu do przestrojenia widm pochodzących zarówno od DRLPG, jak i od widmowej charakterystyki układu interferencyjnego. Ponadto, platforma zostanie scharakteryzowana pod kątem przetwarzania poszczególnych wielkości fizykochemicznych.

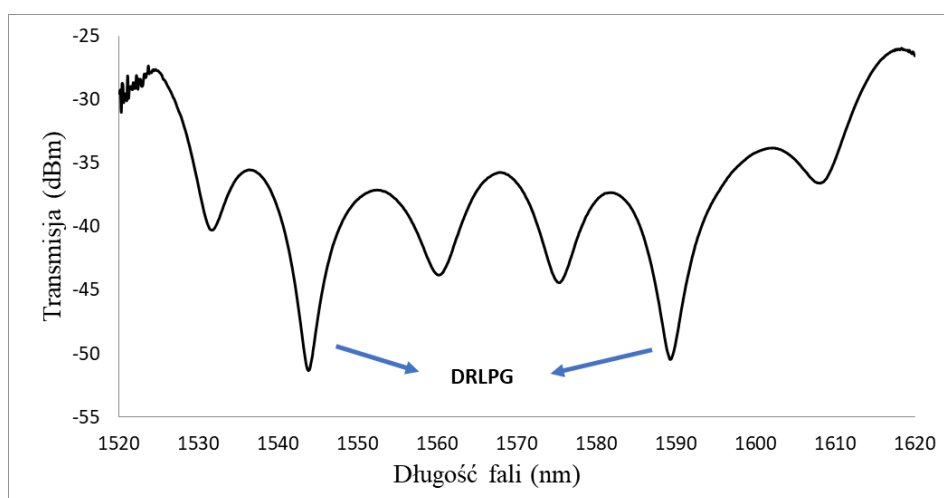
#### 4.1. Koncepcja platformy do przetwarzania wielkości fizykochemicznych

Platforma do przetwarzania wielkości fizykochemicznych została skonstruowana na podstawie FLM z umieszczoną wewnątrz DRLPG oraz odcinkiem PMF (Rysunek 15). Elementy optyczne konstrukcji, zestawione według autorskiego pomysłu odnośnie umieszczenia PC pomiędzy DRLPG a PMF, stanowią najważniejsze składowe przetwornika, ponieważ na część elektroniczną składają się komercyjnie osiągalne urządzenia optoelektroniczne: źródło szerokopasmowe (generujące wiązkę świetlną w zakresie długości fali od 1520 nm do 1620 nm) oraz analizator widmowy (86142B, *Agilent*, Santa Clara, CA, USA) z rozdzielczością 0,1 nm lub/i miernik mocy wraz z detektorem.



**Rysunek 15.** Schemat ogólny platformy przetwornikowej wielkości fizykochemicznej do pomiaru tylko zewnętrznego współczynnika załamania światła [31].

Zasadniczo, konstrukcja FLM z odcinkiem włókna PMF została opisana w rozdziale 3.1, przy czym pętla została wykonana z jednomodowego włókna SMF-28. DRLPG (o parametrach z Tabeli 3) została umieszczona pomiędzy 3 dB sprzęgaczem szerokopasmowym (1310/1550 nm Dual Window, *Thorlabs*, Newton, NJ, USA) a mechanicznym PC tzw. trójpłytkowy (FPC030, 3-Paddle PC, *Thorlabs*). Należy podkreślić, iż DRLPG, ze względu na swoje właściwości dyspersyjne, umieszczone jest na stałe w cieczy o zmiennej, w zależności od przeprowadzonych badań, wartości RI. Włókno PMF podczas przeprowadzonych badań mocowane było w taki sposób, aby zminimalizować wpływ przypadkowych naprężeń na sygnał wyjściowy, z wyjątkiem badań naprężeniowych. Wszystkie elementy światłowodowe zostały ze sobą połączone na bazie nisko-stratnych połączeń spawanych, których stratność można pominąć w dalszych rozważaniach. Miejsca spawów zostały dokładnie zabezpieczone, aby uniknąć błędów systematycznych mogących mieć wpływ na charakterystykę widmową platformy pomiarowej. Przykładowa charakterystyka widmowa skonstruowanej platformy do przetwarzania wielkości fizykochemicznych została przedstawiona na Rysunku 16, gdzie za pomocą PC ustawiono taki SOP, aby uwidocznić pasma absorpcyjne nakładające się na minima interferencyjne.



**Rysunek 16.** Charakterystyka widmowa FLM z umieszczoną wewnątrz DRLPG. RI otoczenia struktury DRLPG to  $n = 1,3333$  (woda destylowana). SOP w pętli został ustawiony w taki sposób, aby uwidocznić pasma absorpcyjne DRLPG [31].

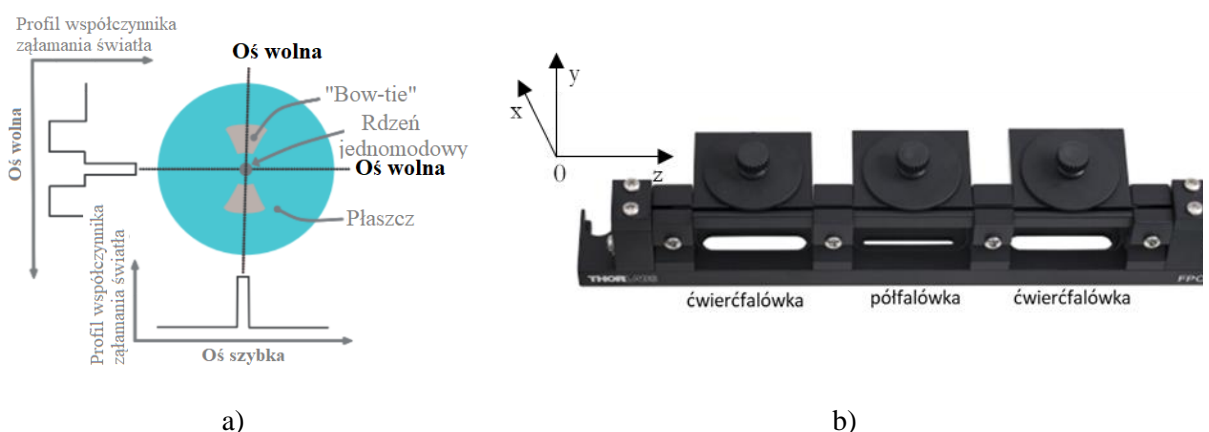
#### 4.2. Dopasowanie widma transmisyjnego długookresowej siatki światłowodowej z podwójnym pasmem absorpcyjnym i światłowodowego interferometru pętlowego

Celem dopasowania względem siebie widm transmisyjnych, pochodzących od dwóch zasadniczych struktur optycznych opisywanej platformy, jest uzyskanie możliwie jak najwyższej czułości na przetwarzany sygnał pochodzący od zmian wielkości

fizykochemicznych. Biorąc pod uwagę możliwość pomiaru zmiany natężenia sygnału wyjściowego jako alternatywy do śledzenia przesunięcia pasm absorpcyjnych, co wymagałoby stosowania OSA, wyjustowanie położenia pasm absorpcyjnych oraz minimów interferencyjnych jest kluczowym etapem optymalizacji skonstruowanej platformy pomiarowej. Możliwość dopasowania widma interferencyjnego pochodzącego od FLM z odcinkiem PMF do charakterystyki widmowej DRLPG jest możliwe dzięki zmianie SOP wiązek świetlnych propagujących się w przeciwnym kierunku w pętli. Zmiana SOP odbywa się poprzez zmianę położenia katowych płytek PC [122]. Charakterystyka widmowa DRLPG zanurzona w cieczy o stałym RI jest niezależna od zmiany SOP wiązki propagującej się zamkniętym układzie. Innymi słowy, nie ma możliwości sterowania widmem transmisyjnym struktury periodycznej wytworzonej zgodnie z technologią opisaną w rozdziale 2.3.2 za pomocą zmiany SOP oddziałujących wiązek.

#### 4.2.1. Podstawy zmiany stanu polaryzacji w światłowodowej pętli interferencyjnej

Rysunek 17 przedstawia schemat przekroju poprzecznego włókna PMF typu „bow-tie” oraz zdjęcie komercyjnego PC firmy Thorlabs wykorzystany w skonstruowanej platformie. Płytki PC odpowiadają dwóm ćwierćfalówkom oraz jednej półfalówce, gdzie włókno jednomodowe, będące częścią pętli interferometrycznej, nawijane jest odpowiednio na poszczególne płytki. Zgięcie światłowodu powoduje powstanie dwójłomności indukowanej wpływającej na macierz transmitancji propagującej się wiązki świetlnej. Poszczególne płytki z numeracją 1, 2 i 3 działają jako  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  płytki falowe-[123]



**Rysunek 17.** Schemat przekroju PMF typu "bow-tie" [124] - a) i trójpłytkowy PC składający się z dwóch ćwierćfalówki i jednej półfalówki [125] - b).

Połączony efekt trzech płytek falowych, których funkcjonowanie jest identyczne do funkcjonowania klasycznych ćwierć- i półfalówek, pozwala w czasie rzeczywistym na

ciągłą i nieprzerwaną transformację wejściowego SOP poprzez zmianę kąta ich odchylenia ( $\theta_i, i = 1, 2, 3$ ) od płaszczyzny głównej  $x$ - $z$  (Rysunek 17b). Matematyczny dowód powyższego stwierdzenia może być dokonany na bazie adaptacji rozważań dotyczących dwupłytkowego PC (PC2) zawierającego jedynie układ dwóch ćwierćfalówek, które uzyskuje się poprzez zwinięcie włókna jednomodowego w pętlę o tak dobranym promieniu by dla danej długości fali (tutaj 1550 nm) wymuszona dwójłomność liniowa pomiędzy osią wzdłuż promienia a płaszczyzną pętli wyniosła równo  $\lambda/4$  ( $\delta=\pi/2$  według równania (3.14)). Wówczas macierz Jonesa dwupłytkowego PC2 przyjmuje postać [126]:

$$\mathbf{M}_{PC2} = \mathbf{M}(\theta_2, \delta_2 = \pi/4, 0) \mathbf{M}(\theta_1, \delta_1 = \pi/4, 0) = \mathbf{R}(\gamma_1) \mathbf{G}(\vartheta) \mathbf{R}(\gamma_2), \quad (4.1a)$$

gdzie:

$$\gamma_1 = 0,92\theta_2 - \frac{\pi}{4}, \quad \vartheta = 1,84(\theta_2 - \theta_1) - \pi, \quad \gamma_2 = 0,92\theta_1 + \frac{\pi}{4}. \quad (4.1b)$$

Jak widać, układ ten poprzez zmiany kątów ustawienia płytek (kąty  $\theta_1, \theta_2$ ) dokonuje zmiany dwójłomności liniowej jak i kołowej, co pozwala na zmianę wejściowego SOP na dowolny inny SOP [126]. Jednakże transformacja ta nie jest jednakowa dla wiązki przechodzącej w obu kierunkach albowiem macierze rotacji  $\mathbf{R}$  mają różne wartości względem kąta ustawienia płytek (różnica o  $\pm \pi/4$ ). Innymi słowy, jeśli PC2 wstawiony do FLM dla wiązki CW przekształca liniowy SOP o ułożony wzdłuż osi  $x$  z Rysunku 17b na liniowy wzdłuż osi  $y$ , to dla wiązki CCW liniowy SOP wzdłuż osi  $y$  nie zostanie w tym ustawieniu PC2 przekształcony w liniowy SOP wzdłuż osi  $x$ . Celem umożliwienia jednakowej transformacji SOP w obu kierunkach konieczne jest zastosowanie układu trójpłytkowego, który to pomiędzy dwiema ćwierćfalówkami ma element płytki półfalowej ( $\delta=\pi$  według równania (3.14)), zmieniającej jedynie azymut a nie eliptyczność polaryzacji. Dla takiego układu macierz Jonesa może być zapisana jako:

$$\mathbf{M}_{PC} = \mathbf{M}(\theta_3, \delta_3 = \pi/2) \mathbf{M}(\theta_2, \delta_2 = \pi) \mathbf{M}(\theta_1, \delta_1 = \pi/2) = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_3, \quad (4.2a)$$

gdzie:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta_i}{2} \cos \theta_i - i \sin \frac{\delta_i}{2} \cos \theta_i & -\cos \frac{\delta_i}{2} \sin \theta_i + i \sin \frac{\delta_i}{2} \sin \theta_i \\ \cos \frac{\delta_i}{2} \sin \theta_i + i \sin \frac{\delta_i}{2} \sin \theta_i & \cos \frac{\delta_i}{2} \cos \theta_i + i \sin \frac{\delta_i}{2} \cos \theta_i \end{bmatrix}, \quad (4.2b)$$

$i=1, 2, 3.$



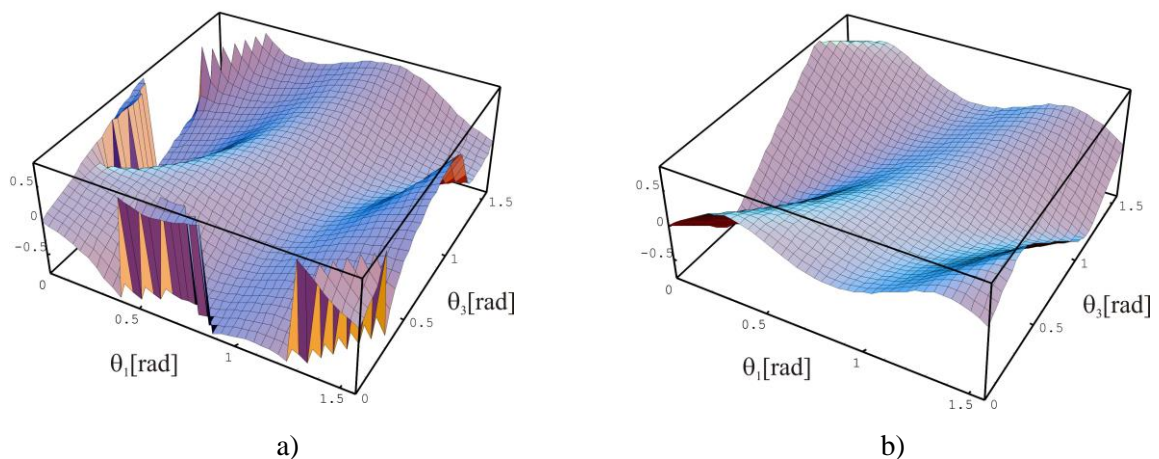
Co ostatecznie po podstawieniu wartości opóźnienia  $\delta_i$  odpowiadających płytkom  $\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$  prowadzi do postaci macierzy Jonesa dla trójpłytkowego PC jako:

$$\mathbf{M}_{PC} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 (1 - i) & -\sin \theta_1 (1 - i) \\ \sin \theta_1 (1 - i) & \cos \theta_1 (1 - i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i \cos \theta_2 & -i \sin \theta_2 \\ i \sin \theta_2 & i \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_3 (1 - i) & -\sin \theta_3 (1 - i) \\ \sin \theta_3 (1 - i) & \cos \theta_3 (1 - i) \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

W powyższych rozważaniach przyjęto, iż elementy nie wprowadzają dwójłomności kołowej ( $\Omega=0$  według równania (3.14)).

Jak widać otrzymana postać macierzy Jonesa ma symetrię względem zmiany kierunku propagacji wiązki świetlnej, co oznacza, iż w układzie FLM będzie jednakowo transformować SOP zarówno dla wiązki CW jak i CCW.

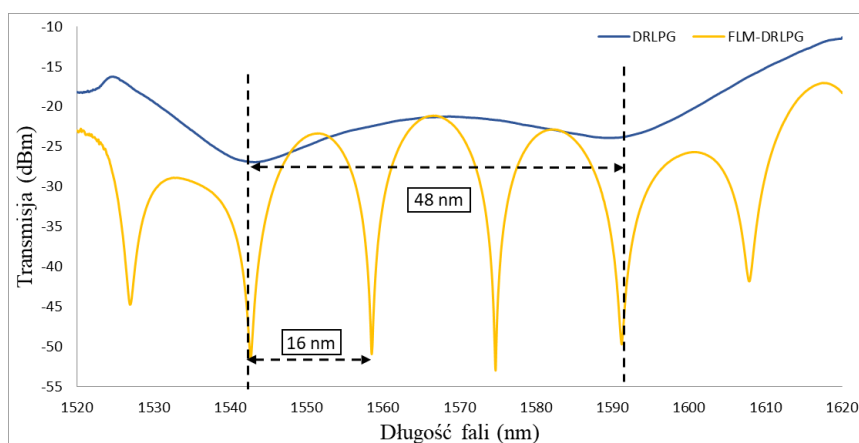
Korzystając z oprogramowania Mathematica 12.1 firmy Wolfram na poniższym Rysunku 18 przedstawiono zaadaptowaną na podstawie [126] symulację zmiany liniowego SOP ( $\beta=\Delta=0$  według równania (3.12)) przy przejściu przez rozważany PC. Przy czym, ze względu na zobrazowanie jedynie zmian położenia płytek ćwierćfalowych przyjęto, iż płytka półfalowa obracana jest tak samo jak pierwsza ćwierćfalówka ( $\theta_2 = \theta_1$ ). Symulacja ta pokazuje, iż PC pozwala efektywnie otrzymać dowolny SOP w tym liniowy prostopadły w stosunku do liniowej polaryzacji wejściowej, co jest istotne z punktu widzenia dalszych rozważań układu FLM-DRLPG.



**Rysunek 18.** Azymut - a) i eliptyczność - b) SOP wiązki wyjściowej z trójpłytkowego PC w funkcji kąta ustawienia płytek tworzących światłowodowe ćwierćfalówki. Na podstawie [126].

#### 4.2.2. Przeszajanie widma transmisyjnego platformy pomiarowej

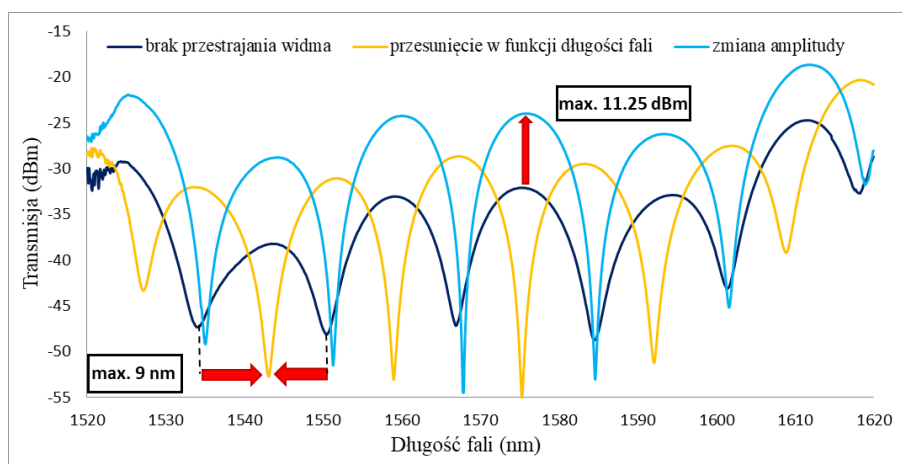
Dopasowanie widma transmisyjnego FLM z PMF do charakterystyki DRLPG o stałym, niezależnym od SOP położeniu dwóch pasm absorpcyjnych możliwe jest dzięki odpowiedniemu dobraniu odległości pomiędzy kolejnymi minimami interferencyjnymi. Odległość pomiędzy dwoma pasmami absorpcyjnymi DRLPG o parametrach z Tabeli 3, dla wszystkich przypadków jest zbliżona i wynosi średnio około  $48 \pm 2$  nm, przy czym pasma absorpcyjne tych siatek są płaskie, gdzie zakres ich wypłaszczenia może wynosić nawet kilka nanometrów. Pozwala to na większą elastyczność w doborze odległości pomiędzy kolejnymi minimami interferencyjnymi FLM. Dla DRLPG nr 1 z Tabeli 3, która to po zanurzeniu w cieczy o  $n = 1,3328$  charakteryzuje się odległością pomiędzy pasmami absorpcyjnymi rzędu 48 nm, ustalono odległość pomiędzy kolejnymi minimami interferencyjnymi na 16 nm, co stanowi jedną trzecią odległości pomiędzy pasmami absorpcyjnymi DRLPG. Biorąc pod uwagę dwójłomność włókna utrzymującego polaryzację HB1550 użytego w ramach konstrukcji platformy do przetwarzania sygnału fizykochemicznego ( $\beta = 5,34 \cdot 10^{-4}$ ) [127], centralną długość fali HB1550 (1550 nm) oraz pożądaną odległość pomiędzy kolejnymi minimami interferencyjnymi, na podstawie wzoru (3.4) wyliczono długość włókna utrzymującego polaryzację, która wynosi 0,28 m. Rysunek 19 przedstawia widmo transmisyjne DRLPG (niebieska linia), do której dostosowane były parametry włókna PMF oraz widmo transmisyjne FLM z umieszczoną wewnątrz DRLPG (oznaczone jako FLM-DRLPG, żółta linia).



**Rysunek 19.** Charakterystyka widmowa DRLPG (niebieska linia) oraz FLM z umieszczoną wewnątrz DRLPG (żółta linia) [31].

Zgodnie z opisem z rozdziału 4.2.1, zmiana SOP wiązki w pętli za pomocą PC, umieszczonego pomiędzy PMF a DRLPG, pozwala na prowadzenie w układzie wiązek CW

i CCW o wzajemnie ortogonalnych SOP pobudzający dwa ortogonalne mody polaryzacyjne PMF. Dzięki temu możliwe jest przestrajanie widma zarówno jako przesunięcie minimów interferencyjnych w funkcji długości fali (wprowadzanie niezrównoważonego stałego przesunięcia fazowego -  $arg(m)$  w równaniu 3.15(a)), jak i zmianę ich głębokości (parametr  $abs(m)$  według równania (3.15(a)), czyli zmianę współczynnika ekstynkcji układu. Eksperymentalnie określono, iż dla parametrów włókna HB1550 oraz trójplytkowego PC możliwość przestrojenia widma mieści się w zakresie 9 nm w funkcji długości fali, przy jednoczesnym uzyskaniu zmian głębokości minimów interferencyjnych o 11,25 dBm (Rysunek 20).



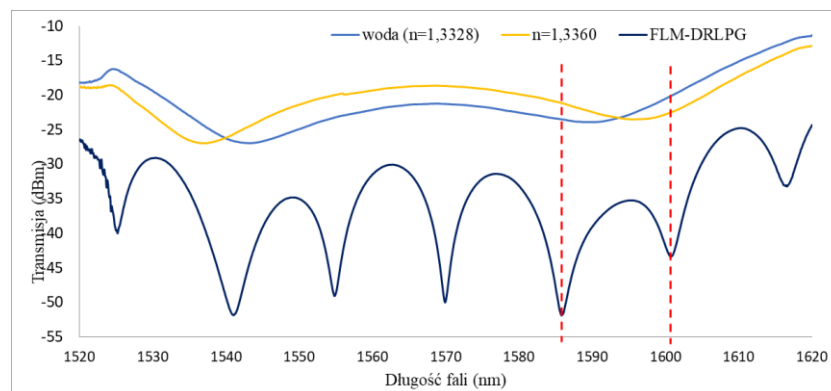
**Rysunek 20.** Widma transmisyjne platformy przetwornikowej bez zmiany SOP wiązki (ciemna niebieska linia) oraz ze zmianą SOP w celu przestrojenia położenia minimów w funkcji długości fali (żółta linia) i zmiany głębokości minimów interferencyjnych (jasna niebieska linia) [31].

Jak wspomniano we wstępie rozdziału 4.1, przestrojenie widma transmisyjnego FLM jest niewyalnizną procedurą w celu uzyskania możliwie maksymalnej czułości platformy do przetwarzania sygnału fizykochemicznego. Istotnym jest, aby położenie minimów interferencyjnych dostosowane było do zakresu pomiarowego, w jakim ma pracować element czuły. Biorąc pod uwagę, iż DRLPG jest głowicą pomiarową czułą na zmianę RI otoczenia, przez co umożliwia detekcję substancji biologicznych oraz chemicznych, przestrojenie minimów interferencyjnych musi być dostosowane do zakresu pracy struktury periodycznej. Na zakres ten zasadniczo wpływa przewidywane zastosowanie platformy:

- w przypadku detekcji czynnika biologicznego wychwytywanego poprzez zmodyfikowaną powierzchnię siatki wymagany zakres zmian wartości RI jest względnie niewielki, tj. mieści się w zakresie 1,333 – 1,343 [128];

- w przypadku detekcji czynnika chemicznego zakres ten powinien być znacznie większy oraz przekraczać wartość 1,343. Zasadniczo, zakres ten zależy od okresu siatki i tak dla siatki o  $\Lambda=230 \mu\text{m}$  wynosi on od 1,3333 do 1,3672 [128]. Jednakże im większy zakres pracy siatki, tym czułość na zmianę RI maleje. Rozszerzenie zakresu przy zachowaniu wysokiej czułości możliwe jest poprzez nanoszenie na powierzchnię siatki cienkiej warstwy odpowiedniego materiału, na przykład tlenku tytanu [129] lub tlenku cynku [130].

Dla DRLPG o parametrach z Tabeli 3 przestrojenie widma interferencyjnego odbywało się w warunkach otoczenia wody destylowanej, której współczynnik załamania wynosi  $n = 1,3328$ , przy czym zanurzono jedynie powierzchnię włókna z naniesioną strukturą periodyczną. W celu wyeliminowania wpływu temperatury na PMF oraz na charakterystykę widmową DRLPG, kalibracja platformy odbywała się w warunkach kontrolowanej temperatury. Ponieważ zmiana parametrów zewnętrznych będzie przetwarzana na sygnał pochodzący od zmiany głębokości wybranych minimów interferencyjnych (standardowo mierzone jest przesunięcie pasma absorpcyjnego DRLPG lub minima interferencyjnego), pasmo absorpcyjne powinno być ustawione pomiędzy minimami interferencyjnymi dla różnych RI otoczenia DRLPG (czerwone przerywane linie na Rysunku 21). Takie ustawienie charakterystyki widmowej powoduje, że podczas zmiany warunków dla DRLPG, a co za tym idzie podczas rozsuwania się obydwu pasm absorpcyjnych, minima interferencyjne znajdujące się w granicy pasm absorpcyjnych będą zmieniały swą głębokość. Im wyższy RI otoczenia, tym mocniej całe widmo platformy FLM-DRLPG będzie wzmacniane, jednakże nieproporcjonalnie w każdym zakresie. W zakresie pasma absorpcyjnego minima interferencyjne zmieniają swoją głębokość w znacznie mniejszym stopniu niż pozostałe minima. Pozwala to na zastosowanie metody różnicowej jako metody określenia czułości platformy do przetwarzania parametrów fizykochemicznych. Tym samym można stwierdzić, iż FLM działa również jako swoisty filtr pasmowo-przepustowy.



**Rysunek 21.** Charakterystyki widmowe DRLPG zanurzonej w wodzie destylowanej o  $n=1,3328$  (jasna niebieska linia), w cieczy o  $n=1,3360$  (żółta linia) oraz charakterystyka widmowa platformy przetwornikowej FLM-DRLPG (ciemna niebieska linia) [32].

We wszystkich przeprowadzonych eksperymentach do pomiaru wybranych wielkości fizykochemicznych przeprowadzono kalibrację platformy pomiarowej, przy czym przestrojenie charakterystyki widmowej poprzez zmianę SOP oddziałujących wiązek odbywało się w czasie rzeczywistym. Należy zaznaczyć, iż główną zaletą proponowanego rozwiązania jest uniwersalność platformy dla DRLPG o dowolnych parametrach, pozwalająca na regulację zakresu pomiarowego, jak również dostosowanie rozdzielczości pomiarowej w zależności od proponowanego zastosowania czujnikowego.

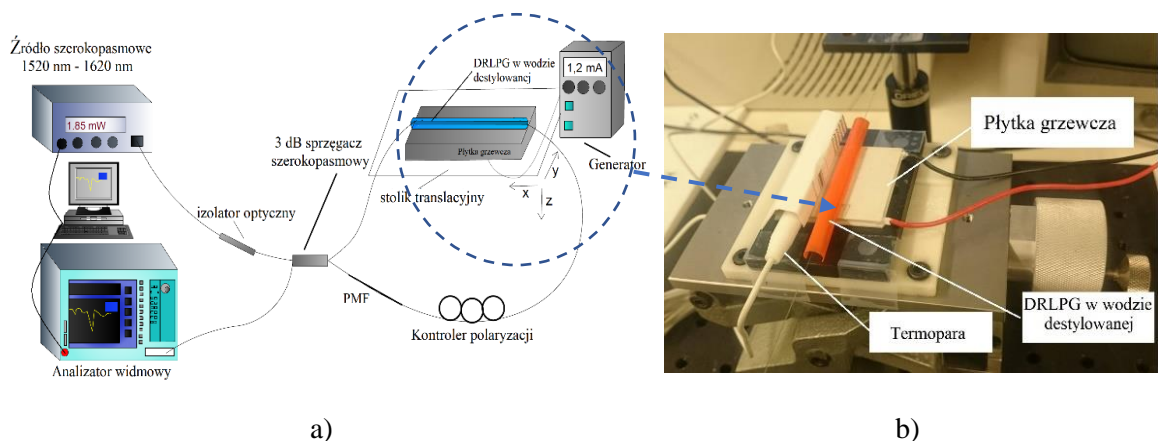
### 4.3. Charakterystyka platformy jako przetwornika wybranych wielkości fizykochemicznych

Do scharakteryzowania skonstruowanej platformy przetwarzającej wielkości fizykochemiczne wykorzystano struktury periodyczne z Tabeli 3, o parametrach bardzo zbliżonych do siebie. Określenie czułości na zmianę temperatury, naprężeń oraz zewnętrznego RI zostało przeprowadzone na bazowej platformie przedstawionej schematycznie na Rysunku 12, gdzie przy każdej zmianie konstrukcji układu następował proces kalibracji widma transmisyjnego według założeń opisanych w rozdziale 4.2.2.

#### 4.3.1. Czułość na zmianę temperatury

Zasadniczą cechą FLM, a w zasadzie jego elementu składowego – odcinka PMF – jest wrażliwość na zmianę temperatury otoczenia. Jednakże, także widmo transmisyjne struktury okresowej ulega zmianie pod wpływem fluktuacji termicznych. Stąd badaniom temperaturowym charakteryzowanej platformy poddano: osobno DRLPG, osobno PMF oraz przebadano wpływ temperatury otoczenia na obydwie struktury DRLPG i PMF.

Rysunek 22a przedstawia konfigurację układu zastosowaną do pomiarów temperaturowych, gdzie zmianie temperatury została poddana tylko DRLPG. W przypadku badania wpływu temperatury na PMF oraz DRLPG-PMF konstrukcja ta ulegała odpowiedniej modyfikacji. Przeprowadzane badania były rejestrowane na komputerze z oprogramowaniem z LabView, pozwalającym na obserwację i rejestrację widma w czasie rzeczywistym z możliwością „zamrożenia” charakterystyki odniesienia. Do zmiany temperatury badanych elementów optycznych użyto ceramiczną płytkę grzewczą podłączoną do zasilacza z płynną regulacją napięcia i prądu wyjściowego. Struktura periodyczna została zanurzona w U-rowku z wodą destylowaną o współczynniku załamania  $n = 1,3328$ , natomiast samo naczynie zostało przymocowane do płytki grzewczej. Aby zapewnić stałą grubość otaczającą siatkę medium, podczas podgrzewania, na U-rowek została nałożona nakrywka (pomarańczowy element na Rysunku 22b). Dzięki temu, zminimalizowano ryzyko zmiany grubości medium o jednorodnym RI przez wyparowanie cieczy otaczającej DRLPG. Do płytki grzewczej, tuż przy U-rowku z DRLPG, została również przymocowana aluminiowa głowica termopary, w celu dokładnego pomiaru temperatury. Rozkład temperatury płytki grzewczej jest równomierny na całej jej powierzchni, zaś błąd pomiaru temperatury określono na  $0,1^{\circ}\text{C}$ .



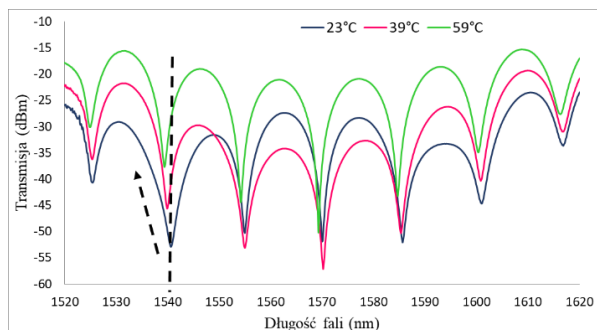
**Rysunek 22.** Schemat układu - a) oraz jego widok - b) przystosowany do badania wpływu zmian temperatury otoczenia na działanie DRLPG [32].

### Zmiana temperatury otoczenia DRLPG.

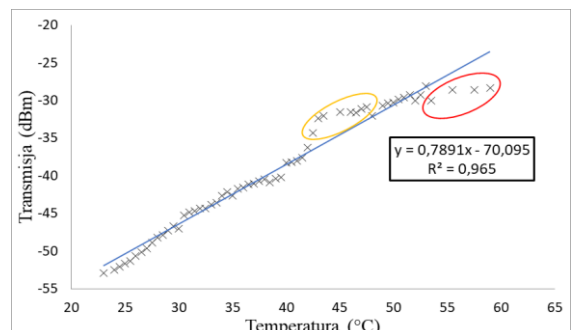
Na Rysunku 23 przedstawiono odpowiedź platformy przetwornikowej na zmianę temperatury, gdzie zmianie tej ulegało tylko otoczenie DRLPG, Pomiar odbywał się zaczynając od temperatury pokojowej ( $23^{\circ}\text{C}$ ), stopniowo zwiększając natężenie prądu przepływającego do płytki grzewczej skutkującej zmianą o  $1^{\circ}\text{C}$  i kończąc na  $59^{\circ}\text{C}$ . Pomiar został zakończony w momencie, kiedy zauważono niekontrolowaną zmianę charakterystyki widmowej, spowodowanej prawdopodobnie parowaniem i skraplaniem się cieczy



w U- rowku. Zapis charakterystyki widmowej odbywał się z krokiem 0,5 °C. Na Rysunku 23a przedstawiono charakterystyki widmowe dla wybranych wartości temperatury, umożliwiające uwypuklenie stwierdzonych zmian dla skrajnych wartości zakresu pomiarowego. Dla temperatury 39 °C można zauważyć, że widmo transmisyjne całościowo ulega pogłębieniu, jednakże minima interferencyjne w miejscach pokrycia z dwoma pasmami absorpcyjnymi „przesunęły się” w górę, co na Rysunku 23a zaznaczono czarną przerywaną strzałką. Trzy minima interferencyjne znajdujące się pomiędzy pasmami absorpcyjnymi ulegają pogłębieniu i jest to związane z połączeniem się dwóch pasm absorpcyjnych po przekroczeniu temperatury krytycznej. Dla temperatury 59 °C minima interferencyjne zachowują się analogicznie jak w przypadku pomiaru dla 39 °C, natomiast charakterystyka widmowa całościowo ulega znacznemu „przesunięciu” ku górze. Tendencje pogłębiania się lub podnoszenia poszczególnych minimów interferencyjnych, jak i całościowego widma transmisyjnego wynikają z charakterystyki temperaturowej samej DRLPG i jest to zgodne z charakterystyką z Rysunku 8. Na Rysunku 23b, dla wybranego minimum interferencyjnego odpowiadającego długości fali 1540,7 nm (czarna przerywana linia na Rysunku 23a), wykreślono zależność wartości transmisji w funkcji temperatury otoczenia. Na podstawie regresji liniowej określono czułość temperaturową badanej platformy pomiarowej, która wynosi 0,7891 dBm/°C ze współczynnikiem korelacji  $R^2 = 0,9650$ . Zależność wartości transmisji od temperatury jest liniowa, poza zakresem temperatur od 42,5 °C do 47,5 °C (na Rysunku 23b zaznaczono ten zakres żółtą obwiednią). Od wartości 53,5 °C charakterystyka temperaturowa również znacząco odbiega od trendu liniowego (zaznaczone odpowiednio czerwoną obwiednią), co ma główny wpływ na wartość współczynnika korelacji. Odstępstw to spowodowane jest faktem, iż minima interferencyjne ulegają również niewielkiemu przesunięciu w funkcji długości fali.



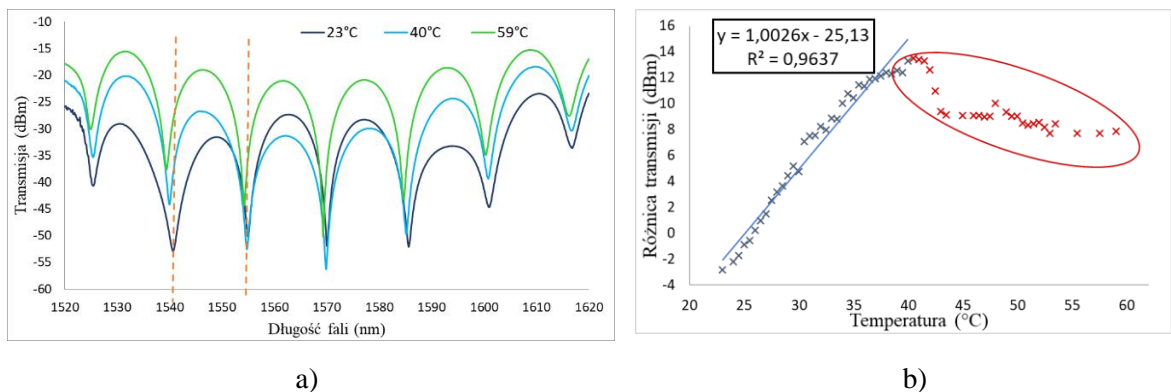
a)



b)

**Rysunek 23.** Charakterystyki widmowe platformy dla wybranych wartości temperatury otoczenia DRLPG - a) i aproksymacja liniowa zmiany amplitudy wybranego minimum interferencyjnego zaznaczonego przerywaną linią na wykresie a) w zależności od zmiany temperatury otoczenia DRLPG - b) [32].

Zaobserwowana różnokierunkowa zmiana minimów interferencyjnych (ich „pogłębienie” oraz „wypłylenie”) pozwala na zastosowanie metody różnicowej jako sposobu oszacowania czułości temperaturowej platformy przetwornikowej. W tym celu wybrano dwa sąsiadujące minima interferencyjne, dla długości fal 1540,7 nm oraz 1554,9 nm (dane dla temperatury pokojowej 23 °C oznaczone na Rysunku 24a przez pomarańczowe przerywane linie). Określono różnicę pomiędzy zmianą wartości transmisji dla tych minimów interferencyjnych dla poszczególnych temperatur (zakres temperaturowy 23 °C – 59 °C z krokiem 0,5 °C) i wyznaczono zależność różnicy wartości transmisji od temperatury (Rysunek 24b). Do 39 °C zależność ta jest liniowa i szacowana czułość temperaturowa wynosi 1,0026 dBm/°C przy współczynniku korelacji  $R^2 = 0,9637$ . Powyżej 39 °C zależność zmienia swoją monotoniczność (dane zaznaczone na Rysunku 24b czerwoną obwiednią) co jest związane z połączeniem się dwóch pasm absorpcyjnych DRLPG. Jak widać zastosowanie metody różnicowej pozwolił na zwiększenie temperaturowej czułości o 0,2135 dBm/°C, jednakże przy jednoczesnym zmniejszeniu zakresu pomiarowego.



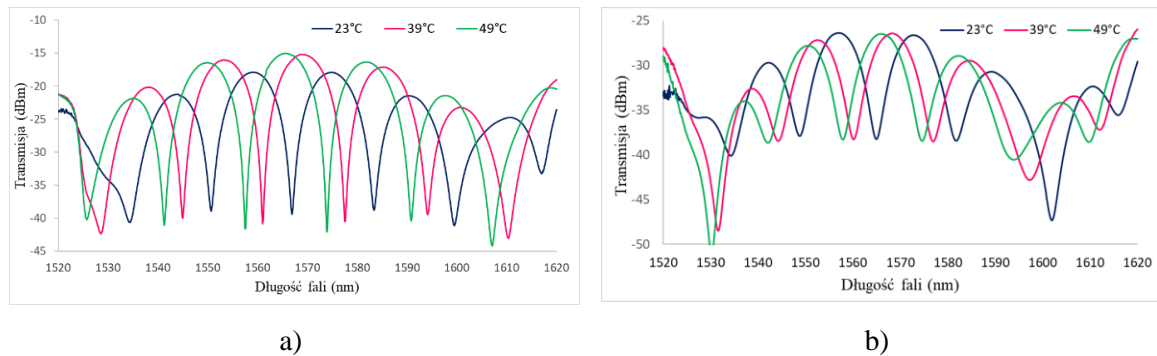
**Rysunek 24.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej z zaznaczeniem minimów interferencyjnych jako danych do oszacowania czułości temperaturowej przy wykorzystaniu metody różnicowej - a) oraz liniowa zależność różnicy transmisji w funkcji temperatury - b) [32].

#### Zmiana temperatury otoczenia PMF.

Badaniom temperaturowym poddano również samo włókno utrzymujące polaryzację, będące integralną częścią platformy przetwornikowej (Rysunek 25), przy czym DRLPG podczas pomiarów umieszczone było w cieczy o współczynniku załamania  $n = 1,3328$ , a działaniu temperatury poddany był tylko 5 cm odcinek PMF. Zakres pomiarowy to 23 °C – 51 °C. Wiadomym jest (z równania (3.8)), iż czułość temperaturowa PMF jest zależna od jego długości i wartości dwójłomności, przy czym czułość ta obserwowana jest jako przesunięcie minimów interferencyjnych. Poddając działaniu



temperatury całą długość włókna, czyli 28 cm, przesunięcie minimów interferencyjnych przekroczyłoby okres oscylacji widma.



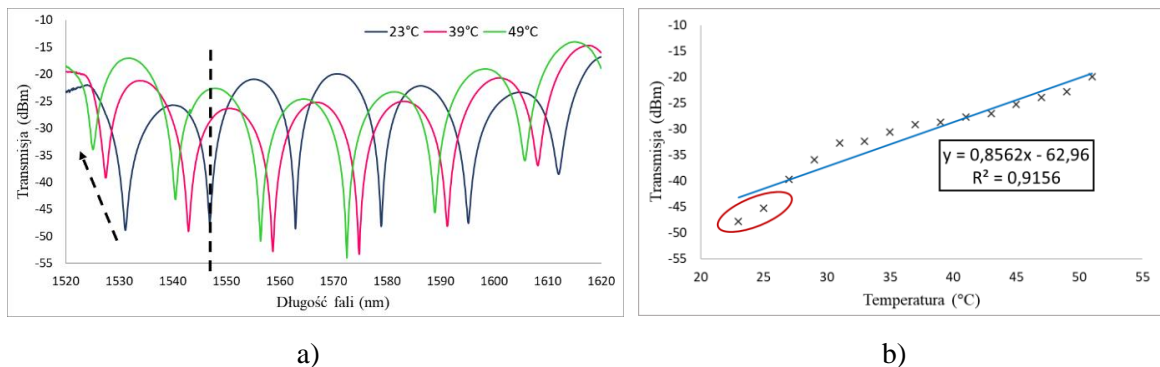
**Rysunek 25.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla wybranych wartości temperatur otoczenia PMF, przy dwóch różnych ustawieniach SOP: dowolnym - a), uwypuklającym pasma absorpcyjne DRLPG - b) [32].

Zastosowanie DRLPG w interferometrze pętlowym z SOP odpowiadającym charakterystykom widmowym z Rysunku 25a, gdzie działaniu temperatury poddane jest tylko PMF, nie wpływa na charakterystykę temperaturową układu. Zmiana SOP wiązek przeciwnie propagujących się w FLM, a co za tym idzie przestrojenie widma w taki sposób, żeby amplituda zmian minimów interferencyjnych była jak najmniejsza, pozwala na uwidocznienie pasm absorpcyjnych struktury periodycznej (Rysunek 25b). Wówczas, podczas zmiany temperatury minima interferencyjne, które pokrywają się z pasmami absorpcyjnymi DRLPG, ulegają zmianie zarówno co do ich głębokości jak i przesunięcia w funkcji długości fali. Pozostałe minima interferencyjne nie zmieniają swojej głębokości, a zmianie ulega jedynie ich położenie. Jednakże należy zaznaczyć, iż zmiany głębokości i przesunięcia minimów interferencyjnych pokrytych z pasmami absorpcyjnymi są nierównomierne.

#### Zmiana temperatury otoczenia dla DRLPG i PMF.

W celu analizy wpływu temperatury na charakterystykę widmową platformy do przetwarzania wielkości fizykochemicznych w ujęciu całościowym, DRLPG oraz PMF umieszczono na ceramicznej płytce grzewczej w niewielkiej odległości od siebie, co zapewniało stworzenie identycznych warunków środowiskowych otoczenia dla obydwu czułych elementów. Również i w tym przypadku, zmianom temperaturowym poddano tylko 5 cm włókna utrzymującego polaryzację. Na Rysunku 26a przedstawiono charakterystykę widmową platformy przetwornikowej dla 3 wybranych wartości temperatur, przy czym zastosowany zakres zmian temperatur wynosił od 23 °C do 51 °C z krokiem 2 C. Głębokość

minimów interferencyjnych dla długości fali 1530,1 nm (Rysunek 26a - czarna przerywana strzałka) i 1546,8 nm, jak również 1595,2 nm i 1612,1 nm ulega zmniejszeniu i jest to związane z zaniknięciem pasma absorpcyjnego DRLPG dla pewnej temperatury krytycznej (zgodnie z charakterystyką temperaturową DRLPG z Rysunku 8). Pozostałe minima interferencyjne ulegają pogłębieniu wraz ze wzrostem temperatury. Dla minimum interferencyjnego przypadającego dla długości fali 1546,1 nm (czarna przerywana linia na Rysunku 26a) wyznaczono zależność wartości transmisji w funkcji temperatury otoczenia (Rysunek 26b) z zastosowaniem aproksymacji liniowej. Dla początkowych temperatur, aż do 25 °C, wyniki znacząco odbiegają od wyznaczonej liniowości (Rysunek 26b - czerwona obwiednia), co jest to związane z faktem, iż pierwszy pomiar jest dla najniższej wartości minimum interferencyjnego, a oprócz zmian głębokości minimum interferencyjnego przemieszcza się ono również w funkcji długości fali. Szacowana czułość temperaturowa wynosi 0,8562 dBm/°C przy współczynniku korelacji  $R^2 = 0,9156$ . Niepewność standardowa wynosi  $3,9 \cdot 10^{-2}$  dBm/°C, natomiast niepewność względna 4,5%.

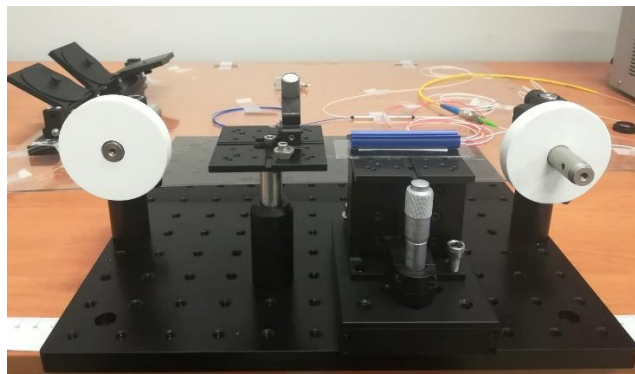
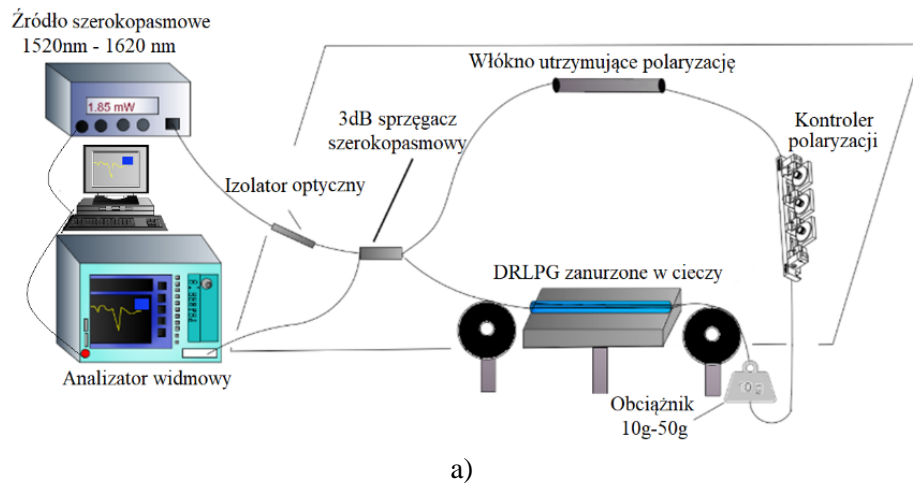


**Rysunek 26.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla wybranych wartości temperatur, gdzie działaniu temperatury zostały poddane DRLPG i PMF - a) oraz aproksymacja liniowa zmiany amplitudy wybranego minimum interferencyjnego (przerywana linia na wykresie a)) w zależności od zmiany temperatury otoczenia DRLPG i PMF - b) [32].

W tym wypadku (pomiar wpływu temperatury jednocześnie na DRLPG i PMF) zastosowanie metody różnicowej do oszacowania czułości temperaturowej platformy przetwornikowej jest niemożliwe, ponieważ wysoka temperaturowa czułość PMF powoduje przesuwanie się minimów interferencyjnych ponad okres  $\pi$  w badanym zakresie temperaturowym. Skutkuje to, iż przetwarzany sygnał od pewnej temperatury krytycznej (w eksperymencie nie określonej) zmienia swoją monotoniczność. Warto zauważyć, iż nierównomierna zmiana głębokości różnych minimów interferencyjnych, w zależności od ich położenia, pozwala na rozróżnienie odpowiedzi przetwornika na zmianę temperatury otoczenia oddzielnie DRLPG i PMF.

### 4.3.2. Czulość na zmianę naprężenia

Konfiguracja przetwornika do rejestracji sygnału pochodzącego od zmian naprężeń wzdłużnych została przedstawiona na Rysunku 27. Rozciąganie dokonano z wykorzystaniem siły grawitacyjnej poprzez dokładanie obciążników na swobodnie zwisające włókno (Rysunek 27c) poddano zarówno PMF jak i DRLPG. W każdym eksperymencie, światłowód jednomodowy - tuż przy zabezpieczonym spawie (odpowiednio z PMF lub DRLPG) - został zaciśnięty w stoliku z V-rowkiem, poprzedzając nawinięciem na kółko z U-rowkiem (Rysunek 27b). Taki układ miał zapewnić stabilne naprężenie początkowe włókna, będącego głowicą pomiarową oraz zabezpieczyć przed możliwością wysunięcia się włókna z uchwytu pod wpływem dokładanego ciężaru.



**Rysunek 27.** Schemat platformy do przetwarzania sygnału pochodzącego od wywołanych naprężeń rozciągających - a), zdjęcie układu - b), obciążniki generujące naprężenia rozciągające - c) [33].

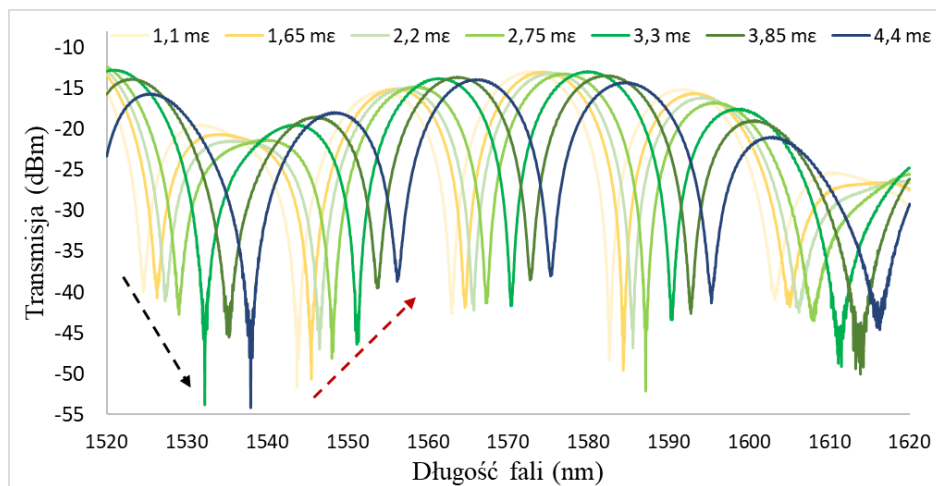
Waga obciążników zmieniających w strukturze naprężenia rozciągające mieściła się w zakresie od 10 do 40 gramów. Powyżej 40 gramów transmisja wiązki świetlnej ulegała

znaczącemu pogorszeniu. Zastosowane wartości obciążenia przekształcono do jednostkowego odkształcenia  $\varepsilon$ , stosując poniższy wzór [131]:

$$m \cdot g = E \cdot A \cdot \varepsilon, \quad (4.5)$$

gdzie:  $m$  - masa obciążników,  $g$  - przyspieszenie ziemskie,  $E$  - moduł Younga (dla krzemionki  $E \approx 7,27 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ), zaś  $A$  - pole przekroju poprzecznego włókna światłowodowego. Po przekształceniu masy obciążników na jednostkowe odkształcenie zakres pomiarowy wynosił od 1,1 mε do 4,4 mε.

Na Rysunku 28 zestawiono charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej, gdzie naprężeniom rozciągającym zostało poddane tylko PMF. Jak wynika z własności włókna wysoko dwójłomnego, wraz ze wzrostem naprężenia minima interferencyjne zgodnie z równaniem (3.11) ulegają przesunięciu w stronę fal dłużych, przy czym jest to zależne od wartości dwójłomności włókna. Zmianie ulega również głębokość minimów interferencyjnych, gdzie dla minimów odpowiadającym otoczeniu pasma absorpcyjnego DRLPG, jej wartość ulega pogłębieniu (czarna strzałka na Rysunku 28). Dla pozostałych trzech minimów interferencyjnych, poziom transmisji wzrasta przy jednoczesnym obniżeniu głębokości minimów interferencyjnych (czerwona strzałka na Rysunku 28).



**Rysunek 28.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla jednostkowych odkształceń, gdzie naprężeniu rozciągającym zostało poddane tylko PMF [33].

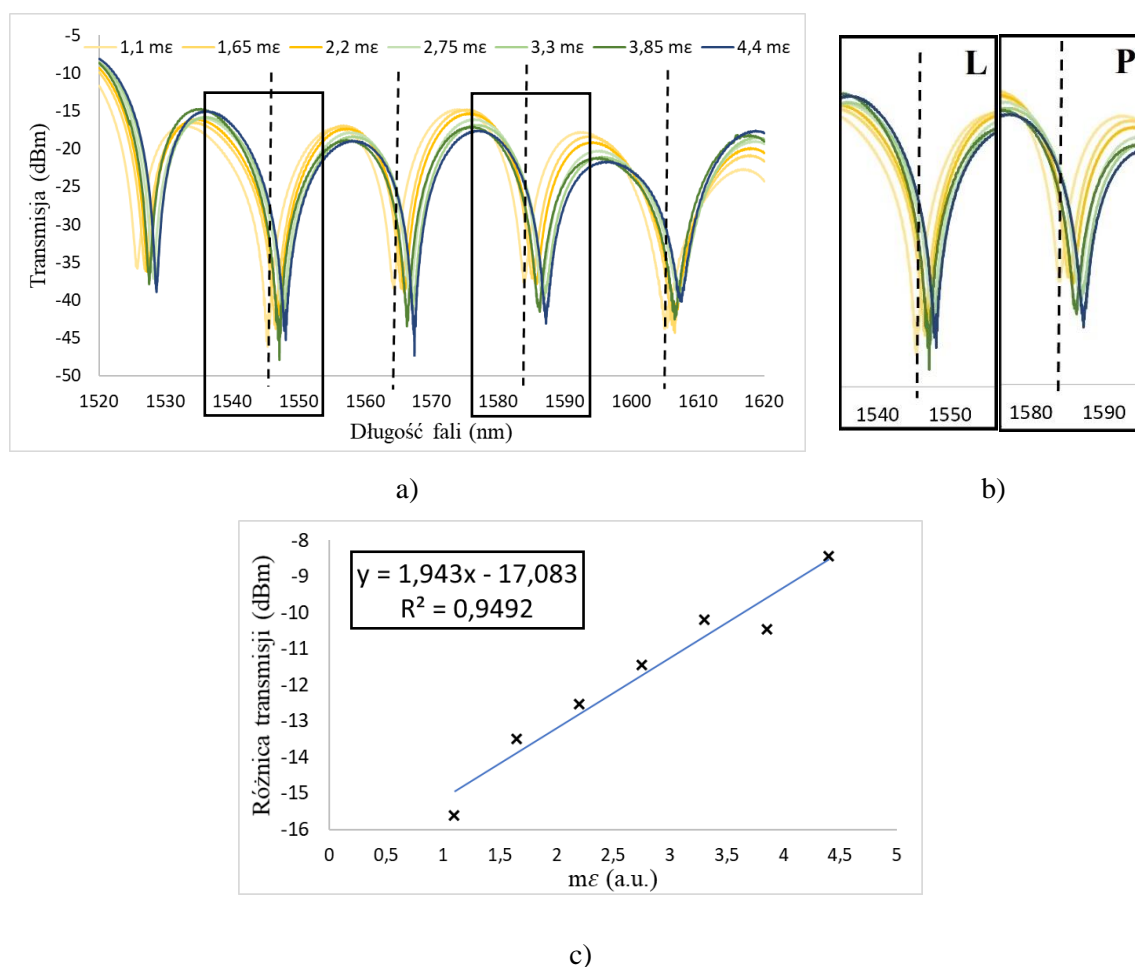
Praktyczne wykorzystanie platformy powinno bazować na wykorzystaniu taniego układu detekcyjnego, którego to kryterium nie spełnia monitorowania sygnału wyjściowego za pomocą OSA. W tym celu konieczne jest zastosowanie fotodetektora pracującego na danej długości fali, co oznacza monitorowanie zmiany wartości transmisji wybranych

minimów interferencyjnych. Jednakże jak widać z powyższych danych eksperymentalnych powstają dwa istotne ograniczenia technologiczne zaprezentowanego przetwornika: po pierwsze, w przypadku wprowadzania naprężenia rozciągającego tylko na PMF, amplituda sygnału wyjściowego zmienia się nieliniowo. Po drugie, w przypadku przekroczenia krytycznej wartości naprężenia, zmiana położenia minimum interferencyjnego może przekroczyć zakres dopuszczalnych przesunięć skutkując sytuacją, iż kolejne minima interferencyjne mogłyby przekroczyć okres oscylacji widma. Wówczas pomiar naprężeń rozciągających byłby możliwy w bardzo wąskim zakresie pomiarowym.

Z powyższych powodów, celem ekranowania wpływu na PMF niekontrolowanych zmian warunków środowiskowych, głównie przypadkowo indukowanych naprężeń, ale również zmian temperatury, w dalszych badaniach platformy, odcinek PMF został ekranowany od tych wpływów poprzez umieszczenie go w ekranującej tubie polimerowej.

Tym sposobem, naprężeniom rozciągającym poddano tylko DRLPG umieszczoną w cieczy o stałym współczynniku załamania ( $n = 1,3328$ ). Na Rysunku 29a przedstawiono odpowiedź widmową platformy przetwornikowej, gdzie odkształceniu osiowemu poddano tylko włókno z wpisaną DRLPG (charakterystyka widmowa samej struktury periodycznej została przedstawiona na Rysunku 10). Minima interferencyjne zostały przestrojone w taki sposób, aby do oszacowania czułości platformy do przetwarzania odkształcenia osiowego wywołanego obciążaniem DRLPG możliwe było zastosowanie metody różnicowej. W takim dostrojeniu pasma absorpcyjne DRLPG znajdują się pomiędzy minimami interferencyjnymi dla długości fali 1545,2 nm i 1564,3 nm oraz 1584,0 nm i 1604,9 nm. Jak wynika z charakterystyki widmowej DRLPG, wraz ze wzrostem odkształcenia osiowego, pasma absorpcyjne przesuwają się ku sobie, aż dla pewnej wartości krytycznej, gdzie ulegają połączeniu. Zjawisko to jest widoczne dla minimum interferencyjnego odpowiadającego długości fali 1567,4 nm, gdzie wraz ze wzrostem obciążenia, charakterystyka widmowa ulega pogłębieniu. Rysunek 29b przedstawia przybliżenie minimów interferencyjnych znajdujących się w okolicy pasm absorpcyjnych DRLPG. Warto zauważyć, iż wartość transmisji dla minimum zaznaczonego jako „L” ogólnie rośnie (z wyjątkiem wartości dla 3,85 mε), natomiast dla minimum zaznaczonego jako „P” wartość transmisji maleje. Dzięki temu, możliwe jest zastosowanie omawianej uprzednio różnicowej metody do wyznaczenia czułości na odkształcenie osiowe charakteryzowanej platformy. Wyznaczono różnicę pomiędzy wartościami transmisjami dla minimów interferencyjnych dla długości fali 1545,2 nm i 1564,3 nm (pierwsze dwa minima interferencyjne zaznaczone na Rysunku 29a

czarnymi przerywanymi liniami) oraz pomiędzy 1584,0 nm i 1604,9 nm (dwa kolejne minima interferencyjne zaznaczone na Rysunku 29a czarnymi przerywanymi liniami) Następnie wyznaczono różnicę pomiędzy otrzymanymi danymi i wyznaczono zależność różnicy wartości transmisji od jednostkowego odkształcenia osiowego (Rysunek 29c). Zależność ta jest liniowa, natomiast z aproksymacji wynika, iż szacowana czułość na odkształcenia osiowe platformy przetwornikowej (współczynnik nachylenia prostej) wynosi 1,943 dBm/mε przy współczynniku korelacji  $R^2 = 0,9492$ . Została również wyznaczona niepewność standardowa, która wyniosła 0,091 dBm/mε, co daje wartość niepewności względnej 4,6%.



**Rysunek 29.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla jednostkowych odkształceń, gdzie naprężeniom rozciągającym została poddana DRLPG - a), przybliżenie pierwszego i czwartego minimum interferencyjnego - b) oraz liniowa zależność transmisji w funkcji jednostkowych naprężeń określona poprzez wykorzystanie metody różnicowej - c) [33].

#### 4.3.3. Czulość na zmianę zewnętrznego współczynnika załamania

Biorąc pod uwagę właściwości dyspersyjne struktury periodycznej oraz możliwości zastosowania platformy jako przetwornika wielkości chemicznych/biologicznych,

scharakteryzowanie platformy pod względem odpowiedzi układu na zmianę RI otoczenia jest zasadniczym zadaniem niniejszej pracy. Ponieważ PMF nie zostało w żaden sposób zmodyfikowane, zatem jest ono nieczułe na zmianę RI otoczenia. Tym samym w prezentowanej platformie DRLPG stanowi głowicę pomiarową RI cieczy, w której jest umieszczone, zaś FLM z PMF stanowi filtr optyczny, umożliwiający pomiar zmiany wartości transmisji minimum interferencyjnego wraz z wykorzystaniem zaproponowanej metody różnicowej, co prowadzi do uzyskania możliwie najwyższej czułości platformy na zmianę zewnętrznego RI.

Do pomiarów zmian RI cieczy, wykorzystano układ schematycznie prezentowany na Rysunku 27a bez elementów obciążających. U-rowek, w którym umieszczono DRLPG, został przymocowany do zestawu mikro przesuwów umożliwiających ruch w trzech kierunkach  $x$ - $y$ - $z$  (Rysunek 27b). Dzięki temu, włókno z wpisaną siatką można centralnie spozycjonować w U-rowku z cieczą tak, by grubość cieczy o danym RI była jednakowa ze wszystkich stron. Ponadto, ruch w osi pionowej pozwala na zmianę cieczy w U-rowku, bez konieczności demontażu jakiegokolwiek elementu układu, tym samym nie zakłóca rejestrowanego sygnału i eliminuje błędy grube. Ze względu na dokładność pomiarową RI cieczy rzędu  $10^{-4}$ , konieczna jest wysoka precyzja pomiarowa oraz zachowana czystość i standaryzacja procedury pomiarowej. Z tego względu, procedura pomiarowa zawierała następujące etapy:

- obniżenie stolika translacyjnego do wysokości zapewniającej bezawaryjne oczyszczanie powierzchni DRLPG,
- czyszczenie powierzchni DRLPG alkoholem etylowym i bezpyłową chusteczką,
- czyszczenie U-rowka przepłukując dwukrotnie alkoholem etylowym, wycieranie chusteczką bezpyłową,
- kontrolny pomiar RI cieczy, w której ma być umieszczone DRLPG, za pomocą elektronicznego refraktometru z odczytem dla żółtej linii sodu (589 nm) oraz z automatyczną kompensacją temperatury.

Przed przystąpieniem do procedury pomiarowej przygotowane zostały fiołki z cieczami o konkretnych RI będące mieszaniną wody destylowanej oraz gliceryny. Współczynnik załamania każdej z przygotowanej mieszaniny został zmierzony dziesięciokrotnie i uśredniony metodą najmniejszych kwadratów. Przed zanurzeniem DRLPG w danej cieczy, RI mierzony był ponownie. Następnie dokonywano:



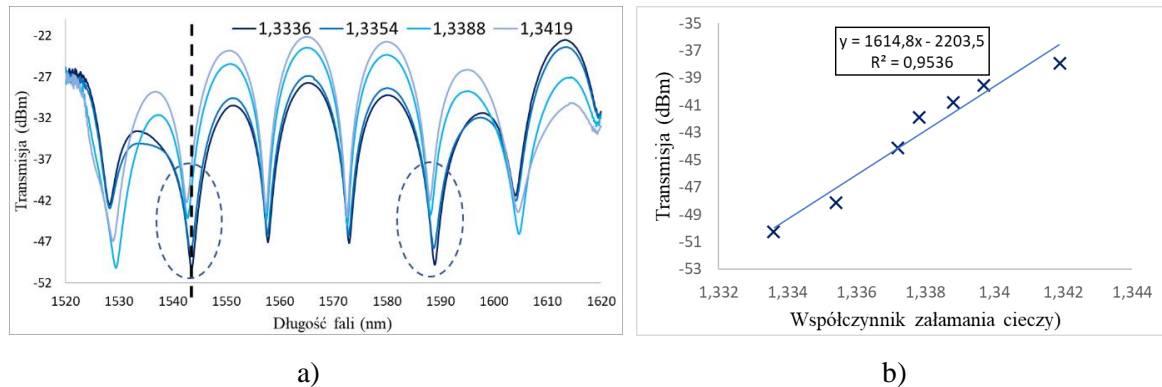
- podniesienie stolika translacyjnego do poziomu, w którym DRLPG będzie znajdowała się w centralnej części U-rowka,
- wypełnienie U-rowka cieczą o danym RI za pomocą pipety jednorazowej.

Wszystkie etapy wymiany cieczy z U-rowka odbywały się w czasie ciągłej rejestracji sygnału, tak, by potencjalne naruszenie konstrukcji platformy pomiarowej było możliwe do zaobserwowania. Podczas wszystkich pomiarów przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy nie zaobserwowano takiego przypadku, co świadczy o wysokiej odporności mechanicznej układu na przypadkowe uszkodzenia.

Rysunek 30 przedstawia odpowiedź skonstruowanego przetwornika na zmiany RI cieczy, w której zanurzono DRLPG. Zakres pomiarowy rozpoczynał się od RI bliskiego wody destylowanej ( $n = 1,3336$ ), natomiast na żadnym etapie eksperymentalnym nie przekraczał 1,343. Górna granica zakresu pomiarowego wynika z właściwości dyspersyjnych DRLPG, gdzie powyżej krytycznej wartości RI otocznia struktury periodycznej, zanika sprzężenie modu podstawowego z dedykowanym modem płaszczowym. W takim wypadku następuje całkowite wypłaszczenie charakterystyki widmowej DRLPG, uniemożliwiające obserwowanie zjawisk rezonansowych. Z Rysunku 30 wynika, iż wartość transmisji dla całego zarejestrowanego zakresu widmowego wraz ze zwiększeniem się RI cieczy ulega wzrostowi, co jest zgodne z zależnością przedstawioną na Rysunku 11b. Wyjątek stanowią dwa skrajne minima interferencyjne, gdzie wartość transmisji znacząco spada wraz ze wzrostem RI. Zjawisko to mogłoby stanowić odpowiedni punkt odniesienia podczas pomiaru zmiany głębokości minimów interferencyjnych, jednakże dla tych długości fali, minima przesuwają się zbyt mocno (szczególnie dla długości fali 1528,2 nm). Powyższa, istotna zmiana położenia minimum interferencyjnych uniemożliwia pomiar RI poprzez monitoring poziomu wartości transmisji dla danej długości fali. Położenie pozostałych minimów interferencyjnych nie ulega przesunięciu w funkcji długości fali lub przesuwa się nieznacznie. Dwa kolejne minima interferencyjne, dla długości fali 1543,5 nm i 1588,9 nm (na Rysunku 30a zaznaczone przerywanymi okręgami) wykazują znacznie większą tendencję do zmiany wartości transmisji w odróżnieniu od pozostałych. Z tego powodu do pomiaru zmian transmisji wybrano minimum interferencyjne dla długości fali 1543,5 nm (przerywana pionowa linia na Rysunku 30a) dla którego wyznaczono zależność zmiany wartości transmisji w funkcji RI cieczy otaczającej DRLPG (Rysunek 30b) Z aproksymacji liniowej



otrzymano szacowaną czułość przetwornika na zmianę RI otoczenia DRLPG, przy monitorowaniu wartości transmisji jednego minimum interferencyjnego. Czułość ta szacowana jest na 1614,8 dBm/RIU (RIU to jednostkowy współczynnik załamania cieczy), przy współczynniku korelacji  $R^2 = 0,9536$ .



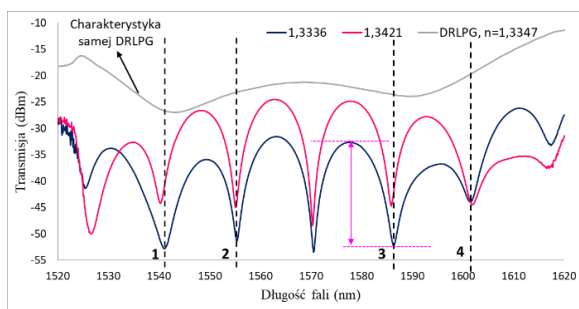
**Rysunek 30.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla cieczy o różnych wartościach RI - a) oraz liniowa zależność transmisji dla wybranego minimum interferencyjnego w funkcji RI cieczy otaczającej DRLPG - b) [31].

Odnosząc się do istniejących w literaturze danych, gdzie według autora niniejszej rozprawy występuje jedna pozycja [132] dotycząca szacowania czułości jako pomiaru wartości transmisji dla wybranego wygaszenia i/bądź długości fali (w dBm/RIU), uzyskana szacowana czułość jest o rząd wielkości wyższa. Jak podają w tej pracy Chu i inni [132] oszacowana czułość na zmianę zewnętrznego RI wynosi 103,2 dB/RIU dla zakresu  $n$  od 1,38 do 1,45, przy czym w FLM umieszczono standardową LPG, tj. z pojedynczym pasmem absorpcyjnym.

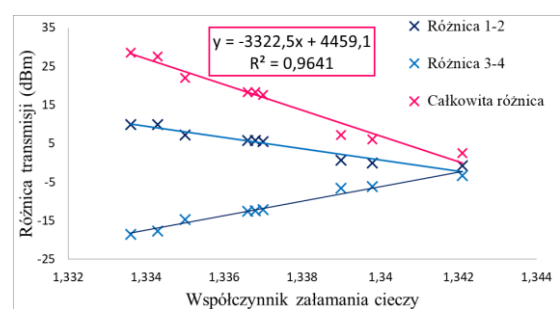
Czułość przetwornika wielkości fizykochemicznych zależy również od SOP wiązek propagujących się w FLM, albowiem to od niego uzależnione jest położenie minimów interferencyjnych oraz ich głębokość. Dodatkowo, zmiana wartości transmisji w minimach interferencyjnych przy bardzo niewielkim ich przesunięciu widmowym przy zmianie wartości RI cieczy otaczającej DRLPG pozwala na zastosowanie metody różnicowej do oszacowania czułości przetwornika na zmianę RI zewnętrznego medium. Rysunek 31a i Rysunek 31c przedstawiają charakterystyki widmowe dla wybranych wartości RI otoczenia DRLPG oraz charakterystykę samej DRLPG dla dwóch różnych SOP (dalej używane jako: pierwszy SOP - dla Rysunku 31a oraz drugi SOP - dla Rysunku 31c) wiązki propagującej się w FLM. SOP dla drugiego przypadku został ustawiony w taki sposób, aby zmianie uległa głębokość minimów interferencyjnych, natomiast ich położenie zostało bez zmian. Dodatkowo, dla drugiego SOP oddziałujących wiązek, obniżeniu uległa całkowita

charakterystyka widmowa przetwornika. Głębokość minimum interferencyjnego zaznaczonego jako numer 3 (różowa strzałka na Rysunku 31a) wynosi odpowiednio 18,1 dBm i 22,0 dBm dla pierwszego i drugiego SOP, natomiast dla minimum interferencyjnego zaznaczonego jako 4 wynosi odpowiednio 7,4 dBm i 10,4 dBm. Również i dla tych pomiarów, głębokości minimów interferencyjnych odpowiadających pasmom absorpcyjnym DRLPG (minimum numer 1 i 4) zmieniają się w bardziej dynamiczny sposób niż pozostałe minima (numer 2 i 3). Do oszacowania czułości przetwornika na zmianę zewnętrznego RI zastosowano metodę różnicową, w której po wybraniu 4 minimów interferencyjnych (zaznaczone na Rysunku 31a i Rysunku 31c czarnymi przerywanymi liniami) obliczono różnicę w wartości transmisji pomiędzy 1 i 2 oraz 3 i 4, a następnie różnicę między uzyskanymi wynikami. Wykreślono zależność zarówno dla dwóch pierwszych różnic (Różnica 1-2 i Różnica 3-4 na Rysunku 31b i Rysunku 31d) oraz całkowitą różnicę. Dla pierwszego SOP uzyskano szacowaną czułość 3322,5 dBm/RIU przy współczynniku korelacji  $R^2 = 0,9641$ , natomiast dla drugiego SOP czułość ta jest wyższa i wynosi 3871,5 dBm/RIU przy współczynniku korelacji  $R^2 = 0,9360$ . Niepewność standardowa wynosi 10,1 dBm/RIU, natomiast niepewność względna 3%.

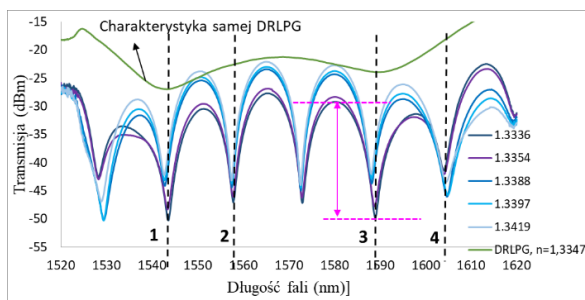
Z powyższych wyników można wnioskować, iż większa głębokość minimów interferencyjnych wynikająca z konkretnego SOP oddziałujących wiązek pozwala na osiągnięcie wyższej czułości przetwornika na zmianę zewnętrznego RI. Jednakże różnica w oszacowanych czułościach nie jest bardzo drastyczna i rząd wielkości jest zachowany. Zatem newralgiczną procedurą przy uzyskaniu możliwie najwyższej czułości przetwornika jest odpowiednie ustawienie minimów interferencyjnych w stosunku do charakterystyki DRLPG.



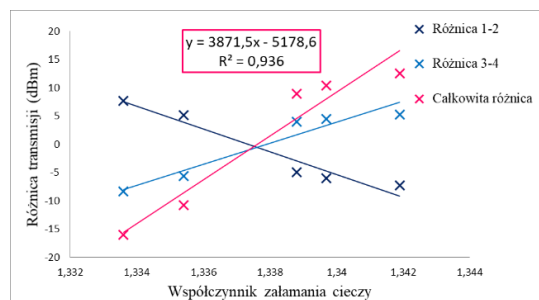
a)



b)



c)



d)

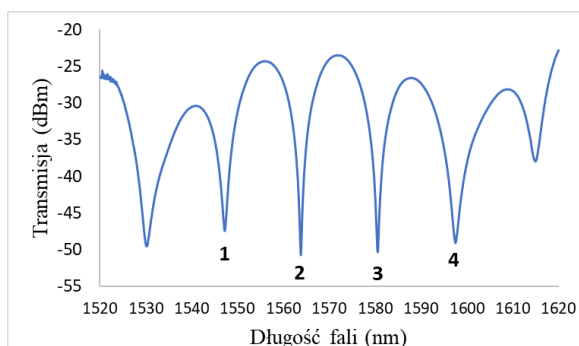
**Rysunek 31.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej w warunkach zmieniającego się RI cieczy otaczającej DRLPG dla dwóch różnych SOP wiązki propagującej się w FLM – a) i - c) oraz liniowa zależność różnicy transmisji od RI cieczy otaczającej DRLPG przy zastosowaniu różnicowej metody pomiaru – b) i - d) [31].

#### 4.3.4. Stabilność przetwornika wielkości fizykochemicznych

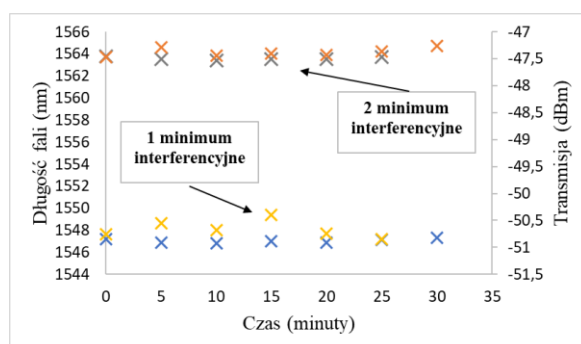
Praktyczne wykorzystanie charakteryzowanej platformy do monitorowania konkretnego materiału chemicznego i/lub biologicznego oraz jako czujnika fizycznego (np. temperatury, naprężenia), wymaga określenia stabilności układu. Badania przeprowadzono w dwojaki sposób: po pierwsze, przeanalizowano stabilność czasową, po drugie przeprowadzono badania wykazujące powtarzalność pomiaru pod względem możliwości powrotu charakterystyki widmowej do stanu początkowego. Parametry, które zostały wzięte pod uwagę przy szacowaniu stabilności, odpowiadają wielkościom fizycznym pod kątem których została przebadana platforma (rozdziały 4.3.1 - 4.3.3), tj.: temperatura, naprężenia wzdłużne oraz współczynnik załamania ośrodka.

Rysunek 32a przedstawia wyjściową charakterystykę widmową, którą monitorowano w celu oszacowania stabilności układu w czasie. Temperatura wyjściowa wynosiła 23,2 °C i została mierzona za pomocą termopary z głowicą aluminiową przymocowaną do ceramicznej płytki grzewczej. Czas, w którym mierzono stabilizację układu wynosił 35 minut, a pomiar rejestrowano co 5 minut. Po upływie 35 minut, temperatura spadła o 0,1 °C. DRLPG została zanurzona w cieczy o współczynniku załamania  $n = 1,3395$ , a sam U-rowek został przykryty osłonką. Na Rysunku 32a zaznaczono numerami 1-4 kolejne minima interferencyjne, których stabilność w szczególności monitorowano, ze względu na wykorzystanie ich do różnicowej metody oszacowania czułości platformy. Rysunek 32b przedstawia fluktuacje przesunięcia długości fali i wartości transmisji w minimach interferencyjnych oznaczonych numerami 1 i 2 w funkcji czasu, natomiast Rysunek 32c te zależności dla miniów interferencyjnych oznaczonych numerem 3 i 4. Dla wszystkich minimów interferencyjnych zmiany długości fali bądź ich głębokości

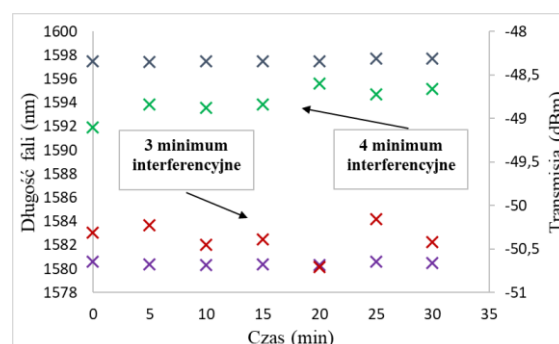
są niewielkie i niezależne od czasu. Stąd, stabilność układu w czasie określono z maksymalnym błędem bezwzględnym wynoszącym odpowiednio: dla długości fali - 0,1 nm oraz dla wartości transmisji - 0,4 dBm.



a)



b)



c)

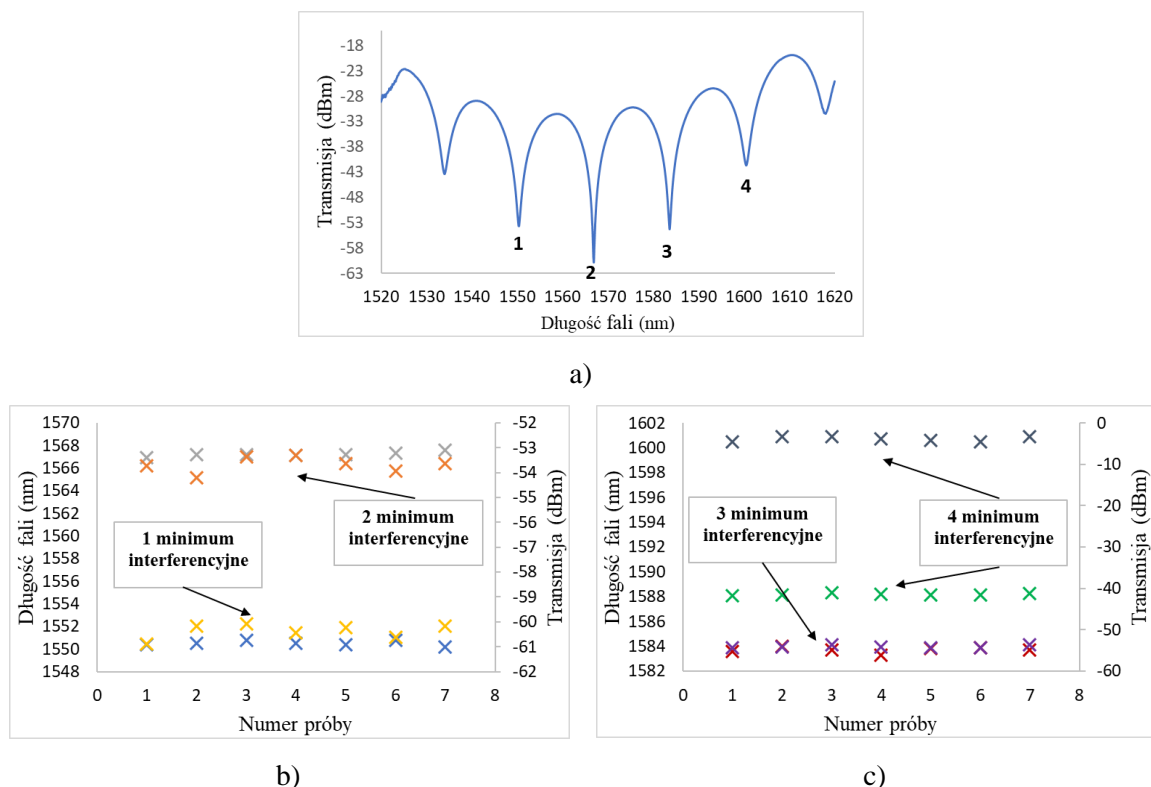
**Rysunek 32.** Czasowa stabilność platformy do przetwarzania wielkości fizykochemicznych dla minimumów interferencyjnych 1 i 2 - a) oraz 3 i 4 - b) zaznaczonych na charakterystyce widmowej (a). Kolorem szarym i niebieskim na (b) oraz szarym i fioletowym na (c) zaznaczono fluktuacje długości fali, pozostałe punkty pomiarowe to fluktuacji wartości transmisji.

Następnie przeanalizowano powtarzalność pomiaru jako możliwość powrotu układu do zadanych parametrów początkowych. Badania te, miały na celu zweryfikowanie: czy powierzchnia DRLPG nie ulega degradacji pod wpływem działających czynników fizykochemicznych oraz czy zmiana parametrów otoczenia platformy nie wpływa na rozstrojenie platformy przetwornikowej.

#### Powtarzalność pomiarów temperatury.

Powtarzalność temperaturową oszacowano dla RI cieczy otaczającej DRLPG  $n = 1,3395$ , przy czym działaniu temperatury poddano zarówno DRLPG jak i PMF. Te dwa czułe elementy przetwornika umieszczone były na ceramicznej płytce grzewczej tuż obok siebie, natomiast U-rowek z cieczą i zanurzonej w niej DRLPG przykryte były osłonką zapobiegającą wyparowaniu cieczy. Temperatura początkowa została ustalona na  $30,3^{\circ}\text{C}$

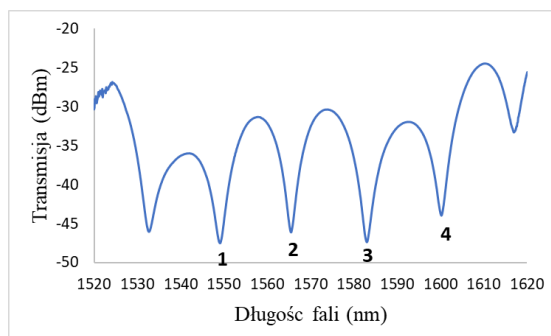
i dla tej wartości zarejestrowano widmową charakterystykę platformy (Rysunek 33a). Należy zauważyć, iż charakterystyka ta znacznie różni się od wszystkich pozostałych opisywanych w ramach niniejszej pracy co jest spowodowane oddziaływaniem dwóch wielkości fizycznych na czułe elementy przetwornika w tym samym czasie: podwyższonej temperaturze oraz podwyższonego RI w stosunku do temperatury pokojowej i RI wody destylowanej. Procedura pomiarowa zawierała następujące etapy: ustabilizowanie temperatury wyjściowej (30,3 °C), stopniowe podwyższanie temperatury otoczenia DRLPG i PMF do 40,3 °C, wyłączenie dopływu natężenia prądu do ceramicznej płytki grzewczej do czasu osiągnięcia początkowej temperatury 30,3 °C, ponowna stabilizacja temperatury początkowej, rejestracja widma transmisyjnego. Wykonano 7 powtórzeń powyższej procedury. Na Rysunku 33b i Rysunku 33c przedstawiono fluktuacje długości fali i wartości transmisji w funkcji kolejnych powtórzeń. Powtarzalność pomiarów temperaturowych oszacowano na 0,7 nm dla długości fali oraz 0,6 dBm dla wartości transmisji.



**Rysunek 33.** Temperaturowa powtarzalność charakterystyki widmowej z temperaturą początkową 30,3 °C. Wyjściowa charakterystyka widmowa - a), fluktuacje długości fali i wartości transmisji w minimach interferencyjnych 1 i 2 - b) oraz 3 i 4 - c). Kolorem szarym i niebieskim na (b) oraz szarym i fioletowym na (c) zaznaczono fluktuacje długości fali, pozostałe punkty pomiarowe to fluktuacje wartości transmisji.

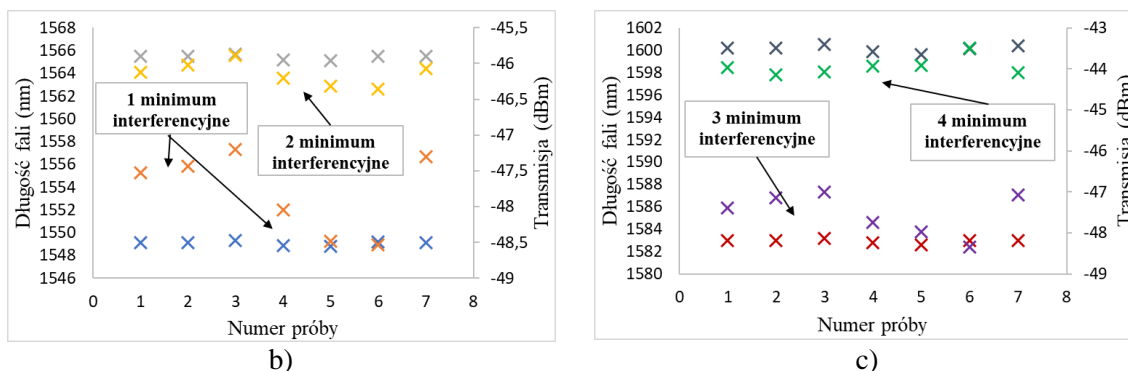
### Powtarzalność pomiarów naprężeń wzdluznych.

Powtarzalność działania platformy dla zadanych naprężeń wzdluznych ustalono w warunkach temperatury pokojowej oraz RI cieczy otaczającej DRLPG bliskiej wartości wody destylowanej ( $n=1,3338$ ). Dla nieobciążonych elementów czułych zarejestrowano charakterystykę widmową przedstawioną na Rysunku 34a. Obciążeniu zostało poddana zarówno DLPG jak i PMF, a wartość dla jakiej przeprowadzony został eksperyment po przeliczeniu na jednostkową wartość naprężenia wynosiła 2,75 mε. Wykonano 7 prób obciążenia elementów czułych, gdzie procedura każdej próby była następująca: rejestracja widma przed obciążeniem, wprowadzenie określonego naprężenia za pomocą ciężarków o zadanej masie na DRLPG i PMF, stabilizacja układu i widma transmisyjnego, zdjęcie obciążenia i ponowna stabilizacja widmowa, rejestracja widma transmisyjnego. Rysunek 34b i Rysunek 34c przedstawiają fluktuacje wartości transmisji i długości fali dla 4 kolejno oznaczonych minimów interferencyjnych. Warto zauważyć, iż największe fluktuacje występują dla wartości transmisji minimum interferencyjnego oznaczonego numerem 1 i 3 i jest to związane z pokryciem dla tej długości fali dwóch pasm absorpcyjnych DRLPG. Oznacza to, iż DRLPG wykazuje się znacznie wyższą niepewnością pomiarową dla naprężeń wzdluznych niż samo PMF. Ze względu na zastosowanie metody różnicowej, analizie powtarzalności muszą być poddane wszystkie oznaczone minima interferencyjne. W związku z tym, fluktuacje w wartości transmisji szacowane są na 1 dBm i jest to maksymalny błąd bezwzględny. Analizując przesunięcia minimów interferencyjnych w funkcji długości fali, niestabilność ta jest niewielka i szacowano ją na 0,3 nm. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę, iż podawane czułości charakteryzowanej platformy wyrażane są w jednostce wartości transmisji, przyjęto, iż fluktuacje w długości fali dla pomiaru naprężeń wzdluznych w tym przypadku mają nieznaczny wpływ na szacowaną powtarzalność.



a)

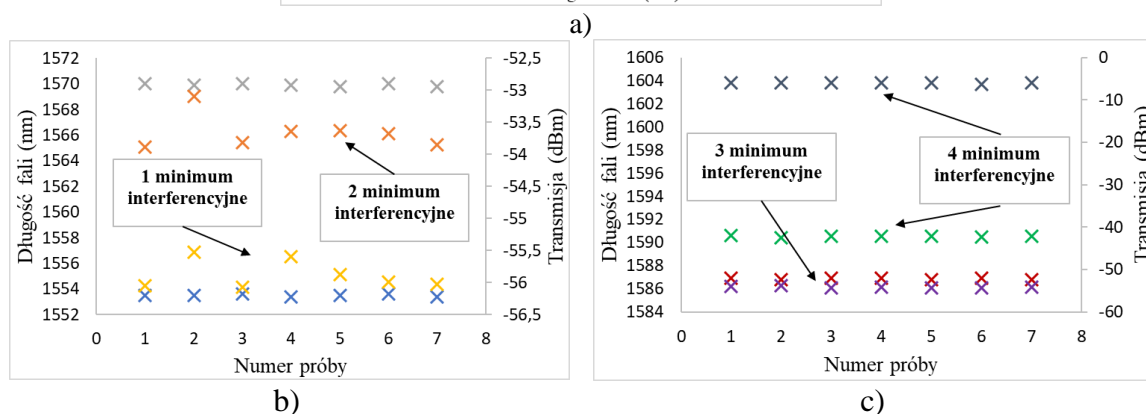
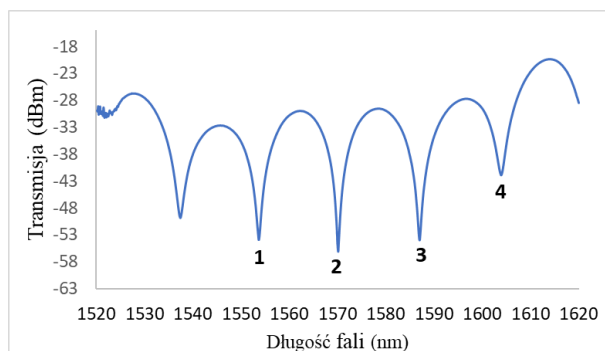




**Rysunek 34.** Powtarzalność naprężeniowa charakterystyki widmowej dla temperatury pokojowej i RI cieczy  $n=1,3338$ . Wyjściowa charakterystyka widmowa - a) fluktuacje długości fali i wartości transmisji minimumów interferencyjnych 1 i 2 - b) oraz 3 i 4 - c). Kolorem szarym i niebieskim na (b) oraz szarym i fioletowym na (c) zaznaczono fluktuacje długości fali, pozostałe punkty pomiarowe to fluktuacje wartości transmisji.

### Powtarzalność pomiarów zmian współczynnika załamania.

Badania powtarzalności pomiarów przetwornika przy monitorowaniu RI cieczy otaczającej DRLPG oszacowano w warunkach temperatury pokojowej, która przez cały czas trwania eksperymentu była kontrolowana. Biorąc pod uwagę, iż zastosowany PMF jest nieczuły na zmianę RI otoczenia, badaniu poddana została struktura DRLPG. RI cieczy, dla której przebadano platformę wynosił 1,3356. Procedura przeprowadzonego eksperymentu sprowadzała się do następujących etapów: wyczyszczenie powierzchni DRLPG alkoholem etylowym, wypełnienie U-rowka cieczą o znanym RI (dodatkowo określonej za pomocą elektronicznego refraktometru), zanurzenie DRLPG w U-rowka z cieczą, rejestracja charakterystyki widmowej, opróżnienie U-rowku z cieczy, precyzyjne czyszczenie powierzchni DRLPG oraz U-rowka alkoholem etylowym. Procedurę powtórzono 7 razy. Pierwsza zarejestrowana charakterystyka widmowa została przedstawiona na Rysunku 35a, natomiast fluktuacje długości fali i wartości transmisji dla poszczególnych minimumów interferencyjnych w kolejnych próbach zestawiono na Rysunku 35b i Rysunku 35c. Kolorem szarym i niebieskim na Rysunku 35b oraz szarym i fioletowym na Rysunku 35c zaznaczono fluktuacje długości fali, która jest bardzo niewielka i została oszacowana na 0,1 nm. Pozostałe punkty pomiarowe to fluktuacje wartości transmisji dla poszczególnych minimumów interferencyjnych, które również wykazują się dużą powtarzalnością, gdzie maksymalny błąd bezwzględny wynosi 0,4 dBm. Warto zauważyć, iż dla minimumów interferencyjnych oznaczonych jako 3 i 4, powtarzalność ta jest dużo wyższa niż dla minimumów interferencyjnych 1 i 2.



**Rysunek 35.** Powtarzalność charakterystyki widmowej dla RI cieczy otaczającej DRLPG  $n = 1,3356$  - a), fluktuacje długości fali i wartości transmisji dla minimum interferencyjnych 1 i 2 - b) oraz 3 i 4 - c). Kolorem szarym i niebieskim na (b) oraz szarym i fioletowym na (c) zaznaczono fluktuacje długości fali, pozostałe punkty pomiarowe to fluktuacje wartości transmisji.

Z przeprowadzonych analiz stabilności platformy przetwornikowej można wywnioskować, iż układ jest stabilny w czasie jak i charakteryzuje się powtarzalnością pomiarów. Układ charakteryzuje się najlepszą powtarzalnością pomiarów dla pomiaru RI otoczenia DRLPG, natomiast największą fluktuację można zauważyć przy pomiarze temperatury. We wszystkich pomiarach większą niestabilnością charakteryzuje się wartość transmisji dla minimum interferencyjnych. Należy podkreślić, iż rozkład fluktuacji nie jest jednakowy dla wszystkich monitorowanych minimum i w każdym przeprowadzonym eksperymencie mniejsze fluktuacje można dostrzec przy minimum interferencyjnym z numerem 3 i 4. Niemniej jednak, podane wartości szacowanych niestabilności są wielkościami uśrednionymi.

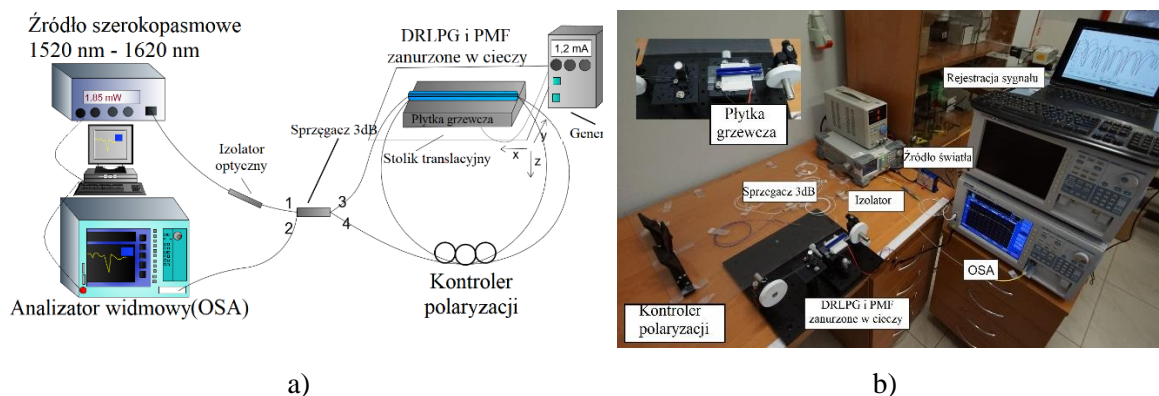
## 5. Dwupunktowy przetwornik parametrów fizykochemicznych na bazie długookresowej siatki światłowodowej umieszczonej w pętli interferometrycznej

Połączenie dwóch czułych struktur charakteryzowanej platformy, tj. struktury periodycznej oraz interferometru pętlowego, pozwala na wykorzystanie ich do równoczesnego pomiaru dwóch wielkości fizycznych. Do tego zagadnienia można podejść na dwa sposoby: stworzenie platformy dwupunktowej pozwalającej na wyeliminowanie



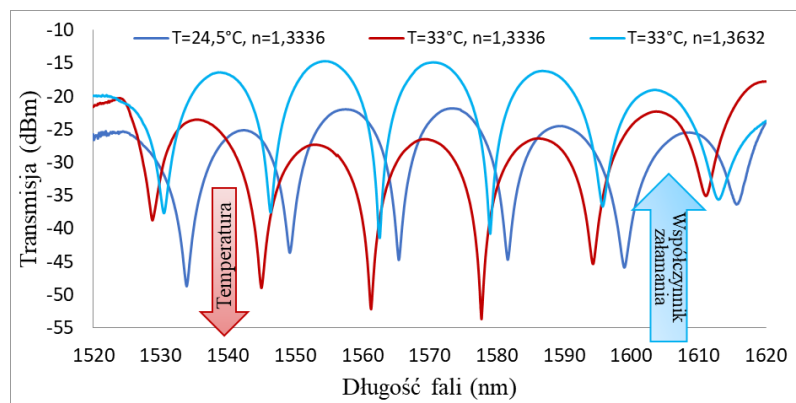
ograniczenia nieliniowości w przetwarzaniu charakterystyki interferometru lub wykorzystanie przetwornika jako czujnik RI (utożsamianego z substancją chemiczną lub materiałem biologicznym) z jednoczesną kompensacją wpływu temperatury. Powszechnym podejściem do detekcji zmian naprężeń i temperatury jednocześnie jest stworzenie czujnika dwupunktowego poprzez wykorzystanie LPG lub/i FLM [133], [134], [135]. W podejściu tym, LPG pozwala na rozróżnienie sygnału pochodzącego osobno od naprężeń wprowadzonych mechanicznie oraz od naprężeń związanych ze zmianą temperatury. Natomiast wykorzystując zdolność LPG do przetworzenia sygnału pochodzącego od zmian zewnętrznego RI oraz wysoką czułość PMF na zmianę temperatury możliwe jest skonstruowanie platformy rozróżniającej sygnał pochodzący od tych dwóch parametrów fizycznych [136], [137]. Istotne korzyści takiego rozwiązania wynikają z właściwości DRLPG, której zasadniczą cechą jest „ultraczułość”, co jest jednym z elementów nowatorstwa niniejszej rozprawy. Jednocześnie, rozważając możliwość budowy hybrydowej platformy według zasygnalizowanego powyżej drugiego podejścia, wykorzystanie do pomiarów substancji chemicznych lub/i biologicznych układu złożonego z FLM zawierającego zarówno DRLPG jak i odcinek PMF który jest czuły na zmianę temperatury a nieczułego na zmianę zewnętrznego RI, pozwala na efektywne wyeliminowanie wpływu temperaturowych fluktuacji na przetwarzany sygnał.

Konfiguracja układu do jednoczesnego monitoringu RI cieczy oraz temperatury otoczenia wykorzystująca DRLPG i PMF przedstawiona jest na Rysunku 36. Również w tym przypadku, DRLPG i PMF zostało umieszczone na płycie grzewczej w niewielkiej odległości od siebie, co miało zapewnić identyczne warunki podczas przeprowadzania eksperymentu. Parametry, które ulegały zmianie podczas pomiarów to RI cieczy otoczenia DRLPG oraz temperatura otoczenia zarówno DRLPG jak i PMF. W celu zapewnienia wysokiej precyzji pomiarowej, każda rejestracja charakterystyki widmowej odbywała się po kilkuminutowej stabilizacji zadanych parametrów – temperatury i wartości RI cieczy pomiarowej ze szczególną uwagą na ujednoczenie temperatury otaczającej zarówno DRLPG jak i PMF.



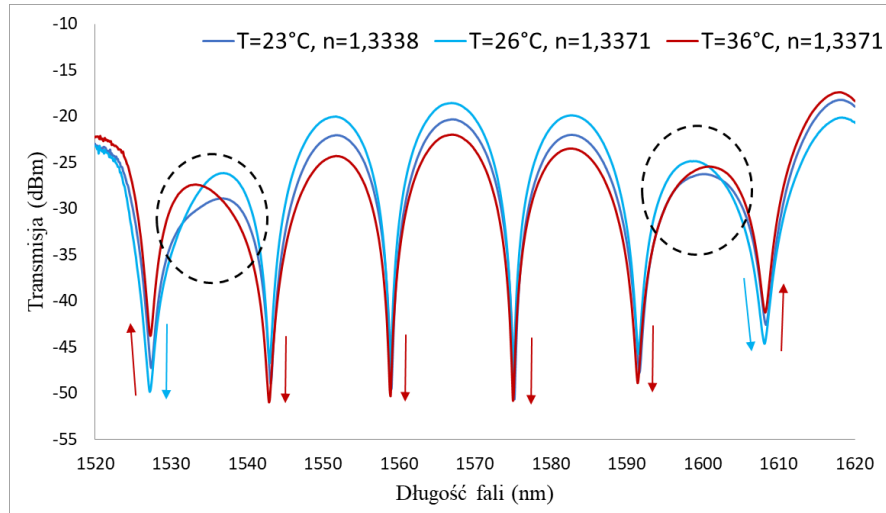
**Rysunek 36.** Schemat układu do jednoczesnego pomiaru wartości RI cieczy i temperatury - a), widok układu eksperymentalnego - b) [32].

Na Rysunku 37 przedstawiono odpowiedź przetwornika na jednoczesną zmianę temperatury i RI cieczy. Dla zmian temperatury przy zachowaniu stałej wartości RI cieczy (czerwona charakterystyka na Rysunku 37), widmo transmisyjne całościowo ulega obniżeniu (czerwona strzałka na Rysunku 37), z jednoczesnym przesunięciem minimów interferencyjnych w kierunku fal krótszych. Należy zauważyć, iż wartość transmisji dla poszczególnych minimów interferencyjnych zmienia się niejednorodnie - dla długości fali które pokrywają się (lub są w sąsiedztwie) pasm absorpcyjnych DRLPG minima mają mniejszą głębokość (minima przesuwają się ku górze), natomiast dla pozostałych długości fal znacząco się pogłębiają. W przypadku zmiany zarówno temperatury jak i RI cieczy, transmisja całościowo znacząco się podnosi (jasnoniebieska charakterystyka na Rysunku 37), zaś różnica pomiędzy wartością transmisji dla minimów interferencyjnych pomiędzy minimami odpowiadającymi pasmom absorpcyjnym DRLPG do wartości transmisji dla minimów odpowiadającym pasmom absorpcyjnym znacznie się zmniejsza. Dla tych oddziaływań minima interferencyjne również przesuwają się w stronę fal krótszych, natomiast przesunięcie to jest dużo mniejsze niż w przypadku zmiany samej temperatury. Oznacza to, iż zmiana RI powoduje przesunięcie minimów interferencyjnych w przeciwną stronę niż podczas zmiany samej temperatury otoczenia. Innymi słowy, odpowiedź układu na zmianę temperatury i RI jest przeciwna. Tym samym odmienne zachowanie układu w zakresie kierunku zmian długości fali odpowiadającej minimom interferencyjnym przypadającym na pasma absorpcyjne DRLPG pozwala na zastosowanie metody różnicowej do oszacowania czułości platformy na dedykowane parametry fizykochemiczne.



**Rysunek 37.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej w warunkach zmiennej temperatury i współczynnika załamania cieczy [32].

Należy zaznaczyć, iż charakter odpowiedzi rozważanej platformy pomiarowej może różnić się w zależności od SOP wiązek propagujących się w FLM. Kiedy SOP wiązki propagującej się w FLM zostanie zmieniony w taki sposób, że nastąpi przesunięcie minimów interferencyjnych w położenie pomiędzy pasma absorpcyjne DRLPG zmiana ulega tylko transmisja poszczególnych minimów interferencyjnych (Rysunek 38). Na tym rysunku przerywanymi obręczami zaznaczono miejsca odpowiadające pasmom absorpcyjnym DRLPG, gdzie widoczne są fluktuacje charakterystyki spowodowane zmianami  $T$  i  $n$ . Dla niewielkich (w porównaniu z Rysunkiem 37) zmian RI cieczy, tj.  $10^{-3}$ , przesunięcia minimów interferencyjnych w funkcji długości fali nie występują. Również w tym przypadku, wartość transmisji zmienia się niejednorodnie dla poszczególnych minimów interferencyjnych w warunkach jednoczesnej zmiany temperatury i RI, tj. dla długości fali 1527,1 nm i 1608,0 nm wartość transmisji ulega obniżeniu (zaznaczono niebieskimi strzałkami na Rysunku 38), natomiast wartość transmisji dla pozostałych minimów interferencyjnych ulega zwiększeniu. Zjawisko to może nie być widoczne na Rysunku 38 ze względu na nałożenie się na siebie charakterystyk widmowych. Jednocześnie wartość transmisji dla czterech środkowych minimów interferencyjnych ulega wzrostowi adekwatnie do całego widma. Kolejna zmiana temperatury przy zachowaniu stałego RI cieczy (charakterystyka zaznaczona kolorem czerwonym na Rysunku 38) skutkuje przeciwną odpowiedzią platformy. Wartość transmisji dla minimów interferencyjnych przypadających dla długości fali 1527,1 nm i 1608,0 nm ulega wzrostowi, natomiast dla pozostałych środkowych minimów interferencyjnych wartość transmisji maleje (zaznaczone czerwonymi strzałkami na Rysunku 38).



**Rysunek 38.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej w warunkach zmiennej temperatury i RI cieczy przy zmianie SOP wiązek propagujących się w FLM [32].

Określenie maksymalnej czułości platformy do jednoczesnego przetwarzania powyższych wielkości fizycznych można przedstawić za pomocą metody macierzy odwróconej [138]. Przy założeniu, iż elementy czułe platformy, tj. DRLPG i PMF, narażone są na takie same oddziaływanie warunków środowiskowych (w szczególności temperatury i współczynnika załamania otoczenia) oraz że z układu zostały wyeliminowane całkowicie niekontrolowane naprężenia, odwrócone macierzowe równanie przetwarzania czujnika można zapisać w następującej postaci [120]:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{DRLPG,n} & K_{DRLPG,T} \\ 0 & K_{FLM,T} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_{DRLPG} \\ \Delta P_{FLM} \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

gdzie:  $K_{DRLPG,n}$ ,  $K_{DRLPG,T}$ ,  $K_{FLM,T}$  oznaczają maksymalne czułości przetwornika na zmianę odpowiednio RI otoczenia DRLPG, temperatury otoczenia DRLPG i temperatury otoczenia PMF. Element „0” w równaniu macierzowym oznacza brak czułości PMF na zmianę RI otoczenia. Odwróconą macierz można przedstawić również w następujący sposób [120]:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{FLM,T} & -K_{DRLPG,T} \\ 0 & K_{DRLPG,n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_{DRLPG} \\ \Delta P_{FLM} \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

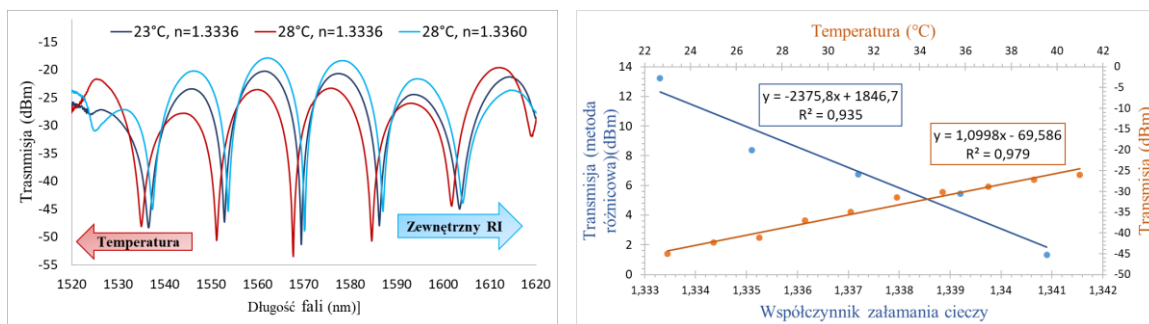
gdzie:  $D$  jest wyznacznikiem macierzy i określa stopień uwarunkowania macierzy [139] i dla powyższych warunków jest równy  $D = K_{DRLPG,n} K_{FLM,T}$ . Istotne jest, aby wyznacznik ten różnił się od zera.

Na bazie równania (5.1) poprzez zastosowanie odwrócenia względem  $\Delta n$  i  $\Delta T$  (w odniesieniu do standardowej macierzy dwupunktowego przetwarzania, [139], [140])

istnieje możliwość wyznaczenia wartości mierzonych, tj. temperatury i RI otoczenia czujnika, wraz z rozróżnieniem sygnału pochodzącego od tych dwóch zmiennych.

Wobec powyższego, w konstrukcji dwuparametrowego przetwornika DRLPG działa jako głowica do przetwarzania sygnału pochodzącego od zmiany RI, natomiast PMF działa jako głowica czuła na zmianę temperatury otoczenia. Co więcej, konstrukcja FLM z PMF działa jako filtr pasmowy, ułatwiający wybranie konkretnych długości fali do monitorowania zmian wartości transmisji i pozwalający na zastosowanie różnicowej metody określenia maksymalnej czułości platformy.

W celu wyznaczenia elementów macierzy przetwornika przeprowadzono pomiary dla zakresu temperaturowego 23 °C – 41 °C z krokiem 2 °C oraz dla zmian RI otoczenia (cieczy) z zakresu 1,3336 – 1,3414. Na Rysunku 39a zestawiono charakterystyki widmowe dla zmian zarówno temperatury otoczenia, jak i RI cieczy. SOP wiązek propagujących się w pętli został ustawiony w taki sposób, aby zmiany powyższych parametrów powodowały przesunięcie minimów interferencyjnych w funkcji długości fali dla pewnego zakresu. Istotne jest, iż zmiana samej temperatury powoduje przesunięcie widma w stronę fal krótszych, natomiast zmiana RI cieczy rzędu  $10^{-2}$  skutkuje przesunięciem widma w stronę fal dłuższych. Pomimo, iż przesunięcie od zmian RI jest nieznaczne w porównaniu z przesunięciem od samej zmiany temperatury, możliwe jest rozdzielenie sygnału pochodzącego od tych dwóch wielkości fizycznych. Wartość transmisji charakterystyki widmowej całościowo wzrasta, zatem możliwe jest zastosowanie różnicowej metody do oszacowania czułości zarówno względem  $T$  jak i  $n$ . Na Rysunku 39b przedstawiono odpowiedź układu na zmiany temperatury i RI cieczy, które to mają przeciwną charakterystykę liniową. Czułości dla przetwarzanych parametrów zostały wyznaczone z aproksymacji liniowej różnicy w wartości transmisji dla poszczególnych minimów interferencyjnych według metody opisanej w rozdziale 4.3. Czułość na zmianę temperatury została określona na 1,0998 dBm/°C przy współczynniku korelacji  $R^2 = 0,9790$  i niepewności standardowej  $2,7 \cdot 10^{-2}$  dBm/°C, co odpowiada niepewności względnej 2,4%. Natomiast szacowana czułość na zmianę RI otoczenia dla dwupunktowego przetwornika wynosi 2375,8 dBm/RIU ze współczynnikiem korelacji  $R^2 = 0,9350$ , niepewnością standardową 8,5 dBm/RIU i niepewnością względną 3%.



a)

b)

**Rysunek 39.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej przy zmianie temperatury i współczynnika załamania otoczenia elementów czułych (DRLPG i PMF) - a) oraz określona przeciwna liniowa odpowiedź przetwornika dwupunktowego - b) [32].

Szacowane czułości przy pomiarze RI otoczenia przetwornika dwupunktowego są niższe niż w przypadku pomiaru tylko jednego parametru przy optymalnym przestrojeniu widma interferencyjnego, jednakże rząd wielkości został zachowany. Niższa szacowana maksymalna czułość spowodowana jest faktem, iż na siatkę działają jednocześnie dwa parametry, które dają przeciwną odpowiedź przetwornika. Zdefiniowanie czułości temperaturowej platformy pozwala na wyeliminowanie wpływu tego parametru na rejestrację zmian zewnętrznego RI. Na podstawie zdefiniowanych w rozdziale 2.4 maksymalnych czułości wybranych parametrów fizycznych przetwornika, możliwe jest określenie współczynników odwróconego równania macierzy przetwornika, która wyraża się następująco:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3871,5 \text{ dBm/RIU} & 0,7891 \text{ dBm/}^\circ\text{C} \\ 0 & 0,8562 \text{ dBm/}^\circ\text{C} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_{DRLPG} \\ \Delta P_{FLM} \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

Przedstawiając odwróconą macierz za pomocą równania (5.2), otrzymano następującą postać:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{3314,8} \begin{bmatrix} 0,8562 \text{ dBm/}^\circ\text{C} & -0,7891 \text{ dBm/}^\circ\text{C} \\ 0 & 3871,5 \text{ dBm/RIU} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_{DRLPG} \\ \Delta P_{FLM} \end{bmatrix}. \quad (5.4)$$

Niezerowa wartość współczynnika D świadczy o tym, iż równanie macierzowe przetwornika jest dobrze uwarunkowane determinując tym samym dobrą stabilność pomiarową.

Określając równanie macierzowe dla jednoczesnego pomiaru temperatury i zewnętrznego RI (Rysunek 39), równanie macierzowe przetwornika przyjmuje postać:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{2612,9} \begin{bmatrix} 1,0998 \text{ dBm}/^{\circ}\text{C} & -0,7891 \text{ dBm}/^{\circ}\text{C} \\ 0 & -2375,8 \text{ dBm}/\text{RIU} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_{DRLPG} \\ \Delta P_{FLM} \end{bmatrix}. \quad (5.5)$$

Istotnym jest, że elementy macierzy  $a_{11}$  i  $a_{22}$  w tym równaniu (co odpowiada  $K_{FLM,T}$  i  $K_{DRLPG,n}$  z równania (5.2)) mają przeciwne znaki, a element  $a_{21}$  jest zawsze równy zero. Oznacza to, że przetwarzana wielkość w postaci zmiany zewnętrznego RI nie wpływa na czułość PMF, a odpowiedź platformy jako całości jest przeciwna dla mierzonego  $T$  jak i  $n$ , tj. monitorowane minima interferencyjne przesuwają się w przeciwnym kierunku w zależności od przetwarzanego sygnału  $T$  lub  $n$ .

Reasumując, powyższe analizy równań macierzowych stanowiących matematyczną interpretację przeprowadzonego eksperymentu jednoczesnego pomiaru temperatury i zewnętrznego RI za pomocą platformy bazującej na FLM z umieszczoną w niej DRLPG oraz świadomie dobranym odcinkiem PMF można stwierdzić, iż:

***możliwe jest rozróżnienie sygnału pochodzącego od dwóch różnych parametrów fizykochemicznych przy zachowaniu względnie wysokiej maksymalnej czułości pomiarowej, przy czym fizyczny parametr to temperatura, zaś chemiczny to zmiana współczynnika załamania otoczenia DRLPG.***

Jest to jednocześnie dowód obranej we wstępie tezy niniejszej rozprawy.

## **6. Zastosowanie platformy do przetwarzania sygnału pochodzącego z materiału biologicznego**

Aktywna czułość LPG na zmiany zewnętrznego współczynnika załamania pozwala na zastosowanie charakteryzowanej platformy do wykrywania między innymi materiału biologicznego. Jest możliwe dzięki głównej funkcjonalności platformy, jakim jest justowanie charakterystyki widmowej FLM prowadzącej do uzyskania przy użyciu pomiaru różnicowego ekstremalnej czułości platformy na zmiany wartości współczynnika załamania otoczenia. Ze względu na tematykę niniejszej rozprawy oraz możliwość współpracy z Photonics Research Center, Université du Québec en Outaouais, podjęte zostały badania eksperymentalne na sfunkcjonalizowanej powierzchni DRLPG umieszczonej w FLM na przykładzie reakcji wiązania biotyna-awidyna [141]. Badania te mają jedynie syntetyczny charakter i stanowią dowód na możliwość zastosowania platformy jako czujnika biologicznego.

Układ immunochemiczny biotyna-awidyna został wybrany ze względu na wysoką stabilność kompleksu, a samo niekowalencyjne wiązanie biotyna-awidyna charakteryzuje się bardzo wysokim powinowactwem (stała dysocjacji wynosi  $10^{-15}$  M) [142]. Dodatkową zaletą tego wiązania jest szybkość jego zachodzenia oraz odporność na skrajne wartości pH oraz rozpuszczalniki biologiczne. Biotyna, znana również jako witamina H, przyłącza się do białka (tutaj awidyna, występująca w surowym białku jaja) bez upośledzenia jej funkcji, przy czym do jednej cząsteczki białka może przyłączyć się wiele cząsteczek biotyny. W prezentowanym systemie biotyna jest stosowana jako receptor, immobilizowany kowalencyjnie na krzemionkowej powierzchni DRLPG, który jest zdolny do selektywnego wychwytywania awidyny rozpuszczonej w roztworze.

### Procedura immobilizacji receptorów do powierzchni DRLPG

Krzemionkową powierzchnię DRLPG oczyszczono z zanieczyszczeń organicznych za pomocą namoczenia w mieszaninie wodnego kwasu solnego i metanolu (1:1, v/v), a następnie w stężonym kwasie siarkowym przez 30 minut. Proces czyszczenia zakończono płukaniem powierzchni DRLPG w wodzie. Następnie włókno światłowodowe z wpisana DRLPG na pewnym odcinku suszono w próżni przez 15 min w celu rozpoczęcia procesu aminowania. Włókno z wpisana DRLPG zamknięto w eksykatorze wraz ze szklanym pojemnikiem wypełnionym mieszaniną 30  $\mu$ l (3-aminopropyl)trietoksyilan (APTES) i 10  $\mu$ l trietyloaminy (TEA) w atmosferze argonu [143] przez 30 minut. W następnym kroku,

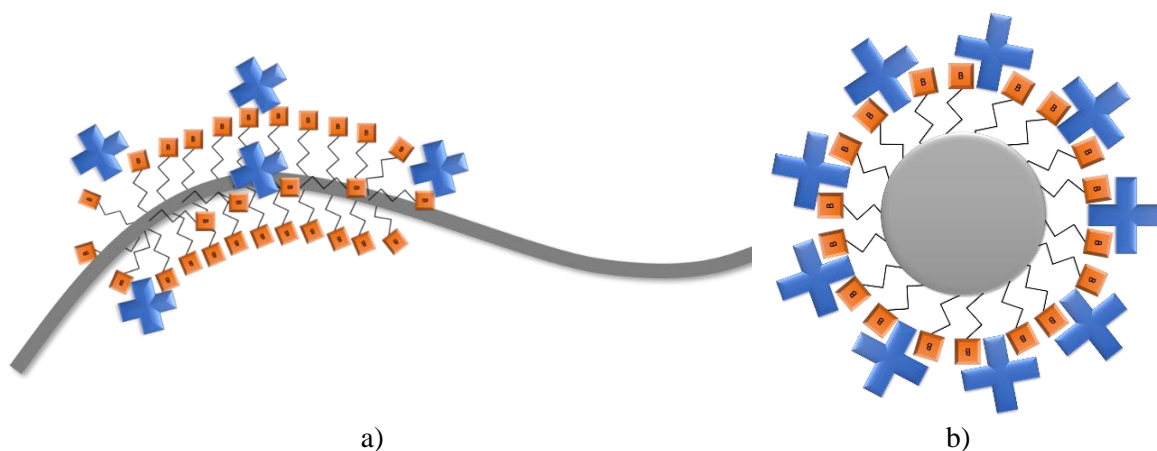


grupa karboksylowa biotyny została aktywowana poprzez EDC/NHS, (protokół używany do sieciowania, ang. cross-linker) [144] w celu utworzenia wiązań amidowych z grupami aminowymi pokrytej APTES powierzchni DRLPG. Tutaj, proszek biotyny został rozpuszczony w mieszaninie wody oraz dimetyloformamidzie (1:1, v:v) zawierającej 0,8 M 1-etylo-3-(3-dimetyloaminopropyl)karboimid chlorowodorku (EDC) i 60 mM N- hydroksycukcynimidu (NHS). Ostateczne stężenie biotyny w roztworze było równe  $1 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ .

Roztwór awidyny przygotowano poprzez rozpuszczenie jej w buforze PBS (buforowana fosforanem sól fizjologiczna) o  $\text{pH}=7,4$  (roztwór soli fizjologicznej składający się z chlorku sodu oraz fosforanu sodu), w celu uzyskania stężenia  $1 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ . W tak przygotowanym roztworze zanurzono uprzednio wypłukaną w wodzie sfunkcjonalizowaną powierzchnię DRLPG na 30 minut.

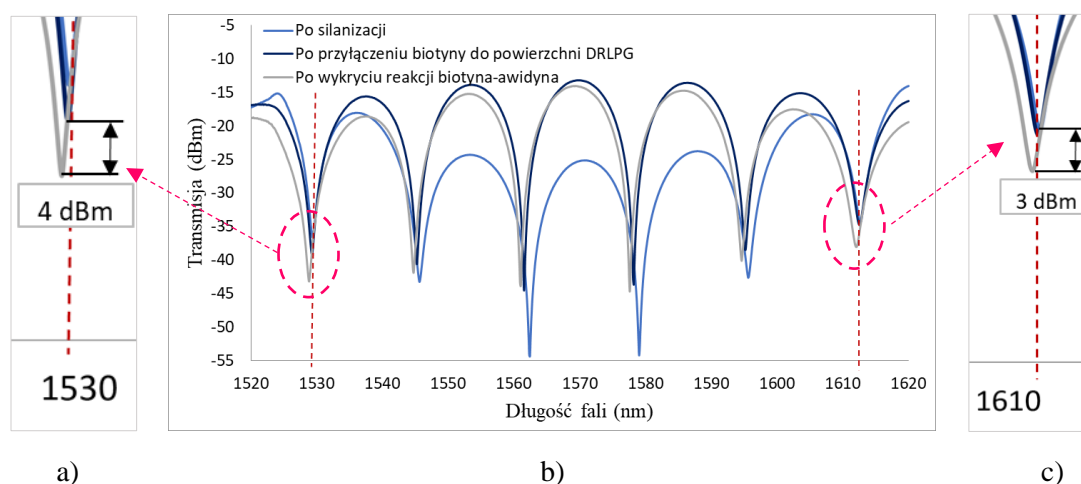
#### Procedura przeprowadzenia eksperymentu detekcji awidyny

Przygotowany odcinek światłowodu z sfunkcjonalizowaną powierzchnią DRLPG został wyjęty z eksykatora i wspawany pomiędzy szerokopasmowy sprzęgacz 3 dB a PC w FLM. DRLPG zostało umieszczone w U-rowku oraz wypłukane PBS. Następnie, pokryta APTES powierzchnia DRLPG została zanurzona w przygotowanym roztworze EDC/NHS i i pozostawiona w nim na 1 godzinę co stanowi proces silanizacji. Po tym czasie, powierzchnia ponownie została wypłukana PBS i zanurzona w roztworze awidyny przez 30 minut. Rysunek 40 schematycznie przedstawia reakcję biotyna-awidyna sfunkcjonalizowanej powierzchni DRLPG.



**Rysunek 40.** Schemat sfunkcjonalizowanej biotyną powierzchni DRLPG (pomarańczowe znaczniki), tworzące niekowalencyjne wiązanie z awidyną (niebieskie znaczniki). Widok z boku - a) oraz przekrój poprzeczny – b) [34].

Rejestracja charakterystyk widmowych (Rysunek 41) zawsze odbywała się po wypłukaniu powierzchni DRLPG w PBS, w celu wyeliminowania potencjalnych niezwiązanych cząsteczek organicznych i/lub zanieczyszczeń powodujących zakłócenie sygnału. Temperatura podczas monitorowania wiązania biotyna-awidyna była kontrolowana (temperatura otoczenia). Zarejestrowano sygnał po procesie silanizacji powierzchni DRLPG u układzie z Rysunku 15, po kowalencyjnym związaniu biotyny do powierzchni DRLPG oraz po wykryciu awidyny poprzez sfunkcjonalizowaną powierzchnię DRLPG. Należy podkreślić, iż wszystkie przedstawione na Rysunku 41 charakterystyki widmowe zostały zarejestrowane po kilkukrotnym wypłukaniu buforem PBS powierzchni DRLPG w celu usunięcia słabo związanych cząsteczek.



**Rysunek 41.** Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej po silanizacji powierzchni DRLPG (niebieska linia), po przyłączeniu cząsteczek biotyny (granatowa linia) oraz po utworzeniu kompleksu biotyna-awidyna (szara linia) – b). Dla pasm absorpcyjnych DRLPG (1529 nm i 1612 nm – czerwone przerywane linie) przedstawiono zbliżenia zmian transmisji dla poszczególnych etapów eksperymentu – a) i - c) [34].

Jeśli współczynnik załamania otoczenia DRLPG się zmienia, transmisja całościowo podnosi się, co jest widoczne po procesie przyłączenia biotyny do sfunkcjonalizowanej powierzchni. Oznacza to, że cząsteczki biotyny prawidłowo i stabilnie związały się z powierzchnią DRLPG, tym samym zmieniając grubość otoczenia struktury okresowej, co również wpłynęło na znaczącą zmianę wartości transmisji. Po zainicjowaniu wiązania kompleksu biotyna-awidyna (szara linia z Rysunku 41), minima interferencyjne uległy przesunięciu w stronę fal krótszych przy nieznacznym obniżeniu w miejscach nieodpowiadających pasmom absorpcyjnym. Dla długości fali 1529 nm oraz 1612 nm, czyli w miejscach pokrycia minimów interferencyjnych z pasmami absorpcyjnymi DRLPG, widoczna jest znacząca zmiana transmisji, wynosząca odpowiednio około 4 dBm oraz 3 dBm.

Dzięki uzyskaniu wysokiej (rzędu  $10^4$  dBm/RIU) czułości skonstruowanego układu na zmianę RI możliwa jest efektywna detekcja czynnika biologicznego rozpoznanego poprzez sfunkcjonalizowaną powierzchnię DRLPG. Czułość ta jest wynikiem prawidłowej implementacji platformy przetwornikowej z efektywnym dostrojeniem widma DRLPG i FLM oraz zaproponowanej metody pomiaru różnicowego. Właściwa implementacja i integracja poszczególnych elementów światłowodowych platformy przetwornikowej jest zatem kluczowym czynnikiem umożliwiającym konstrukcję przetworników wielkości fizykochemicznych typu in-line.

## 7. Podsumowanie i wnioski

Eksperymentalne charakterystyki przedstawione w rozdziale 5 dowodzą, że możliwe jest skonstruowanie czujnika dwupunktowego na bazie DRLPG umieszczonego w FLM do pomiaru wielkości fizycznej (temperatury) oraz chemicznej (zmiana zewnętrznego współczynnika załamania substancji chemicznej) a też pośrednio biologicznej (po odpowiednim sfunkcjonalizowaniu powierzchni DRLPG)). Tak postawiona teza wymagała scharakteryzowania platformy przetwornikowej jako całości (rozdział 4.1), jak również poszczególnych jej elementów optycznych: DRLPG, FLM pod względem wpływu wielkości fizycznych i parametrów układowych (rozdziały 2.4 i 3.2) oraz optycznych, tj, PC na zmianę rejestrowanego sygnału (rozdział 3.3). Choć istnieją pewne wzmianki w literaturze dotyczące łączenia struktur interferometrycznych i periodycznych, to połączenie FLM i DRLPG nie zostało wcześniej dokładnie przebadane i przeanalizowane.

Teoretyczna analiza DRLPG jak i FLM pozwoliła na dobranie odpowiednich parametrów do skonstruowania platformy do przetwarzania wielkości fizykochemicznych, dających możliwie najwyższą czułość przy niskim nakładzie kosztowym. Niewątpliwie, w całej konstrukcji platformy przetwornikowej istotnym jest samo działanie „ultraczułej” DRLPG, gdzie dzięki właściwościom dyspersyjnym, pojawiają się dwa pasma absorpcyjne odpowiadające sprzężeniu modu podstawowego z jednym modem wyższego rzędu. Należy jednak podkreślić, iż technologia wytwarzania DRLPG została opanowana przez PRC-UQO i nie była bezpośrednim tematem niniejszej rozprawy. Głównym parametrem brany pod uwagę przy konstrukcji platformy była długość PMF, decydująca o odległościach kolejnych minimów interferencyjnych, które są wielokrotnością odległości pomiędzy dwoma pasmami absorpcyjnymi DRLPG. Autorskie rozwiązanie polegające na wprowadzeniu PC do konstrukcji platformy pomiędzy PMF i DRLPG umożliwiło dostosowanie minimów interferencyjnych do pasm absorpcyjnych w taki sposób, aby możliwa była rejestracja spadku transmisji minimów interferencyjnych przypadających na rejon pasma absorpcyjnego i zwiększenie transmisji minimów interferencyjnych leżących pomiędzy pasmami absorpcyjnymi. Jak przedstawiono w rozdziale 3.3, zmiana SOP wpływa na położenie minimów interferencyjnych, jak również na ich amplitudę, co następnie pozwoliło na przebadanie platformy dla różnych charakterystyk widmowych. Dostrojenie widma interferencyjnego do niezależnego od zmiany SOP widma rezonansowego (widmo DRLPG) w czasie rzeczywistym było zatem punktem wyjściowym do konstrukcji platformy do rejestracji zmian wielkości fizykochemicznych.

Tak skonstruowana platforma została scharakteryzowana pod względem wpływu zmiany temperatury, naprężeń wzdłużnych oraz zewnętrznego współczynnika załamania cieczy na rejestrowany sygnał. Badaniom tym, zostały poddane oddzielnie DRLPG i PMF, jak również przeanalizowano wpływ wyżej wymienionych wielkości jednocześnie na obydwa powyższe elementy światłowodowe. Należy jednak podkreślić, iż PMF jest nieczułe na zmianę zewnętrznego współczynnika załamania, co w kontekście niniejszej pracy pozwala na konstrukcję czujnika dwupunktowego. Wiadomym jest, iż PMF jest bardzo czułe na zmianę temperatury, zaś wartość tej czułości zależy od długości zastosowanego włókna PMF oraz jego dwójłomności. Prowadzi to do ograniczenia zakresu pomiarowego, gdyż po nałożeniu niewielkiej zmiany temperatury przesunięcie minimów interferencyjnych często przekracza  $\pi$  i kolejne minima mogą się na siebie nakładać (niejednoznaczność odczytu zmian parametrów). Z badań temperaturowych wynika (rozdział 4.3.1), iż najlepszą czułość uzyskano w przypadku podgrzewania cieczy, w której umieszczono tylko DRLPG ( $1,0026 \text{ dBm}/^\circ\text{C}$ ), a wartość ta możliwa była do osiągnięcia dzięki zastosowaniu pomiaru różnicowego. Jednakże, tak wysoka czułość była ograniczona temperaturowo, ponieważ powyżej  $39^\circ\text{C}$  odpowiedź układu stawała się nieliniowa. W przypadku podnoszenia temperatury otoczenia zarówno dla DRLPG jak i PMF, pomiar różnicowy był niemożliwy do zastosowania, nie mniej jednak wartość czułości osiągała ten sam rząd i została oszacowana na  $0,8562 \pm 0,039 \text{ dBm}/^\circ\text{C}$ . Należy zaznaczyć, iż dla tych warunków nie zauważono ograniczenia pomiarowego dla badanego zakresu temperatur ( $23^\circ\text{C} - 51^\circ\text{C}$ ). Wysoka czułość uzyskana w tych badaniach potwierdza możliwość stworzenia przetwornika biologiczno-chemicznego, gdzie wpływ temperatury na przetwarzany sygnał głowicy pomiarowej DRLPG może zostać odróżniony za pomocą PMF.

Charakterystyka naprężeniowa platformy przetwornikowej, przedstawiona w rozdziale 4.3.2), określiła czułość platformy na naprężenia rozciągające. W przypadku oddziaływania naprężeń tylko na PMF, jak należało się spodziewać, zmiany w widmie transmisyjnym są niekorzystne, albowiem minima interferencyjne przesuwają się w sposób niekontrolowany już dla niewielkiego zakresu zmian naprężeń. Dlatego też, przetwarzanie sygnału pochodzącego od odkształcenia osiowego elementów optycznych charakteryzowanej platformy odbywało się tylko przy obciążaniu DRLPG, podczas gdy PMF zostało od nich izolowane. Dzięki temu, możliwa była rejestracja zmiany tłumienia minimów interferencyjnych przypadających na okolicę pasm absorpcyjnych, dla szerszego zakresu pomiarowego w stosunku do obciążania PMF. Dla takich warunków możliwe było również

zastosowanie pomiaru różnicowego, a szacowana czułość została określona na  $1,943 \pm 0,091$  dBm/mε. Biorąc pod uwagę istniejące platformy w dostępnych publikacjach, gdzie szacowane czułości określane są dla zakresu με, uzyskany wynik został uznany za wysoce zadawalający.

Kolejnym etapem badań laboratoryjnych była charakterystyka platformy przetwornikowej dla zmieniającego się RI cieczy otaczającej DRLPG. Badania wykonano dla różnych SOP, celem weryfikacji optymalnych warunków dla pomiaru różnicowego. Jak wykazano właściwe ustawienie SOP pozwala na uzyskanie czułości platformy na poziomie  $3871,5 \pm 10,1$  dBm/RIU przy rejestracji 4 minimów interferencyjnych: 2 przypadających na region pasm absorpcyjnych oraz 2 pomiędzy pasmami absorpcyjnymi. Badania te potwierdziły możliwość zastosowania platformy do badań chemicznych/biologicznych, gdzie głównym stawianym wymogiem jest ekstremalna czułość na niewielkie zmiany parametrów brzegowych, tutaj współczynnika załamania ośrodka wokół DRLPG.

Ze względu na wysoką czułość platformy przetwornikowej na analizowane wielkości fizykochemiczne niezbędne było przeprowadzenie badań określających stabilność układu (rozdział 4.3.4). Wykonano badanie stabilności układu w czasie dla określonych warunków temperaturowych przy umieszczeniu DRLPG w cieczy o współczynniku załamania  $n = 1,3395$  oraz unieruchomieniu PMF. Obserwowano zmiany transmisji poszczególnych minimów interferencyjnych, jak również przesunięcie w funkcji długości fali. Błąd bezwzględny wynosił odpowiednio: 0,1 nm dla przesunięcia w funkcji długości fali oraz dla wartości transmisji - 0,4 dBm. Określono również powtarzalność pomiarową platformy również dla charakteryzowanych wielkości fizykochemicznych, tj. temperatury, naprężeń wzdłużnych oraz współczynnika załamania cieczy, w której zanurzano DRLPG. Z przeprowadzonych badań wynika, iż najmniejsze fluktuacje transmisyjne oraz dla długości fali zaobserwowano dla pomiaru zewnętrznego współczynnika załamania DRLPG, natomiast platforma przetwornikowa najbardziej narażona jest na niestabilność temperaturową. Niewątpliwie było to najtrudniejsze badanie biorąc pod uwagę możliwość parowania i skraplania się cieczy, w której umieszczone były DRLPG i PMF.

Przedstawiony w rozdziale 5 dwupunktowy czujnik można rozpatrywać jako czujnik substancji chemicznych/biologicznych z jednoczesną kompensacją wpływu temperatury na rejestrowany sygnał. Pozwoliło to na uzyskanie czystego sygnału, pochodzącego tylko od mierzonego współczynnika załamania otoczenia DRLPG. Dodatkowo, umieszczenie

struktury periodycznej w FLM niesie za sobą szereg korzyści. Po pierwsze, dzięki wąskim minimom interferencyjnym istnieje możliwość monitorowania dyskretnych długości fali, tym samym dając możliwość zastąpienia drogiego optycznego analizatora widma zespołem fotodetektorów wraz z miernikiem mocy. Po drugie, biorąc pod uwagę ograniczony zakres działania DRLPG, gdzie po przekroczeniu wartości krytycznych działających nań wielkości fizykochemicznych efekt sprzężenia modów zanika, pojawienie się minimów interferencyjnych daje możliwość detekcji zmian parametrów zewnętrznych, tym samym znacząco poszerzając zakres pomiarowy platformy przetwornikowej. Po trzecie, możliwość dostosowania odległości kolejnych minimów interferencyjnych do dwóch pasm absorpcyjnych DRLPG umożliwia zastosowanie pomiaru różnicowego w celu uzyskania możliwie najwyższej czułości na mierzoną wielkość fizykochemiczną. Efekt ten możliwy jest przede wszystkim poprzez umieszczenie pomiędzy PMF a DRLPG kontrolera polaryzacji, który daje możliwość wyjustowania widma transmisyjnego platformy przetwornikowej, tym samym wpływa na optymalne położenie minimów interferencyjnych. Na tym etapie badań sformułowano równania macierzowe dla platformy przetwornikowej do pomiaru dwóch wielkości fizykochemicznych zachowując dobre uwarunkowanie. Jednocześnie, rozdział ten stanowi dowód postawionej w pracy tezy, a rozdział poświęcony charakterystyce platformy przetwornikowej (rozdział 4.3) dla poszczególnych wielkości fizykochemicznych są poparciem przeprowadzonego dowodu.

Ostatnim etapem badań niniejszej rozprawy było przeprowadzenie przykładowych testów biologicznych na sfunekjonalizowanej powierzchni DRLPG, będącej integralną częścią platformy przetwornikowej, co zostało przedstawione w rozdziale 6. Badania te stanowią prosty dowód możliwości zastosowania charakteryzowanej platformy przetwornikowej do pomiarów biologicznych i mają jedynie charakter syntetyczny, jednocześnie wskazując na możliwości aplikacyjne charakteryzowanej platformy przetwornikowej. Do badań wykorzystano znany model wiązania niekowalencyjnego biotylna-awidyna, gdzie odpowiednio aktywowana chemicznie powierzchnia DRLPG umożliwia detekowanie niewielkiej zmiany współczynnika załamania otoczenia lub/i grubości medium jej otaczającego, skutkując zmianą widma transmisyjnego platformy przetwornikowej. Ponieważ DRLPG jest głowicą pomiarową przy badaniach biologicznych, zmianie transmisji ulegają tylko minima interferencyjne będące w zakresie pasm absorpcyjnych. Taka odpowiedź układu jest punktem wyjściowym do przeprowadzenia

badań biologicznych w szerszym zakresie ze wskazaniem na kompensację temperaturową, będącej często szumem dynamicznym pomiaru.

Jako oryginalny wkład doktorantki należy przyjąć następujące elementy pracy:

- określenie parametrów technologicznych LPG, dla wybranego typu światłowodu jednomodowego, metodą geometrycznej modyfikacji, tj. wytworzenia serii przewężeń określonego odcinka włókna światłowodowego za pomocą żarnika wolframowego w kształcie „ $\Omega$ ” platformy do modyfikacji włókna - GPX-3400 firmy Vytran,
- zaproponowanie oraz zbudowanie platformy przetwornikowej do monitorowania zmian wielkości fizykochemicznych, w tym dokonanie optymalizacji parametrów elementów światłowodowych platformy, tj. DRLPG oraz PMF, zapewniając wystarczającą wartość zakresu pomiarowego, jak również wymogi ekstremalnej czułości na detekowaną wielkość,
- dokonanie justowania układu, z punktu widzenia otrzymania ekstremalnej czułości dla detekowej wielkości fizykochemicznej, poprzez wprowadzenie kontrolera polaryzacji pomiędzy DRLPG a PMF oraz teoretyczna i eksperymentalna analiza wpływu SOP na widmo transmisyjne platformy przetwornikowej,
- scharakteryzowanie platformy przetwornikowej pod względem czułości na zewnętrzne zmiany temperatury, naprężeń wzdłużnych oraz współczynnika załamania otoczenia, przy uwzględnieniu wpływu detekowanych wielkości fizykochemicznych na dwa elementy optyczne: DRLPG oraz PLF,
- określenie stabilności platformy przetwornikowej w czasie przy określonych warunkach środowiskowych oraz powtarzalności rejestracji transmisji i przesunięcia w funkcji długości fali minimów interferencyjnych przy pomiarach zmian temperatury, naprężeń wzdłużnych oraz współczynnika załamania otoczenia,
- wykazanie, iż zaprojektowana platforma przetwornikowa może być zaimplementowana jako dwupunktowy czujnik rejestracji zmiany zewnętrznego współczynnika załamania otaczającego DRLPG medium przy jednoczesnej detekcji zmiany temperatury, bądź jej kompensacji,
- wykazanie, iż zaproponowana platforma może służyć jako czujnik biologiczny, gdzie do wykrycia materiału biologicznego/chemicznego niezbędna jest ekstremalna czułość głowicy pomiarowej.



Praca uzmysławia, iż wykorzystanie, zmodyfikowanie oraz świadome łączenie istniejących już rozwiązań z dziedziny inżynierii materiałowej jest punktem wyjściowym do wytworzenia nowoczesnych narzędzi do detekcji parametrów zarówno fizycznych, jak i materiału biologicznego/chemicznego. Interpretacja warunków fizycznych poszczególnych elementów światłowodowych oraz układowych pozwoliła na skonstruowanie platformy, w której możliwość justowania widma transmisyjnego poprzez zmianę SOP wiązki propagującej się w pętli pozwala na uzyskanie ekstremalnych czułości przy zastosowaniu pomiaru różnicowego. Dokładna charakterystyka skonstruowanej platformy, jak również implementacja jej do pomiaru materiału biologicznego (na przykładnie układu immunochemicznego biotylna-awidyna), pozwala na stwierdzenie, iż nowe technologie stwarzają coraz szersze możliwości dla rozwoju fonicznych urządzeń czujnikowych typu in-line.

## 8. Spis Rysunków

<b>Rysunek 1.</b> Schemat długookresowej siatki światłowodowej [40] - a), przykładowe widmo transmisyjne LPG (dla sprzężenia z modami rzędu $m=4, 5, 6, 7, 8, 10$ ) - b) oraz rozkład natężenia wiązki świetlnej dla LPG - c) mierzony techniką pola bliskiego dla sprzężenia modów rzędu $m=4, 5, 6, 7, 8, 10$ [39].	15
<b>Rysunek 2.</b> Teoretyczna zależność szerokości pasma tłumienia w zależności od współczynnika sprzężenia modów LPG [44].	17
<b>Rysunek 3.</b> Przykładowe krzywe dopasowania fazowego dla sprzężenia modu podstawowego z modami wyższych rzędów $m=1-10$ - a) oraz $m=11-20$ - b) [14]. Przerywane linie określają obszar „ultraczyły”. Pomarańczowa linia wskazuje przykładowy okres LPG, dla którego występuje podwójne pasmo tłumienia dla sprzężenia z tym samym modem wyższego rzędu.	18
<b>Rysunek 4.</b> Przykładowa charakterystyka widmowa długookresowej siatki światłowodowej z podwójnym pasmem absorpcyjnym.	19
<b>Rysunek 5.</b> Zdjęcia mikroskopowe LPG wytworzonej poprzez: okresowe trawienie płaszczka włókna - a) [56], okresowe przewężanie włókna - b).	20
<b>Rysunek 6.</b> Schemat układu do wytwarzania LPG punkt po punkcie metodą przewężeń wykonanych za pomocą żarnika oporowego - a). oraz widma transmisyjne dla różnych ilości przewężeń wykonanych na włóknie 1550-HP-80 – b) [54].	22
<b>Rysunek 7.</b> Uproszczony schemat wytwarzania DRLPG przy użyciu maski fazowej i promieniowania UV - a) oraz laboratoryjne stanowisko PRC-UQO do wytwarzania LPG z podwójnym pikem rezonansowym - b).	25
<b>Rysunek 8.</b> Wpływ zmiany temperatury na DRLPG. Przerywane linie pionowe oznaczają położenie długości fali rezonansowej w temperaturze pokojowej 23 °C. Strzałkami zaznaczono kierunek przesuwania się pasm absorpcyjnych wraz ze wzrostem temperatury.	29
<b>Rysunek 9.</b> Czułość temperaturowa $ST$ DRLPG o parametrach dla siatki nr 1 z Tabeli 3. Czułość została wyznaczona metodą interpolacji liniowej.	30
<b>Rysunek 10.</b> Charakterystyki widmowe DRLPG na zadane odkształcenie osiowe.	32
<b>Rysunek 11.</b> Krzywe dopasowania fazowego dla modu $LP_{0,10}$ dla wybranych zewnętrznych współczynników załamania [99] - a) oraz zależnie od zewnętrznego współczynnika załamania przesunięcie pasm absorpcyjnych dla DRLPG nr 1 z Tabeli 3 – b).	34
<b>Rysunek 12.</b> Schemat FLM z odcinkiem PMF oraz PC umożliwiającym kontrole SOP oddziałujących wiązek. CW- wiązka świetlna propagująca się zgodnie ze wskazówkami zegara, CCW – wiązka świetlna propagująca się przeciwnie do ruchu wskazówek zegara.	37
<b>Rysunek 13.</b> Widmo transmisyjne FLM z odcinkiem PMF o długości 24 cm oraz 8 cm.	38
<b>Rysunek 14.</b> Ilustracja zasady ekwiwalentności Kaprona: a) wejściowe światło $E$ i jego osie odniesienia $X_1-Y_1$ , b) obrót osi o kąt $\alpha$ do osi liniowego opóźniacza fazowego $X_2-Y_2$ , c) liniowy	

opóźniacz o dwójłomności liniowej □□□d) wyjściowe światło z opóźniacza doznające dodatkowego obrotu płaszczyzny polaryzacji o kąt □ [118] □ .....	42
<b>Rysunek 15.</b> Schemat ogólny platformy przetwornikowej wielkości fizykochemicznej do pomiaru tylko zewnętrznego współczynnika załamania światła [31]. .....	45
<b>Rysunek 16.</b> Charakterystyka widmowa FLM z umieszczoną wewnątrz DRLPG. RI otoczenia struktury DRLPG to $n = 1,3333$ (woda destylowana). SOP w pętli został ustawiony w taki sposób, aby uwidocznić pasma absorpcyjne DRLPG [31]. .....	46
<b>Rysunek 17.</b> Schemat przekroju PMF typu "bow-tie" [124] - a) i trójplytkowy PC składający się z dwóch ćwierćfalówki i jednej półfalówki [125] - b). .....	47
<b>Rysunek 18.</b> Azymut - a) i eliptyczność - b) SOP wiązki wyjściowej z trójplytkowego PC w funkcji kąta ustawienia płytek tworzących światłowodowe ćwierćfalówki. Na podstawie [126]. .....	49
<b>Rysunek 19.</b> Charakterystyka widmowa DRLPG (niebieska linia) oraz FLM z umieszczoną wewnątrz DRLPG (żółta linia) [31]. .....	50
<b>Rysunek 20.</b> Widma transmisyjne platformy przetwornikowej bez zmiany SOP wiązki (ciemna niebieska linia) oraz ze zmianą SOP w celu przestrojenia położenia minimów w funkcji długości fali (żółta linia) i zmiany głębokości minimów interferencyjnych (jasna niebieska linia) [31]. .....	51
<b>Rysunek 21.</b> Charakterystyki widmowe DRLPG zanurzonej w wodzie destylowanej o $n=1,3328$ (jasna niebieska linia), w cieczy o $n=1,3360$ (żółta linia) oraz charakterystyka widmowa platformy przetwornikowej FLM-DRLPG (ciemna niebieska linia) [32]. .....	53
<b>Rysunek 22.</b> Schemat układu - a) oraz jego widok - b) przystosowany do badania wpływu zmian temperatury otoczenia na działanie DRLPG [32]. .....	54
<b>Rysunek 23.</b> Charakterystyki widmowe platformy dla wybranych wartości temperatury otoczenia DRLPG - a) i aproksymacja liniowa zmiany amplitudy wybranego minimum interferencyjnego zaznaczonego przerywaną linią na wykresie a) w zależności od zmiany temperatury otoczenia DRLPG - b) [32]. .....	55
<b>Rysunek 24.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej z zaznaczeniem minimów interferencyjnych jako danych do oszacowania czułości temperaturowej przy wykorzystaniu metody różnicowej - a) oraz liniowa zależność różnicy transmisji w funkcji temperatury - b) [32]. .....	56
<b>Rysunek 25.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla wybranych wartości temperatur otoczenia PMF, przy dwóch różnych ustawieniach SOP: dowolnym - a), uwypuklającym pasma absorpcyjne DRLPG - b) [32]. .....	57
<b>Rysunek 26.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla wybranych wartości temperatur, gdzie działaniu temperatury zostały poddane DRLPG i PMF - a) oraz aproksymacja liniowa zmiany amplitudy wybranego minimum interferencyjnego (przerywana linia na wykresie a)) w zależności od zmiany temperatury otoczenia DRLPG i PMF - b) [32]. .....	58

<b>Rysunek 27.</b> Schemat platformy do przetwarzania sygnału pochodzącego od wywołanych naprężeń rozciągających - a), zdjęcie układu - b), obciążniki generujące naprężenia rozciągające - c) [33].	59
<b>Rysunek 28.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla jednostkowych odkształceń, gdzie naprężeniu rozciągającym zostało poddane tylko PMF [33].	60
<b>Rysunek 29.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla jednostkowych odkształceń, gdzie naprężeniom rozciągającym została poddana DRLPG - a), przybliżenie pierwszego i czwartego minimum interferencyjnego - b) oraz liniowa zależność transmisji w funkcji jednostkowych naprężeń określona poprzez wykorzystanie metody różnicowej - c) [33].	62
<b>Rysunek 30.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej dla cieczy o różnych wartościach RI - a) oraz liniowa zależność transmisji dla wybranego minimum interferencyjnego w funkcji RI cieczy otaczającej DRLPG - b) [31].	65
<b>Rysunek 31.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej w warunkach zmieniającego się RI cieczy otaczającej DRLPG dla dwóch różnych SOP wiązki propagującej się w FLM – a) i - c) oraz liniowa zależność różnicy transmisji od RI cieczy otaczającej DRLPG przy zastosowaniu różnicowej metody pomiaru – b) i - d) [31].	67
<b>Rysunek 32.</b> Czasowa stabilność platformy do przetwarzania wielkości fizykochemicznych dla minimów interferencyjnych 1 i 2 - a) oraz 3 i 4 - b) zaznaczonych na charakterystyce widmowej (a). Kolorem szarym i niebieskim na (b) oraz szarym i fioletowym na (c) zaznaczono fluktuacje długości fali, pozostałe punkty pomiarowe to fluktuacje wartości transmisji.	68
<b>Rysunek 33.</b> Temperaturowa powtarzalność charakterystyki widmowej z temperaturą początkową 30,3 °C. Wyjściowa charakterystyka widmowa - a), fluktuacje długości fali i wartości transmisji w minimach interferencyjnych 1 i 2 - b) oraz 3 i 4 - c). Kolorem szarym i niebieskim na (b) oraz szarym i fioletowym na (c) zaznaczono fluktuacje długości fali, pozostałe punkty pomiarowe to fluktuacje wartości transmisji.	69
<b>Rysunek 34.</b> Powtarzalność naprężeniowa charakterystyki widmowej dla temperatury pokojowej i RI cieczy $n=1,3338$ . Wyjściowa charakterystyka widmowa - a) fluktuacje długości fali i wartości transmisji minimów interferencyjnych 1 i 2 - b) oraz 3 i 4 - c). Kolorem szarym i niebieskim na (b) oraz szarym i fioletowym na (c) zaznaczono fluktuacje długości fali, pozostałe punkty pomiarowe to fluktuacje wartości transmisji.	71
<b>Rysunek 35.</b> Powtarzalność charakterystyki widmowej dla RI cieczy otaczającej DRLPG $n = 1,3356$ - a), fluktuacje długości fali i wartości transmisji dla minimów interferencyjnych 1 i 2 - b) oraz 3 i 4 - c). Kolorem szarym i niebieskim na (b) oraz szarym i fioletowym na (c) zaznaczono fluktuacje długości fali, pozostałe punkty pomiarowe to fluktuacje wartości transmisji.	72
<b>Rysunek 36.</b> Schemat układu do jednoczesnego pomiaru wartości RI cieczy i temperatury - a), widok układu eksperymentalnego - b) [32].	74

<b>Rysunek 37.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej w warunkach zmiennej temperatury i współczynnika załamania cieczy [32]. .....	75
<b>Rysunek 38.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej w warunkach zmiennej temperatury i RI cieczy przy zmianie SOP wiązek propagujących się w FLM [32]. .....	76
<b>Rysunek 39.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej przy zmianie temperatury i współczynnika załamania otoczenia elementów czułych (DRLPG i PMF) - a) oraz określona przeciwna liniowa odpowiedź przetwornika dwupunktowego - b) [32]. .....	78
<b>Rysunek 40.</b> Schemat sfunkcjonalizowanej biotyną powierzchni DRLPG (pomarańczowe znaczniki), tworzące niekowalencyjne wiązanie z awidyną (niebieskie znaczniki). Widok z boku - a) oraz przekrój poprzeczny – b) [34]. .....	81
<b>Rysunek 41.</b> Charakterystyki widmowe platformy przetwornikowej po silanizacji powierzchni DRLPG (niebieska linia), po przyłączeniu cząsteczek biotyny (granatowa linia) oraz po utworzeniu kompleksu biotyna-awidyna (szara linia) – b). Dla pasm absorpcyjnych DRLPG (1529 nm i 1612 nm – czerwone przerywane linie) przedstawiono zbliżenia zmian transmisji dla poszczególnych etapów eksperymentu – a) i - c) [34]. .....	82

## 9. Spis Tabel

<b>Tabela 1</b> Porównanie głównych parametrów i właściwości siatki Bragga (FBG) i długookresowej siatki światłowodowej (LPG) [37]. .....	14
<b>Tabela 2</b> Podział LPG wytwarzanych metodą fotoindukcji laserem UV [74], [75].....	24
<b>Tabela 3</b> Parametry charakteryzujące DRLPG użyte w ramach pracy. ....	26

## 10. Bibliografia

- [1] Encyklopedia powszechna PWN, 2019.
- [2] A. Pawlaczyk, Elementy i układy optoelektroniczne, WKiŁ, 1984.
- [3] A. Maruta i S.-i. Oda, „Optical Signal Processing Based on All-Optical Analog-to-Digital Conversion,” *Opt Photonics News*, tom 19, nr 4, str. 30-35, 2008.
- [4] M. M. Werneck, R. C. S. B. Allil, B. A. Ribeiro i F. V. B. d. Nazaré, A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors, Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings, Christian Cuadrado-Laborde, IntechOpen, 2013.
- [5] N. Sabri, S. A. Aljunid, M. S. Salim i S. Fouad, „Fiber Optic Sensors: Short Review,” w *Recent Trends in Physics of Material Science and Technology*, Springer Science+Business Media Singapore, 2015.
- [6] I. P. Kaminow, „Polarization-maintaining fibers,” *Applied Scientific Research*, tom 41, nr 3-4, str. 257–270, 1984.
- [7] B. Fultz i J. Howe, „Diffraction and the X-Ray Diffractometer,” w *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials*, Springer, str. 1-58, 2013.
- [8] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam i E. J. Friebele, „Fiber grating sensors,” *J Lightwave Technol*, tom 15, nr 8, str. 1442-1463, 1997.
- [9] A. Yariv i M. Nakamura, „Periodic Structures for Integrated Optics,” *IEEE J Quantum Electron*, tom 13, nr 4, str. 233 - 253, 1977.
- [10] T. Erdogan, „Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating,” *J Opt Soc Am A*, tom 14, nr 8, str. 2113-2113, 1997.
- [11] Q.-S. Li, X.-L. Zhang, J.-G. Shi, D. Xiang, L. Zheng, Y. Yang, J.-H. Yang, D. Feng i W.-F. Dong, „An Ultrasensitive Long-Period Fiber Grating-Based Refractive Index Sensor with Long Wavelengths,” *Sensors*, tom 16, nr 12, str. 1-9, 2016.
- [12] S. Bandyopadhyay, P. Biswas, F. Chiavaioli, T. K. Dey, N. Basumallick, C. Trono, A. Giannetti, S. Tombelli, F. Baldini i S. Bandyopadhyay, „Long-period fiber grating: a specific design for biosensing applications,” *Applied Optics*, tom 56, nr 35, str. 9846-9853, 2017.
- [13] X. Shu, X. Zhu, Q. Wang i S. Jiang, „Dual resonant peaks of LP<sub>0,15</sub> cladding mode,” *Mathematics*, tom 35, nr 8, str. 649-650, 1999.
- [14] X. Shu, L. Zhang i I. Bennion, „Sensitivity Characteristics of Long-Period Fiber Gratings,” *J of Lightwave Technol*, tom 20, nr 2, str. 255-266, 2002.
- [15] F. Diego, „Influence of temperature on the refractive index sensitivities of fiber Bragg gratings refractometers,” *J Microw Optoelectron Electromagn Appl*, tom 16, nr 2, str. 385-392, 2017.
- [16] A. Iadicicco, S. Campopiano, A. Cutolo, M. Giordano i A. Cusano, „Non uniform thinned fiber Bragg gratings for simultaneous refractive index and temperature measurements,” *IEEE Photonics Tech L*, tom 17, nr 7, str. 1495–1497, 2005.

- [17] H. Wang, H. Meng, R. Xiong, Q. Wang, B. Huang, X. Zhang, W. Yu, C. Tan i X. Huang, „Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on asymmetric structures modal interference,” *Opt Commun*, tom 364, str. 191–194, 2016.
- [18] X. Guo, W. Bi, L. Wang i F. Liu, „Simultaneous measurement of refractive index and temperature using dual-period grapefruit microstructured fiber grating,” *Optik*, tom 124, nr 18, str. 3371–3374, 2013.
- [19] F. Esposito, A. Srivastava, A. Iadicicco i S. Campopiano, „Multi-parameter sensor based on single Long Period Grating in Panda fiber for the simultaneous measurement of SRI, temperature and strain,” *Opt Laser Technol*, tom 113, str. 198-203, 2019.
- [20] S. M. Tripathi, K. Dandapat, W. J. Bock, P. Mikulic, J. Perreault i B. Sellamuthu, „Gold coated dual-resonance long-period fiber gratings (DR-LPFG) based aptasensor for cyanobacterial toxin detection,” *Sensing and Bio-Sensing Research*, tom 25, nr 100289, str. 1-8, 2019.
- [21] M. Janczuk-Richter, M. Dominik, E. Roźniecka, M. Koba, P. Mikulic i W. J. Bock, „Long-period fiber grating sensor for detection of viruses,” *Sens Actuat B Chem*, tom 250, str. 32-38, 2017.
- [22] Q. Huang i H. Chenb, „Multi-parameter optochemical sensing based on coated cascaded long-period fiber gratings and frequency division multiplexing,” *Fiber Integrated Opt*, tom 132, str. 348-355, 2017.
- [23] P. Gao, X. Chen i W. Feng, „Simultaneous measurement of external refractive index and temperature based on long-period-grating-inscribed Sagnac interferometer and fiber Bragg grating,” *Review of Scientific Instruments*, tom 83, nr 10, str. 1-5, 2012.
- [24] H. C. A. S. G. Vasconcelos i J. M. M. M. de Almeida, „Mach-Zehnder Interferometers Based on Long Period Fiber Grating Coated with Titanium Dioxide for Refractive Index Sensing,” *J of Lightwave Technol*, tom 37, nr 18, str. 4584-4589, 2019.
- [25] L. Mosquera, D. Sáez-Rodríguez, J. L. Cruz i M. V. Andrés, „In-fiber Fabry-Perot refractometer assisted by a long-period grating,” *Opt Lett*, tom 35, nr 4, str. 613-615, 2010.
- [26] P. L. Swart, „Long-period grating Michelson refractometric sensor,” *Meas Sci Technol*, tom 15, nr 8, str. 1576–1580, 2004.
- [27] C. Zhao, Y. Jin, J. Kang, H. Gong i X. Dong, „Recent Progress of Fiber Loop Mirror-Based Sensors in China Jiliang University,” *Photonic Sensors*, tom 2, nr 1, str. 29–36, 2012.
- [28] A. Reza, S. Tofighi, M. Bathaee i F. Farm, „Optical Fiber Interferometers and Their Applications,” w *Interferometry - Research and Applications in Science and Technology*, I. Padron, Red., Sharif, Iran, InTech, 2012, str. 1-30.
- [29] D. B. Mortimore, „Fiber loop reflectors,” *J of Lightwave Technol*, tom 6, nr 7, str. 1217–1224, 1988.
- [30] O. Frazão, L. M. Marques, S. Santos, J. M. Baptista i J. L. Santos, „Simultaneous Measurement for Strain and Temperature Based on a Long-Period Grating Combined With a High-Birefringence Fiber Loop Mirror,” *IEEE Photonic Tech L*, tom 18, nr 22, str. 2407-2409, 2006.
- [31] R. Zawisza, T. Eftimov, Y. Chinifooroshan, A. Celebańska, P. Mikulic, W. J. Bock i L. Jaroszewicz, „Dual-resonance long-period grating in fiber loop mirror structure for liquid refractive index measurement,” *Opto-Electronic Rev*, tom 26, nr 1, str. 24-28, 2018.
- [32] R. Zawisza, T. Eftimov, P. Mikulic, W. J. Bock i L. R. Jaroszewicz, „Ambient Refractive-Index Measurement with Simultaneous Temperature Monitoring Based on a Dual-Resonance Long-Period Grating Inside a Fiber Loop Mirror Structure,” *Sensors*, tom 18, nr 7, str. 2370, 2018.



- [33] R. Zawisza, L. R. Jaroszewicz, P. Mikulic i W. J. Bock, „An interferometric structure with a dual-resonance long period grating for strain sensing,” *Opto-Electron Rev*, tom 26, nr 4, str. 325-328, 2018.
- [34] R. Zawisza, L. R. Jaroszewicz, A. Celebańska, P. Mikulic i W. J. Bock, „Dual-Resonance Long Period Grating in Fiber Loop Mirror Based Platform for Cheap Biomedical Sample Detection with High Resolution,” *BJSTR*, tom 10, nr 3, str. 7872-7875, 2018.
- [35] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson i B. S. Kawasaki, „Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication,” *Appl Phys Lett*, tom 32, nr 10, str. 647-649, 1978.
- [36] F. Chiavaioli, F. Baldini i C. Trono, „Manufacturing and Spectral Features of Different Types of Long Period Fiber Gratings: Phase-Shifted, Turn-Around Point, Internally Tilted, and Pseudo-Random,” *Engineering*, tom 5, nr 29, str. 1-14, 2017.
- [37] T. Erdogan, „Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters: Errata,” *J Opt Soc Am A*, tom 17, nr 1, str. 2113, 2000.
- [38] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, 2nd Editio red., Academic Press, 2009.
- [39] S. A. Vasiliev, E. M. Dianov, O. I. Medvedkov, V. N. Protopopov, D. M. Costantini, A. Iocco, H. G. Limberger i R. P. Salathe, „Properties of the cladding modes of an optical fibre excited by refractive-index gratings,” *IEEE J Quantum Electron*, tom 29, nr 1, str. 65-68, 1999.
- [40] C. A. J. Gouveia, J. M. Baptista i P. A. Jorge, „Refractometric Optical Fiber Platforms for Label Free Sensing,” w *Current Developments in Optical Fiber Technology*, W. H. a. H. Arof, Red., IntechOpen, 2012, str. 345-375.
- [41] M.-Y. Chen, J. Wei, Y. Sheng i N.-F. Ren, „Design and optimization of fundamental mode filters based on long-period fiber gratings,” *Opt Fiber Technol*, tom 30, str. 89-94, 2016.
- [42] T. Erdogan i D. Stegall, „Impact of dispersion on the bandwidth of long-period fiber-grating filters,” w *OFC '98. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, San Jose, USA, 1998.
- [43] T. Erdogan, „Cladding-mode resonances in short- and longperiod fiber grating filters,” *J Opt Soc Am A*, tom 14, nr 8, str. 1760-1773, 1997.
- [44] V. Jain, S. Pawar, S. Kumbhaj i P. K. Sen, „Spectral and Dispersion Properties of Long Period Fiber Grating for Optical Communication Systems,” *Appl Environ Microbiol*, tom 7, nr 4, str. 109-116, 2018.
- [45] E. Anemogiannis, E. N. Glytsis i T. K. Gaylord, „Transmission Characteristics of Long-Period Fiber Gratings Having Arbitrary Azimuthal/Radial Refractive Index Variations,” *J Lightwave Technol*, tom 21, nr 1, str. 218-227, 2003.
- [46] T. Erdogan, „Fiber Grating Spectra,” *J Lightwave Technol*, tom 15, nr 8, str. 1277-1294, 1997.
- [47] P. Biswas, N. Basumallick i S. Bandyopadhyay, „Sensitivity Enhancement of Turn-Around-Point Long Period Gratings By Tuning Initial Coupling Condition, Kamal Dasgupta, Ajay Ghosh, and Somnath Bandyopadhyay,” *IEEE Sens J*, tom 15, nr 2, str. 1240-1245, 2015.
- [48] M. Gambhir i S. Gupta, „Review of Turn around Point Long Period Fiber Gratings,” *J Sens Technol*, tom 5, nr 4, str. 81-89, 2015.
- [49] S. Kher, S. Chaubey, J. Kishore i S. Oak, „Detection of Fuel Adulteration with High Sensitivity Using Turnaround Point Long Period Fiber Gratings in B/Ge Doped Fibers,” *IEEE*, tom 13, nr 11, str. 4482-4486, 2013.

- [50] P. Biswas, N. Basumallick, S. Bandyopadhyay, K. Dasgupta, A. Ghosh i S. Bandyopadhyay, „Sensitivity Enhancement of Turn-Around-Point Long Period Gratings By Tuning Initial Coupling Condition,” *IEEE Sens J*, tom 15, nr 2, str. 1240-1245, 2015.
- [51] K. P. Chen, P. R. Herman, R. Tam i J. Zhang, „Rapid long-period grating formation in hydrogen-loaded fibre with 157 nm F/sub 2/-laser radiation,” *Electron Lett*, tom 36, nr 24, str. 2000-2001, 2000.
- [52] J. Ascorbe, J. M. Corres, I. d. Villar i I. R. Matias, „Fabrication of Long Period Gratings by Periodically Removing the Coating of Cladding-Etched Single Mode Optical Fiber Towards Optical Fiber Sensor Development,” *Sensors*, tom 6, str. 1866, 2018.
- [53] G. Rego, „Arc-Induced Long Period Fiber Gratings,” *J Sens*, tom 21, str. 1-14, 2016.
- [54] R. Wonko, P. Marć i L. R. Jaroszewicz, „Fabrication of tapered Long Period Fiber Gratings for sensors application by filament heating,” w *Optical Fibers and Their Applications 2017*, Suprasl, Polska, 2017.
- [55] M. Myśliwiec, J. Grochowski, K. Krogulski, P. Mikulic, W. Bock i M. Śmietana, „Effect of Wet Etching of Arc-Induced Long-Period Gratings on Their Refractive Index Sensitivity,” *Acta Physica Polonica A*, tom 124, nr 3, str. 521-524, 2013.
- [56] C. Chiang i L. Tsai, „Perfectly notched long-period fiber grating filter based on ICP dry etching technique,” *Opt Lett*, tom 37, nr 2, str. 193-195, 2012.
- [57] R. Kashyap, *Fiber Bragg gratings*, Academic Press Boston, 1999.
- [58] J. F. Akki, A. Lalasangi i U. S. Raikar, „Chemical sensor for nitrate in water using long period optical fiber grating fabricated by point by point method,” w *2012 International Conference on Optical Engineering*, 2012.
- [59] M. J. Śmietana, W. J. Bock, P. Mikulic i J. Chen, „Tuned Pressure Sensitivity of Dual Resonant Long-Period Gratings Written in Boron Co-Doped Optical Fiber,” *J Lightwave Technol*, tom 30, nr 8, str. 1080-1084, 2012.
- [60] W. J. Bock, J. Chen, P. Mikulic i T. Eftimov, „A Novel Fiber-Optic Tapered Long-Period Grating Sensor for Pressure Monitoring,” *IEEE T Instrum Meas*, tom 56, nr 4, str. 1176-1180, 2007.
- [61] K. Morishit i Y. Miyake, „Fabrication and Resonance Wavelengths of Long-Period Gratings Written in a Pure-Silica Photonic Crystal Fiber by the Glass Structure Change,” *J Lightwave Technol*, tom 22, nr 2, str. 625-630, 2004.
- [62] L. Shao, J. Zhaoc, X. Donga, H. Y. Tama, C. Luc i S. He, „Long-period grating fabricated using resistive filament,” w *19th International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2008.
- [63] M. Fujumaki, Y. Ohki, L. Brebner i J. S. Roorda, „Fabrication of long-period optical fibre gratings by use of ion implantation,” *Opt Lett*, tom 25, nr 2, str. 88-90, 2000.
- [64] Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu, M. Watanabe, P. Kazansky i K. Hirao, „Fabrication of long-period fibre gratings by focused irradiation of infra-red femtosecond laser pulses,” *Opt Lett*, tom 24, nr 10, str. 646-648, 1999.
- [65] D. D. Davis, T. K. Gaylord, N. E. Glytsis, S. G. Kosinski, S. C. Mettler i A. M. Vengsarkar, „Long-period fibre grating fabrication with focused CO2 laser beams,” *Electron Lett*, tom 34, nr 3, str. 302-303, 1998.
- [66] G. Rego, O. Okhotnikov, E. Dianov i V. Sulimov, „High-temperature stability of long-period fibre gratings using an electric arc,” *J Lightwave Technol*, tom 19, nr 10, str. 1574-1579, 2001.

- [67] E. M. Dianov, V. I. Karpov, M. V. Grekov, K. M. Golant, S. A. Vasiliev, O. I. Medvedkov i R. R. Khrapko, „Thermo-induced long period fibre grating,” w *Integrated Optics and Optical Fibre Communications, 11th International Conference on, and 23rd European Conference on Optical Communications*, Londyn, 1997.
- [68] K. P. Chen, P. R. Herman, R. Tam i J. Zhang, „Rapid long-period grating formation in hydrogen loaded fibre with 157 nm F2 laser radiation,” *Electron Lett*, tom 36, nr 24, str. 2000 - 2001, 2000.
- [69] B.-O. Guan, H.-Y. Tam, S.-L. Ho, S.-Y. Liu i X.-Y. Dong, „Growth of long-period gratings in H<sub>2</sub>-loaded fibre after 193 nm UV inscription,” *IEEE Photon Technol Lett*, tom 12, nr 6, str. 642-644, 2000.
- [70] R. M. Atkins, P. J. Lemaire, T. Erdogan i V. Mizrahi, „Mechanisms of enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses,” *Electron Lett*, tom 29, nr 14, str. 1234, 1993.
- [71] I. J. G. Sparrow., *Development and Applications of UV Written Waveguides*, Faculty of Engineering, University of Southampton, 2005.
- [72] B. Leconte, W.-X. Xie, M. Douay, P. Bernage, P. Niay, J. F. Bayon, E. Delevaque i H. Poignant, „Analysis of color-center-related contribution to Bragg grating formation in Ge:SiO<sub>2</sub> fiber based on a local Kramers–Kronig transformation of excess loss spectra,” *Appl Opt*, tom 36, nr 24, str. 5923, 1997.
- [73] D. P. Hand i P. S. J. Russell, „Photoinduced refractive-index changes in germanosilicate fibers,” *Opt Lett*, tom 15, nr 2, str. 102, 1990.
- [74] D. S. Starodubov, E. M. Dianov, S. A. Vasiliev, A. A. Frolov, O. I. Medvedkov, A. O. Rybaltovskii i V. A. Titova, „Hydrogen Enhancement of Near-UV Photosensitivity of Germanosilicate Glass,” w *The International Society for Optical Engineering*, 1997.
- [75] N. Canning, Groothoff i J. Canning, „Enhanced type IIA gratings for high-temperature operation,” *Opt Lett*, tom 29, nr 20, str. 2360-2362, 2004.
- [76] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan i J. E. Sipe, „Long-period fiber gratings as band-rejection filters,” *J Lightwave Technol*, tom 14, nr 1, str. 58–65, 1996.
- [77] M. Smietana, M. Dominik, P. Mikulic i W. J. Bock, „Temperature and refractive index sensing with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -nanocoated long-period gratings working at dispersion turning point,” *Opt Laser Technology*, tom 107, str. 268–273, 2018.
- [78] X. Chen, K. Zho, L. Z. i I. Bennion, „Dual-peak long-period fiber gratings with enhanced refractive index sensitivity by finely tailored mode dispersion that uses the light cladding etching technique,” *Appl Opt*, tom 46, nr 4, str. 451-455, 2006.
- [79] V. Bhatia i A. M. Vengsarkar, „Optical fiber long-period grating sensors,” *Opt Lett*, tom 21, nr 9, str. 692-694, 1998.
- [80] G. Rego, „A Review of Refractometric Sensors Based on Long Period Fibre Gratings,” *Sci World J*, tom 2013, str. 1-14, 2013.
- [81] A. Martinez-Rios, D. Monzon-Hernandez, I. Torres-Gomez i G. Salceda-Delgado, Long Period Fibre Gratings, D. M. Yasin, Red., InTech, 2012.
- [82] O. V. Mazurin, M. Streltsina i T. P. Shvaiko-Shaveikovskaya, Handbook of Glass Data, Amsterdam: Elsevier, 1987.

- [83] A. Singh, D. Engles, A. Sharma i M. Singh, „Temperature sensitivity of long period fiber grating in SMF-28 fiber,” *Optik*, tom 125, nr 1, str. 457–460, 2014.
- [84] R. D. Sante, „Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications,” *Sensors*, tom 15, nr 8, str. 18666-18713, 2015.
- [85] B. A. Tahir, M. A. Saeed, R. Ahmed, M. Ahmed i M. G. B. Askiq, „Long-Period grating as strain sensor,” *J Ovonic Res*, tom 8, nr 5, str. 113 - 120, 2012.
- [86] C.-L. Zhao, L. Xiao, J. Ju, M. S. Demokan i Wei Jin, „Strain and Temperature Characteristics of a Long-Period Grating Written in a Photonic Crystal Fiber and Its Application as a Temperature-Insensitive Strain Sensor,” *J Lightwave Technol*, tom 26, nr 2, str. 220-227, 2008.
- [87] V. Bhatia, D. Campbell, R. O. Claus i A. M. Vengsarkar, „Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings,” *Opt Lett*, tom 22, nr 9, p. 648–650, 1997.
- [88] C. Tong, X. Chen, Y. Zhou, J. He, W. Yang, T. Geng, W. Sun i L. Yuan, „Ultra-long-period fiber grating cascaded to a knob-taper for simultaneous measurement of strain and temperature,” *Optical Review*, tom 25, nr 3, str. 295–300, 2018.
- [89] J. Ascorbe, L. Coelho, J. L. Santos, O. Frazao i J. M. Corres, „Temperature Compensated Strain Sensor Based on Long-Period Gratings and Microspheres,” *IEEE Photon Technol Lett*, tom 30, nr 1, str. 67 - 70, 2017.
- [90] V. Bhatia, „Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing,” *OPTICS EXPRESS*, tom 4, nr 11, str. 457-466, 1999.
- [91] P. Wang, *Advanced long period fiber grating and its applications to fiber sensor and optical filter*, Shizuoka Univ, 2016.
- [92] W. Zhang, J. Hao, X. Lou, M. Dong i L. Zhu, „All-Fiber Dual-Parameter Sensor Based on Cascaded Long Period Fiber Grating Pair Fabricated by Femtosecond Laser and CO2 Laser,” *Fiber Integrator Opt*, tom 37, nr 2, str. 66–78, 2018.
- [93] M. Koba, M. Śmietana, A. Cusano i W. J. Bock, „Detection specificity studies of bacteriophage adhesin-coated long-period grating-based biosensor,” w *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*, Curitiba, Brazylia, 2015.
- [94] D. Hwang, L. V. Nguyen, D. S. Moon i Y. Chung, „Intensity based optical fiber strain sensor using long period grating and core mode blocker,” w *19th International Conference on Optical Fibre Sensors*, Perth, Australia, 2008.
- [95] J. F. Henninot, O. Duhem, M. Warengem, M. Douay, A. S. Kurkov i L. Rivoallan, „Investigationos long period fiber gratings sensitivity of liquid crystal external medium,” *Mol Cryst Liq Cryst*, tom 320, nr 1, str. 389–404, 1998.
- [96] H. J. Patrick, A. Kersey i F. Bucholtz, „Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction,” *J Lightwave Technol*, tom 16, nr 9, str. 1606–1612, 1998.
- [97] A. Cusano, A. Iadicicco, P. Pilla, L. Contessa, S. Campopiano, A. Cutolo i M. Giordano, „Mode transition in high refractive index coated long period gratings,” *Opt Express*, tom 14, nr 1, str. 19-34, 2006.
- [98] M. Smietana, M. L. Korwin-Pawłowski, W. J. Bock, G. R. Pickrell i J. Szmids, „Refractive index sensing of fiber optic long-period grating structures coated with a plasma deposited diamond-like carbon thin film,” *Meas Sci Technol*, tom 19, nr 8, str. 1-7, 2008.

- [99] G. Rego, „A Review of Refractometric Sensors Based on Long Period Fibre Gratings,” *Sci World J*, tom 2013, str. 1-14, 2013.
- [100] Y.-Q. Ni, S. Ding, B. Han i H. Wang, „Layer-by-layer assembly of polyelectrolytes-wrapped multi-walled carbon nanotubes on long period fiber grating sensors,” *Sens Actuators B Chem*, tom 301, pp. 1-7, 2019.
- [101] K. P. W. Dissanayake, W. Wu, H. Nguyen, T. Sun i K. T. V. Grattan, „Graphene oxide coated long period grating based fibre optic humidity sensor,” w *The International Society for Optical Engineering*, 2017.
- [102] P. Pilla, V. Malachovská, A. Borriello, A. Buosciolo, M. L. Ambrosio, A. Cutolo i A. Cusano, „Transition mode Long Period Grating biosensor with functional multilayer coatings,” *Opt Express*, tom 19, nr 2, str. 512-526, 2011.
- [103] X. Lana, Q. Hana, J. Huang, X. Fang, T. Weia, Z. Gao i H. Xiao, „High order mode long-period fiber grating refractive index sensor based on intensity measurement,” w *Optical Components and Materials IX*, San Francisco, Stany Zjednoczone, 2012.
- [104] O. Frazão, J. M. T. Baptista i J. L. Santos, „Recent advances in high-birefringence fiber loop mirror sensors,” *Sensors*, tom 7, nr 11, str. 2970-2983, 2007.
- [105] A. Kurzych, L. R. Jaroszewicz, Z. Krajewski, K. P. Teisseyre i J. K. Kowalski, „Fibre Optic System for Monitoring Rotational Seismic Phenomena,” *Sensors*, tom 14, nr 3, str. 5459–5469, 2014.
- [106] Y. Liu, B. Liu, X. Feng, W. Zhang, G. Zhou i S. Yuan, „High-birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors,” *App Opt*, tom 44, nr 12, str. 2382-2390, 2005.
- [107] R. Lv, T. Zhou, L. Zhang, H. Peng i Y. Zhang, „Simultaneous measurement of temperature and strain based on fiber loop mirror combined with fiber Bragg grating,” *J Optoelectron Adv M*, tom 11, nr 12, str. 633-636, 2017.
- [108] L.-P. Sun, J. Li, L. Jin, Y. Ran i B.-O. Guan, „High-birefringence microfiber Sagnac interferometer based humidity sensor,” *Sens Actuators B Chem*, tom 231, str. 696-700, 2016.
- [109] D. Leandro i M. Lopez-Amo, „All-PM Fiber Loop Mirror Interferometer Analysis and Simultaneous Measurement of Temperature and Mechanical Vibration,” *J Lightwave Technol*, tom 36, nr 4, str. 1105-1111, 2018.
- [110] S. Feng, Q. Mao, L. Shang i J. W. Lit, „Reflectivity characteristics of the fiber loop mirror with a polarization controller,” *Opt Commun*, tom 277, str. 322–328, 2007.
- [111] I. P. Kaminow, „Polarization in optical fibers,” *IEEE Journal of Quantum*, tom 17, nr 1, str. 15–22, 1981.
- [112] C. Kaczmarek, Światłowodowy interferometr pętlowy jako narzędzie pomiarowe do wyznaczania dwójmownych właściwości światłowodów, Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2019.
- [113] Y. Liu, B. Liu, X. Feng, W. Zhang, G. Zhou, S. Yuan, G. Kai i X. Dong, „High-birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors,” *Appl Opt*, tom 44, nr 12, str. 2382-2390, 2005.
- [114] F. Zhang, Y. Yue i J. Hu, „Highly sensitive temperature sensor based on multicore fiber-polarization maintaining fiber loop mirror,” *IEEE Sens J*, tom 20, nr 3, str. 1315 - 1321, 2019.
- [115] D. Bo, Z. Qida, L. Feng, G. Tuan, X. Lifang, L. Shuhong i G. Hong, „Liquid-level sensor with a high-birefringence-fiber loop mirror,” *Appl Opt*, tom 45, nr 30, str. 7767-7771, 2006.

- [116] L. R. Jaroszewicz, *Rola polaryzacji i spójności w interferometrii światłowodowej, rozprawa habilitacyjna*, WAT, 1995.
- [117] H. Hurwitz i R. C. Jones, „A new calculus for treatment of optical systems,” *J Opt Soc Am*, tom 31, nr 7, str. 488-493, 1941.
- [118] F. P. Kapron, N. Borrelli i D. Keck, „Birefringence in dielectric optical waveguides,” *IEEE J Quantum Electron*, tom 8, nr 2, str. 222 - 225, 1972.
- [119] C. Wang, Z. Huang, G. Li, S. Zhang, J. Zhao, N. Zhao, H. Cai i Y. Zhang, „Simultaneous Temperature and Strain Measurements Using Polarization-Maintaining Few-Mode Bragg Gratings,” *Sensors*, tom 19, nr 23, str. 1-13, 2019.
- [120] J. Yuan, C. L. Zhao, Y. Zhou, X. Yu, J. Kang, J. Wang i S. Jin, „Reflective long-period fiber grating-based sensor with Sagnac fiber loop mirror for simultaneous measurement of refractive index and temperature,” *Appl Opt*, tom 53, nr 29, str. 85-90, 2014.
- [121] B. Yin, S. Wu, M. Wang, W. Liu, H. Li, B. Wu i Q. Wang, „High-sensitivity refractive index and temperature sensor based on cascaded dual-wavelength fiber laser and SNHNS interferometer,” *Opt Express*, tom 27, nr 1, str. 252-264, 2019.
- [122] S. Feng, Q. Mao, L. Shang i J. W. Lit, „Reflectivity characteristics of the fiber loop mirror with a polarization controller,” *Opt Commun*, tom 277, nr 2, p. 322–328, 2007.
- [123] H. C. Lefevre, „Single-mode fiber fractional wave devices and polarization controllers,” *Electron Lett*, tom 16, nr 20, str. 778–780, 1980.
- [124] Fibrecore, „<https://www.fibercore.com/expertise/fiberpaedia/bow-tie-fiber>,” 29 12 2019. [Online].
- [125] Thorlabs, „[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=343](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=343),” 2019. [Online].
- [126] F. Heismann, „Analysis of a reset-free polarization controller for fast automatic polarization stabilization in fiber-optic transmission systems,” *J Lightwave Technol*, tom 12, nr 4, str. 690 - 699, 1994.
- [127] A. F. Fernandez, H. O. C. V. Ierschot, K. P. F. Berghmans i H. Thienpont, „Multi-parameter force sensing with fiber Bragg grating,” w *Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*, Amsterdam, 2002.
- [128] X.-W. Zhao i Q. Wang, „Mini review: Recent advances in long period fiber grating biological and chemical sensors,” *Instrum Sci Technol*, tom 47, nr 2, str. 140-169, 2019.
- [129] M. Smietana, M. Koba, E. Brzozowska, J. Nakonieczny, L. Wachnicki, P. Mikulic, M. Godlewski i W. J. Bock, „Label-free sensitivity of long-period gratings enhanced by atomic layer deposited TiO<sub>2</sub> nano-overlays,” *OPTICS EXPRESS*, tom 23, nr 7, str. 8441-8453, 2015.
- [130] L. C. Coelho, D. Viegas, J. L. Santos i J. Almeida, „Characterization of zinc oxide coated optical fiber long period gratings with improved refractive index sensing properties,” *Sens Actuators B Chem*, tom 223, str. 45-51, 2016.
- [131] B.-O. Guan, H.-Y. Tam i S.-Y. Liu, „Temperature-Independent Fiber Bragg Grating Tilt Sensor,” *IEEE Photonics Tech Lett*, tom 16, nr 1, str. 224-226, 2004.
- [132] J. Chu, C. Shen, C. Zhong, X. Zou, K. Li i X. Dong, „Optical Fiber Refractometer Based on a Long-Period Grating inscribed in a fiber loop mirror,” w *2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics*, Shanghai, China, 2012.

- [133] C.-L. Zhao, J. Zhao, W. Jin, J. Ju, L. Cheng i X. Huang, „Simultaneous strain and temperature measurement using a highly birefringence fiber loop mirror and a long-period grating written in a photonic crystal fiber,” *Opt Commun*, tom 282, str. 4077–4080, 2009.
- [134] C. Zhang, S. Xu, J. Zhao, H. Li, H. Bai i C. Miao, „Multipoint refractive index and temperature fiber optic sensor based on cascaded no core fiber-fiber Bragg grating structures,” *Opt Eng*, tom 56, nr 2, str. 1-6, 2017.
- [135] O. Frazao, L. M. Marques, S. Santos, J. M. Baptista i J. L. Santos, „Simultaneous Measurement for Strain and Temperature Based on a Long-Period Grating Combined With a High-Birefringence Fiber Loop Mirror,” *IEEE Photonics Tech L*, tom 18, nr 22, str. 2407 - 2409, 2006.
- [136] J. Chu, C. Shen, C. Zhong, X. Zou, K. Li i X. Dong, „Optical Fiber Refractometer Based on a Long-Period Grating inscribed in a fiber loop mirror.,” w *2012 Symposium Photonics and Optoelectronics (SOPO)*, Shanghai, China, 21-23 May 2012.
- [137] D. J. J. Hu, J. L. Lim, M. Jiang, Y. Wang, F. Luan, P. P. Shum, H. Wei i W. Tong, „Long period grating cascaded to photonic crystal fiber modal interferometer for simultaneous measurement of temperature and refractive index,” *Opt Lett*, tom 37, str. 2283-2285, 2012.
- [138] W. Jin, W. Michie, G. Thursby, M. Konstantaki i B. Culshaw, „Simultaneous measurement of strain and temperature: Error analysis,” *Opt Eng*, tom 36, str. 598–609, 1997.
- [139] P. Kisała, *Periodyczne struktury światłowodowe w optoelektronicznych czujnikach do pomiaru wybranych wielkości nieelektrycznych*, Lublin: Monografie – Politechnika Lubelska, 2012.
- [140] M. Yamada i K. Sakuda, „Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach,” *App Opt*, tom 26, nr 16, str. 474-3478, 1987.
- [141] G. P. Fulton i B. R. Lutz, „Egg-White in jury lin chicks and its relationship to a deficiency of vitamin H (biotin),” *Science*, tom 92, nr 2384, str. 224-225, 1940.
- [142] H. Kuramitz, K. Sugawara i S. Tanaka, „Electrochemical Sensing of Avidin±Biotin Interaction Using Redox Markers,” *Electroanalysis*, tom 12, nr 16, str. 1299-1303, 2000.
- [143] Y. Chiniforooshan, A. Celebańska, M. Janik, P. Mikulic, F. Haddadb, J. Perreault i W. J. Bock, „Double resonance long period fiber grating for detection of E. coli in trace concentration by choosing a proper bacteriophage,” w *2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*, Jeju, South Korea, 2017.
- [144] „G-Biosciences,” Geno Technology Inc., USA., 26 wrzesień 2017. [Online]. Available: <https://info.gbiosciences.com/blog/2-step-protein-coupling-edc-nhs>. [Data uzyskania dostępu: 25 kwiecień 2020].

## Streszczenie

Celem niniejszej pracy była konstrukcja i badania platformy do przetwarzania wielkości fizykochemicznych, opartej na długookresowej siatce światłowodowej z podwójnym pasmem absorpcyjnym umieszczonej w światłowodowej pętli interferometrycznej. Głównymi wyzwaniami w tym zakresie było wykonanie platformy przetwornikowej zapewniającej zarówno szeroki zakres pomiarowy, jak i ekstremalną czułość przede wszystkim na zmianę współczynnika załamania medium otaczającego głowicę pomiarową, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej stabilności czasowej oraz powtarzalności pomiarowej. Przeprowadzony przegląd literaturowy własności fizycznych elementów światłowodowych oraz rozwiązań układowych platformy przetwornikowej pozwolił na dobranie odpowiednich parametrów konstrukcyjnych, takich, że platforma spełnia wymogi stawiane przy konstrukcji biologicznych/chemicznych czujników in-line.

Podczas realizacji pracy, przeprowadzono analizę warunków dopasowania widma transmisyjnego długookresowej siatki światłowodowej z podwójnym pasmem absorpcyjnym i światłowodowego interferometru pętlowego za pomocą zmiany stanu polaryzacji wiązki propagującej się w zamkniętym torze optycznym. Scharakteryzowano również skonstruowaną platformę jako przetwornik zmiany temperatury, naprężeń wzdluznych oraz zmiany zewnętrznego współczynnika załamania medium otaczającego głowicę pomiarową. Minima interferencyjne, działające również jako filtr optyczny, umożliwiły zastosowanie pomiaru różnicowego dającego ekstremalną czułość na detekowane parametry fizyczne:  $0,8562 \pm 0,039$  dBm/°C dla temperatury,  $1,943 \pm 0,091$  dBm/mε dla naprężeń wzdluznych oraz  $3871,5 \pm 10,1$  dBm/RIU dla zewnętrznego współczynnika załamania. Przeprowadzono również badania potwierdzające stabilność platformy w czasie, jak również powtarzalność pomiaru analizowanych zmiennych parametrów fizycznych.

Realizując założone cele pracy zastosowano platformę jako dwupunktowy czujnik do detekcji zewnętrznego współczynnika załamania światła oraz zmian temperaturowych. Taka implementacja pozwoliła na kompensację temperatury jako szumu dynamicznego pomiaru innej wielkości, tutaj zewnętrznego współczynnika załamania. Analiza macierzowa pozwala na rozdzielnie sygnałów pochodzących od dwóch lub więcej przetwarzanych wielkości fizykochemicznych. W pracy przedstawiono również syntetyczne wyniki badań detekcji materiału biologicznego za pomocą skonstruowanej platformy. Do tego wykorzystano układ immunochemiczny biotyna-awidyna, gdzie sfunckjonalizowana powierzchnia struktury periodycznej stanowiła głowicę pomiarową. Dzięki zastosowaniu pętli interferometrycznej możliwa była rejestracja ekstremalnie małych zmian wywołanych przez wiązanie biotyny z awidyną. Badanie te były przedstawieniem możliwości aplikacyjnych charakteryzowanej platformy.

Zaprezentowane w pracy wyniki były tematem czterech publikacji, w tym trzech w czasopismach naukowych z JCR oraz ponad 10 wystąpień konferencyjnych, w których doktorantka jest współautorem.



## Summary

The purpose of this work was the construction and testing of a platform for processing physicochemical quantities, based on a long period fiber grating with a dual resonance (DRLPG), placed in a fiber loop mirror (FLM). The main challenge in this area was the implementation of the transducer platform ensuring both a wide measuring range and extreme sensitivity primarily to changing the refractive index (RI) of the medium surrounding the measuring head while maintaining high time stability and measurement repeatability. A literature review of the physical properties of optical fiber elements and transducer platform system solutions has allowed the selection of appropriate construction parameters such that the platform meets the requirements for the construction of biological / chemical in-line sensors.

During the work, an analysis of the conditions for matching the transmission spectrum of a DRLPG and a FLM was performed by changing the polarization state of the beam propagating in the closed optical path. The constructed platform was also characterized as a transducer of temperature change, longitudinal stress and change of the external refractive index of the medium surrounding the measuring head. Interference minima of FLM, also functioning as an optical filter, allowed the use of differential measurement giving extreme sensitivity to the detected physical parameters:  $0.8562 \pm 0.039$  dBm / ° C for temperature,  $1.943 \pm 0.091$  dBm / mε for longitudinal stress and  $3871.5 \pm 10.1$  dBm / RIU for the external refractive index. Tests confirming platform stability over time, as well as repeatability of measurement of the analysed physical variables were also carried out.

Implementing the assumed objectives of the work, the platform was used as a two- point sensor to detect the external refractive index (RI) and temperature changes. This implementation allowed temperature compensation as a dynamic noise measurement of another quantity, here the external refractive index. Matrix analysis allows the separation of signals from two or more processed physicochemical quantities. The paper also presents synthetic results of biological material detection tests using the constructed platform. For this, the immunochemical biotin avidin system was used, where the functionalized surface of the periodic structure (DRLPG) was a measuring head. Thanks to the interferometric loop, it was possible to record extremely small changes caused by the binding of biotin to avidin. This study was a proof of the application possibilities of the characterized platform.

The results presented in the work were the subject of four scientific publications, including three in scientific journals with JCR and over 10 conference presentations in which the PhD student is a co-author. The laboratory experiments were mostly carried out in Photonic Photonics Research Center, Université du Québec en Outaouais in Canada.