



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA
I ELEKTROTECHNIKA

Autoreferat rozprawy doktorskiej pt.

***Wieloparametrowe czujniki wykorzystujące
światłowodowe skośne siatki Bragga***

Autor: mgr inż. Damian Harasim

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Piotr Kisała

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Sławomir Ciężczyk

Praca wykonana: Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki
i Informatyki, Katedra Elektroniki i Technik Informacyjnych

Kraków, 2022

1. Wstęp

Rozwój technologii światłowodów wykorzystywanych w telekomunikacji spowodował, że ich właściwości stały się przedmiotem zainteresowania w zastosowaniach czujnikowych. Ze względu na szereg zalet, czujniki oparte na światłowodowych siatkach Bragga FBG (ang. *fiber Bragg gratings*) stanowią ważną część badań w dziedzinie systemów pomiarowych. Charakteryzują się niewielkimi rozmiarami (średnica włókna światłowodowego typowo 125 μm), odpornością na zakłócenia elektromagnetyczne, a także powtarzalnością procesu wytwarzania, wysoką czułością i możliwością tworzenia wielu czujników w jednym włóknie światłowodowym. Zakres potencjalnych aplikacji jest szeroki i obejmuje m.in. pomiary wielkości fizycznych w elektroenergetyce czy elementach kompozytowych [1,2]. Przetworniki w formie siatek Bragga mogą być elementami bardziej skomplikowanych czujników.

Istnieje wiele możliwości modyfikacji wewnętrznej struktury periodycznej w celu uzyskania różnych parametrów spektralnych. Jedną z możliwych modyfikacji włókna światłowodowego jest stworzenie siatek długookresowych LPG (ang. *long period gratings*), które oferują wyższą czułość na zginanie. Inną potencjalną modyfikacją struktur Bragga jest wprowadzenie pewnej niezerowej wartości kąta pomiędzy płaszczyznami dyfrakcyjnymi a płaszczyzną przekroju poprzecznego światłowodu, co pozwala uzyskać skośne siatki Bragga TFBG (ang. *tilted fiber Bragg Grating*) [5]. Rezultatem jest silne sprzęganie światła z rdzenia włókna do płaszczka, co w efekcie obserwowane jest jako szereg minimów w widmie transmisyjnym tego typu struktury. Propagacja światła w płaszczu włókna sprawia, że minima te charakteryzują się czułością na zmiany współczynnika załamania włókna oraz niesymetryczne naprężenia powodowane przez zmiany promieni krzywizny włókna. Struktury tego typu wytwarzane w układach zbliżonych do standardowych systemów zapisu siatek konwencjonalnych zapewniają wysoki stopień powtarzalności.

Wykrywanie kilku wielkości fizycznych jednocześnie przy użyciu światłowodowych siatek Bragga jest przedmiotem badań z uwagi na różne zalety takich rozwiązań. Po pierwsze, oferują większą elastyczność i większą ilość informacji dzięki badaniu dwóch wielkości niezależnie od siebie. Po drugie, czujniki FBG z natury wykazują czułość krzyżową, która powoduje brak możliwości rozróżnienia wpływu różnych wielkości (np. naprężenia oraz temperatury) na przesunięcie długości fali. Dotychczas prezentowano różne podejścia i techniki w celu przeciwdziałaniu temu zjawisku takie jak budowa interferometru światłowodowego Fabry-Perot [6,7], modyfikacje wewnętrzne struktur FBG czy wytwarzanie siatek na światłowodach o różnych parametrach geometrycznych czy specjalnym domieszkowaniu [8,9]. Możliwe jest również budowanie układów przesłuchujących wykorzystujących metody interferometryczne czy polarymetryczne. Dużym zainteresowaniem cieszy się zastosowanie pojedynczego czujnika FBG do jednoczesnego pomiaru dwuparametrowego. Oprócz pomiaru dwóch wielkości mierzonych jednocześnie, do zalet takiego rozwiązania należy: 1) jego konstrukcja jest generalnie mniej trudna do wykonania oraz 2) przetwornik może być wykonany w kompaktowych, miniaturowych rozmiarach.

2. Teza, cel i zakres pracy

2.1. Teza pracy

Dobór cech spektralnych oraz parametrów struktur pochyłonych siatek Bragga pozwala na wyznaczenie wartości kilku wielkości fizycznych działających jednocześnie na jeden element TFBG.

2.2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest badanie i analiza wpływu zmian wybranych wielkości fizycznych na charakterystyki widmowe światłowodowych struktur periodycznych o pochyłonych płaszczyznach dyfrakcyjnych oraz dobór takich cech spektralnych, które umożliwią jednoczesne wyznaczenie wartości tych wielkości.

Cel został osiągnięty poprzez wykonanie zadań:

- wytworzenie skośnych siatek Bragga o zmiennych parametrach (długość, kąt pochylenia, głębokość modulacji współczynnika załamania),
- opracowanie układu opto-mechanicznego umożliwiającego zadawanie wielkości mierzonych (przesunięcia/promienia zgięcia, kąta obrotu oraz temperatury),
- wybór parametrów charakterystyk widmowych siatek, na podstawie których wyznaczano badane wielkości fizyczne,
- określenie kluczowych parametrów metrologicznych wykorzystanej metody.

Za najważniejsze osiągnięcia uważam:

- zdefiniowanie wpływu zmian kąta pochylenia płaszczyzn o podwyższonym współczynniku załamania oraz głębokości modulacji współczynnika załamania siatek skośnych o kątach 2° oraz 4° ,
- zbudowanie stanowiska do wytwarzania periodycznych struktur światłowodowych o zmiennych kątach pochylenia płaszczyzny wewnętrznych perturbacji współczynnika załamania,
- stworzenie układu pomiarowego, w którym możliwe jest zadawanie promienia gięcia włókna w zakresie promieni od 12 do 30 mm, kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego w zakresie $0-360^\circ$ oraz zmian temperatury otoczenia,
- określenie parametrów spektralnych widm struktur TFBG o kątach pochylenia 2° oraz 4° powiązanych ze zmianami promienia gięcia, kąta obrotu oraz temperatury otoczenia,
- wykazanie możliwości wykorzystania pojedynczej periodycznej struktury światłowodowej o pochyłonej płaszczyźnie modulacji współczynnika załamania do pomiaru trzech wielkości fizycznych jednocześnie,
- wyznaczenie czułości wybranych parametrów spektralnych struktur o kącie wewnętrznym 2° oraz 4° na zmiany promienia gięcia, kąta obrotu oraz temperatury,
- wyznaczenie czułości skośnych przy pomiarach dwóch wielkości fizycznych jednocześnie: promienia gięcia oraz kąta obrotu, promienia gięcia oraz temperatury, kąta obrotu oraz temperatury,
- określenie podstawowych parametrów metrologicznych analizowanej metody pomiaru trzech wielkości fizycznych.

3. Opis rozprawy

W niniejszej pracy zaprezentowany został układ do wytwarzania światłowodowych siatek Bragga o pochyłonych płaszczyznach dyfrakcyjnych, charakterystyki zależności wybranych parametrów spektralnych struktur TFBG od zmian promienia gięcia, kąta obrotu i temperatury oraz analizę możliwości wykorzystania pojedynczej TFBG do pomiaru wszystkich tych wielkości jednocześnie.

Zawartość pracy obejmuje jeden rozdział wprowadzający, jeden rozdział dotyczący wytwarzania i charakteryzacji widm struktur TFBG, oraz dwa rozdziały merytoryczne dotyczące pomiarów wybranych wielkości fizycznych z wykorzystaniem przetworników w postaci siatek skośnych o różnych kątach nachylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych.

W rozdziale trzecim przedstawiono zasadę działania światłowodowych siatek Bragga, ich rodzaje, potencjalne modyfikacje struktury ze szczególnym naciskiem na skośne siatki Bragga. Przedstawiono również ich właściwości oraz czułości na zmiany wybranych wielkości fizycznych.

Treść rozdziału czwartego dotyczy metod wytwarzania klasycznych siatek Bragga oraz ich modyfikacje, pozwalające na zapis struktur o pochyłonych płaszczyznach modulacji współczynnika załamania. Przedstawiono wpływ zmian kąta pochylenia oraz głębokości modulacji współczynnika załamania na charakterystyki spektralne TFBG.

Rozdział piąty opisuje w sposób szczegółowy zmiany parametrów widmowych poszczególnych rezonansów siatek TFBG o kątach 2° oraz 4° , pod wpływem zmian promienia krzywizny, kąta obrotu oraz temperatury. Określone zostały parametry spektralne charakteryzujące się najwyższą czułością na zmiany wyszczególnionych wielkości.

W rozdziale szóstym opisano możliwość prowadzenia jednoczesnych pomiarów promienia gięcia, kąta obrotu oraz temperatury z pojedynczą strukturą TFBG w charakterze przetwornika. Opisano wzajemny wpływ zmian wybranych wielkości fizycznych na parametry widmowe określając czułości skośne modów płaszczowych. Porównano potencjał siatek skośnych o różnych kątach nachylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych w zastosowaniu do pomiaru trzech wielkości fizycznych jednocześnie.

Rozdział ostatni zawiera podsumowanie oraz wnioski z przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz określa dalsze możliwości budowy czujników wielu wielkości fizycznych przy zastosowaniu pojedynczej struktury TFBG jako przetwornika pomiarowego. Wskazane zostały również kierunki potencjalnych modyfikacji struktury wewnętrznej siatek skośnych w celu ograniczenia wzajemnych czułości przy pomiarach wielu wielkości jednocześnie.

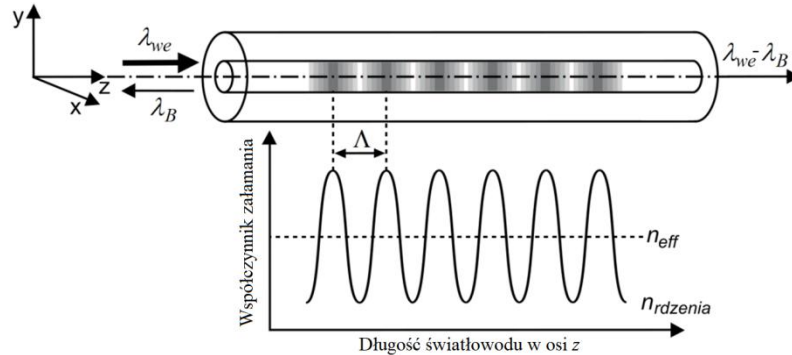
3.1. Światłowodowa siatka Bragga

Światłowodowa siatka Bragga jest to najczęściej krótki fragment światłowodu, w którego rdzeniu wytworzona została periodyczna struktura składająca się ze skończonej liczby następujących po sobie odcinków światłowodu o podwyższonej wartości współczynnika załamania. Najczęściej spotykane siatki, w których płaszczyzny zmian współczynnika załamania przebiegają równoległe do przekroju poprzecznego światłowodu nazywane są często konwencjonalnymi. Charakter zmian wartości współczynnika załamania na długości siatki Bragga zależy od przyjętej metody wytwarzania takiej struktury i najczęściej ma przebieg sinusoidalny. W przypadku struktur konwencjonalnych siatka odbija fale o charakterystycznej długości λ_B (długość fali Bragga) przy zachowaniu transparentności dla światła o pozostałych długościach fal. Znając podstawowe parametry wytworzonej struktury, długość fali Bragga wyznaczyć można ze wzoru:

$$\lambda_B = 2(n_{eff}^r) \cdot \Lambda, \quad (3.1)$$

gdzie n_{eff}^r jest efektywną wartością współczynnika załamania rdzenia światłowodu, a Λ_g jest okresem wytworzonych perturbacji współczynnika refrakcji i określana jest jako stała siatki [2].

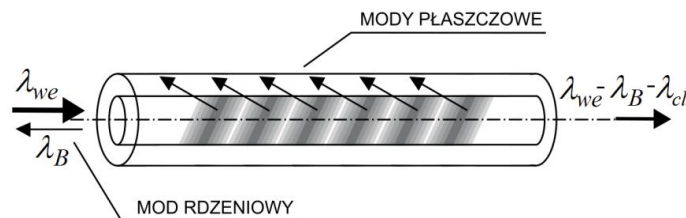
Promieniowanie, którego długość fali spełnia warunek Bragga opisany wzorem (3.1) na każdej napotkanej zmianie współczynnika refrakcji ulega częściowemu rozproszeniu oraz odbiciu w przeciwnym kierunku. Odbite promienie dodają się w fazie i tworzą na zasadzie konstruktywnej interferencji mod światła odbitego. Dla włókien ze szkła krzemionkowego przeznaczonych do pracy w trzecim oknie transmisyjnym, typowa wartość okresu struktury wynosi około 500 nm [3].



Rys. 3.1. Schemat światłowodowej siatki Bragga wraz z wykresem zmian współczynnika załamania rdzenia wzdłuż światłowodu

Na rysunku 3.1. schematycznie przedstawiono siatkę Bragga wraz z wykresem obrazującym modulację współczynnika załamania rdzenia w obszarze siatki. Modulacje współczynnika załamania określa się często jako płaszczyzny zmian pomimo, że są one płynne, a nie skokowe. W literaturze często spotyka się określenie płaszczyzny dyfrakcyjne (ang. *diffraction planes*) [10,11].

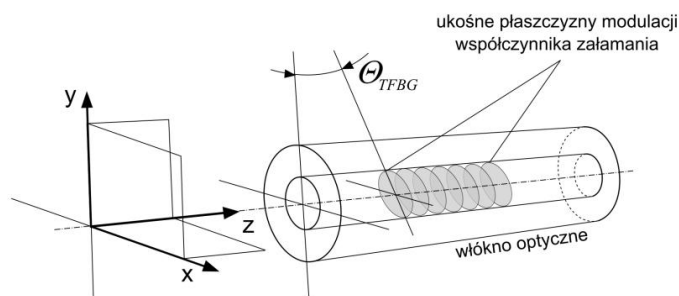
Szczególnym rodzajem światłowodowych struktur periodycznych są skośne siatki Bragga TFBG (ang. *tilted fiber Bragg gratings*), które powstają poprzez zastosowanie technologicznej modyfikacji zapisu struktury w porównaniu do siatek tradycyjnych, polegającej na wprowadzeniu pewnego niezerowego kąta pomiędzy płaszczyznę okresowej dyfrakcyjną a płaszczyznę przekroju poprzecznego włókna światłowodowego [20–22]. Na rysunku 3.2. przedstawiony został schemat struktury wewnętrznej pochylonych prążków współczynnika załamania siatki TFBG.



Rys. 3.2. Schemat światłowodowej skośnej siatki Bragga z zaznaczeniem obszaru występowania wyciekających modów płaszczowych

Konwencjonalna FBG (tj. taka, której płaszczyzny modulacji współczynnika załamania są równoległe do płaszczyzny czołowej włókna) charakteryzuje się jednym silnym rezonansem powodującym zanik mocy optycznej w widmie transmisyjnym dla długości fali spełniającej warunek Bragga. Ten sam rezonans widoczny jest również w widmie odbiciowym siatki jako pojedynczy pik mocy optycznej dla tej samej długości fali światła jak w przypadku transmisji [23,24]. Oprócz wyraźnego efektu widocznego dla długości fali Bragga, w widmie transmisyjnym prostej siatki o dużej amplitudzie modulacji współczynnika załamania widoczne są również minima mocy optycznej obserwowane w zakresie fal krótszych, pochodzące od modów wprowadzonych do płaszcza światłowodu [25–28]. Zjawisko to w przypadku większości zastosowań FBG jest niepożądane z uwagi na wymaganą dużą selektywność widmową odbijanego światła. Wprowadzenie kąta pochylenia pomiędzy płaszczyzny zapisanych zmian współczynnika załamania w obszarze siatki skutkuje silnym zwiększeniem współczynnika sprzężenia modów płaszczowych przy jednoczesnym osłabieniu

rezonansu Bragga. Na charakterystyce spektralnej obserwowane jest to zawsze jako rezonans o największej długości fali ponieważ efektywny współczynnik załamania światła dla tej długości fali ma największą wartość. W pewnym uproszeniu można stwierdzić, że mody płaszczowe prowadzone są na granicy płaszczka i rdzenia światłowodu, przez co ich parametry spektralne wykazują wrażliwość na wiele wielkości fizycznych [29–31]. W przypadku światłowodu jednomodowego, duża średnica płaszczka, w porównaniu do długości fali transmitowanego światła, pozwala na propagację wielu modów płaszczowych.

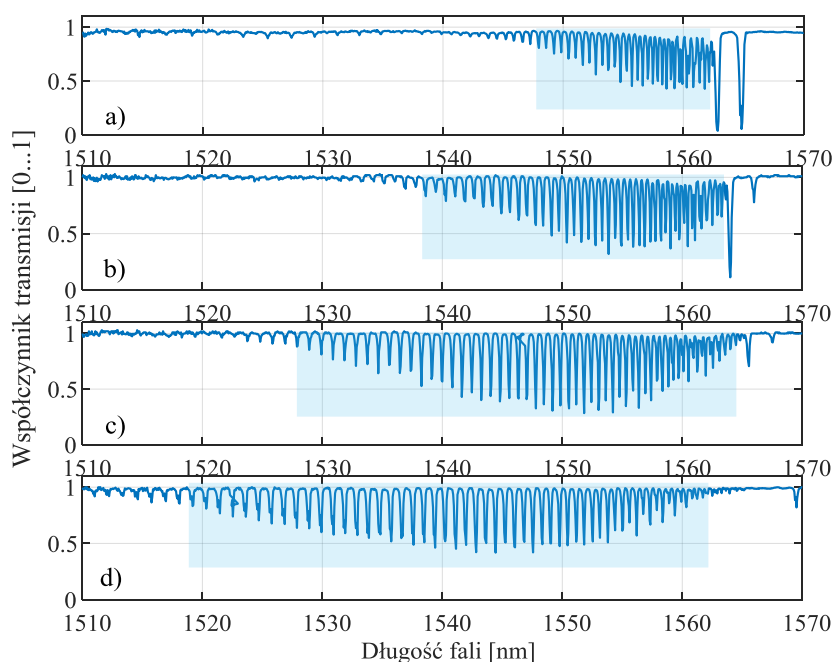


Rys. 3.3. Schemat przestrzennego zorientowania ukośnych płaszczyzn modulacji dyfrakcyjnych rdzenia światłowodu w układzie współrzędnych xyz

W celu precyzyjnego określenia orientacji płaszczyzn dyfrakcyjnych w objętości włókna światłowodowego, istotne jest umieszczenie jej w układzie współrzędnych xyz . Rysunek 3.3. przedstawia schematyczny widok TFBG w odniesieniu do przestrzennego układu współrzędnych. W dalszej części pracy wykorzystywane będzie analogiczne pozycjonowanie struktury periodycznej w stosunku do stałego układu.

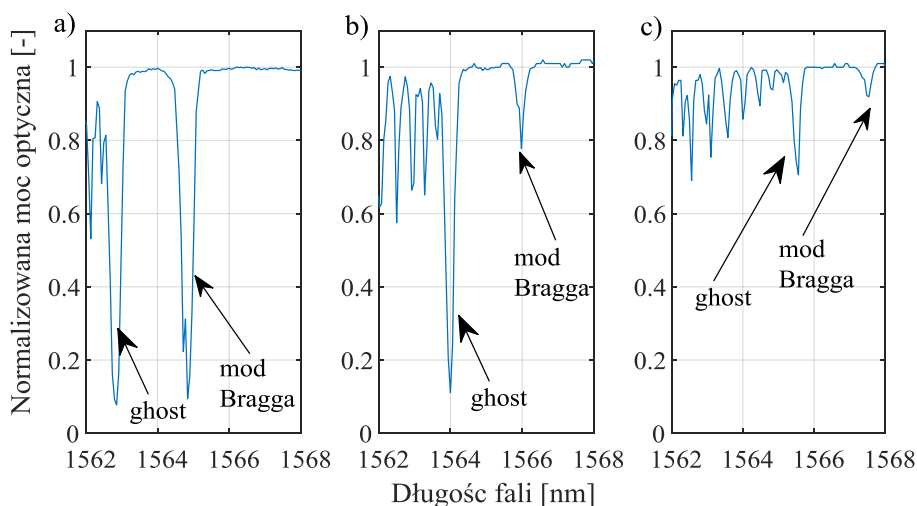
3.2. Wpływ zmian kąta pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania

Najistotniejszym parametrem warunkującym właściwości spektralne siatek skośnych jest kąt θ_{TFBG} zawarty pomiędzy płaszczyznami modulacji współczynnika załamania w rdzeniu a powierzchnią przekroju poprzecznego włókna.



Rys. 3.4. Widma transmisyjne periodycznych struktur światłowodowych o pochyłonych płaszczyznach dyfrakcyjnych: a) 2° , b) 3° , c) 4° , d) 5°

Rysunek 3.4. przedstawia widma transmisyjne siatek skośnych o różnych kątach pochylenia wewnętrznych stref podwyższonego współczynnika załamania. Kolorem niebieskim zaznaczono zakres widmowy występowania maksimów strat transmisyjnych pochodzących od modów płaszczowych. Wraz ze zwiększaniem kąta pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania względem płaszczyzny przekroju poprzecznego włókna, wzrasta zakres widma pokrywany przez minima mocy światła transmitowanego przez strukturę. Dodatkowo zauważyć można, że długość fali związana z rezonansem modu rdzeniowego ulega przesunięciu w kierunku fal dłuższych, co związane jest z zależnościami geometrycznymi wynikającymi ze zwiększania kąta pochylenia struktury wewnętrznej siatki. Jednocześnie straty mocy charakterystyczne dla modu ghost stają się coraz mniejsze, co pokazane zostało na rysunku 3.5.

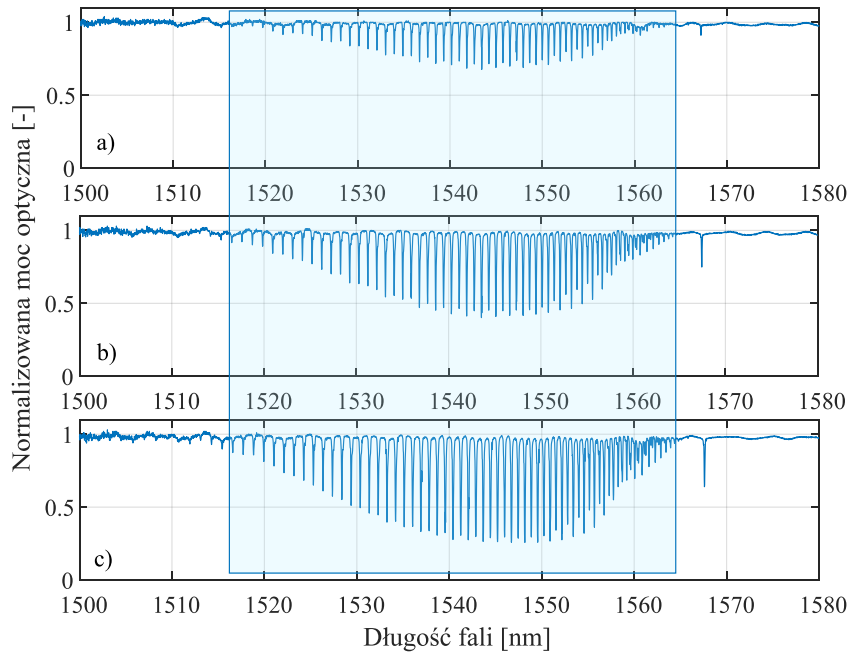


Rys. 3.5. Charakterystyki obszarów spektralnych siatek skośnych o kątach a) 1°, b) 2°, c) 3° pokazujące widma transmisyjne rezonansu Bragga oraz modu ghost

W przypadku siatek o najmniejszych kątach pochylenia, minima pochodzące od modów najniższych rzędów tworzące na widmie mod ghost „zlewają się” w jeden silny rezonans.

3.3. Wpływ zmian głębokości modulacji współczynnika załamania w obrębie tworzonej struktury periodycznej

Kolejnym szczególnie istotnym parametrem wpływającym na właściwości widmowe periodycznych struktur światłowodowych o pochylenych płaszczyznach stref o podwyższonej wartości współczynnika załamania jest głębokość modulacji tego współczynnika. Parametr ten podczas wytwarzania skośnej siatki Bragga w istocie najczęściej związany jest z mocą źródła promieniowania zapisującego oraz długością prowadzonego procesu zapisu. W układzie opracowanym na potrzeby niniejszej pracy wykorzystywano laser ekscymerowy o regulowanej energii oraz częstotliwości generowanych impulsów. Pomiar widma struktury o narastającej wartości amplitudy profilu współczynnika załamania wzdłuż osi podłużnej światłowodu, realizowane były podczas procesu wytwarzania z odstępami czasowymi wynoszącymi 1 minutę. Rysunek 3.4. przedstawia widma transmisyjne skośnej siatki Bragga o kącie 4 stopnie, wytwarzanej przy energii impulsu promieniowania zapisującego równej 90 mJ, z częstotliwością repetycji wynoszącą 50 Hz, pracującego przez: a) 1 minutę, b) 3 minuty, c) 4 minuty.



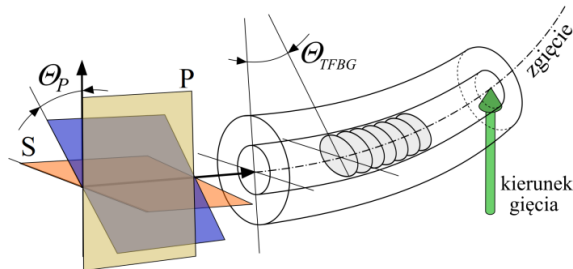
Rys. 3.4. Widma transmisyjne struktury Bragga o płaszczyznach modulacji współczynnika załamania pod kątem 4° dla narastającego czasu wytwarzania: a) 1 minuta, b) 3 minuty, c) 4 minuty

Istotne z punktu widzenia charakteryzacji struktur periodycznych o pochyłych płaszczyznach modulacji jest to, że zwiększenie amplitudy profilu zmian współczynnika załamania nie wpływa na poszerzenie zakresu spektralnego, w którym występują minima mocy charakterystyczne dla modów płaszczowych. Zwiększeniu natomiast ulega stopień sprzęgania poszczególnych rezonansów, co objawia się pogłębieniem amplitudy minimów mocy obserwowanych w widmie transmisyjnym.

4. Zmiany widma pojedynczej skośnej siatki TFBG przy jednoczesnej zmianie kilku wielkości fizycznych

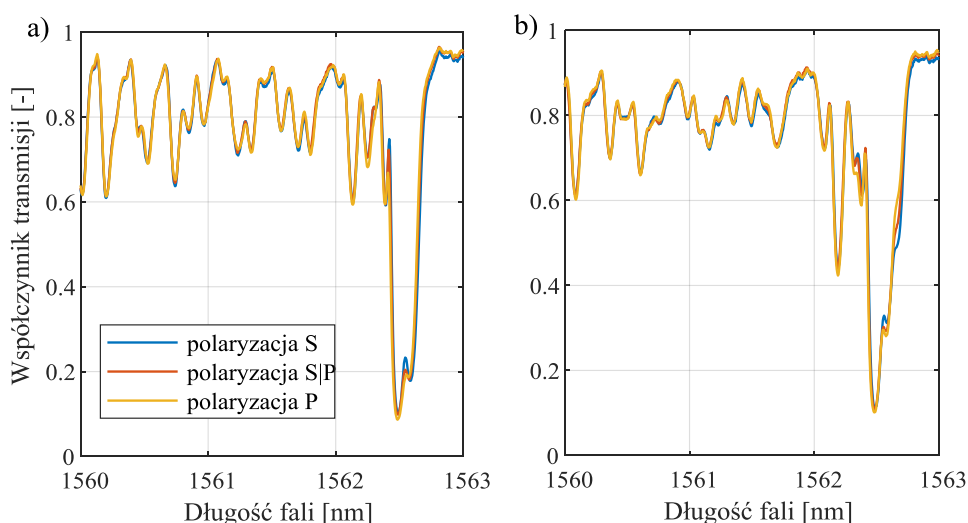
4.1. Wpływ zmian promienia gięcia i kąta obrotu na widma TFBG 2°

Opisane w powyższych rozdziałach właściwości spektralne siatki TFBG o kącie pochylenia struktury wewnętrznej wynoszącym 2° dotyczą zmian wybranych parametrów spektralnych przy zmianach promienia gięcia, kąta polaryzacji światła wprowadzanego do włókna oraz temperatury. Niniejszy rozdział przedstawia analizę wpływu jednoczesnych zmian tych wielkości fizycznych na określone wcześniej parametry widmowe wybranych fragmentów spektrum transmisyjnego. Określone zostały tzw. czułości skrośne oraz wpływ zmian gięcia na współczynniki widmowe związane z pomiarem skrętu. Pozwoliło to na określenie możliwości wykorzystania pojedynczego elementu przetwarzającego w postaci siatki TFBG do pomiaru dwóch wielkości fizycznych jednocześnie. Na rysunku 4.1. przedstawiono schematycznie widok włókna z zapisaną strukturą TFBG ulegającą gięciu oraz trzy charakterystyczne kąty polaryzacji światła wejściowego.



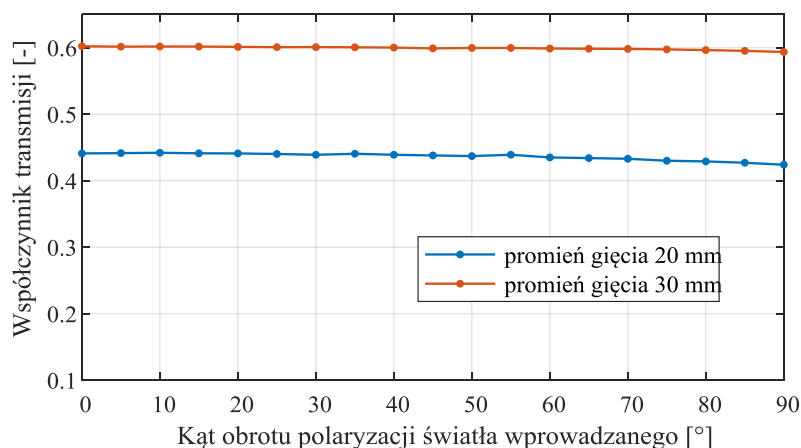
Rys 4.1. Schematyczny widok wewnętrznej struktury siatki TFBG wraz z zaznaczonymi trzema charakterystycznymi przypadkami polaryzacji światła

Analiza przeprowadzona w niniejszym rozdziale dotyczy przypadku gięcia włókna w płaszczyźnie xy układu współrzędnych. Pierwszym analizowanym przypadkiem było określenie wpływu zmian kąta polaryzacji światła wprowadzanego do światłowodu na parametry spektralne, świadczące o zmianach promienia gięcia włókna z zapisaną skośną siatką Bragga. Analizie poddane zostały parametry spektralne, tj. współczynnik transmisji oraz długość fali modu LP_{11} . Rysunek 4.2. przedstawia charakterystyki spektralne wybranych zakresów widmowych modu niskiego rzędu LP_{11} wyznaczone przy trzech skrajnych przypadkach polaryzacji światła wprowadzanego: stan P, stan S oraz przejściowy P/S, a także dla dwóch promieni gięcia: 30 mm (a) oraz 15 mm (b). W przypadku kątów polaryzacji światła zmieniających się pomiędzy skrajnymi stanami tj. od $\theta_P = 0^\circ$ (P) do $\theta_P = 90^\circ$ (S) zmiany parametrów spektralnych są monotoniczne. Należy zatem uznać, że potencjalny wpływ zmian polaryzacji na parametry związane z wyznaczaniem promienia gięcia będzie najbardziej znaczący właśnie dla przypadków skrajnych.



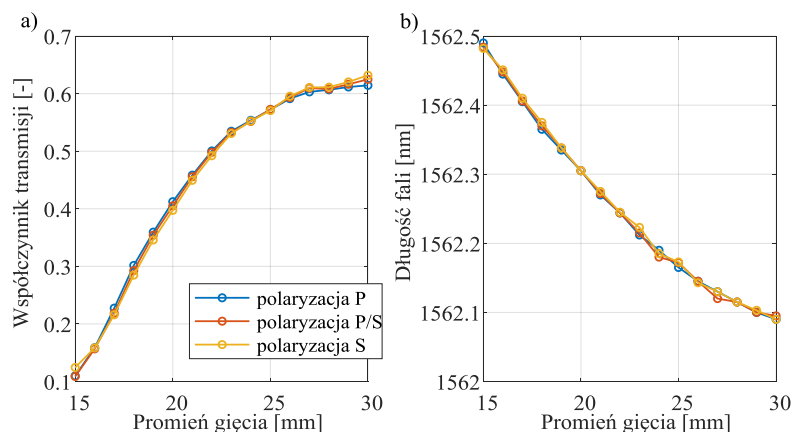
Rys. 4.2. Widma siatki 2° mierzone dla: a) promienia gięcia 30 mm oraz b) 20 mm przy kątach polaryzacji światła wprowadzanego S, S/P oraz P

Charakterystyki przedstawione na rysunku 4.2. pokazują jasno, że przy zmianach kąta polaryzacji światła wprowadzanego do struktury TFBG, widma nie ulegają znaczącym zmianom w obrębie modów wykazujących dużą czułość na zmiany promienia gięcia. Na rysunku 4.3. przedstawione zostały charakterystyki zmian współczynnika transmisji modu LP_{11} wyznaczone przy zmianach kąta polaryzacji światła w zakresie 0° do 90° (pomiędzy P a S). Zakres wartości współczynnika transmisji przedstawiono w zakresie od 0,1 do 0,6, który odzwierciedla przedział zmian współczynnika transmisji modu LP_{11} dla zmian promienia gięcia w założonym zakresie od 15 mm do 30 mm.



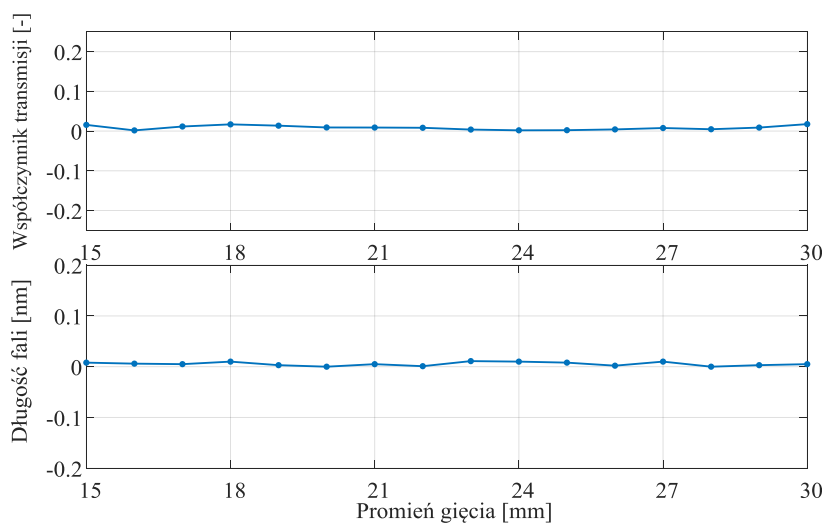
Rys. 4.3. Przebieg zmian współczynnika transmisji modu LP_{11}

Obok współczynnika transmisji modu płaszczowego niskiego rzędu, parametrem zależnym od promienia gięcia włókna jest długość fali minimum transmisji dla tego modu. Zważywszy na to, wyznaczona została dodatkowo charakterystyka zmian centralnej długości fali modu LP_{11} przy zmianach promienia gięcia wyznaczona dla trzech skrajnych przypadków polaryzacji światła wprowadzanego: typu P, S oraz P/S. Rysunek 4.4.a przedstawia charakterystyki przejściowe zmian współczynnika transmisji natomiast rysunek 4.4b przedstawia zmiany centralnej długości fali modu niskiego rzędu wyznaczone przy trzech skrajnych przypadkach polaryzacji światła wprowadzanego: stan P, stan S oraz przejściowy P/S.



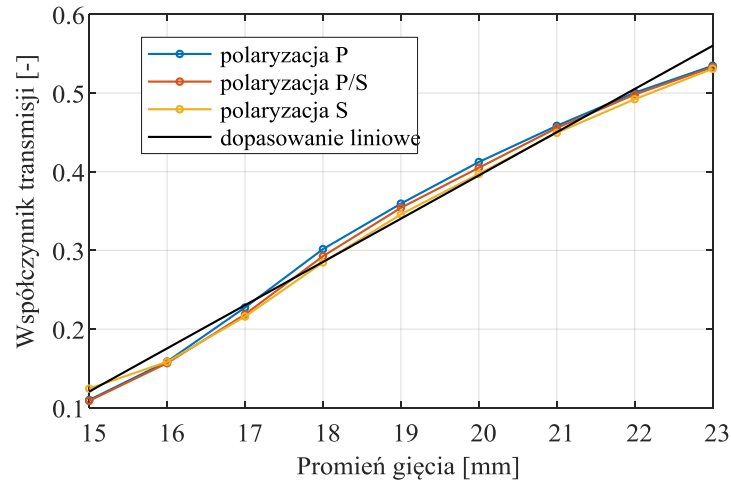
Rys. 4.4. Charakterystyki przejściowe współczynnika transmisji (a) oraz centralnej długości fali (b) modu płaszczowego LP_{11} dla trzech wartości polaryzacji

Z charakterystyk przedstawionych na rysunku 4.4. wynika, iż mimo wprowadzania światła o kątach polaryzacji skrajnie różnych zachowany jest charakter zmian zarówno centralnej długości fali jak również współczynnika transmisji wybranego modu. Różnice w wartościach wskazanych powyżej parametrów przy zmianach polaryzacji są nieznaczne. Na rysunku 4.5. pokazane zostały charakterystyki przedstawiające wartości największej różnicy pomiędzy wartościami współczynnika transmisji (a) oraz centralnej długości fali modu (b) wyznaczanymi dla stanów polaryzacji P, S oraz P/S. Kształt charakterystyk wskazuje, iż w zakresie promieni gięcia od 15 do 30 mm największe różnice współczynnika transmisji odnotowano dla skrajnych wartości krzywizny, co jest zgodne z rysunkiem 4.5. Parametr centralnej długości fali natomiast utrzymuje stałą wartość w pełnym założonym zakresie gięcia.



Rys. 4.5. Zmiana wartości największej różnicy pomiędzy wartościami: a) współczynnika transmisji; b) centralnej długości fali modu LP_{11} wyznaczanymi dla kolejnych promieni gięcia dla trzech wartości polaryzacji światła wejściowego: S, P oraz S|P.

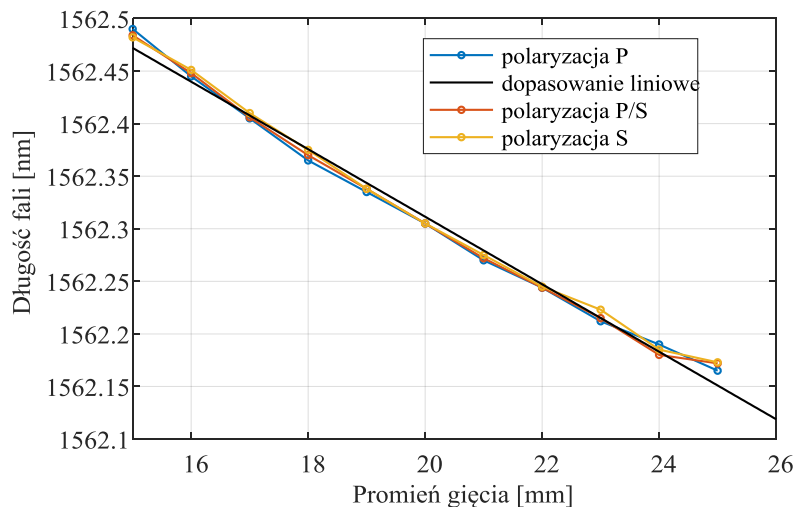
Z analizy rysunku 4.5. wynika, że w przypadku zgięcia o promieniu od 15 mm do 23 mm, charakterystyka przejściowa współczynnika związanego z amplitudą sygnału mierzonego dla wybranej długości fali zachowuje kształt zbliżony do liniowego. Fragment charakterystyki został pokazany na rysunku 4.6. poniżej.



Rys. 4.6. Zbliżony do liniowego zakres charakterystyk przejściowych zmian współczynnika transmisji modu LP_{11} dla kolejnych promieni gięcia włókna, mierzonych dla trzech stanów polaryzacji światła

Do wykresów zamieszczonych powyżej dodatkowo podana została prosta przybliżenia liniowego wyznaczana dla uśrednionych wartości współczynnika transmisji wyznaczonych dla kolejnych promieni gięcia włókna. W założonym zakresie krzywizn włókna, największa różnica pomiędzy odczytami mocy transmisyjnej wynosi 0,0169. Przyjmując, że dla promieni gięcia od 15 do 23 mm zmiana współczynnika wynosi 0,4241, przekłada się to na niepewność wyznaczania promienia gięcia wynoszącą 0,318 mm.

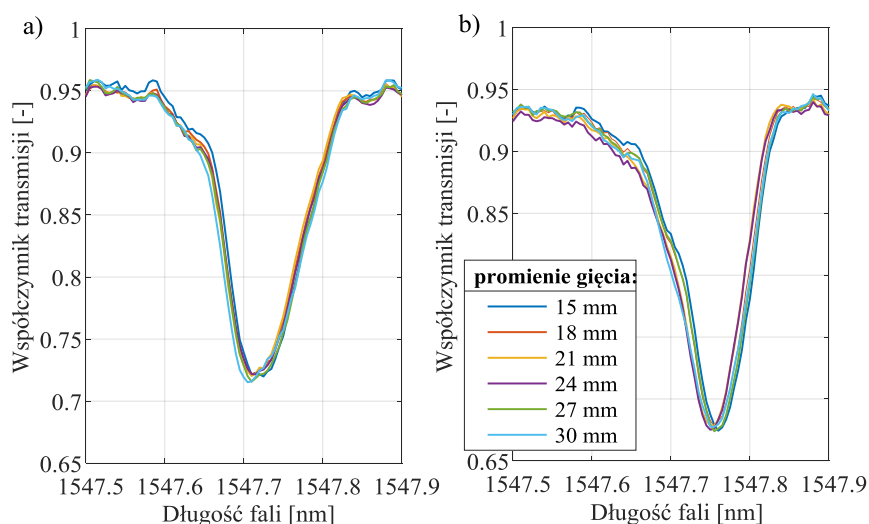
Kolejnym parametrem spektralnym związanym z promieniem gięcia, którego zmiany w wybranym zakresie zachowują kształt zbliżony do liniowego jest centralna długość fali wybranego modu płaszczowego LP_{11} . Rysunek 4.7. przedstawia charakterystyki przejściowe długości fali od zmian promieniowania gięcia, wyznaczone na podstawie widm mierzonych przy trzech opisanych wcześniej przypadkach polaryzacji światła.



Rys. 4.7. Charakterystyki przejściowe zmian centralnej długości fal modu LP_{11} dla kolejnych promieni gięcia włókna, mierzonych dla trzech stanów polaryzacji światła

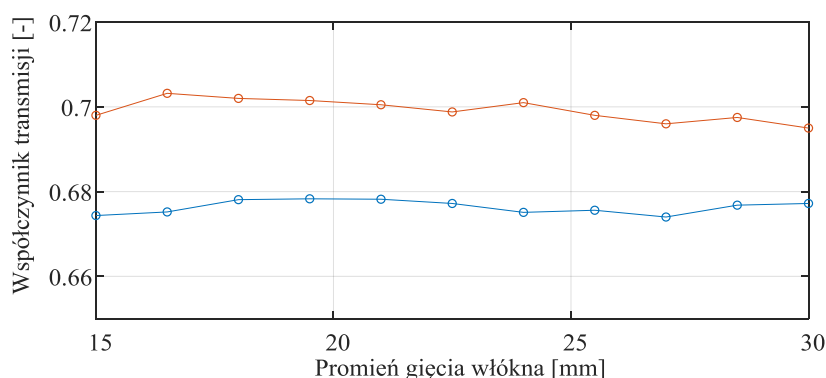
Przedstawione powyżej wykresy podobnie jak w przypadku rozpatrywanego wcześniej współczynnika transmisji oznaczają, iż zmiana kąta polaryzacji światła nie wpływa znacząco na zmiany kształtu charakterystyk przejściowych. Przyjmując, że dla wybranego zakresu promieni gięcia zmiana długości fali modu LP_{11} wynosi 0,309 nm, największa różnica pomiędzy długościami fali wynosząca 0,011 nm przekłada się na błąd wyznaczania promienia gięcia związana ze stanem polaryzacji światła wprowadzanego rzędu 0,3203 mm.

Kolejnym analizowanym przypadkiem jest wpływ zmian promienia gięcia na parametry spektralne wytypowane jako powiązane z kątem polaryzacji światła wejściowego. Wybrane mody płaszczowe wysokiego rzędu powinny zachować kształt spektrum podczas poddawania włókna światłowodowego zmianom promienia gięcia. W dalszej części pracy przedstawione zostały widma modu płaszczowego LP_{016} mierzone dla różnych stanów polaryzacji oraz charakterystyki przejściowe zmian skrzywienia płaszczyzny polaryzacji światła wprowadzanego na współczynnik transmisji dla wybranych długości fali. Na rysunku 4.8. przedstawione zostały widma transmisyjne tego samego modu LP_{016} mierzone dla dwóch skrajnych przypadków polaryzacji światła wprowadzanego (typu S oraz P) przy jednoczesnej zmianie promienia gięcia włókna w miejscu wytworzonej TFBG.



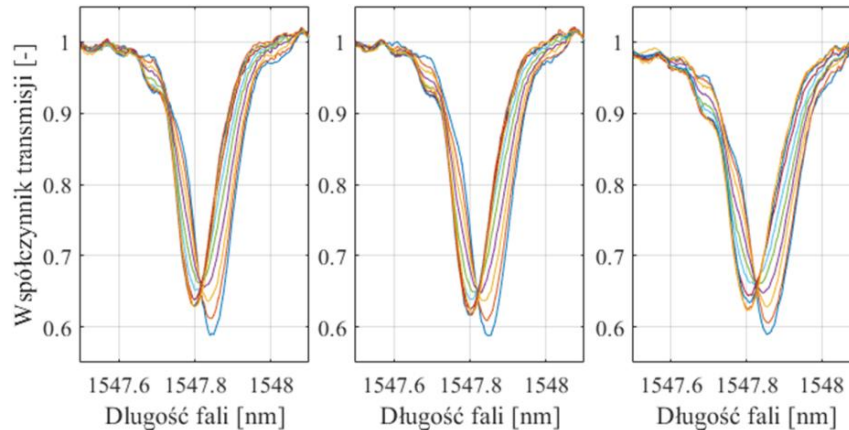
Rys. 4.8. widma transmisyjne modu LP_{016} mierzone dla dwóch skrajnych przypadków polaryzacji światła wprowadzanego: a) typu P, b) typu S przy jednoczesnej zmianie promienia gięcia włókna

Charakterystyki przedstawione na rysunku 4.8. wskazują, że zmiana promienia gięcia włókna światłowodowego wpływa nieznacznie na współczynnik transmisji wybranego modu płaszczowego zarówno w przypadku polaryzacji w płaszczyźnie xy jak również xz , co przedstawione zostało na rysunku 4.9.



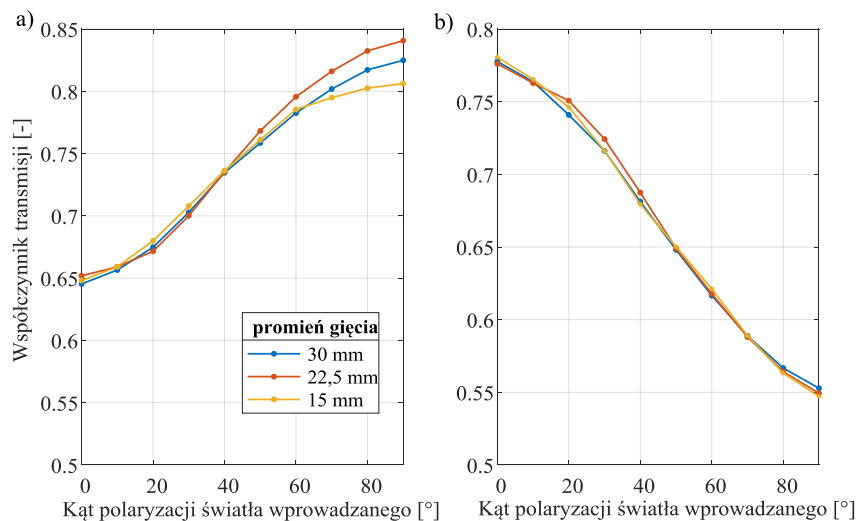
Rys. 4.9. Zmiany współczynnika transmisji modu LP_{016} przy zmianach promienia gięcia włókna w zakresie 15–30 mm.

Stałość wartości współczynnika transmisji w tym przypadku jest istotna z uwagi na fakt, iż parametr ten został powiązany ze zmianami kąta wzajemnego skrętu elementów skutkującego zmianą polaryzacji światła. Dzięki temu, możliwe jest uzyskanie pomiaru niezależnego zarówno promienia gięcia w zakresie 15–30 mm oraz kąta skrętu elementów z wykorzystaniem zmian polaryzacji światła wprowadzanego. Na rysunku 4.10. pokazane zostały zmiany widma transmisyjnego wybranego modu płaszczowego mierzone dla różnych polaryzacji światła dla trzech wartości promienia gięcia włókna: 15 mm, 22,5 mm oraz 30 mm.



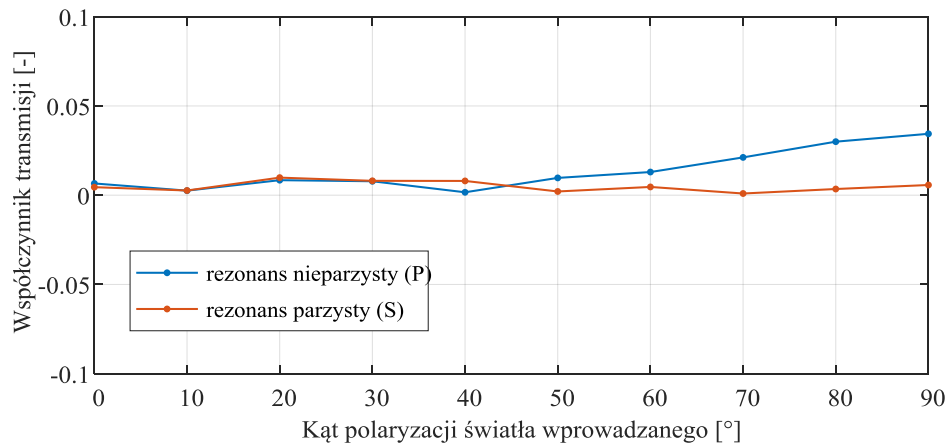
Rys. 4.10. Wykresy przedstawiające charakterystyki spektralne modu LP_{016} siatki TFBG 2° mierzone dla kolejnych stanów polaryzacji i promieniach gięcia: a) 30 mm, b) 22,5 mm oraz c) 15 mm

Charakterystyki przedstawione na rysunku 4.10. pokazują, iż zmiana promienia gięcia w zakresie od 30 mm do 15 mm nie wpływa znacząco na kształt widm modu rdzeniowego wyższego rzędu siatki TFBG 2° . Dodatkowo zmiany współczynnika transmisji, wyznaczone dla wybranych długości fali, powodowane zmianami kąta polaryzacji światła wprowadzanego mają podobny kształt dla każdego z badanych promieni gięcia. Na rysunku 4.11. przedstawione zostały zmiany współczynnika transmisji części modu płaszczowego LP_{016} . Na rysunku 4.11a przedstawiono charakterystyki, które zostały wyznaczone dla długości fali, na której współczynnik transmisji części charakterystycznej dla sprzęgania polaryzacji typu P osiąga najmniejszą wartość. Natomiast na rysunku 4.11b przedstawione zostały wartości współczynnika transmisji wyznaczonego dla długości fali charakterystycznej dla sprzęgania przy polaryzacji typu S.



Rys. 4.11. Wykresy zmiany współczynnika transmisji części *even* (a) oraz *odd* (b) modu LP_{016} siatki TFBG 2° mierzone dla kolejnych stanów polaryzacji przy trzech promieniach gięcia TFBG 2°

Pomiary przedstawione na rysunku 4.11. potwierdzają, iż sprzężanie części modu LP_{016} o większej długości fali charakteryzuje się mniejszą zależnością od promienia gięcia włókna światłowodowego w miejscu wytworzonej struktury TFBG o kącie pochylenia 2° . W przypadku zmian amplitudy rezonansu typu P (Rys. 4.11.a) w miarę skrętu kąta polaryzacji światła wprowadzanego w kierunku płaszczyzny zx różnica pomiędzy wartościami współczynnika transmisji ulega zwiększeniu co zostało odzwierciedlone na rysunku 4.12. Rezonans charakterystyczny dla sprzężania polaryzacji S zachowuje podobny kształt w miarę zmian polaryzacji światła dla wszystkich badanych promieni gięcia. Na rysunku 4.12. przedstawiono charakterystyki największej wartości różnicy pomiędzy wartościami współczynnika transmisji wyznaczanymi przy trzech promieniach gięcia, dla kolejnych kątów polaryzacji światła wprowadzanego.



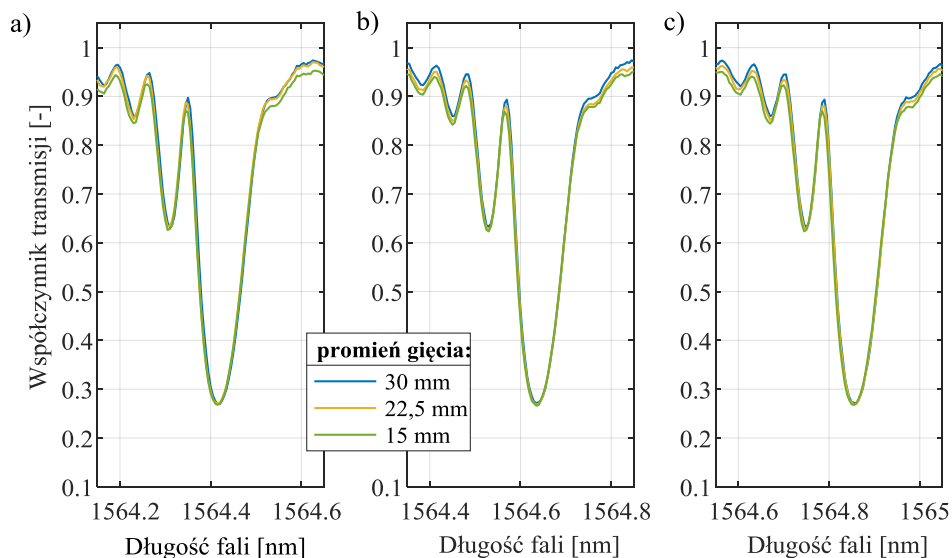
Rys. 4.12. Zmiana wartości największej różnicy pomiędzy wartościami współczynnika transmisji dla rezonansu P oraz rezonansu S modu LP_{016} wyznaczanymi dla kolejnych kątów obrotu polaryzacji przy trzech promieniach gięcia: 30 mm, 22,5 mm oraz 15 mm

Rysunek 4.12. wskazuje jednoznacznie, że amplituda rezonansu o dłuższej centralnej długości fali modu LP_{016} siatki skośnej o kącie 2° jest mniej zależny od zmian promienia gięcia niż w przypadku rezonansu o krótszej długości fali. Dodatkowo warto zauważyć, iż amplituda tego rezonansu charakteryzuje się większym zakresem zmian przy zmianach kąta obrotu. Te dwie właściwości sprawiają, iż w przypadku realizacji pomiaru kąta obrotu niezależnego od promienia gięcia TFBG w zakresie 15–30 mm korzystniejszy jest wybór rezonansu związanego ze sprzężaniem typu S.

Największa różnica pomiędzy wartością współczynnika transmisji modu LP_{016} wyznaczaną dla 3 promieni gięcia wynosi 0,009844. Przy zakresie zmian dla pełnego zakresu kątów polaryzacji światła wprowadzanego (90°) wynoszącym 0,22836, przekłada się to na błąd wyznaczania kąta polaryzacji na poziomie $3,789^\circ$ powodowaną zmianami promienia zgięcia w zakresie 15–30 mm.

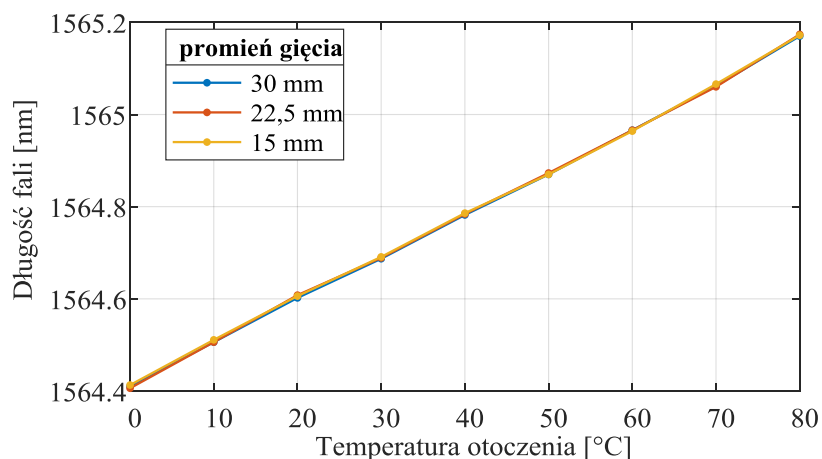
4.2. Wpływ zmian promienia zgięcia i temperatury na widmo TFBG 2°

Analizując możliwość wykonywania pomiarów temperatury oraz promienia gięcia z wykorzystaniem pojedynczej struktury jako przetwornik pomiarowy, należy wykorzystać wyniki przedstawione w rozdziale, w którym zdefiniowane zostały parametry widmowe siatki TFBG 2° związane z pomiarem temperatury oraz promienia krzywizny. Najczęściej wykorzystywanym do pomiaru temperatury elementem widma siatki skośnej o niewielkim kącie pochylenia struktury wewnętrznej jest minimum związane z rezonansem rdzeniowym (Bragga). W celu określenia wpływu zmian promienia krzywizny na długość fali oraz współczynnik odbicia modu podstawowego przeprowadzono eksperyment polegający na zmianie gięcia włókna w miejscu wytworzonej TFBG. Rysunek 4.13. przedstawia charakterystyki transmisyjne modu rdzeniowego mierzone dla promieni krzywizny z zakresie od 15 mm do 30 mm.



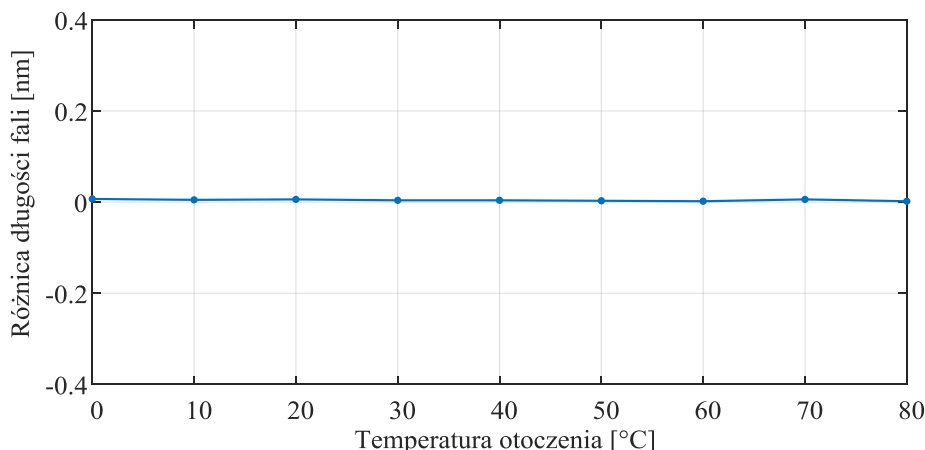
Rys. 4.13. Charakterystyki transmisyjne modu Bragga siatki TFBG o kącie 2° mierzone dla 3 promieni gięcia przy temperaturze otoczenia: a) 20°C ; b) 40°C oraz 60°C

Charakterystyki spektralne przedstawione na rysunku 4.13. wskazują, że zmiana promienia gięcia przy danej temperaturze otoczenia w niewielkim stopniu wpływa na widma modu podstawowego. Jest to zgodne z teoretycznymi założeniami stanowiącymi, że zmiana promienia zgięcia włókna nie powoduje powstawania naprężeń w obrębie rdzenia włókna, gdzie prowadzone jest promieniowanie związane z modem Bragga. Dodatkowo, w celu określenia wpływu zmian promienia gięcia na parametry widmowe związane z przetwarzaniem temperatury, wyznaczone zostały charakterystyki zmian centralnej długości fali Bragga przy krzywiznie o promieniu wynoszącym 15 mm, 22,5 mm oraz 30 mm. Krzywe te przedstawione zostały na rysunku 6.16. Analiza wykresów przedstawionych na rysunku 4.14. wskazuje, że w przypadku każdego z promieni gięcia przetwarzanie temperatury na zmiany długości fali Bragga jest liniowe. Dodatkowo widoczne jest, że różnice wartości długości fali przy danej temperaturze otoczenia powodowane przez zmiany krzywizny w zadanym zakresie są niewielkie.



Rys. 4.14. Wykresy wartości długości fali modu Bragga wyznaczanych dla kolejnych temperatur otoczenia przy trzech wartościach promienia gięcia

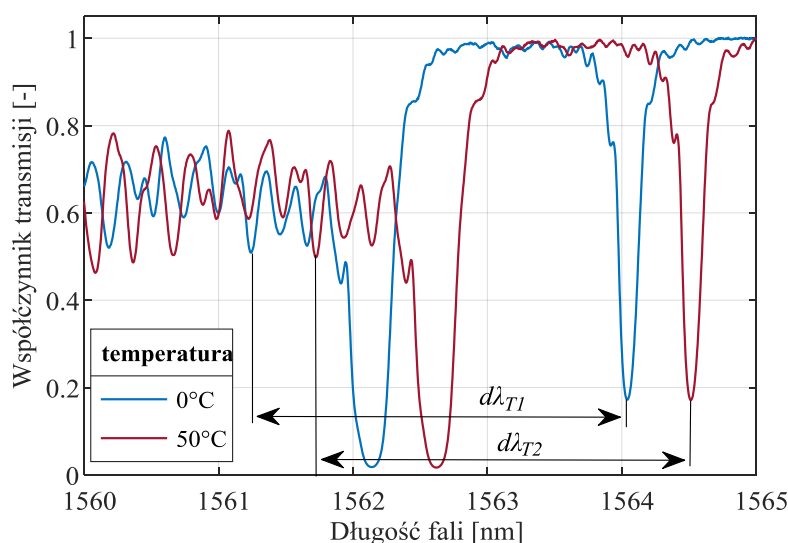
Rysunek 4.15. przedstawia największe różnice długości fali wyznaczone przy zadanej temperaturze i dla promieni gięcia 15 mm, 22,5 mm oraz 30 mm.



Rys. 4.15. Największa różnica pomiędzy długościami fali Bragga modu rdzeniowego wyznaczone dla różnych wartości temperatury przy promieniach gięcia 15 mm, 22,5 mm oraz 30 mm

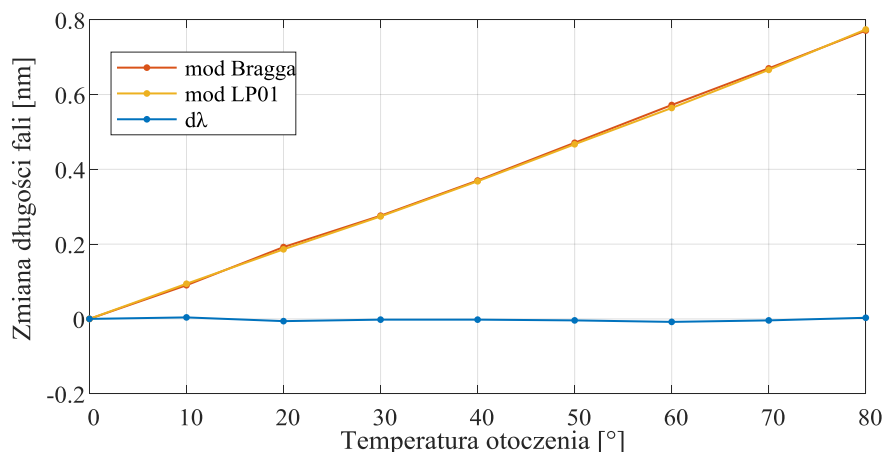
Największa różnica w odczytach długości fali Bragga przy danej temperaturze i wybranych promieniach gięcia wynosi 0,016 nm, co przy czułości $9,6 \left[\frac{pm}{^{\circ}C} \right]$ przekłada się na błąd wyznaczania temperatury wynoszący $1,66^{\circ}C$.

Drugim analizowanym przypadkiem jest wpływ zmian temperatury na parametry spektralne związane z wyznaczaniem promienia gięcia. Wyniki pomiarów przedstawione powyżej wskazują, że zwiększenie temperatury otoczenia powoduje przesunięcie charakterystyki widmowej w stronę fal dłuższych. Zatem długość fali modu LP_{01} ulegnie zmianie pod wpływem zmian temperatury. Jednakże w rozdziale 5.1.1. rozprawy wskazano, że niezależność od wpływu tej wielkości fizycznej może zostać uzyskana poprzez wyznaczanie różnicy pomiędzy długością fali minimum współczynnika transmisji badanego modu, a długością fali modu podstawowego. Jak wykazano w niniejszym rozdziale, długość fali modu rdzeniowego w niewielkim stopniu reaguje na zmiany promienia gięcia dzięki czemu może stanowić wartość odniesienia. Na rysunku 4.16. przedstawione zostały widma transmisyjne siatki TFBG 2° mierzone w zakresie spektralnym obejmującym mod Bragga, ghost oraz mody płaszczowe najniższych rzędów, o dużej czułości na zmiany krzywizny włókna, mierzone dla temperatur otoczenia wynoszących $0^{\circ}C$ oraz $50^{\circ}C$.



Rys. 4.16. Charakterystyki transmisyjne modu Bragga oraz modów płaszczowych najniższych rzędów mierzone dla temperatur otoczenia wynoszących $0^{\circ}C$ oraz $50^{\circ}C$ z oznaczoną różnicą długości fali między modem Bragga a modem LP_{01}

Na rysunku 4.16. zaznaczona została różnica pomiędzy długością fali modu LP_{01} a długością fali modu Bragga. Rysunek przedstawia widma mierzone dla dwóch wartości temperatur. Różnica $d\lambda$ jest stała w zakresie temperatur, dla których przeprowadzany był eksperyment, tj. w zakresie od 0°C do 80°C . Na rysunku 4.17. pokazane zostały zmiany długości fali wybranego modu płaszczowego, modu ghost oraz modu Bragga. Dodatkowo w celu zachowania skali porównawczej na tym samym rysunku zamieszczony został przebieg wartości różnicy pomiędzy skrajnymi wartościami różnicy $d\lambda$ wyznaczanymi dla kolejnych temperatur otoczenia.

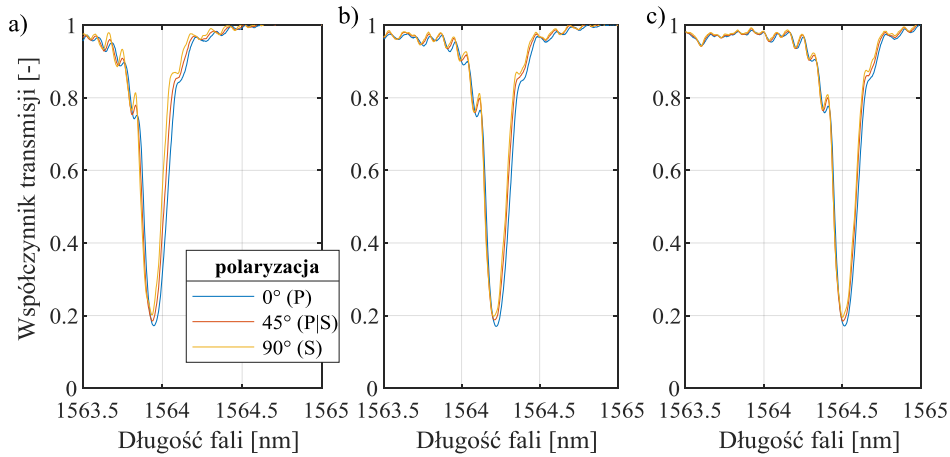


Rys. 4.17. Charakterystyki zmian długości fali modu Bragga oraz modu płaszczowego LP_{01}

Jak widać wartość różnicy między długością fali modu Bragga oraz wybranego modu płaszczowego niskiego rzędu jest wartością stałą pomimo zmian temperatury otoczenia w zakresie 0°C do 80°C . Zmiany wartości różnicy pomiędzy wybranymi minimami widma transmisyjnego przedstawione są na rysunku kolorem niebieskim. Największa wartość różnicy pomiędzy wyznaczonymi wartościami wielkości $d\lambda$ wynosi $0,011\text{ nm}$. Przy czułości zmian długości fali modu LP_{01} na wartość promienia gięcia wynoszącej $0,04\text{ nm/mm}$, przekłada się na niepewność wyznaczania promienia krzywizny wynoszącą $0,275\text{ mm}$, powodowaną przez zmiany temperatury otoczenia w zakresie od 0°C do 80°C .

4.3. Wpływ zmian kąta obrotu i temperatury na widmo TF₂°

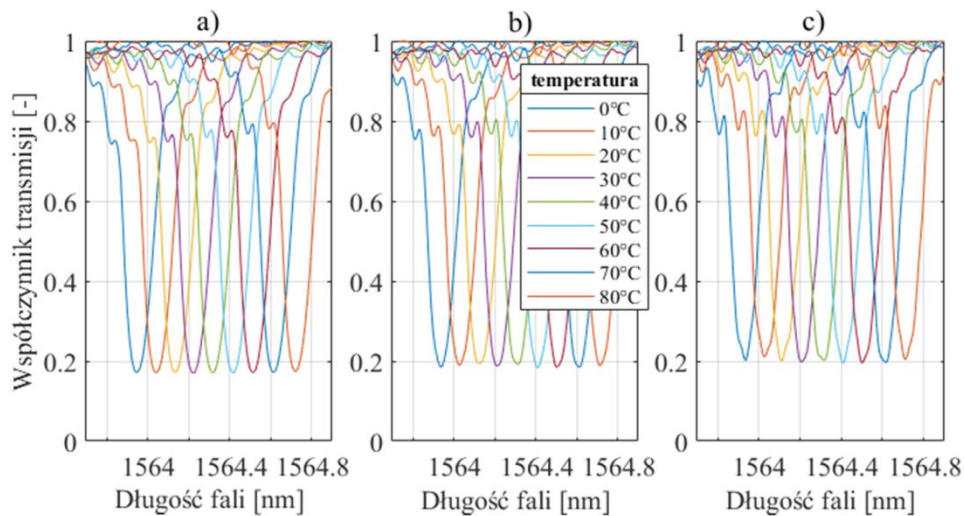
Kolejnym analizowanym przypadkiem jednoczesnego pomiaru dwóch wielkości fizycznych z wykorzystaniem przetwornika w postaci pojedynczej światłowodowej skośnej siatki Bragga jest pomiar kąta obrotu oraz temperatury. W ramach rozdziału 5.1.2. rozprawy doktorskiej wykazano, że możliwe jest wykorzystanie struktury TF₂° do pomiaru kąta obrotu, poprzez analizę zmian parametrów widmowych związanych z kierunkiem polaryzacji światła wprowadzanego. Dodatkowo, pomiar temperatury może być realizowany za pomocą analizy długości fali modu rdzeniowego. Badając wpływ zmian kąta obrotu na parametry widmowe związane z temperaturą otoczenia należy rozpocząć od określenia zmian długości fali Bragga w zależności od kąta polaryzacji światła wprowadzanego do struktury TF₂°. Na rysunku 4.18. przedstawione zostały widma transmisyjne modu Bragga siatki TF₂° mierzone dla trzech charakterystycznych stanów polaryzacji przy temperaturze otoczenia: a) 0°C , b) 30°C oraz c) 60°C .



Rys. 4.18. Widma transmisyjne modu Bragga siatki TFBG 2° mierzone dla 3 stanów polaryzacji, przy temperaturze otoczenia: a) 0°C, b) 30°C oraz 60°C

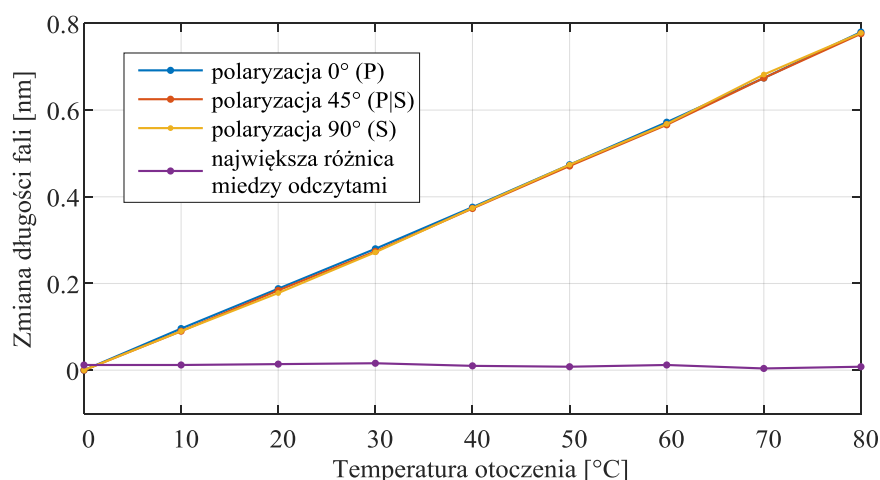
Zmiana kąta obrotu struktury przy różnych temperaturach otoczenia powoduje niewielką zmianę współczynnika transmisji oraz długości fali Bragga (Rys. 4.18.). W związku z faktem, iż w części pomiarów analizowanych w poprzednich rozdziałach parametrem koniecznym do wyznaczania wybranych wielkości jest centralna długość fali, w dalszej części pracy analizie poddany zostanie ten parametr. Wartość współczynnika transmisji nie jest parametrem związanym ze zmianami temperatury i pozostaje na stałym poziomie.

Widma transmisyjne modu Bragga z rysunku 4.19. mierzone były dla narastającej wartości temperatury w zakresie od 0°C do 80°C, przy trzech wartościach kąta obrotu polaryzacji: a) 0° (P); b) 45° (P|S) oraz c) 90° (S).



Rys. 4.19. Widma transmisyjne modu Bragga siatki TFBG 2° mierzone dla narastającej temperatury w zakresie od 0°C do 80°C, przy stanach polaryzacji: a) typu P; b) typu P|S oraz c) typu S

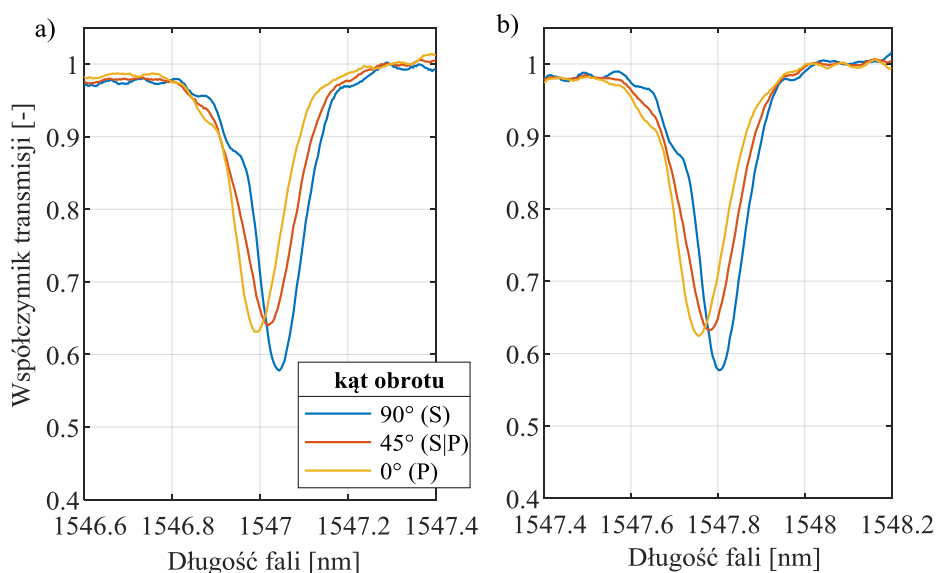
Na podstawie danych przedstawionych w formie graficznej na rysunku 4.19. wykonane zostały wykresy przedstawiające zmianę długości fali modu Bragga przy zmieniającej się temperaturze otoczenia, wyznaczone dla 3 charakterystycznych przypadków kąta obrotu polaryzacji. Dodatkowo, na rysunku 4.20. zamieszczone zostały wartości rozrzutu pomiędzy wartościami λ_B wyznaczanymi przy zadanych stanach polaryzacji.



Rys. 4.20. Charakterystyki zmian długości fali Bragga wyznaczanych dla temperatur z zakresu 0–80°C, dla trzech charakterystycznych kątów obrotu polaryzacji oraz wykres największej różnicy tych wartości

Dane przedstawione w formie wykresów przedstawionych na 4.20. potwierdzają, że zmiana kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego nie wpływa w sposób znaczący na długość fali modu Bragga. Największa wartość rozrzutu pomiędzy wartościami centralnej długości fali modu rdzeniowego mierzonymi przy danej temperaturze, dla kolejnych kątów obrotu polaryzacji światła wynosi 0,012 nm. Przekłada się to na błąd wyznaczania temperatury na poziomie 1,25°C.

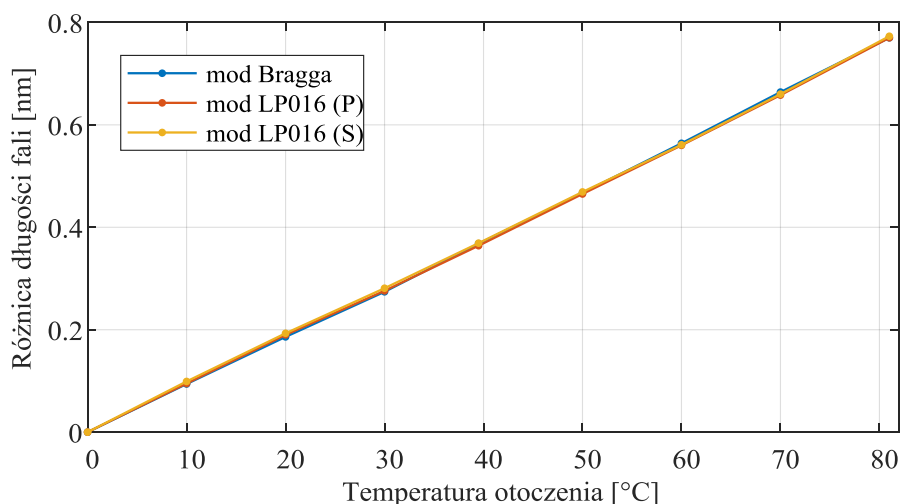
W wypadku układu pozwalającego na pomiar jednoczesny temperatury oraz kąta obrotu konieczne jest również określenie wpływu zmian temperatury na parametry widmowe modu płaszczowego, którego parametry spektralne zostały powiązane z wartością kąta obrotu. Na rysunku 4.21. przedstawione zostały widma transmisyjne modu LP₀₁₆ mierzone dla trzech stanów polaryzacji (P, S oraz S|P) przy dwóch temperaturach otoczenia: a) 0°C oraz b) 80°C.



Rys. 4.21. Widma transmisyjne modu LP₀₁₆ siatki TFBG o kącie 2° mierzone dla trzech charakterystycznych kątów obrotu, przy temperaturach: a) 0°C oraz b) 80°C

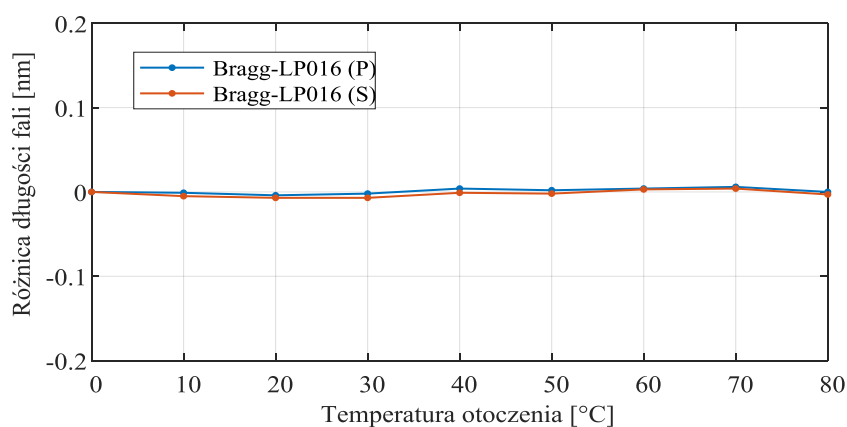
Porównanie charakterystyk widmowych przedstawionych na rysunku 4.21. wskazuje, iż oprócz przesunięcia długości fali powodowanego przez opisane wcześniej efekty rozszerzalności temperaturowej oraz zmiany współczynnika załamania, wpływ zmian temperatury na amplitudę czy FWHM modów jest niewielki. Współczynnik transmisji mierzony przy określonej wartości kąta obrotu zachowuje stałą wartość w całym zakresie zadawanych temperatur otoczenia. Z uwagi na

przesunięcie spektralne powodowane zmianami temperatury, w celu uzyskania niezależności pomiaru kąta obrotu od tej wielkości konieczne jest śledzenie zmian modu Bragga. Długość fali, dla której badany jest współczynnik transmisji powinna być modyfikowana zgodnie z wartością przesunięcia spektralnego modu rdzeniowego, który jest niezależny od zmian polaryzacji. Na rysunku 4.22. przedstawiona została charakterystyka wartości przesunięcia długości fali modu Bragga oraz modu płaszczowego LP₀₁₆ wyznaczana dla długości fali minimów związanych z polaryzacją typu P oraz typu S.



Rys. 4.22. Zmiany długości centralnych długości fali modu rdzeniowego oraz modu płaszczowego LP₀₁₆ przy przeciwnych kierunkach płaszczyzny polaryzacji, mierzone w zakresie temperatur 0–80°C

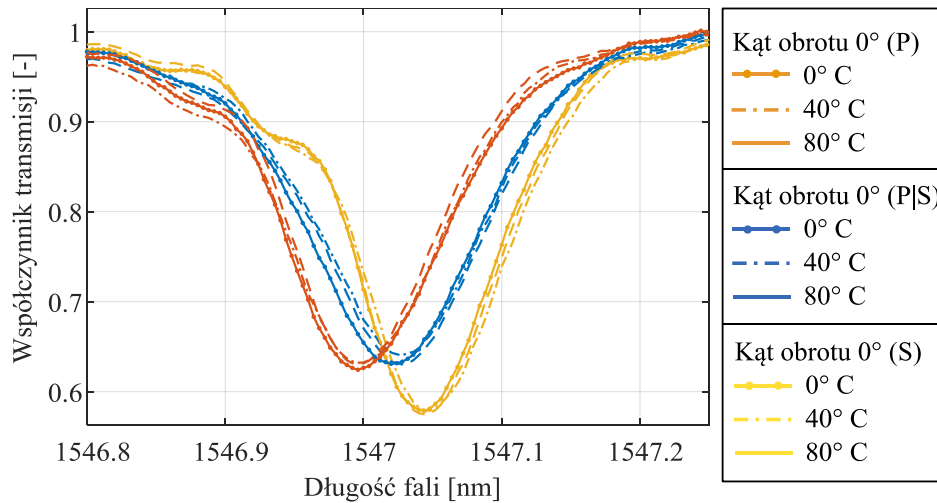
Wykresy przedstawione powyżej pokazują, że zmiana długości fali modu płaszczowego LP₀₁₆ dla skrajnych przypadków kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego jest w zakresie mierzonych temperatur jednakowa. Czułość zmian długości fali dla każdego z wykazanych przypadków wynosi 9,6 pm/°C, co przekłada się na właściwość utrzymywania stałej wartości różnicy pomiędzy długością fali modu rdzeniowego a długością fali wybranego modu płaszczowego. Możliwe jest zatem określanie długości fali, dla której badany jest współczynnik transmisji modu LP₀₁₆ w oparciu o wyznaczanie różnicy między jego długością fali oraz długością fali modu rdzeniowego. Na rysunku 4.23. przedstawione zostały różnice pomiędzy długością fali Bragga oraz długością fali rezonansu charakterystycznego dla polaryzacji P (niebieski) oraz polaryzacji S (czerwony) modu LP₀₁₆ dla kolejnych wartości temperatury otoczenia.



Rys. 4.23. Wartości różnicy pomiędzy długością fali modu Bragga oraz centralnej długości fali modu LP₀₁₆ wyznaczone dla polaryzacji typu P oraz typu S

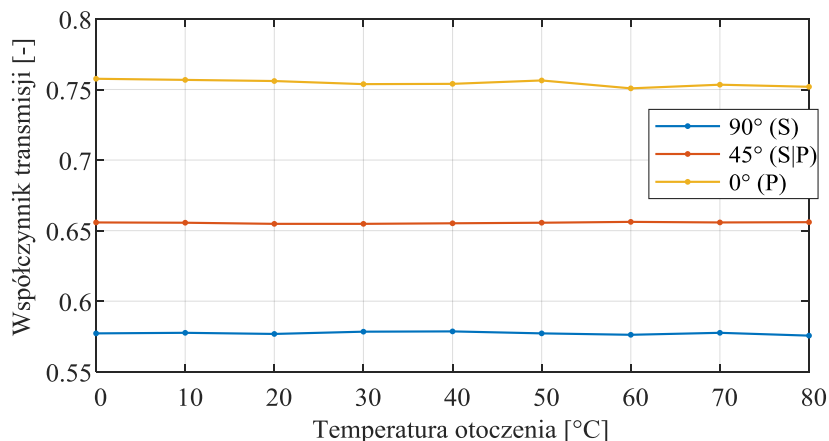
Uśredniona wartość różnicy pomiędzy długością fali Bragga a długością fali modu LP₀₁₆ wynosi 16,731 nm. Na rysunku 4.24. przedstawione zostały widma transmisyjne modu LP₀₁₆ mierzone dla

trzech charakterystycznych wartości polaryzacji: 0° (P), 45° (P|S) oraz 90° (S), dla trzech temperatur otoczenia siatki, tj. 0°C , 40°C oraz 80°C .



Rys. 4.24. Widma transmisyjne modu LP_{016} mierzone dla trzech wartości kąta obrotu polaryzacji, dla kolejnych wartościach temperatury: a) 0°C , b) 40°C oraz c) 80°C , po korekcie wpływu temperatury na przesunięcie długości fali

Poszczególne charakterystyki przejściowe należy więc korygować uwzględniając zmiany długości rezonansu Bragga, co pozwoliło na uniezależnienie pomiaru kąta obrotu od wpływu temperatury otoczenia. Amplituda rezonansów wyznaczana dla danej wartości kąta obrotu nie zmienia się w miarę zmian temperatury otoczenia (Rys. 4.24.). Właściwość ta pozwala na stwierdzenie, że zmiany temperatury w niewielki sposób wpływają na współczynnik transmisji modu LP_{016} niezależnie od kąta polaryzacji światła wprowadzanego. Dzięki temu, możliwe jest wyznaczanie kąta obrotu względnego przy zmiennej wartości temperatury otoczenia. Na rysunku 4.25. przedstawione zostały przebiegi wartości współczynnika transmisji części parzystej modu płaszczonego LP_{016} . Współczynnik ten wyznaczany był metodą linii spektralnej dla długości fali λ_S wyznaczonej jako różnica pomiędzy λ_B a stałą wartością $16,731\text{ nm}$ wyznaczoną na drodze eksperymentalnej.



Rys. 4.25. Wartości współczynnika transmisji modu LP_{016} wyznaczone dla części parzystej na długości fali wynoszącej λ_S

Z rysunku 4.25. wynika, że w przypadku zmian temperatury w zakresie od 0°C do 80°C współczynnik transmisji wyznaczany dla zdefiniowanej długości fali λ_S niezależnie od kąta polaryzacji światła zachowuje stałą wartość. Największe różnice amplitudy wyznaczonej dla wybranej wartości długości fali charakterystycznej dla polaryzacji S, wyznaczone zostały dla kąta obrotu 0° (polaryzacja P). Jest to związane z faktem, że dla tej długości fali przy polaryzacji P mamy do czynienia

ze stromym zboczem charakterystyki widmowej. W takim przypadku, nawet niewielkie zmiany długości fali modu, rzędu pojedynczych piko metrów, mają istotny wpływ na wartość współczynnika transmisji dla linii spektralnej. Błędy pomiarowe mogą być powodowane również poprzez działanie komory klimatycznej, gdzie oprócz elementów grzejnych bądź chłodzących używany jest wentylator. Ruch powietrza wywołany wentylatorem powoduje delikatne ruchy włókna z zapisaną siatką Bragga, co może przekładać się na niewielkie zmiany długości fali pomiędzy kolejnymi pomiarami.

Wykaz dziesięciu ważniejszych publikacji doktoranta:

- [1] **Damian Harasim**; Polarization-insensitive refractive index measurement using cascaded perpendicular tilted fiber Bragg gratings.- 2022 Measurement [Przyjęta do druku w dniu składania autoreferatu] (**IF: 5.2**)
- [2] **Damian Harasim**; Temperature-insensitive bending measurement method using optical fiber sensors. Sensors and Actuators A - Physical.- 2021, vol. 332, nr Pt 2, s. 1-9 (**IF: 4.29**)
- [3] **Damian Harasim**; The influence of fibre bending on polarization-dependent twist sensor based on tilted Bragg grating. Metrology and Measurement Systems.- 2017, vol. 24, nr 3, s. 577-584 (**IF: 1.1**)
- [4] **Damian Harasim**, Piotr Kisała, Bakhyt Yeraliyeva and Janusz Mrocza; Design and Manufacturing Optoelectronic Sensors for the Measurement of Refractive Index Changes under Unknown Polarization State. Sensors 2021, vol. 21, nr 21, s. 1-29 (**IF:3.8**)
- [5] **Damian Harasim**, Sławomir Ciężczyk; The method of elimination of light polarization cross sensitivity on tilted fiber Bragg grating bending sensor, Metrology and Measurement Systems 2022, 29(4) [Przyjęta do druku w dniu składania autoreferatu] (**IF: 1.1**)
- [6] Piotr Kisała, **Damian Harasim**, Janusz Mrocza; Temperature-insensitive simultaneous rotation and displacement (bending) sensor based on tilted fiber Bragg grating. Optics Express.- 2016, vol. 24, nr 26, s. 29922-29929 (**IF: 3.6**)
- [7] Sławomir Ciężczyk, **Damian Harasim**, Piotr Kisała; A Novel Simple TFBG Spectrum Demodulation Method for RI Quantification. IEEE Photonics Technology Letters 2017, vol. 29, nr 24, s. 2264-2267 (**IF:2.6**)
- [8] Sławomir Ciężczyk, **Damian Harasim**, Piotr Kisała; Novel twist measurement method based on TFBG and fully optical ratiometric interrogation. Sensors and Actuators A - Physical.- 2018, vol. 272, s. 18-22 (**IF: 2.6**)
- [9] Michał Wydra, Piotr Kisała, **Damian Harasim**, Piotr Kacejko; Overhead Transmission Line Sag Estimation Using a Simple Optomechanical System with Chirped Fiber Bragg Gratings. Part 1: Preliminary Measurements. Sensors 2018, vol. 18, nr 1, s. 1-14 (**IF: 2.8**)
- [10] Sławomir Ciężczyk, **Damian Harasim**, Ainur Ormanbekova, Krzysztof Skorupski, Martyna Wawrzyk; Methods of Projecting Mode Amplitude Changes on the Wavelength Axis in Order to Determine the Bending Radius on the Basis of TFBG Grating Spectra. Sensors 2021, vol. 21, nr 22, s. 1-14 (**IF: 3.5**)