

*Pracę dedykuję żonie Klaudii*

*Serdeczne podziękowania składam  
Panu prof. dr hab. inż. Piotrowi Kisale,  
Panu dr hab. inż. Sławomirowi Ciężczykowi,  
oraz kolegom z zespołu Laboratorium za pomoc  
w realizacji pracy.*





AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH**

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA  
I ELEKTROTECHNIKA

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

*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 Informatycznych

Kraków, 2022



## Spis Treści

<b>Streszczenie</b> .....	7
<b>Abstract</b> .....	9
<b>1. Wstęp</b> .....	13
<b>2. Teza, cel i zakres pracy</b> .....	16
2.1. Teza pracy .....	16
2.2. Cel i zakres pracy .....	16
<b>3. Światłowodowe siatki Bragga</b> .....	17
3.1. Struktura i zasada działania .....	17
3.2. Rodzaje światłowodowych siatek Bragga .....	18
3.3. Właściwości braggowskich periodycznych struktur światłowodowych ...	25
3.3.1. Właściwości siatek konwencjonalnych .....	25
3.3.2. Właściwości siatek skośnych .....	27
3.4. Podstawowe parametry widmowe siatek Bragga .....	35
3.4.1. Parametry spektralne konwencjonalnych siatek Bragga .....	36
3.4.2. Parametry spektralne skośnych siatek Bragga .....	39
<b>4. Zapis i charakteryzacja struktur periodycznych o pochylonej modułacji współczynnika załamania na włóknach światłowodowych</b> .....	44
4.1. Wrażliwość włókna światłowodowego na promieniowanie ultrafioletowe .....	44
4.2. Metody zapisu periodycznych struktur światłowodowych w rdzeniu włókna światłowodowego .....	46
4.2.1. Metody interferometru objętościowego .....	48
4.2.2. Metoda maski fazowej .....	50
4.2.3. Metoda interferometru z użyciem maski fazowej .....	52
4.3. Wytwarzanie skośnych światłowodowych siatek Bragga .....	54
4.3.1. Opis stanowiska do wytwarzania struktur periodycznych o pochylonych płaszczyznach dyfrakcyjnych .....	56
4.4. Charakterystyki spektralne wytworzonych skośnych siatek .....	64
4.4.1. Wpływ kąta pochylecia płaszczyzn dyfrakcyjnych na parametry optyczne siatek .....	64

4.4.2. Wpływ zmian głębokości modulacji współczynnika załamania na parametry optyczne siatek.....	66
<b>5. Wpływ zmian wybranych wielkości fizycznych na widma TFBG .....</b>	<b>69</b>
5.1. Wpływ zmian wybranych wielkości fizycznych na widma siatki TFBG o kącie 2° .....	72
5.1.1. Wpływ zmian promienia zgięcia na widmo siatki TFBG 2° .....	72
5.1.2. Wpływ zmian kąta obrotu na widmo siatki TFBG 2° .....	77
5.1.3. Wpływ zmian temperatury na widmo siatki TFBG 2° .....	80
5.2. Wpływ zmian wybranych wielkości fizycznych na widma siatki TFBG o kącie 4° .....	82
5.2.1. Wpływ zmian promienia zgięcia na widmo siatki TFBG 4° .....	82
5.2.2. Wpływ zmian kąta obrotu na widmo siatki TFBG 4° .....	85
5.2.3. Wpływ zmian temperatury na widmo siatki TFBG 4° .....	88
5.3. Analiza możliwości jednoczesnego pomiaru kilku wielkości fizycznych z wykorzystaniem pojedynczej TFBG.....	90
<b>6. Zmiany widma pojedynczej skośnej siatki TFBG przy jednoczesnej zmianie kilku wielkości fizycznych .....</b>	<b>92</b>
6.1. Opis stanowiska pomiarowego .....	92
6.2. Wpływ zmian dwóch wielkości fizycznych na widmo siatki TFBG 2° ...	94
6.2.1. Wpływ zmian promienia zgięcia i kąta obrotu na widma TFBG 2° .....	94
6.2.2. Wpływ zmian promienia zgięcia i temperatury na widmo TFBG 2° .....	105
6.2.3. Wpływ zmian kąta obrotu i temperatury dla TFBG 2° .....	109
6.3. Jednoczesny wpływ promienia zgięcia, kąta obrotu i temperatury na widma siatki TFBG 4° .....	116
6.4. Modyfikacje struktury TFBG poprawiające selektywność czujnika podczas pomiaru wybranych wielkości fizycznych .....	123
<b>7. Podsumowanie i wnioski.....</b>	<b>129</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>133</b>

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

Słowa kluczowe: światłowodowa siatka Bragga, skośna siatka Bragga, FBG, TFBG, czujniki światłowodowe, technika światłowodowa

## **Streszczenie**

Niniejsza praca dotyczy zagadnień związanych z technologią wytwarzania światłowodowych siatek Bragga o pochylonych prążkach dyfrakcyjnych, ich właściwościami spektralnymi oraz analizą możliwości wykorzystania pojedynczej siatki w charakterze przetwornika kilku wybranych wielkości fizycznych jednocześnie. W szczególności przedstawione zostały wyniki pomiarów charakterystyk widmowych siatek o kącie  $2^\circ$  oraz  $4^\circ$  poddawanych zmianom temperatury otoczenia, kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego oraz promienia zgięcia włókna w miejscu wytworzonej siatki. Przedstawiono również wyniki pomiarów wpływu zmian dwóch wielkości fizycznych na charakterystyki widmowe siatek oraz określono wzajemny wpływ na ich wybrane parametry widmowe.

W pierwszej części pracy zawarto podstawy teoretyczne opisujące zasadę działania światłowodowych siatek Bragga, począwszy od najbardziej rozpowszechnionych siatek klasycznych, poprzez kolejne ich modyfikacje. Szczególną uwagę poświęcono siatkom o pochylonych płaszczyznach prążków dyfrakcyjnych, które dzięki swojej geometrii wewnętrznej charakteryzują się odmiennymi właściwościami. Przedstawione zostały przykładowe charakterystyki oraz wskazano pola zastosowań takich struktur w charakterze przetworników wielkości fizycznych. Następnie przedstawione zostały metody wytwarzania siatek Bragga we włóknach światłowodowych oraz zaprezentowano zmodyfikowany układ zapisu tego typu struktur w Laboratorium Optoelektroniki i Techniki Laserowej Politechniki Lubelskiej. Przeanalizowano charakterystyki widmowe siatek skośnych o różnych kątach pochylenia prążków dyfrakcyjnych oraz głębokości modulacji współczynnika załamania.

W części eksperymentalnej przedstawione zostały wyniki pomiarów widm transmisyjnych siatek skośnych o kątach wewnętrznych wynoszących  $2^\circ$  oraz  $4^\circ$ , poddawanych działaniu zmiennych warunków, tj. temperatury otoczenia, kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego oraz promienia zgięcia. Na potrzeby niniejszej pracy zdefiniowano parametry spektralne, które związane są ze zmianami poszczególnych wielkości fizycznych. Przedstawiono charakterystyki przejściowe parametrów oraz porównanie zakresów dla siatek

skośnych o podanych kątach. Na podstawie uzyskanych wyników, przedstawiona została koncepcja pomiaru kilku wielkości fizycznych jednocześnie z użyciem pojedynczej skośnej siatki Bragga w charakterze przetwornika. Określone zostały zakresy spektralne, w których wybrane parametry widmowe siatek skośnych zachowują wysoką czułość na zmiany wybranej wielkości.

Kolejna część pracy związana jest z analizą wpływu zmian dwóch wielkości fizycznych jednocześnie na charakterystyki widmowe siatki skośnej o kącie równym  $2^\circ$ , w konfiguracjach: promień zgięcia i kąt obrotu, promień zgięcia i temperatura oraz kąt obrotu i temperatura. Na podstawie uzyskanych wyników przedstawione zostały charakterystyki przejściowe zdefiniowanych parametrów spektralnych przy zmianach dwóch wielkości fizycznych. Dokonano doboru modów płaszczowych, których właściwości widmowe pozwalają na pomiary dwóch wymienionych wcześniej wielkości. Ponadto określone zostały czułości skrośne związane z wzajemnym wpływem mierzonych wielkości na charakter zmian wybranych parametrów TFBG. Podobną analizę przeprowadzono dla siatki skośnej o kącie wynoszącym  $4^\circ$  dla pary wielkości: promień zgięcia i kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów wskazały jednoznacznie, że w przypadku takiej struktury wzajemny wpływ tych wielkości na parametry spektralne jest znaczący, uniemożliwiając prowadzenie jednoczesnych pomiarów z wykorzystaniem pojedynczego przetwornika TFBG.

Ostatni rozdział jest związany z badaniami eksperymentalnymi i odnosi się do potencjalnych modyfikacji struktury wewnętrznej siatek skośnych w celu uzyskania pożądanych właściwości wybranych modów płaszczowych.

Reasumując, niniejsza rozprawa obejmuje metody wytwarzania światłowodowych siatek Bragga, badania wpływu zmian wybranych wielkości fizycznych na charakterystyki widmowe siatek skośnych oraz analizę możliwości zastosowania pojedynczej siatki w charakterze przetwornika kilku wielkości fizycznych jednocześnie. Na podstawie badań eksperymentalnych zdefiniowano parametry widmowe umożliwiające jednoczesny pomiar promienia zgięcia, kąta obrotu oraz temperatury otoczenia w wybranych zakresach. Pokazano wzajemny wpływ zmian tych wielkości na parametry widmowe z nimi powiązane.



## **Multiparameter sensors with tilted fiber Bragg gratings**

Keywords: fiber Bragg grating, tilted fiber Bragg grating, FBG, TFBG, optical fiber sensors, optical fiber technology

### **Abstract**

Presented dissertation concerns with issues related to the technology of producing fiber Bragg gratings with tilted diffraction fringes, their spectral properties and the analysis of the possibility for using a single grating as a transducer of several selected physical quantities simultaneously. In particular, the results of measurements of spectra of gratings with an angle of  $2^\circ$  and  $4^\circ$  subjected to changes in ambient temperature, the angle of rotation of the polarization of the introduced light and the bending radius of the fiber in the place of the produced grating are presented. Then, the results of measurements of the impact of changes in two physical quantities on the spectral characteristics of the grids at the same time were presented and the mutual influence on the selected spectral parameters was determined.

The first part of the thesis contains theoretical foundations related to the principle of operation of fiber Bragg gratings, starting from the most popular classic gratings, through their subsequent modifications. Particular attention was paid to gratings with tilted planes of diffraction fringes, which according to their internal geometry, are characterized by different properties. Exemplary characteristics have been presented and the fields of application of such structures as converters of physical quantities have been indicated. Then, the methods of producing Bragg gratings in optical fibers and the modified inscribing system in the Laboratory of Optoelectronics and Laser Technology of the Lublin University of Technology were presented. The spectral characteristics of the tilted gratings with different tilt angles of the diffraction fringes and the depth of the refractive index modulation are shown.

The experimental part presents the results of measurements of transmission spectra of tilted gratings with internal angles of  $2^\circ$  and  $4^\circ$ , subjected to changing conditions, i.e. the ambient temperature, the rotation angle of the introduced light polarization and the bending radius. For the purposes of this study, spectral parameters related to changes in individual physical quantities were defined. The transitional characteristics of the parameters and the comparison of the ranges for oblique meshes with given angles are presented. On the basis of the obtained results, the concept of measuring several physical quantities simultaneously with the use of a single tilted Bragg grating as a transducer was presented. Spectral

ranges have been defined in which selected spectral parameters of tilted gratings maintain high sensitivity to changes in the selected quantity.

The next part of the work is related to the analysis of the influence of changes in two physical quantities simultaneously on the spectral characteristics of a  $2^\circ$  tilted grating, in the following configurations: bend radius and rotation angle, bend radius and temperature, as well as rotation angle and temperature. On the basis of the obtained results, the characteristics of the defined spectral parameters to changes in two physical quantities were presented. The cladding modes were selected, the spectral properties of which allow for selective measurements of the two previously listed quantities. Moreover, cross-sensitivities related to the mutual influence of the measured values on the course of changes in a given parameter were determined. A similar analysis was carried out for a tilted grating with an angle of  $4^\circ$  for a pair of quantities: bend radius and angle of rotation of the plane of polarization. The results of the conducted experiments clearly showed that in the case of such a structure, the mutual influence of these values on the spectral parameters is significant, making it impossible to conduct simultaneous measurements with the use of a single TFBG transducer.

The last chapter related to the experimental research is the one relating to the potential modifications of the internal structure of the tilt gratings in order to obtain the desired properties of the selected cladding modes.

This dissertation covers the methods of producing fiber Bragg gratings, examining the influence of changes in selected physical quantities on the spectral characteristics of tilted gratings and the analysis of the possibility of using a single grating as a transducer of several physical quantities simultaneously. On the basis of experimental studies, spectral parameters were defined, enabling the simultaneous measurement of the bend radius, the angle of rotation and the ambient temperature in selected ranges. The mutual influence of changes of these quantities on the related spectral parameters was shown.

## Wykaz oznaczeń

FBG – (ang. *fiber Bragg grating*) światłowodowa siatka Bragga

FWHM – (ang. *full width at half maximum*) szerokość połówkowa widma

NA – apertura numeryczna światłowodu

P-TFBG – (ang. *perpendicular tilted fiber Bragg grating*) prostopadła skośna siatka Bragga

RI – (ang. *refractive index*) współczynnik załamania

RIU – (ang. *refractive index unit*) jednostka współczynnika załamania

SPR – (ang. *surface plasmon resonance*) powierzchniowy rezonans plazmonowy

SRI – (ang. *surrounding refractive index*) współczynnik załamania otoczenia

TTFBG – (ang. *twisted tilted fiber Bragg grating*) skręcona skośna siatka Bragga

TFBG – (ang. *tilted fiber Bragg grating*) światłowodowa skośna siatka Bragga

$A_i$  – amplituda widma  $i$ -tego modu

$C$  – krzywizna tworzona przez wygięte włókno

$d$  – średnica rdzenia światłowodu

$\vec{E}^r$  – składowa poprzeczna pola elektrycznego modu rdzeniowego

$\vec{E}^p$  – składowa poprzeczna pola elektrycznego modu płaszczowego

$K_T$  – czułość na zmiany temperatury

$K_{rot}$  – czułość na zmiany kąta obrotu

$l$  – długość siatki Bragga

$m$  – liczba azymutalna modu

$n$  – liczba radialna modu

$n_{eff}^r$  – efektywny współczynnik załamania rdzenia włókna światłowodowego

$n_{eff}^{clad}$  – efektywny współczynnik załamania dla modu płaszczowego

$n_{uv}$  – współczynnik załamania światła dla długości promieniowania zapisującego

$P_{env}$  – pole powierzchni pomiędzy obwiedniami widma siatki TFBG

$R$  – reflektancja modu

$T$  – temperatura otoczenia

$V$  – częstotliwość znormalizowana

$\alpha_l$  – kąt pomiędzy wiązkami lasera w metodzie interferometru objętościowego

$\alpha_n$  – współczynnik termo-optyczny szkła

$\alpha_A$  – współczynnik rozszerzalności temperaturowej światłowodu

$\beta_i$  – kąt padania wiązki źródłowej na powierzchnię maski fazowej

$\varepsilon$  – odkształcenie względne

$\Theta_{TFBG}$  – kąt pochylenia wewnętrznych płaszczyzn modulacji dyfrakcyjnych skośnych siatek Bragga

$\Theta_p$  – kąt polaryzacji wprowadzanego światła spolaryzowanego liniowo

$A$  – okres jednorodnej, prostej siatki Bragga

$A_g$  – stała siatki Bragga o pochylonych płaszczyznach dyfrakcyjnych

$A_{pm}$  – okres maski fazowej

$\lambda_B$  – długość fali Bragga

$\lambda_{pi}$  – centralna długość fali  $i$ -tego modu płaszczowego

$\lambda_S$  – długość fali modu płaszczowego charakterystyczna dla polaryzacji typu S

$\nu$  – stała Poissona

$p_e$  – współczynnik elasto-optyczny opisujący zmianę współczynnika załamania światła w światłowodzie pod wpływem odkształcenia

## 1. Wstęp

Prawidłowe wskazania czujników monitorujących pracę i stan obiektów fizycznych są niezbędne do funkcjonowania aktualnie wykorzystywanych systemów przemysłowych oraz kontroli procesów w nich zachodzących. 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  $\mu\text{m}$ ), 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. Pomiar przemieszczenia może być wykonywany za pomocą sensora skonstruowanego przy użyciu specjalnie zaprojektowanego wspornika w formie belki [3]. Przesunięcie długości fali Bragga powodowane może być przez zmiany odkształcenia, wydłużenia bądź temperatury otoczenia struktury periodycznej a zatem charakteryzują się czułością krzyżową na temperaturę i odkształcenia. Z tego powodu pomiary odkształceń lub przemieszczeń zawsze wymagają kompensacji temperatury.

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, z sprawą stosunkowo długiego okresu [4]. W przypadku tych struktur trudno jest rozróżnić zmiany parametrów widma związane ze zginaniem od zmian innych towarzyszących parametrów (takich jak współczynnik załamania lub temperatura otoczenia). Ponadto LPG charakteryzują się słabą powtarzalnością mimo procesu wytwarzania wysokiej jakości. 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 sprzężanie światła z rdzenia włókna do płaszczyzny, 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.

W niniejszej pracy zaprezentowany został układ do wytwarzania światłowodowych siatek Bragga o pochylonych 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 pochylonych płaszczyznach modulacji współczynnika załamania. Przedstawiono wpływ zmian kąta pochylecia oraz głębokości modulacji współczynnika załamania na charakterystyki spektralne TFBG.

Rozdział piąty opisuje w sposób szczegółowy zmiany parametrów widmowych poszczególnych rezonansów siatek TFBG o kątach  $2^\circ$  oraz  $4^\circ$ , 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 płaszczyznych. 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.

## **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 wyznaczanie 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.



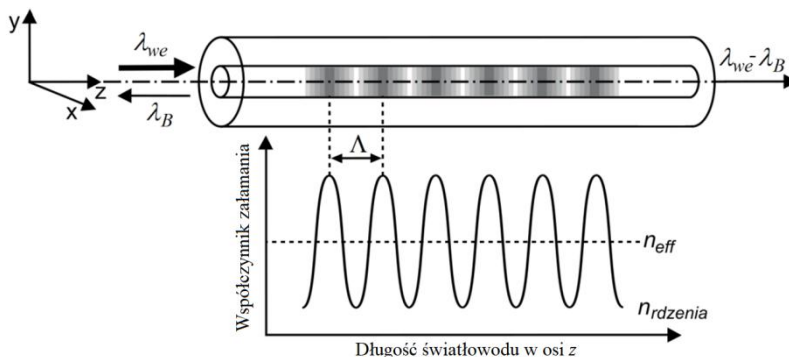
### 3. Światłowodowe siatki Bragga

#### 3.1. Struktura i zasada działania siatek 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  $\lambda_B$  (długość fali Bragga) przy zachowaniu transparentności dla światła o pozostałych długościach fal. Znając podstawowe parametry wytworzonej struktury, długość fali Bragga wyznaczyć można ze wzoru:

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

gdzie  $n_{eff}^r$  jest efektywną wartością współczynnika załamania rdzenia światłowodu, a  $A_g$  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]. Profil modulacji współczynnika załamania światła dla światłowodowej siatki Bragga wyznaczyć można z zależności:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right), \quad (3.2)$$

gdzie:  $n_0$  – uśredniona wartość współczynnika załamania światła;  $\Delta n$  – amplituda zmian współczynnika załamania światła zapisanych w światłowodzie;  $z$  – odległość wzdłuż osi podłużnej włókna (zgodnie z rysunkiem 3.1. oś  $z$ ).

Z punktu widzenia zastosowań siatek Bragga, najważniejszym ich parametrem spektralnym obok długości fali Bragga jest współczynnik odbicia siatki. Jest on związany z głębokością modulacji zmian współczynnika załamania, tzn. im większa amplituda  $\Delta n$  zmian tym większy współczynnik odbicia siatki. Dla siatki równomiernej, tzn. takiej, w której okres jest stały na całej jej długości, współczynnik odbicia siatki wyznaczyć można na podstawie teorii modów sprzężonych, za pomocą następującego wyrażenia [12]:

$$R(l, \lambda) = \frac{\kappa^2 \sinh^2(\gamma l)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(\gamma l) + \gamma^2 \cosh^2(\gamma l)}, \quad (3.3)$$

gdzie:  $\kappa$  – współczynnik sprzężenia modów;  $\Delta\beta = \beta - \pi / \gamma$  – parametr określający odstrojenie wiązki wejściowej od rezonansu Bragga;  $\beta = 2\pi n_0 / \lambda$  – stała propagacji;  $l$  – długość siatki;  $\gamma^2 = \kappa^2 - \Delta\beta^2$ . Przy założeniu sinusoidalnego przebiegu zmian współczynnika załamania rdzenia światłowodu, współczynnik sprzężenia  $\kappa$  zdefiniowany jest równaniem:

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} M_p, \quad (3.4)$$

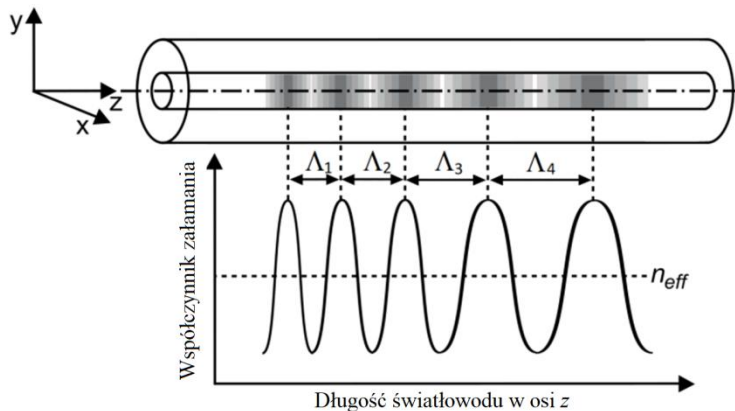
gdzie:  $M_p$  – część mocy modu zawarta w rdzeniu światłowodu.

Przy wytwarzaniu siatek Bragga wykorzystuje się efekt zmian współczynnika załamania światła wskutek oświetlenia odpowiedniego włókna światłowodowego (nasyconego wodorem lub domieszkowanego np. germanem) światłem ultrafioletowym o długości fali 248 nm i wysokiej energii. Uzyskanie zmian periodycznych wymaga naświetlania światłowodu wiązką światła o natężeniu zmieniającym się odpowiednio wzdłuż włókna, co uzyskuje się najczęściej

poprzez zastosowanie tzw. masek fazowych w postaci specjalnych siatek dyfrakcyjnych. Włókno umieszcza się w obszarze pola interferencyjnego powstającego za maską fazową dzięki czemu uzyskuje się periodycznie zmieniający się rozkład współczynnika załamania wzdłuż światłowodu.

### 3.2. Rodzaje światłowodowych siatek Bragga

Rozwój technologii światłowodowych czujników wykorzystujących siatki Bragga oraz nowe koncepcje dotyczące ich zastosowań, w których wymagana jest wysoka selektywność odbijanej długości fali spowodowały opracowanie metod pozwalających na modyfikację właściwości spektralnych tych struktur. Jedną z zaproponowanych modyfikacji jest wytworzenie siatki Bragga o monotonicznie zmiennym okresie CFBG (ang. *Chirped Fiber Bragg Grating*). Rysunek 3.2. przedstawia okres siatki chirpowej zmieniający się na długości światłowodu.



Rys. 3. 2. Schemat światłowodowej siatki Bragga wraz z wykresem obrazującym zmiany współczynnika załamania rdzenia wzdłuż światłowodu

Okres zmian współczynnika załamania w omawianej strukturze w najprostszym przypadku może być opisany za pomocą funkcji liniowej, w postaci równania:

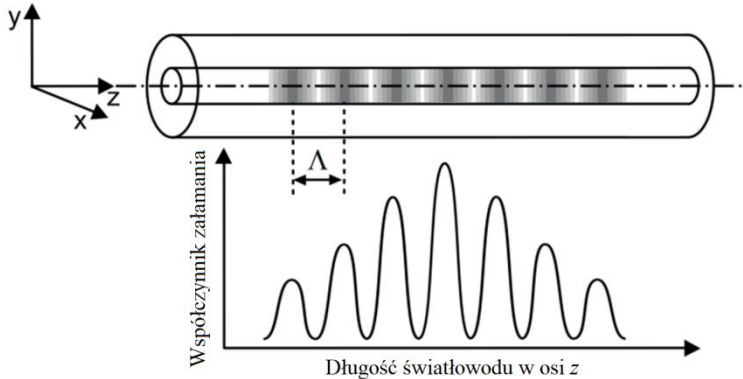
$$A(z) = A_{min} + A_l z, \quad (3.5)$$

gdzie:  $A_{min}$  jest okresem początkowym;  $A_l$  jest współczynnikiem zmian tego okresu wzdłuż siatki [13,14]. Wprowadzenie zmian okresu wzdłuż siatki powoduje zmiany warunków propagacji światła w kolejnych jej odcinkach. Szerokość widmową siatki o okresie  $\Delta\lambda_{ch}$  wyznaczyć można z wykorzystaniem równania:

$$\Delta\lambda_{ch} = 2n_{eff} (A_{max} - A_{min}) = 2n_{eff} \Delta A_{ch}. \quad (3.6)$$

W przypadku siatek chirpowych, długość fali Bragga zmienia się wzdłuż siatki zgodnie z funkcją opisującą zmiany okresu struktury. Efektem tego jest odbijanie światła o innej długości fali w różnych miejscach siatki, co skutkuje rozszerzeniem spektralnej charakterystyki siatki chirpowej w porównaniu do siatki jednorodnej.

Innym rodzajem modyfikacji jaką można zastosować jest wytworzenie siatki apodyzowanej, w której głębokość modulacji współczynnika załamania prążków dyfrakcyjnych przyjmuje różne wartości wzdłuż siatki. Schemat siatki Bragga wraz z zaznaczonym profilem współczynnika załamania rdzenia przedstawia rysunek 3.3.



Rys. 3.3. Schemat światłowodowej siatki Bragga wraz z wykresem zmiany intensywności współczynnika załamania rdzenia wzdłuż światłowodu

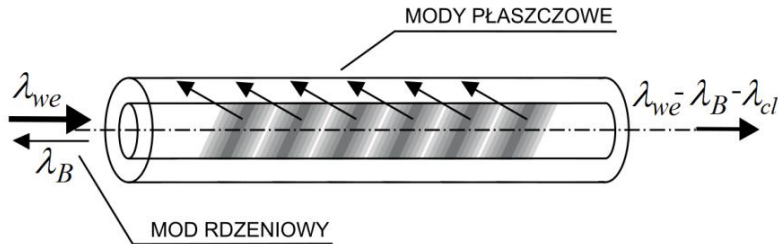
Apodyzacja pozwala na uzyskiwanie pożądaných właściwości spektralnych. Obwiednia profilu modulacji współczynnika załamania najczęściej opisana jest za pomocą funkcji Gaussa zgodnie wyrażeniem [15,16]:

$$f_A(z) = \exp \left[ -G \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \right]. \quad (3.7)$$

Korzystnym efektem wprowadzenia apodyzacji profilu zmian współczynnika załamania funkcją Gaussa jest wygaszanie na charakterystykach spektralnych tzw. wstęg bocznych (ang. *side lobes*) charakterystycznych dla siatek o jednorodnym profilu współczynnika [17–19].

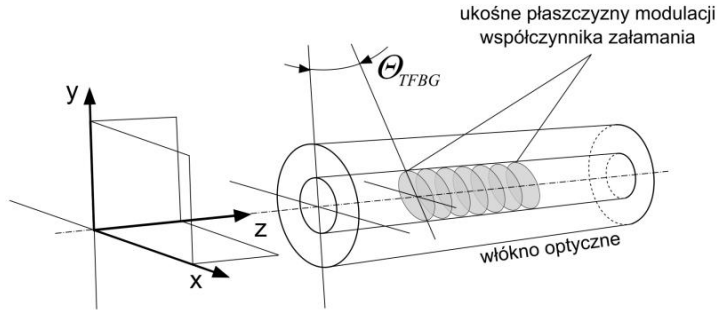
Szczególnym rodzajem światłowodowych struktur periodycznych są skośne siatki Bragga TFBG (ang. *tilted fiber Bragg gratings*), które powstają poprzez zastosowanie technologicznej modyfikacji zapisu struktury w porównaniu do siatek tradycyjnych, polegającej na wprowadzeniu pewnego niezerowego kąta

między płaszczyzną okresowej dyfrakcyjną a płaszczyzną przekroju poprzecznego włókna światłowodowego [20–22]. Na rysunku 3.4. przedstawiony został schemat struktury wewnętrznej pochyłonych prążków współczynnika załamania siatki TFBG.



Rys. 3.4. 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 sprzęgania 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 płaszcza i rdzenia światłowodu, przez co ich parametry spektralne wykazują wrażliwość na wiele wielkości fizycznych [29–31]. W przypadku światłowodu jednomodowego, duża średnica płaszcza, w porównaniu do długości fali transmitowanego światła, pozwala na propagację wielu modów płaszczowych.



Rys. 3.5. 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 3.5. przedstawia schematyczny widok TFBBG w odniesieniu do przestrzennego układu współrzędnych. W dalszej części pracy wykorzystywane będzie analogiczne pozycjonowanie struktury periodycznej w stosunku do stałego układu.

Warunek Bragga opisany równaniem (3.1) spełniony jest dla sprzęgania pomiędzy modami propagującymi w kierunku od źródła światła do siatki oraz biegnącymi w kierunku przeciwnym. W przypadku siatek skośnych, wprowadzenie kąta  $\Theta_{TFBG}$  pomiędzy płaszczyzny prążków dyfrakcyjnych a płaszczyznę przekroju poprzecznego światłowodu sprawia, że okres siatki skośnej  $A_g$  może być obliczony na podstawie wyrażenia [32]:

$$A_g = \frac{A}{\cos(\Theta_{TFBG})}. \quad (3.8)$$

Widać zatem, że dla siatki konwencjonalnej, dla której  $\Theta_{TFBG}$  wynosi  $90^\circ$ ,  $A_g = A$ . Przez podstawienie wyrażenia (3.8) do (3.1), warunek Bragga dla siatki skośnej można wyrazić poniższym równaniem [33]:

$$\lambda_B = 2(n_{eff}^r) \frac{A_g}{\cos(\Theta_{TFBG})}. \quad (3.9)$$

Wprowadzenie pochylenia płaszczyzn okresów siatki powoduje również, że część światła propagującego od źródła w postaci modu rdzeniowego ulega sprzęganiu do propagujących w przeciwnym kierunku modów płaszczowych. Długość fali rezonansów modów płaszczowych jest określona równaniem:

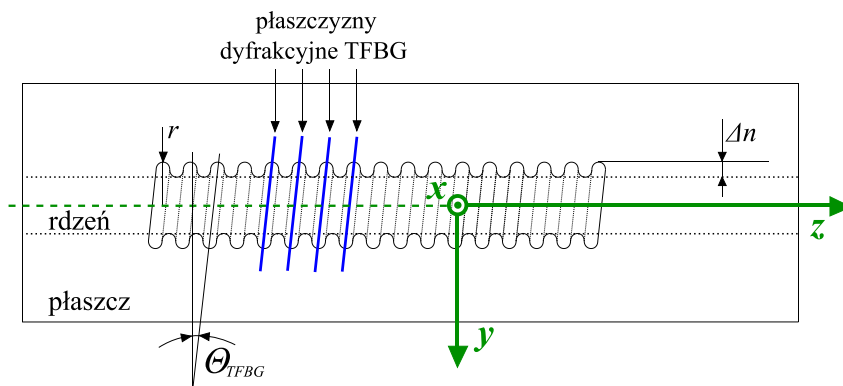
$$\lambda_{pi} = (n_{eff}^r + n_{eff}^p) \frac{A_g}{(\cos \Theta_{TFBG})}. \quad (3.10)$$

Podobieństwa pomiędzy warunkami Bragga dla rezonansów rdzeniowych FBG i TFBG sprawiają, że w obu przypadkach mody rdzeniowe charakteryzują się podobnymi czułościami na zmiany wielkości mierzonej, takiej jak temperatura czy naprężenie. Podobnie jak w przypadku modu rdzeniowego, współczynnik refleksyjności modów płaszczowych zależy od funkcji modulacji współczynnika załamania światła tworzącego strukturę periodyczną [34]:

$$R_i^P = \tanh^2 \left\{ LC \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{E}^r \cdot \vec{E}^p \cdot \Delta n \cdot \cos \left[ \frac{4\pi}{\Lambda} z \cos(\Theta_{TFBG}) \right] dx dy \right\}, \quad (3.11)$$

gdzie:  $L$  jest długością wytworzonej siatki,  $C$  jest stałą proporcjonalną związaną z normalizacją pól modów,  $\vec{E}^r$  jest składową poprzeczną pól elektrycznych modu rdzeniowego,  $\vec{E}^p$  jest składową poprzeczną pól modów płaszczowych, a  $\Delta n$  jest funkcją opisującą zmiany współczynnika załamania światła wzdłuż wytworzonej modulacji.

Właściwością istotną z punktu widzenia mechanizmu prowadzenia światła w strukturach TFBG, jednocześnie odróżniająca je od struktur konwencjonalnych jest asymetria płaszczyzn o podwyższonym współczynniku załamania w płaszczyźnie  $y$ - $z$ . Ze względu na cylindryczność włókna oraz średnicę rdzenia bliską długości fali transmitowanego światła, mod propagujący w rdzeniu jest spolaryzowany liniowo wzdłuż jednego wybranego kierunku [35]. Z uwagi na ściśle zdefiniowaną orientację w przestrzeni struktur pochyłonych, nachylenie płaszczyzn podwyższonego współczynnika załamania powoduje brak symetrii struktury wewnętrznej w płaszczyźnie  $y$ - $z$ , co zostało przedstawione na rysunku 3.6.



Rys. 3.6. Schemat przestrzennego zorientowania ukośnych płaszczyzn modulacji współczynnika załamania rdzenia światłowodu w układzie współrzędnych

Jeżeli poddamy analizie dwa skrajne przypadki, gdzie jednym z nich jest wprowadzane do rdzenia włókna z wytworzoną strukturą TFBG promieniowania spolaryzowanego wzdłuż osi  $x$ , oraz wprowadzanie promieniowania spolaryzowanego wzdłuż osi  $y$ , wtedy występujący w równaniu  $R^p_i$  iloczyn skalarny wektorów pola elektrycznego modu rdzeniowego  $\vec{E}^r$  oraz  $i$ -tego modu płaszczowego  $\vec{E}^p$  można uprościć do iloczynu wartości tych pól, ponieważ w szklach  $\Delta n$  nie jest tensorem. W równaniu (3.11)  $R^p_i$  całka jest liczona po przekroju poprzecznym ( $x$ - $y$ ) włókna, a zmiana współczynnika załamania światła jest dla struktury TFBG funkcją kąta nachylenia w stosunku do normalnej do osi symetrii włókna ( $z$ ) przy czym [34]:

$$\Delta n = f(x, y, z, \Theta_{TFBG}) = \Delta n \cos \left[ \left( \frac{4\pi}{\Lambda} \right) [z \cos(\Theta_{TFBG}) + y \sin(\Theta_{TFBG})] \right]. \quad (3.12)$$

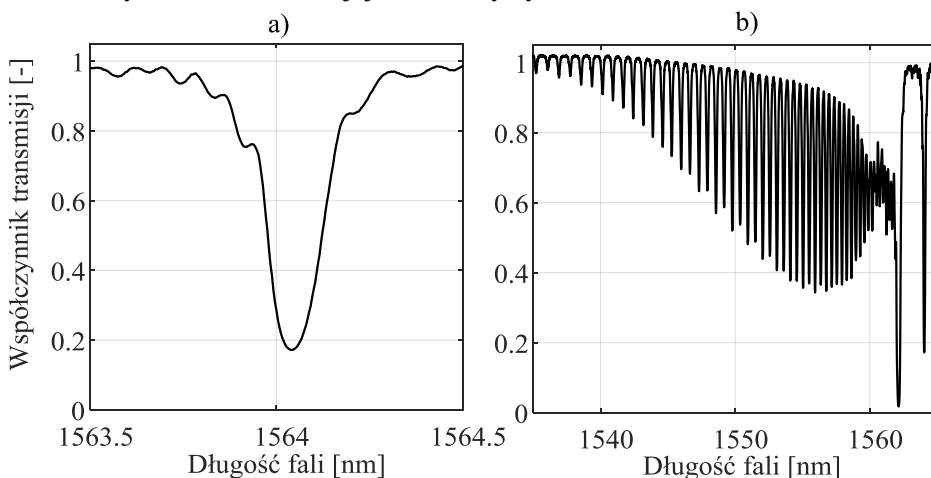
Dodatkowo należy zauważyć, że modulacja wartości współczynnika załamania tworzona jest w procesie zapisu siatek Bragga w rdzeniu włókna optycznego. W związku z tym, w płaszczu światłowodu  $\Delta n=0$ , natomiast w rdzeniu  $\Delta n \neq 0$ , co zostało przedstawione na rysunku 3.6. Całkę przedstawioną w równaniu (3.11)  $R^p_i$  można zatem ograniczyć z zakresu  $-\infty, +\infty$  do zakresu  $-r, +r$ , gdzie  $r$  jest średnicą rdzenia włókna. A zatem równanie (3.12) można zapisać w postaci:

$$\kappa = C \int_{-r}^{+r} \int_{-r}^{+r} \vec{E}^r \cdot \vec{E}^p \left\{ \Delta n \cos \left[ \left( \frac{4\pi}{\Lambda} \right) [z \cos(\Theta_{TFBG}) + y \sin(\Theta_{TFBG})] \right] \right\} dx dy. \quad (3.13)$$

Wprowadzenie do struktury TFBG światła wejściowego w postaci modu rdzeniowego spolaryzowanego liniowo w kierunku osi  $x$ , powoduje, że w całce z równania (3.13) uwzględniane zostają jedynie składowe  $x$  pola elektrycznego. W przypadku wprowadzenia światła jako modu rdzeniowego spolaryzowanego w osi  $y$ , w równaniu uwzględniane będą jedynie składowe  $y$  pola elektrycznego. Stany pośrednie polaryzacji promieniowania wprowadzanego do struktury TFBG traktować można jako superpozycję stanów opisanych powyżej. W związku z tym, kierunek polaryzacji światła wejściowego wpływa na różnice w sprzęganiu światła. Zważywszy na to, współczynnik sprzęgania pomiędzy modem propagującym w rdzeniu a wybranym modem płaszczowym będzie przyjmował różne wartości, uzależnione od zorientowania płaszczyzny polaryzacji promieniowania wejściowego względem płaszczyzn tworzących strukturę TFBG.



Rezonans obserwowany najbliżej  $\lambda_B$ , który często jest silniejszy od sąsiednich modów płaszczowych charakteryzujących się mniejszą długością fali, nazywany jest tzw. „duchem” (ang. *ghost mode resonance*) [36,37]. Na rysunku 3.7. przedstawione zostały przykładowe widma transmisyjne siatki tradycyjnej oraz siatki skośnej o kącie pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych równym 2 stopnie. Należy zaznaczyć, że wprowadzenie niewielkiego kąta pochylenia siatki zdecydowanie zmienia jej charakterystyki widmowe.



Rys. 3.7. Widma transmisyjne konwencjonalnej siatki Bragga (a) oraz siatki skośnej o kącie pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania w stosunku do płaszczyzny przekroju poprzecznego światłowodu równym 2 stopnie (b)

Zjawisko silnych sprzężeń do modów płaszczowych objawia się w postaci rezonansów o szerokościach spektralnych zbliżonych do siatek konwencjonalnych, która wynosi typowo 0.1 nm dla siatek o długości 10 mm. Strata mocy w transmisji poszczególnych modów może wynosić powyżej 20 dB, odpowiadając stracie na poziomie 99% światła wejściowego sprzęganego do jednego, ściśle opisanego modu. Możliwe jest również wprowadzanie zmiany okresu struktury na jej długości, co poszerza zakres widmowy występowania rezonansów powodując również ich nakładanie się. Umożliwia to uzyskanie filtra optycznego o płaskiej, szerokopasmowej charakterystyce spektralnej [38,39].

### 3.3. Właściwości braggowskich struktur światłowodowych

#### 3.3.1. Właściwości konwencjonalnych siatek Bragga

Okres siatki oraz efektywny współczynnik załamania rdzenia światłowodu są parametrami determinującymi centralną długość fali siatki. Ta właściwość siatek Bragga sprawia, że mogą być one stosowane jako przetworniki temperatury

i wydłużenia, ponieważ wielkości te wpływają na okres i współczynnik załamania. Zmiany długości fali Bragga spowodowane odkształceniem  $\Delta\varepsilon$  oraz zmianą temperatury  $\Delta T$  można opisać poniższą zależnością [40]:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T. \quad (3.14)$$

Wyrażenie (3.14) składa się z dwóch składników, z których jeden opisuje wpływ temperatury, a drugi wydłużenia siatki. Podstawowym efektem zmiany temperatury oraz odkształcenia światłowodu z zapisaną siatką jest zmiana okresu, a co za tym idzie przesunięcie długości fali Bragga. Efekt ten jest zależny od właściwości materiałowych włókna z siatką. Wpływ opisanych wielkości na zmianę długości centralnej fali można zapisać w postaci:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left[ (1 - p_e) \varepsilon + (\alpha_A + \alpha_n) \Delta T \right], \quad (3.15)$$

gdzie:  $\varepsilon$  jest odkształceniem względnym,  $\alpha_A = \left(\frac{1}{\Lambda}\right)\left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)$  jest współczynnikiem rozszerzalności temperaturowej światłowodu (dla szkła kwarcowego  $0,55 \cdot 10^{-6}$ );  $\alpha_n = \left(\frac{1}{n_{eff}}\right)\left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\right)$  jest współczynnikiem temperaturowo-optycznym;  $p_e$  jest współczynnikiem elastooptycznym opisującym zmianę współczynnika załamania światła w światłowodzie pod wpływem odkształcenia określony wzorem [41]:

$$p_e = \frac{n_2 e}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (3.16)$$

gdzie:  $p_{11}$  i  $p_{12}$  są współczynnikami elastooptycznymi;  $\nu$  jest stałą Poissona. Szkło kwarcowe domieszkowane germanem charakteryzuje się wartościami  $p_{11} = 0,113$ ;  $p_{12} = 0,252$ ;  $\nu = 0,16$  oraz  $n_{eff} = 1,482$ ; z czego wynika  $p_e = 0,22$ . Z wyrażenia (3.15) wyznaczyć można współczynniki względnej czułości odkształcenia  $k_\varepsilon$  oraz temperatury  $k_T$  siatki Bragga. Przy stałej temperaturze, współczynnik  $k_\varepsilon$  wynosi:

$$k_\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \varepsilon} = 1 - p_e \approx 0,78 \left[ \frac{1}{\mu\varepsilon} \right]. \quad (3.17)$$

Na tej podstawie, czułość  $K_\varepsilon$  siatki o centralnej długości fali 1550 nm na odkształcenie względne wynosi:

$$K_\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{\varepsilon} = k_\varepsilon \cdot \lambda_B = 1,2 \left[ \frac{pm}{\mu\varepsilon} \right]. \quad (3.18)$$

Współczynnik  $k_T$  względnej czułości na temperaturę przy stałym kształcie siatki można określić jako:

$$k_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_n + \alpha_A) K^{-1} \approx 9,15 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{1}{K} \right]. \quad (3.19)$$

Wynika z tego, że czułość  $K_T$  na zmiany temperatury dla siatki o długości fali Bragga 1550 nm, pracującej jako przetwornik temperatury wyraża równanie:

$$K_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = k_T \cdot \lambda_B \quad (3.20)$$

i wynosi  $14,2 \left[ \frac{pm}{K} \right]$ .

### 3.3.2 Właściwości światłowodowych skośnych struktur Bragga

Dla skośnych siatek Bragga, długość fali Bragga oraz  $i$ -tego modu płaszczowego ( $\lambda_B$ ,  $\lambda_{pi}$ ) powodowane przez odkształcenie wzdluzne ( $\Delta l$ ) oraz zmiany temperatury ( $\Delta T$ ) mogą być wyznaczone na podstawie wyrażen [42]:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_B &= 2 \left( \frac{\Lambda}{\cos(\theta)} \frac{\partial n_{eff}^r}{\partial l} + \frac{n_{eff}^r}{\cos(\theta)} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \frac{\Lambda}{\cos(\theta)} \frac{\partial n_{eff}^r}{\partial T} + \frac{n_{eff}^r}{\cos(\theta)} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \\ \Delta\lambda_{pi} &= \left( \frac{(n_{eff}^{core} + n_{eff}^{clad})}{\cos(\theta_{TFBG})} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} + \frac{\Lambda}{\cos(\theta_{TFBG})} \frac{\partial (n_{eff}^{clad} + n_{eff}^i)}{\partial l} \right) \Delta l + \\ &+ \left( \frac{(n_{eff}^{core} + n_{eff}^{clad})}{\cos(\theta_{TFBG})} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{\Lambda}{\cos(\theta_{TFBG})} \frac{\partial (n_{eff}^{core} + n_{eff}^{clad})}{\partial T} \right) \Delta T. \end{aligned} \quad (3.21)$$

W przypadku temperatury, przeważającym czynnikiem jest współczynnik termo-optyczny  $\left( \frac{\partial n}{\partial T} \right)$ , o wartości rzędu  $10^{-5}$  dla szkła krzemionkowego wynikającej z niewielkiego współczynnika rozszerzalności termicznej wynoszącego  $0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ . W tym przypadku różnica pomiędzy przesunięciem długości fali

$\Delta\lambda_B$  oraz  $\Delta\lambda^i$  jest proporcjonalna do  $\frac{\partial(n_{eff}^r - n_{eff}^{clad})}{\partial T}$ , co stanowi bardzo małą wartość w stosunku do przesunięcia powodowanego rozszerzalnością termiczną.

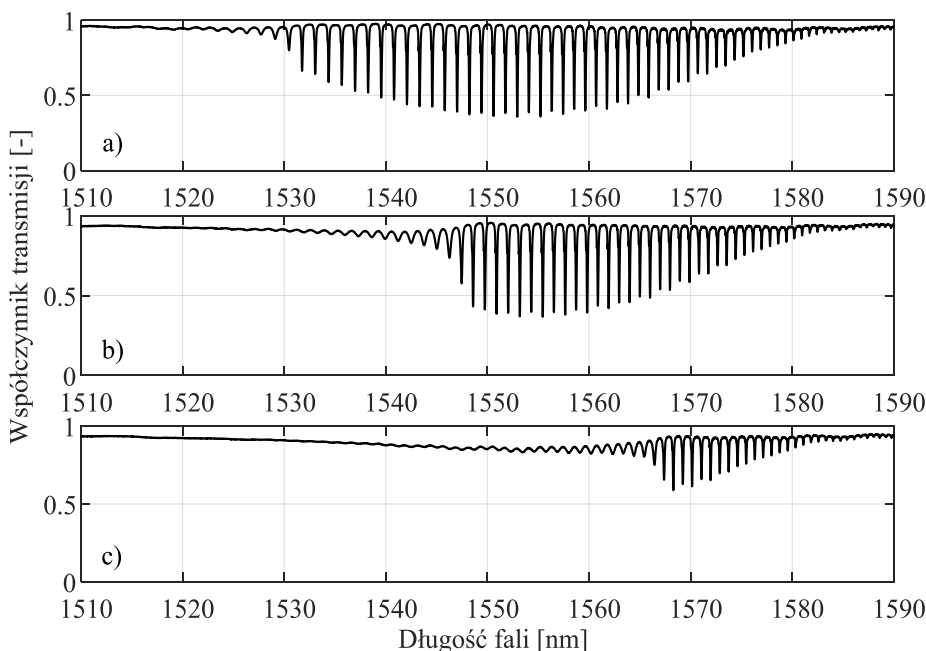
Z poprzednich rozważań wynika, że kształt widma TFBG nie zmienia się pod wpływem zmian temperatury, występuje jedynie globalne przesunięcie długości fali wszystkich rezonansów w przybliżeniu o 10 pm/°C, co stanowi typową czułość konwencjonalnych siatek. Czułość skrośna (ang. *cross-sensitivity*) na temperaturę w przypadku czujników większości wielkości mierzonych za pomocą czujnika TFBG może być wyeliminowana poprzez pomiar względnego przesunięcia długości fali rozpatrywanego modu w odniesieniu do długości fali Bragga  $\Delta\lambda_B$  rezonansu rdzeniowego. W przypadku osiowego wydłużenia światłowodu, przeważającym efektem jest zmiana okresu siatki spowodowana wydłużeniem względnym  $\left(\frac{\partial\Lambda}{\partial\varepsilon}\right)$ . Względne przesunięcie spektralne pomiędzy modem rdzeniowym a płaszczowymi wyniesie zatem:

$$\Delta\lambda_B - \Delta\lambda^r = \left( \frac{(n_{eff}^r - n_{eff}^{clad})}{\cos(\theta_{TFBG})} \frac{\partial\Lambda}{\partial\varepsilon} \right) \Delta\varepsilon. \quad (3.22)$$

W efekcie, względne przesunięcie spektralne wzrasta wraz ze wzrostem rzędu rozpatrywanych modów płaszczowych, dla których współczynnik załamania szkła jest mniejszy niż dla modu rdzeniowego. Podczas rozciągania światłowodu spektralne przesunięcie względne pomiędzy rezonansem Bragga a modami płaszczowymi rośnie wraz ze wzrostem rzędu rozpatrywanego modu.

Jednym z najczęściej opisywanych zastosowań siatek skośnych, wykorzystującym dokładną ocenę właściwości spektralnych modów płaszczowych, jest pomiar współczynnika załamania medium (ang. *surrounding refractive index SRI*), w którym zanurzony jest czujnik [43–45]. W celu wykonania pomiaru SRI z użyciem siatek TFBG, prowadzone światło musi wejść w kontakt z zewnętrzną granicą płaszcza światłowodu tak, aby światło w postaci modów wyciekających propagowało do zewnętrznego ośrodka. Przetwornik w postaci TFBG zapewnia możliwość uzyskania pomiarów niewrażliwych na temperaturę przez wykorzystanie długości fali rezonansu rdzeniowego, który jest zupełnie niezależny od zmian SRI [46,47]. Kiedy współczynnik załamania ośrodka zwiększa się od poziomu odpowiadającego wartości współczynnika załamania powietrza (~1,00) do wartości odpowiadającej współczynnika płaszcza światłowodu (~1,45), rezonanse modów płaszczowych kolejno zanikają, ponieważ przestają ulegać

całkowitemu wewnętrznemu odbiciu na granicy zewnętrznej płaszczka. Właściwość ta może być wykorzystywana do wykrywania stężenia wybranych substancji poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych pokryć, których współczynnika załamania ulega zmianom [48–50]. Rysunek 3.8. przedstawia zmiany widma transmisyjnego zmierzonego dla siatki o kącie  $\Theta_{TFBG}$  równym  $7^\circ$  dla współczynników załamania wynoszących 1, 1,39 oraz 1,42.



Rys. 3.8. Widma transmisyjne siatki TFBG o kącie  $\Theta_{TFBG}$  równym  $7^\circ$  dla współczynników załamania otoczenia: a) 1, b) 1,39 oraz c) 1,42

Do ilościowego wyznaczenia zależności pomiędzy zmianami współczynnika załamania otoczenia a zmianami parametrów spektralnych widma wykorzystuje się wiele metod, np. opartych o wyznaczanie pola powierzchni pomiędzy obwiedniami widma. Jedną z metod wyznaczania tego parametru wyrazić można jako pole powierzchni pomiędzy krzywymi tworzonymi przez obwiednie widma [51,52]. Pole to opisane jest następującym równaniem:

$$P_{env} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (P_T^g(\lambda) - P_T^d(\lambda)) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (P_T'^g(\lambda) - P_T'^d(\lambda)) d\lambda}. \quad (3.23)$$

Do grupy metod globalnych wykorzystujących zmiany parametrów szeregu modów płaszczowych pod wpływem zmian współczynnika załamania medium otaczającego światłowód z zapisaną siatką TFBG zaliczyć można wyznaczenie długości konturu widma transmisyjnego. Zakłada się, że mierzony zakres spektralny składa się z  $N$  punktów o kolejnych długościach fali oraz mierzonej mocy optycznej. Długość konturu wyznaczyć można z zależności [53]:

$$L_C = \sum_{i=0}^N |T_{i+1} - T_i|, \quad (3.24)$$

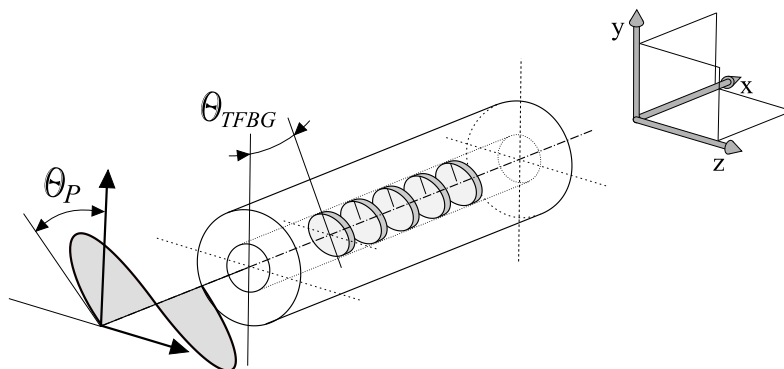
gdzie  $T$  jest współczynnikiem transmisji wyznaczanym dla danego punktu pomiarowego. Możliwe jest również obliczanie korelacji pomiędzy wybranymi charakterystykami widmowymi siatki TFBG oraz wyznaczania współczynników statystycznych [54,55]. Parametrem takim najczęściej jest kurtoza, której wartość zależy od spłaszczenia rozkładu wartości.

Innym sposobem opisu zmian parametrów widma jest analiza poszczególnych rezonansów modów płaszczowych bliskich długości fali odcięcia. Tuż przed osiągnięciem przez ośrodek współczynnika załamania równego efektywnemu współczynnikowi dla wybranego modu, długość fali rezonansu tego modu ulega przesunięciu, które posiada większą wartość, gdy jego zanikające pole coraz bardziej przenika do ośrodka zewnętrznego, a następnie znika. Największe wartości czułości wynoszą około 557,79 nm/RIU (ang. *refractive index unit*) i występują w momencie, kiedy SRI zbliża się do wartości współczynnika załamania płaszcza włókna światłowodowego [56]. Właściwość ta wykorzystywana jest również w przypadku zastosowań TFBG w układach pomiaru poziomu cieczy [57,58].

Dla ośrodka o współczynniku załamania większym niż współczynnik charakteryzujący płaszcz światłowodu, rezonanse kolejno pojawiają się wraz ze wzrostem różnicy pomiędzy wartościami tych współczynników [59]. Z uwagi na fakt, że w widmie odbiciowym obserwowany jest jedynie pik pochodzący od rezonansu Bragga, czujniki wykorzystujące zjawisko zmian modów płaszczowych mogą być implementowane z pomocą różnego rodzaju sprzęgaczy rdzeń-płaszcz. Jedną z opcji zastosowania TFBG jako punktowego czujnika w konfiguracji jednokońcówkowej, pracującego w trybie odbiciowym jest umieszczenie struktury odbijającej za skośną siatką Bragga [60,61]. Dzięki takiej konstrukcji układu, światło ze źródła dwukrotnie przechodzi przez siatkę skośną [62]. W najprostszej konfiguracji do odbicia światła zastosowane może być pokrycie cienką warstwą metalu czoła powstałego przez wysokiej jakości cięcie światłowodu. Tak powstałe lustro pozwala na odbicie do 100%

padającego światła [63]. Inną możliwością jest zastosowanie tradycyjnej siatki Bragga o szerokości spektrum odbiciowego dopasowanego do szerokości widmowej rozpatrywanego modu płaszczowego TFBG lub wybranego zakresu długości fali, określonego na podstawie widma transmisyjnego siatki skośnej. Ponadto, w celu transferu promieniowania odbitego prowadzonego w płaszczu włókna do rdzenia, stosowane są połączenia światłowodu jednomodowego z odcinkiem włókna wielodomowego lub połączenia włókien jednomodowych z przesunięciem [64,65]. W pracy [66] pokazano również, że możliwe jest uzyskanie transmisji światła odbijanego przez TFBG do rdzenia tzw. „włókna D-shape”.

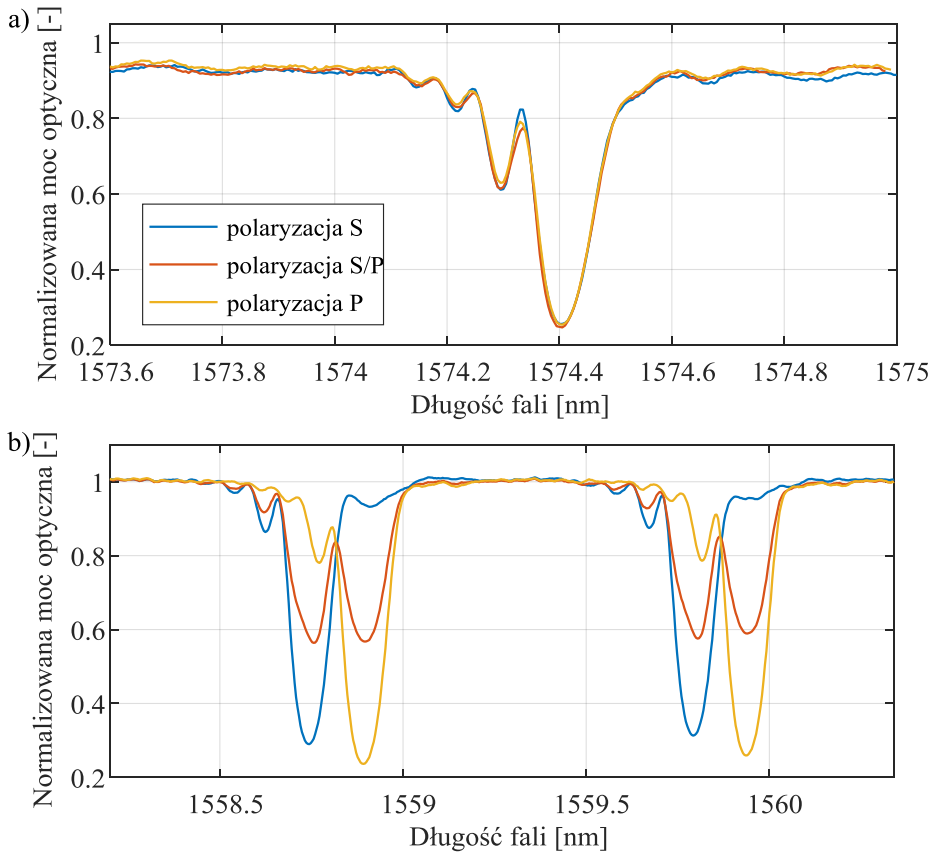
Innym parametrem istotnie wpływającym na charakterystyki siatki skośnej jest stan polaryzacji światła wejściowego wynikający z faktu, iż wprowadzenie kąta pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania powoduje, że dla cylindrycznej struktury wprowadzona zostaje asymetria. Właściwość ta umożliwia badanie kąta płaszczyzny polaryzacji światła wprowadzanego do układu, w odniesieniu do geometrii TFBG [67–69]. Wprowadzanie światła liniowo spolaryzowanego do światłowodu z zapisaną strukturą TFBG jest przedstawione na rysunku 3.9.



Rys. 3.9. Schemat idealny wprowadzania światła liniowo spolaryzowanego pod kątem  $\theta_P$  do włókna światłowodowego z zapisaną TFBG w odniesieniu do wewnętrznej geometrii struktury

Wpływ kąta polaryzacji światła wprowadzanego do struktury TFBG na jej widmo jest różny w zależności od rozpatrywanego modu. Podobnie jak w przypadku zmian współczynnika załamania medium otaczającego włókno, zmiana kąta polaryzacji ma znikomy wpływ na parametry spektralne modu rdzeniowego. Na rysunku 3.10. pokazane są widma transmisyjne wybranych modów sprzęganych przez TFBG o kącie pochylenia  $5^\circ$  uzyskane poprzez pomiar analizatorem widma. Na rysunku 3.10.a widoczne jest, że zmiana kąta

płaszczyzny polaryzacji modu rdzeniowego wprowadzanego do TFBG ma praktycznie nieistotny wpływ na parametry spektralne rezonansu Bragga. Natomiast fragment widma transmisyjnego tej samej siatki zmierzony w zakresie modów płaszczowych wyższych rzędów pokazany na rysunku 3.10.b odzwierciedla dużą zmienność ich parametrów spektralnych w zależności od stanu polaryzacji światła. Te zależności wynikają z podstawowych właściwości propagacji światła we włóknach optycznych.



Rys. 3.10. Widma transmisyjne modu rdzeniowego oraz wybranych modów płaszczowych wyższych rzędów dla skrajnych przypadków polaryzacji światła wprowadzanego do struktury

W przypadku części widma przedstawiającej mody sprzęgane w płaszczu włókna światłowodowego, wraz ze zmianą kąta polaryzacji światła wprowadzanego następuje zmiana amplitud rezonansów wchodzących w skład modu. Minimum obserwowane dla fal o mniejszej długości związane jest ze sprzężaniem typu S (przedstawionym na rysunku 3.10.  $\theta_p = 90^\circ$ ). Natomiast



minimum występujące dla fal o większej długości związane jest ze sprzężaniem modów typu P (przedstawionym na rysunku 3.10.  $\Theta_p = 0^\circ$ ) [70–72]. Stan pośredni, tzw. wprowadzenie polaryzacji o kącie pomiędzy S a P (na rysunku 3.10.  $\Theta_p = 45^\circ$ ) doprowadza amplitudy do zbliżonych poziomów.

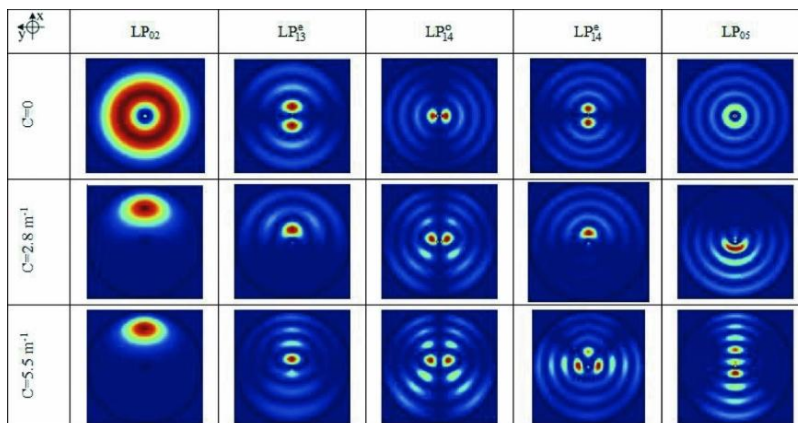
Inaczej niż w przypadku temperatury i osiowego rozciągania, zginanie włókna wprowadza wiele efektów wpływających na mody płaszczowe. W pracach [73,74] pokazano, że zmiany widma siatki skośnej poddawanej zginaniu powodowane są przez zmianę kąta pochylenia struktury wewnętrznej prążków dyfrakcyjnych. Wyjaśnienie to jest niepełne, ponieważ nie uwzględnia naprężeń powstających przy zginaniu elementów oraz z uwagi na fakt, iż możliwy promień gięcia włókna jest zdecydowanie większy niż średnica rdzenia, a zatem zmiana kąta wewnętrznego jest nieznaczna. W pracy [75] wykazano, że mody zgiętych włókien mają tendencję do przesuwania się w kierunku zewnętrznym włókna, gdy propagują wokół zgięcia. Zatem efektywne współczynniki załamania modów płaszczowych i modu rdzeniowego zmieniają się [76]. Krzywizna  $C$  zgiętego włókna definiowana jest najczęściej jako odwrotność promienia gięcia  $R$ , tj.:

$$C = \frac{1}{R}. \quad (3.25)$$

Największy wpływ na charakterystyki transmisyjne jest powodowany gięciem niejednorodnych naprężeń  $\varepsilon$  wzdłuż włókna, które skutkuje przesunięciem profilu pola modowego od centrum rdzenia światłowodu w kierunku gięcia. Biorąc pod uwagę efekt fotoelastyczny, naprężenie to wprowadza zmianę współczynnika załamania światła  $\Delta n$  w przekroju światłowodu:

$$\Delta n = -\left(\frac{n^3}{2}\right) [(1-\nu) p_{12} - \nu p_{11}] Cx, \quad (3.26)$$

gdzie:  $\nu$  jest współczynnikiem Poissona,  $p_{11}$  oraz  $p_{12}$  to stałe fotoplastyczne oraz  $n$  to współczynnik załamania [77]. Współczynniki sprzężenia zmieniają się w inny sposób dla każdego z modów płaszczowych, z uwagi na fakt, że wartość przesunięcia zależy od rzędu modu. Na rysunku 3.11. przedstawione zostały obliczone numerycznie przez Shao i innych [78] zmieniające się pola modów podczas zginania włókna.



Rys. 3.11. Symulowane wybrane pola modów płaszczka włókien prostych i zgiętych [78]

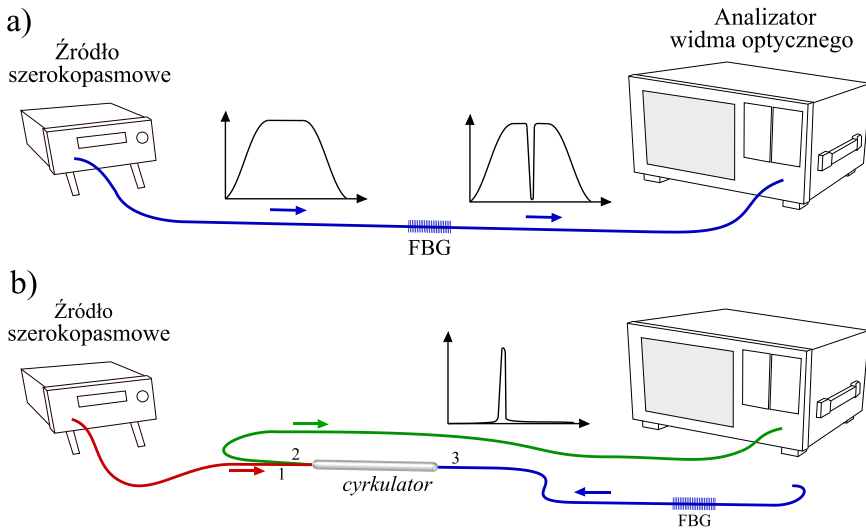
Główną konsekwencją zginania włókna jest przesunięcie środka pól modów płaszczowych od środka światłowodu w kierunku płaszczyzny zgięcia, to z kolei powoduje zmianę obszaru nakładania się pomiędzy modem rdzenia i każdym z modów płaszczowych. Z tego powodu zmianie ulegają współczynniki sprzężenia pomiędzy modami, co obserwować można na widmie transmisyjnym jako zmiana transmisyjności wybranych minimów związanych z modami płaszczowymi.

Należy również wspomnieć, że w zależności od kierunku gięcia w stosunku do położenia płaszczyzn perturbacji współczynnika załamania, zmiany współczynnika transmisji modu ghost charakteryzują się różnymi czułościami. W rezultacie, jeśli kierunek gięcia nie jest znany, zależność zmienności transmisji modu ghost w zależności od promienia gięcia uniemożliwia prawidłowe określenie promienia gięcia. Warto w tym miejscu powtórzyć, że rezonans ghost jest rezultatem nakładania się kilku modów płaszczowych niskiego rzędu, z których każdy zmienia się inaczej pod wpływem wielkości i kierunku gięcia. Wynikające z tego zmiany widmowe są dość złożone.

Włókno światłowodowe może być dodatkowo pokrywane w miejscu wytworzonej siatki TFBG cienkimi warstwami materiałów metalicznych, wywołując powstawanie efektu powierzchniowego rezonansu plazmowego SPR (ang. *surface plasmon resonance*) [79–81]. Efekt ten modyfikuje wybrane parametry widmowe TFBG, pozwalając na uzyskanie modyfikacji właściwości czujników opartych na takich strukturach [82].

### 3.4. Podstawowe parametry widmowe siatek Bragga

Charakteryzacja parametrów widmowych światłowodowych siatek Bragga może być realizowana w układach o dwóch podstawowych wariantach – układ pomiaru widma transmisyjnego dla światła, które jest transmitowane za siatką w kierunku światła źródłowego oraz układ pomiaru widma odbiciowego dla światła odbitego od siatki w kierunku przeciwnym do kierunku promieniowania wejściowego. W celu zbadania widma światła odbitego, należy użyć pasywnego elementu światłowodowego, który posiada zdolność do kierunkowego prowadzenia światła. Może nim być cyrkulator bądź sprzęgacz światłowodowy. Rysunek 3.12. w sposób ideowy przedstawia układy do pomiarów wybranych charakterystyk widmowych światłowodowych struktur okresowych.

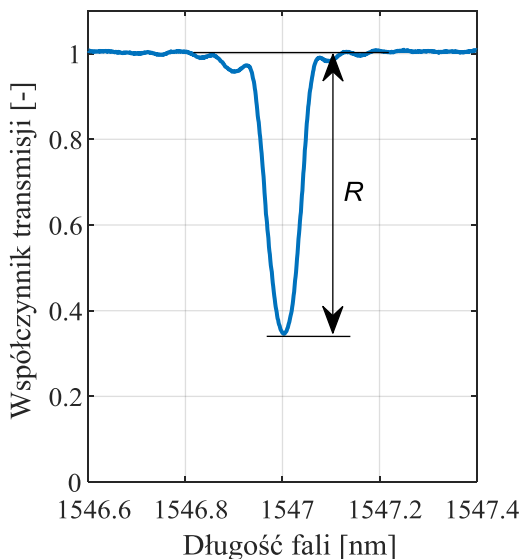


Rys. 3.12. Schematy ideowe układów do pomiaru widma światłowodowych siatek Bragga: a) transmisyjnego, b) odbiciowego

Pożądany kształt charakterystyki widmowej siatki Bragga może znacząco różnić się w zależności od potencjalnego zastosowania. Typowo w przypadku przeznaczenia telekomunikacyjnego konieczne jest, by charakterystyka widmowa struktury odpowiadała pojedynczemu kanałowi w systemach zwielokrotnienia długości fali. Wymagana jest również wysoka wartość współczynnika odbicia. Analiza wybranych parametrów widma jest konieczna do prowadzenia procesu optymalizacji parametrów technologicznych układu wytwarzania takich struktur pod kątem uzyskiwania pożądanych właściwości spektralnych.

### 3.4.1. Parametry spektralne konwencjonalnych siatek Bragga

Jednym z podstawowych parametrów widmowych konwencjonalnych siatek Bragga jest współczynnik odbicia dla centralnej długości fali nazywany również reflektancją. Wielkość ta wyznaczana jest najczęściej na podstawie spektrum transmisyjnego jako stosunek minimalnej wartości mocy optycznej mierzonej dla długości fali światła najsilniej odbijanego oraz wartości mocy odniesienia mierzonej dla części widma znajdującej się poza zakresem długości fali Bragga. Określenie reflektancji na podstawie widma odbiciowego nie jest możliwe z uwagi na fakt, iż przy pomiarach w układzie odbiciowym nie ma możliwości odniesienia wartości amplitudy mocy dla centralnej długości fali do wartości mocy promieniowania emitowanego przez źródło światła. Rysunek 3.13. przedstawia widmo transmisyjne siatki Bragga z zaznaczoną różnicą między poziomami mocy odbitej oraz mocy odniesienia.

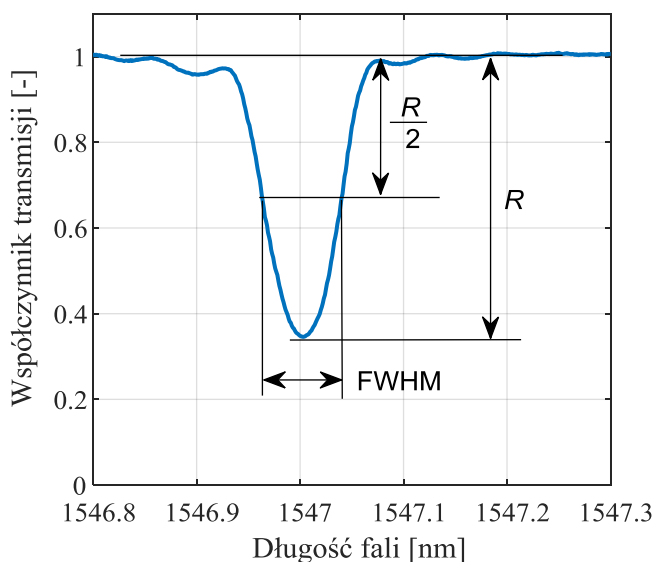


Rys. 3.13. Charakterystyka transmisyjna FBG, przedstawiająca schemat wyznaczania współczynnika odbicia siatki Bragga dla centralnej długości fali na podstawie widma transmisyjnego

Reflektancja siatki jest często wyrażana w formie procentowej, określając, jaki procent promieniowania o długości fali Bragga dostarczonego do siatki, jest przez nią odbijany. W wielu przypadkach kształt charakterystyki widmowej źródła światła może wpływać na dokładność wyznaczania reflektancji struktur periodycznych. Rozwiązaniem pozwalającym na minimalizowanie tego zjawiska jest wyznaczanie charakterystyki transmisyjnej siatki i wykonanie dzielenia

zmierzonego spektrum transmisyjnego charakteryzowanej struktury Bragga przez widmo promieniowania źródła światła.

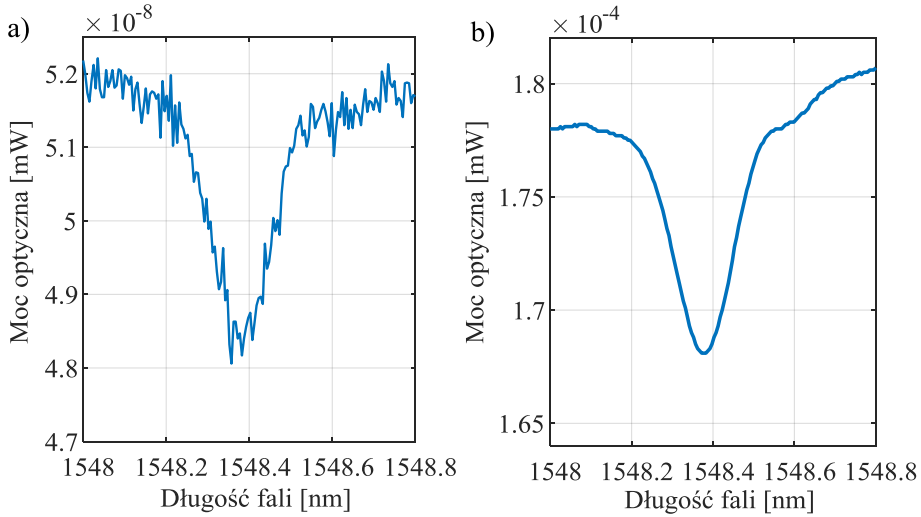
Innym istotnym parametrem opisującym charakterystykę widmową siatki Bragga jest FWHM (ang. *full width at half maximum*), określający szerokość widmową charakterystyki spektralnej struktury periodycznej.



Rys. 3.14. Charakterystyka transmisyjna FBG, przedstawiająca metodę wyznaczania współczynnika odbicia siatki Bragga dla centralnej długości fali na podstawie widma transmisyjnego

Szerokość spektralna *FWHM* określana jest jako różnica pomiędzy długościami fali, dla których reflektancja minimum odpowiadającego rezonansowi Bragga przyjmuje wartość 50%. Parametr ten może być wyznaczany zarówno na podstawie widma odbiciowego jak i transmisyjnego.

Kolejnym charakterystycznym parametrem widma siatki jest centralna długość fali odbijanego światła. W przypadku struktur, których widma posiadają kształt zbliżony do charakterystyki opisanej przez funkcję typu Gaussa, oraz są mierzone przy zachowaniu wysokiego stosunku sygnału do szumu, długość ta definiowana jest dla największej wartości reflektancji. Rysunek 3.15. przedstawia widma transmisyjne siatki Bragga zmierzone przy zastosowaniu szerokopasmowego źródła światła w postaci lampy halogenowej oraz źródła światła wysokiej mocy SLED (ang. *superluminescent diode*).



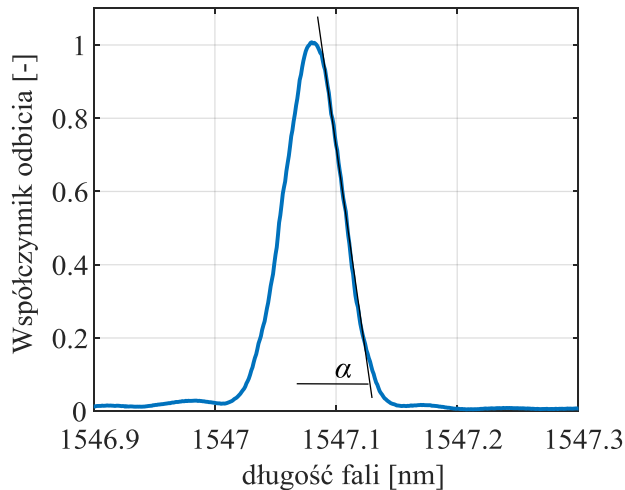
Rys. 3.15. Widma transmisyjne światłowodowej siatki Bragga mierzone dla a) źródła wysokiej mocy SLED, b) szerokopasmowego źródła halogenowego

W praktyce, widmo charakteryzowanej siatki Bragga może być mierzone w sposób niezapewniający wystarczająco wysokiego stosunku sygnału do szumu. Wpływa to znacząco na dokładność wyznaczania długości fali, dla której występuje ekstremum na charakterystyce widmowej. Przykładowe spektrum pokazane zostało na rysunku 3.15.a, gdzie wyraźnie widoczne jest, iż długość fali dla minimum mocy optycznej przesunięte jest względem charakterystyki porównawczej mierzonej dla tej samej siatki Bragga, ale z zastosowaniem źródła wysokiej mocy. Rozwiązaniem takiego problemu może być zastosowanie specjalizowanych algorytmów określających położenie centralnej długości fali np. przez dopasowanie widma do krzywej Gaussa bądź przez wyznaczenie geometrycznego środka ciężkości części widma zgodnie z wzorem [83]:

$$\lambda_B = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i A_i}{\sum_{i=1}^N A_i}, \quad (3.27)$$

gdzie  $N$  jest liczbą mierzonych punktów widma,  $\lambda_i$  długością fali  $i$ -tego punktu,  $A$  jest amplitudą  $i$ -tego punktu. Wartość długości fali Bragga dla danej siatki jest szczególnie istotna z punktu widzenia systemów wykorzystujących przesunięcie widma piku lub skorelowanie (dopasowanie) widm wielu struktur.

Istotnym z punktu widzenia zastosowań czujnikowych parametrem charakteryzującym widmo jest kąt nachylenia zbocza widma struktury. Kąt ten jest użyteczny przy opisywaniu charakterystyki siatki stosowanej jako filtr krawędziowy.

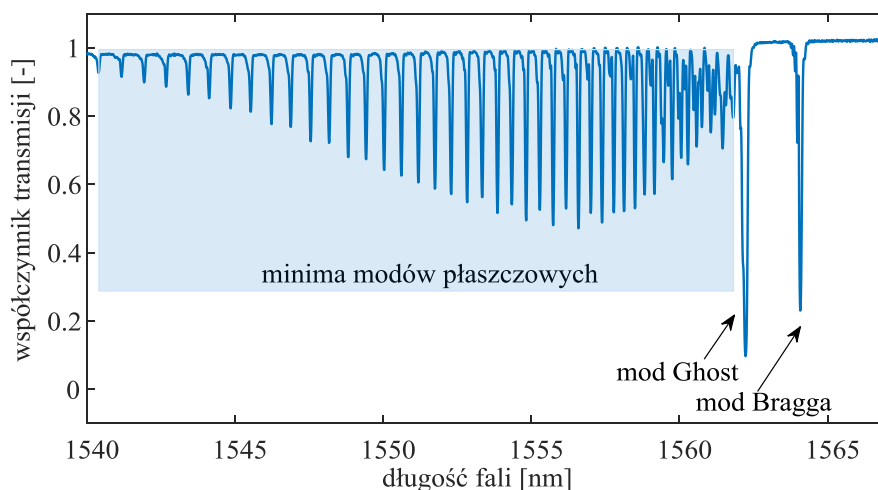


Rys. 3.16. Widmo odbiciowe konwencjonalnej siatki Bragga z oznaczonym kątem nachylenia  $\alpha$  zbrocza charakterystyki

Kąt oznaczony na rysunku 3.16. jako  $\alpha$  opisuje nachylenie zbrocza charakterystyki i jest uzależniony od szeregu parametrów technologicznych wytworzonej siatki Bragga. W układach wykorzystujących siatki Bragga w charakterze filtrów pożądane jest minimalizowanie wstęp bocznych widma oraz utrzymywanie liniowego charakteru zbrocza w szerokim zakresie spektralnym. Skośne siatki Bragga charakteryzują się widmami o bardziej skomplikowanej strukturze w porównaniu do siatek prostych. Parametry opisane powyżej mogą być wykorzystywane do opisu charakterystyk spektralnych poszczególnych modów sprzęganych przez TFBG.

### 3.4.2. Parametry widmowe skośnych siatek Bragga

Widmo transmisyjne siatki Bragga o pochylonych płaszczyznach modulacji współczynnika załamania światła można podzielić na trzy podstawowe obszary: minimum mocy związane z występowaniem rezonansu rdzeniowego, widmo modu ghost oraz szereg minimów pochodzących od modów płaszczyznowych. Straty transmisyjne powodowane przez występujące rezonanse są silnie zależne od kąta nachylenia siatki. Rysunek 3.17. przedstawia charakterystykę transmisyjną światłowodowej skośnej siatki Bragga o kącie nachylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych  $2^\circ$ .



Rys. 3.17. Spektrum transmisyjne skośnej siatki Bragga o kącie nachylenia  $2^\circ$  z oznaczonymi charakterystycznymi elementami widma

Mod rdzeniowy siatki skośnej jest identyfikowany jako rezonans o największej długości fali spośród wszystkich obserwowanych minimów. Rezonans ten charakteryzuje się podobną czułością na zmiany temperatury, wynoszącą  $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  oraz osiowe wydłużenie światłowodu wynoszącą  $1 \text{ pm}/\mu\epsilon$  jak w przypadku modu rdzeniowego konwencjonalnej siatki FBG. Ponadto odznacza się również nieczułością na zmiany środowiska otaczającego światłowód. Z uwagi na fakt, iż zarówno mod rdzeniowy jak i mody płaszczowe charakteryzują się podobną czułością na zmiany temperatury skutkujące przesunięciem ich długości fal, możliwym sposobem ograniczenia czułości skośnej dla większości potencjalnych zastosowań czujnikowych może być pomiar przesunięcia poszczególnych modów względem modu rdzeniowego.

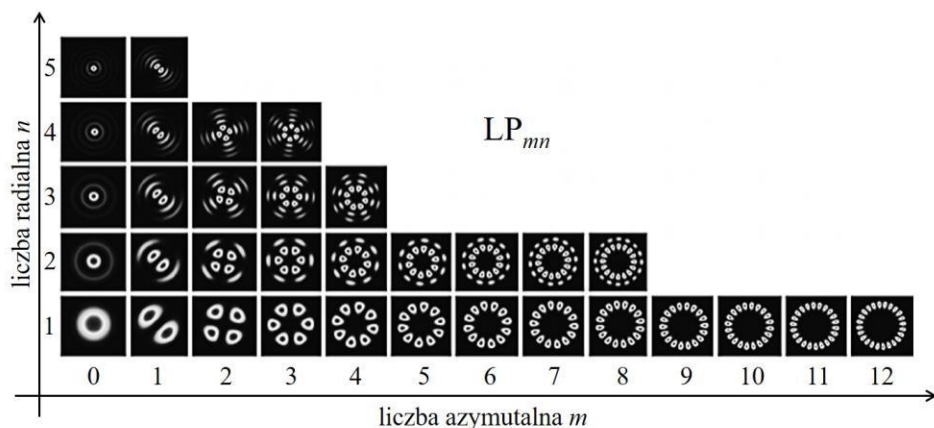
Tak zwany mod ghost skośnej siatki Bragga, jest definiowany jako grupa modów płaszczowych najniższych rzędów, prowadzonych w większości na granicy rdzeń-płaszcz oraz w niewielkim stopniu na zewnętrznej granicy włókna, w związku z czym długości fali ich rezonansów są zbliżone do modu rdzeniowego [84,85]. Ponadto dla niewielkich kątów nachylenia struktury wewnętrznej siatki, formują one pojedynczy rezonans, który posiada charakterystykę widmową podobną do modu rdzeniowego. Biorąc pod uwagę, że nieparzyste mody pierwszego rzędu propagują przy granicy rdzeń-płaszcz z rozkładem asymetrycznym, każda zmiana geometrii włókna może powodować zmianę poprzecznych rozkładów amplitudy pola elektrycznego. Mimo iż połączone spektrum rezonansów tworzących mod ghost jest często



nieregularne, możliwy jest pomiar mocy w paśmie widma pokrywającym całe spektrum tego modu.

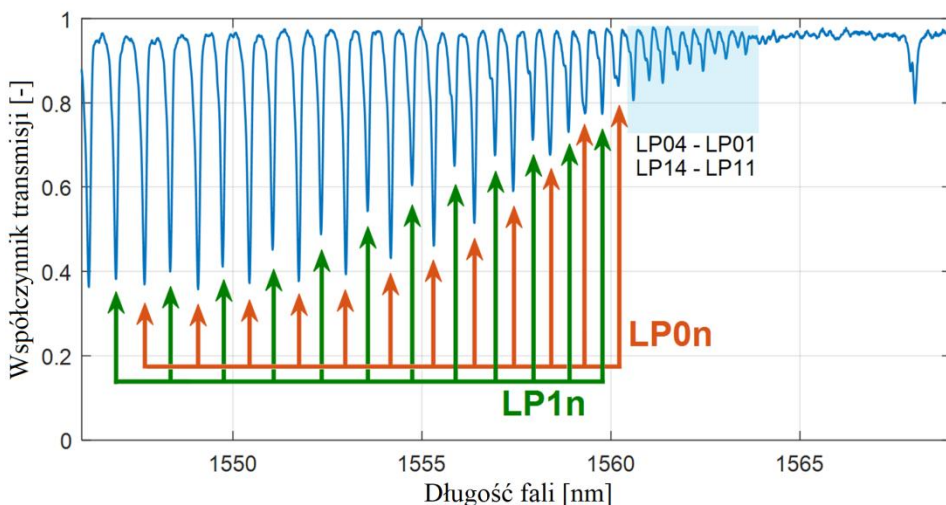
Maksymalne wartości strat transmisyjnych obserwowane na kolejnych, mniejszych długościach fal są związane z modami propagującymi w płaszczu światłowodu. Jeżeli współczynnik załamania ośrodka otaczającego TFBG osiąga wartość, dla której obserwowane są zanikające pola modowe, w mierzonym zakresie zmieniają się pozycje rezonansowe modów płaszczowych. Szerokość spektralna pojawiającego się grzebienia pików strat transmisyjnych jest szczególnie silnie uzależniona od kąta skosu siatki. Im większy kąt  $\Theta_{TFBG}$ , tym więcej światła sprzęgane jest do modów płaszczowych. Światło to ulega sprzęganiu do modów prowadzonych coraz dalej od rdzenia światłowodu, zatem efektywny współczynnik załamania modów ma coraz niższą wartość. Kąt pochylenia płaszczyzn struktury wewnętrznej siatki definiuje, który zespół modów płaszczowych zostanie pobudzony. Dodatkowo występuje zależność warunkująca różnice długości fal sąsiadujących rezonansów płaszczowych o najwyższych amplitudach w zależności od kąta pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania w wewnętrznej strukturze siatki [86]. Parametr ten jest istotny w przypadku zastosowania filtrów w postaci konwencjonalnych siatek Bragga do demodulacji sygnału z przetwornika TFBG [87].

Osobny problem stanowi rozwiązanie kwestii oznaczania i numerowania poszczególnych modów obserwowanych na widmie transmisyjnym oraz minimum od nich pochodzących. Numeracja taka jest możliwa i należy ją odnosić do konkretnych przypadków struktur o wybranym kącie pochylenia struktury wewnętrznej. Dla tak zwanych „słabo prowadzących” struktur, do jakich należy rdzeń światłowodu (z uwagi na różnicę współczynników załamania rdzenia i płaszczu na poziomie poniżej 1%), wiadomo, że możliwe jest grupowanie modów w światłowodzie o podobnym efektywnym współczynniku załamania. Mody spolaryzowane liniowo w płaszczyźnie prostopadłej do osi światłowodu nazywane są modami LP (ang. *linearly polarized*). W przypadku płaszczu światłowodu różnica współczynnika załamania na granicy płaszcz-otoczenie dla większości otaczających mediów jest wysoka, a zatem nie jest on strukturą słabo prowadzącą. W wyniku tego degeneracja modu wzrasta, a komponenty wektorów modowych ( $EH_{mn}$ ,  $HE_{mn}$ ) objawiają się jako ściśle rozdzielone rezonanse. Każdy z modów LP określony jest jako  $LP_{mn}$ , gdzie poprzez  $m$  oznacza się liczbę zer radialnych, a poprzez  $n$  liczbę zer azymutalnych określonego modu zgodnie z rysunkiem 3.18. [88].



Rys. 3.18. Oznaczenie modów spolaryzowanych liniowo  $LP_{mn}$  oraz przekroje poprzeczne pól modowych [88]

Pierwsze minimum mocy obserwowane po stronie fal o najmniejszych długościach związane jest z rezonansem Bragga propagującym w rdzeniu włókna. Mod ten oznaczyć można jako  $LP_{01}$ , gdzie liczba azymutalna  $m = 0$ , a liczba radialna = 1. W przypadku TFBG zapisanej w jednomodowym włóknie wzbudzone są mody o liczbie azymutalnej 0 i 1 i występują one dla kolejnych długości fali naprzemiennie [89]. Kolejnym obserwowanym minimum jest to związane z występowaniem złożenia modów płaszczowych najniższych rzędów, propagujących w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia włókna jako pojedynczy rezonans ghost. Zbliżone długości fali modów wchodzących w jego skład sprawiają, że w widmie obserwowane są jako jedno maksimum strat transmisyjnych. Występowanie tego zjawiska obserwowane jest wyłącznie dla niewielkich kątów pochylenia struktury wewnętrznej, tj. do około 3 stopni. Zgodnie z analizą przedstawioną w pracy [20], w skład modu ghost wchodzi mody płaszczowe o liczbach radialnych 2–4 i różnych liczbach azymutalnych. W przypadku skośnej siatki Bragga zapisanej w jednomodowym włóknie światłowodowym, wzbudzeniu ulegają mody o liczbie azymutalnej 0 oraz 1. Obserwowane są one w widmie transmisyjnym jako minima występujące naprzemiennie dla kolejnych długości fal, co pokazane zostało na rysunku 3.19. na przykładzie siatki skośnej o kącie pochylenia struktury wewnętrznej wynoszącym 4 stopnie.



Rys. 3.19. Numeracja poszczególnych modów płaszczowych w widmie transmisyjnym skośnej siatki Bragga o kącie nachylenia  $4^\circ$

Porównując widma transmisyjne struktur o kątach pochylenia  $2^\circ$  (Rys. 3.17.) oraz  $4^\circ$  (Rys. 3.19.) można stwierdzić, iż w przypadku silniejszego pochylenia struktury wewnętrznej, nie występuje połączenie rezonansów najniższych rzędów w jeden o dużej amplitudzie. Na rysunku 3.19. kolorem czerwonym oznaczono mody płaszczowe o liczbie azymutalnej 0 oraz kolorem zielonym o liczbie azymutalnej 1 przy liczbach radialnych równych lub większych niż 5. Z uwagi na czytelność rysunku, mody płaszczowe o liczbach radialnych od 2 do 4, które charakteryzują się niewielką różnicą długości fal oznaczono kolorem niebieskim. W kontekście zastosowania struktur TFBG w konkretnych układach pomiarowych, istotne jest prawidłowe oznaczanie minimów obserwowanych w widmie transmisyjnym [90]. Zastosowanie siatek skośnych w charakterze przetworników wybranych wielkości fizycznych, związane jest z wyznaczeniem parametrów spektralnych wybranych minimów współczynnika transmisji. Porównywanie właściwości poszczególnych struktur wymaga odnoszenia się do modów o tych samych liczbach azymutalnych i radialnych.

#### **4. Zapis i charakteryzacja struktur periodycznych o pochylonej płaszczyźnie modulacji współczynnika załamania na włóknach światłowodowych**

Wyróżnić można trzy podstawowe metody zapisu struktur periodycznych we włóknie światłowodowym oraz szereg metod syntetyzujących elementy metod podstawowych, a także metody będące ich modyfikacją i rozwinięciem. Do podstawowych metod zapisu siatek Bragga należą: metoda punkt po punkcie, metoda maski fazowej oraz metoda interferometryczna. Zapis struktur braggowskich wymaga odpowiedniego doboru włókien światłowodowych oraz warunków samego procesu zapisu. Ze względu na rodzaj użytego światłowodu wyodrębnić można dwa rodzaje procesów nadających światłowodom właściwą czułość na promieniowanie z zakresu UV. Proces taki ma na celu zwiększenie fotoczułości włókna na promieniowanie UV tak, by umożliwić tworzenie w obrębie światłowodu okresowych, następujących po sobie zmian współczynnika załamania wielokrotnie większych niż w przypadku standardowego jednomodowego włókna telekomunikacyjnego. Nadanie fotoczułości rdzeniowi światłowodu może odbywać się podczas procesu tworzenia preformy światłowodowej poprzez domieszkowanie go pierwiastkami ziem rzadkich lub zwiększenie domieszki germanu. Drugą metodą jest poddanie światłowodu telekomunikacyjnego procesowi wodorownia, realizowane przez umieszczenie włókna w atmosferze wodoru w warunkach wysokiego ciśnienia na kilkadziesiąt godzin.

##### **4.1. Wrażliwość włókna światłowodowego na promieniowanie ultrafioletowe**

Jako najbardziej wiarygodną teorię uzasadniającą występowanie fotoczułości światłowodów produkowanych ze szkła krzemionkowego jest teoria występowania defektów wewnątrz szkła domieszkowanego [91]. Obecność atomów germanu w strukturze rdzenia światłowodu, powoduje tworzenie wiązań z niedoborem tlenu – tworzone są wiązania Ge-Ge, Si-Si oraz Si-Ge. Struktury te tworzą defekty o przerwie energetycznej wynoszącej ok. 5 eV, potrzebnej do rozerwania wiązania. Dwufotonowa absorpcja promieniowania lasera argonowego o długości fali 488 nm lub absorpcja pojedynczego fotonu promieniowania o długości fali równej 248 nm powoduje zerwanie tego wiązania i powstanie atomów germanu bez przyłączonych atomów tlenu – tzw. centrów Ge, co prawdopodobnie skutkuje zmianą absorpcji szkła i zmianą jego gęstości. Ilościowy opis zmiany gęstości ośrodka oraz zmiany jego absorpcji opisany został modelem Kramers–Kroniga [91]. Zmiana zawartości oraz rodzaju domieszki w materiale rdzenia włókna światłowodowego skutkuje

zwiększeniem jego tłumienności oraz zmianą współczynnika załamania światła. W takim przypadku, w celu zapewnienia pracy jednomodowej włókna dla fali o wybranej długości, konieczne jest zmniejszenie średnicy rdzenia światłowodu lub wprowadzenie dodatkowych pierwiastków jako domieszki we włóknie. Warunek jednomodowej pracy światłowodu określa parametr częstotliwości znormalizowanej:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot \sqrt{n_R^2 - n_p^2}}{\lambda} = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} NA < 2,405, \quad (4.1)$$

gdzie:  $d$  jest średnicą rdzenia światłowodu,  $\lambda$  jest długością fali światła,  $n_R$  jest współczynnikiem załamania rdzenia,  $n_p$  współczynnikiem załamania płaszczka światłowodu.

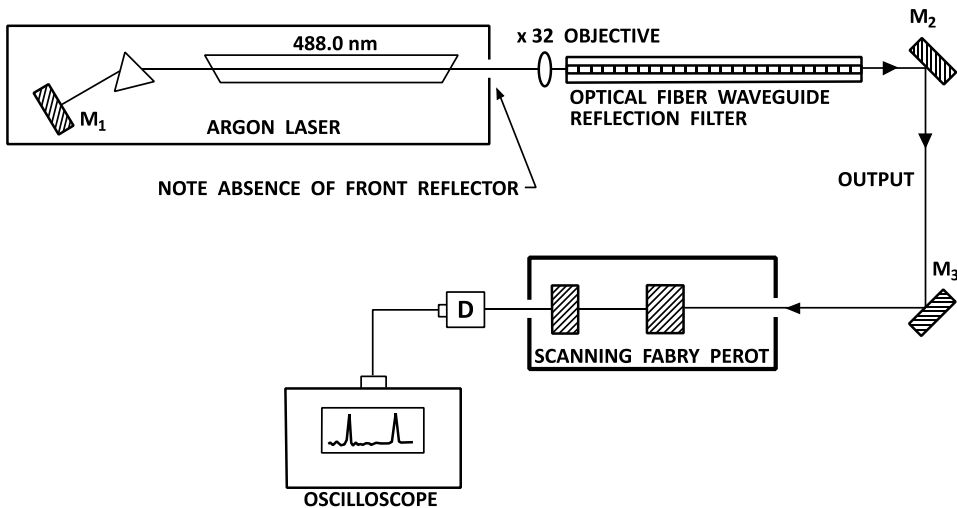
Dla wartości częstotliwości znormalizowanej poniżej 2,405 we włóknie może propagować jedynie mod podstawowy. Domieszkowanie rdzenia włókna cząsteczkami  $\text{GeO}_2$  może powodować nawet dwukrotne zwiększenie apertury numerycznej światłowodu, co skutkuje koniecznością proporcjonalnego zmniejszenia średnicy rdzenia światłowodu dla zachowania pracy jednomodowej dla tej samej długości fali światła. Poza problemami technologicznymi pojawiającymi się podczas wytwarzania preform światłowodowych o wysokich stężeniach molowych tlenu germanu, zmiana geometrii włókna powoduje trudności w wykonywaniu połączeń takich światłowodów z włóknami telekomunikacyjnymi. Aby uniknąć konieczności zmian średnicy rdzenia powodowanej zwiększonym współczynnikiem załamania materiału od obecności domieszki germanu, opracowano technikę domieszkowania włókien pierwiastkami obniżającymi wartość współczynnika załamania szkła krzemionkowego, takimi jak fosfor czy bor. Stosowanie domieszki obniżającej współczynnik załamania umożliwia zwiększenie zawartości cząstek germanowych tak, by uśredniona wartość pozostała na poziomie standardowych włókien telekomunikacyjnych. Takie włókna charakteryzują się wysoką tłumiennością, jednakże umożliwiają tworzenie dobrej jakości połączeń z włóknami telekomunikacyjnymi zatem możliwe jest stosowanie krótkich odcinków światłowodu z wytworzonymi strukturami periodycznymi spawanych do włókien transmisyjnych.

Drugą metodą zwiększenia fotoczułości światłowodu jest wprowadzenie do struktury włókna cząsteczek wodoru, które rekombinują z atomami tlenu tworząc jony OH, jednocześnie zwiększając liczbę wiązań germanu  $\text{GeO}$ , w których występuje niedobór atomów tlenu [92]. Wodorowanie włókna powoduje zwiększenie tłumienności światłowodu podobnie jak ma to miejsce

podczas domieszkowania cząsteczkami germanu oraz pierwiastkami kompensującymi zmiany współczynnika załamania materiału. Ma to miejsce z uwagi na występowanie zwiększonej ilości grup OH w szkle, które powodują wzrost tłumienności na długości fali 950 nm, 1250 nm oraz 1390 nm. Szczególnie istotne są straty transmisyjne o wartości kilku decybeli pojawiające się po procesie naświetlania światłowodu promieniowaniem UV na długości 1,39  $\mu\text{m}$ , ponieważ tłumienie to może negatywnie wpływać na transmisję fal światła o długościach w II oraz III oknie transmisyjnym [93]. Najczęściej stosowaną techniką wodorowania jest umieszczenie standardowego włókna światłowodowego w wodorze pod wysokim ciśnieniem sięgającym 300 bar. Niekiedy stosowane jest również podnoszenie temperatury otoczenia światłowodu, co skraca czas potrzebny do skutecznej dyfuzji jonów wodoru. Pożądane jest jednak ograniczenie temperatury do ok. 100°C. Przekroczenie tego poziomu może skutkować zwiększeniem stratności włókna powodowanym reakcjami wodoru [94].

#### **4.2. Metody wytwarzania światłowodowych siatek Bragga**

Światłowodowe skośne siatki Bragga mogą być zapisywane w rdzeniu światłowodu jednomodowego przy użyciu podobnych narzędzi i technik jak w przypadku siatek konwencjonalnych. Do wytworzenia pierwszej światłowodowej siatki Bragga wykorzystano metodę zapisu wewnętrznego. Do światłowodu wprowadzono wiązkę światła o długości fali 488 nm. Dzięki obciętym końcom światłowodu, które działały jako zwierciadła odbijające na zasadzie zjawiska Fresnela uzyskano rezonator Fabry'ego–Perota. Dzięki wykorzystaniu włókna fotoczułego po uzyskaniu interferencji światła zapisana została okresowa zmiana o podwyższonym współczynniku załamania. Metoda ta pozwala na zapis wyłącznie siatek Bragga o centralnej długości fal równej długości fali światła emitowanego przez źródło laserowe. Rysunek 4.1. przedstawia schemat układu wykorzystanego do zapisu wewnętrznego siatki. Szybki rozwój technologii związanych z tworzeniem periodycznych modulacji współczynnika załamania w światłowodzie doprowadził do opracowania szeregu metod zapisu zewnętrznego, to znaczy takich, w których światło oddziaływujące na wewnętrzną strukturę rdzenia włókna dostarczane jest do światłowodu – przez płaszczyznę.

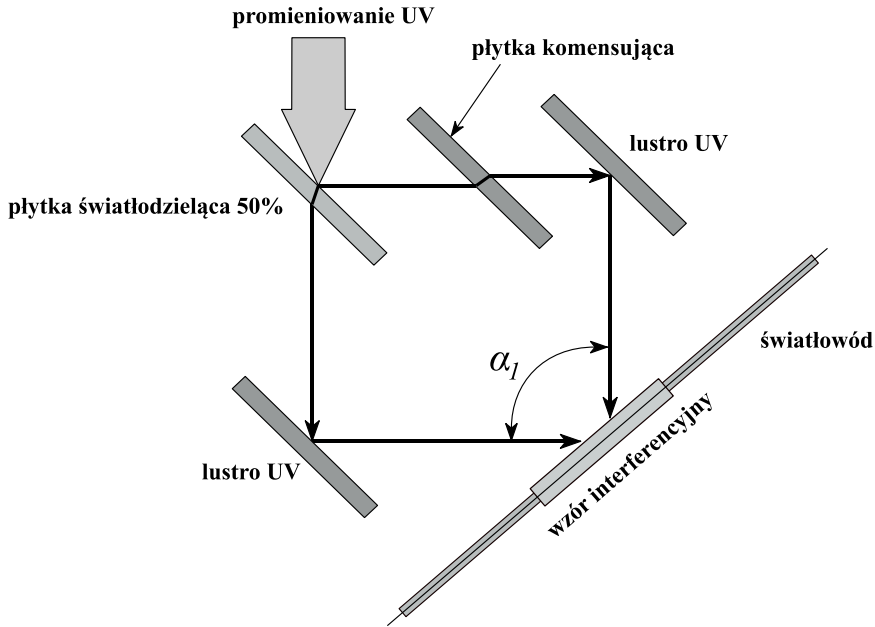


Rys. 4.1. Schemat układu wykorzystanego do zapisu wewnętrznego siatki Bragga metodą Hilla [95]

Stosowanie metod zapisu zewnętrznego umożliwia kształtowanie parametrów technologicznych takich jak głębokość modulacji współczynnika załamania w obrębie siatki czy stała siatki co pozwala na zmiany długości fali Bragga w dużym zakresie. Siatki Bragga o centralnej długości fali innej niż długość fali światła źródła zapisującego, wytwarzane są za pomocą technik, które podzielić można na dwie grupy: metody holograficzne oraz metody nieinterferometryczne, bazujące na ekspozycji periodycznych odcinków włókna na światło UV. Pierwsze ze wspomnianych metod polegają na rozszczepieniu pojedynczej wiązki światła zapisującego na dwie wiązki, kierowane różnymi drogami na włókno, gdzie tworzą one obraz interferencyjny. Drugi rodzaj metod polega na naświetlaniu okresowo oddalonych od siebie fragmentów włókna pulsacyjnym źródłem światła, którego wiązka przechodzi przez przestrzenną okresową maskę fazową.

#### 4.2.1. Metody interferometru objętościowego

Metoda zapisu światłowodowych siatek Bragga polegająca na naświetlaniu włókna optycznego przez płaszcz została zaprezentowana w pracy [96] i schematycznie przedstawiona na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Schemat układu interferometru UV wykorzystywanego do zapisu siatek Bragga we włóknach światłowodowych [97]

Interferometr zaprezentowany w pracy [97] dzieli jednorodną wiązkę światła na dwie, prowadzone różnymi drogami o tej samej długości. Po odbiciu od lusterek UV wiązki te są kierowane na światłowód a kąt pomiędzy nimi oznaczony jest jako  $\alpha_1$ . Metoda ta pozwala na wybór długości fali Bragga zapisywanej struktury niezależnie od długości fali promieniowania źródła UV, zgodnie ze wzorem:

$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \lambda_{uv}}{n_{uv} \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}, \quad (4.2)$$

gdzie  $\lambda_B$  reprezentuje długość fali Bragga,  $n_{eff}$  jest efektywnym współczynnikiem załamania modu podstawowego propagującego w rdzeniu,  $n_{uv}$  jest współczynnikiem załamania światła szkła dla długości promieniowania zapisującego, a  $\lambda_{uv}$  jest jego długością fali oraz  $\alpha_1$  jest kątem zawartym pomiędzy wiązkami kierowanymi przez lustra.

Zakładając, że kąt  $\alpha$  może zmieniać się w zakresie od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ , teoretycznie długość fali Bragga uzyskanej tą metodą struktury może wynosić od wartości bliskiej długości promieniowania UV do nieskończoności. Światłowód umieszczony jest na przecięciu uformowanych wiązek promieniowania. Metoda z zastosowaniem interferometru najlepiej sprawdza się przy



zapisie siatek o niewielkiej długości za pomocą pojedynczego impulsu. Niezwykle istotne jest dokładne montowanie elementów optycznych w układach mechanicznych zapewniających dużą precyzję oraz kontrolę pozycji. Objętościowa konfiguracja interferometru z elementami optycznymi umieszczonymi w pewnych odległościach od siebie sprawia, że wibracje pojawiające się podczas zapisu czy ruch powietrza pomiędzy elementami mogą powodować zmiany interferogramu w czasie, np. dryf prążków, wpływając na jakość procesu [98]. Przy zastosowaniu źródeł promieniowania o niskiej koherencji, różnica długości pomiędzy dwiema interferującymi wiązkami musi być kompensowana. Rozwiązaniem może być zastosowanie kompensatora w jednym z ramion interferometru dla skompensowania nierównowagi długości dróg optycznych powodowanej przez płytkę światłodzielącą, rozdzielającą pierwotną wiązkę.

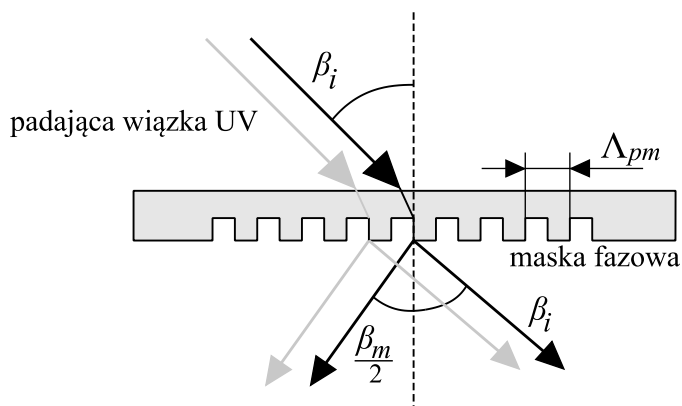
#### 4.2.2. Metoda maski fazowej

Zastosowanie maski fazowej zamiast układu interferometru stanowiło istotny krok w rozwoju technologii wytwarzania światłowodowych siatek Bragga. Metoda ta szybko zyskała na popularności z uwagi na fakt, iż do uzyskania interferencji promieniowania ultrafioletowego wykorzystywany jest pojedynczy element optyczny. W chwili obecnej jest ona najbardziej rozpowszechnioną metodą, zapewniając najwyższą powtarzalność oraz szybkość wytwarzania siatek. Układ z maską fazową pozbawiony jest długich odcinków drogi optycznej wiązki promieniowania, co eliminuje wpływ fluktuacji powietrza. W metodzie tej jako element dyfrakcyjny wykorzystuje się płytkę szklaną, w której wytworzony został szereg równoległych zagłębień. Maski fazowe najczęściej wykonywane są przez trawienie w procesie fotolitografii [99]. Najistotniejszymi elementami maski fazowej są podłużne wpusty wytrawione w materiale przezroczystym dla promieniowania UV, których głębokość oraz szerokość są precyzyjnie kontrolowane. Zasada działania opiera się na dyfrakcji padającej wiązki UV na promienie kilku rzędów,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , gdzie  $m$  oznacza rząd dyfrakcji. Wiązka padająca oraz wiązka ugięta spełniają równanie ugięcia dla okresu maski fazowej wynoszącego  $\Lambda_{pm}$ :

$$\Lambda_{pm} = \frac{m\lambda_{uv}}{\left(\sin \frac{\beta_m}{2} - \sin \beta_i\right)}, \quad (4.3)$$

gdzie  $\beta_m/2$  jest kątem pod jakim pada promień ugięty,  $\lambda_{uv}$  jest długością fali promieniowania UV,  $\beta_i$  reprezentuje kąt padania wiązki lasera UV na powierzchnię maski fazowej. W przypadku, gdy okres maski zawiera się w przedziale od  $\lambda_{uv}$  do  $\lambda_{uv}/2$ , występuje ugięcie promienia padającego na maskę

jedynie do pierwszego rzędu ( $m = \pm 1$ ) przy czym reszta promieniowania pozostaje w wiązce transmitowanej. Mamy w takim przypadku do czynienia z promieniem zerowego rzędu [66,91]. Jeżeli występuje pewien niezerowy kąt pomiędzy kierunkiem padania wiązki promieniowania oraz normalną do powierzchni maski fazowej, interferencji ulegają promień ugięcia pierwszego rzędu oraz promień zerowego rzędu, co schematycznie przedstawione zostało na rysunku 4.3.



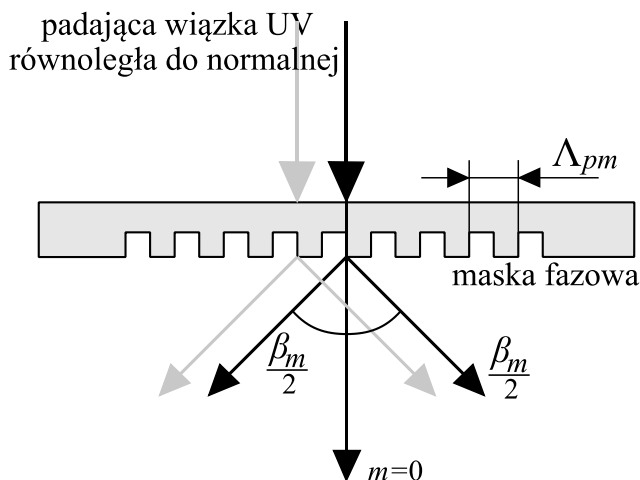
Rys 4.3. Droga promieni ugiętego pierwszego rzędu oraz transmitowanego przez maskę rzędu zerowego dla wiązki padającej pod kątem  $\beta_i$  w stosunku do powierzchni maski fazowej

Do prowadzenia skutecznego procesu zapisu siatek Bragga w powyższym układzie (Rys. 4.3.) intensywności promieni rzędu  $m = 0$  oraz  $m = -1$  nie muszą być równe. Jednakże dla uzyskania najwyższej jakości obrazu interferencyjnego, wielkości te powinny być takie same, dzięki czemu zwiększa się efektywność procesu. Okres zapisywanej siatki Bragga zależy od kąta padania wiązki UV na powierzchnię maski fazowej.

Dla światłowodowych siatek Bragga zapisywanych na długości fal odpowiadających trzeciemu oknu transmisyjnemu, przy założeniu efektywnego współczynnika załamania włókna na poziomie 1,46, okres maski fazowej wynosi około 1000 nm co stanowi wartość większą niż długość fali promieniowania UV zapisującego siatkę. Skutkuje to dodatkową dyfrakcją wiązki do promieni o rzędach wyższych od  $\pm 1$ . W celu kontrolowania zjawiska dyfrakcji oraz wytłumienia promieni niepożądanych rzędów stosowane jest pokrycie ścian wytrawionych rowków cienką warstwą metaliczną tworząc lustra. W przypadku promieniowania źródła padającego pod pewnym kątem do maski fazowej, możliwe jest wyrównywanie intensywności promienia rzędu  $-1$  oraz promienia transmitowanego rzędu 0. Efekt ten uzyskuje się przez napylenie

metal na maskę fazową pod pewnym kątem, zapewniającym osadzenie cząsteczek jedynie na wybranych ścianach substratu [100].

W przypadku, gdy wiązka promieniowania pada na maskę równoległa do normalnej do powierzchni ( $\beta_i = 0$ ), wiązka jest dzielona na dwa promienie rzędu pierwszego oraz minus pierwszego ( $m = 0 \pm 1$ ), co schematycznie pokazane zostało na rysunku 4.4.



Rys.4.4. Drogi promieni ugiętego pierwszego rzędu oraz transmitowanego przez maskę rzędu zerowego dla wiązki padającej prostopadle do powierzchni maski

W tym przypadku interferencja zachodzi pomiędzy promieniami a okres zapisywanej struktury Bragga  $\Lambda_B$  powiązany z kątem ugięcia promieni  $\beta m/2$  określony jest za pomocą wyrażenia:

$$\Lambda_g = \frac{\lambda_{uv}}{2 \sin\left(\frac{\beta_m}{2}\right)} = \frac{\Lambda_{pm}}{2}. \quad (4.4)$$

Okres  $\Lambda_{pm}$  struktury tworzącej maskę fazową jest determinowany przez oczekiwaną długość fali Bragga zapisywanej siatki i może być wyrażony jako:

$$\Lambda_g = \frac{\lambda_B}{2n_{eff}} = \frac{\Lambda_{pm}}{2}. \quad (4.5)$$

W przypadku stosowania układu, w którym wiązka promieniowania UV kierowana jest na maskę fazową prostopadle do jej powierzchni, istotnym zagadnieniem jest ograniczenie intensywności promienia zerowego rzędu, transmitowanego przez maskę. Głębokość wytrawionych zagłębień  $d$  jest

uzależniona od długości fali promieniowania UV, natomiast dystans pomiędzy nimi dobierany jest do długości fali siatki Bragga, która ma zostać zapisana we włóknie światłowodowym oraz efektywnego współczynnika załamania modu podstawowego.

W celu minimalizowania intensywności promienia zerowego rzędu, najmniejsza głębokość wytrawionych zagłębień  $d$  maski wykonanej w płycie szkła krzemionkowego, powinna wynosić:

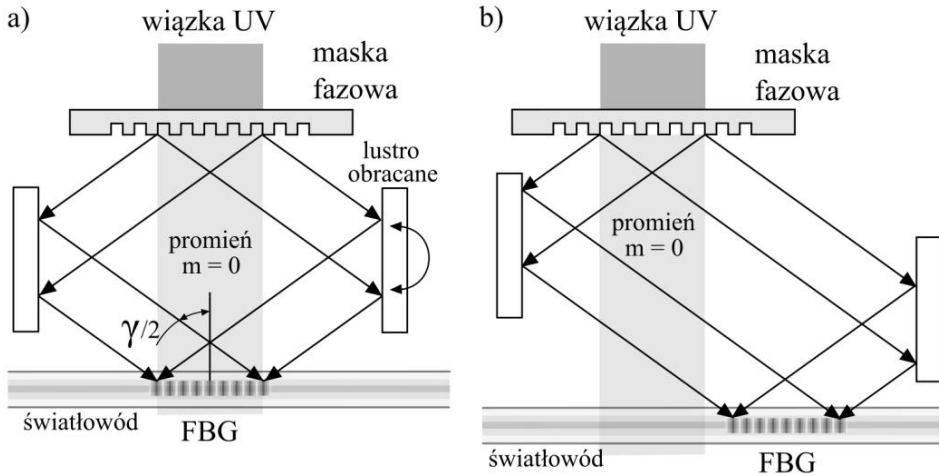
$$d(n_{uv} - 1) = \frac{\lambda_{uv}}{2}. \quad (4.6)$$

W powyższym równaniu zakłada się, że promieniowanie źródła zapisującego jest monochromatyczne, jednak w praktyce przy promieniowaniu nie spełniającym tego warunku, promień rzędu zerowego ( $m = 0$ ) nie może zostać wyeliminowany. Odpowiednio dobrane parametry technologiczne maski pozwalają redukować intensywność promienia transmitowanego przez maskę do wartości rzędu kilku procent.

#### 4.2.3. Metoda interferometru z użyciem maski fazowej

Maska fazowa jako element dyfrakcyjny może być używana w różnych układach do zapisu struktur periodycznych we włóknach światłowodowych. Oprócz podstawowej konfiguracji opisanej w poprzednim rozdziale, może być stosowana jako dzielnik wiązki UV na promienie ulegające interferencji przestrzennej, w którym umieszcza się włókno. Metoda ta w istocie stanowi połączenie metody maski fazowej oraz metody holograficznej, dzięki czemu łączy zalety obu konfiguracji. Podobnie jak metoda holograficzna, zapewnia ona możliwość dostrajania długości fali w szerokim zakresie. Jednocześnie umożliwia ograniczenie długości dróg optycznych rozdzielonych promieni światła, które ulegają interferencji, dzięki czemu zwiększa się stabilność mechaniczna układu oraz ograniczony zostaje wpływ ruchu cząsteczek powietrza na drodze promieni. Zaletą stosowania maski fazowej zamiast płytki światłodzielącej w takim interferometrze jest fakt, iż okres maski determinuje stałą tworzonej siatki. W układzie tym wiązka UV pada na maskę prostopadle do jej powierzchni. Jeżeli lustra odbijające promienie ustawione zostaną równoległe do kierunku propagacji promieniowania, wówczas stała wytworzonej struktury periodycznej będzie zależna jedynie od kąta ugięcia promieni, przez co będzie identyczna jak w przypadku zastosowania metody maski fazowej. Schemat takiego układu pokazany został na rysunku 4.5.a. Zastosowanie maski fazowej w układzie wykorzystującym interferometr umożliwia dodatkowo wyeliminowanie

wanie wpływu promienia zerowego rzędu, transmitowanego przez element dyfrakcyjny. Na rysunku 4.5.b. przedstawiony został schemat układu, w którym dzięki zmianie pozycji lustra odbijającego jeden z promieni pierwszego rzędu, przesunięciu ulega obszar interferencji. Odpowiedni dobór odległości pomiędzy elementami optycznymi umożliwia odsunięcie obszaru, w którym interferują wiązki poza obszar promienia rzędu zerowego.



Rys. 4.5. Schemat metody interferometrycznej z użyciem maski fazowej, b) metoda ograniczająca wpływ promienia rzędu zerowego

Sposobem przestrajania długości fali Bragga tworzonej we włóknie światłowodowym siatki jest wprowadzenie zmiany kąta  $\gamma$ , pod którym krzyżują się promienie rozdzielone przez maskę fazową poprzez obrót jednego z luster. Zmiana kąta  $\gamma$  pomiędzy promieniami, powoduje zmianę centralnej długości fali  $\lambda_B$  zgodnie z poniższym wyrażeniem:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B^r} = -\frac{\Delta\gamma}{2} \cdot \cot \frac{\gamma}{2}, \quad (4.7)$$

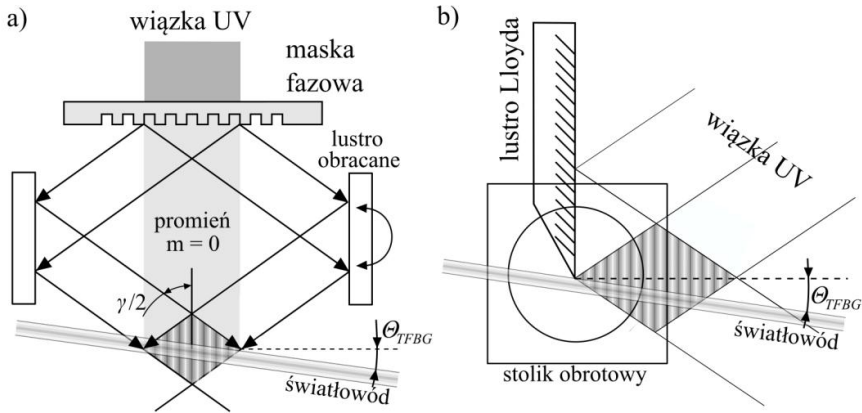
gdzie  $\Delta\lambda$  oznacza zmianę długości fali Bragga w stosunku do długości odniesienia  $\Delta\lambda_B^r$  osiąganą dla ustawienia luster prostopadle do kierunku propagacji wiązki.

Opisywana metoda zapewnia szeroki zakres przestrajania długości fali wytworzonej struktury. Przy kącie dyfrakcji wynoszącym  $10^\circ$ , dla maski fazowej o okresie dostosowanym do zapisu siatek o długości fali zbliżonej do  $1550 \text{ nm}$ , zmiana kąta krzyżowania promieni o  $5^\circ$  powoduje przesunięcie długości fali Bragga o około  $800 \text{ nm}$  [101].

Stan polaryzacji promieniowania wiązki lasera UV w istotny sposób wpływa na proces zapisu siatki. Aby zapewnić niską wrażliwość zapisywanej struktury periodycznej na polaryzację promieniowania, płaszczyzna polaryzacji światła wiązki UV powinna być zorientowana równoległe do osi podłużnej światłowodu [102]. Kontrola stanu polaryzacji wiązki może być realizowana przez umieszczenie półfalówki w polu promieniowania. Metody wykorzystujące maskę fazową mogą być stosowane zarówno do wytwarzania siatek o stałym okresie jak i siatek chirpowych. Efekt zmiany okresu wzdłuż zapisywanej struktury może być osiągnięty przez stosowanie chirpowych masek fazowych [103]. Siatki chipowe mogą być również zapisywane z użyciem jednorodnej maski fazowej przy zastosowaniu modyfikacji bazowej metody, polegających np. na przesuwaniu maski [104], umieszczeniu włókna pod pewnym kątem w stosunku do powierzchni maski [105] lub stosując przewężane struktury światłowodowe [106].

#### **4.3. Wytwarzanie skośnych światłowodowych siatek Bragga**

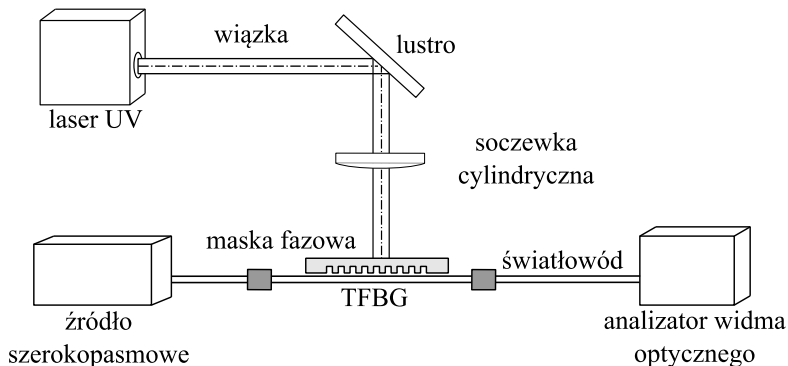
Światłowodowe skośne siatki Bragga w większości przypadków zapisywane są w podobnych układach jak w przypadku siatek konwencjonalnych. W tym przypadku również możliwe jest zestawienie szeregu różnych typów stanowisk wykorzystujących układy interferometrów przestrzennych, interferometrów wykorzystujących maski fazowe jako elementy dzielące promień UV oraz korzystając bezpośrednio z metody maski fazowej. Wytworzenie siatki skośnej wymaga ustawienia światłowodu pod pewnym niezerowym kątem w stosunku do prążków wzoru interferencyjnego. Wymagane jest, by obszar interferencji promieni miał odpowiednio dużą powierzchnię. Na rysunku 4.6. przedstawiono dwie metody zapisu siatek skośnych wykorzystujące układy interferometrów przestrzennych. Widoczny w części a) schemat jest podobny do układu wykorzystującego maskę fazową do dzielenia wiązki UV przedstawionego na rysunku 4.5. Dodatkowo symbolicznie wskazany został obszar interferencji wiązek.



Rys. 4.6. Schematy układów wykorzystujących metody interferometryczne do zapisu skośnych periodycznych struktur światłowodowych: a) wykorzystujący maskę fazową; b) wykorzystujący lustro Lloyd'a

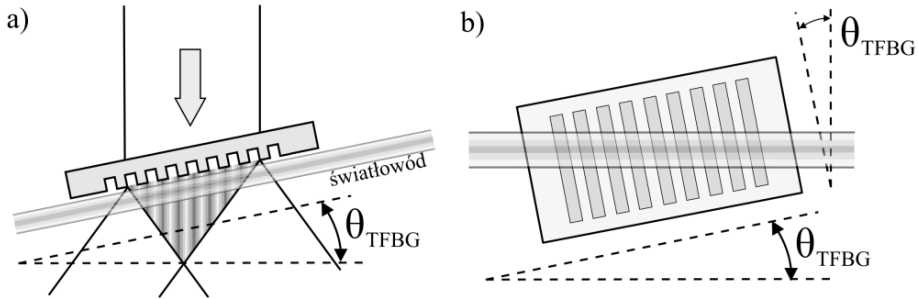
Rysunek 4.6.b przedstawia metodę interferencyjną wykorzystującą lustro Lloyd'a do odbijania wiązki promieniowania UV. W metodzie tej promień źródła nie jest dzielony na promienie, a interferencja następuje w obszarze krzyżowania się wiązki źródła oraz części wiązki odbitej od lustra [107]. Umieszczenie światłowodu na stoliku obrotowym pozwala na regulację kąta nachylenia wewnętrznej struktury siatki.

Z uwagi na szereg zalet stosowania metody maski fazowej do zapisu periodycznych struktur światłowodowych, stała się ona podstawowym sposobem wytwarzania siatek Bragga, w tym skośnych. Podstawowym źródłem promieniowania UV niezbędnego do prowadzenia procesu tworzenia periodycznych zmian współczynnika załamania jest laser ekscymerowy. Schemat typowego układu zapisu wykorzystującego metodę maski fazowej przedstawiono na rysunku 4.7. [20].



Rys. 4.7. Schemat drogi promieni ugiętego pierwszego rzędu oraz transmitowanego przez maskę rzędu zerowego [20]

Podczas zapisu struktur o pochylonych płaszczyznach wewnętrznych zmian współczynnika załamania, elementy optyczne układu spełniają te same funkcje jak w przypadku siatek konwencjonalnych. Na rysunku 4.8. przedstawione zostały dwa przypadki ustawienia światłowodu w bezpośredniej bliskości maski fazowej w sposób umożliwiający tworzenie struktur skośnych.



Rys. 4.8. Dwie metody zastosowania metody maski fazowej w zapisie skośnych siatek Bragga

Układ przedstawiony na rysunku 4.8.a zakłada utrzymywanie światłowodu równolegle do maski fazowej, pod kątem  $\theta_{TFBG}$  w stosunku do normalnej do kierunku propagacji wiązki UV. Metoda przedstawiona na rysunku 4.8.b polega na utrzymywaniu powierzchni maski fazowej prostopadle do kierunku propagacji promieniowania zapisującego. Światłowód mocowany jest równolegle do powierzchni maski fazowej oraz profilu skupionej przez soczewkę cylindryczną wiązki UV. Jednocześnie obrót maski fazowej wokół środka obrotu wyznaczonego przez oś symetrii wiązki o kąt  $\theta_{TFBG}$  powoduje, że wzór interferencyjny ugiętych promieni  $\pm 1$  rzędu powstaje pod tym kątem w stosunku do płaszczyzny przekroju poprzecznego światłowodu.

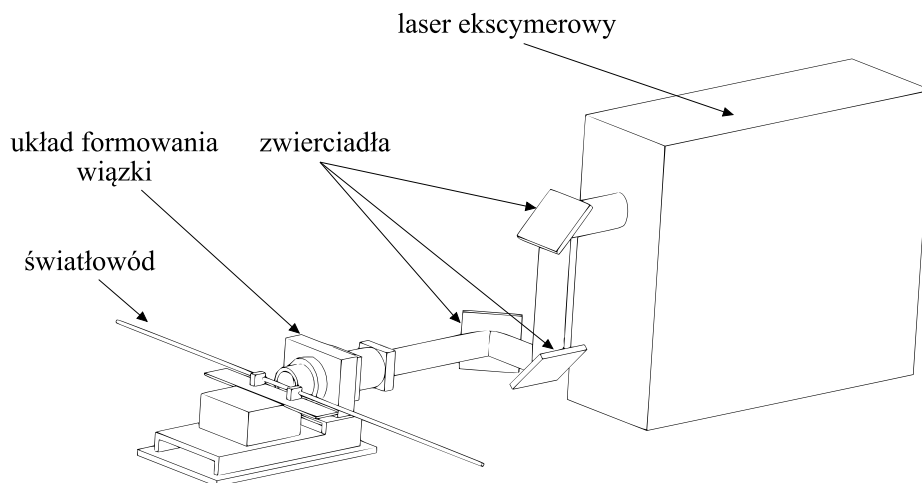
#### 4.3.1. Opis stanowiska do wytwarzania skośnych struktur periodycznych w rdzeniu światłowodu

Na potrzeby opisywanej pracy, wykonany został szereg modyfikacji istniejącego w Laboratorium Optoelektroniki i Technik Laserowych Politechniki Lubelskiej układu zapisu periodycznych struktur światłowodowych. System ten wykorzystuje metodę maski fazowej, w której włókno poddane procesowi naświetlania promieniowaniem UV utrzymywane jest w bliskiej odległości od powierzchni dyfrakcyjnej. Modyfikacje polegały na wzbogaceniu możliwości systemu o wytwarzanie skośnych siatek Bragga o precyzyjnie zadawanym kącie nachylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych w rdzeniu włókna. Dodatkowe elementy mechaniczne zostały zaprojektowane oraz wykonane w sposób umożliwiający



zastosowanie metody wytwarzania siatek skośnych przedstawionej na rysunku 4.8. (patrz na s. 56), tj. poprzez obrót maski fazowej wokół osi centralnej wiązki UV przy jednoczesnym utrzymywaniu włókna światłowodowego równoległe do osi podłużnej przekroju poprzecznego wiązki. W tym celu zastosowano specjalizowane rozwiązania mechaniczne wykorzystujące układy mikroprocesorowe do sterowania układu kąтового. Dodatkowo modyfikacji poddane zostały uchwyty mocowania włókien światłowodowych podczas naświetlania promieniami UV. Umożliwiają one dodatkowo indukowanie wstępnego skrętu włókna światłowodowego.

Istniejący w Laboratorium Optoelektroniki i Techniki Laserowej Politechniki Lubelskiej układ do wytwarzania konwencjonalnych periodycznych struktur światłowodowych został schematycznie pokazany na rysunku 4.9. System ten można podzielić na trzy główne bloki: źródło promieniowania UV, układ przeniesienia oraz formowania wiązki oraz optomechaniczny układ mocowania maski fazowej i pozycjonowania światłowodu.



Rys. 4.9. Układ zapisu periodycznych struktur światłowodowych w Laboratorium Optoelektroniki i Techniki Laserowej

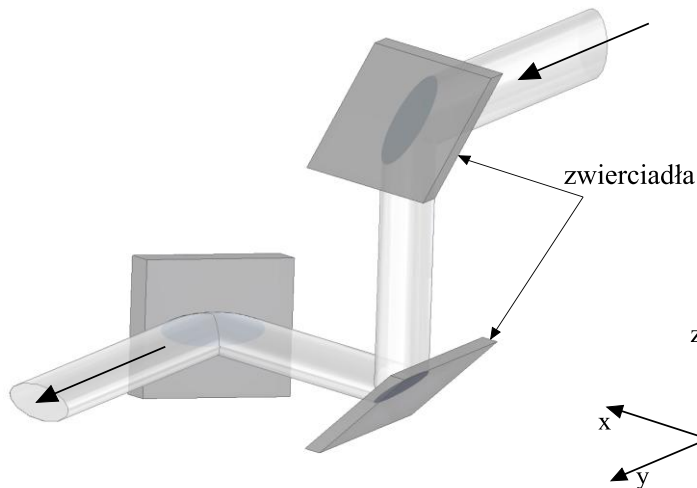
Podstawowym komponentem wykorzystywanym w stanowisku opracowanym do wytwarzania periodycznych struktur światłowodowych jest źródło światła w postaci lasera ekscymerowego produkowanego przez firmę Coherent. Urządzenie to zostało wyposażone przez producenta w komponenty zapewniające parametry optyczne wiązki umożliwiające jego zastosowania w zapisie siatek Bragga. Parametry techniczne lasera zestawiono w tabeli 4.1. przedstawionej na następnej stronie.

Tab. 4.1. Zestawienie podstawowych danych technicznych lasera ekscymerowego wykorzystywanego do zapisu skośnych siatek Bragga

<b>Coherent Bragg Star M</b>	
Energia impulsu [mJ]	140
Długość fali emitowanego promieniowania [nm]	248
Maksymalna częstotliwość [Hz]	100
Średnia moc [W]	12
Długość impulsu [ns]	20
Wymiary wiązki (pion. x poz.) 4 [mm]	12,5 x
Rozbieżność wiązki (pion. x poz.) [mrad <sup>2</sup> ]	≤ 0,3 x 0,2
Koherencja przestrzenna [μm]	800
Masa [kg]	275

Lasery wyposażony został w system umożliwiający podłączenie zewnętrznego obiegu wody w celu chłodzenia urządzenia. Zapewnia to dodatkową poprawę stabilności parametrów wyjściowych wiązki emitowanego promieniowania. Atutami wykorzystanego źródła laserowego są ponadto wysoka moc optyczna w połączeniu z dużą stabilnością wiązki oraz możliwością długotrwałej pracy.

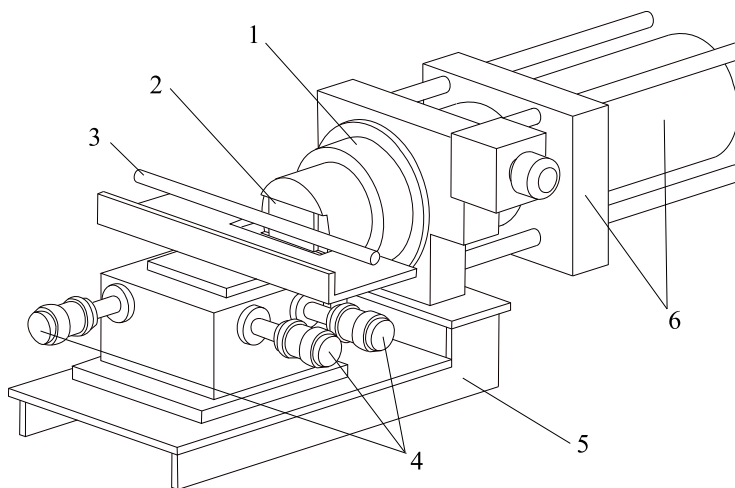
Przekrój poprzeczny wiązki promieniowania emitowanej przez laser posiada kształt zbliżony do elipsy z osią podłużną ustawioną prostopadle do powierzchni blatu roboczego. Podstawowymi elementami układu przeniesienia wiązki są zwierciadła dielektryczne ustawione w uchwytach mechanicznych umożliwiających regulację ich ustawienia. Odpowiednie ustawienie elementów optycznych biorących udział w prowadzeniu promienia lasera zapewnia po trzech odbiciach od zwierciadeł propagację wiązki równoległą do powierzchni roboczej stołu optycznego wraz z ustawieniem osi podłużnej przekroju poprzecznego wiązki poziomo, równoległą do powierzchni roboczej stołu optycznego. Na rysunku 4.10. schematycznie przedstawiono sposób odbijania wiązki w sposób pozwalający na obrócenie osi podłużnej jej przekroju poprzecznego o 90 stopni.



Rys. 4.10. Schemat drogi promienia wiązki UV wychodzącej z lasera ekscymerowego, umożliwiającego obrót osi podłużnej przekroju poprzecznego wiązki

Z uwagi na fakt, iż laser ekscymerowy wykorzystany do budowy stanowiska posiada wyjście wiązki promieniowania umieszczone w odległości równej 378 mm ponad powierzchnią blatu stołu optycznego, układ schematycznie przedstawiony na rysunku 4.10. spełnia również funkcję sprowadzenia wiązki promieniowania na mniejszą wysokość. Zabieg ten pozwala na zmniejszenie stopnia skomplikowania budowy układu optomechanicznego formującego wiązkę oraz mocowania maski fazowej. Dodatkowo układ charakteryzuje się zmniejszoną masą oraz większą odpornością na uszkodzenia mechaniczne oraz drgania. Ponadto ergonomia stanowiska została poprawiona z uwagi na fakt, iż uchwyt montażu maski fazowej oraz światłowodu został sprowadzony do wysokości pozwalającej na wygodny dostęp.

Na potrzeby realizacji niniejszej pracy istniejący system zapisu periodycznych struktur światłowodowych został doposażony w specjalizowany układ pozwalający na precyzyjny obrót maski fazowej wokół centralnej osi wiązki promieniowania UV. Kontrola kąta obrotu układu optomechanicznego realizowana jest dzięki zastosowaniu stolika obrotowego firmy Thorlabs model NR360S, zapewniającego dokładność ustawienia kąta do 5 minut kątowych z rozdzielczością poniżej 1 sekundy kątowej. Deklarowane dokładności sterowania kątem obrotu osiągnęte są jedynie przy zastosowaniu dedykowanego sterownika Thorlabs BSC201.



Rys. 4.11. Schemat układu optomechanicznego formującego wiązkę UV, mocującego maskę fazową oraz pozycjonującego włókno światłowodowe

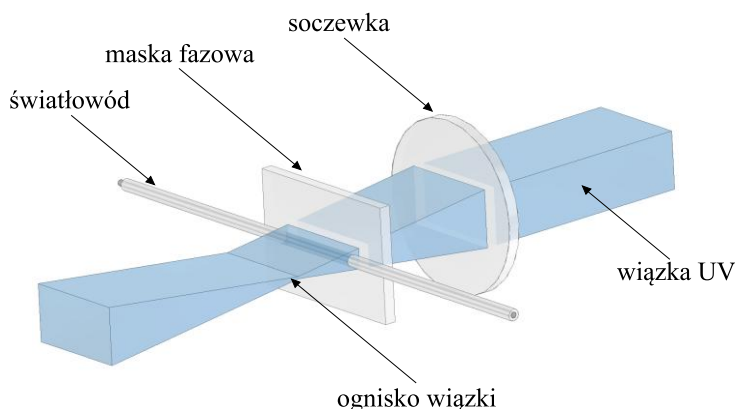
Na rysunku 4.11. schematycznie przedstawiony został widok układu optomechanicznego pozycjonującego światłowód oraz maskę fazową względem wiązki zapisującego promieniowania UV, na którym umieszczono:

- 1) uchwyt mocujący płytkę z maską fazową umieszczony w stoliku obrotowym,
- 2) płytkę krzemową z maską fazową,
- 3) uproszczony widok stolika trzyosiowego XYZ z mocowaniami włókna światłowodowego,
- 4) śruby mikrometryczne stolika trzyosiowego pozycjonującego światłowód względem maski fazowej,
- 5) konstrukcja wsporcza, na której mocowane są elementy mechaniczne oraz optomechaniczne układu,
- 6) elementy układu przeniesienia wiązki wraz z systemem posuwu soczewki cylindrycznej umieszczonej wewnątrz.

Zastosowanie elementów mechanicznych projektowanych oraz wykonywanych specjalnie do zastosowania w opisywanym układzie zapewnia jego stabilną pracę oraz powtarzalność parametrów widmowych zapisywanych struktur Bragga.

Oprócz transferu promienia lasera wzdłuż zaprojektowanej drogi optycznej, układ optyczny spełnia również funkcję skupienia wiązki równoległe do powierzchni roboczej przez zastosowanie dopasowanej soczewki cylindrycznej. Podstawowym zadaniem soczewki jest skupienie wiązki w jednej płaszczyźnie tak, by zwiększyć gęstość mocy optycznej w obszarze, w którym umieszczane jest włókno światłowodowe poddawane naświetlaniu. Na rysunku 4.12. przedstawiono w sposób schematyczny koncepcję użycia soczewki w metodzie

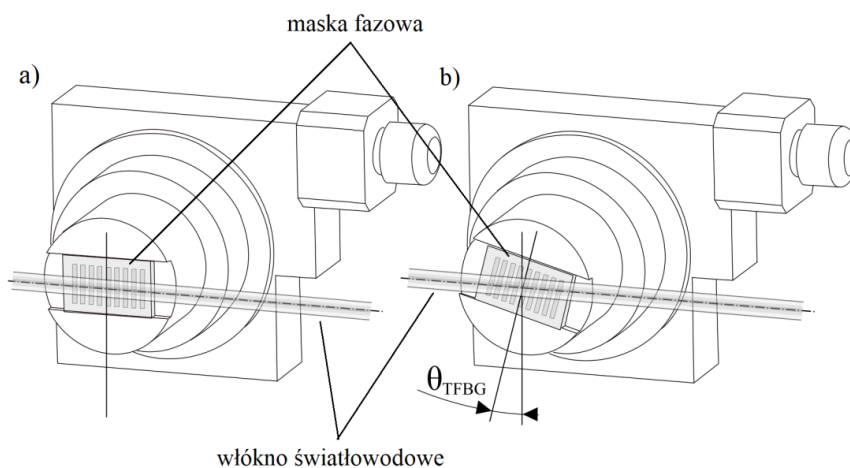
maski fazowej przy wytwarzaniu periodycznych struktur światłowodowych. Soczewka umieszczona została w układzie z posuwem umożliwiającym ruch soczewki wzdłuż wiązki UV równoległe do jej osi. Posuw ten jest szczególnie istotny z uwagi na zastosowane źródło promieniowania zapisującego, które przy długotrwałej pracy generuje impulsy o słabnącej energii. Przy wysokiej energii impulsów promieniowania generowanych przez laser ekscymerowy, umieszczenie światłowodu zbyt blisko ogniska skupianej wiązki może skutkować niszczeniem powierzchni włókna, co uniemożliwia prowadzenie prawidłowego procesu zapisu struktur periodycznych. W opisywanym układzie ognisko wiązki zostało ustawione przed maską fazową oraz światłowodem (zgodnie z rysunkiem 4.12.). Przy odpowiednio wysokiej energii impulsów laserowych, posuw soczewki powodujący zbliżanie ogniska wiązki do powierzchni włókna spowoduje w pierwszej kolejności uszkodzenie światłowodu. W efekcie, zmniejszone jest ryzyko uszkodzenia maski fazowej przy dostosowywaniu parametrów pracy układu blisko warunków niebezpiecznych dla elementów optycznych.



Rys. 4.12. Kształt wiązki UV skupionej przez soczewkę cylindryczną w obszarze maski fazowej oraz włókna światłowodowego

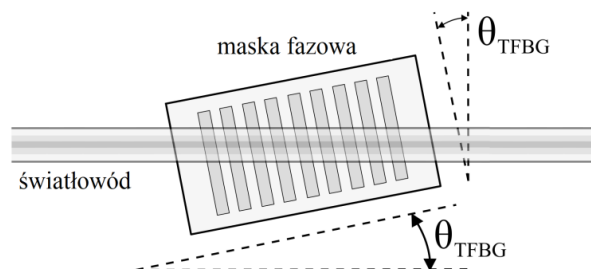
Z uwagi na fakt, iż w wykonanym układzie wykorzystywana jest metoda obrotu maski fazowej wokół geometrycznego środka przekroju poprzecznego wiązki lasera, szczególnie istotne jest utrzymywanie soczewki cylindrycznej oraz włókna światłowodowego równoległe do osi wielkiej elipsy tworzonej przez przekrój wiązki. Dodatkowo wykonany został układ mechaniczny umożliwiający dokonywanie posuwu soczewki wzdłuż wiązki, dzięki czemu możliwe jest dostosowanie odległości pomiędzy soczewką a maską dyfrakcyjną oraz włóknem światłowodowym. Zastosowanie precyzyjnie sterowanego stolika obrotowego wymusiło zaprojektowanie oraz wykonanie mechanicznej części

uchwyty mocowania maski fazowej dopasowanego do fabrycznych otworów montażowych. Element w kształcie cylindra mocujący maskę dyfrakcyjną został wykonany metodą obróbki skrawania z bloku aluminium. Wykonane zostały specjalne frezy pozwalające na wsunięcie płytki szklanej o wymiarach 20 x 30 mm, na której wytrawiona została maska. Następnie element ten został zamocowany w stoliku obrotowym z zachowaniem wspólnej osi obrotu dzięki czemu centralny punkt maski fazowej wytworzonej na środku płytki szklanej podczas obrotu pozostaje nieruchomy. Na rysunku 4.13. schematycznie pokazany został sposób zadawania kąta pochylenia struktury wewnętrznej wytwarzanej w układzie skośnej siatki Bragga.



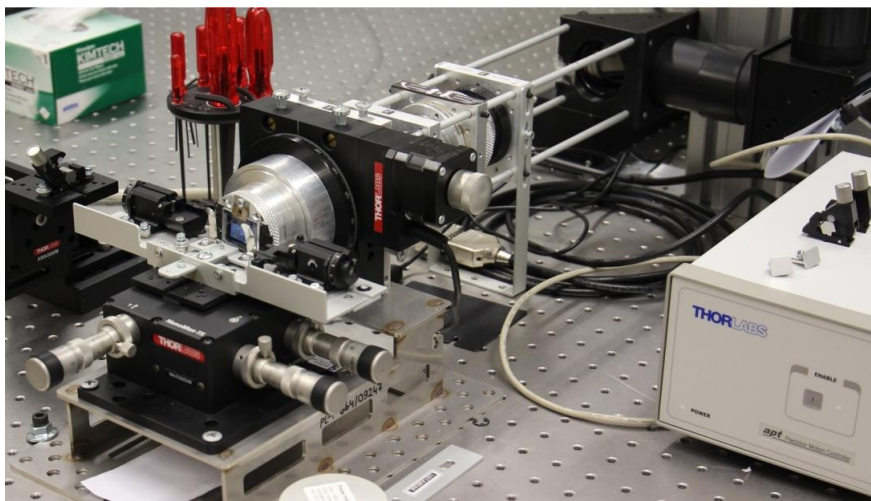
Rys. 4.13. Widok głowicy obrotowej wraz z zamocowaną maską fazową dla: a) siatek konwencjonalnych, b) siatek skośnych o kącie wewnętrznym  $\theta_{TFBG}$ .

Metoda wytwarzania siatek skośnych wykorzystywana w opracowanym na potrzeby realizacji pracy stanowisku zakłada utrzymywanie maski fazowej oraz włókna światłowodowego równoległe do płaszczyzny przekroju poprzecznego wiązki promieniowania UV, jednocześnie obracając maskę fazową wokół osi promienia wiązki.



Rys. 4.14. Widok maski fazowej obróconej o kąt  $\theta_{TFBG}$  w stosunku do osi światłowodu

Włókno światłowodowe utrzymywane jest nieruchomo, tak by oś podłużna światłowodu pokrywała się z osią wielką elipsy tworzonej przez przekrój poprzeczny wiązki. Widok maski fazowej obróconej o kąt  $\Theta_{TFBG}$  w stosunku do osi podłużnej światłowodu oraz wiązki skupionej za soczewką pokazany został na rysunku 4.14. Zdjęcie przedstawiające rzeczywisty system zapisu skośnych siatek Bragga w Laboratorium Optoelektroniki i Techniki Laserowej Politechniki Lubelskiej przedstawione zostało na rysunku 4.15. Poza elementami wyszczególnionymi na schematach pokazanych wcześniej, widoczne są również obrotowe uchwyty na światłowód, pozwalające na wywołanie wstępnego skrętu włókna optycznego.



Rys. 4.15. Zdjęcie układu optomechanicznego pozycjonującego maskę fazową oraz włókno światłowodowe względem wiązki promieniowania UV

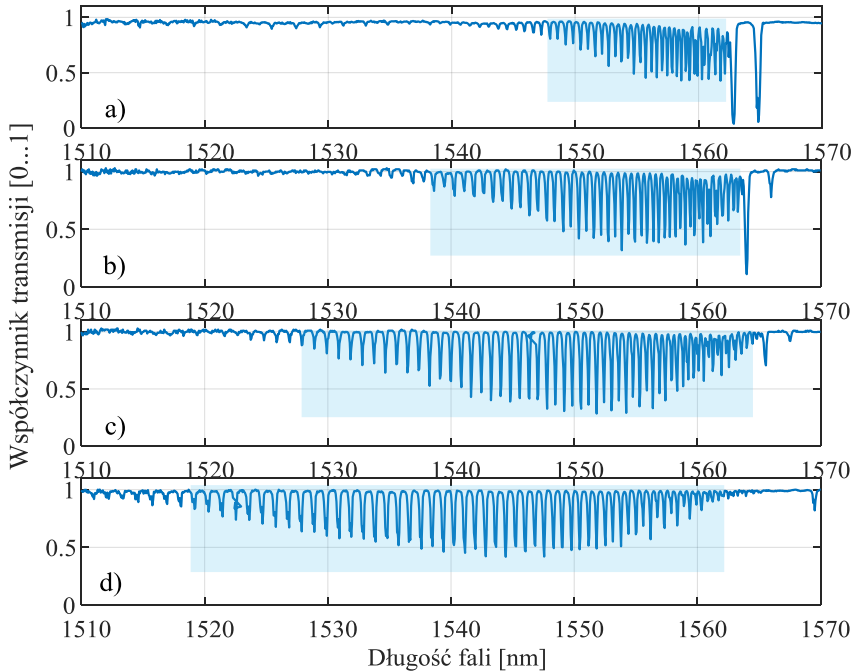
Oprócz ograniczania wpływu fluktuacji powietrza na drodze optycznej wiązki, istotne staje się wyeliminowanie wpływu drgań przenoszonych na system zapisu siatek Bragga z uwagi na fakt, iż okres wytwarzanych struktur periodycznych wynosi w większości zastosowań około 500 nm. Opracowany i zestawiony zespół układów mechanicznych oraz optycznych został zamontowany na stole optycznym THORLABS NEXUS o wymiarach blatu roboczego 120 x 250 cm, wyposażonym w poduszki powietrzne, których celem jest eliminacja drgań pochodzących od podłoża. Zastosowanie specjalizowanego stołu roboczego pozwala na poprawienie efektywności procesu zapisu struktur w rdzeniu światłowodu oraz wpływa na zwiększenie powtarzalności parametrów widmowych kolejnych zapisywanych siatek.

#### 4.4. Charakterystyki spektralne wytworzonych struktur periodycznych ukośnych

Stanowisko do zapisu periodycznych struktur światłowodowych o pochylonych płaszczyznach modulacji współczynnika załamania w ramach realizacji prac badawczych do niniejszej pracy posłużyło do wytworzenia szeregu siatek Bragga o różnych parametrach technologicznych. Przedstawiona w tym rozdziale analiza właściwości widmowych wytworzonych struktur obejmuje zmiany dwóch parametrów technologicznych: kąta pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania oraz głębokości modulacji współczynnika załamania światła. Profil apodyzacji wynikał wprost z rozkładu mocy w osi podłużnej wiązki i był zbliżony do krzywej Gaussa.

##### 4.4.1. Wpływ zmian kąta pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania

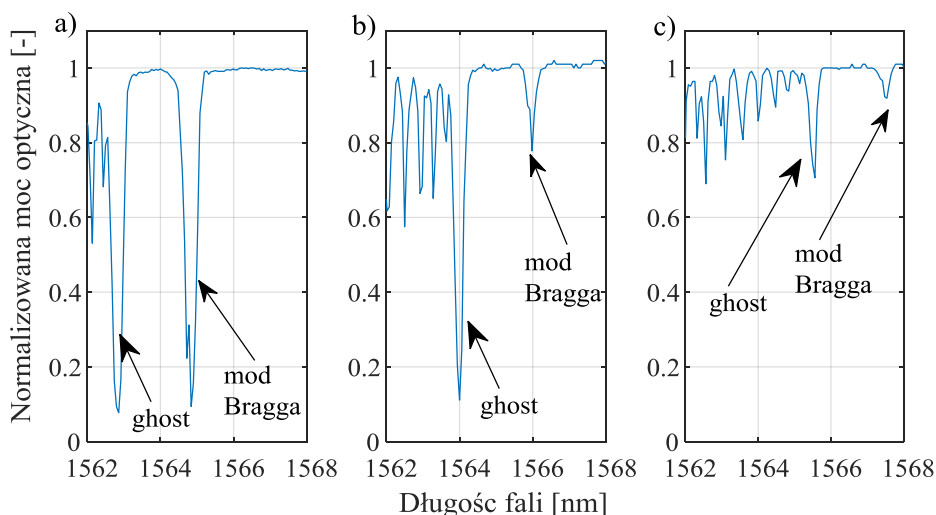
Najistotniejszym parametrem warunkującym właściwości spektralne siatek skośnych jest kąt  $\theta_{TFBG}$  zawarty pomiędzy płaszczyznami modulacji współczynnika załamania w rdzeniu a powierzchnią przekroju poprzecznego włókna.



Rys. 4.16. Widma transmisyjne periodycznych struktur światłowodowych o pochylonych płaszczyznach dyfrakcyjnych: a) 2°, b) 3°, c) 4°, d) 5°



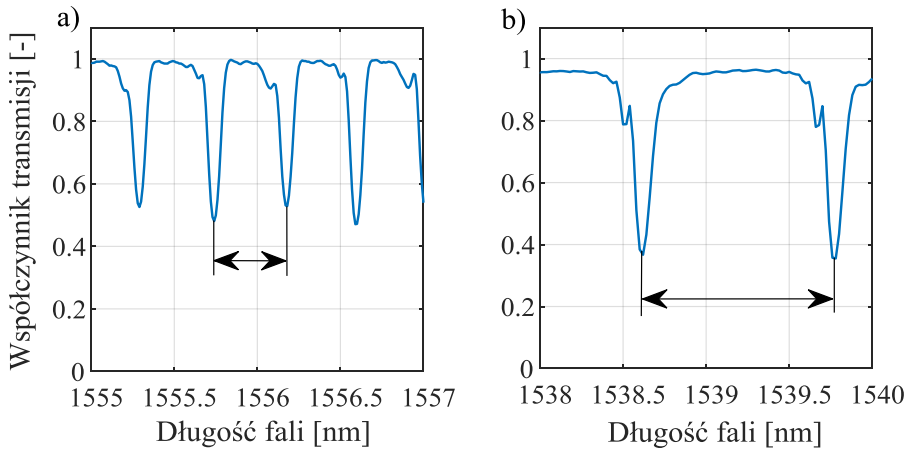
Rysunek 4.16. przedstawia widma transmisyjne siatek skośnych o różnych kątach pochylenia wewnętrznych stref podwyższonego współczynnika załamania. Kolorem niebieskim zaznaczono zakres widmowy występowania maksimum strat transmisyjnych pochodzących od modów płaszczowych. Wraz ze zwiększaniem kąta pochylenia 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 4.17.



Rys. 4.17. 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. W przypadku siatek o większych kątach pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych, mody płaszczowe niskich rzędów ulegają rozdzielaniu. Kolejnym charakterystycznym zjawiskiem towarzyszącym zwiększaniu kąta siatki skośnej jest powiększanie różnicy długości fal pomiędzy sąsiednimi minimami związanymi z kolejnymi rezonansami płaszczowymi. Na rysunku 4.18. zamieszczone zostały wybrane zakresy charakterystyk widmowych o szerokości spektralnej wynoszącej 2 nm pokazujące widma transmisyjne

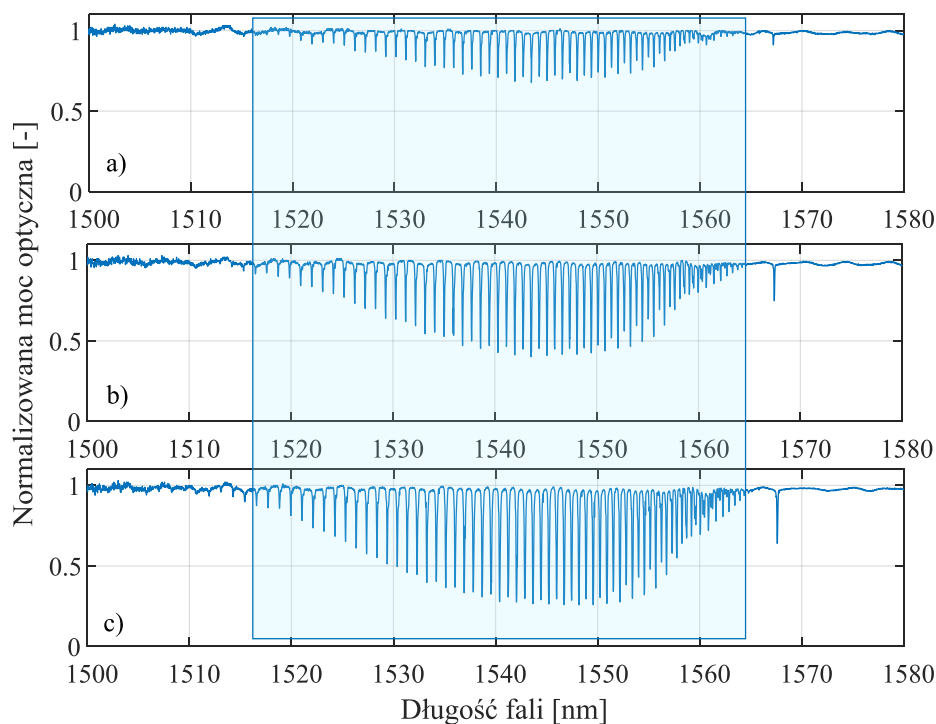
modów płaszczowych o najwyższych współczynnikach straty mody optycznej dla siatek o kątach: a)  $2^\circ$  oraz b)  $6^\circ$ .



Rys. 4.18. Wybrane do analizy zakresy widm transmisyjnych o szerokości spektralnej 2 nm, dla skośnych siatek Bragga o kątach pochylenia struktury: a)  $2^\circ$ , b)  $6^\circ$

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

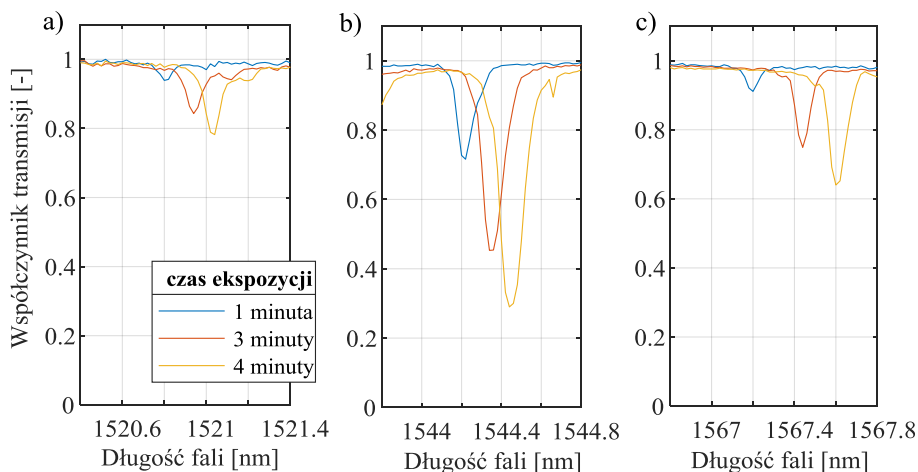
Kolejnym szczególnie istotnym parametrem wpływającym na właściwości widmowe periodycznych struktur światłowodowych o pochyłonych płaszczach stref o podwyższonej wartości współczynnika załamania jest głębokość modulacji tego współczynnika. Parametr ten podczas wytwarzania skośnej siatki Bragga w istocie 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 4.19. przedstawia widma transmisyjne skośnej siatki Bragga o kącie  $4^\circ$ , 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. 4.19. Widma transmisyjne struktury Bragga o płaszczyznach modulacji współczynnika załamania pod kątem  $4^\circ$  dla narastającego czasu wytwarzania: a) 1 minuta, b) 3 minuty, c) 4 minuty

Istotne z punktu widzenia charakteryzacji struktur periodycznych o pochyłonych 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. Charakterystycznym zjawiskiem jest przesunięcie długości fal rezonansów sprzęganych przez wytwarzaną strukturę w stronę fal dłuższych. Zjawisko to nosi nazwę *red-shift* i obserwowane jest również w przypadku zapisu struktur konwencjonalnych tj. o płaszczyznach modulacji równoległych do płaszczyzny przekroju poprzecznego światłowodu. Jest ono związane ze zwiększeniem wypadkowego efektywnego współczynnika załamania oraz charakterystycznym dla metody maski fazowej wpływem transmitowanego przez maskę promienia rzędu zerowego.

Podczas wydłużania czasu ekspozycji światłowodu na promieniowanie UV występuje przesunięcie długości fali w stronę fal dłuższych. Dotyczy ono zarówno rezonansów płaszczowych jak również modu rdzeniowego. Zjawisko to przedstawione zostało na rysunku 4.20. w postaci fragmentów widm transmisyjnych o szerokości 1 nm, rejestrowanych dla pojedynczej struktury ukośnej TFBG 2° w momentach czasowych tożsamych z momentami określonymi dla wykresów z rysunku 4.19.



Rys. 4.21. Ilustracja zmian reflektancji oraz przesunięcia widmowego modów 1, 3, 4

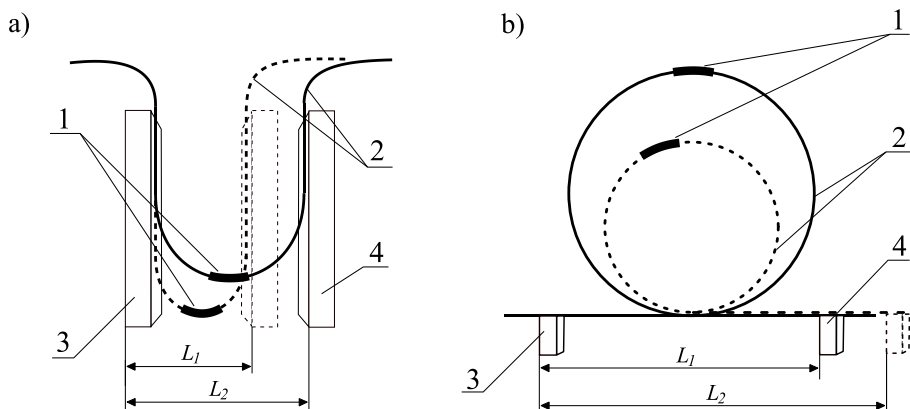
Przedstawione w niniejszym rozdziale charakterystyki spektralne wskazują, że parametry technologiczne struktur wytwarzanych w laboratorium na potrzeby niniejszej pracy wpływają na widma transmisyjne zapisywanych siatek. Z tego powodu, uzyskanie struktur o zbliżonych charakterystykach widmowych wymaga zachowania stabilności warunków procesu zapisu. Informacje pozyskane podczas analizy wpływu zmian kąta pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania oraz głębokości modulacji tego współczynnika posłużyły do doboru techniki wytwarzania siatek TFBG do zastosowania w jednoczesnych pomiarach kilku wielkości fizycznych.

## 5. Wpływ zmian wybranych wielkości fizycznych na widma TFBG

W tym rozdziale przedstawiono zasady pomiaru, a także konkretne układy i metody pomiarowe kąta obrotu, promienia gięcia oraz temperatury z wykorzystaniem struktur TFBG. Pomiary wykonywane były przy założeniu zmienności jedynie jednej wybranej wielkości fizycznej. Pozostałe wielkości utrzymywane były na stałej wartości tak, aby możliwa była ekstrakcja unikalnych cech widma, stwarzających możliwości pomiarów niezależnych dwóch wielkości fizycznych z wykorzystaniem pojedynczego przetwornika w postaci siatki TFBG. Badania eksperymentalne związane z określeniem wpływu zmian promienia gięcia, kąta polaryzacji światła wprowadzanego do siatki oraz temperatury przeprowadzone zostały z wykorzystaniem siatek o kącie pochylenia  $\theta_{TFBG}$  wynoszącym  $2^\circ$  oraz  $4^\circ$ . Zgodnie z charakterystykami przedstawionymi w rozdziale 3 niniejszej pracy, różnica wartości nachylenia płaszczyzn podwyższonego współczynnika załamania istotnie wpływa na zmiany widma transmisyjnego, co pokazane zostało na rysunku 4.16. (patrz rys. na s. 64). Siatka skośna o kącie  $2^\circ$  charakteryzuje się silniejszym sprzężaniem modów płaszczowych najniższych rzędów, dzięki czemu możliwa jest obserwacja zmian parametrów widmowych poszczególnych minimów widma transmisyjnego w bezpośredniej bliskości długości fali rezonansu ghost. Jednakże, mody płaszczowe wyższych rzędów w przypadku takiej wartości kąta nachylenia struktury wewnętrznej, które cechują się wrażliwością na zmiany kąta polaryzacji światła wprowadzanego charakteryzują się niską wartością strat transmisyjnych. Zwiększenie zakresu zmian współczynnika transmisji wybranego modu dla obrotu płaszczyzny polaryzacji może być uzyskane poprzez zwiększenie kąta pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych. Wykorzystanie w procesie wytwarzania TFBG kąta wynoszącego  $4^\circ$  skutkuje zwiększeniem stopnia sprzężenia modów najwyższych rzędów przy jednoczesnym osłabieniu sprzężenia modów w bezpośredniej bliskości modu rdzeniowego. W niniejszym rozdziale przedstawione zostały wyniki pomiarów widma transmisyjnego siatki skośnej o kącie pochylenia struktury wewnętrznej wynoszącym  $2^\circ$ , dla jednoczesnych zmian kąta polaryzacji światła wprowadzanego oraz promienia zgięcia włókna.

Budowa poszczególnych układów pomiarowych, w których przetwornikiem promienia gięcia jest TFBG umożliwia wykorzystanie zmian parametrów widmowych związanych ze zmianą promienia krzywizny do wyznaczania odległości pomiędzy wybranymi elementami. Pomiary odległości z dużą rozdzielczością lecz w niewielkim zakresie realizowane są poprzez konwencjonalne siatki Bragga. Jednakże zakres pomiaru w standardowym

układzie nie może przekroczyć przemieszczenia powodującego zerwanie włókna, co w praktyce oznacza wydłużenie względne o 0,5–1,0%. Na rysunku poniżej przedstawiono ideę wykorzystania zależności promienia gięcia od odległości pomiędzy wybranymi punktami.

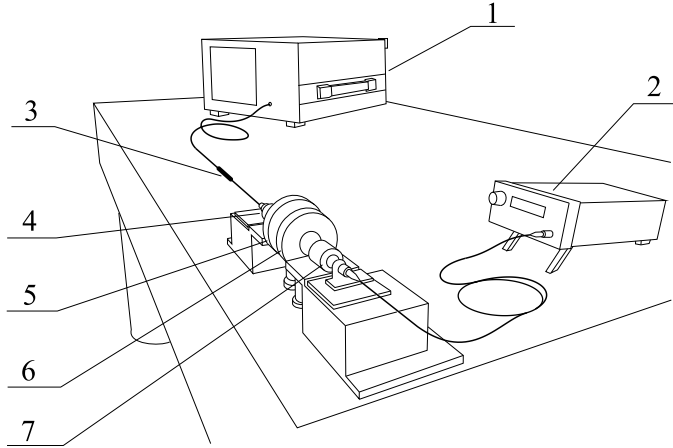


Rys. 5.1. Układy ideowe wykorzystania zmian promienia gięcia siatki TFBG do pomiaru zmian odległości pomiędzy wybranymi elementami

Przedstawione na rysunku 5.1. układy charakteryzują się transformacją przesunięcia względnego pomiędzy stałym mocowaniem (3) włókna (2) oraz elementem przesuwającym (4) na zmianę promienia gięcia światłowodu z zapisaną TFBG (1). Oba te układy charakteryzują się różną wartością stosunku zmiany odległości pomiędzy ruchomymi elementami a krzywizną. Większy zakres zmian przesunięcia może być uzyskany w przypadku układu pokazanego w części b) rysunku 5.1. W obu przypadkach konieczne są odpowiednie zabiegi zapewniające ruch światłowodu w określonym kierunku oraz zabezpieczenie przed niekontrolowanym skrętem włókna.

Zmiana kierunku polaryzacji liniowej światła wprowadzanego wpływa na poszczególne parametry spektralne transmisji. Szczególnie ciekawym parametrem jest współczynnik transmisji modów płaszczowych, którego zmiany wykazują cechy monotoniczności w zakresie kąta obrotu od 0 do 180 stopni. Określenie czułości współczynnika transmisji (amplitudy) poszczególnych modów obserwowanych w widmie transmisyjnym prowadzi do określenia przydatności siatki TFBG w charakterze przetwornika kąta obrotu pomiędzy elementami. Na potrzeby pomiarów charakterystyk spektralnych związanych ze zmianami polaryzacji zestawione zostało stanowisko, w którym światłowód z zapisaną strukturą skośną został trwale zamocowany w uchwytach, co zabezpieczyło go przed niezamierzonym skręceniem. Stanowisko zostało przedstawione na rysunku 5.2., na którym kolejnymi cyframi oznaczono:

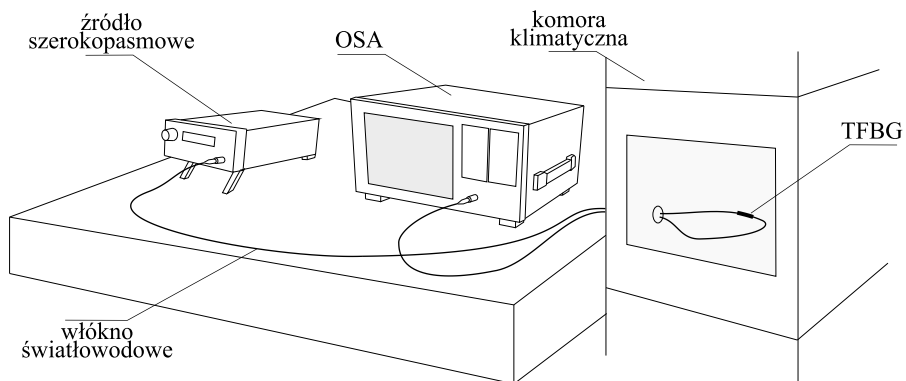
1 – analizator widma optycznego, 2 – szerokopasmowe źródło światła SLED, 3 – siatkę TFBG, 4 oraz 7 – obiektywy planarne, 5 – półfalówkę, 6 – polaryzator.



Rys. 5.2. Schemat wprowadzania światła spolaryzowanego w dwóch charakterystycznych ortogonalnych kierunkach: typu P oraz typu S

Wykorzystanie polaryzatora zapewnia liniowy stan polaryzacji oraz wysoki stopień spolaryzowania promieniowania. Półfalówka zamontowana w zmotoryzowanym stoliku obrotowym umożliwia precyzyjną kontrolę kąta płaszczyzny polaryzacji światła.

Jak opisano we wcześniejszych rozdziałach pracy, zmiana temperatury włókna światłowodowego powoduje rozszerzanie się materiału, za co odpowiada współczynnik rozszerzalności, jak również zmianą ogólnego współczynnika załamania związanego z współczynnikiem termo-optycznym. W przypadku siatek TFBG, podobnie jak w przypadku siatek konwencjonalnych, zwiększenie temperatury skutkuje przede wszystkim przesunięciem charakterystyk spektralnych w kierunku fal dłuższych.



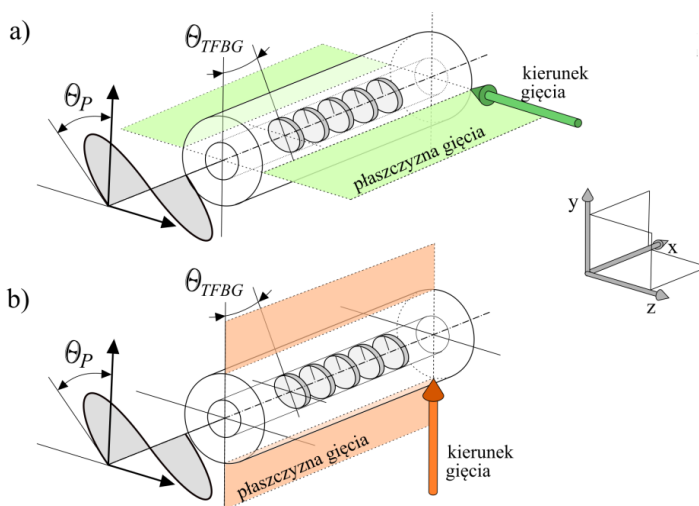
Rys. 5.3. Układ do wyznaczania zmian charakterystyk spektralnych siatki TFBG pod wpływem zmian temperatury otoczenia

Układ do pomiaru zmian widm związanych ze zmienną temperaturą otoczenia przedstawiony został na rysunku 5.3., gdzie zmiany warunków zadawane były poprzez komorę klimatyczną. W większości potencjalnych zastosowań, możliwe jest założenie, iż czułość długości fali na zmiany temperatury dla każdego ze sprzęganych modów jest jednakowy.

## 5.1. Wpływ zmian wybranych wielkości fizycznych na widma siatki TFBG o kącie $2^\circ$

### 5.1.1. Wpływ zmian promienia zgięcia na widmo siatki TBFG $2^\circ$

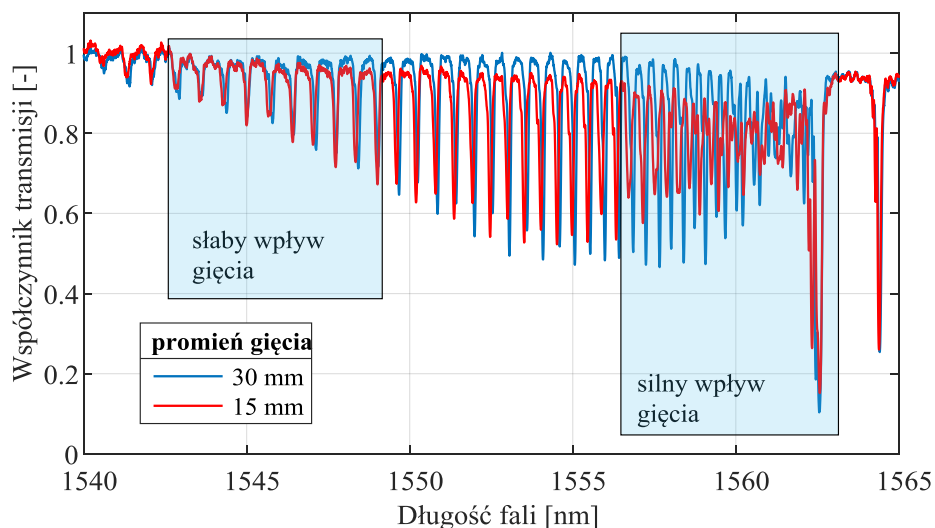
Pierwszym analizowanym przypadkiem jest zmiana promienia gięcia odcinka światłowodu jednomodowego z zapisaną periodyczną strukturą światłowodową o kącie pochylenia  $2^\circ$ . Z uwagi na przestrzenną asymetrię struktur TFBG, istotnym parametrem jest ułożenie płaszczyzn o podwyższonym współczynniku załamania w stosunku do płaszczyzny gięcia włókna. Rysunek 5.4. przedstawia dwa skrajne przypadki ustawienia struktury wewnętrznej siatki TFBG w stosunku do kierunku działania siły zginającej.



Rys. 5.4. Schemat ustawienia siły zginającej włókno w stosunku do ustawienia geometrii wewnętrznej struktury TFBG: a) zginanie w płaszczyźnie  $xz$ ; b) zginanie w płaszczyźnie  $yx$

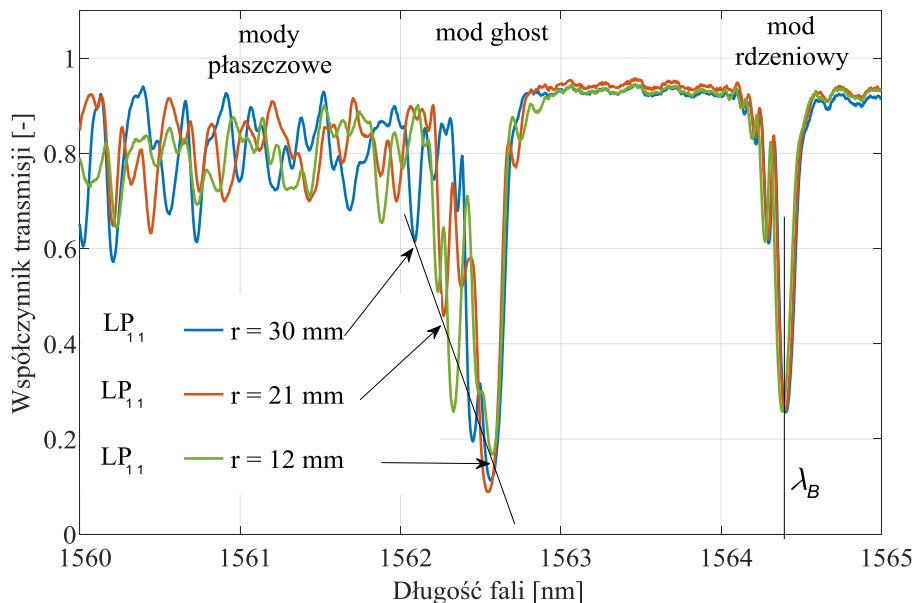
W przypadku eksperymentów prowadzonych na potrzeby niniejszej pracy doktorskiej, analizowano ustawienie, w którym siła zginająca włókno z zapisaną siatką skośną działała zgodnie z kierunkiem osi  $x$ , tj. płaszczyzna gięcia była zgodna z płaszczyzną  $zy$  układu odniesienia (przypadek b na rysunku 5.4.).





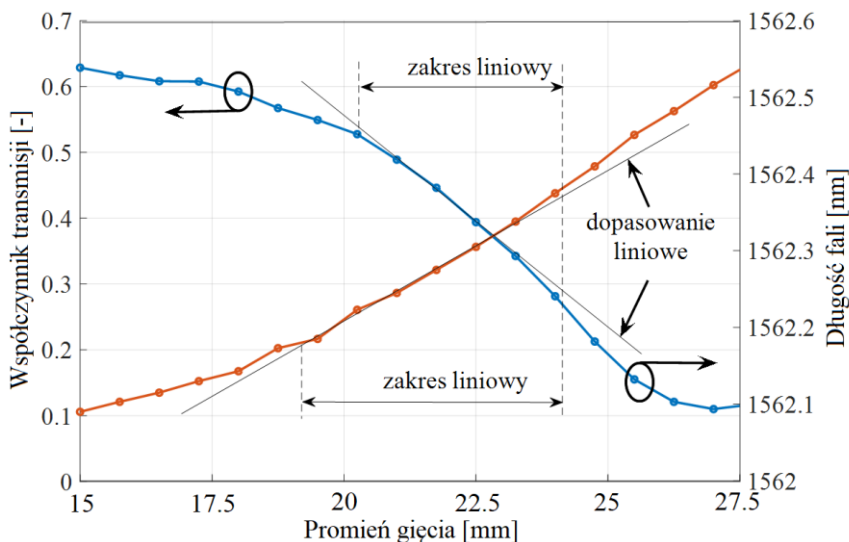
Rys. 5.5. Widma transmisyjne struktury TFBS o kącie wewnętrznym  $2^\circ$  zmierzone dla dwóch wartości promienia gięcia włókna: niebieski 30 mm oraz czerwony 15 mm przy polaryzacji światła wejściowego typu P

Charakterystyki spektralne struktury TFBS przedstawione na rysunku 5.5. pokazują, iż zmiana promienia gięcia oraz implikowana zmiana profilu współczynnika załamania włókna powodowana ścisaniem wewnętrznej części w wyraźny sposób wpływa na długości fali oraz amplitudy modów płaszczowych najniższych rzędów. Jednocześnie zaobserwować można, że charakterystyki widmowe modów o najdłuższych długościach fal ulegają znacznie mniejszym zmianom. Analiza poszczególnych rezonansów o długości fali zbliżonej do modu ghost pozwoli na wyznaczenie charakterystyk przejściowych wybranych parametrów spektralnych w funkcji zmiany promienia gięcia włókna. Na rysunku 5.6. przedstawiono zmiany charakterystyk widmowych w zakresie 1560–1565 nm dla trzech wybranych wartości promienia gięcia włókna z wytworzoną TFBS: 15, 22.5 oraz 30 mm. Widoczne jest, że w miarę zacieśniania promienia długości fal oraz współczynniki transmisji modów płaszczowych propagujących w bezpośredniej bliskości rdzenia światłowodu ulegają zmianom. Do szczegółowej analizy wybrany został pierwszy mod  $LP_{11}$ , który można wyselekcjonować spoza minimum modu ghost. Długość fali modu płaszczowego  $LP_{11}$  ulega monotonicznemu przesunięciu w stronę fal dłuższych. Jednocześnie zaobserwować można zmianę amplitudy tego rezonansu objawiającą się zwiększaniem współczynnika transmisji. Dodatkowo zaobserwować można, że część charakterystyki związana z występowaniem rezonansu rdzeniowego (Bragga) nie ulega ani przesunięciu ani zmianie amplitudy.



Rys. 5.6 Wpływ zmian promienia gięcia na charakterystyki spektralne TFBRG o kącie  $2^\circ$ , mierzone w zakresie długości fal obejmującym mod Bragga, ghost oraz mody płaszczowe najniższych rzędów przy zmianach promienia gięcia włókna

Długość fali Bragga modu rdzeniowego może być wykorzystywana jako wartość referencyjna dla kompensacji wpływu temperatury na charakterystyki. Zmiany temperatury otoczenia powodują jednostajne przesunięcie całego widma struktury TFBRG. Z tego powodu, różnica długości fali pomiędzy rezonansem Bragga a wybranym do analizy modem rdzeniowym pozostaje stała niezależnie od temperatury otoczenia. Problem kompensacji wpływu temperatury oraz niezależnego jej pomiaru został bardziej szczegółowo opisany w podrozdziale 4.3.3. Na rysunku 5.7. zamieszczone zostały charakterystyki przejściowe zmian współczynnika transmisji oraz długości fali modu płaszczowego  $LP_{11}$  wyznaczone na podstawie charakterystyk zmierzonych w przedstawionym układzie. Należy zaznaczyć, że pomiary te wykonywane były przy zachowaniu kontroli kąta polaryzacji światła wejściowego typu P.

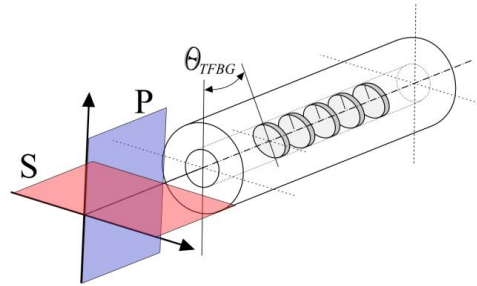


Rys. 5.7. Charakterystyki przejściowe centralnej długości fali oraz współczynnika transmisji modu  $LP_{11}$  dla zmian promienia gięcia

Wykresy przedstawione na rysunku 5.7. wykazują, iż wybrane parametry widmowe spektrum transmisyjnego modu  $LP_{11}$  charakteryzują się monotoniczną zmianą wraz ze zmianami promienia gięcia włókna światłowodowego. Zwiększenie krzywizny powoduje przesunięcie jego centralnej długości fali w stronę fal dłuższych. Jednocześnie widoczne jest, iż w związku z spektralnym zbliżaniem się do modu ghost, współczynnik transmisji osiąga coraz mniejszą wartość. Zmiany te mogą podlegać detekcji poprzez dokonywanie pomiarów spektralnych jak również poprzez budowę układów filtrów optycznych. Czułość zmian długości fali modu w zakresie liniowym wynosi 0,04 nm/mm.

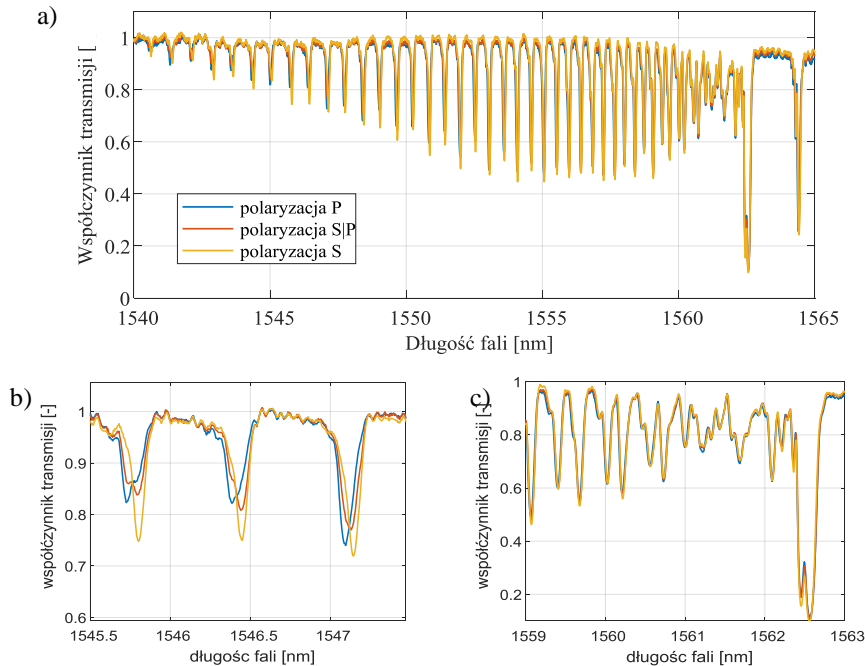
### 5.1.2. Wpływ zmian kąta obrotu na widmo siatki TFBG $2^\circ$

W przypadku siatek o pochylonych płaszczyznach współczynnika załamania rdzenia, z uwagi na przestrzenną asymetrię konieczne jest zapewnienie kontroli kąta polaryzacji w stosunku do ułożenia struktury wewnętrznej siatki TFBG. Na rysunku 5.8. pokazane zostały dwa szczególne ustawienia płaszczyzny polaryzacji światła wejściowego w stosunku do ułożenia prążków interferencyjnych wytworzonej w rdzeniu siatki. Oznaczony kąt  $\theta_{TFBG}$  wyznaczony jest w płaszczyźnie  $xy$  prostopadłej do płaszczyzny przekroju poprzecznego włókna.



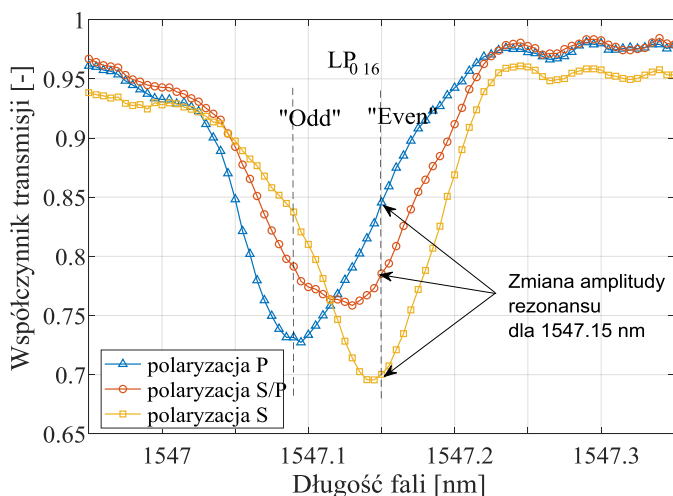
Rys. 5.8. Wprowadzanie światła spolaryzowanego w dwóch charakterystycznych ortogonalnych kierunkach: typu P oraz typu S

Wpływ zmian kąta polaryzacji wprowadzanego promieniowania na charakterystyki spektralne badanej struktury TFBRG  $2^\circ$  przedstawia rysunek 5.9.a, na którym pokazane zostały 3 widma w całym zakresie obejmującym modulację sygnału przez siatkę Bragga. Rysunek 5.9.b pokazuje powiększenie zakresu długości fal zawierającego wybrane mody płaszczowe wyższych rzędów; natomiast rysunek 5.9.c prezentuje modulacje sygnału transmisyjnego związane z sprzężaniem modów o długościach fal najbliższych modu ghost.



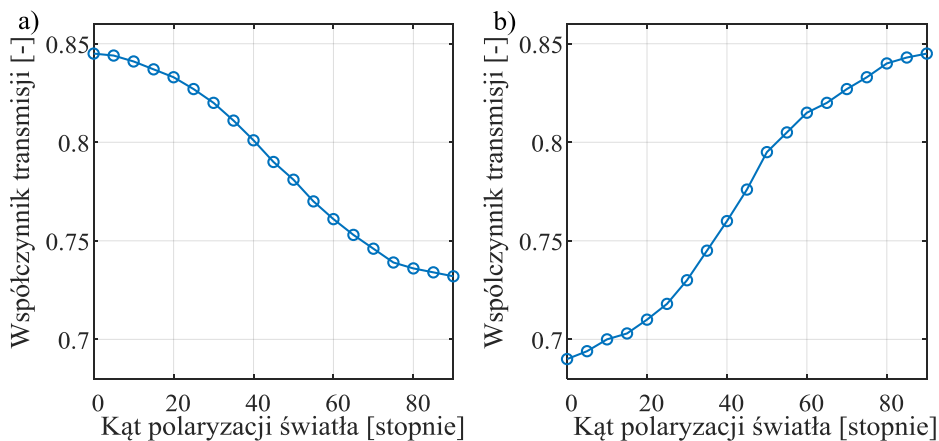
Rys. 5.9. Widma transmisyjne siatki TFBRG  $2^\circ$  mierzone dla 3 charakterystycznych stanów polaryzacji światła wejściowego: a) pełen zakres spektralny; b) zakres spektralny modów płaszczowych silnie reagujących; c) zakres modów słabo reagujących

Charakterystyki transmisyjne przedstawione powyżej pokazują, że stan polaryzacji światła wprowadzanego wywiera szczególnie istotny wpływ na zmiany widma modów o najmniejszych długościach fal. Przedstawione na rysunku 5.9.c rezonanse propagujące w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia włókna światłowodowego wykazują niezależność parametrów spektralnych takich jak współczynnik transmisji czy długość fali od kąta polaryzacji promieniowania wprowadzanego. Właściwość ta stanowi istotną zaletę, która w dalszych rozdziałach pracy posłuży do określenia możliwości uzyskania pomiarów wielu wielkości fizycznych przy zastosowaniu pojedynczego przetwornika w postaci TFBG. Analiza rysunku 5.9.b pozwala zauważyć, iż widma rezonansów o krótszych centralnych długościach fal wykazują zdecydowanie większą zależność od polaryzacji. Podobnie jak w przypadku struktur TFBG o większych kątach pochylenia wewnętrznych płaszczyzn modulacji, mody te wykazują dualny charakter – tj. rozdzielenie na dwa maksima o nieznacznie różniących się długościach fal. Określenie odpowiednich parametrów spektralnych, które ulegają monotonicznej zmianie wraz ze zmianą kąta polaryzacji światła pozwala na dokonywanie pomiarów kąta skręcenia względnego wybranych punktów konstrukcji. Metoda pomiaru polegająca na wyznaczaniu zmian współczynnika transmisji dla wybranej długości fali nazywana jest metodą linii spektralnej. Zastosowanie takiej analizy wymaga wyznaczenia jednej długości fali, dla której zmiany współczynnika transmisji będą zachowywać charakter monotoniczny wraz ze zmianami wielkości mierzonej. Rysunek 5.10. przedstawia widmo wybranego do analizy modu płaszczonego  $LP_{016}$  w wąskim zakresie spektralnym.



Rys. 5.10. Widma transmisyjne siatki TFBG 2° mierzone dla 3 charakterystycznych stanów polaryzacji światła wejściowego

Na rysunku 5.10. widoczne są zmiany kształtu widma wybranego modu płaszczowego przy trzech charakterystycznych kątach polaryzacji światła wejściowego. Widoczny jest charakterystyczny rozdział na dwa rozróżnialne rezonanse: charakteryzujący się krótszą centralną długością fali tzw. mod nieparzysty (ang. *odd mode*) oraz tzw. mod parzysty (ang. *even mode*). Dodatkowo oznaczone zostały długości fal obu rezonansów 1547,09 nm oraz 1547,15 nm, dla których przeprowadzona została analiza zmian współczynnika transmisji dla zmian kąta polaryzacji światła wprowadzanego do włókna. Zależność wartości amplitudy dla wybranej długości fali od kąta polaryzacji promieniowania wprowadzanego do włókna przedstawiona została na rysunku 5.11.

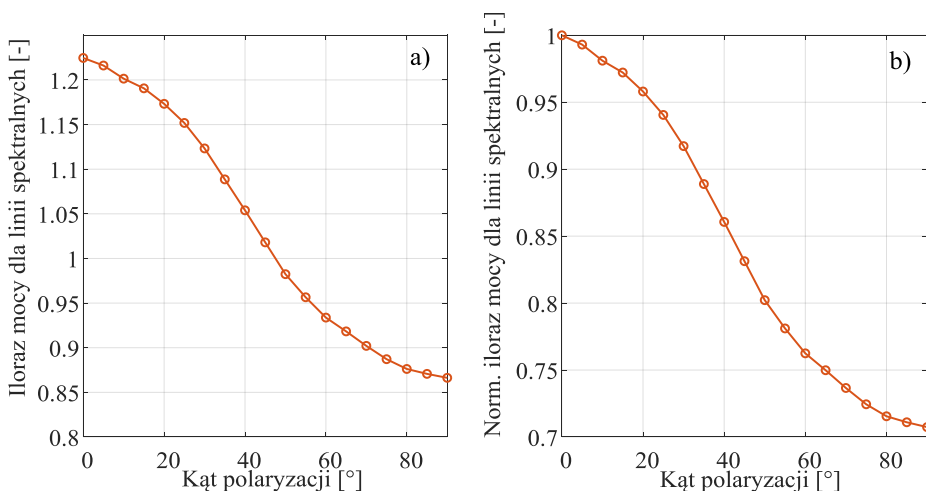


Rys. 5.11. Charakterystyka zmian współczynnika transmisji modu płaszczowego LP<sub>016</sub> rozdzielonego na dwa rezonanse: a) modu nieparzystego, b) modu parzystego

Kąty polaryzacji światła wprowadzanego stanowiące oś poziomą na rysunku 5.11. odnoszą się do kąta  $\theta_p$  oznaczonego na rysunku 5.8., na którym wartość 0 odpowiada stanowi polaryzacji typu P, a wartość 90 oznacza stan typu S. Pomiar prowadzone przy zastosowaniu takiej metody mogą służyć do wyznaczania kąta skrętu względnego wybranych punktów konstrukcji. Analiza wykresów przedstawionych na rys. 4.4. pozwala określić zakres kątów obrotu, w których zachowują one charakter liniowy od 30 do 60°. Na podstawie wykonanych pomiarów wyznaczyć można czułości zmian współczynnika transmisji modów parzystego i nieparzystego występujących w tych zakresach zmian kątów:

$$K_{rot}^{odd} = 0,002267 \left[ \frac{-}{deg} \right], \quad K_{rot}^{even} = -0,002833 \left[ \frac{-}{deg} \right].$$

Dodatkowo warto zauważyć, iż kierunek zmian współczynnika transmisji modów parzystego i nieparzystego jest przeciwny. Pozwala to na zwiększenie zakresu zmian parametru spektralnego poprzez zastosowanie metody ilorazowej, tj. takiej, w której o zmianie wielkości mierzonej, w tym przypadku kąta skrzytu, świadczy iloraz współczynników transmisji obu modów. Ponadto, zastosowanie takiego rozwiązania pozwala na eliminację wpływu fluktuacji mocy źródła światła w układzie pomiarowym. Rysunek 5.12. przedstawia zmiany ilorazu mocy wyznaczonej za pomocą metody linii spektralnej wyznaczone dla modu  $LP_{016}$ , obliczany jako stosunek współczynników transmisji modu parzystego do nieparzystego.

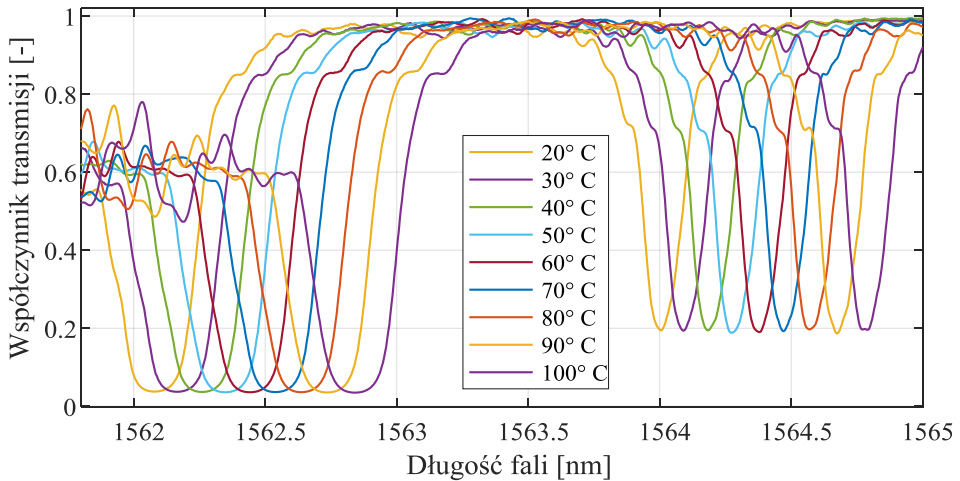


Rys. 5.12. a) Charakterystyka zmian stosunku współczynników transmisji części *odd* do części *even* modu płaszcowego  $LP_{016}$ , b) normalizowana wartość charakterystyki

Rysunek 5.12.a przedstawia charakterystykę przejściową zmian stosunku współczynników transmisji modu parzystego do modu nieparzystego przy zmianach kąta polaryzacji. Na rysunku 5.12.b widoczna jest znormalizowana charakterystyka przejścia, która pozwala na zobrazowanie zakresu zmian w skali od 0 do 1. Tak jak wspomniano wcześniej, zastosowanie metody ilorazowej pozwala na eliminację wpływu zmian mocy źródła światła, które przy użyciu klasycznej metody filtrów dopasowanych mają istotny wpływ na pomiar. Należy zauważyć, że charakterystyki przedstawiające widma transmisyjne opisywane w niniejszym rozdziale, na osi rzędnych posiadają współczynnik transmisji, który wyznaczany jest na podstawie pomiaru spektrum transmisyjnego za siatką TFBG oraz po podzieleniu go przez widmo źródła światła. W przypadku rzeczywistego pomiaru, moc optyczna wyznaczana dla wybranej długości fali zależy wprost od mocy źródła światła w tym zakresie spektralnym.

### 5.1.3. Wpływ zmian temperatury na widmo siatki TBFG 2°

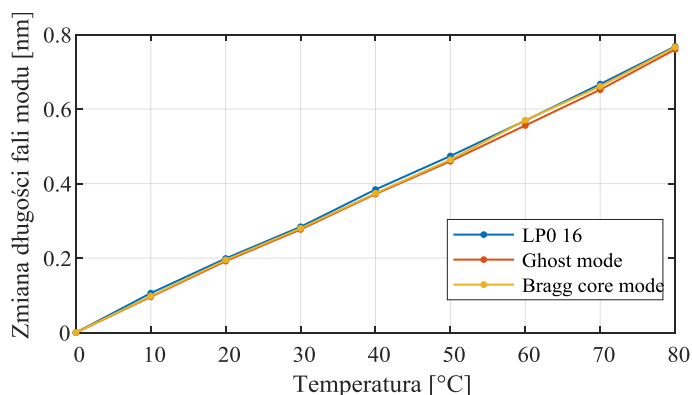
Przesunięcie widmowe kolejnych minimów obserwowanych w transmisji różni się w zależności od długości fali danego modu [20,51]. Mody wyższych rzędów charakteryzują się nieznacznie mniejszą czułością niż mody znajdujące się w pobliżu modu ghost oraz modu rdzeniowego Bragga.



Rys. 5.13. Widma transmisyjne modu rdzeniowego oraz mod ghost siatki skośnej o kącie 2° mierzone dla kilku wartości temperatury otoczenia

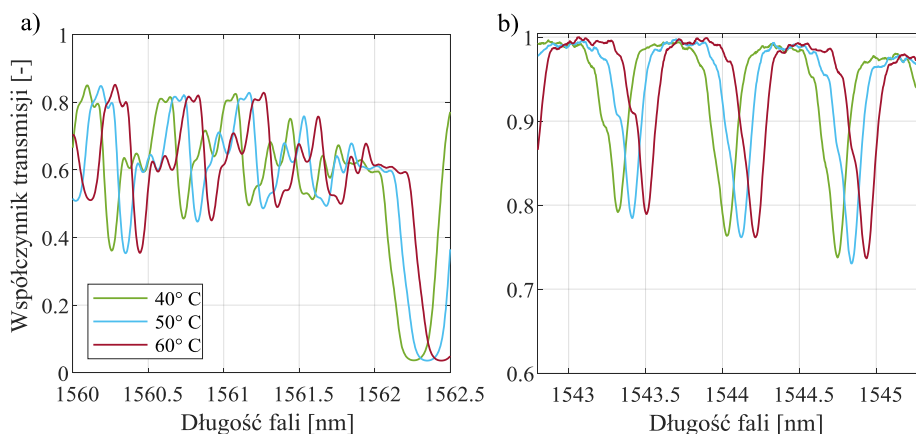
Na rysunku 5.13. przedstawione zostały charakterystyki transmisyjne fragmentu widma siatki skośnej o kącie 2° obejmującego mod podstawowy Bragga oraz mod ghost, zmierzone dla kilku wartości temperatur otoczenia zadawanej w laboratoryjnej komorze klimatycznej. Analiza rysunku 5.13. wskazuje, iż kształt widma, a co za tym idzie charakterystyczne parametry spektralne poszczególnych rezonansów, nie ulegają zmianie. Podobny efekt obserwowany jest w przypadku modów płaszczowych wyższych rzędów. Rysunek 5.14. przedstawia charakterystyki zmian centralnej długości fali dla wybranego modu płaszczowego wyższego rzędu LP<sub>016</sub>, modu ghost oraz modu rdzeniowego Bragga.





Rys. 5.14. Przebieg względnych zmian długości fali modu płaszczowego LP<sub>016</sub>, modu ghost oraz rdzeniowego siatki TFBRG 2° w zależności od temperatury

Charakterystyki względnego przesunięcia długości fali mierzone dla siatki TFBRG 2° posiadają charakter liniowy. Dodatkowo zauważyć można, że czułości tego przesunięcia od temperatury, dla każdego z modów wziętych pod uwagę są identyczne. W przypadku siatek o relatywnie niewielkim kącie pochylenia struktury wewnętrznej, różnica efektywnego współczynnika załamania najbardziej oddalonych od siebie rezonansów jest niewielka. W związku z tym, zmiana temperatury otoczenia powoduje jednakowe przesunięcie centralnej długości fali. Na rysunku 5.15. przedstawione zostały fragmenty widm siatki TFBRG 2° mierzone przy różnych temperaturach otoczenia dla zakresów spektralnych: a) obejmującego mody płaszczowe najniższych rzędów (bliskich modu ghost) oraz b) obejmującego mody niższych rzędów charakteryzujące się czułością na zmiany polaryzacji światła wprowadzanego.



Rys 5.15. Widma transmisyjne modów płaszczowych najniższych rzędów (a) oraz wyższych rzędów (b) siatki skośnej o kącie pochylenia wynoszącym 2°

Z uwagi na czytelność, rysunek 5.15. (patrz rys. na s. 81) prezentuje jedynie 3 charakterystyki spektralne mierzone dla temperatur rosnących o 10°C. Z powodu niewielkiej różnicy długości fali poszczególnych modów oraz przesunięcia powodowanego zmianami temperatury, umieszczenie większej ilości wykresów spowodowałoby nakładanie się kolejnych linii, zmniejszając czytelność całego rysunku. Na podstawie pomiarów wyznaczone zostały eksperymentalnie czułości zmiany długości fali wybranego modu płaszczowego wysokiego rzędu, modu rdzeniowego oraz modu ghost:

$$\text{mod rdzeniowy: } K_T = 9,6 \left[ \frac{\text{pm}}{^\circ\text{C}} \right],$$

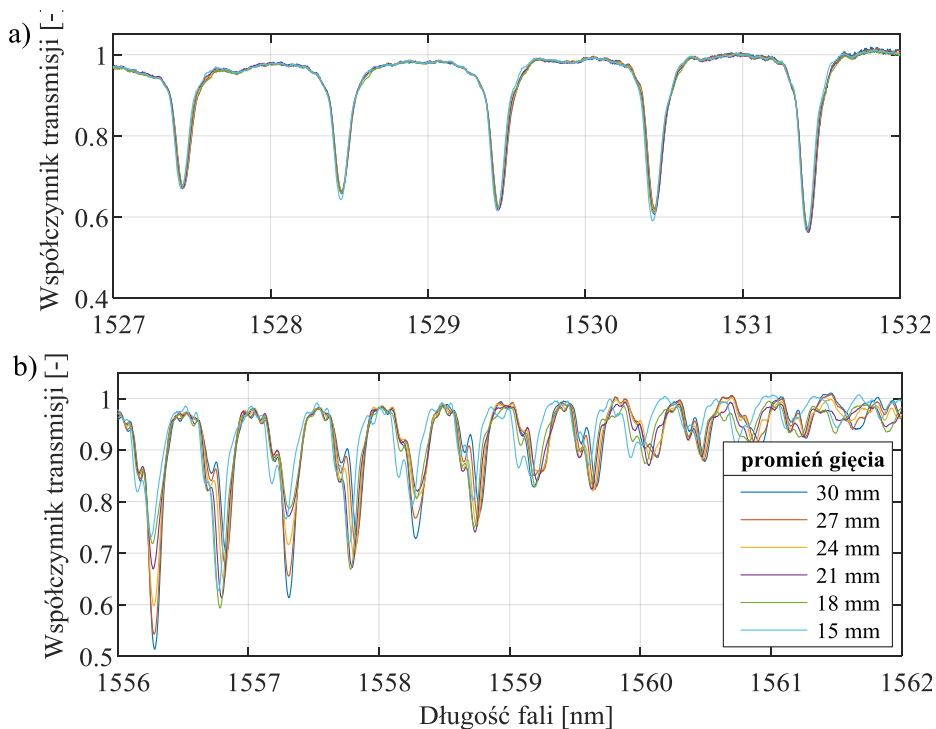
$$\text{mod ghost: } K_T = 9,575 \left[ \frac{\text{pm}}{^\circ\text{C}} \right],$$

$$\text{mod płaszczowy wyższego rzędu LP}_{0,16}: K_T = 9,5 \left[ \frac{\text{pm}}{^\circ\text{C}} \right].$$

## 5.2. Wpływ zmian wybranych wielkości fizycznych na widma siatki TFBG o kącie 4°

### 5.2.1. Wpływ zmian promienia zgięcia na widmo siatki TFBG 4°

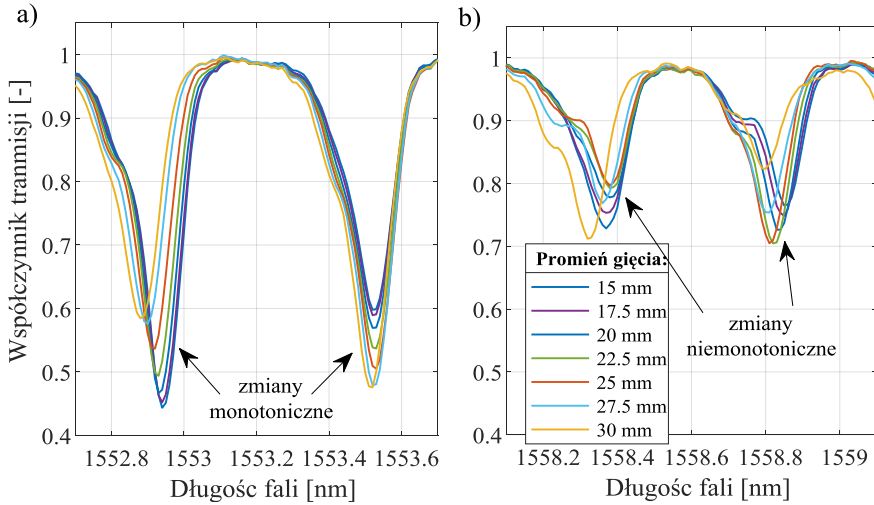
Badania eksperymentalne o podobnym zakresie jak w przypadku siatki o kącie pochylenia 2 stopnie przeprowadzono dla TFBG o kącie pochylenia płaszczyzn wewnętrznych wynoszącym 4°. Podobnie jak w poprzednim analizowanym przypadku, możliwe jest rozdzielenie dwóch zakresów spektralnych. Dla jednego z nich zmiana promienia gięcia ma istotny wpływ na parametry spektralne poszczególnych modów. Drugi z wydzielonych obszarów widma charakteryzuje się brakiem zmienności kształtu, współczynników transmisji i długości fal modów. Na rysunku 5.16. przedstawione zostały fragmenty charakterystyk spektralnych przedstawiające minima odpowiadające modom płaszczowym wyższych rzędów (a) oraz przedstawiające mody płaszczowe najniższych rzędów (b) siatki TFBG 4° poddawanej zginaniu o zmiennych promieniu od 15 do 30 mm.



Rys. 5.16. Widma transmisyjne modów płaszczowych wyższych rzędów (a) oraz najniższych rzędów (b) mierzone dla siatki TFBG  $4^\circ$  poddawanej zginaniu

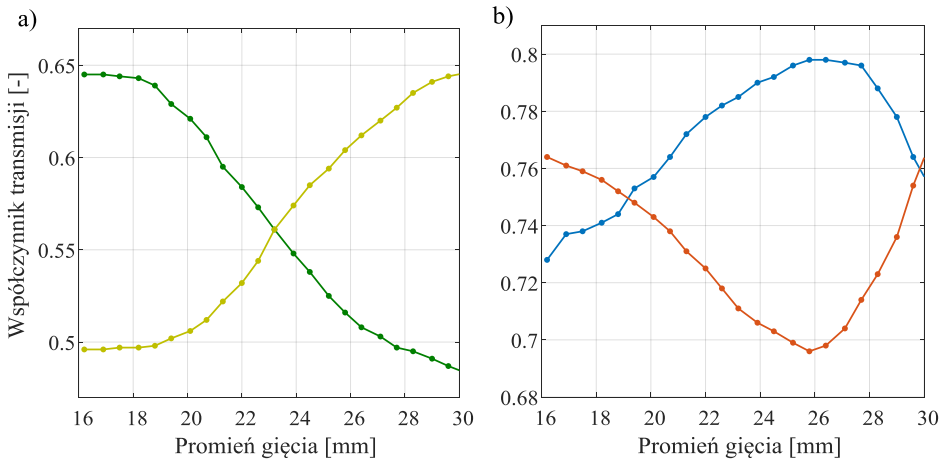
Na podstawie rysunku 5.16. przedstawionego powyżej widoczne jest, że mody płaszczowe o centralnych długościach fali bliskich długości fali Bragga reagują silnie na zmiany promienia gięcia włókna. Dodatkowo zaobserwować można, że w zadanym zakresie promieni krzywizny, parametry widmowe modów płaszczowych niskich rzędów ulegają jedynie nieznacznym zmianom. Na podstawie analizy widm struktur skośnych wytwarzanych w laboratorium na potrzeby niniejszej pracy zaobserwować można, że przy kącie pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania wynoszącym  $4^\circ$  nie występuje zjawisko nakładania się modów sprzęganych w bezpośredniej bliskości rdzenia do jednego silnego rezonansu ghost. Jednakże, charakterystyczne właściwości spektralne modów niskich rzędów, takie jak centralna długość fali czy przede wszystkim współczynnik transmisji ulegają znacznym zmianom. W przypadku tej struktury widocznie zaznacza się zależność głębokości minimów związanych ze sprzęganiem od promienia krzywizny jaką przyjmuje zginane włókno. Analiza widm wybranych modów mierzonych dla zmniejszających się promieni zginania pokazuje, że dla wybranego zakresu krzywizn, zmiana współczynnika transmisji kolejnych modów jest inna. Na rysunku 5.17. przedstawione zostały

w powiększeniu widma czterech modów oddalonych spektralnie o kilka nanometrów. Mody płaszczowe o mniejszych długościach fal zmieniają się w sposób regularny, podczas gdy amplituda modów bliższych rezonansowi Bragga zmienia się w sposób nieregularny.



Rys. 5.17. Widma transmisyjne modów płaszczowych wyższych rzędów (a) oraz najniższych rzędów (b) mierzone dla siatki TFBG 4° poddawanej gięciu o zmieniającym się promieniu

Na podstawie zmierzonych widm wyznaczone zostały charakterystyki zmian współczynnika transmisji modów z rysunku 5.17.

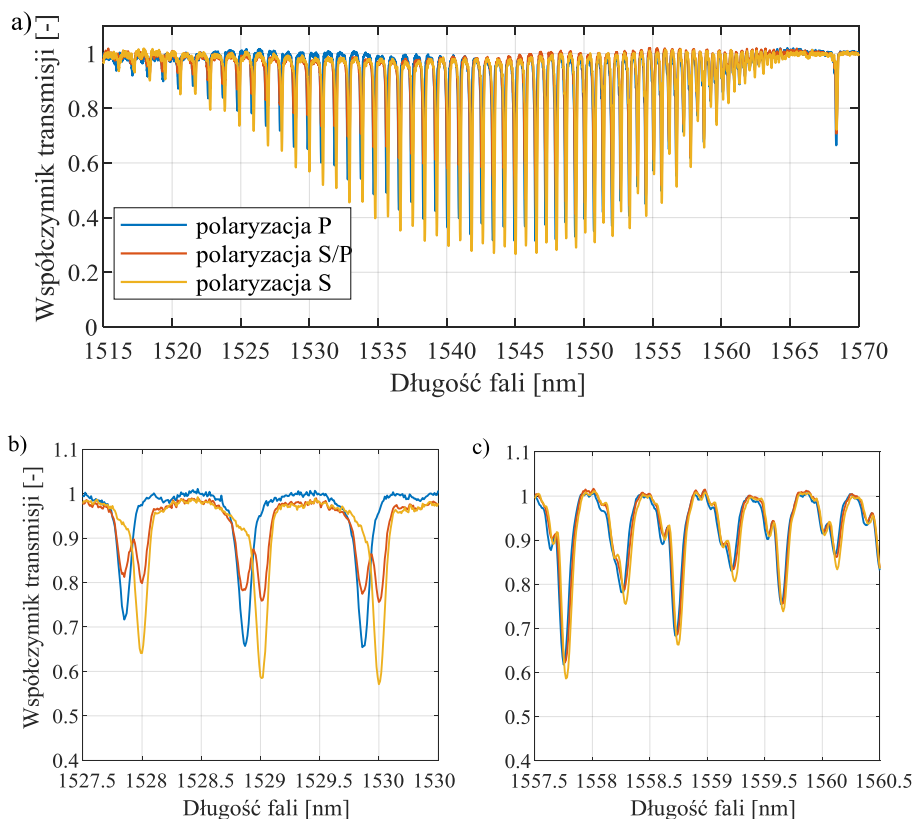


Rys. 5.18. Charakterystyki przejściowe współczynnika odbicia wybranych par modów płaszczowych: LP<sub>04</sub> i LP<sub>14</sub> (a) oraz LP<sub>08</sub> i LP<sub>18</sub> (b) w zależności od promienia gięcia siatki 4°

Dla każdego z par modów, zmiany widma pod wpływem zmian promienia zgięcia włókna w zakresie 15–30 mm są nieco inne, co zostało przedstawione na rysunku 5.18. Widmo transmisyjne modu płaszczowego o długości fali 1559,2 nm przedstawione na rysunku 5.18.a, charakteryzuje się spadkiem wartości współczynnika transmisji podczas zacieśniania krzywizny. Jednocześnie, kolejne minimum obserwowane od strony dłuższych fal charakteryzuje się wzrostem tej wartości. Dla promieni gięcia w zakresie 15–30 mm współczynnik transmisji jest monotoniczny, a w zakresie 19–28 mm przybiera kształt zbliżony do liniowego przy jednoczesnej największej dynamice zmian. Charakterystyki z rysunku 5.18.b nie są funkcjami monotonicznymi zmian współczynnika transmisji dwóch modów o większej długości fali, powodowanych przez zmianę promienia gięcia w zakresie 15–30 mm. Analiza innych zakresów widma wskazuje, iż charakter zmian kolejnych modów przy założonym zakresie promieni gięcia silnie zależy od długości fali, tj. odległości spektralnej rozpatrywanego modu płaszczowego do minimum odpowiadającego rezonansowi Bragga.

### 5.2.2. Wpływ zmian kąta obrotu na widmo siatki TFBG 4°

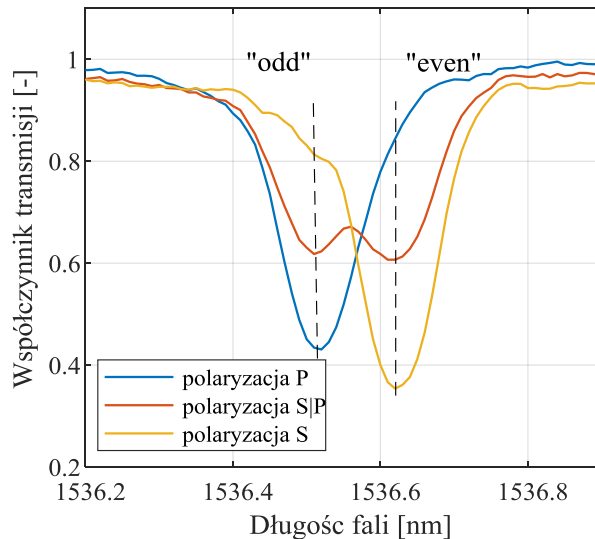
Analogicznie do pomiarów widm siatki skośnej o kącie 2 stopni w zależności od kąta obrotu, wykonano pomiary charakterystyk widmowych transmisji siatki TFBG o kącie 4 stopni przy szeregu wartości kąta polaryzacji światła wprowadzanego. Zgodnie z analizą z rozdziału 4.4.1., zwiększenie kąta pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania w stosunku do płaszczyzny przekroju poprzecznego światłowodu powoduje zwiększenie stopnia sprzężenia wstecznego modu rdzeniowego do modów płaszczowych. W rezultacie zwiększa się szerokość widmowa szeregu minimów obserwowanych w widmie transmisyjnym oraz zwiększa się współczynnik odbicia modów płaszczowych wyższych rzędów. Rysunek 5.19. przedstawia widma transmisyjne siatki TFBG o kącie 4 stopnie zmierzone dla trzech stanów polaryzacji światła wprowadzanego: stan P, stan S oraz stan pośredni (S/P). Na rysunku 5.19.a przedstawione zostało widmo w pełnym zakresie długości fal, pokrywającym występujące mody płaszczowe. Rysunek 5.19.b pokazuje mody wyższych rzędów, które cechuje silna zmiana współczynnika transmisji. Na rysunku 5.19.c pokazane zostały charakterystyki modów płaszczowych najniższych rzędów, które w poprzednim rozdziale zostały przedstawione jako silnie reagujące na zmiany promienia zginania.



Rys. 5.19. Widma transmisyjne siatki TFBG  $4^\circ$  mierzone dla 3 charakterystycznych stanów polaryzacji światła wejściowego: a) pełen zakres spektralny; b) zakres spektralny modów płaszczowych silnie reagujących; c) zakres modów słabo reagujących

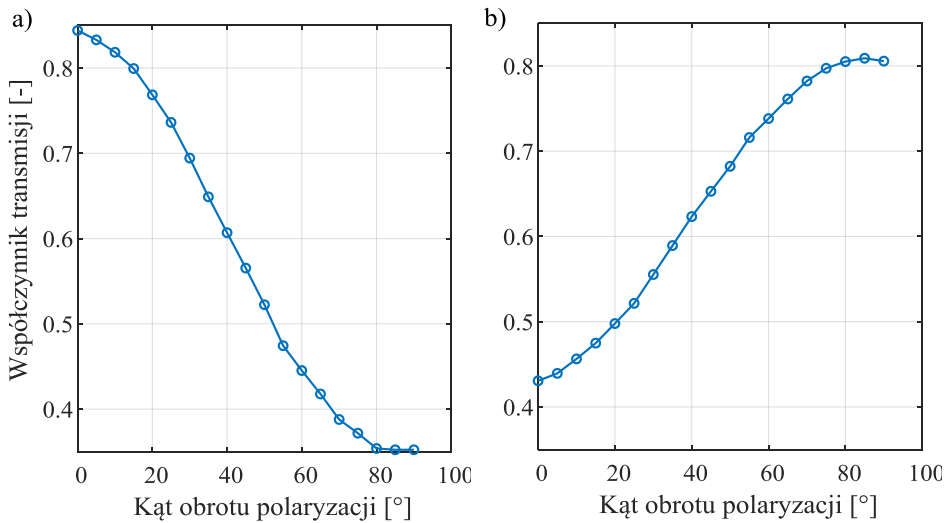
Dla widm z rysunku 5.19. wskazują, że podobnie jak w przypadku siatki o kącie wewnętrznym wynoszącym 2 stopnie, wyróżnić można charakterystyczne zakresy spektralne. Rezonanse obserwowane dla długości fal najbliższych centralnej długości fali modu rdzeniowego charakteryzują się zdecydowanie mniejszymi zmianami parametrów widmowych powodowanych różnicami w kącie polaryzacji światła wprowadzanego (Rys. 5.19.a). W zakresie modów wyższych rzędów zmiana kąta polaryzacji światła wprowadzanego ma znaczący wpływ na parametry widmowe (Rys. 5.19.b). Z kolei w zakresie modów bliskich minimum związanego z modem rdzeniowym, zmiana polaryzacji ma znacząco mniejszy wpływ na charakterystykę spektralną. W celu wyboru modu płaszczowego siatki TFBG  $4^\circ$ , którego amplituda zmienia się w największym zakresie należy przeanalizować widmo w pełnym zakresie spektralnym. Z punktu widzenia detekcji zmiany istotne są zarówno zmiany

względne, jak również zmiany bezwzględne, tj. różnica pomiędzy skrajnymi wartościami amplitudy minimum widma modu. Na rysunku 5.20. pokazany został mod wyższego rzędu, który charakteryzuje się największą wartością względnych zmian współczynnika transmisji wyznaczanych z wykorzystaniem metody linii spektralnej.



Rys. 5.20. Widmo transmisyjne siatki TFBG o kącie struktury wewnętrznej  $4^\circ$  dla trzech skrajnych przypadków polaryzacji światła wejściowego

Na podstawie przedstawionych w tym rozdziale wyników pomiarów, możliwe jest dokonanie porównania zmian widm modów płaszczowych dla siatki TFBG  $2^\circ$  oraz TFBG  $4^\circ$ . W tym celu wyznaczone zostały charakterystyki zmian amplitudy obu części modu płaszczowego, sprzęganych najsilniej dla przeciwnych stanów polaryzacji, tj. stanu P oraz S. Zmiany te zostały przedstawione na rysunku 5.21.a, na którym pokazano zamiany współczynnika transmisji części nieparzystej, oraz na rysunku 5.21.b, który przedstawia zmiany transmisji rezonansu parzystego.



Rys. 5.21. Charakterystyka zmian współczynnika transmisji modu płaszczowego rozdzielonego na dwa rezonanse: a) modu nieparzystego, b) modu parzystego

Porównanie charakterystyk wyznaczonych dla długości fal parzystego i nieparzystego rezonansu modu płaszczowego siatek skośnych o kątach 2 i 4 stopnie pokazuje, że zmiany te mają podobny charakter. W całym zakresie kątów polaryzacji, tj. 0 do 90 stopni zmiany są monotoniczne, przy czym czułość zmian amplitudy jest najniższa dla kątów najbliższych skrajnym położeniom. Istotną różnicą jest zakres zmian współczynnika transmisji, który dla siatki o większym kącie struktury wewnętrznej jest wyraźnie większy. Dodatkowo zwiększeniu ulega zakres kątów obrotu, w którym wykres jest zbliżony do funkcji liniowej i zawiera się w przedziale od 20° do 70°. Czułości zmian współczynnika transmisji w przypadku modu płaszczowego wyższego rzędu wynosi:

$$K_{rot}^{odd} = 0,0574 \left[ \frac{-}{deg} \right], K_{rot}^{even} = -0,0076 \left[ \frac{-}{deg} \right].$$

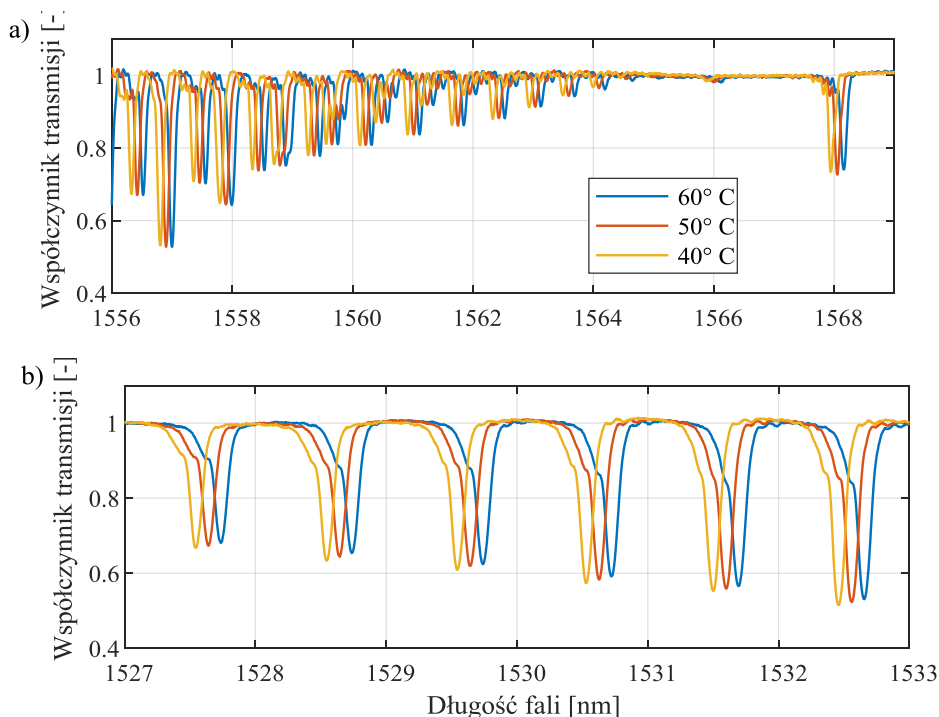
Oznacza to, że przy pomiarze kąta obrotu bądź skrętu względnego elementów, w przypadku detekcji zmian amplitudy wybranego modu TFBG, korzystnym jest wybór struktury o kącie 4 stopnie.

### 5.2.3. Wpływ zmian temperatury na widmo siatki TBFG 4°

Analogicznie jak w przypadku poprzednich rozdziałów, wykonane zostały pomiary charakterystyk spektralnych siatki skośnej o kącie 4° dla wybranego zakresu temperatury. Do pomiarów widm siatki umieszczonej w zmieniającej się temperaturze otoczenia wykorzystano komorę klimatyczną przedstawioną na

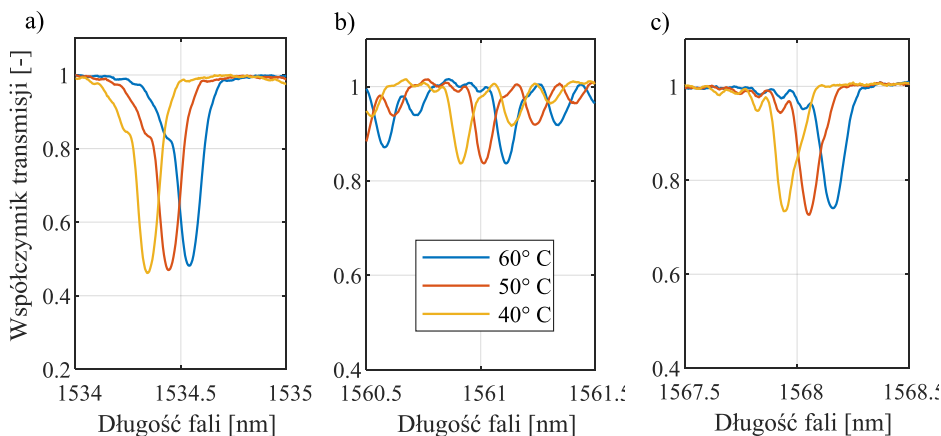


rysunku 5.3. Poniżej przedstawione zostały transmisyjne charakterystyki widmowe siatki o kącie pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych 4 stopnie w zakresach spektralnych identycznych jak na rysunku 5.16. (patrz rys. na s. 83). Na rysunku 5.22.a mody o długości fali najbliższej długości fali Bragga, rysunek 5.22.b obejmuje wybrane mody wyższych rzędów.



Rys. 5.22. Widma transmisyjne modów płaszczyznych najniższych rzędów (a) oraz wyższych rzędów (b) siatki skośnej o kącie pochylenia wynoszącym  $2^\circ$

Analiza widm z rysunku 5.22. pokazuje, że zgodnie z założeniami teoretycznymi, podniesienie temperatury otoczenia powoduje przesunięcie charakterystyki w stronę fal dłuższych. Ocena wpływu zmian temperatury na parametry widmowe związane z kątem obrotu czy zmianą promienia gięcia wymaga wyznaczenia czułości przesunięcia centralnej długości fali modów płaszczyznych oraz modu Bragga. Rysunek 5.23. przedstawia widma wybranego modu płaszczyzowego wysokiego rzędu (a), modu niskiego rzędu (b) oraz modu rdzeniowego (c). Przesunięcie długości fali spowodowane zmianą temperatury o 20 stopni Celsjusza, ma identyczną wartość dla każdego z minimów w rozpatrywanym zakresie spektralnym.



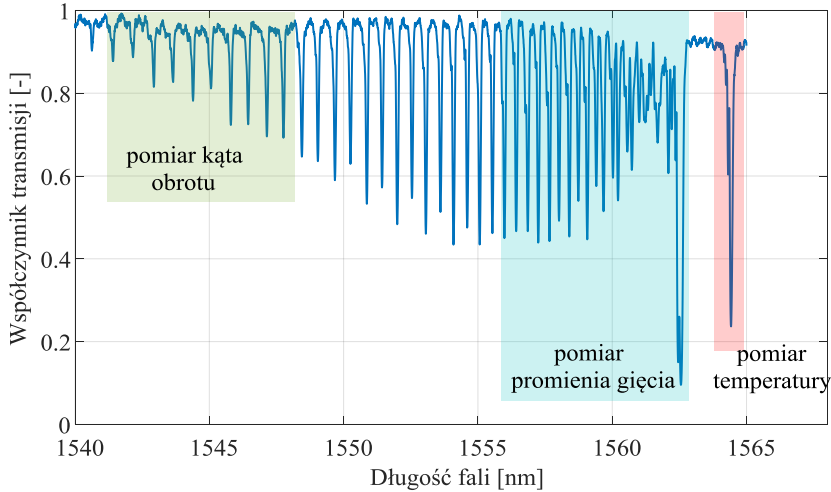
Rys. 5.23. Widma transyjne modów płaszczowych najniższych rzędów (a) oraz wyższych rzędów (b) siatki skośnej o kącie pochylenia wynoszącym  $2^\circ$

$$\text{mod niskiego rzędu: } K_T = 10,083 \left[ \frac{\text{pm}}{^\circ\text{C}} \right], \text{ mod rdzeniowy: } K_T = 10,35 \left[ \frac{\text{pm}}{^\circ\text{C}} \right].$$

### 5.3. Analiza możliwości jednoczesnego pomiaru wielu wielkości fizycznych z wykorzystaniem przetwornika w postaci pojedynczej TFBG

Jednakowe przesunięcie długości fali poszczególnych modów pod wpływem zmian temperatury oznacza, że możliwe jest uzyskanie niezależności parametrów wyznaczonych w rozdziałach 5.2.1. oraz 5.2.2. od zmian temperatury otoczenia. W celu uzyskania informacji dotyczących promienia gięcia na podstawie przesunięcia widma określonego modu niskiego rzędu, konieczne jest odniesienie tego przesunięcia do modu rdzeniowego. W układzie przedstawionym w punkcie 5.1., mod Bragga propagując w rdzeniu, gdzie zmiana naprężeń powodowana przez zmianę promienia gięcia nie występuje, reaguje zmianą długości fali jedynie pod wpływem temperatury. Śledzenie zmian długości fali Bragga pozwala na określenie relatywnej zmiany długości fali pomiędzy wybranym modem płaszczowym, dzięki czemu uzyskuje się niezależność wyników analiz od temperatury otoczenia. Pomiar przesunięcia spektralnego widma modu rdzeniowego może być dokonywany poprzez zastosowanie filtrów optycznych o ściśle określonych parametrach spektralnych, dopasowanych do długości fali modu Bragga oraz potencjalnych przesunięć spowodowanych zmianami temperatury. Stosując metody filtrów dopasowanych, konieczne jest założenie zakresu temperatur tak, aby w skrajnych przypadkach w zakresie spektralnym filtra nie znalazło się minimum związane z modem innym niż rdzeniowy.

Na rysunku 5.24. przedstawiona została charakterystyka spektralna siatki TFBG  $2^\circ$  z oznaczonymi trzema zakresami długości fal. Zakresy te odpowiadają długościom fali modów, których parametry spektralne mogą być wykorzystane do pomiaru kąta obrotu (zielony), promienia zgięcia (niebieski) oraz temperatury (czerwony).



Rys. 5.24. Widmo transmisyjne siatki TFBG o kącie płaszczyzn dyfrakcyjnych  $2^\circ$ , z oznaczonymi zakresami widma o czułości na zmiany wybranych wielkości fizycznych

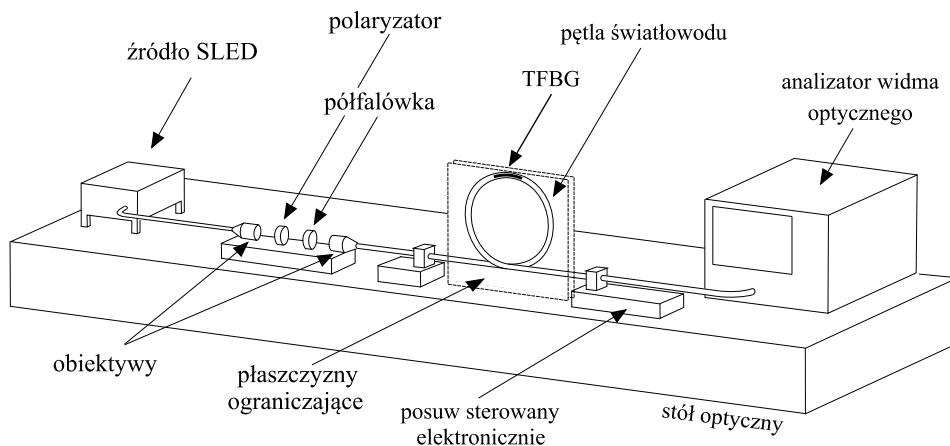
Ze wstępnej analizy widm przedstawionych w rozdziałach 5.2.1. oraz 5.2.2. wynika, iż zakresy widmowe siatek TFBG o kątach 2 oraz 4 stopnie można w istocie podzielić na obszar czuły na zmiany polaryzacji światła wprowadzanego oraz obszar czuły na zmiany promienia gięcia. Możliwe jest stwierdzenie, że zarówno w przypadku siatki skośnej o kącie pochylenia struktury wewnętrznej  $2^\circ$  oraz  $4^\circ$ , parametry spektralne modów płaszczyznych niskich rzędów posiadają dużą czułość na zmiany promienia gięcia w wybranym zakresie. Jednocześnie, analiza widm transmisyjnych wskazuje, że parametry te zachowują niską czułość na zmiany polaryzacji światła wprowadzanego. Z połączenia tych właściwości wynika możliwość uzyskania niezależności pomiarów promienia gięcia w wybranym zakresie od zmian polaryzacji światła wprowadzanego. Zmiany współczynnika transmisji powodowane przez zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła wejściowego mogą być wykorzystane do wyznaczania zmian kąta obrotu względnego dwóch elementów. Dodatkowo, parametry modów wyższych rzędów silnie zależne od kąta obrotu wykazują niewielkie zmiany podczas zmian promienia krzywizny siatek TFBG. W kolejnym rozdziale przedstawiono w sposób szczegółowy wyniki pomiarów spektralnych struktur skośnych o kącie  $2^\circ$  oraz  $4^\circ$ .

## **6. Zmiany widma pojedynczej skośnej siatki TFBG 6° przy jednoczesnej zmianie kilku wielkości fizycznych**

Jednym z postawionych w rozprawie celów badawczych było określenie możliwości wykorzystania pojedynczej światłowodowej struktury periodycznej do pomiaru dwóch wielkości jednocześnie: promienia gięcia oraz kąta płaszczyzny polaryzacji światła wprowadzanego do włókna. Czułość siatki skośnej na zmiany stanu polaryzacji światła może być wykorzystywana do pomiaru relatywnego skrętu wybranych punktów konstrukcji. Na potrzeby realizacji prac badawczych opisywanych w niniejszej pracy zbudowane zostało stanowisko pomiarowe, w którym możliwe były jednoczesne zadawanie kąta płaszczyzny polaryzacji światła wprowadzanego oraz zmiany promienia zgięcia światłowodu w miejscu zapisanej skośnej siatki Bragga. W badaniach eksperymentalnych wykorzystane zostały struktury wytworzone w Laboratorium Optoelektroniki i Techniki Laserowej.

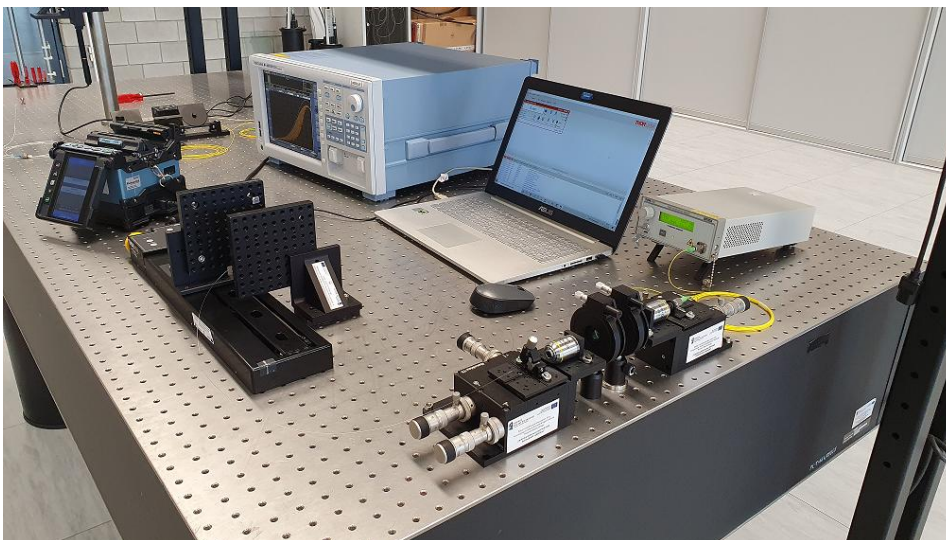
### **6.1. Opis stanowiska pomiarowego**

Zestawienie stanowiska umożliwiającego zadawanie wybranych wielkości fizycznych w odniesieniu do badanych światłowodowych struktur periodycznych oraz pomiary ich widm, wymagało przede wszystkim zastosowania przyrządów klasy laboratoryjnej. Jako źródło światła zastosowana została dioda SLED umieszczona w dedykowanym zestawie umożliwiającym precyzyjną kontrolę parametrów jej pracy, takich jak temperatura oraz prąd diody (Benchtop source S5FC1550P-A2). Promieniowanie transmitowane było ze źródła przy użyciu włókna światłowodowego dwójłomnego, utrzymującego polaryzację światła do obiektywu planarnego, którego celem było uzyskanie wiązki równoległej. Pomiędzy obiektywami umieszczone zostały elementy optyki objętościowej w postaci polaryzatora THORLABS LPNIR100-MP2, którego celem było zwiększenie stopnia polaryzacji światła wprowadzanego do światłowodu ze skośną siatką Bragga oraz półfalówki THORLABS AHWP05M-1600 zamocowanej w obrotowej głowicy sterowanej za pomocą dostarczanego przez producenta układu mikrosterowania za pośrednictwem dedykowanego oprogramowania. Rysunek 6.1. schematycznie przedstawia opisywane stanowisko.



Rys. 6.1. Schemat stanowiska do jednoczesnego zadawania zmian kąta polaryzacji światła wejściowego oraz promienia gięcia światłowodu z wytworzoną skośną siatką Bragga

Promieniowanie emitowane przez diodę SLED, po zdeterminowaniu stanu polaryzacji kierowane jest przez kolejny obiektyw na czoło światłowodu i wprowadzane do odcinka włókna, w którym rdzeniu znajduje się periodyczna struktura o pochylonych płaszczyznach modulacji współczynnika załamania. Odcinek ten został uformowany w pętlę, której jeden z końców został unieruchomiony w uchwycie. Drugi koniec pętli został zamocowany w uchwycie przytwierdzonym do elektronicznie sterowanego posuwu z zachowaniem jednakowej wysokości punktu przytwierdzenia końców światłowodu względem blatu roboczego stołu optycznego. Dodatkowo włókno światłowodowe w miejscu przecięcia zostało zamocowane w sposób zapewniający swobodny ruch wzdłużny światłowodu, jednocześnie eliminując przesunięcie samego punktu przecięcia. Dzięki temu pętla włókna podczas zmian długości obwodu zachowywała kształt koła. Obwód pętli był kontrolowany przez ustawienie stolika sterowanego elektronicznie. Zwiększenie odległości pomiędzy mocowaniami światłowodu powoduje zacieśnianie pętli. Zmniejszenie obwodu fragmentu włókna z wytworzoną strukturą o pochylonych płaszczyznach współczynnika załamania skutkuje zmniejszeniem promienia krzywizny. Rysunek 6.2. przedstawia rzeczywistą fotografię zestawionego układu pomiarowego. W przypadku pomiarów wpływu temperatury na zmiany wybranych parametrów charakterystyk widmowych, układ do zadawania promienia gięcia umieszczony był w komorze klimatycznej.



Rys. 6.2. Fotografia stanowiska pomiarowego do badania wpływu promienia gięcia oraz zmian polaryzacji światła wejściowego struktury TFBG

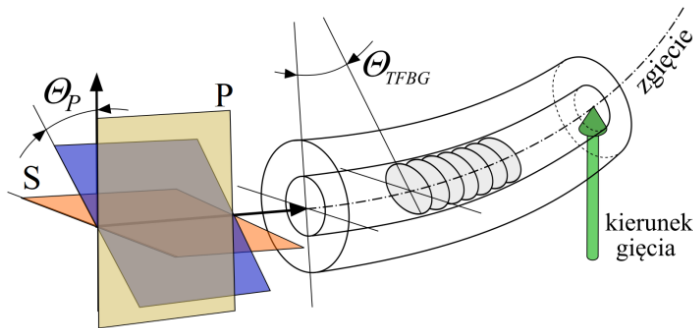
Wpływ zmian promienia krzywizny na widma transmisyjne siatek skośnych najczęściej opisywany jest przy założeniu jego długości na poziomie kilkudziesięciu centymetrów oraz znaczących zmian. W dalszej części pracy przedstawione zostały wyniki pomiarów dla znacząco mniejszych promieni gięcia rzędu 30–12 mm. Pętla światłowodu z zapisaną strukturą TFBG utworzona została w sposób zapewniający możliwość zacieśniania jej aż do wartości powodujących pęknięcie włókna.

## 6.2. Wpływ zmian dwóch wielkości fizycznych na widmo siatki TFBG $2^\circ$

### 6.2.1. Wpływ zmian promienia gięcia i kąta obrotu na widma TFBG $2^\circ$

Opisane w powyższych rozdziałach właściwości spektralne siatki TFBG o kącie pochylenia struktury wewnętrznej wynoszącym  $2^\circ$  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 6.3. przedstawiono schematycznie widok

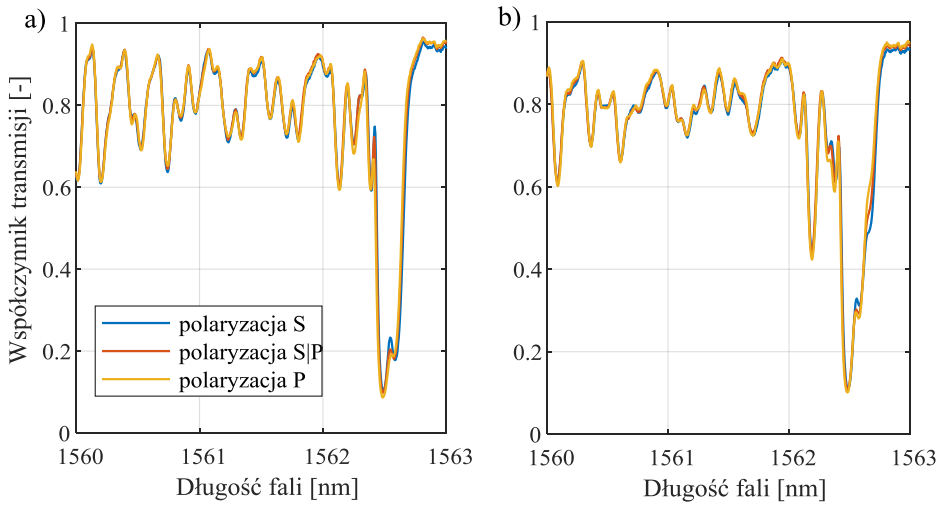
włókna z zapisaną strukturą TFBG ulegającą gięciu oraz trzy charakterystyczne kąty polaryzacji światła wejściowego.



Rys. 6.3. Schematyczny widok wewnętrznej struktury siatki TFBG wraz z zaznaczonymi trzema charakterystycznymi przypadkami polaryzacji światła

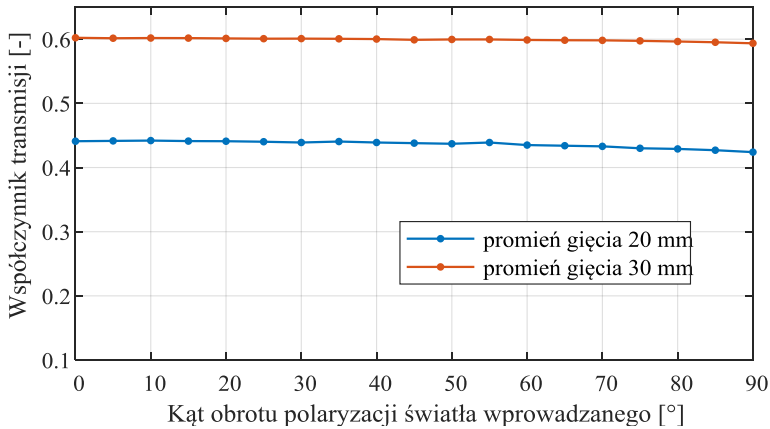
Analiza przeprowadzona w niniejszym rozdziale dotyczy przypadku gięcia włókna w płaszczyźnie  $xy$  układu współrzędnych. Kierunek gięcia w stosunku do ułożenia wewnętrznej struktury siatki TFBG jest taki sam jak w przypadku opisanym w rozdziale 5.

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 6.4. 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. 6.4. 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 6.4. 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 6.5. 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.

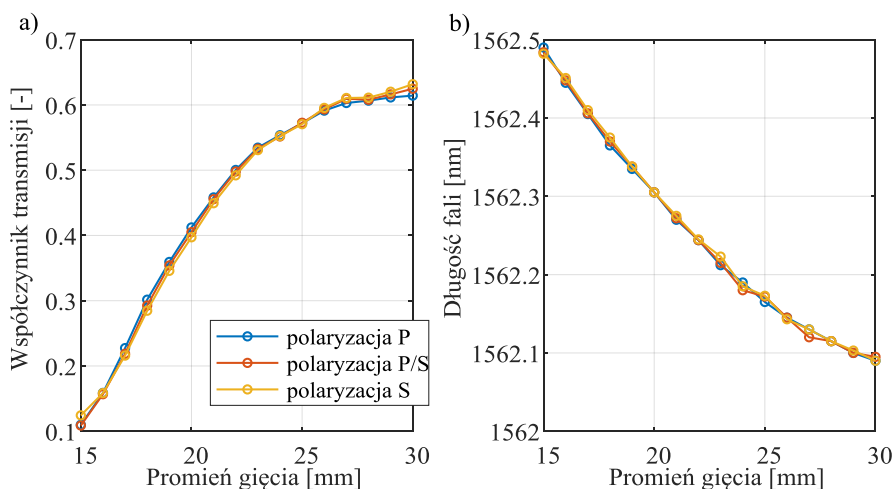


Rys. 6.5. Przebieg zmian współczynnika transmisji modu  $LP_{11}$



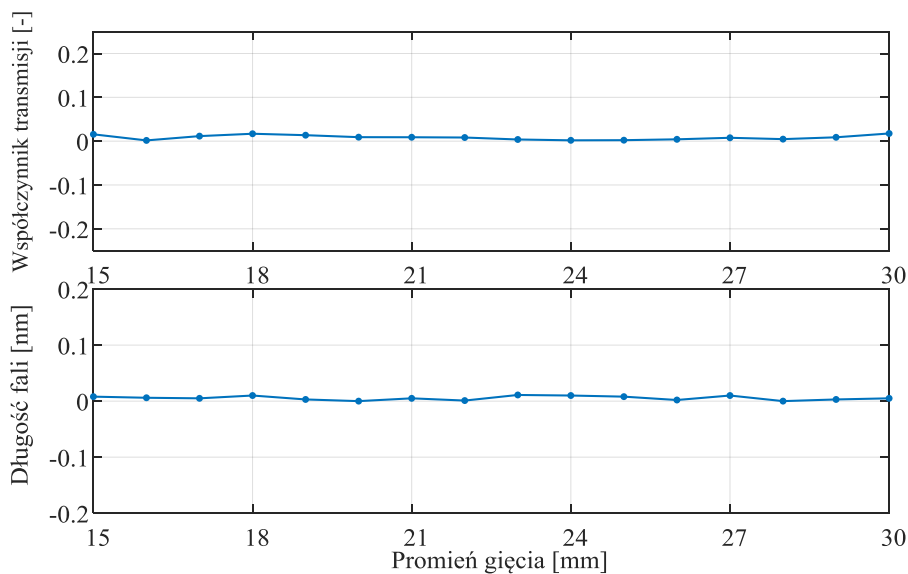
Obok współczynnika transmisji modu płaszczowego niskiego rzędu, parametrem zależnym od promienia gięcia włókna jest długość fali minimum transmisji dla tego modu. Zważywszy na to, wyznaczona została dodatkowo charakterystyka zmian centralnej długości fali modu  $LP_{11}$  przy zmianach promienia gięcia wyznaczona dla trzech skrajnych przypadków polaryzacji światła wprowadzanego: typu P, S oraz P/S.

Rysunek 6.6.a przedstawia charakterystyki przejściowe zmian współczynnika transmisji natomiast rysunek 6.6.b przedstawia zmiany centralnej długości fali modu niskiego rzędu wyznaczone przy trzech skrajnych przypadkach polaryzacji światła wprowadzanego: stan P, stan S oraz przejściowy P/S.



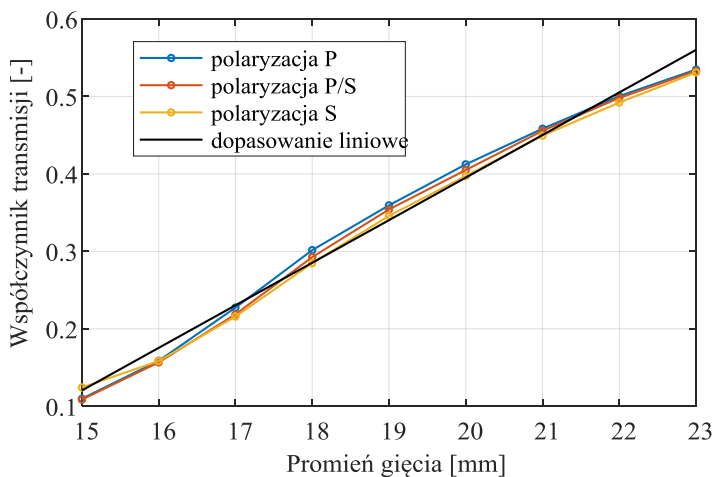
Rys. 6.6. Charakterystyki przejściowe współczynnika transmisji (a) oraz centralnej długości fali (b) modu płaszczowego  $LP_{11}$  dla trzech wartości polaryzacji

Z charakterystyk przedstawionych na rysunku 6.6. 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 6.7. 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 6.5. Parametr centralnej długości fali natomiast utrzymuje stałą wartość w pełnym założonym zakresie gięcia.



Rys. 6.7. 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 6.6. 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 6.8. poniżej.



Rys. 6.8. Zbliżony do liniowego zakres charakterystyk przejściowych zmian współczynnika transmisji modu  $LP_{11}$  dla kolejnych promieni gięcia włókna, mierzonych dla trzech stanów polaryzacji światła

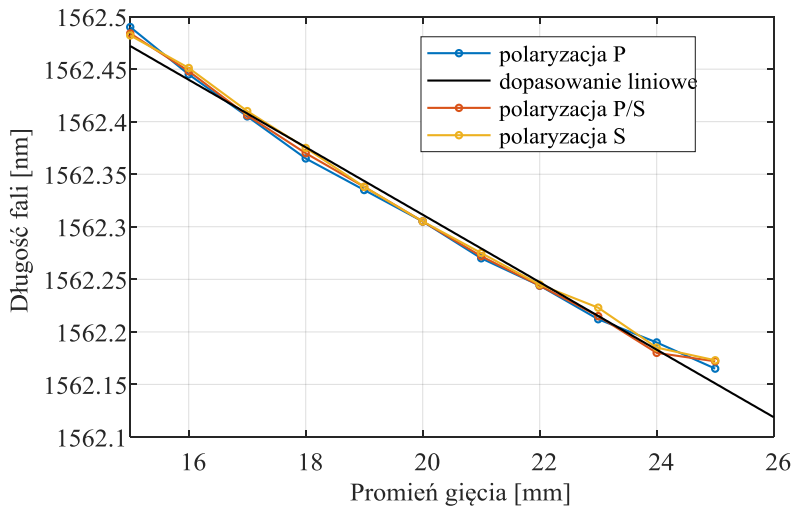
Do wykresów zamieszczonych powyżej dodatkowo podana została prosta przybliżenia liniowego wyznaczana dla uśrednionych wartości współczynnika transmisji wyznaczonych dla kolejnych promieni gięcia włókna. W tabeli 6.1. przedstawione zostały wartości współczynnika transmisji wyznaczane dla modu  $LP_{11}$  podczas zwiększania promienia gięcia włókna przy trzech stanach polaryzacji promieniowania wprowadzanego.

Tabela 6.1. Wartości współczynnika transmisji modu  $LP_{11}$  wyznaczane dla trzech przypadków polaryzacji oraz dla kilku promieni gięcia włókna

<b>Promień Gięcia [mm]</b>	<b>Wsp. transmisji modu <math>LP_{11}</math> polaryzacja P</b>	<b>Wsp. transmisji modu <math>LP_{11}</math> polaryzacja P/S</b>	<b>Wsp. transmisji modu <math>LP_{11}</math> polaryzacja S</b>	<b>Największa różnica</b>
15	0,1243	0,1087	0,1098	0,0156
16	0,1584	0,1567	0,1587	0,002
17	0,2159	0,2187	0,2274	0,0028
18	0,2847	0,2926	0,3016	0,0169
19	0,3458	0,3541	0,3594	0,0136
20	0,3972	0,405	0,4123	0,0151
21	0,4494	0,4556	0,4583	0,0089
22	0,4921	0,498	0,5004	0,0083
23	0,5308	0,5328	0,5346	0,0038

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 6.9. przedstawia charakterystyki przejściowe długości fali od zmian promieniowania gięcia, wyznaczane na podstawie widm mierzonych przy trzech opisanych wcześniej przypadkach polaryzacji światła.



Rys. 6.9. Charakterystyki przejściowe zmian centralnej długości fal modu  $LP_{11}$  dla kolejnych promieni gięcia włókna, mierzone dla trzech stanów polaryzacji światła

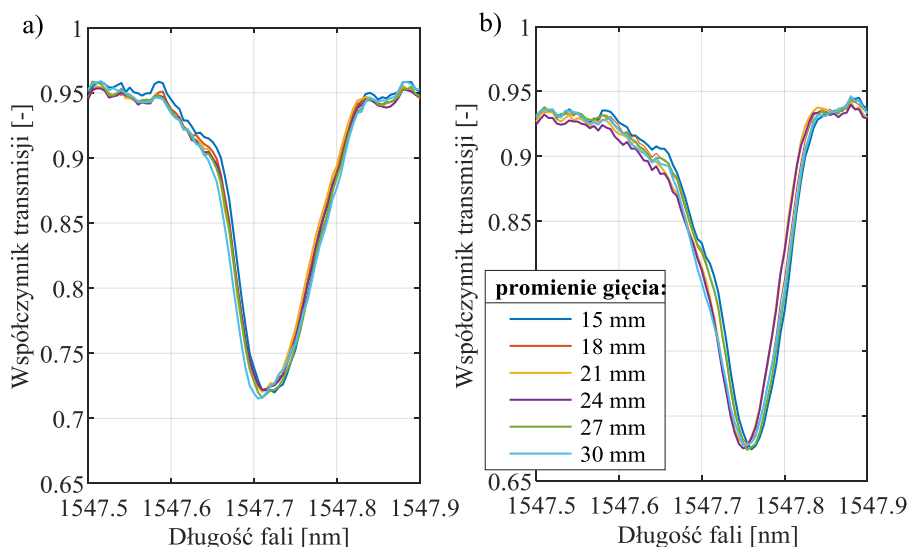
Przedstawione powyżej wykresy podobnie jak w przypadku rozpatrywanego wcześniej współczynnika transmisji oznaczają, iż zmiana kąta polaryzacji światła nie wpływa znacząco na zmiany kształtu charakterystyk przejściowych. Tabela 6.2. przedstawia zestawienie wyznaczonych centralnych długości fali modu  $LP_{11}$  przy trzech charakterystycznych przypadkach polaryzacji światła wejściowego dla zmieniającego się promienia gięcia włókna z zapisaną strukturą TFBG.

Tabela 6.2. Wartości centralnej długości fali modu  $LP_{11}$  wyznaczone dla trzech przypadków polaryzacji oraz zmiennego promienia gięcia włókna

Promień Gięcia [mm]	Centralna dl. fali modu $LP_{11}$ polaryzacja P	Centralna dl. fali modu $LP_{11}$ polaryzacja P/S	Centralna dl. fali modu $LP_{11}$ polaryzacja S	Największa różnica
15	1562,482	1562,484	1562,49	0,008
16	1562,51	1562,448	1562,445	0,006
17	1562,41	1562,406	1562,405	0,005
18	1562,375	1562,37	1562,365	0,01
19	1562,338	1562,338	1562,335	0,003
20	1562,305	1562,305	1562,305	0
21	1562,275	1562,272	1562,27	0,005
22	1562,245	1562,244	1562,244	0,001
23	1562,223	1562,215	1562,212	0,011
24	1562,185	1562,18	1562,19	0,01

Przyjmując, że dla wybranego zakresu promieni gięcia zmiana długości fali modu  $LP_{11}$  wynosi 0,309 nm, największa różnica pomiędzy długościami fali przedstawionymi w tabeli 6.2. wynosząca 0,011 nm przekłada się na błąd wyznaczania promienia gięcia związana ze stanem polaryzacji światła wprowadzanego rzędu 0,3203 mm.

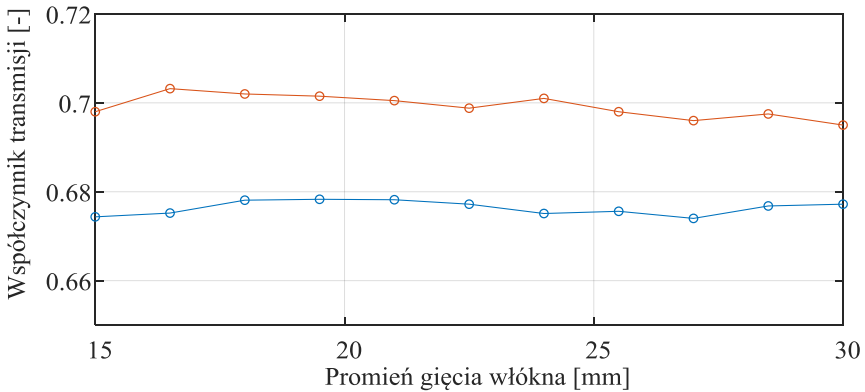
Kolejnym analizowanym przypadkiem jest wpływ zmian promienia gięcia na parametry spektralne wytypowane jako powiązane z kątem polaryzacji światła wejściowego. Wybrane mody płaszczowe wysokiego rzędu powinny zachować kształt spektrum podczas poddawania włókna światłowodowego zmianom promienia gięcia. W rozdziale 5.1.2. 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 6.10. 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. 6.10. 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

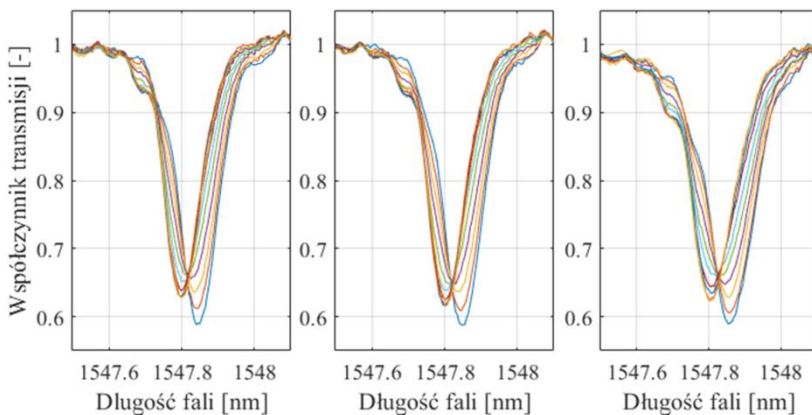
Charakterystyki przedstawione na rysunku 6.10. wskazują, że zmiana promienia gięcia włókna światłowodowego wpływa nieznacznie na współczynnik

transmisji wybranego modu płaszczowego zarówno w przypadku polaryzacji w płaszczyźnie  $xy$  jak również  $xz$ , co przedstawione zostało na rysunku 6.11.



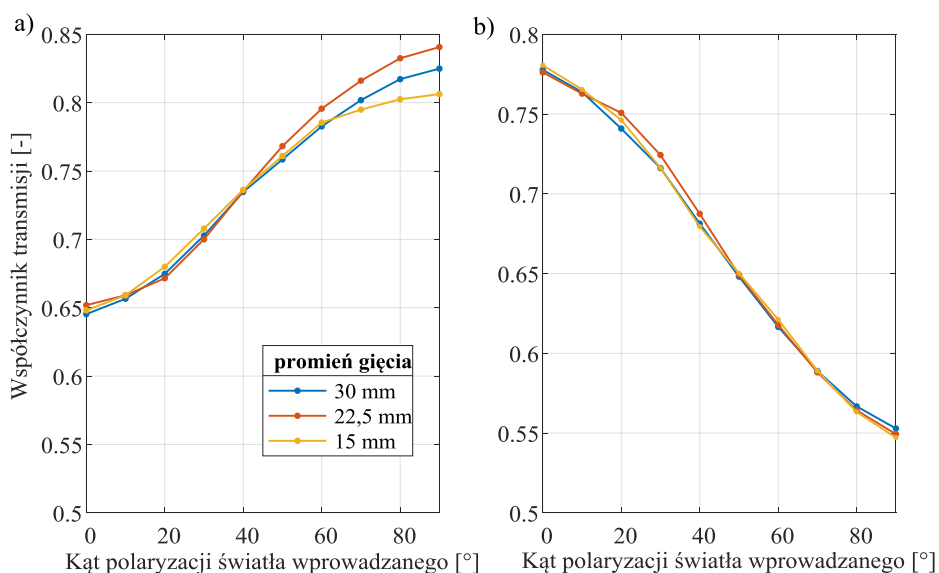
Rys. 6.11. Zmiany współczynnika transmisji modu  $LP_{016}$  przy zmianach promienia gięcia włókna w zakresie 15–30 mm.

Stołość 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 6.12. 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. 6.12. Wykresy przedstawiające charakterystyki spektralne modu  $LP_{016}$  siatki TFBG  $2^\circ$  mierzone dla kolejnych stanów polaryzacji i promieniach gięcia: a) 30 mm, b) 22,5 mm oraz c) 15 mm

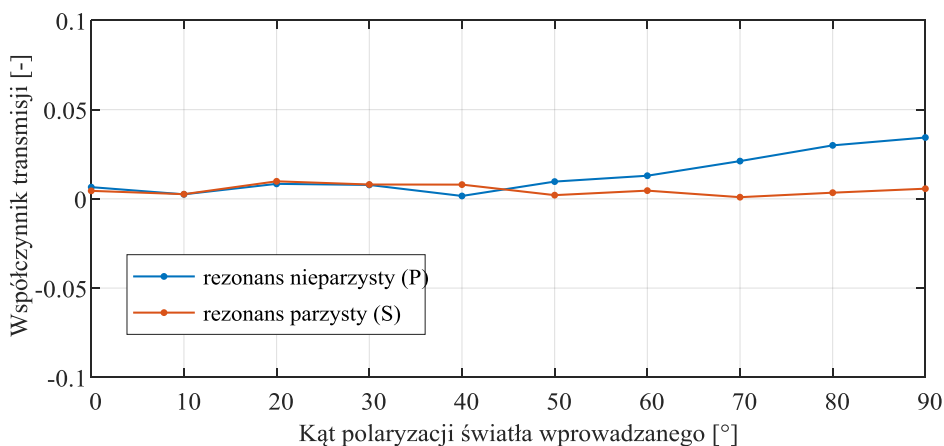
Charakterystyki przedstawione na rysunku 6.12. pokazują, iż zmiana promienia gięcia w zakresie od 30 mm do 15 mm nie wpływa znacząco na kształt widm modu rdzeniowego wyższego rzędu siatki TFBG 2°. Dodatkowo zmiany współczynnika transmisji, wyznaczone dla wybranych długości fali, powodowane zmianami kąta polaryzacji światła wprowadzanego mają podobny kształt dla każdego z badanych promieni gięcia. Na rysunku 6.13. przedstawione zostały zmiany współczynnika transmisji części modu płaszczowego LP<sub>016</sub>. Na rysunku 6.13.a 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 6.13.b przedstawione zostały wartości współczynnika transmisji wyznaczonego dla długości fali charakterystycznej dla sprzęgania przy polaryzacji typu S.



Rys. 6.13. Wykresy zmiany współczynnika transmisji części *even* (a) oraz *odd* (b) modu LP<sub>016</sub> siatki TFBG 2° mierzone dla kolejnych stanów polaryzacji przy trzech promieniach gięcia TFBG 2°

Pomiary przedstawione na rysunku 6.13. potwierdzają, iż sprzęganie części modu LP<sub>016</sub> 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. 6.13.a) w miarę skrętu kąta polaryzacji światła wprowadzanego w kierunku płaszczyzny  $\alpha$  różnica pomiędzy wartościami współczynnika transmisji ulega zwiększeniu co zostało odzwierciedlone na rysunku 6.13.

Rezonans charakterystyczny dla sprzęgania polaryzacji S zachowuje podobny kształt w miarę zmian polaryzacji światła dla wszystkich badanych promieni gięcia. Na rysunku 6.14. przedstawiono charakterystyki największej wartości różnicy pomiędzy wartościami współczynnika transmisji wyznaczanymi przy trzech promieniach gięcia, dla kolejnych kątów polaryzacji światła wprowadzanego.



Rys. 6.14. 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 6.14. wskazuje jednoznacznie, że amplituda rezonansu o dłuższej centralnej długości fali modu  $LP_{016}$  siatki skośnej o kącie  $2^\circ$  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. W tabeli 6.3. umieszczone zostały wartości współczynnika transmisji rezonansu parzystego modu  $LP_{016}$  wyznaczone dla trzech promieni gięcia włókna przy 10 wartościach kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego.



Tabela 6.3. Wartości współczynnika transmisji modu  $LP_{11}$  wyznaczone dla trzech przypadków promieni gięcia oraz 10 kątów obrotu polaryzacji światła

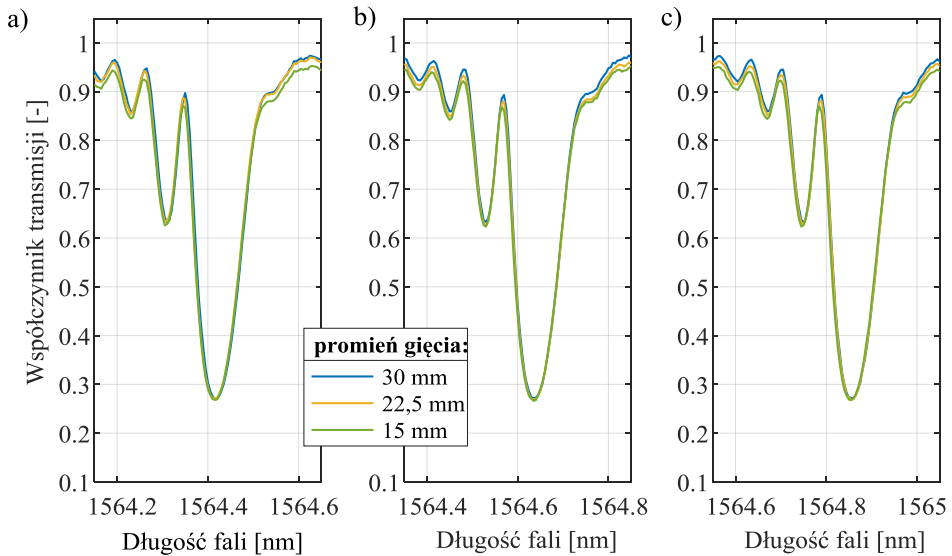
Kąt obrotu [°]	Wsp. transmisji $LP_{11}$			Największa różnica
	Promień gięcia 15 mm	Promień gięcia 22,5 mm	Promień gięcia 30 mm	
90	0,552845541	0,54935334	0,547137768	0,005708
80	0,566700323	0,564239773	0,563238627	0,003462
70	0,588867975	0,588058066	0,589	0,000942
60	0,61657754	0,617830932	0,621201717	0,004624
50	0,648089172	0,64916532	0,650179436	0,00209
40	0,681289641	0,687433155	0,679442966	0,00799
30	0,716162943	0,724294086	0,716247911	0,008046
20	0,740886441	0,7507308	0,746260434	0,009844
10	0,763760864	0,762793177	0,765416087	0,002623
0	0,777689873	0,776115415	0,780612643	0,004497

Dane przedstawione w tabeli 6.3. wskazują, iż 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 ( $90^\circ$ ) 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.

### 6.2.2. Wpływ zmian promienia zgięcia i temperatury na widmo TFBG $2^\circ$

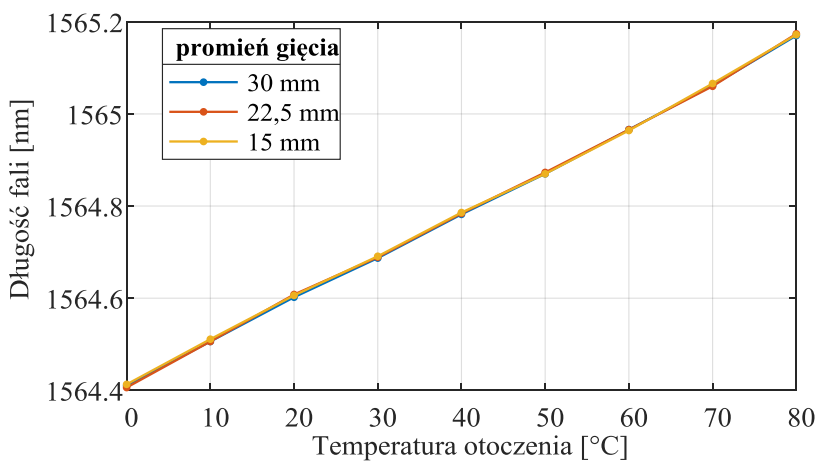
Analizując możliwość wykonywania pomiarów temperatury oraz promienia gięcia z wykorzystaniem pojedynczej struktury jako przetwornik pomiarowy, należy wykorzystać wyniki przedstawione w rozdziale 5.1., w którym zdefiniowane zostały parametry widmowe siatki TFBG  $2^\circ$  związane z pomiarem temperatury 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 6.15. przedstawia charakterystyki transmisyjne modu rdzeniowego mierzone dla promieni krzywizny z zakresie od 15 mm do 30 mm.



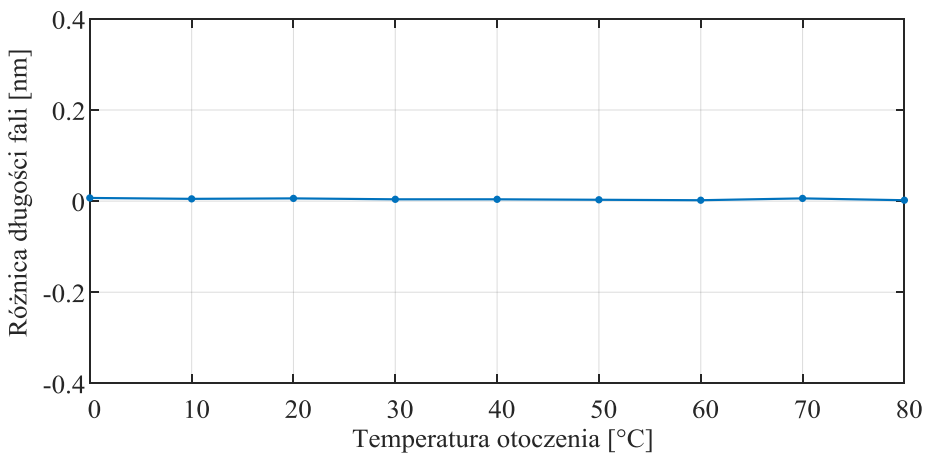
Rys. 6.15. Charakterystyki transmisyjne modu Bragga siatki TFBG o kącie  $2^\circ$  mierzone dla 3 promieni gięcia przy temperaturze otoczenia: a)  $20^\circ\text{C}$ ; b)  $40^\circ\text{C}$  oraz  $60^\circ\text{C}$

Charakterystyki spektralne przedstawione na rysunku 6.15. 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 6.16. 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. 6.16. Wykresy wartości długości fali modu Bragga wyznaczonych dla kolejnych temperatur otoczenia przy trzech wartościach promienia gięcia

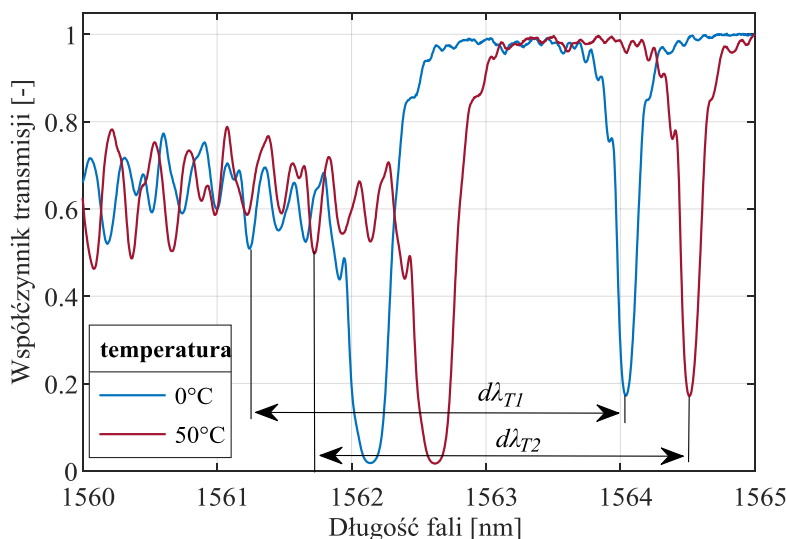
Rysunek 6.17. przedstawia największe różnice długości fali wyznaczone przy zadanej temperaturze i dla promieni gięcia 15 mm, 22,5 mm oraz 30 mm.



Rys. 6.17. 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°C.

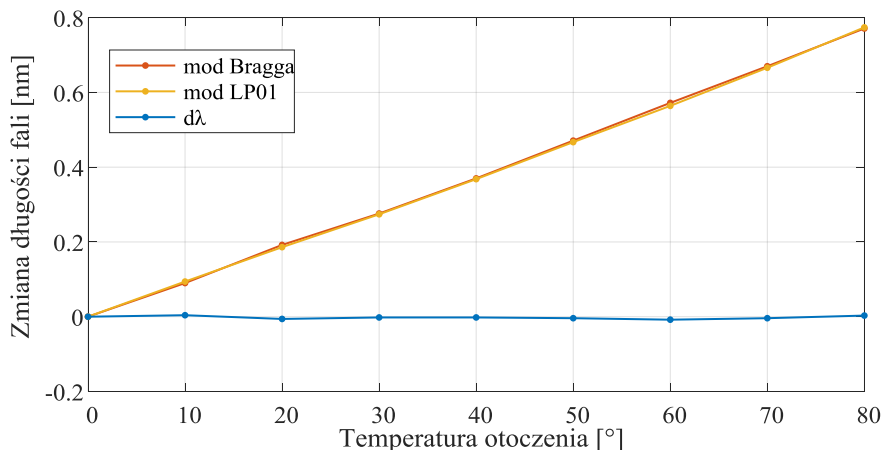
Drugim analizowanym przypadkiem jest wpływ zmian temperatury na parametry spektralne związane z wyznaczaniem promienia gięcia. Wyniki pomiarów przedstawione powyżej wskazują, że zwiększenie temperatury otoczenia powoduje przesunięcie charakterystyki widmowej w stronę fal dłuższych. Zatem długość fali modu  $LP_{01}$  ulegnie zmianie pod wpływem zmian temperatury. Jednakże w rozdziale 5.1.1. 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 6.18. przedstawione zostały widma transmisyjne siatki TFBG  $2^\circ$  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  $0^\circ\text{C}$  oraz  $50^\circ\text{C}$ .



Rys. 6.18. Charakterystyki transmisyjne modu Bragga oraz modów płaszczowych najniższych rzędów mierzone dla temperatur otoczenia wynoszących  $0^\circ\text{C}$  oraz  $50^\circ\text{C}$  z oznaczoną różnicą długości fali między modem Bragga a modem  $LP_{01}$

Na rysunku 6.18. 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  $0^\circ\text{C}$  do  $80^\circ\text{C}$ . Na rysunku 6.19. pokazane zostały zmiany długości fali wybranego modu

płaszczyzowego, 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.



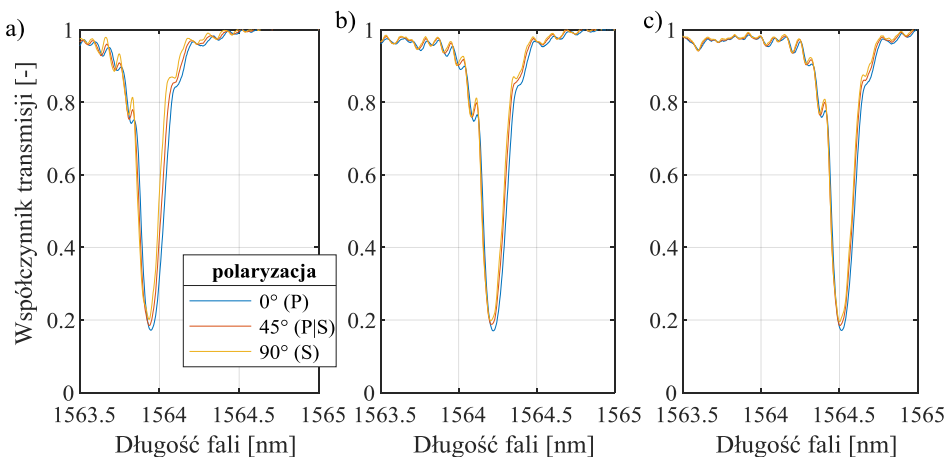
Rys. 6.19. Charakterystyki zmian długości fali modu Bragga oraz modu płaszczyzowego  $LP_{01}$

Jak widać wartość różnicy między długością fali modu Bragga oraz wybranego modu płaszczyzowego niskiego rzędu jest wartością stałą pomimo zmian temperatury otoczenia w zakresie  $0^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$ . 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  $0^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$ .

### 6.2.3. Wpływ zmian kąta obrotu i temperatury na widmo TFBG 2°

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. wykazano, że możliwe jest wykorzystanie struktury TFBG 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

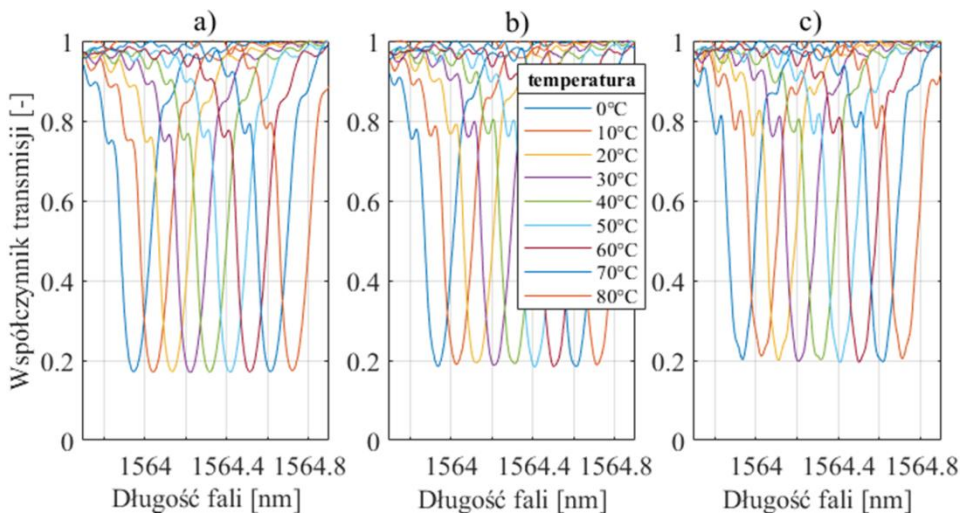
modu rdzeniowego. Badając wpływ zmian kąta obrotu na parametry widmowe związane z temperaturą otoczenia należy rozpocząć od określenia zmian długości fali Bragga w zależności od kąta polaryzacji światła wprowadzanego do struktury TFBG. Na rysunku 6.20. przedstawione zostały widma transmisyjne modu Bragga siatki TFBG  $2^\circ$  mierzone dla trzech charakterystycznych stanów polaryzacji przy temperaturze otoczenia: a)  $0^\circ\text{C}$ , b)  $30^\circ\text{C}$  oraz c)  $60^\circ\text{C}$ .



Rys. 6.20. Widma transmisyjne modu Bragga siatki TFBG  $2^\circ$  mierzone dla 3 stanów polaryzacji, przy temperaturze otoczenia: a)  $0^\circ\text{C}$ , b)  $30^\circ\text{C}$  oraz  $60^\circ\text{C}$

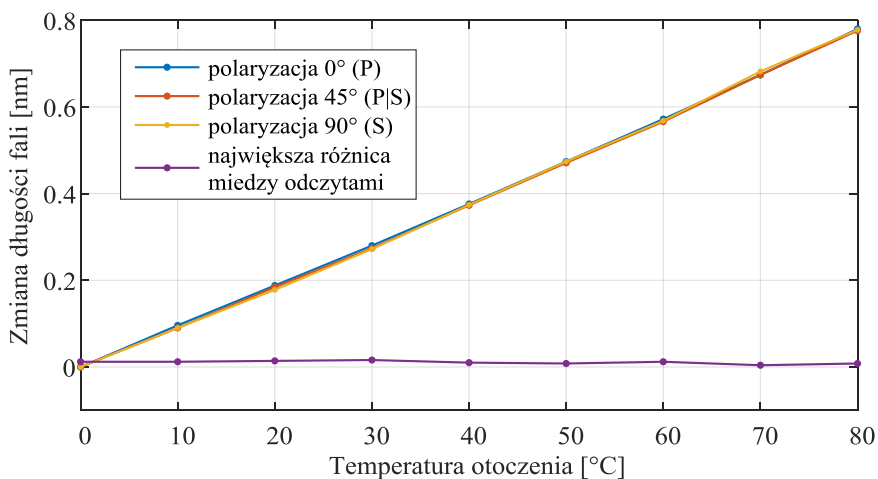
Zmiana kąta obrotu struktury przy różnych temperaturach otoczenia powoduje niewielką zmianę współczynnika transmisji oraz długości fali Bragga (Rys. 6.21.). W związku z faktem, iż w części pomiarów analizowanych w poprzednich rozdziałach parametrem koniecznym do wyznaczania wybranych wielkości jest centralna 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 6.21. mierzone były dla narastającej wartości temperatury w zakresie od  $0^\circ\text{C}$  do  $80^\circ\text{C}$ , przy trzech wartościach kąta obrotu polaryzacji: a)  $0^\circ$  (P); b)  $45^\circ$  (P|S) oraz c)  $90^\circ$  (S).



Rys. 6.21. Widma transyjsyjne modu Bragga siatki TFBG 2° mierzone dla narastajacej temperatury w zakresie od 0°C do 80°C, przy stanach polaryzacji: a) typu P; b) typu P/S oraz c) typu S

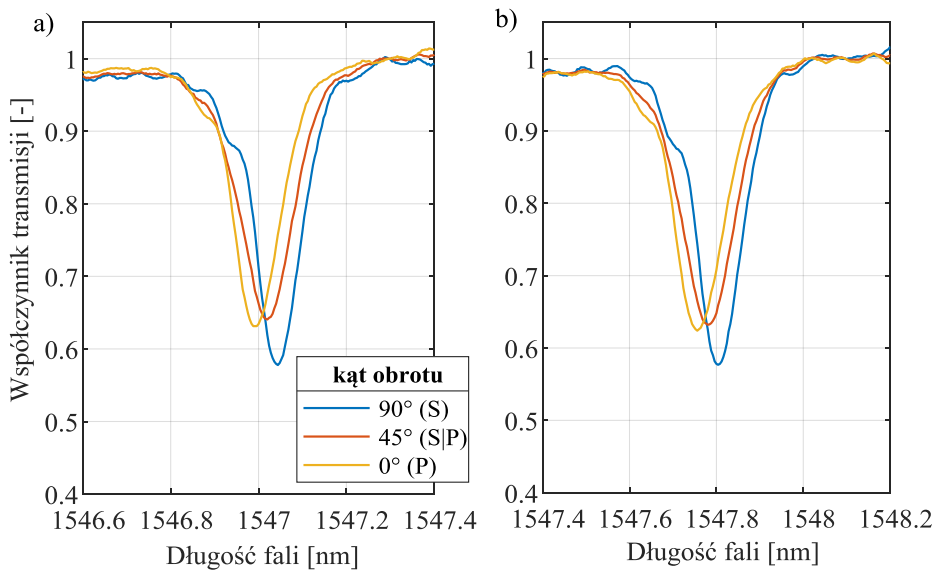
Na podstawie danych przedstawionych w formie graficznej na rysunku 6.21. wykonane zostaly wykresy przedstawiajace zmianę dlugosci fali modu Bragga przy zmieniajacej się temperaturze otoczenia, wyznaczone dla 3 charakterystycznych przypadków kąta obrotu polaryzacji. Dodatkowo, na rysunku 6.22. zamieszczone zostaly wartosci rozrzutu pomiedzy wartosciami  $\lambda_B$  wyznaczonymi przy zadanych stanach polaryzacji.



Rys. 6.22. Charakterystyki zmian dlugosci fali Bragga wyznaczonych dla temperatur z zakresu 0–80°C, dla trzech charakterystycznych kątów obrotu polaryzacji oraz wykres najwiekszej różnicy tych wartosci

Dane przedstawione w formie wykresów przedstawionych na rysunku 6.22. 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 6.23. przedstawione zostały widma transmisyjne modu LP<sub>016</sub> mierzone dla trzech stanów polaryzacji (P, S oraz S|P) przy dwóch temperaturach otoczenia: a) 0°C oraz b) 80°C.

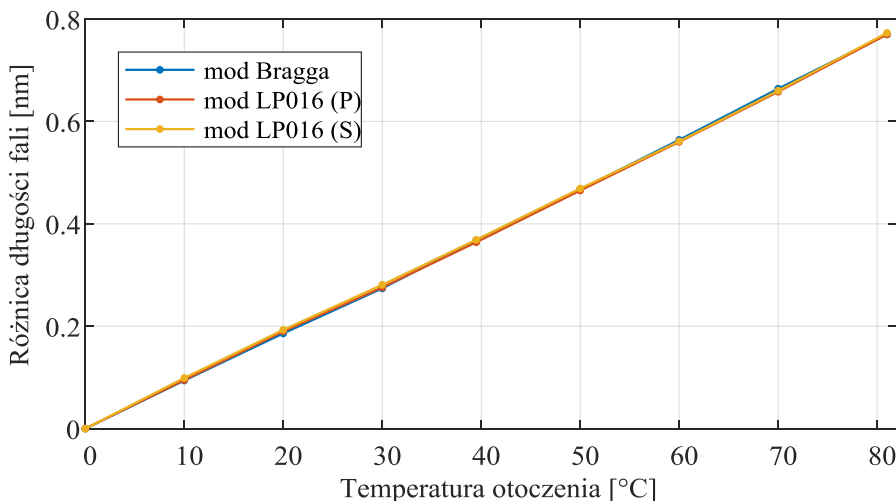


Rys. 6.23. Widma transmisyjne modu LP<sub>016</sub> siatki TFBRG o kącie 2° mierzone dla trzech charakterystycznych kątów obrotu, przy temperaturach: a) 0°C oraz b) 80°C

Porównanie charakterystyk widmowych przedstawionych na rysunku 6.23. 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

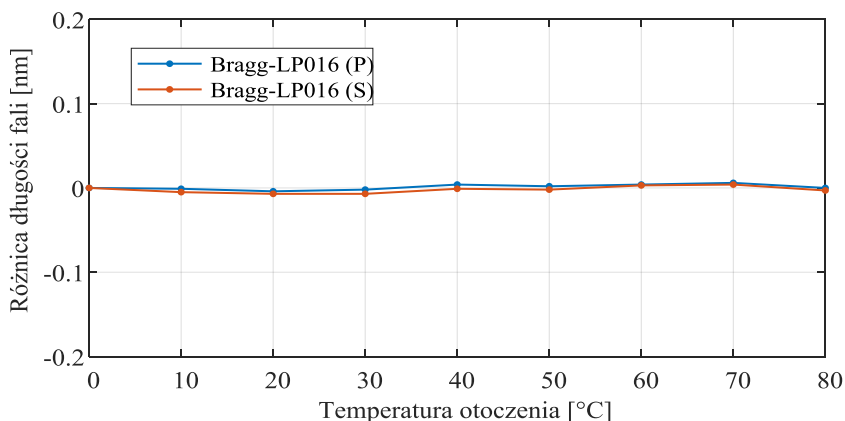


wielkości konieczne jest śledzenie zmian modu Bragga. Długość fali, dla której badany jest współczynnik transmisji powinna być modyfikowana zgodnie z wartością przesunięcia spektralnego modu rdzeniowego, który jest niezależny od zmian polaryzacji. Na rysunku 6.24. przedstawiona została charakterystyka wartości przesunięcia długości fali modu Bragga oraz modu płaszczonego LP<sub>016</sub> wyznaczana dla długości fali minimów związanych z polaryzacją typu P oraz typu S.



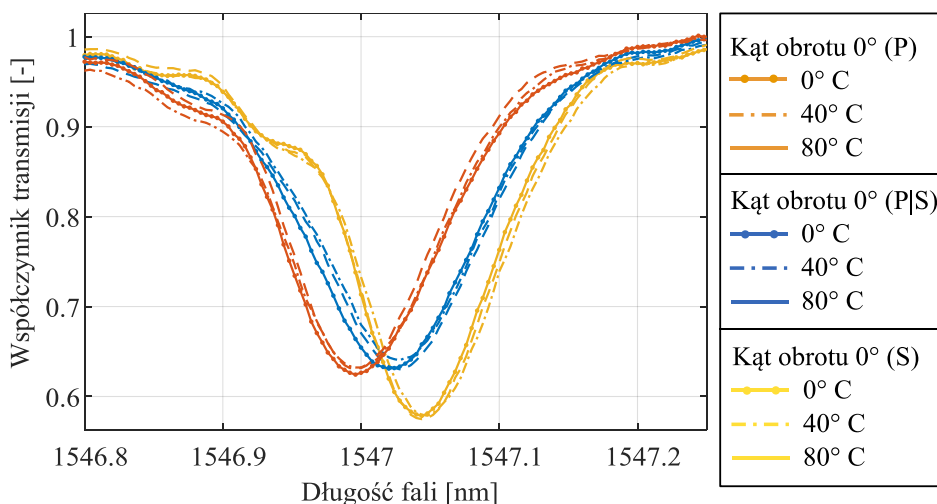
Rys. 6.24. Zmiany długości centralnych długości fali modu rdzeniowego oraz modu płaszczonego LP<sub>016</sub> przy przeciwnych kierunkach płaszczyzny polaryzacji, mierzone w zakresie temperatur 0–80°C

Wykresy przedstawione powyżej pokazują, że zmiana długości fali modu płaszczonego LP<sub>016</sub> 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 płaszczonego. Możliwe jest zatem określanie długości fali, dla której badany jest współczynnik transmisji modu LP<sub>016</sub> w oparciu o wyznaczanie różnicy między jego długością fali oraz długością fali modu rdzeniowego. Na rysunku 6.25. przedstawione zostały różnice pomiędzy długością fali Bragga oraz długością fali rezonansu charakterystycznego dla polaryzacji P (niebieski) oraz polaryzacji S (czerwony) modu LP<sub>016</sub> dla kolejnych wartości temperatury otoczenia.



Rys. 6.25. Wartości różnicy pomiędzy długością fali modu Bragga oraz centralnej długości fali modu LP<sub>016</sub> wyznaczone dla polaryzacji typu P oraz typu S

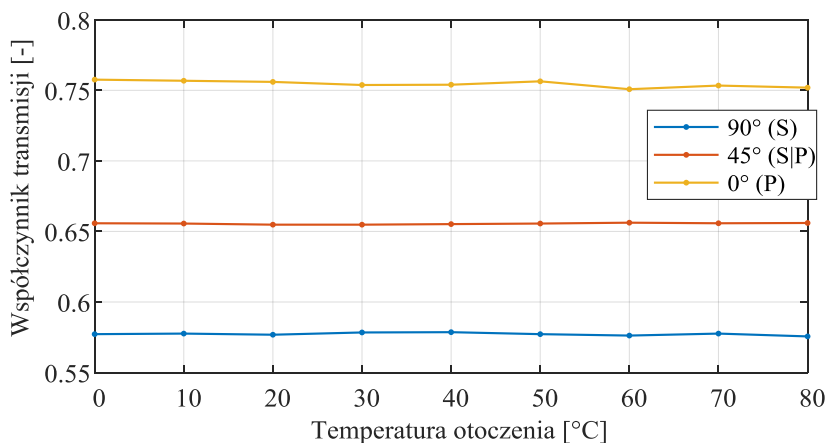
Uśredniona wartość różnicy pomiędzy długością fali Bragga a długością fali modu LP<sub>016</sub> wynosi 16,731 nm. Na rysunku 6.26. przedstawione zostały widma transmisyjne modu LP<sub>016</sub> mierzone dla trzech charakterystycznych wartości polaryzacji: 0° (P), 45° (P|S) oraz 90° (S), dla trzech temperatur otoczenia siatki, tj. 0°C, 40°C oraz 80°C.



Rys. 6.26. Widma transmisyjne modu LP<sub>016</sub> 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. 6.26.). Właściwość ta pozwala na stwierdzenie, że zmiany temperatury w niewielki sposób wpływają na współczynnik transmisji modu LP<sub>016</sub> niezależnie od kąta polaryzacji światła wprowadzanego. Dzięki temu, możliwe jest wyznaczanie kąta obrotu względnego przy zmiennej wartości temperatury otoczenia. Na rysunku 6.27. przedstawione zostały przebiegi wartości współczynnika transmisji części parzystej modu płaszczowego LP<sub>016</sub>. Współczynnik ten wyznaczany był metodą linii spektralnej dla długości fali  $\lambda_S$  wyznaczonej jako różnica pomiędzy  $\lambda_B$  a stałą wartością 16,731 nm wyznaczoną na drodze eksperymentalnej.

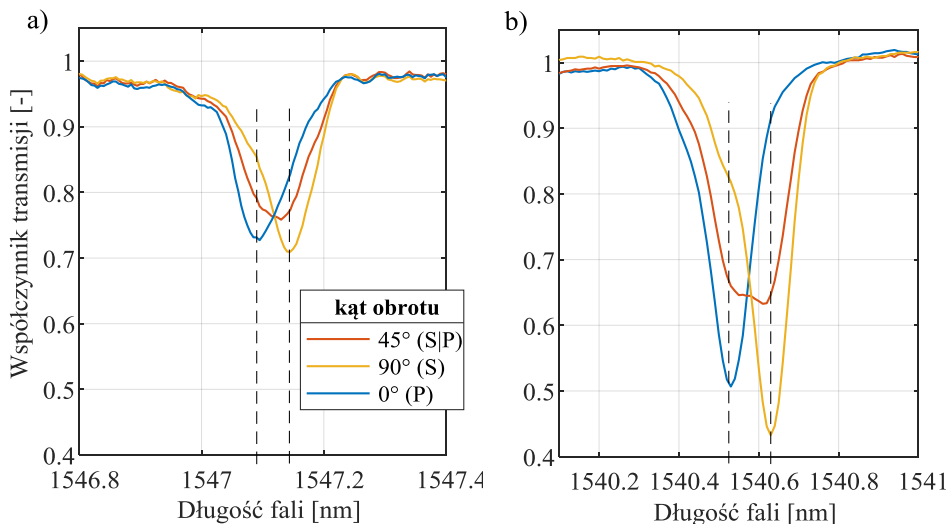


Rys. 6.27. Wartości współczynnika transmisji modu LP<sub>016</sub> wyznaczone dla części parzystej na długości fali wynoszącej  $\lambda_S$

Z rysunku 6.27. wynika, że w przypadku zmian temperatury w zakresie od 0°C do 80°C współczynnik transmisji wyznaczany dla zdefiniowanej długości fali  $\lambda_S$  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.

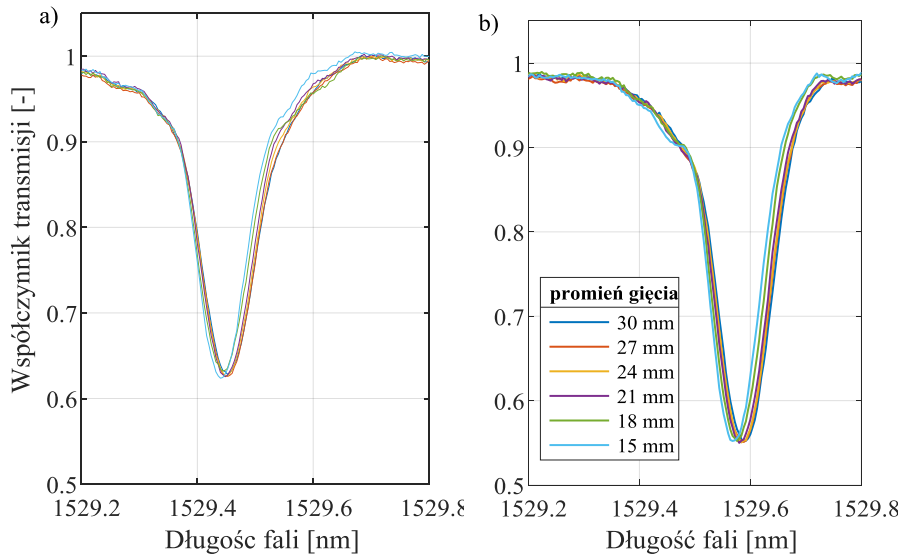
### 6.3. Jednoczesny wpływ promienia zgięcia, kąta obrotu i temperatury na widma siatki TFBG 4°

W rozdziale 6.2. przedstawione zostały parametry spektralne wyznaczone na podstawie widm transmisyjnych mierzonych dla periodycznych struktur światłowodowych o kącie pochylenia 2 stopnie. Relatywnie niewielki kąt pochylenia kolejnych płaszczyzn modulacji współczynnika załamania powoduje, stosunkowo wąski zakres długości fal, dla których sprzęgane są mody płaszczowe. Mody płaszczowe najwyższych rzędów posiadają niską wartość współczynnika odbicia, przez co głębokość obserwowanych w widmie transmisyjnym zmian jest relatywnie niewielka. W konsekwencji różnice współczynnika transmisji mierzone dla zmieniających się kierunków polaryzacji światła wprowadzanego są niewielkie. Sposobem na zwiększenie czułości wybranych parametrów spektralnych struktur TFBG na wzajemny skręt płaszczyzny polaryzacji światła jest zwiększenie kąta pochylenia wewnętrznych perturbacji współczynnika załamania. Rysunek 6.28. przedstawia widma transmisyjne wybranych modów płaszczowych o najsilniejszej odpowiedzi na zmiany polaryzacji światła wprowadzanego, siatek o kątach 2 oraz 4 stopnie. Oba rysunki zostały wykonane przy zachowaniu tego samego zakresu współczynnika transmisji co ułatwia obserwację różnicy w czułości widm siatek o podanych powyżej kątach pochylenia.



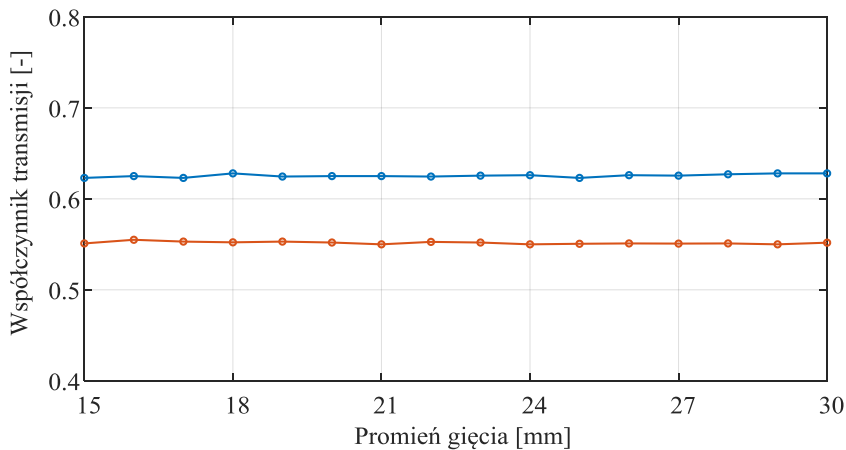
Rys. 6.28. Widma transmisyjne modów płaszczowych wysokiego rzędu, odznaczające się największą zmianą współczynnika transmisji pomiędzy kątami obrotu polaryzacji P, S|P oraz S, dla siatek TFBG o kątach 2° (a) oraz 4° (b)

Przy TFBG o większym kącie pochylenia struktury wewnętrznej następuje wyraźniejsza separacja w dziedzinie długości fali modów sprzęganych dla stanów S oraz P polaryzacji światła wprowadzanego (Rys. 6.28.). Zjawisko to ma pozytywny wpływ na możliwości zastosowania technik interrogacji tych modów zamiast zastosowania analizatora widma optycznego. Przykład układu przesłuchującego jest opisany w pracy [87], gdzie zaprezentowano sposób rejestracji kąta skręcenia polaryzacji światła wprowadzanego poprzez zastosowanie dwóch filtrów w postaci siatek FBG o długościach fal dopasowanych do długości fal modów S oraz P. Filtry te odbijając selektywnie światło o długościach fal odpowiadających tym modom pozwoliły na budowę układu ratiometrycznego, wykorzystującego stosunek ich mocy. Jest to przykład układu, którego konstrukcja pozwala na eliminację wpływu zmian mocy źródła światła. Pierwszym analizowanym krokiem przy jednoczesnych pomiarach kąta obrotu oraz promienia gięcia struktury TFBG jest określenie wpływu zmian krzywizny włókna w założonym zakresie, na zmiany parametrów widmowych wybranego modu płaszczowego TFBG  $4^\circ$ , związanego z kątem polaryzacji światła wprowadzanego. W niniejszym rozdziale opisane zostały charakterystyki wybranego modu płaszczowego  $LP_{118}$ . Rezonans ten został wytypowany w drodze wstępnej analizy zmian parametrów widmowych kolejnych modów dla włókna poddanego gięciu o promieniu w zakresie 15–30 mm. Mod  $LP_{118}$  ze względu na charakter widma siatki TFBG  $4^\circ$  zachowuje wysoką wartość sprzęgania skutkującą dużą amplitudą spektrum. Na rysunku 6.29. przedstawione zostały widma modu  $LP_{118}$  mierzone dla dwóch charakterystycznych przypadków polaryzacji światła wprowadzanego: a) typu P oraz b) typu S. Zestawy charakterystyk widmowych przedstawione na rysunku 6.29. wskazują jednoznacznie, że zmiana promienia gięcia w zakresie 15–30 mm nie wpływa w sposób znaczący na zmianę współczynnika transmisji oraz długość fali poszczególnych rezonansów.



Rys. 6.29. Widma transmisyjne modu  $LP_{118}$  mierzone dla kilku promieni gięcia przy dwóch skrajnych stanach polaryzacji światła wprowadzanego: a) stan P; b) stan S

Zarówno rezonans charakterystyczny dla polaryzacji typu P jak i ten związany ze sprzężeniem typu S zachowują podobny stopień niewrażliwości amplitudy w miarę zacieśniania krzywizny co przedstawione zostało na rysunku 6.30.

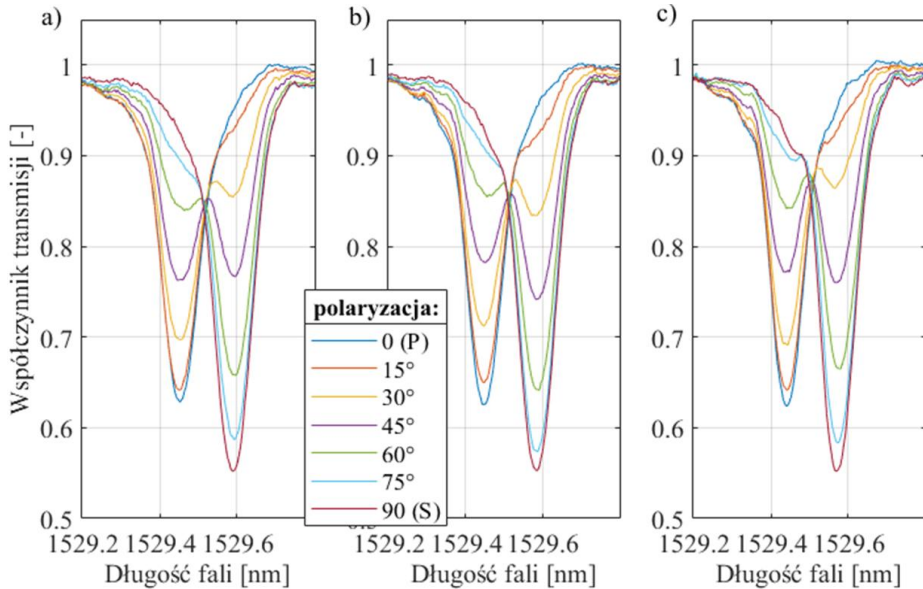


Rys. 6.30. Współczynnik transmisji modu  $LP_{118}$  wyznaczony dla dwóch przeciwnych stanów polaryzacji przy zmianach promienia gięcia

Zakres na osi y rysunku 6.30. dobrany został do zakresu zmian współczynnika transmisji wyznaczonego metodą linii spektralnej rezonansu S charakteryzującego się większą wartością centralnej długości fali. Dzięki

odniesieniu do zakresu potencjalnych zmian widoczne jest, że zmiana promienia gięcia w tym zakresie nieznacznie, ale jednak wpływa na współczynnik transmisji wybranego modu płaszczowego. Zacieśnianie krzywizny powoduje zmniejszenie wartości współczynnika transmisji.

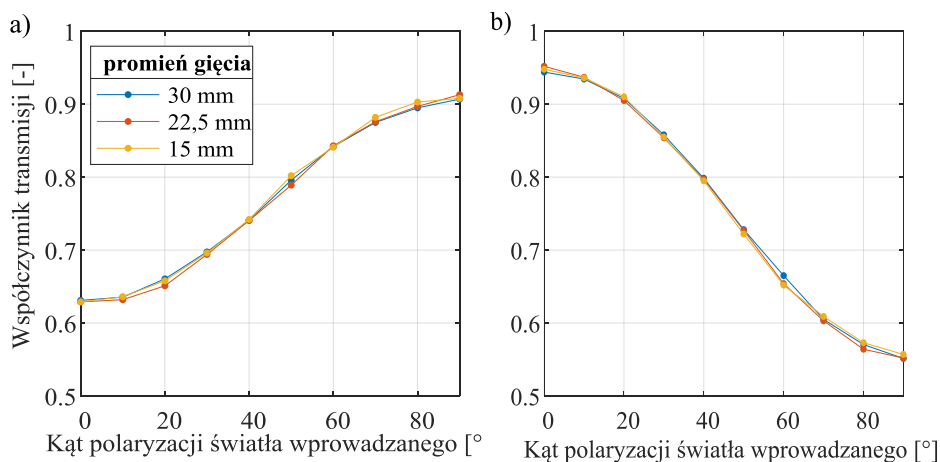
Zmiany parametrów widmowych spektrum wybranego modu płaszczowego wysokiego rzędu  $LP_{118}$  przedstawione zostały na rysunku 6.31. W porównaniu do wybranego modu siatki TFBG  $2^\circ$  występuje tutaj większa separacja rezonansów związanych z polaryzacją P oraz S. Dzięki temu możliwe jest zachowanie większej selektywności w śledzeniu zmian amplitudy rezonansów, co pozytywnie wpływa na możliwości budowania układów pomiarowych opartych o filtry optyczne w postaci siatek Bragga. Na rysunku 6.31. przedstawione zostały widma transmisyjne modu  $LP_{18}$  mierzone dla kolejnych kątów obrotu polaryzacji światła wprowadzanego przy trzech promieniach gięcia: a) 30 mm, b) 22,5 mm oraz c) 15 mm.



Rys. 6.31. Widma transmisyjne modu  $LP_{118}$  TFBG o kącie  $4^\circ$  mierzone dla kolejnych wartości kąta polaryzacji światła wprowadzanego, przy promieniach zgięcia: a) 30 mm; b) 22,5 mm; c) 15 mm

Analiza rysunku 6.31. wskazuje, iż zmiany spektralne modu  $LP_{118}$  powodowane zmianami kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego są podobne dla każdego z wybranych promieni gięcia. W każdym przypadku krzywizny możliwe jest określenie centralnych długości fali rezonansu nieparzystego i parzystego, dla których następuje monotoniczna zmiana współczynnika transmisji. W porównaniu z wybranym modem płaszczowym wysokiego rzędu

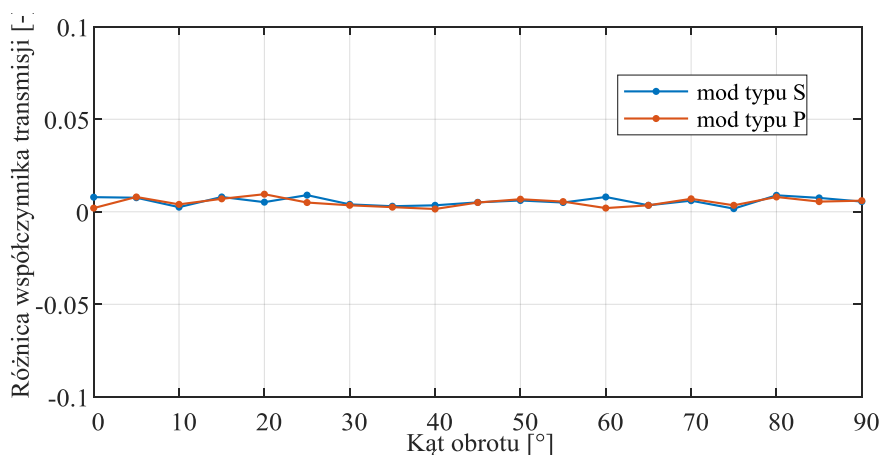
siatki skośnej o kącie  $2^\circ$  istotnie większy jest zakres zmian współczynnika transmisji dla centralnej długości fali modu, powodowany skrajnymi ustawieniami polaryzacji światła, wynoszący około 0.5. Należy w tym miejscu powtórzyć, iż analizowany mod płaszczowy  $LP_{118}$  nie charakteryzuje się największym zakresem zmian, jaki można znaleźć w przypadku siatki TFBG  $4^\circ$ . Został on wybrany w ramach wstępnej analizy jako rezonans charakteryzujący się najmniejszą zmianą parametrów widmowych przy zmianach promienia gięcia w wybranym zakresie. Na rysunku 6.32. przedstawione zostały przebiegi krzywe współczynnika transmisji rezonansu P o mniejszej oraz rezonansu S o większej centralnej długości fali wyznaczanych dla zmian obrotu polaryzacji światła wprowadzanego. Charakterystyki wyznaczone były dodatkowo przy trzech różnych promieniach gięcia włókna światłowodowego w miejscu wytworzonej siatki TFBG o kącie  $4^\circ$ .



Rys. 6.32. Wartości współczynnika transmisji modu  $LP_{118}$  wyznaczone dla trzech promieni gięcia w przypadku modów charakterystycznych dla dwóch stanów polaryzacji: typu S (a) oraz typu P (b)

Wykresy przedstawiające zmiany współczynnika transmisji powodowanych zmianą kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego potwierdzają, że wpływ promienia gięcia w zakresie od 15 mm do 30 mm nie wpływa na ich charakter. Największa różnica pomiędzy wartościami wyznaczonymi dla różnych promieni gięcia przy danym kącie obrotu płaszczyzny polaryzacji wynosi 0,0089. Wartości największej różnicy amplitudy wyznaczonej metodą linii spektralnej dwóch rezonansów (P i S) przy trzech promieniach gięcia przedstawione zostały na rysunku 6.33.





Rys. 6.33. Wykresy przedstawiające zmiany współczynnika transmisji rezonansów P oraz S modu LP<sub>118</sub>, wyznaczone dla kolejnych promieni gięcia włókna

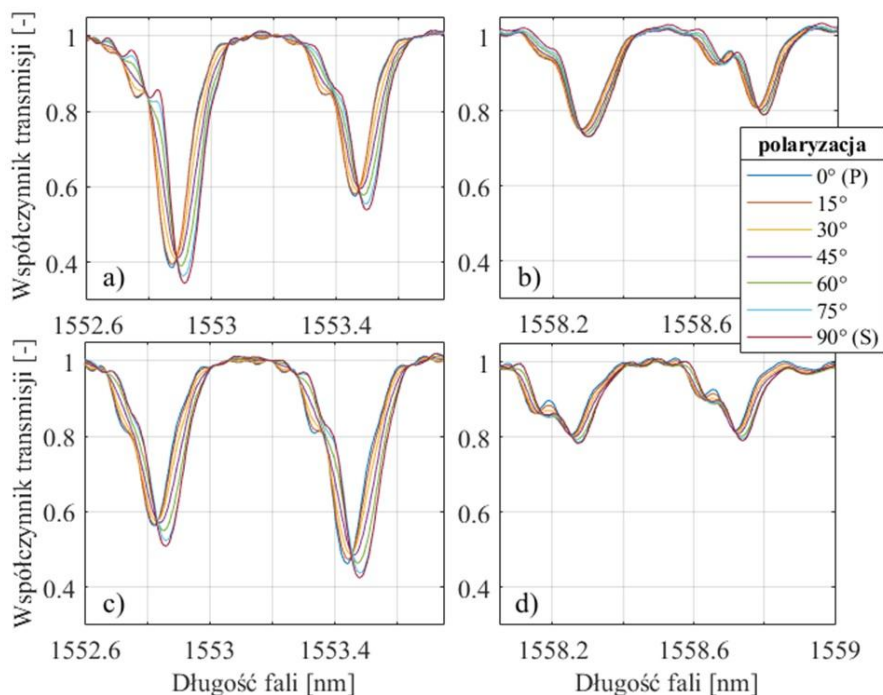
Warto również zauważyć, że zakres zmian amplitudy dla pełnego zakresu kątów obrotu jest większy w przypadku rezonansu związanego z polaryzacją typu S (o większej długości fali). Analizując wykresy z rysunku 6.33. należy zwrócić uwagę, że zakres wartości na osi y wynosi 0,2. W tabeli 6.4. przedstawione zostały wartości współczynnika transmisji wyznaczone dla długości fali charakterystycznej dla rezonansu związanego z polaryzacją typu S, którego amplituda zmienia się w szerszym zakresie.

Tabela 6.4. Wartości współczynnika transmisji modu LP<sub>016</sub> wyznaczone dla trzech przypadków promieni gięcia oraz zmiennego kąta obrotu polaryzacji światła

Kąt obrotu [°]	Współczynnik transmisji modu LP <sub>016</sub>			Największa różnica
	Promień gięcia 15 mm	Promień gięcia 22,5 mm	Promień gięcia 30 mm	
0	0,9441	0,952	0,948	0,0079
10	0,9345	0,937	0,936	0,0025
20	0,908	0,905	0,9102	0,0052
30	0,858	0,854	0,855	0,0004
40	0,7985	0,797	0,795	0,0035
50	0,7281	0,727	0,723	0,0051
60	0,6614	0,654	0,652	0,0084
70	0,605	0,603	0,609	0,0006
80	0,5705	0,5641	0,573	0,0089
90	0,5515	0,552	0,557	0,0055

W przypadku zmian promienia gięcia w zakresie od 15 mm do 30 mm, największa różnica w wartościach współczynnika transmisji wyznaczana dla konkretnej wartości kąta obrotu wynosi 0,0089. Przy zmianach współczynnika transmisji w zakresie 0,4 dla pełnego zakresu zmian kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego, przekłada się to na błąd wyznaczania kąta obrotu względnego na poziomie  $2,0025^\circ$ .

W dalszej części niniejszego rozdziału analizie poddano wpływ zmian kąta obrotu polaryzacji światła wejściowego na parametry spektralne wybranego modu LP siatki TFBG  $4^\circ$  oznaczone jako charakterystyczne dla zmiany promienia gięcia. Na rysunku 6.34. przedstawione zostały widma transmisyjne modów płaszczowych struktury TFBG  $4^\circ$ , których parametry widmowe zostały powiązane w rozdziale 5.2.1. z wartością promienia krzywizny włókna z zapisaną siatką.



Rys. 6.34. Widma transmisyjne dwóch wybranych modów płaszczowych struktury TFBG  $4^\circ$  mierzone dla zmian kąta obrotu polaryzacji dla dwóch promieni gięcia: a) 30 mm oraz b) 15 mm

Zmiana kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego w istotny sposób wpływa na zmiany parametrów widmowych modów płaszczowych niskich rzędów, które zostały zidentyfikowane jako związane z wartością promienia

gięcia (Rys. 6.34.). Dodatkowo, obrót polaryzacji światła wprowadzanego zmienia nie tylko współczynnik transmisji ale również długość fali modów. W związku z tym, nie jest możliwe uzyskanie pomiarów promienia gięcia włókna niezależnych od kąta polaryzacji światła wprowadzanego do struktury TFBG.

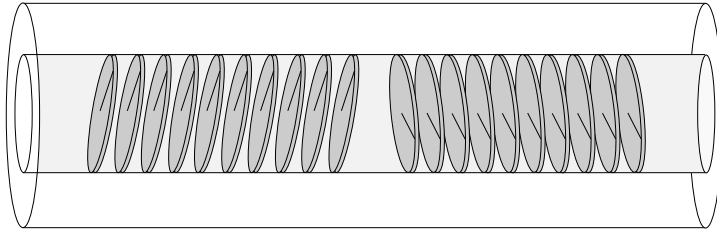
Dodatkowo, na bazie wyników przedstawionych w rozdziałach 5. oraz 6. można stwierdzić, że podobnie jak w przypadku siatki  $2^\circ$ , mody o parametrach powiązanych z wartością promienia gięcia oraz kąta obrotu ulegają pod wpływem temperatury wyłącznie przesunięciu długości fali. Właściwość ta umożliwia uzyskanie pomiaru promienia krzywizny czy kąta obrotu polaryzacji światła wprowadzanego niezależnego od temperatury otoczenia, poprzez odniesienie do modu rdzeniowego. Jednakże, analizując charakterystyki widmowe siatek TFBG o kącie pochylenia struktury wewnętrznej  $4^\circ$  widoczne jest, że wyraźnemu osłabieniu ulega sprzężanie rezonansu rdzeniowego, przez co jego amplituda jest zdecydowanie mniejsza niż w przypadku siatki o kącie  $2^\circ$ . Z tego powodu badania możliwości prowadzenia pomiarów trzech wielkości fizycznych z wykorzystaniem pojedynczej struktury TFBG o kącie  $4^\circ$  w charakterze przetwornika zostały zakończone na tym etapie.

#### **6.4. Modyfikacje struktury TFBG poprawiające selektywność czujnika podczas pomiaru wybranych wielkości fizycznych**

Niniejszy rozdział pokazuje modyfikacje struktury wewnętrznej siatek TFBG oraz ich wpływ na charakterystyki spektralne. Przedstawia koncepcje oraz wyniki badań opublikowane w pracach autora rozprawy lub innych członków zespołu badawczego Laboratorium Optoelektroniki i Techniki Laserowej Politechniki Lubelskiej.

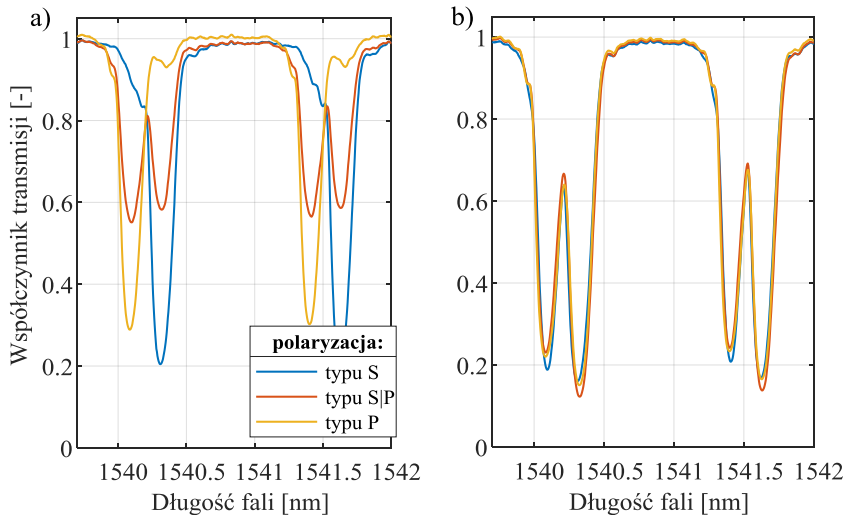
Parametry widmowe oraz charakterystyki przejściowe związane z wyznaczeniem wybranych wielkości fizycznych przedstawione w poprzednich rozdziałach wskazują, że wielkości te wpływają na siebie. Uzyskanie zwiększonej niezależności pomiaru wybranej wielkości fizycznej od innych, które mogą zakłócać pomiar może być wykonane poprzez modyfikacje struktury wewnętrznej siatki TFBG. Geometria struktury siatek o pochyłonych płaszczyznach dyfrakcyjnych pozwala na dokonywanie modyfikacji innych niż w przypadku siatek prostych. Wprowadzanie zmian w geometrii układu prążków dyfrakcyjnych wymaga szczególnej dbałości o zachowanie ustalonych warunków wytwarzania takich struktur. Uzyskanie pożądaných właściwości spektralnych wymaga najczęściej szczególnie dokładnego dopasowania długości fal poszczególnych modów. Jedną z możliwości wpływania na charakterystyki spektralne jest stworzenie struktury będącej złożeniem dwóch siatek TFBG

skręconych względem siebie o wybrany kąt. Przykładem zastosowania takich bardziej skomplikowanych struktur jest przedstawiona w pracy [108] koncepcja złożenia siatek skręconych względem siebie o kąt  $90^\circ$ , tworząc tzw. P-TFBB (ang. *perpendicular tilted fiber Bragg grating*). Rysunek 6.35. przedstawia schematycznie pokazaną strukturę wewnętrzną takiej siatki.



Rys. 6.35. Schemat struktury wewnętrznej siatki P-TFBB utworzonej poprzez złożenie dwóch struktur TFBB skręconych wobec siebie o  $90^\circ$

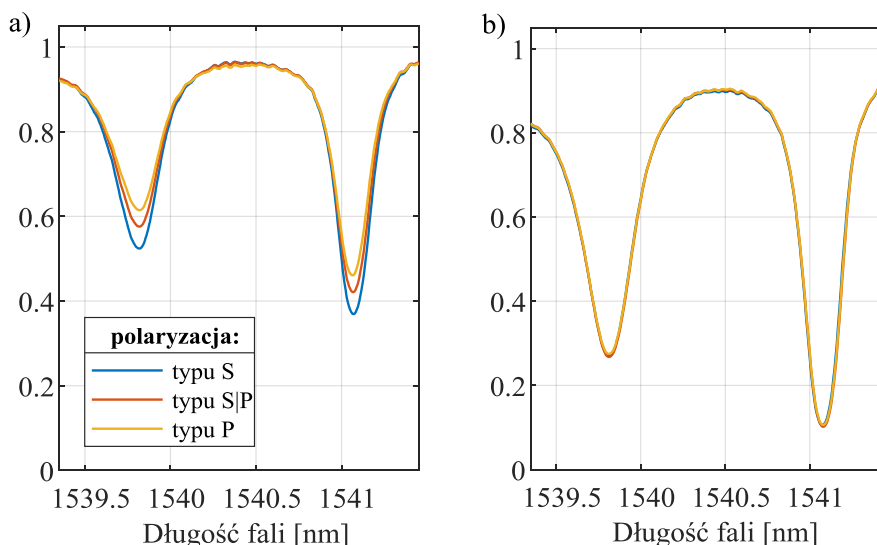
Struktura wewnętrzna siatki P-TFBB pozwala na zmniejszenie czułości parametrów widmowych na zmianę polaryzacji światła wprowadzanego, poprzez dopasowanie długości fali badanego modu płaszczowego.



Rys. 6.36. Widma transmisyjne mierzone dla trzech przypadków polaryzacji światła wejściowego, dla struktur: a) TFBB; b) P-TFBB w otoczeniu powietrza

Wykorzystując fakt, że zmiana kąta polaryzacji światła wprowadzanego zmienia współczynnik transmisji części parzystej modu płaszczowego w przeciwnym kierunku, niż w przypadku części nieparzystej tego modu możliwe jest zmniejszenie wpływu kąta płaszczyzny polaryzacji światła na charakterystyki widmowe. Rysunek 6.36. przedstawia porównanie charaktery-

styk widmowych mierzonych dla skrajnych przypadkach polaryzacji światła wejściowego dla siatek TFBG oraz P-TFBG [108]. Na rysunku 6.36.a przedstawione zostały widma transmisyjne modu płaszczyznowego siatki TFBG o kącie pochylenia  $7^\circ$  mierzone dla polaryzacji światła wprowadzanego typu S, P oraz S|P. Natomiast na rysunku 6.36.b pokazano widma transmisyjne siatki P-TFBG stworzonej poprzez złożenie dwóch struktur TFBG o tym samym kącie nachylenia prążków dyfrakcyjnych wynoszących  $7^\circ$ , skręconych w stosunku do siebie o  $90^\circ$ . Dla wybranych długości fal, charakterystycznych dla rezonansów polaryzacji typu P oraz polaryzacji typu S zmiana współczynnika transmisji powodowana zmianą kąta polaryzacji światła wprowadzanego jest znacznie mniejsza niż w przypadku typowej siatki skośnej. Właściwość ta została zbadana również przy pomiarach wybranego zakresu zmian współczynnika załamania medium otaczającego włókno.

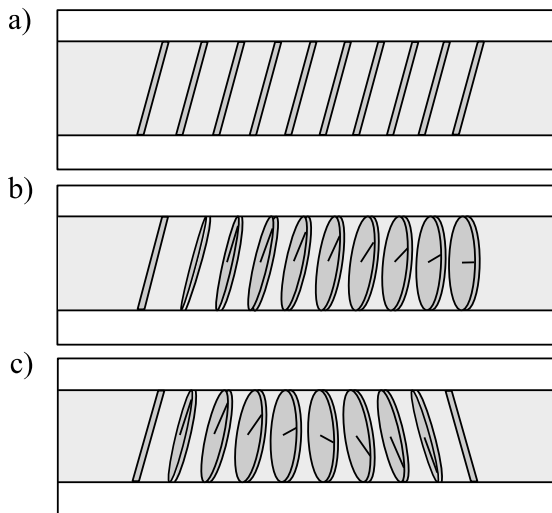


Rys. 6.37. Widma transmisyjne mierzone dla trzech przypadków polaryzacji światła wejściowego, dla struktur: a) TFBG; b) P-TFBG w otoczeniu roztworu o współczynniku załamania 1,37 RIU

Wykresy umieszczone na rysunku 6.37. przedstawiają widma transmisyjne tych samych modów płaszczyznowych siatek TFBG oraz P-TFBG, których widma zostały przedstawione na rysunku 6.36. W przypadku umieszczenia TFBG w roztworze o współczynniku załamania bliskim RI wody, wpływ zmian kąta polaryzacji światła wprowadzanego jest znaczny. Dodatkowo, zastosowanie dwóch TFBG o dopasowanych długościach fal wybranego modu płaszczyznowego, gdzie promieniowanie przechodzi dwukrotnie przez siatki skośne sprawia, że amplituda zmian wartości współczynnika transmisji jest większa niż

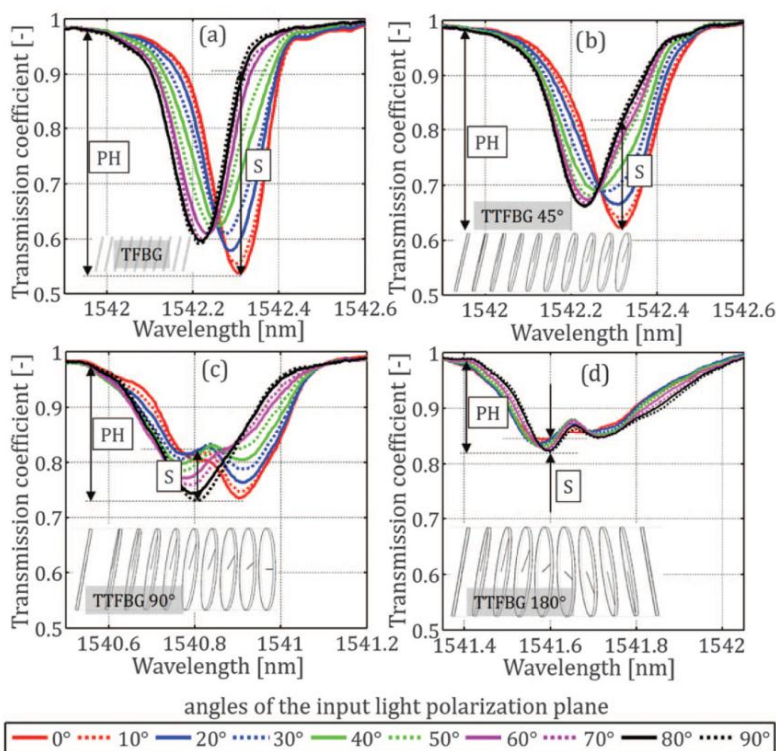
w przypadku pojedynczej TFBG. Zastosowanie struktury P-TFBG zapewnia zmniejszenie zależności współczynnika transmisji wybranego modu od zmian polaryzacji. Wyniki te pokazują obiecujący kierunek dalszych badań związanych z modyfikacjami typowych struktur periodycznych.

Inną potencjalną możliwością zmiany geometrii układu prążków dyfrakcyjnych jest wprowadzenie skrętu na długości całej struktury poprzez stopniowe obracanie prążków dyfrakcyjnych wokół osi podłużnej światłowodu. Powstająca w ten sposób skręcona siatka skośna opisana została w pracy [109], gdzie użyto nazwy TTFBG (ang. *twisted tilted fiber Bragg grating*). Przy zachowaniu warunków, że na długości struktury skręt będzie jednakowy oraz, że względny skręt struktury na jej długości wynosić będzie  $180^\circ$ , charakterystyki widmowe TTFBG powinny zachowywać niezależność od zmian kąta polaryzacji światła wprowadzanego. Problemem przy modyfikacjach tego typu może być wpływ niejednakowej wartości głębokości modulacji współczynnika załamania na długości siatki. Przy zastosowaniu metody maski fazowej oraz lasera ekscymerowego źródłem apodyzacji jest rozkład intensywności przekroju wiązki światła zapisującego siatkę. Przy wprowadzonej apodyzacji, część struktury TTFBG „odbija” światło bardziej intensywnie niż fragment o mniejszej głębokości modulacji współczynnika załamania. Na rysunku 6.38. przedstawiona została struktura wewnętrzna siatki TFBG oraz siatek TTFBG o kątach skrętu prążków dyfrakcyjnych  $90^\circ$  oraz  $180^\circ$ .



Rys. 6.38. Struktura wewnętrzna siatek TTFBG o kątach skrętu struktury wewnętrznej:  
a)  $0^\circ$ , b)  $90^\circ$  oraz c)  $180^\circ$

Zmiana ustawienia względnego kolejnych płaszczyzn modulacji współczynnika załamania wpływa na zmiany orientacji płaszczyzny polaryzacji światła wprowadzanego w stosunku do kolejnych prążków dyfrakcyjnych. Wynikiem tego jest zmniejszenie zakresu zmian współczynnika transmisji wyznaczanego dla wybranych długości fali związanych z minimami transmisji związanymi z polaryzacją typu P oraz S. Wyniki pomiarów wpływu zmian kąta polaryzacji światła wprowadzanego zostały przedstawione w pracach [22,109]. Na rysunku 6.39. przedstawione zostały widma transmisyjne modu płaszczyzowego siatek T-TFBG wytworzonych dla kolejnych kątów skrzywienia struktury wewnętrznej:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  oraz  $180^\circ$ , przy zmianach kąta płaszczyzny polaryzacji światła wprowadzanego.



Rys. 6.39. Widma transmisyjne wybranego modu płaszczyzowego siatek TTFBG, wytworzonych dla różnych wartości skrzywienia struktury wewnętrznej:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  oraz  $180^\circ$ , przy zmianach kąta płaszczyzny polaryzacji światła wprowadzanego [109]

Analiza widm przedstawionych na rysunku 6.39. wskazuje, że zwiększenie kąta skrzywienia struktury wewnętrznej sprawia, że stopień sprzężenia modu płaszczyzowego zmniejsza się. Widoczne jest to jako zmniejszenie różnicy pomiędzy wartością współczynnika transmisji modu w stosunku do współczyn-

nika transmisji światła źródłowego. Ponadto zwiększenie stopnia skęcenia pochyłonych prążków dyfrakcyjnych powoduje, że obrót płaszczyzny polaryzacji światła wprowadzanego skutkuje mniejszym zakresem zmian amplitudy modów płaszczowych.

W wielu pracach traktujących o pomiarach współczynnika załamania z wykorzystaniem TFBG, pomijany jest wpływ zmian polaryzacji światła wprowadzanego na widmo transmisyjne takiego przetwornika. Z tego powodu istotnym jest określenie tego wpływu oraz podjęcie próby złagodzenia fluktuacji współczynnika transmisji widma np. poprzez modyfikacje TFBG w zakresie geometrii wewnętrznej. Jest to ciekawy kierunek do rozwoju dalszych badań związanych z dopasowaniem geometrii struktury wewnętrznej do wymaganych właściwości spektralnych dla konkretnego zastosowania. Dodatkowo jako element analizy widm, których celem jest zmniejszenie wzajemnego wpływu zmian różnych wielkości fizycznych jednocześnie można wskazać wykorzystanie metod globalnych, gdzie analizie poddaje się wiele modów w wybranym zakresie spektralnym. Podejście polegające na wyznaczeniu charakterystycznych parametrów grupy modów przedstawione zostało w pracy [109], gdzie autor rozprawy przedstawia zastosowanie metody długości konturu do określania promienia gięcia włókna.



## 7. Podsumowanie i wnioski

Niniejsza praca dotyczy zagadnień związanych z wytwarzaniem światłowodowych struktur periodycznych o pochyłonych płaszczyznach współczynnika załamania, oraz wykorzystywania ich do jednoczesnych pomiarów kilku wielkości fizycznych.

W pracy przedstawiono wykonany w Laboratorium Optoelektroniki i Techniki Laserowej układ do wytwarzania skośnych siatek Bragga. Przedstawiono także wpływ zmian głębokości modulacji oraz kąta pochylenia płaszczyzn o podwyższonej wartości współczynnika załamania na widma transmisyjne wytworzonych struktur okresowych.

W kolejnym etapie prac przeprowadzono badania eksperymentalne w celu określenia parametrów widmowych siatek o kątach  $2^\circ$  oraz  $4^\circ$  pod wpływem zmiany kąta obrotu, promienia gięcia oraz temperatury otoczenia. Zaproponowano ponadto 2 różne układy, w których wartość krzywizny może być transformowana na zmianę odległości. Na podstawie wyników pomiarów dokonano wyboru parametrów spektralnych wybranych modów widocznych w widmie transmisyjnym, oraz określono ich czułości na zmiany wymienionych powyżej wielkości fizycznych.

Określono w jakich zakresach długości fali spektrum transmisyjnego siatek skośnych występują mody odznaczające się czułością na wybrane wielkości fizyczne.

Wykazano, że obszar widma, w którym występują mody płaszczowe najwyższych rzędów wykazuje dużą czułość na zmiany kąta polaryzacji światła wprowadzanego, jednocześnie zachowując stałą wartość współczynnika transmisji czy długości fali przy zmianach promienia gięcia włókna.

Zakres spektralny o długościach fal zbliżonych do długości fali modu Bragga czy modu ghost zawiera mody płaszczowe, których charakterystyki wykazują zwiększoną wrażliwość na zmiany promienia zgięcia przy niskiej czułości na zmiany kąta obrotu. Wykazano, że czułość długości fali na zmiany temperatury posiada zbliżoną wartość dla trzech badanych modów, tj. rdzeniowego, ghost oraz  $LP_{016}$ .

Na podstawie analizy eksperymentalnej wpływu poszczególnych wielkości określone zostały teoretyczne możliwości pomiarów trzech wielkości fizycznych jednocześnie, przy zastosowaniu przetwornika pomiarowego w postaci pojedynczej struktury TFBG. W przypadku struktury o kącie  $2^\circ$  wykazano, że różnica pomiędzy długością fali modu rdzeniowego oraz wybranych modów płaszczowych związanych z wartością kąta obrotu czy promienia gięcia jest stała dla temperatur z zakresu od  $0^\circ$  do  $80^\circ\text{C}$ . Wyznaczone zostały czułości skrośne

parametrów spektralnych przy jednoczesnych pomiarach promienia gięcia i kąta obrotu, promienia gięcia i temperatury oraz kąta obrotu i temperatury. Na podstawie pomiarów z wykorzystaniem układu pozwalającego na niezależne zmiany każdej z wybranych wielkości fizycznych wskazano, iż możliwe jest dokonywanie pomiarów dwóch wielkości fizycznych jednocześnie, z wykorzystaniem pojedynczej siatki skośnej o odpowiednio dobranych parametrach technicznych.

Analiza zmian widm transmisyjnych pod wpływem zmian promienia gięcia, kąta obrotu polaryzacji oraz temperatury wskazuje, że możliwe jest również prowadzenie jednoczesnych pomiarów wszystkich trzech wyszczególnionych wielkości, z wykorzystaniem przetwornika w postaci pojedynczej struktury TFBG o kącie pochylenia struktury wewnętrznej wynoszącym  $2^\circ$ .

Analiza możliwości wykorzystania struktury o kącie pochylenia  $4^\circ$  wykazała, że nie jest możliwe prowadzenie jednoczesnych pomiarów promienia gięcia i kąta obrotu z użyciem pojedynczej struktury TFBG. Wpływ zmian promienia krzywizny na parametry widmowe modów czułych na zmiany kąta obrotu jest nieznaczny, jednakże wpływ zmian polaryzacji na widma modu niskiego rzędu czułego na zmiany promienia krzywizny jest znaczący. W związku z tym, nie jest możliwe wykorzystanie pojedynczej struktury TFBG o kącie pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania  $4^\circ$ , do jednoczesnego pomiaru promienia gięcia, kąta obrotu oraz temperatury. Dodatkowo, w przypadku TFBG o kącie  $4^\circ$  silne sprzężenie rezonansów płaszczyznowych powoduje osłabienie modu rdzeniowego, przez co używanie długości fali odpowiadającej temu modowi jako wartość odniesienia jest utrudniona.

Za najważniejsze osiągnięcia uważam:

- zdefiniowanie wpływu zmian kąta pochylenia płaszczyzn o podwyższonym współczynniku załamania oraz głębokości modulacji współczynnika załamania siatek skośnych o kątach  $2^\circ$  oraz  $4^\circ$ ,
- 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 pochylonej 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 skrośnych 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.



## Literatura

- [1] Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., et. al.; Fiber Grating Sensors; *Journal of Lightwave Technology* 15(8), 1442–1462, 1997
- [2] Sahota J.K., Gupta N., Dhawan D.; Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review; *Optical Engineering* 59(6), 060901, 2020
- [3] Cieszczyk S., Kisala P.; Inverse problem of determining periodic surface profile oscillation defects of steel materials with a fiber Bragg grating sensor; *Applied Optics* 55(6), 1412–1420, 2016
- [4] Zhang S., Deng S., Geng, T., Sun C., Niu H., Li X., Wang Z., Li X., Ma Y., Yang W., et al.; A miniature ultra long period fiber grating for simultaneous measurement of axial strain and temperature; *Optics & Laser Technology* 126, 106121, 2020
- [5] **Harasim D.**; Temperature-insensitive bending measurement method using optical fiber sensors; *Sensors and Actuators A: Physical* 332(2), 113207, 2021
- [6] Paixão T., Araújo F., Antunes P.; Highly sensitive fiber optic temperature and strain sensor based on an intrinsic Fabry-Perot interferometer fabricated by a femtosecond laser; *Optics Letters* 44, 4833–4836, 2019
- [7] He C., Zhou C., Zhou Q., Xie S., Xiao M., Tian J., Yao Y.; Simultaneous measurement of strain and temperature using Fabry-Pérot interferometry and antiresonant mechanism in a hollow-core fiber; *Chinese Optics Letters* 19, 041201, 2021
- [8] Oliveira R., Osório J.H., Aristilde S., Bilro L., Nogueira R.N., Cordeiro C.; Simultaneous measurement of strain, temperature and refractive index based on multimode interference, fiber tapering and fiber Bragg gratings; *Measurement Science Technology* 27, 075107, 2016
- [9] Zhang X., Peng W., Shao L.Y., Pan W., Yan L.; Strain and temperature discrimination by using temperature-independent FPI and FBG; *Sensors and Actuators: A Physical* 272, 134–138, 2018
- [10] Gupta B.D., Kant R.; Recent advances in surface plasmon resonance based fiber optic chemical and biosensors utilizing bulk and nanostructures; *Optics and Laser Technology* 101, 144–161, 2018
- [11] Wang Q., Jing J., Wang B.; Highly Sensitive SPR Biosensor Based on Graphene Oxide and Staphylococcal Protein A Co-Modified TFBG for Human IgG Detection; *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1–8, 2018
- [12] Jackson J.D.; *Electrodynamics*. In *The Optics Encyclopedia*; editors Brown T.G., Creath K., Kogelnik H., Kriss M.A., Schmit J. and Weber M.J., 2007
- [13] Wydra M., Kisala P., **Harasim D.**, Kacejko P.; Overhead Transmission Line Sag Estimation Using a Simple Optomechanical System with Chirped Fiber Bragg Gratings. Part 1: Preliminary Measurements; *Sensors* 18(1), 309, 2018
- [14] Tosi D.; Review of Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG) Fiber-Optic Sensors and Their Applications; *Sensors* 18(7), 2147, 2018

- [15] Khalid K. S., Zafrullah M., Bilal S. M., Mirza M. A.; Simulation and analysis of Gaussian apodized fiber Bragg grating strain sensor; *Journal of Optical Technology* 79(10), 667–673, 2012
- [16] Chaoui F., Aghzout O., Alejos A. V., Naghar A., Falcone F., El Yakhloufi M.; Theoretical Approach to Optimize Fiber Bragg Grating Sensor Performance using an Automated New Code; *Optik* 140, 634–643, 2017
- [17] Zychowicz Ł., Klimek J., Kisała P.; Methods of producing apodized fiber bragg gratings and examples of their applications; *Informatyka Automatyka Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 8(1), 60–63, 2018
- [18] Skorupski K., Cieszczyk S., Panas P., Kisała P.; Numerical and Experimental Analysis of Matched Filter Interrogation of FBG Sensors with Large Side Lobes; *Sensors* 20(19), 5522, 2020
- [19] Tan K. M., Chan C. C., Tjin S. C., X., Dong Y.; Embedded long-period fiber grating bending sensor; *Sensors and Actuators A Physical* 125(2), 267–272, 2006
- [20] Guo T., Liu F., Guan B., Albert J.; Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors; *Optics & Laser Technology* 78 Part B, 19–33, 2016
- [21] Kisała P., **Harasim D.**, Mroczyk J.; Temperature-insensitive simultaneous rotation and displacement (bending) sensor based on tilted fiber Bragg grating; *Optics Express* 24(26), 29922–29929, 2016
- [22] **Harasim D.**; The influence of fibre bending on polarization-dependent twist sensor based on tilted bragg grating; *Metrology and Measurement Systems*, 24(3), 577–584, 2017
- [23] Othonos A.; Fiber Bragg gratings; *Review of Scientific Instruments* 68, 4309, 1997
- [24] Chen J., Liu B., Zhan H.; Review of fiber Bragg grating sensor technology; *Frontiers of Optoelectronics in China* 4, 204–212, 2011
- [25] Zhao Y., Wang Q., Huang H.; Characteristics and applications of tilted fiber Bragg gratings; *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 12, 2343–2354, 2010
- [26] Chehura E., James S., Tatam R.; Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating; *Optics Communications* 275(2), 344–347, 2007
- [27] James S.W., Tatam R.P.; Optical fiber long-period grating sensors: characteristics and application; *Measurement Science and Technology* 14, R49–R61, 2003
- [28] Kisała P., Skorupski K., Cieszczyk S., Panas P., Klimek J.; Rotation and twist measurement using tilted fibre Bragg gratings; *Metrology and Measurement Systems* 25(3), 429–440, 2018
- [29] Bueno A., Debliquy M., Lahem D., Van Baekel A., Mégret P., Caucheteur C.; NO<sub>2</sub> optical fiber sensor based on TFBG coated with LuPc<sub>2</sub>; *Sensors IEEE*, 1073–1076, 2014
- [30] Candiani A., Sozzi M., Cucinotta An., Veneziano R., Corradini R., Childs P., Pissadakis S., Selleri S.; DNA biosensor based on a double tilted fiber Bragg grating; *IEEE Photonics Conference 2012, Burlingame, CA, USA* 206–207, 2012

- [31] Yazdizadeh Z., Marzouk H., Hadianfard M.A.; Monitoring of concrete shrinkage and creep using Fiber Bragg Grating sensors; *Construction and Building Materials* 137, 505–512, 2017
- [32] Dong X., Zhang H., Liu B., Miano Y.; Tilted Fiber Bragg Gratings: Principle and Sensing Applications; *Photonic Sensors* 1(1), 6–30, 2011
- [33] Chen C., Xiong L., Caucheteur C., Mégret P., Albert J.; Differential strain sensitivity of higher order cladding modes in weakly tilted fiber Bragg gratings; *Proc. SPIE* 6379, 63790E–1–7, 2006
- [34] Erdogan T., Sipe J.E.; Tilted fiber phase gratings; *Journal of Optical Society of America A* 13, 296–313, 1996
- [35] Bialiyayeu A., Ianoul A., Albert J.; Polarization-resolved sensing with tilted fiber Bragg gratings: theory and limits of detection; *Journal of Optics* 17, 1–8, 2015
- [36] Chen X., Zhou K., Zhang L., Bennion I.; “Optical chemsensor based on etched tilted Bragg grating structures in multimode fiber,” *IEEE Photonics Technology Letters* 17(4), 864–866, 2005
- [37] Wang R., Si J., Chen T., Yan L., Cao H., Pham X., Hou X.; Fabrication of high-temperature tilted fiber Bragg gratings using a femtosecond laser; *Optics Express* 25(20), 23684–23689, 2017
- [38] Klimek J., Skorupski K., **Harasim D.**; The influence of CTFBG gratings physical parameters on their spectral properties; *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, SPIE 10445, 1044512, 2017
- [39] Lin W., Desjardins-Carrière M., Sévigny B., Sévigny B., Rochette M.; Optimization of Chirp and Tilt of Fiber Bragg gratings for Raman Emission Suppression; 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest, 2021
- [40] Kaczmarek Z.; Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe; Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2006
- [41] Othonos A., Kalli K.; *Fiber Bragg Gratings. Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, Boston London, 1999
- [42] Albert J., Shao L.Y., Caucheteur C.; Tilted fiber Bragg grating sensors; *Laser Photonics Review* 7(1), 83–108, 2012
- [43] Ciężczyk S., Kisała P., Mroczyk J.; New Parameters Extracted from Tilted Fiber Bragg Grating Spectra for the Determination of the Refractive Index and Cut-Off Wavelength; *Sensors* 19(9), 1–11, 2019
- [44] Ciężczyk S., **Harasim D.**, Ormanbekova A., Skorupski K., Wawrzyk M.; 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* 21(22), 7526, 2021
- [45] Wong A.C.L., Chung W.H., Tam H.Y., Lu C.; Single tilted Bragg reflector fiber laser for simultaneous sensing of refractive index and temperature;. *Optics Express*, 19(2), 409–414, 2011

- [46] Zhou W., Zhou Y., Albert, J.; A true fiber optic refractometer; *Laser Photonics Review* 11(1), 1600157, 2017
- [47] Pham X., Si J., Chen T., Wang R., Yan L., Cao H., Hou X.; Demodulation method for tilted fiber Bragg grating refractometer with high sensitivity; *Journal of Applied Physics*, 123, 174501, 2018
- [48] Lepinay S., Ianoul A., Albert J.; Tilted fiber Bragg gratings as a new sensing device for in situ and real time monitoring of surface initiated polymerization; *Talanta*, 128, 401–407, 2014
- [49] Li C., Yang W., Wang M., Yu X., Fan J., Xiong Y., Yang Y., Li L.; A Review of Coating Materials Used to Improve the Performance of Optical Fiber Sensors; *Sensors* 20, 4215, 2020
- [50] Dolzhenko E.I., Tomyshev K., Butov O.V.; TFBG-assisted fiber optic sensors for environmental monitoring; *Proceedings Volume 11772, Optical Sensors 2021; 117720S*, 2021
- [51] Laffont G., Ferdinand P.; Tilt short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry; *Measurement Science and Technology* 12, 765–770, 2001
- [52] Liu F., Guo T., Liu J., Zhu X., Liu Y., Guan B., Albert J.; High-sensitive and temperature-self-calibrated tilted fiber grating biological sensing probe; *Chinese Science Bulletin* 58, 2607–2611, 2013
- [53] Cięższyk S., **Harasim D.**, Kisała P.; A Novel Simple TFBG Spectrum Demodulation Method for RI Quantification; *IEEE Photonics Technology Letters* 24(29), 2264–2267, 2017
- [54] Caucheteur C., Paladino D., Pilla P., Cutolo A., Campopiano S., Giordano M., Cusano A., Mégret P.; External Refractive Index Sensitivity of Weakly Tilted Fiber Bragg Gratings With Different Coating Thicknesses; *IEEE Sensors Journal* 8(7), 1330–1336, 2008
- [55] McClarren R.G.; Initial Value Problems; *Computational Nuclear Engineering and Radiological Science Using Python*, 301–332, 2018
- [56] Liu F., Guo T., Liu J., Zhu X., Liu Y., Guan B., Albert J.; High-sensitive and temperature-self-calibrated tilted fiber grating biological sensing probe; *Chinese Science Bulletin* 58, 2607–2611, 2013
- [57] Liu B., Miao Y., Liu J., Sun H., and Zhang H., “Temperature-independent liquid level sensor based on tilted fiber Bragg grating,” presented at 2010 3rd Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference, Guangzhou, China, Jun. 28–30, 2010
- [58] Sahota J.K., Gupta N., Dhawan D.; Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review; *Optical Engineering* 59(6), 060901, 2020
- [59] Chen C., Guo T., Laronche A., Albert J.; Liquid Radiation mode resonances of tilted fiber Bragg gratings for high index media measurement; *Proceedings of SPIE* 7004, 700418, 2008



- [60] Chan C.F., Chen C., Jafari A., Laronche A., Thomson D.J., Albert J.; Optical fiber refractometer using narrowband cladding-mode resonance shift; *Applied Optics* 46(7), 1142–1149, 2007
- [61] Guo T., Tam H.Y., Krug P.A., Albert J.; Reflective tilted fiber Bragg grating refractometer based on strong cladding to core recoupling; *Optics Express* 17(7), 5736–5742, 2009
- [62] Zheng J., Dong X.Y., Ji J.H., Su H.B., Shum P.P.; Power-referenced refractometer with tilted fiber Bragg grating cascaded by chirped grating. *Optics Communications* 312, 106–109, 2015
- [63] Lu Y.C., Geng R., Wang C.C., Jian S.; Polarization Effects in Tilted Fiber Bragg Grating Refractometers; *Journal of Lightwave Technology* 28(11),1677–1684, 2010
- [64] Guo T., Tam H.Y., Krug P.A., Albert J.; Reflective tilted fiber Bragg grating refractometer based on strong cladding to core recoupling; *Optics Express* 17, 5736–5742, 2009
- [65] Hibino Y.; Cladding-Mode-Recoupling-Based Tilted Fiber Bragg Grating Sensor With a Core-Diameter-Mismatched Fiber Section; *IEEE Photonics Journal* 2(2),152–157, 2010
- [66] Cai Z.Y., Liu F., Guo T., Guan B.O., Peng G.D., Albert J.; Evanescently coupled optical fiber refractometer based a tilted fiber Bragg grating and a d-shaped fiber; *Optics Express* 23, 20971–20976, 2015
- [67] Lu Y.C., Geng R., Wang C.C., Jian S.; Polarization Effects in Tilted Fiber Bragg Grating Refractometers; *Journal of Lightwave Technology* 28(11),1677–1684, 2010
- [68] Kisała P., Skorupski K., Ciężczyk S., Panas P., Klimek J.; Rotation and twist measurement using tilted fibre Bragg Gratings; *Metrology Measurement Systems* 25(3), 429–440, 2018
- [69] **Harasim D.**, Kusambayeva N.; The optical measurement method for structural twist monitoring with using tilted Bragg grating sensor; *Przegląd Elektrotechniczny* 94(7), 62–65, 2018
- [70] Reid D. C. J., Ragdale C. M., Bennion I., Buus J., Stewart W. J.; Phaseshifted Moire grating fibre resonators; *Electronics Letters* 26(1), 10–12, 1990
- [71] Ribaut C., Loyez M., Larrieu J.C., Chevineau S., Lambert P., Rimmelink M., Wattiez R., Caucheteur C.; Cancer biomarker sensing using packaged plasmonic optical fiber gratings: Towards in vivo diagnosis; *Biosensors and Bioelectronics* 92, 449–456, 2017
- [72] Budinski V., Donlagic D.; Fiber-Optic Sensors for Measurements of Torsion, Twist and Rotation: A Review; *Sensors* 17(3), 443, 2017
- [73] Baek S., Jeong Y., Lee B.; Characteristics of short-period blazed fiber Bragg gratings for use as macrobending sensors; *Applied Optics* 41(4), 631–636, 2002
- [74] Alberto N.J., Marques C.A., Pinto J.L., Nogueira R.N.; Three-parameter optical fiber sensor based on a tilted fiber Bragg grating; *Applied Optics* 49(31), 6085–6091, 2010

- [75] Marcuse D.; Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers; *Journal of the Optical Society of America* 66(4), 311–320, 1976
- [76] Feng D., Zhou W., Qiao X., Albert J.; Compact Optical Fiber 3D Shape Sensor Based on a Pair of Orthogonal Tilted Fiber Bragg Gratings; *Scientific Reports* 5, 17415, 2015
- [77] Block U. L., Digonnet M. J. F., Fejer M. M., Dangui V.; Bending-induced birefringence of optical fiber cladding modes; *Journal of Lightwave Technology* 24(6), 2336–2339, 2006
- [78] Shao L., Xiong L., Chen C., Laronche A., Albert J.; Directional Bend Sensor Based on Re-Grown Tilted Fiber Bragg Grating; *Journal of Lightwave Technology* 28(18), 2681–2687, 2010
- [79] Albert J., Lepinay S., Caucheteur C., DeRosa M.C.; High resolution grating-assisted surface plasmon resonance fiber optic aptasensor; *Methods* 63, 239–254, 2013
- [80] Lobry M., Loyez, M., Chah K., Hassan E.M., Goormaghtigh E., DeRosa M., Wattiez R., Caucheteur C.; HER2 biosensing through SPR-envelope tracking in plasmonic optical fiber gratings; *Biomedical Optics Express* 11(9), 4862–4871, 2020
- [81] Tomyshev K., Tazhetdinova D., Manuilovich E., Butov O.; High-resolution fiber optic surface plasmon resonance sensor for biomedical applications; *Journal of Applied Physics* 124, 113106, 2018
- [82] Shen C., Zhong C.; Novel temperature-insensitive fiber Bragg grating sensor for displacement measurement; *Sensors and Actuators A Physical* 170(1–2), 51–54, 2011
- [83] **Harasim D.**, Gulbahar Y.; Improvement of FBG peak wavelength demodulation using digital signal processing algorithms; *Proc. SPIE* 9662, 966212, 2015
- [84] Chan C.F., Chen C.K., Jafari A., Laronche A., Thomson D.J., Albert J.; Optical fiber refractometer using narrowband cladding-mode resonance shifts; *Applied Optics* 46, 1142–1149, 2007
- [85] Laffont G., Ferdinand P.; Tilted short-period fibre-Bragg-grating induced coupling to cladding modes for accurate refractometry; *Measurement Science Technology* 12, 765–770, 2001
- [86] Kisala P., Wojcik W., Kalizhanova A.U., Kozbakova A.K., Amirgaliyeva Z.Y., Kashaganova G., Amirgaliyeva S.N.; Spectral properties of Tilted Bragg Gratings with different tilt angles and variable surrounding conditions; *Przeglad Elektrotechniczny* 95(4), 185–188, 2019
- [87] Cieżczyk S., **Harasim D.**, Kisala P.; Novel twist measurement method based on TFBG and fully optical ratiometric interrogation; *Sensors and Actuators A – Physical* 272, 18–22, 2018
- [88] Kisala P.; Światłowodowe struktury periodyczne o pochyłonej modulacji współczynnika załamania: właściwości i zastosowania; *Politechnika Lubelska, Lublin* 2019
- [89] Dong X., Zhang H., Liu B., Miao Y.; Tilted Fiber Bragg Gratings: Principle and Sensing Applications; *Photonic Sensors* 1(1), 6–30, 2011

- [90] Laffont G., Ferdinand P.; Tilt short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry; *Measurement Science Technology* 12, 765–770, 2001
- [91] Kashyap R.; *Fiber Bragg Gratings*; Academic Press, San Diego, Toronto 1999
- [92] Limberger H.G., Fonjallaz P.Y., Lambelet P., Salathe R.P., Zimmer C. Gilgen H.H.; Fiber grating characterization by OLCR measurements; *European Conference on Optical Fibre Communications, MoP2.1*, 1993
- [93] Fonjallaz P.Y., Limberger H.G., Salathe R.P.; Bragg grating with directional, efficient and wavelength-selective fiber out coupling; *Technology Digest of Optics Fiber Communications*, 160–161, 1995
- [94] Essid M., Brebner, Albert J., Awazu K.; Difference in the behavior of oxygen deficient defects in Ge-doped silica optical fiber preforms under ArF and KrF excimer laser irradiation; *Journal of Applied Physics* 84(8), 1998
- [95] Hill K., Fujii Y., Johnson D., Kawasaki B.; Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication; *Applied Physics Letters* 32, 647, 1978
- [96] Meltz G., Morey W.W.; Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity; *SPIE* 1516, 185–199, 1991
- [97] Nykolak G., Lenz G., Eggleton B.J., Strasser T.A., Evolution of transmission dispersion characteristics of nonuniform gratings for DWDM systems, *TaA2*, 3–4, 1998
- [98] Becker M., Bergmann J., Brückner S., Franke M., Lindner E., Rothhardt M.W., Bartelt H., Fiber Bragg grating inscription combining DUV sub-picosecond laser pulses and two-beam interferometry. *Optics Express* 16(23), 19169–19178, 2008
- [99] Qiu Y., Sheng Y., Beaulieu C.; Optimal phase mask for fiber Bragg grating fabrication; *Journal of Lightwave Technology* 17(11), 2366–2370, 1999
- [100] Okai M., Tsuji S., Chinone N., Harada T.; Novel method to fabricate corrugation for a  $\lambda/4$  shifted distributed feedback laser using a grating photomask; *Applied Physics Letters* 55, 415, 1989
- [101] Kashyap R.; Assessment of tuning the wavelength of chirped and unchirped fibre Bragg grating with single phase-masks; *Electronics Letters* 34(21), 2025–2027, 1998
- [102] Erdogan T., Mizrahi V., Lemaire P., Monroe D.; Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings; *Journal of Applied Physics* 76, 73, 1994
- [103] Wójcik W., Kisała P., Gulbahar Y., Kashaganova G., Kussambayeva N., **Harasim D.**; Analysis of the possibilities for using a uniform bragg grating in a tunable dispersion compensator; *International Journal of Electronics and Telecommunications* 61(4), 381–387, 2015
- [104] Melo L.B., Rodrigues J.M.M., Farinha A.S.F., Marques C.A., Bilro L., Alberto N., Tom J.P.C., Nogueira R.N.; Concentration sensor based on a tilted fiber Bragg grating for anions monitoring; *Optical Fiber Technology* 20, 422–427, 2014

- [105] Li M., Li H., Painchaud Y.; Multi-channel notch filter based on a phase-shift phase-only sampled fiber Bragg grating; *Optics Express* 16(23), 19388–19394, 2008
- [106] Markowski K., Jędrzejewski K., Marzęcki M., Osuch T.; Linearly chirped tapered fiber-Bragg-grating-based Fabry–Perot cavity and its application in simultaneous strain and temperature measurement; *Optics letters* 42(7), 1464–1467, 2017
- [107] Erdogan T., Mizrahi V.; Decay of UV induced fiber Bragg gratings; *Proc. Optical Fiber Conference, OFC '94*, 50, 1994
- [108] **Harasim D.**, Kisała P., Yeraliyeva B., Mrocza J.; Design and Manufacturing Optoelectronic Sensors for the Measurement of Refractive Index Changes under Unknown Polarization State; *Sensors* 21(21), 7318, 2021
- [109] Kisała P., Mrocza J., Ciężczyk S., Skorupski K., Panas P.; Twisted tilted fiber Bragg gratings: new structures and polarization properties; *Optics Letters* 43(18), 4445–4448, 2017