

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i
Inżynierii Biomedycznej
Katedra Metrologii i Elektroniki

Autoreferat

BADANIE WPŁYWU PARAMETRÓW PROCESU WYTWARZANIA
PERIODYCZNYCH STRUKTUR ŚWIATŁOWODOWYCH NA ICH
CHARAKTERYSTYKI WIDMOWE

mgr inż. Jacek Klimek

Promotor: Prof. dr hab. inż. Piotr Kisała

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Sławomir Ciężczyk, prof. uczelni

Kraków 2021

1. Wstęp

Czujniki wykorzystujące światłowodowe siatki Bragga jako przetworniki pomiarowe umożliwiają wykonywanie bezinwazyjnych pomiarów w medycynie oraz przemyśle [17]. Ich małe wymiary i niewrażliwość na zewnętrzne pole elektromagnetyczne sprawiają, że stale zwiększa się obszar stosowania tego typu czujników [15, 16, 29]. Badania nad ich zastosowaniami trwają już od kilku dekad, a zapoczątkował je Ken Hill w 1978 r., wytwarzając strukturę periodyczną w rdzeniu światłowodu przy użyciu lasera. Przy wprowadzaniu światła do rdzenia światłowodu [21] po odbiciu od jego końców powstaje fala stojąca, w której maksimach pojawia się lokalna zmiana współczynnika załamania ośrodka.

W 1989 r. Gerald Meltz znacznie udoskonalił zapis tego typu struktur stosując oświetlenie boczne promieniami z zakresu UV [42], przy czym przez sformułowanie „zapis” (ang.: FBG inscription) rozumiane jest wytworzenie struktury periodycznej w rdzeniu światłowodu. Metoda ta jest stosowana do dnia dzisiejszego. Nazwa siatki Bragga pochodzi jednakże od Wiliama Henrego Bragga i jego syna Wiliama Lawrence Bragga, którzy znaleźli zależność pomiędzy geometrią kryształu, długością fali padającej i kątem obserwacji maksimum interferencji [5]. Zjawisko to nazwane zostało prawem Bragga. Ze względu na czułość na temperaturę i naprężenie, siatki Bragga stosowane są jako czujniki tych wielkości fizycznych [10, 53].

Najczęściej wykorzystuje się zjawisko przesunięcia długości fali rezonansu Bragga pod wpływem temperatury lub naprężenia [30, 31, 56]. Istnieje wiele rodzajów siatek Bragga, z których najważniejsze ze względu na geometryczny rozkład współczynnika załamania to: siatki skośne TFBG (ang.: tilted fiber Bragg gratings), siatki chirpowe CFBG (ang.: chirped fiber Bragg gratings), siatki długookresowe LPG (ang.: long period gratings) oraz ze względu na amplitudowy rozkład amplitudy modulacji współczynnika załamania są to siatki apodyzowane. Struktury Bragga o zmiennym na długości okresie, nazywane siatkami chirpowymi – CFBG, ze względu na monotonicznie pochylone zbocza charakterystyk transmisyjnych służą jako filtry krawędziowe i są stosowane w układach interrogatorów do określania zmian długości fali Bragga, zapewniając przy tym dynamiczną kompensację temperatury [20]. Zakres pracy takiego rodzaju filtra wynosi kilka nanometrów. Z kolei struktury skośne – TFBG mogą być zastosowane w wielu rodzajach czujników, np. do pomiaru współczynnika załamania, analizy stężenia substancji biologicznych lub jako sensory zgięcia [3, 9, 23, 32, 44, 48]. Siatki skośne po odpowiednim zmodyfikowaniu, np. po nałożeniu na światłowód cienkiej warstwy z alkoholu winylowego mogą być wykorzystywane jako sensory wilgotności charakteryzujące się wysoką powtarzalnością pomiaru i małą histerezą [43].

Możliwe jest również nanoszenie cienkich warstw metalicznych wywołujących zmianę charakterystyki spektralnej, co powoduje zmodyfikowanie czułości struktury na zmiany parametrów fizycznych. W tego typu układach wykorzystuje się tzw. efekt rezonansu plazmonowego [1, 6, 35, 49]. Każdy rodzaj siatki może mieć dodatkowo różne profile rozkładu zmiany współczynnika załamania na długości siatki, czyli tzw. apodyzacje (ang.: apodization). Apodyzacja siatki zmienia jej charakterystykę spektralną i potencjalny obszar jej zastosowań [22, 26, 37, 57]. Ze względu na wąskie rezonanse pochodzące od odbicia Bragga, siatki proste stosowane są do budowy multiplekserów wykorzystujących technikę DWDM (ang.: dense wavelength division multiplexing). Siatki chirpowe ze względu na swoją budowę stosowane są w telekomunikacji jako kompensatory dyspersji chromatycznej [24, 28]. Poprzez dodatkowe trawienie obszaru, w którym zapisana jest siatka można uzyskać większą czułość na zmiany czynnika zewnętrznego [56]. Ze względu na obojętność biologiczną FBG oraz TFBG mogą być wykorzystywane w pomiarach substancji biologicznych, są także stosowane w pomiarach przemysłowych, w których występuje zagrożenie wybuchem [8, 13, 39].

Wzrost zainteresowania strukturami typu Bragga można również obserwować przy konstrukcji laserów światłowodowych oraz wzmacniaczy optycznych, w których struktury periodyczne wykorzystywane są do budowy zwierciadeł wnek rezonansowych [4, 7, 14, 50, 51]. Siatki długookresowe umożliwiają z kolei kontrolę strat w zależności od długości fali, dlatego stosowane są we wzmacniaczach optycznych jako regulatory wzmocnienia [52].

W niniejszej pracy poruszono tematykę wpływu parametrów wytwarzania siatek Bragga na ich charakterystyki spektralne. W części pierwszej badania opierały się na analizie widm struktur

z wykorzystaniem modelowania matematycznego. Analizie, poddane zostały takie parametry jak: długość siatki, apodyzacja oraz zmiana okresu na długości struktury.

Najistotniejsze wyniki tych prac umieszczono w rozdziale dotyczącym modelowania struktur periodycznych. Równolegle budowany był także układ do zapisu siatek Bragga oraz zaprojektowana została instalacja do wodorowania włókien światłowodowych. Głównymi parametrami wodorowania, analizowanymi w niniejszej pracy, był czas przebywania włókna w atmosferze wodoru oraz ciśnienie ustawiane w komorze do wodorowania. Wykonanie na potrzeby niniejszej pracy instalacji do wodorowania włókien stworzyło dodatkowe możliwości wytwarzania struktur Bragga o parametrach regulowanych w szerokim zakresie. Z kolei zbudowane stanowisko do zapisu struktur periodycznych posiada możliwość regulacji czasu naświetlania oraz energii impulsów laserowych, a także szerokości i kształtu wiązki lasera UV (ang.: Ultraviolet). Zagadnienia te poruszone zostały w rozdziale dotyczącym wytwarzania specjalnych struktur periodycznych na włóknach światłowodowych

2. Cel i zakres

W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne oraz badania numeryczne i eksperymentalne kilku rodzajów światłowodowych siatek Bragga. Badania wszystkich struktur zakończone są analizą wyników i określeniem wpływu parametrów ich wytwarzania oraz wpływu wodorowania włókien światłowodowych na właściwości spektralne tego typu struktur.

Celem pracy jest wykazanie możliwości zmiany parametrów fizycznych i optycznych światłowodowych struktur periodycznych typu Bragga i ich doboru do wybranych zastosowań poprzez dobór parametrów fizycznych i chemicznych procesu wodorowania oraz parametrów fizycznych procesu naświetlania włókien światłowodowych.

Celem pracy jest również wykazanie zasadności modyfikacji metody i układu do wytwarzania struktur periodycznych na jednomodowych włóknach światłowodowych w celu kształtowania charakterystyk spektralnych tego typu struktur.

W rozdziale 3 przedstawiono podstawy teoretyczne dotyczące właściwości siatek Bragga, scharakteryzowano podstawowe typy siatek oraz opis metody ich wytwarzania.

W rozdziale 4 pracy na podstawie wykonanej analizy matematycznej przedstawiono wpływ parametrów struktur, takich jak: apodyzacja, długość siatki oraz chirp, na kształt ich charakterystyk spektralnych. Zaproponowano zapis siatki z wykorzystaniem szczeliny umieszczonej w wiązce lasera na narastającym i opadającym zboczach wiązki przy zastosowaniu maski jednorodnej oraz maski chirpowej.

W rozdziale 5 przedstawiono charakterystyki spektralne wytworzonych siatek skośnych z chirpem oraz zamieszczono analizę zmian ich połówkowej szerokości spektralnej, centralnej długości fali, a także szerokości grzebienia.

Rozdział 6 poświęcony został projektowi i opisowi układu zbudowanego do wodorowania włókien. Wpływ technologii wodorowania określony został dla trzech przypadków: SMF-28 – klasyczne włókno jednomodowe, GF1 – włókno dostępne handlowo o zwiększonej fotoczułości oraz to samo włókno GF1 – poddane dodatkowo procesowi wodorowania. Po przeprowadzeniu procesu wodorowania zapisano siatki o takich samych parametrach i z takimi samymi warunkami pracy lasera. Porównano charakterystyki pod kątem czasu zapisu, zmiany centralnej długości fali Bragga, jak również połówkowej szerokości spektralnej.

W trakcie prowadzenia badań szczególnie interesujące okazały się właściwości włókien, które określono jako podwójnie fotouczulone czyli takie, które posiadają zwiększoną zawartość germanu, a dodatkowo zostają poddane procesowi wodorowania.

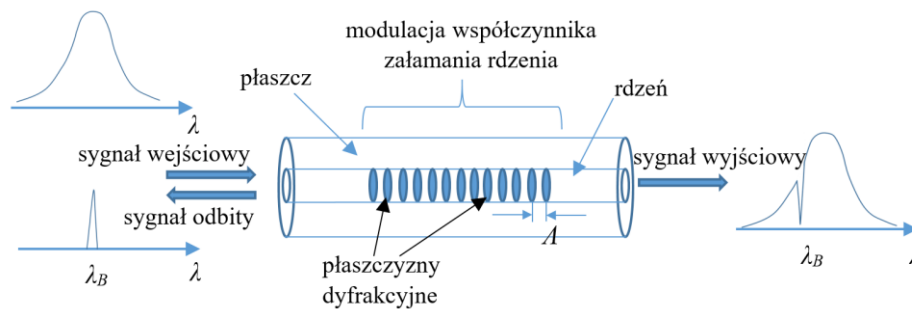
Wodorowanie jest technologią zwiększającą fotoczułość rdzenia włókna światłowodowego czyli podatność rdzenia na zmianę współczynnika załamania pod wpływem promieniowania UV pozwalającą na zapis struktur Bragga na włóknach domieszkowanych pierwiastkami ziem rzadkich, jak również na włóknach krzemionkowych bez zawartości germanu. Włókno podwójnie fotouczulane daje możliwość uzyskania dużo lepszych parametrów struktur w stosunku do włókien klasycznych. Sam proces zapisu jest 10-krotnie szybszy, co jest dużą zaletą przy zapisie siatek skośnych, jak również siatek krótkich o długości rzędu kilku milimetrów i jednocześnie dużej wartości współczynnika odbicia.

Przeprowadzone prace pozwolą na określenie możliwości kształtowania charakterystyk widmowych struktur, a przez to wpływania na właściwości metrologiczne opartych o nie czujników. Jest to istotne

ponieważ oferowane komercyjnie siatki Bragga cechuje znaczna ograniczoność zakresu dostępnych parametrów. Struktury takie są bowiem optymalizowane pod kątem wykorzystania telekomunikacyjnego. Niektóre rodzaje siatek, takie jak skośne siatki Bragga nie są dostępne handlowo.

3. Wybrane rodzaje struktur periodycznych

Światłowodowa siatka Bragga jest strukturą periodyczną o zmiennym współczynniku załamania, zapisaną na rdzeniu włókna światłowodowego wytworzoną poprzez naświetlanie promieniowaniem UV. Siatka Bragga działa jak filtr pasmowo – zaporowy w trybie pracy transmisyjnym. Struktura o okresowo zmiennym współczynniku załamania odbija selektywnie te długości fali, które odpowiadają rezonansowi Bragga, natomiast wszystkie pozostałe przepuszcza nie powodując tłumienia sygnału. Na rysunku 1 przedstawiona jest budowa i zasada działania światłowodowej siatki Bragga.

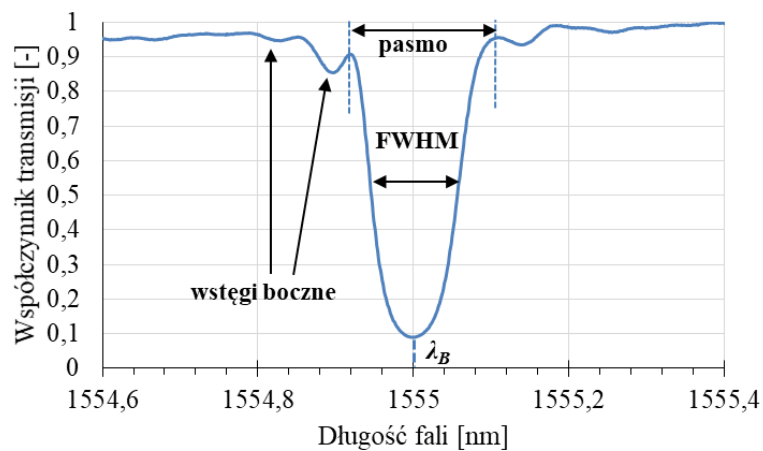


Rys. 3.1. Schemat światłowodowej struktury Bragga

Im dłuższa jest struktura periodyczna tym silniej odbijany jest promień świetlny i siatka posiada większy współczynnik odbicia. Dla każdej dodatkowej periodycznej zmiany współczynnika, tj. tzw. płaszczki dyfrakcyjnej następuje konstruktywne dodawanie sygnału odbitego od rozpatrywanej płaszczki do sygnału odbitego przez poprzednie płaszczki. Rezonans Bragga pierwszego rzędu opisuje zależność:

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

gdzie λ_B jest centralną długością fali Bragga, która została odbita od struktury periodycznej, n_{eff} to efektywny współczynnik załamania światła w rdzeniu na odcinku, na którym zapisana jest siatka.



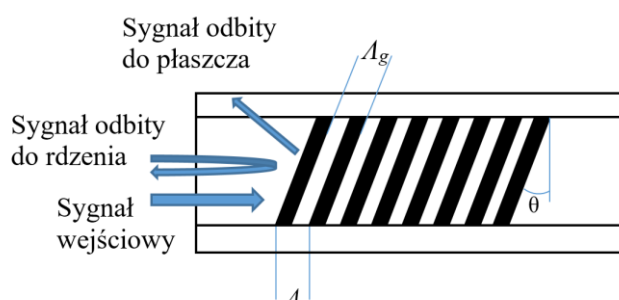
Rys. 3.2. Charakterystyka spektralna siatki jednorodnej dla długości fali rezonansowej 1555 nm

Szerokość spektralną siatki Bragga *FWHM* (ang.: *Full Width at Half Maximum*) wyraża równanie:

$$FWHM = \lambda_B s \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}, \quad (3.2)$$

gdzie N jest ilością płaszczyzn siatki, dla mocnych siatek o współczynniku odbicia równym 1 wartość s jest w przybliżeniu równa 1, dla słabych siatek $s = 0,5$ [52]. W praktyce na efektywny współczynnik załamania rdzenia i przestrzenną okresowość siatki wpływają zmiany odkształcenia i temperatury.

Siatka skośna jest strukturą periodyczną, w której prążki zmiany współczynnika załamania w rdzeniu wytworzone są pod pewnym kątem θ w stosunku do prostopadłej do rdzenia światłowodu. W strukturze siatki prostej prążki wytworzone są prostopadle do rdzenia ($\theta = 0^\circ$). Zwierciadła typu Bragga umieszczone pod pewnym niezerowym kątem θ odbijają promieniowanie, dlatego część promieni wprowadzana jest do płaszcza. Do wytworzenia siatki skośnej niezbędna jest taka sama technologia jak do siatek prostych. Siatki skośne TFBG powstają poprzez dodatkowe pochylenie płaszczyzny maski fazowej podczas procesu wytwarzania o określony kąt. Schemat tak wytworzonej siatki prezentuje rysunek 3. Stanowią one ważne elementy w technice czujników światłowodowych, ponieważ posiadają cechy czujników opartych zarówno na siatkach jednorodnych jak i długookresowych LPG [11, 12, 27, 38]. W siatkach skośnych występuje nie tylko sprzężenie pomiędzy modami prowadzonymi w rdzeniu, ale również pomiędzy modami propagującymi w płaszczu [2]. Dlatego też mają one szerokie zastosowanie przy budowie czujników chemicznych lub biologicznych. Za ich pomocą można określać współczynnik załamania lub koncentrację oraz stężenie substancji. Także dzięki nanoszeniu na zewnętrzną część światłowodu cienkiej warstwy metalicznej można obserwować adsorpcję materiałów na powierzchni metalu, zazwyczaj złota i srebra, dzięki zjawisku rezonansu plazmonowego [36, 54, 55].



Rys. 3.3 Schemat siatki skośnej

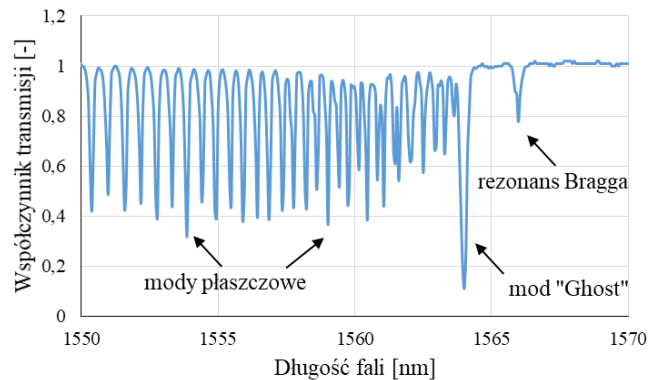
Relacja pomiędzy A i A_g opisana jest równaniem:

$$A = A_g \cos \theta, \quad (3.3)$$

gdzie A_g jest okresem wzdłuż osi włókna, A jest nominalnym okresem mierzonym jak pokazano na rysunku 3.3.

Ponieważ struktura periodyczna zapisana jest pod pewnym niezerowym kątem θ , światło odbite o długość fali odpowiadającej rezonansowi Bragga propagowane jest w rdzeniu, natomiast pozostałe długości fali sprzęgane są do płaszcza włókna światłowodowego powodując powstanie modów płaszczowych. Na charakterystyce transmisyjnej siatki skośnej można wyróżnić minima pochodzące od rezonansu Bragga, minima pochodzące od tzw. modu typu „ghost” oraz szereg minimów związanych

z występowaniem rezonansów pochodzących od modów płaszczowych (Rys. 3.4) nazywanych często tzw. grzebieniem (ang.: *comb*)



Rys. 3.4. Przykładowa charakterystyka spektralna siatki skośnej

Charakterystycznym zjawiskiem dla struktur ukośnych jest występowanie minimum na widmie transmisyjnym odpowiadające minimum ducha (ang.: *ghost peak*), którego wartość zmienia się wraz ze zmianą wartości kąta nachylenia płaszczyzn struktury. Wraz ze zwiększaniem kąta nachylenia płaszczyzn siatki większa część energii sprzęgana jest do płaszczu, a przez to zmniejsza się wartość energii przypadającej modowi rdzeniowemu Bragga. Mod ghosta składa się z kilku modów płaszczowych niższego rzędu, znajduje się pomiędzy modem rdzeniowym a modami płaszczowymi co powoduje, że bierze on udział w transferze energii wywołanej zmianą kąta nachylenia [18, 19].

Długość fali Bragga przedstawia wzór:

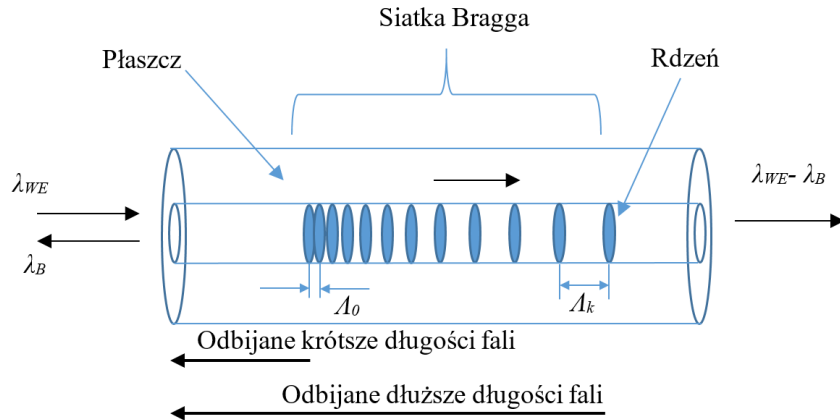
$$\lambda_B = 2n_{eff\ r} \frac{\Lambda}{\cos\theta}. \quad (3.4)$$

Natomiast długość fali sprzęgniętego i -tego modu opisuje zależność:

$$\lambda_{S,i} = (n_{eff\ r} + n_{eff\ p,i}) \frac{\Lambda}{\cos\theta}, \quad (3.5)$$

gdzie θ jest kątem skręcenia maski fazowej względem osi włókna, n_{eff} efektywnym współczynnikiem załamania rdzenia a $n_{eff\ p,i}$ jest efektywnym współczynnikiem załamania i -tego modu płaszczowego.

Siatkę chirpową wytwarza się za pomocą maski fazowej nazywanej maską chirpową. Zmiana okresu w takiej masce może być liniowa lub zmieniać się w sposób skokowy. Znaną są również metody wytwarzania chirpu na przewężeniach włókien światłowodowych. Na rysunku 3.5 przedstawiona została zasada działania siatki z monotonicznie narastającą wartością okresu siatki.



Rys. 3.5. Schemat i zasada działania siatki o narastającej wartości okresu

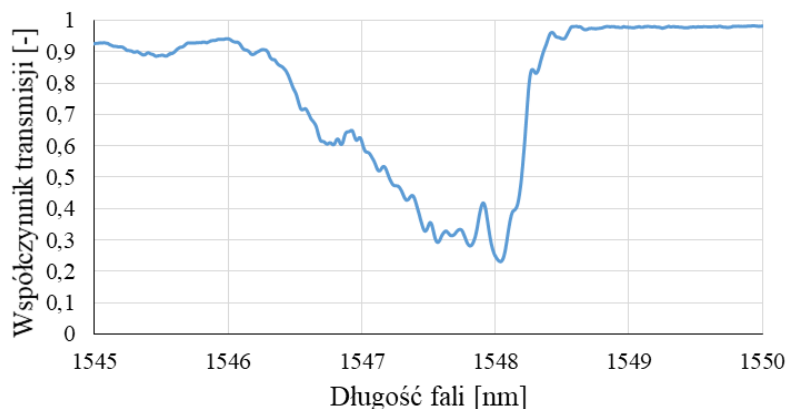
Zasada działania takiej siatki polega na tym, że fale o różnej długości odbijane są w różnych częściach siatki w zależności od okresu zmiany współczynnika załamania. W ten sposób krótsze długości fali odbijane są w tej części siatki, w której okres jest mniejszy i analogicznie dłuższe fale odbijane są w części siatki, gdzie okres jest większy. W opisywanym przypadku droga przebyta przez fale krótsze jest mniejsza niż w wypadku fal dłuższych. Odwrotny przypadek uzyskamy zmieniając kierunek wprowadzania sygnału optycznego (wejście z prawej strony) wtedy dłuższe fale zostaną odbite wcześniej, tym samym przebędą krótszą drogę. Miarą chirpu maski fazowej wykorzystanej do wytworzenia siatki chirpowej jest zmiana okresu maski w stosunku do jej długości i wyrażana jest ona jednostką nm/cm. Dla maski o długości 25 mm, chirpie 1 nm/cm oraz centralnym okresie maski np. 1060 nm okres na początku maski jest o 1,25 nm mniejszy od 1060 nm, a na końcu maski jest o 1,25 nm większy. Dla wytworzonych siatek chirp takiej siatki przyjmował będzie połowę wartości chirpu maski fazowej. Ten typ siatek wytwarzany jest poprzez zmianę okresu na długości światłowodu lub poprzez zmianę efektywnego współczynnika załamania w zależności od długości siatki, a także poprzez obydwie te efekty równocześnie, co przedstawia równanie (3.6).

$$\lambda_B(z) = 2n_{eff}(z)A(z). \quad (3.6)$$

Najprostszymi siatkami chirpowymi są siatki, których okres zmienia się w sposób liniowy zgodnie z poniższym równaniem:

$$A(z) = A_0 + \Delta A z, \quad (3.7)$$

gdzie A_0 jest okresem początkowym natomiast ΔA jest liniową zmianą okresu po długości włókna z. Przykładowa charakterystyka siatki chirpowej przedstawiona jest na rysunku 3.6.

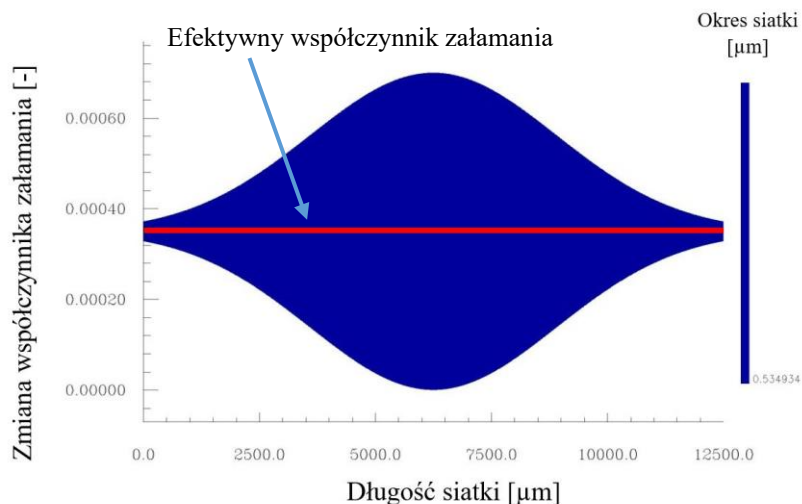


Rys. 3.6. Charakterystyka spektralna siatki zapisana za pomocą maski o chirpie równym 1 nm/cm.

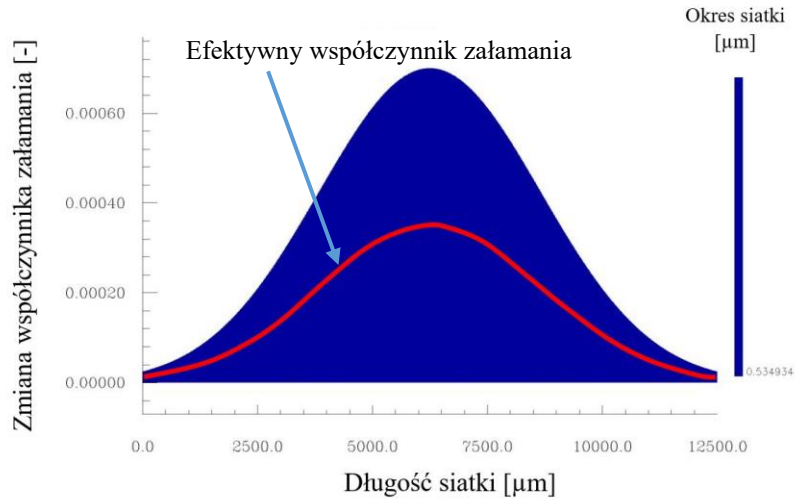
4. Modelowanie struktur periodycznych

W tej części przedstawiono obliczenia numeryczne charakterystyk widmowych wykonane dla wybranych profili apodycyjnych. Do obliczeń przyjęto średnicę rdzenia równą 9 μm , średnicę płaszczu 125 μm , współczynnik załamania rdzenia 1,4672, współczynnik załamania płaszczu 1,444.

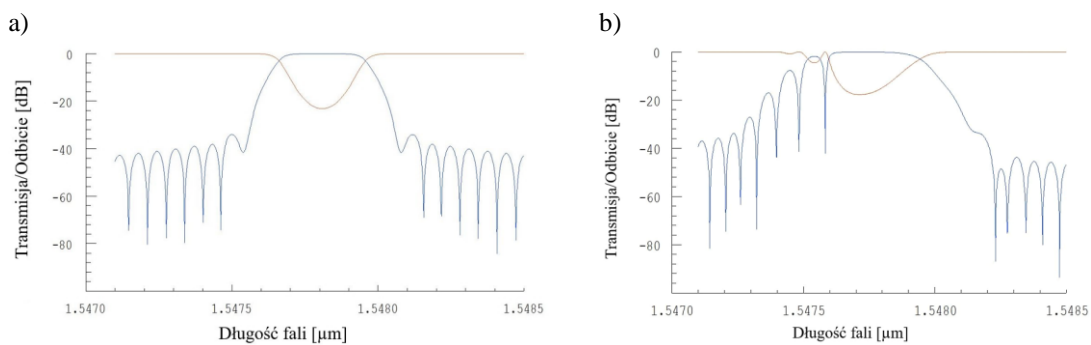
Apodyzacja, będąca parametrem siatki Bragga wynika z wielkości zmian współczynnika załamania światła na długości całej struktury δn_{eff} , z obwiedni zmian amplitudy współczynnika załamania światła, które razem determinują efektywny współczynnik załamania światła [40]. Dodatkowo, możemy mieć tutaj do czynienia z przypadkami, opisanymi również w pracy [41], opisującymi dwa różne możliwe rodzaje apodyzacji: bez stałej wartości współczynnika załamania w obszarze siatki (tzw. non-true apodization) oraz ze stałym efektywnym współczynnikiem załamania w obszarze siatki (tzw. true apodization). Przypadki te przedstawiono na rysunku 4.1 i 4.2.



Rys. 4.1. Apodyzacja ze stałym efektywnym współczynnikiem załamania w obszarze siatki (*true apodization*)



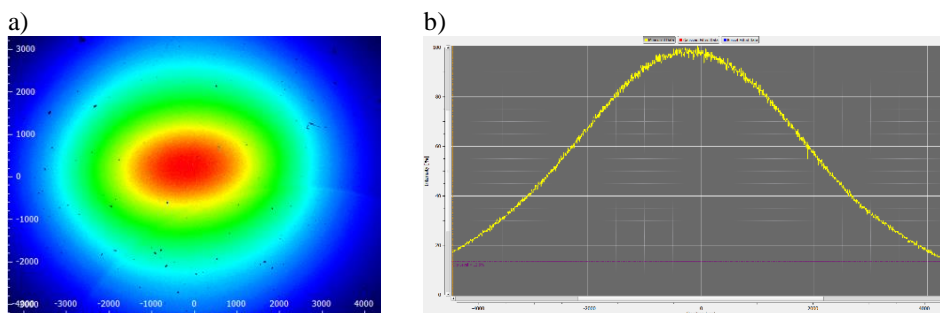
Rys. 4.2. Apodyzacja bez stałej wartości współczynnika załamania w obszarze siatki (*non-true apodization*)



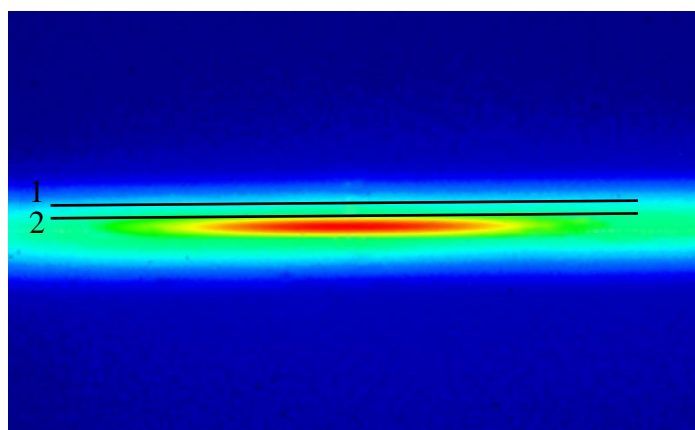
Rys. 4.3. Widma transmisyjne i odbiciowe siatek o stałym okresie dla a) apodyzacji ze stałym efektywnym współczynnikiem załamania w obszarze siatki (*true apodization*) b) apodyzacji bez stałej wartości współczynnika załamania w obszarze siatki (*non-true apodization*)

Siatki ze stałą wartością efektywnego współczynnika załamania są siatkami trudniejszymi do wytworzenia, jedną z metod ich wytwarzania jest zastosowanie masek fazowych o zmiennej wydajności dyfrakcyjnej, wiąże się to z koniecznością określenia parametrów siatki i funkcji apodyzacyjnej już na etapie wytwarzania maski fazowej. Wykres przedstawiający wartość efektywnego współczynnika załamania światła na długości siatki typu *true apodization* przedstawiono na rysunku 4.1. Czerwoną linią zaznaczono wartość efektywnego współczynnika załamania. Tego typu siatki mają zmniejszone wstęgi boczne, a ich widmo jest symetryczne co pokazane jest na rysunku 4.3 a. Siatki ze zmienną wartością efektywnego współczynnika załamania (Rys. 4.2) mają mniejszy potencjał aplikacyjny, gdyż wprawdzie posiadają zmniejszone wstęgi boczne, ale ich charakterystyka widmowa jest wyraźnie niesymetryczna. Wyniki obliczeń numerycznych charakterystyki widmowej takiej siatki przedstawiono na rysunku 4.3 b. Brak symetrii często eliminuje lub znacznie ogranicza możliwość ich wykorzystania w charakterze filtrów optycznych czy nawet czujników.

W przypadku FBG wytwarzanych na potrzeby niniejszej pracy ich apodyzacja wynika z faktu, że wartość mocy promieniowania lasera zmienia się na długości użytej maski fazowej i wytworzonej siatki Bragga. Kształt rzeczywistej charakterystyki przedstawiającej profil wiązki użytego lasera przedstawiono na rysunku 4.4.

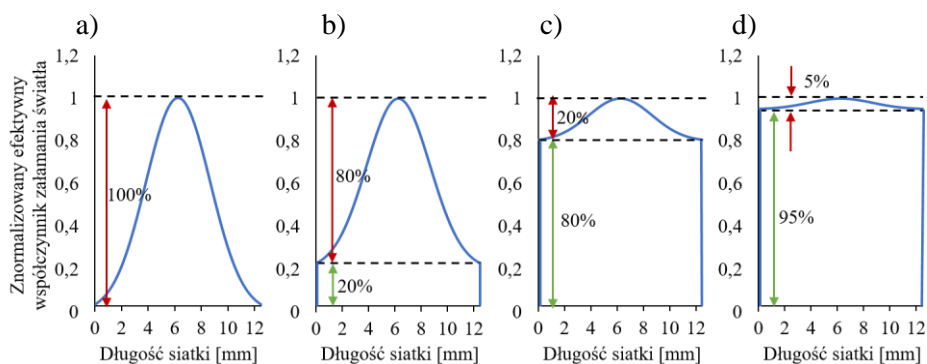


Rys. 4.4. a) Obraz wiązki wyjściowej lasera ekscymerowego uzyskany za pomocą profilometru, b) profil wiązki lasera



Rys. 4.5. Obraz wiązki wyjściowej lasera ekscymerowego po przejściu przez soczewkę cylindryczną

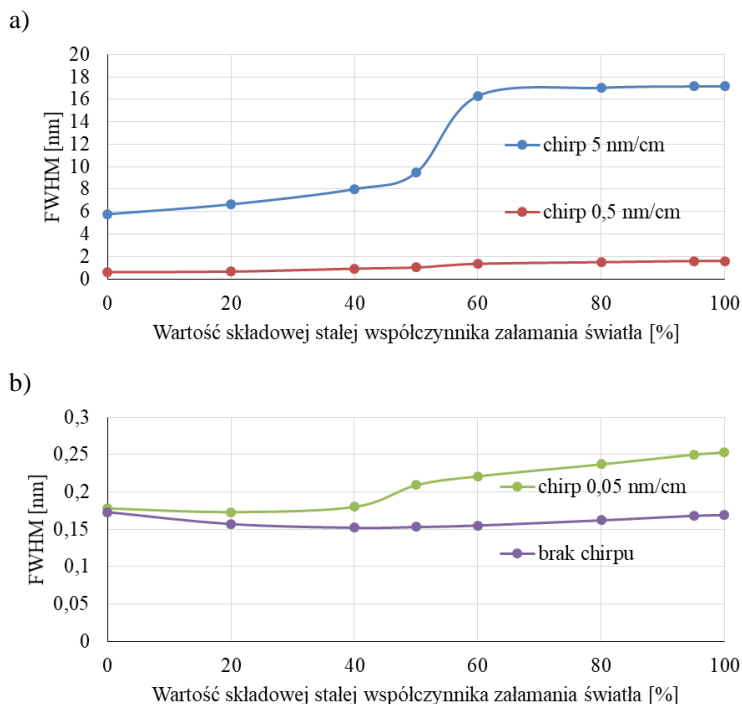
Zmiana profilu apodyzacji możliwa będzie również przy nie osiowym lub niesymetrycznym ustawieniu naświetlanego włókna jak pokazano to na rysunku 4.5. Pozycja 1 oraz 2 znajdują się powyżej osi środkowej profilu wiązki lasera, umieszczenie włókna w tych miejscach skutkowało będzie zmianą profilu apodyzacji. Zmieniać będzie się udział składowej stałej efektywnego współczynnika załamania światła co przedstawiono na rysunku 4.6. Siatki w niniejszej pracy modelowane były dla idealnie osiowego i symetrycznego położenia, natomiast rzeczywiste siatki mogą posiadać odchylenia od położenia idealnego. Na rysunku 4.6 przedstawiono sposób wyznaczania składowej stałej współczynnika załamania światła.



Rys. 4.6. Sposób wyznaczania procentowej wartości składowej stałej współczynnika załamania światła a) składowa stała równa 0%, b) składowa stała równa 20%, c) składowa stała równa 80%, d) składowa stała równa 95%,

Na rysunku 4.7 przedstawiono wrażliwość parametru $FWHM$ na zmianę składowej stałej współczynnika załamania światła dla różnych wartości chirpu.

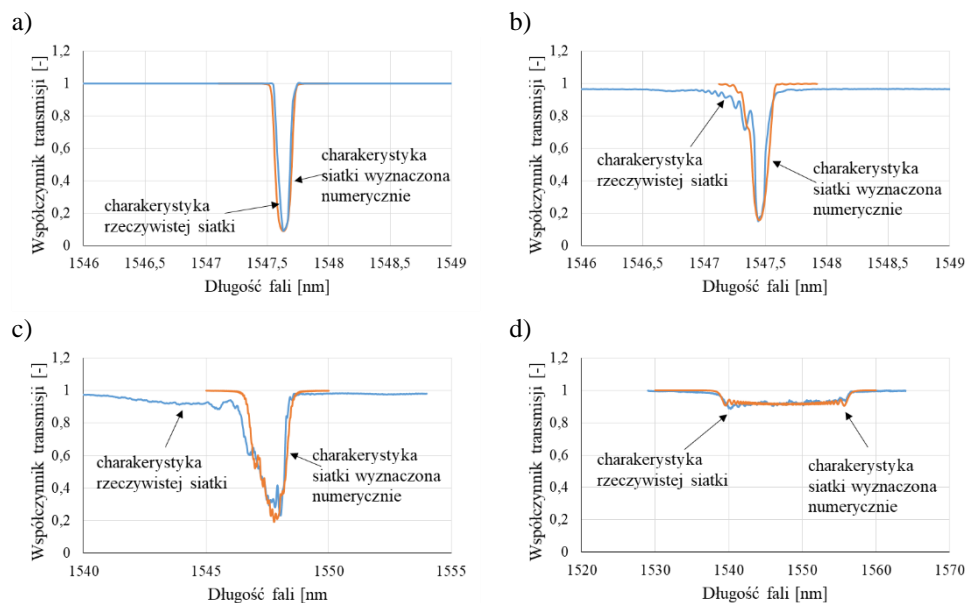
W wypadku siatek bez chirpu wpływ położenia włókna jest niezauważalny, natomiast przy siatkach z chirpem położenie względem osi profilu wiązki lasera ma kluczowe znaczenie. Zmiana położenia względem osi przekroju wiązki lasera oraz zmiana parametru $FWHM$ pokazane jest na rysunku 4.7.



Rys. 4.7. Zależność wartości parametru $FWHM$ od wartości składowej stałej efektywnego współczynnika załamania światła a) dla siatki z chirpem 5 nm/cm oraz 0,5 nm/cm, b) dla siatki z chirpem 0,05 nm/cm oraz bez chirpu

Rysunek 4.7 przedstawia zmianę wartości parametru $FWHM$ dla czterech siatek przy braku chirpu, z chirpem 0,05 nm/cm, 0,5 nm/cm oraz 5 nm/cm dla zmiennego położenia względem osi poziomej przekroju wiązki jak pokazuje rysunek 4.5. Przy czym idealnie centralne położenie odpowiada brakowi składowej stałej i jest to wartość odpowiadająca położeniu na osi równa 0%. Dla siatki z chirpem 5 nm/cm zmiana jest największa i wartość $FWHM$ zmienia się od 5,8 nm do wartości 17,2 nm czyli prawie trzykrotnie. Największa zmiana wartości parametru $FWHM$ występuje w przypadku 50% wartości składowej stałej efektywnego współczynnika załamania. Zmiana wartości $FWHM$ przy zmianie wartości składowej stałej od 0 do 100% dla siatki z chirpem 0,5 nm wynosi odpowiednio 0,6 nm i 1,6 nm, dla siatki z chirpem 0,05 nm/cm zmiana jest od 0,18 nm do 0,25 nm, natomiast dla siatki bez chirpu wartości parametru $FWHM$ zmienia się w zakresie od 0,15 nm do 0,17 nm. Największa wrażliwość na położenie włókna względem osi światłowodu występuje dla siatek o większym chirpie 5 nm/cm oraz 0,5 nm/cm, dla tych siatek zmiana parametru $FWHM$ jest kilkukrotna.

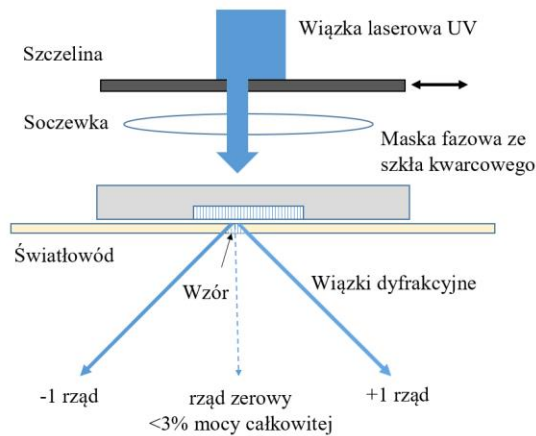
Poniżej przedstawione zostały charakterystyki rzeczywiste oraz charakterystyki wynikające z obliczeń numerycznych uwzględniające zmianę kształtu profilu apodyzacji zgodnie z rysunkiem 4.6.



Rys. 4.8. Wyniki obliczeń numerycznych i rzeczywiste charakterystyki siatek o długości 12,5 mm apodyzowanych funkcją Gauss dla różnych wartości chirpu: a) brak chirpu, b) chirp 0,05 nm/cm, c) 0,5 nm/cm, d) 5 nm/cm

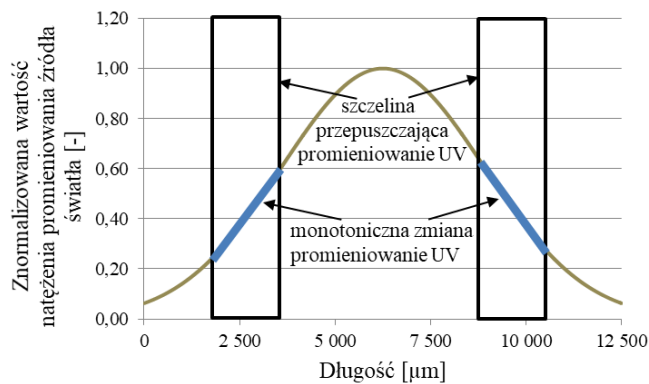
W pierwszej kolejności wytworzono struktury zaznaczone na rysunku 4.8 linią niebieską. Charakterystyki wykonane były dla różnych czasów naświetlania ponieważ czas naświetlania siatki jednorodnej jest znacznie krótszy niż siatki z chirpem 5 nm/cm i siatka taka byłaby niewidoczna. Czasy dla wszystkich siatek dobierane były podczas wytwarzania tak by osiągnąć maksymalną wartości refleksji każdej siatki. Następnie w OptiGrating dopasowano rzeczywisty profil dla siatek uwzględniający składową stałą efektywnego współczynnika załamania światła. Najlepsze dopasowanie charakterystyki uzyskano dla 95% zawartości składowej stałej efektywnego współczynnika załamania światła dla siatki z chirpem 5nm/cm oraz 50% zawartości składowej stałej efektywnego współczynnika załamania światła dla siatki z chirpem 0,5 nm/cm. Świadczy to o przesunięciu naświetlanego włókna względem centralnego położenia wiązki lasera i dużej wrażliwości na położenie dla siatek o większym chirpie. Siatki z małym chirpem lub bez chirpu nie wykazywały tak znacznego wpływu udziału składowej stałej co pokazuje charakterystyka na rysunku 4.7b.

Na potrzeby pracy opracowano nieskomplikowany sposób sterowania kształtem apodyzacji wytworzonych struktur periodycznych. Zaproponowano metodę, w której zmianę profilu apodyzacyjnego można w prosty sposób uzyskać poprzez umieszczenie szczeliny w wiązce lasera zapisującego struktury. Szczelina taka powinna przesłaniać wiązkę lasera w ściśle określonym miejscu.



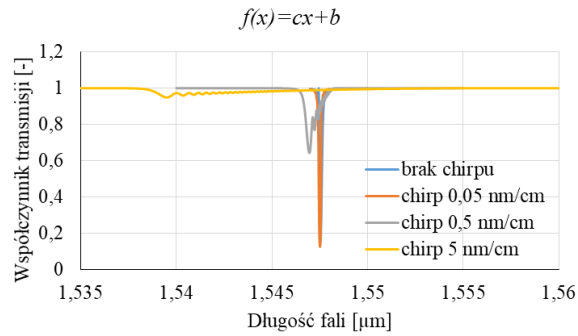
Rys. 4.9. Zmiana apodyzacji za pomocą szczeliny o regulowanej szerokości

Na charakterystyce przedstawiającej rozkład natężenia promieniowania lasera UV szczelina ta umieszczona została na jednym ze zboczy tej charakterystyki (Rys. 4.10). Jak można zauważyć kształt rozkładu natężenia promieniowania całej wiązki laserowej jest opisany krzywą Gaussa, natomiast wybierając odpowiednią część tej wiązki uzyskuje się profil zmian natężenia promieniowania zbliżony do liniowego. W wypadku korzystania z masek fazowych o stałym okresie na całej długości (brak chirpu) charakterystyki widmowe modelowanych siatek są zbliżone do charakterystyki widmowej siatki jednorodnej o apodyzacji funkcją Gaussa. Natomiast przy maskach fazowych z tzw. chirpem zauważalna jest asymetria siatki modelowanej w zależności od kierunku narastania profilu i kierunku wzrostu chirpu maski (Rys. 4.11 i Rys. 4.12).



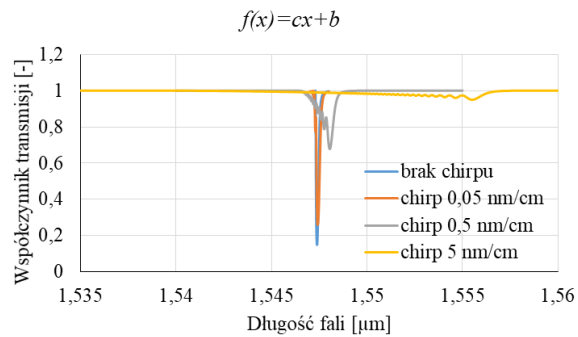
Rys. 4.10. Zmiana apodyzacji za pomocą szczeliny o regulowanej szerokości umieszczonej na zboczu narastającym i opadającym profilu wiązki lasera

Rysunek 4.11 przedstawia wyniki obliczeń numerycznych widma siatki o profilu liniowym o dodatnim współczynniku kierunkowym prostej c .



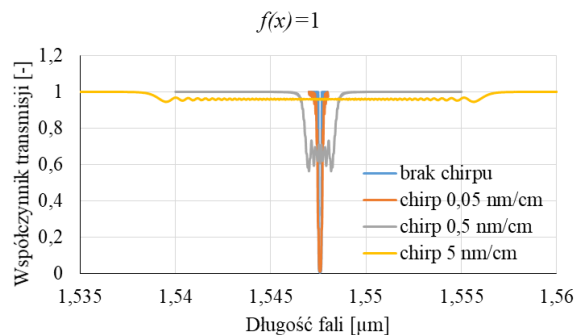
Rys. 4.11. Wyniki obliczeń numerycznych charakterystyk spektralnych dla siatki apodyzowanej profilem liniowym z dodatnim współczynnikiem kierunkowym prostej dla różnych wartości chirpu

Wyznaczone numerycznie charakterystyki spektralne dla profilu liniowego ujemnego przedstawione zostały na rysunku 4.12.



Rys. 4.12. Wyniki obliczeń numerycznych charakterystyk spektralnych dla siatki apodyzowanej profilem liniowym o ujemnym współczynniku kierunkowym prostej dla różnych wartości chirpu

Dla porównania wykonano symulacje dla profilu apodyzacyjnego opisanego funkcją $f(x)=1$.



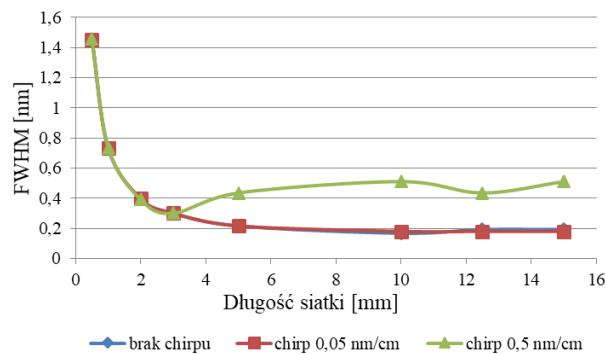
Rys. 4.13. Wyniki obliczeń numerycznych dla siatki o profilu apodyzacyjnym typu $f(x)=1$ dla różnych wartości chirpu

Jak można zaobserwować, zmiana okresu struktury wpływa znacząco na jej charakterystyki spektralne. Największe zmiany parametru $FWHM$ dla różnych wartości chirpu występują dla struktury o profilu apodyzacyjnym opisanym funkcją $f(x) = 1$ przedstawionym na rysunku 4.13. Zmiana $\Delta FWHM/\Delta chirp$ wynosi aż 3,49 nm/nm/cm i dla tego profilu apodyzacyjnego można uzyskać siatkę o największej wartości parametru $FWHM$. Dla chirpu równego 5 nm/cm wartość połówkowej szerokości spektralnej wynosi 17,5 nm. Strukturę o najmniejszej wartości połówkowej szerokości spektralnej można uzyskać stosując profil apodyzacyjny opisany funkcją $f(x) = cx + b$ dla $c > 0$. Zmiana

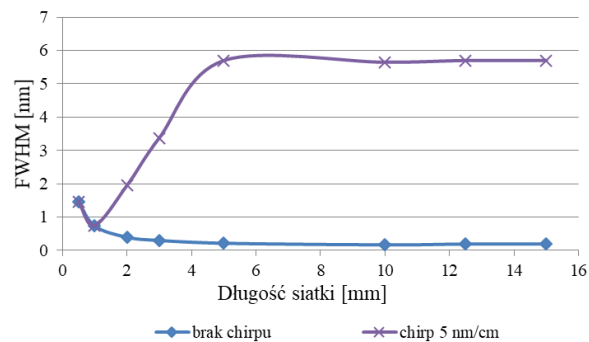
$\Delta FWHM/\Delta chirp$ tej struktury wynosi 0,78 nm/nm/cm i dla tego profilu można uzyskać siatkę o najmniejszej wartości $FWHM$ równej 0,13 nm. Wartość współczynnika odbicia zmienia się podobnie dla wszystkich profili apodyzacyjnych co oznacza, że niezależnie od profilu, dla tych samych wartości chirpu, uzyskamy zbliżone wartości współczynnika odbicia.

Parametry charakterystyk spektralnych takie jak $FWHM$, współczynnik transmisji siatki, nachylenie zboczy charakterystyki spektralnej zależą również od długości siatki. W celu zbadania tych zależności przeprowadzono obliczenia numeryczne dla struktur apodyzowanych o profilu Gaussa ze współczynnikiem kształtu a równym 0,5 oraz dla amplitudy modulacji współczynnika załamania δn równej 0,000137. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla siatki bez chirpu jak również z chirpem wynoszącym 0,05 nm/cm, 0,5 nm/cm oraz 5 nm/cm.

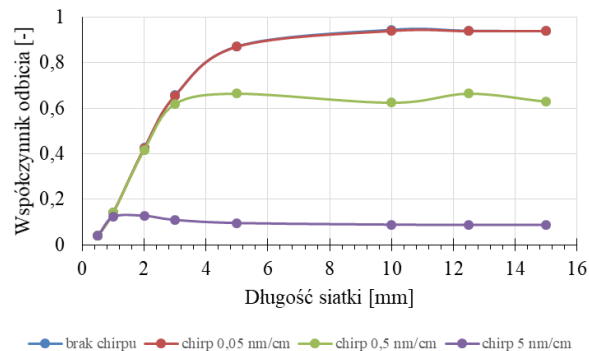
Na podstawie obliczonych numerycznie charakterystyk spektralnych wyznaczono wartość połówkowej szerokości spektralnej i współczynnik odbicia siatki w zależności od długości siatki dla różnych wartości chirpu. Wyniki przedstawiono na rysunkach 4.14–4.16.



Rys. 4.14. Zależność $FWHM$ od długości siatki dla struktury bez chirpu z chirpem 0,5 nm/cm i chirpem 0,05 nm/cm



Rys. 4.15. Zależność $FWHM$ od długości siatki dla struktury z chirpem 5 nm/cm oraz przy braku chirpu



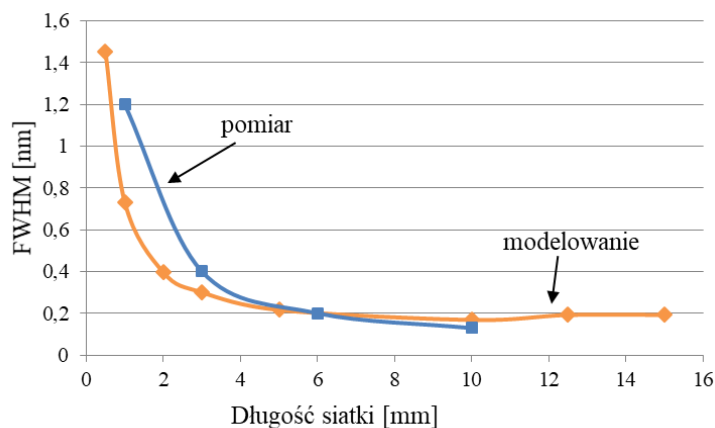
Rys. 4.16. Zależność współczynnika odbicia od długości siatki dla struktury bez chirpu z chirpem 0,05 nm/cm, chirpem 0,5 nm/cm i chirpem 5 nm/cm

Siatki bez chirpu oraz z chirpem 0,05 nm/cm posiadają zbliżone parametry *FWHM* oraz wartości współczynnika odbicia, spowodowane jest to małą zmianą okresu siatki po długości. *FWHM* dla siatki o długości 15 mm bez chirpu wynosi 0,19 nm natomiast siatka tej samej długości z chirpem 0,05 nm/cm posiada wartość parametru *FWHM* równą 0,18 nm. Współczynnik odbicia przyjmuje wartość powyżej 0,87 przy długości siatki 5 mm dla struktury z chirpem 0,05 nm/cm jak również dla struktury bez chirpu. Zwiększanie długości siatki powyżej 10 mm w wypadku siatki bez chirpu i z chirpem 0,05 nm/cm nie powoduje znacznego wzrostu współczynnika odbicia.

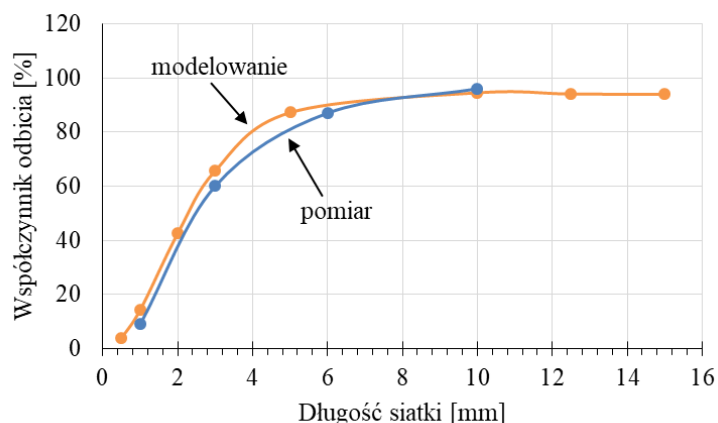
Dla siatek z chirpem równym 0,5 nm/cm parametr *FWHM* zmienia się w zakresie od 1,46 nm dla siatki o długości 0,5 mm do wartości 0,5 nm dla siatki o długości 15 mm. Zauważyć można, że zwiększając długość siatki z chirpem 0,5 nm/cm połowkowa szerokość spektralna dla siatek do 3 mm przyjmuje wartości zbliżone do siatki bez chirpu, natomiast dla dłuższych struktur powyżej 4 mm zmiana parametru *FWHM* jest w zakresie od 0,4 nm do 0,51 nm. Natomiast współczynnik odbicia zmienia się w zakresie od 0,04 dla siatki o długości 0,5 mm do 0,94 dla siatki o długości 15 mm.

W wypadku siatki z chirpem 5 nm/cm wartość parametru *FWHM* wynosi 1,45 nm dla siatki o długości 0,5 mm i 5,7 nm dla siatki o długości 15 mm. Zatem 30-krotna zmiana długości siatki powoduje blisko czterokrotną zmianę szerokości połowkowej jej charakterystyki transmisyjnej. Na rysunku 4.15 oraz 4.16 widać, że krótkie siatki chirpowe posiadają parametry i charakterystyki zbliżone do siatek bez chirpu, spowodowane jest to tym, że na krótkim odcinku siatki chirpowej zmiana okresu struktury jest niewielka i taka siatka parametrami zbliżona jest do siatki jednorodnej o stałym okresie. Dla struktury CFBG o długości równej 0,5 mm współczynnik odbicia osiąga wartość 0,04 natomiast w wypadku siatki o długości 15 mm współczynnik ten równy jest 0,09.

Na podstawie charakterystyk spektralnych przedstawiono wyniki wartości parametru *FWHM* (Rys. 4.17) oraz współczynnika odbicia (Rys. 4.18) dla siatek modelowanych matematycznie oraz rzeczywistych, wytworzonych w laboratorium. Charakterystyki przedstawiają wpływ długości struktury na wartość połowkowej szerokości spektralnej oraz współczynnik odbicia.



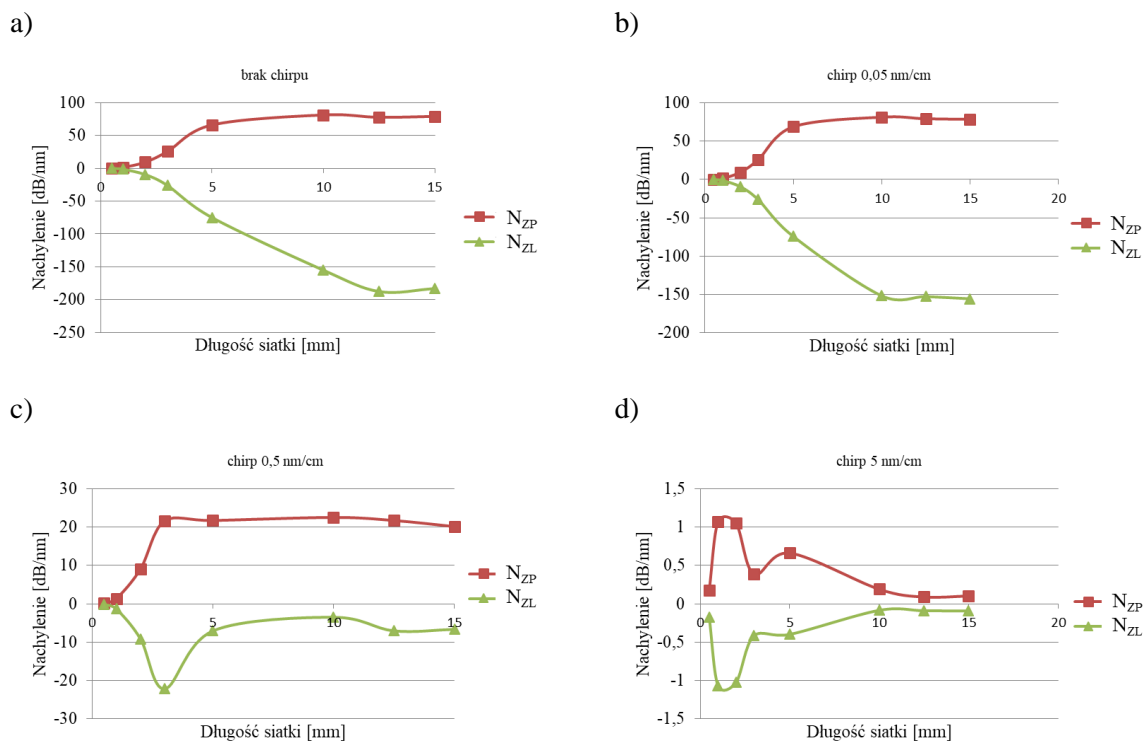
Rys. 4.17. Zależność FWHM w funkcji długości siatki. Struktura bez chirpu



Rys. 4.18. Zależność współczynnika odbicia dla różnych długości siatki. Struktura bez chirpu

Dla siatek bez chirpu o profilu apodyzacyjnym Gaussa największa wartość $FWHM$ występuje dla najkrótszej siatki o długości 0,5 mm i wynosi 1,45 nm, ale współczynnik odbicia siatki wynosi zaledwie 3,9%. Współczynnik odbicia rośnie znacząco do długości siatki 5 mm następnie uzyskuje nasycenie osiągając wartość 94,5% dla siatki o długości 15 mm. W wypadku wytworzonych siatek pomiary parametrów $FWHM$ i współczynnika odbicia R wykonane zostały dla czterech wartości długości siatki równych odpowiednio 1 mm, 3 mm, 6 mm oraz 10 mm w celu potwierdzenia zgodności wyników uzyskanych z modelowania matematycznego z wynikami pomiarów siatek rzeczywistych, wytworzonych w laboratorium.

Kolejnym parametrem, który został wyznaczony z charakterystyk widmowych jest nachylenie zbocza charakterystyki transmisyjnej siatki.



Rys. 4.19. Nachylenie zbocza charakterystyki spektralnej siatki Bragga w funkcji długości a) dla struktury bez chirpu, b) dla struktury z chirpem 0,05 nm/cm, c) dla struktury z chirpem 0,5 nm/cm d) dla struktury z chirpem 5 nm/cm

Siatki o największym chirpie wynoszącym 5 nm/cm charakteryzują się najmniejszym nachyleniem zbocza charakterystyki widmowej uzyskując wartość 1,1 dB/nm dla zbocza prawego oraz -1,1 dB/nm dla zbocza lewego. Dla mniejszego chirpu, np. wynoszącego 0,5 nm/cm nachylenie to jest większe i osiąga wartość 22,5 dB/nm dla zbocza prawego oraz -22,5 dB/nm dla zbocza lewego. Największe nachylenie zbocza charakterystyki widmowej siatek występuje dla struktur bez chirpu i z małym chirpem 0,05 nm/cm. Dla najmniejszych długości siatek, np. 0,5 mm N_{ZP} wynosi 0,17 dB/nm oraz N_{ZL} osiąga wartość -0,17 dB/nm, dla siatek o długości równej 15 mm N_{ZL} wynosi -155,7 dB/nm natomiast N_{ZP} wynosi 78,5 dB/nm. Dla siatek bez chirpu wartość N_{ZL} wynosi -183 dB/nm oraz N_{ZP} wynosi 79 dB/nm. Wynika stąd, że długość siatki wpływa znacząco na nachylenie zbocza charakterystyki widmowej siatki. Nachylenie można zmieniać w szerokim zakresie od 0,17 dB/nm do około 80 dB/nm dla zbocza prawego i w zakresie od -0,17 dB/nm do -183 dB/nm dla zbocza lewego. Siatki o dużym nachyleniu zbocza charakterystyki spektralnej rzędu kilkudziesięciu dB/nm są strukturami bez chirpu i o długości powyżej 10 mm. Tego typu siatki charakteryzują się małą wartością połówkowej szerokości spektralnej poniżej 0,2 nm oraz wysoką wartością współczynnika odbicia struktury bliską 1. Długość struktury periodycznej ma wpływ na parametry charakterystyk widmowych a przez to wpływa na wartość $FWHM$, współczynnik odbicia jak również wartość nachylenia zbocza charakterystyki spektralnej. Chcąc uzyskać powtarzalne siatki Bragga o zadanych parametrach należy dokładnie kontrolować szerokość wiązki UV, którą naświetlane jest włókno, a tym samym kontrolować długość struktury periodycznej.

5. Wytwarzanie specjalnych struktur periodycznych we włóknach światłowodowych

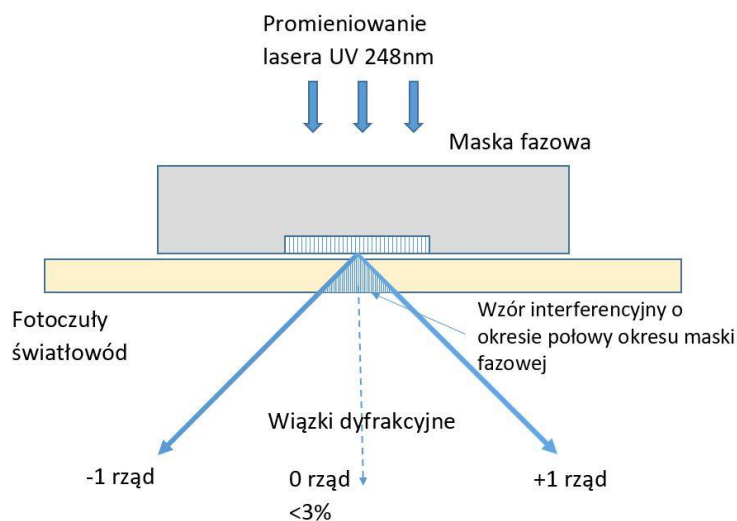
Jedną z najbardziej znanych i popularnych metod wytwarzania struktur periodycznych jest metoda maski fazowej, która wykorzystuje promieniowanie o długości fali 193 nm oraz 248 nm. Metoda ta charakteryzuje się dużą stabilnością mechaniczną i optyczną. Po oświetleniu wiązką laserową maski fazowej powstaje regularny wzór interferencyjny, przy czym najlepszy kontrast uzyskuje się w odległości 100–200 μm od maski fazowej. Wiązką lasera możemy oświetlać cały obszar roboczy maski fazowej w zależności od rodzaju maski jest to 25, 30 lub 50 mm długości maski, jeżeli pozwala na to konstrukcja lasera. Wiązka używana do badań wykonanych na potrzeby niniejszej pracy posiada na wyjściu wymiary 12 x 4,5 mm oraz rozbieżność 0,4 x 0,2 mrad. Jako czynnik wyładowczy zastosowana jest mieszanina gazów szlachetnych i halogenów. W wypadku lasera Bragg Star 248 nm nośnikiem jest neon, a pozostałe gazy stanowią fluor 0,13%, hel 2,44% oraz krypton 3,42%. W celu zapisu dłuższych siatek stosowane są ekspandery wiązki, które poszerzają wiązkę optyczną np. 2,5- krotnie, umożliwiając zapis dłuższych siatek. Laser Bragg Star M (Coherent Inc.) umożliwia zapis siatki z energią 140 mJ i repetycją 100 Hz. Koherencja, czyli droga spójności tego lasera wynosi 800 μm , co pozwala na powstanie interferencji i umożliwia zapis siatki na rdzeniu o średnicy ok 10 μm . Ten typ lasera ze względu na długą drogę koherencji i energię ma możliwość zapisu równoległego wielu siatek poprzez rozdzielanie wiązki lasera. Na świecie jest około 50 producentów siatek Bragga, najwięksi producenci wytwarzają siatki Bragga podczas wyciągania włókna jednomodowego jednym impulsem lasera ekscymerowego. Siatka jest powlekana lakierem i oznaczana markerem. Niestety zapis podczas wyciągania z powodu użycia jednego nanoimpulsu skutkuje małymi wartościami współczynnika odbicia takich siatek, rzędu 10-20%.



Rys. 5.1. Zdjęcie zaprojektowanego i wykorzystywanego na potrzeby pracy stanowiska do wytwarzania siatek Bragga na włóknach fotouczulonych, niebieskimi strzałkami zaznaczono przebieg wiązki lasera

Na potrzeby niniejszej pracy zbudowano stanowisko do wytwarzania siatek Bragga. Zaprojektowano kompletny układ optyczny oparty na zwierciadłach dielektrycznych oraz soczewce cylindrycznej. Układ optyczny pełni rolę peryskopu, dopasowuje on wysokość wyjścia promieniowania lasera ekscymerowego do układu zapisu siatek i odwraca wiązkę, gdyż promień wyjściowy z lasera ma ułożenie pionowe. Układ transformuje wiązkę za pomocą trzech zwierciadeł dielektrycznych na wiązkę poziomą. Zastosowana soczewka jest soczewką cylindryczną wykonaną z czystego szkła krzemionkowego

Aby umożliwić zapisu siatek skośnych układ został wyposażony w obrotowy element, na którym umieszczana jest maska fazowa. Obrotowy stolik ma możliwość precyzyjnego sterowania kątem skręcenia maski względem padającej wiązki.



Rys. 5.2. Wytwarzanie siatek Bragga metodą maski fazowej

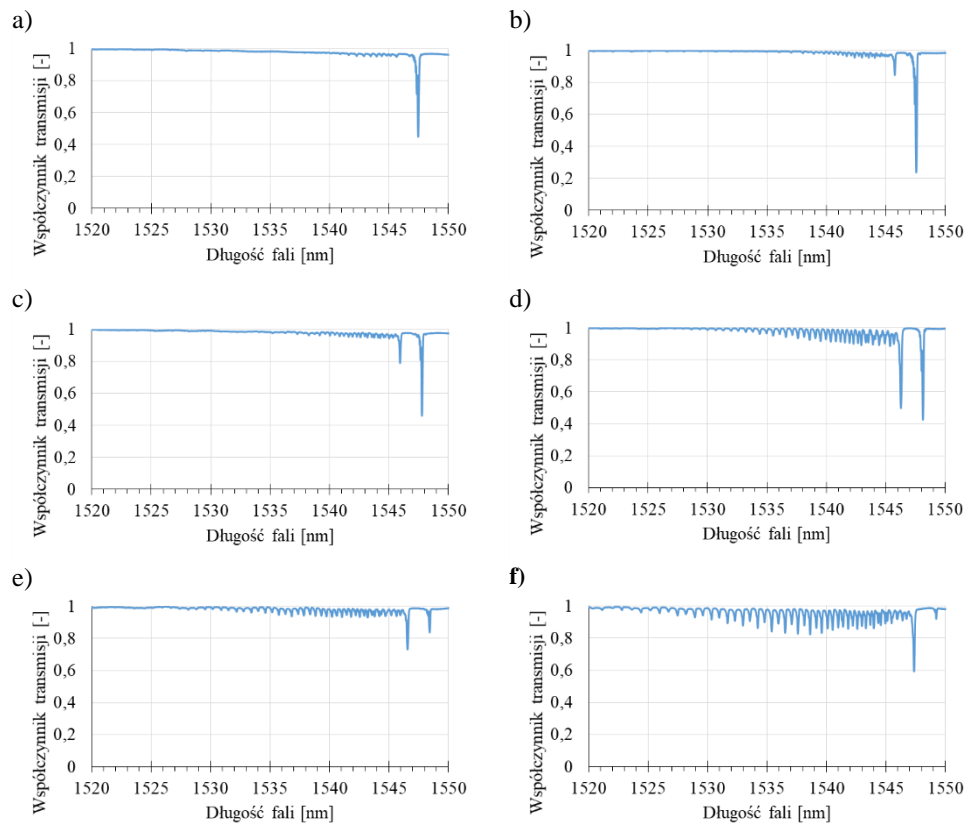
Metoda maski fazowej jest obecnie najbardziej rozpowszechnioną techniką wytwarzania siatek Bragga. Ze względu na stosowanie jednego elementu dyfrakcyjnego zapewnia ona dużą powtarzalność, natomiast bliskie umieszczenie maski i włókna zmniejsza wpływ drgań mechanicznych. Wadą metody jest konieczność stosowania konkretnej maski o odpowiedniej długości fali, implikująca brak możliwości płynnej zmiany długości fali w dużym zakresie oraz znaczący koszt takiego elementu.

W tej części autoreferatu przedstawione zostały charakterystyki widmowe struktur Bragga, wytworzonych w laboratorium przy wykorzystaniu opisanego wcześniej układu lasera ekscymerowego oraz układu optycznego do przeniesienia wiązki lasera na włókna światłowodowe. Zbudowany układ

pozwalają na zmianę szeregu kluczowych parametrów procesu zapisu tego typu struktur. Dla potrzeb dalszej analizy w tabeli 5.1 wyszczególniono takie parametry i podano ich wartości. Dla każdej kombinacji wartości podanych w tabeli w laboratorium wykonano odpowiednie struktury Bragga, a ich widmowe charakterystyki transmisyjne zestawiono na rysunkach 5.5–5.7. W siatkach skośnych znormalizowana efektywna widzialność prążków jest zależna od kąta skosu i powoduje zmniejszanie się współczynnika odbicia modu Bragga. Dokładny kształt tej zmiany zależy również od wartości współczynnika modulacji oraz kształtu profilu siatki. Stąd też przykładowo współczynnik odbicia może maleć dla kątów skosu powyżej wartości 5 stopni i przyjmować wartość zero dla kąta o wartości nieco powyżej 8 stopni.

Tab. 5.1. Parametry zapisu siatek chirpowych

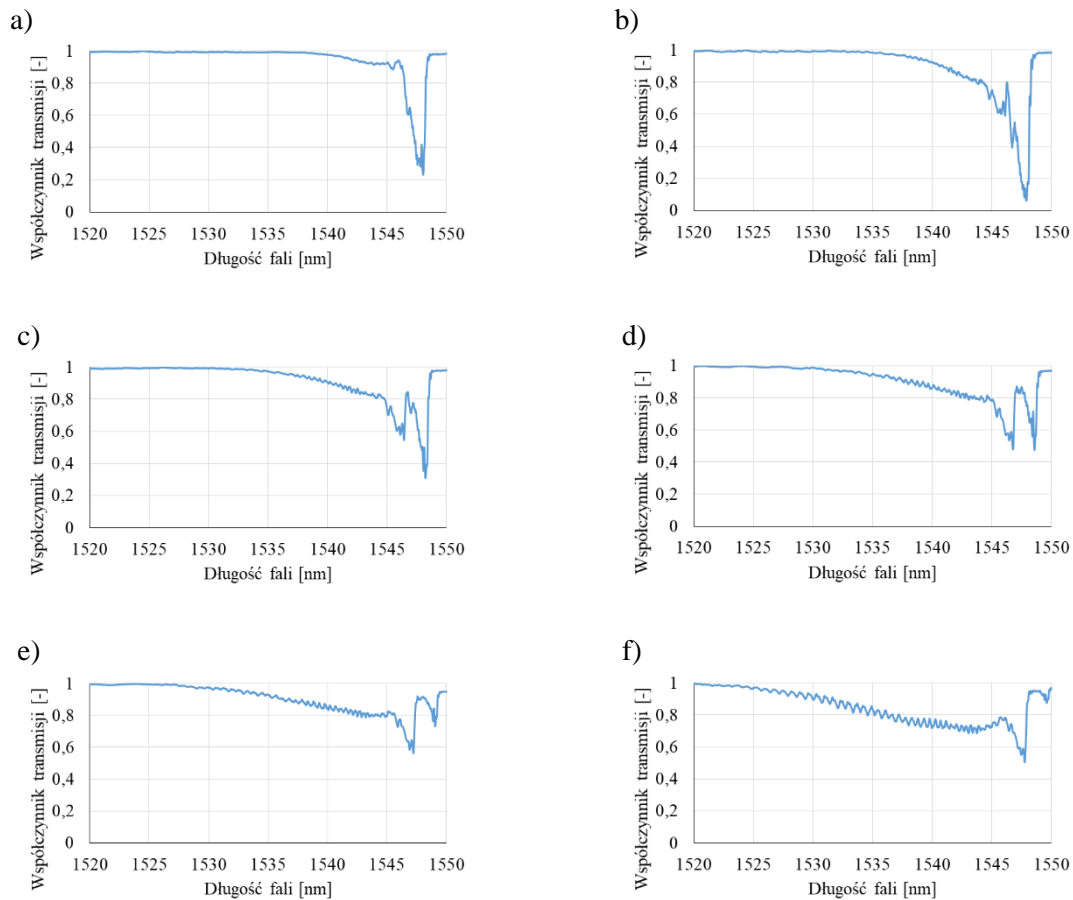
Maska fazowa	Czas naświetlania	repetycja	energia	Napięcie
0,1 nm/cm	4 min	50 Hz	90 mJ	20,5 kV
1 nm/cm	15 min	50 Hz	90 mJ	20,5 kV
10 nm/cm	30 min	50 Hz	90 mJ	20,5 kV



Rys. 5.3. Zmierzone charakterystyki spektralne siatek zapisanych za pomocą maski z chirpem 0,1 nm/cm dla różnych kątów zapisu a) 0°, b) 0,5°, c) 1°, d) 1,5°, e) 2°, f) 2,5°

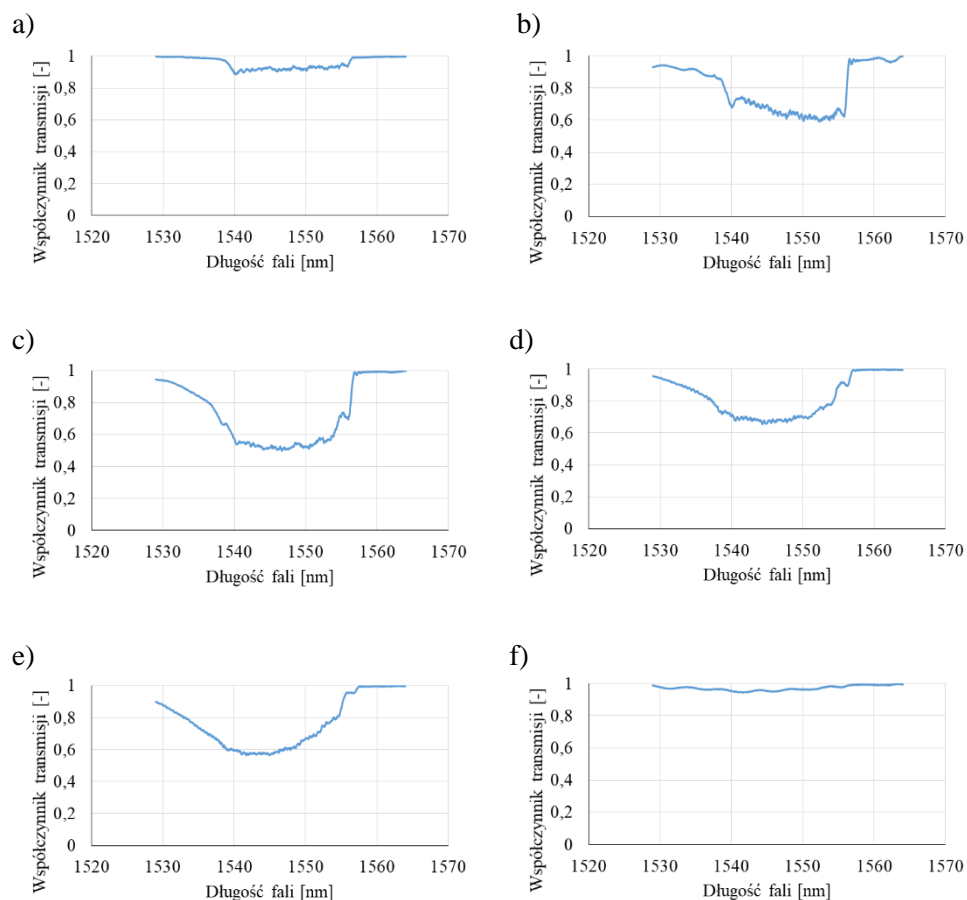
Dla siatek o małych wartościach chirpu w widmie (Rys. 5.3b, 5.3c, 5.3d, 5.3e, 5.3f) widoczne jest charakterystyczne minimum odpowiadające istnieniu modu typu ghost oraz minimum odpowiadające rezonansowi/modowi Bragga. Wyraźnie widoczny jest również grzebień modów płaszczowych charakterystyczny dla struktur skośnych i pojawiający się po stronie fal krótszych w stosunku do głównego rezonansu Bragga. Dla małych wartości chirpu siatki (Rys. 5.3 a, 5.3b, 5.3c, 5.3d, 5.3e, 5.3f) widoczne jest, że wraz ze wzrostem kąta siatki następuje wzrost amplitudy modów płaszczowych. Pojawia się również minimum związane z występowaniem modu ghosta. Charakterystyczne jest również poszerzenie zakresu spektralnego, w którym pojawiają się nowe minima, związane

z występowaniem kolejnych modów wyższego rzędu. W celu dalszej analizy charakterystyk spektralnych na rysunku 5.4 umieszczono wyniki pomiarów widmowych siatek z chirpem 0,5 nm/cm dla sześciu wartości kąta obrotu maski fazowej.



Rys. 5.4. Zmierzone charakterystyki spektralne siatek zapianych za pomocą maski z chirpem 1 nm/cm dla różnych kątów zapisu: a) 0°, b) 0,5°, c) 1°, d) 1,5°, e) 2°, f) 2,5°

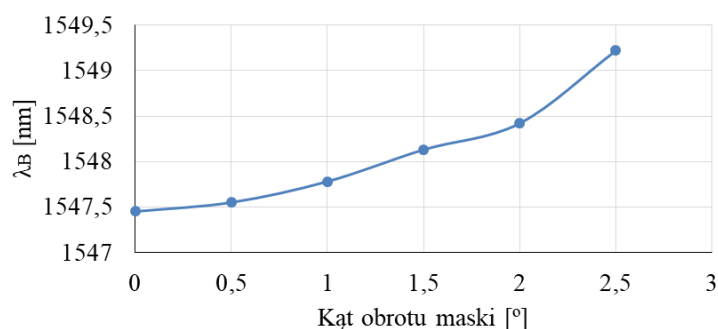
Dla chirpów o większej wartości, rzędu 0,5 nm/cm (Rys. 5.4a, 5.4b, 5.4c, 5.4d, 5.4e, 5.4f) wraz ze wzrostem kąta nachylenia płaszczyzn siatek skośnych chirpowych zmienia się charakter widma. Wzrost amplitudy poszczególnych minimów charakterystyki spektralnej jest mniejszy, natomiast część widma znajdująca się po stronie fal krótszych ulega obniżeniu. Zmniejsza się zatem współczynnik transmisji dla fal krótszych od fal rezonansowych Bragga. Wynika to ze wzrostu odbicia tej części widma przez siatki skośne, posiadające chirp rzędu 0,5 nm/cm. Kolejnej analizie poddane zostały siatki zapisane za pomocą maski o chirpie 10 nm/cm, których zmierzone charakterystyki spektralne przedstawione zostały na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Zmierzone charakterystyki spektralne siatek zapisanych za pomocą maski z chirpem 10nm/cm dla różnych kątów zapisu: a) 0°, b) 0,5°, c) 1°, d) 1,5°, e) 2°, f) 2,5°

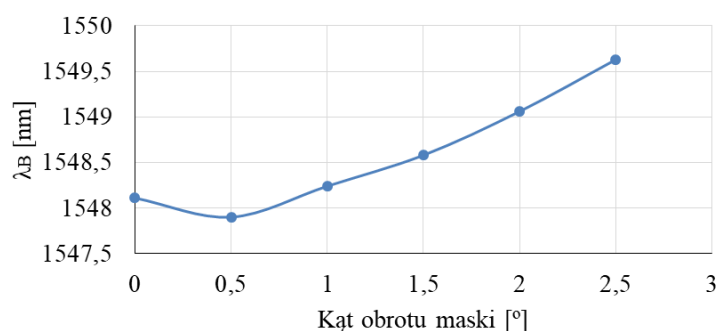
Dla struktur wytworzonych za pomocą masek z chirpem 10 nm/cm pik ghosta, pik główny rezonansowy oraz piki modów wyższych rzędów przyjmują takie same wartości i charakterystyka siatki obniża się w szerokim zakresie długości fal. Dla siatek o tak dużej wartości chirpu dla różnych wartości kąta nachylenia płaszczyzny siatki charakterystyczne jest płaskie widmo w szerokim zakresie długości fal. Jak można zauważyć im szerszy jest zakres zmian okresu struktury Bragga tym większy jest zakres długości fal, które spełniają warunek Bragga. Fale o różnych długościach odbijane są w różnych częściach struktury o zmiennym okresie. Krótsze fale odbijane są w miejscu, gdzie okres jest mniejszy i analogicznie fale dłuższe ulegają odbiciu w miejscu, w którym okres jest większy. Im szerszy jest zatem zakres zmian wartości okresu struktury na jej długości, tym zakres długości odbitych fal jest szerszy, co powoduje poszerzenie charakterystyki spektralnej całej struktury.

Struktura mieszana powstaje z połączenie dwóch rodzajów siatek: siatki chirpowej oraz siatki skośnej, przez co posiada cechy siatki skośnej, jak również siatki chirpowej.



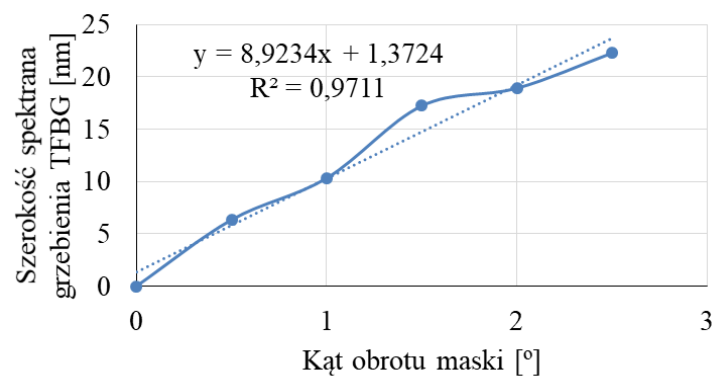
Rys. 5.6. Zależność centralnej długości fali Bragga od kąta naświetlania siatki wytworzonej za pomocą maski fazowej o chirpie 0,1 nm/cm

Rysunek 5.6 przedstawia wzrost długości fali Bragga wraz ze wzrostem kąta naświetlania. Dla kąta 0° wynosi ona 1547,45 nm natomiast dla 2,5° jest to 1549,22 nm, co oznacza zmianę o 1,77 nm. Dla większych kątów θ występuje większa zmiana długości fali Bragga.



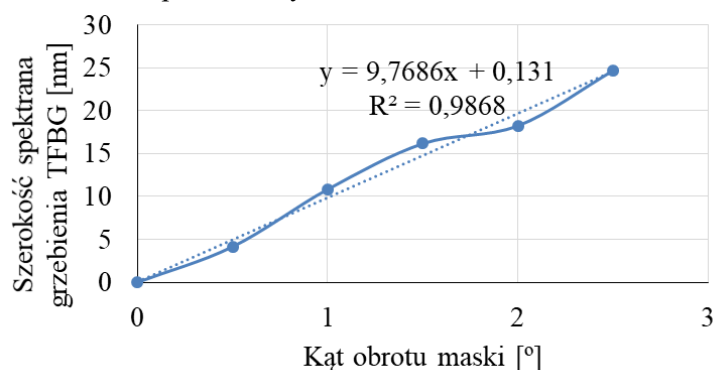
Rys. 5.7. Zależność centralnej długości fali Bragga od kąta naświetlania siatki wytworzonej za pomocą maski fazowej o chirpie 1 nm/cm

Również dla struktur o 10-krotnie większej wartości chirpu charakterystyczny jest wzrost długości fali Bragga pojawiający się wraz ze wzrostem kąta nachylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych (Rys. 5.7). Zakres zmian długości fali Bragga dla siatki o wartości chirpu 0,5 nm/cm wynosi 1,73 nm i jest porównywalny do struktur o chirpie równym 0,05 nm/cm. Chcąc uzyskać strukturę o precyzyjnie dobranej wartości długości fali Bragga należy uwzględnić i kontrolować kąt obrotu maski podczas wytworzenia siatek o pochylonej modulacji współczynnika załamania.



Rys. 5.8. Zależność szerokości spektralnej grzebieńa od kąta naświetlania dla siatki wytworzonej za pomocą maski z chirpem równym 0,1 nm/cm

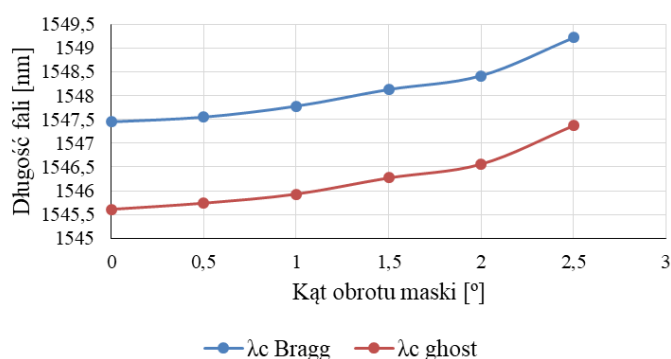
Na wykresach umieszczonych na rysunkach 5.8 i 5.9 przedstawiono zależność szerokości grzebienia złożonego z minimów na charakterystyce transmisyjnej, pochodzących od modów wyższych rzędów, również dla różnych wartości chirpu struktury.



Rys. 5.9. Zależność szerokości spektralnej grzebienia od kąta naświetlania dla siatki wytworzonej za pomocą maski z chirpem równym 1 nm/cm

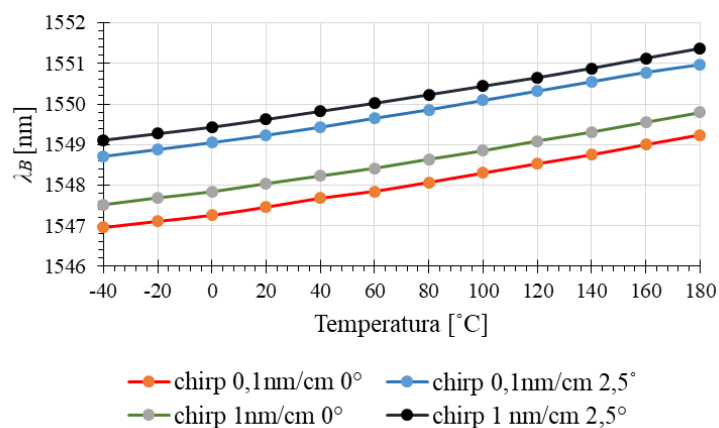
Rysunki 5.8 i 5.9 przedstawiają szerokość spektralną tej części charakterystyki widmowej, która odpowiada istnieniu minimów związanych z istnieniem modów płaszczowych. Zmiana wartości szerokości widma odpowiadającej istnieniu modów płaszczowych jest niemal liniowa w zależności od kąta θ , przy czym ten sam charakter zmian występuje dla struktur o wartości chirpu równych 0,5 nm/cm oraz 0,05 nm/cm. Współczynnik determinacji dla charakterystyk przedstawiających zależność szerokości grzebienia od kąta obrotu maski (Rys. 5.8 i 5.9) przyjmuje wartości powyżej 0,97. Aby uzyskać szerszą oraz bardziej płaską charakterystykę widmową siatek należy dokonać ich zapisu zwiększając wartość kąta nachylenia płaszczyzny dyfrakcyjnej w podanym zakresie kąta obrotu maski, tj. 0,5°–2,5°. Tego typu charakterystyki są pożądane w zastosowaniach czujnikowych, np. przy detekcji zmiany współczynnika załamania światła.

Na rysunku 5.10 przedstawiono zmianę długości fali Bragga i długości fali modu ghosta w zależności od kąta obrotu maski fazowej.



Rys. 5.10. Zmiana długości fali Bragga i długości fali modu ghosta w zależności od kąta obrotu maski fazowej podczas zapisu siatek wytworzonych za pomocą maski z chirpem 0,1 nm/cm

W celu wyznaczenia czułości temperaturowej siatek badaniu poddane zostały cztery siatki Bragga z różnymi kombinacjami wartości chirpu oraz kąta obrotu maski fazowej, które wynosiły odpowiednio 0,05 nm/cm i 0,5 nm/cm oraz 0° oraz 2,5°. Badania przeprowadzone zostały w komorze klimatycznej w zakresie pracy komory od -40°C do 180°C. Wyniki przedstawione zostały na rysunku 5.11.



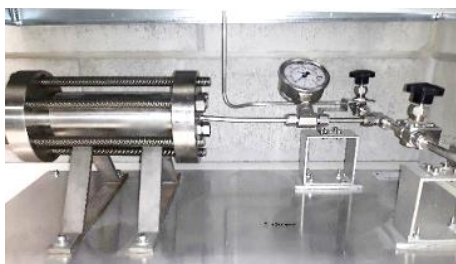
Rys. 5.11. Zależność długości fali Bragga od temperatury dla siatek wytworzonych za pomocą maski z chirpem 0,1 nm/cm oraz 1 nm/cm dla dwóch kątów obrotu maski fazowej 0° i 2,5°

Pod wpływem zmiany temperatury przesuwa się minimum odpowiadające głównemu rezonansowi Bragga (Rys. 5.11). Zmiana długości fali dla czterech charakterystyk jest liniowa. Czułość temperaturowa dla każdej siatki jest identyczna i wynosi 10,36 pm/°C. Różnica długości fali dla siatek zapisanych z kątem 0° i 2,5° jest stała w całym zakresie temperatury.

Wykonane badania wykazały, że wraz ze wzrostem kąta naświetlania rośnie centralna długość fali Bragga, zależność ta nie jest liniowa. Podobnie jest z szerokością obszaru widmowego odpowiadającą występowaniu minimów związanych ze sprzężaniem mocy do modów płaszczowych, która wraz ze wzrostem kąta osiąga większe wartości. Największą szerokość grzebienia pików płaszczowych uzyskano dla siatki o chirpie równym 0,5 nm/cm i wynosiła ona 25 nm. Zależność szerokości grzebienia od kąta naświetlania dla siatek z chirpem 0,05 oraz 0,5 nm/cm jest zależnością liniową ze współczynnikiem R^2 równym 0,98. Wyniki wskazują możliwość sterowania charakterystykami spektralnymi siatek chirpowych skośnych i dostosowywania ich do specyfiki konkretnych potrzeb. Zmieniać można kształt, zakres płaskiego obszaru widma, a nawet wysokość minimów odpowiadających poszczególnym modom płaszczowym wyższych rzędów.

6. Fotuczulanie

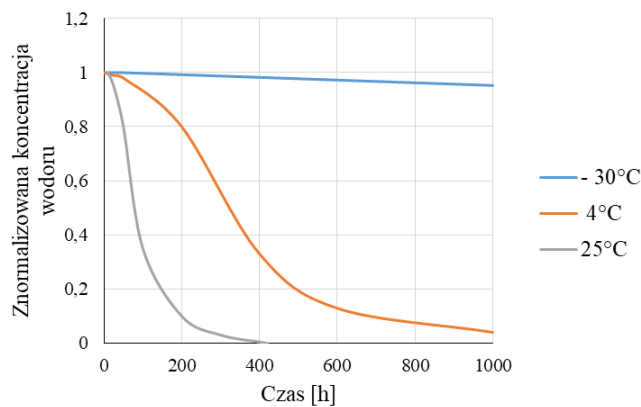
W ramach pracy zaprojektowany został układ do wodorowania włókien w zakresie ciśnień 10-200 barów w temperaturze pokojowej. W późniejszym okresie możliwa będzie rozbudowa układu umożliwiającego wodorowanie również w wyższych temperaturach. Dodatkowa instalacja argonu jako gazu obojętnego umożliwi oczyszczanie instalacji wodorowej. Czyste gazy, takie jak wodór i argon dostarczane są w przenośnych zbiornikach, butlach o pojemności 50 litrów pod ciśnieniem 200 barów. Butle są przechowywane w laboratorium w wentylowanej szafie.



Rys. 6.1. Komora do wodorowania włókien

Zaletą wodorowania jest możliwość nanoszenia siatek Bragga na dowolnym światłowodzie germanowo-krzemionkowym. Wodorowaniu można poddać każde włókno dostępne handlowo i zapisać na nim strukturę periodyczną, wyjątkiem mogą być jedynie nowoczesne struktury światłowodów fotonicznych, których płaszcz wykonany jest z otworów powietrznych przez co proces ucieczki wodoru jest szybszy i trudniejszy staje się zapis struktury. Wodorowanie obniża koszty wytwarzania czujników opartych na światłowodowych siatkach Bragga. Klasyczne włókno telekomunikacyjne jest 10-cio krotnie tańsze od włókna ze zwiększoną domieszką GeO_2 . Celowym byłoby rozwinięcie metody wodorowania i uzyskanie lepszych parametrów siatek wytwarzanych dzięki metodzie fotouczulania polegającej na wodorowaniu włókien.

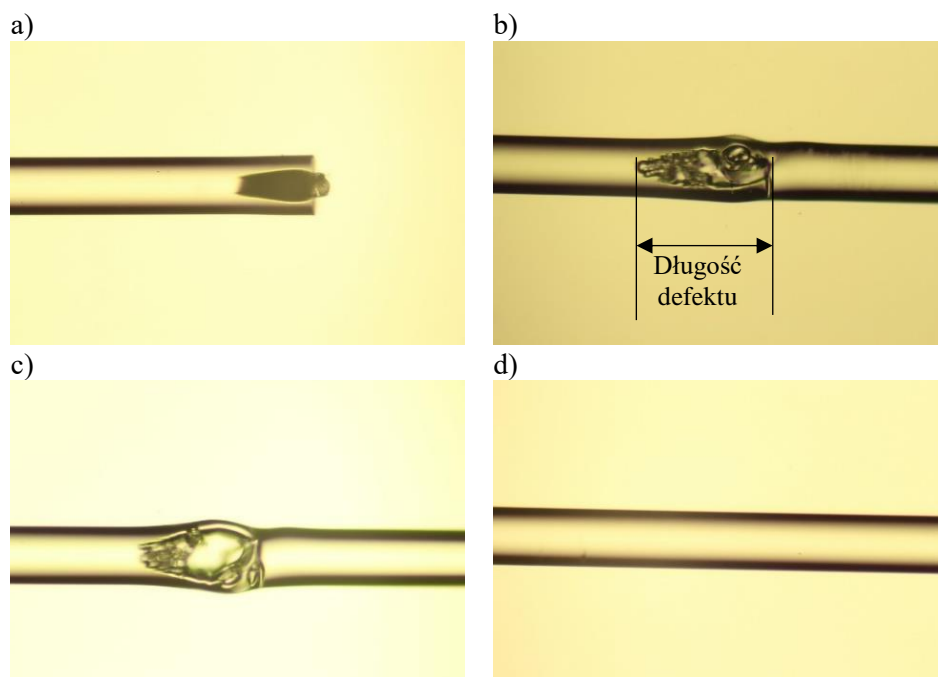
Nasylenie wodorem jest zależne od temperatury i ciśnienia. Skrócenie czasu wodorowania można uzyskać zwiększając ciśnienie jakiego poddawane jest wodorowane włókno w atmosferze wodoru, jak również zwiększając temperaturę wodorowania. Wodorowanie może trwać od kilku godzin do kilkudziesięciu dni. Po wyciągnięciu włókna z komory wodorowej następuje proces odwrotny, czyli opuszczanie atomów wodoru z rdzenia światłowodu. Na rysunku 6.2 zaobserwować można, że wodór wydostaje się z wodorowanego włókna bardzo szybko. Obliczenia koncentracji wodoru wykonane zostały na podstawie modelu absorpcji dla długości fali $1,24 \mu\text{m}$. W celu przedstawienia szybkości wydostawania się wodoru z włókna światłowodowego na rysunku 6.2 zestawiono charakterystyki ukazujące zależności znormalizowanej koncentracji wodoru w funkcji czasu dla różnych temperatur.



Rys. 6.2. Ulatnianie się wodoru z uwodornionych włókien światłowodowych na podstawie modelu absorpcji wodoru dla długości fali $1,24 \mu\text{m}$ dla trzech temperatur 25°C , 4°C i -30°C [69]

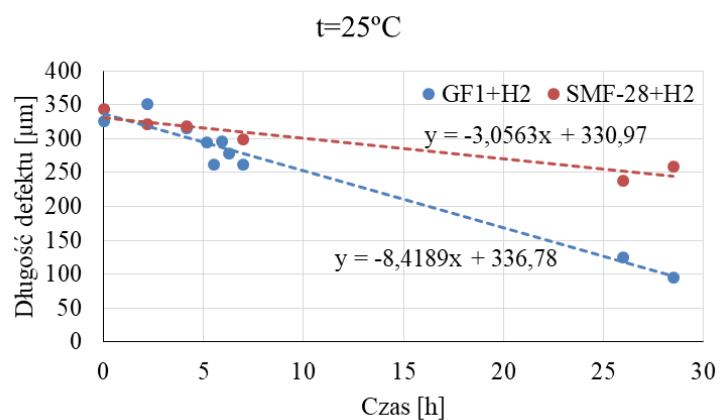
Dla spowolnienia procesu wydostawania się atomów wodoru obniża się temperaturę przechowywania takiego włókna. Już dla temperatury -30°C po 41 dniach, co odpowiada przedziałowi czasowemu równemu w przybliżeniu 1000 godzin, spadek koncentracji wodoru jest niewielki. Inaczej wygląda sytuacja dla temperatury 25°C , w której już po 400 godzinach koncentracja wodoru spada do 0

Bezpośrednio po zawodorowaniu zauważalny jest wzrost strat dla długości fali $1,24 \mu\text{m}$ oraz $1,38 \mu\text{m}$. Są to maksima związane z grupami OH, które w klasycznym włóknie telekomunikacyjnym są zminimalizowane. Wielkość pików absorpcyjnego na długości fali $1,24 \mu\text{m}$ jest wprost proporcjonalna do stężenia wodoru. Na rysunku 6.3 przedstawione są zdjęcia włókien wykonane bezpośrednio po procesie ich wodorowaniu oraz miejsca spawów włókien dla różnych czasów przebywania w temperaturze 25°C . Zdjęcia z prób spawania wykonane zostały bezpośrednio po wyjęciu z komory w odstępach 24 godzinnych. Zdjęcie 6.3a ukazuje włókno, które poddane zostało próbie oczyszczenia za pomocą łuku elektrycznego. Również przed spawaniem występuje reakcja łuku elektrycznego z wodorem. W kolejnych odstępach czasu spaw jest wykonany, jednakże zwiększona energia łuku powoduje również reakcję z wodorem (rys. 6.3b i 6.3c). Dopiero po upływie 72 godzin w temperaturze 25°C i normalnej atmosferze koncentracja wodoru spadła do poziomu umożliwiającego wykonanie spawu bez defektu (rys. 6.3d).

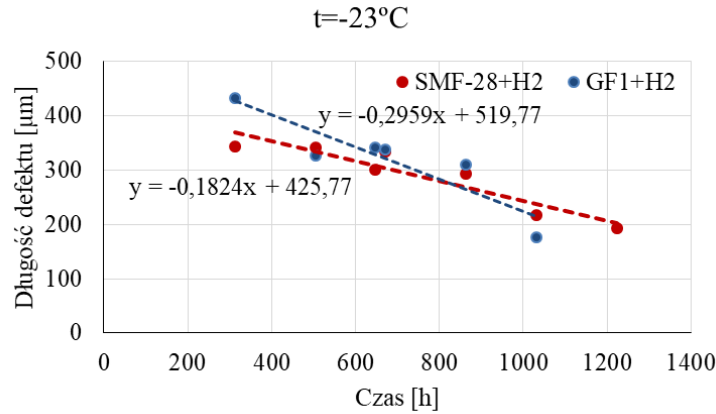


Rys. 6.3. Zdjęcia włókien wodorowanych przy próbie spawania: a) bezpośrednio po wyjęciu, b) po 24 godzinach, c) po 48 godzinach i d) po 72 godzinach (prawidłowe spawanie, bez defektów)

Na rysunku 6.4. i 6.5 przedstawiono zależność długości defektu od czasu przebywania w atmosferze o różnych temperaturach 25°C oraz -23°C. Długość defektu mierzona była dla dwóch rodzajów włókien poddanych wodorowaniu, było to włókno telekomunikacyjne SMF-28 oraz GF1 o zwiększonej zawartości germanu.



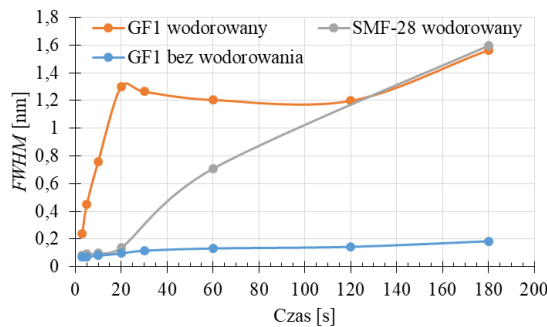
Rys. 6.4. Zmierzone charakterystyki przedstawiające zmianę długości defektu w zależności od czasu przebywania włókna w atmosferze o temperaturze 25°C dla dwóch rodzajów włókien fotouczulonych GF1 oraz SMF-28



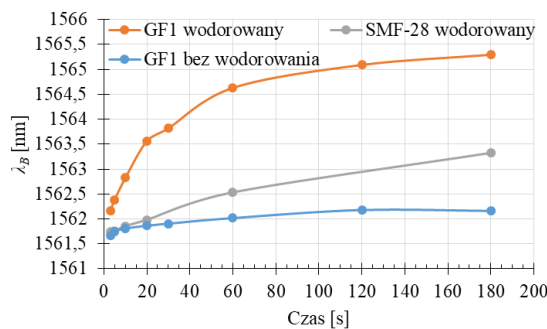
Rys. 6.5. Zmierzone charakterystyki przedstawiające zmianę długości defektu w zależności od czasu przebywania włókna w atmosferze o temperaturze -23°C dla dwóch rodzajów włókien fotoczulonych GF1 oraz SMF-28

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji można stwierdzić, iż długość defektu podczas próby spawania może być wskaźnikiem koncentracji wodoru. Stężenie wodoru szybciej spada dla włókna GF1 niż dla włókna SMF-28. Zauważalny jest również wpływ temperatury przechowywania na koncentrację wodoru, przy temperaturze -23°C czas jest 40-krotnie dłuższy niż przy temperaturze 25°C . Rozwiązaniem problemu ze spawaniem włókien wodorowanych, na których wytwarzane będą siatki Bragga może być wygrzewanie samych końcówek, a następnie spawanie tych włókien. Wygrzewanie przyspiesza usuwanie wodoru z włókna i umożliwi wykonanie spawu bez defektu.

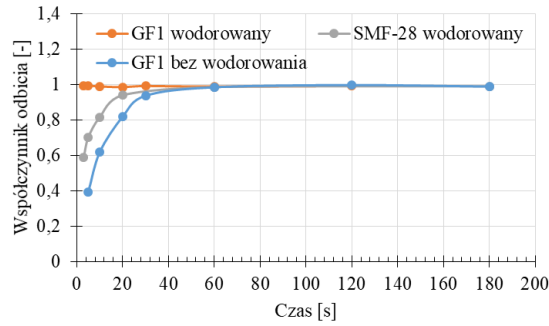
W celu porównania parametrów charakterystyk spektralnych wytworzono siatki na trzech rodzajach włókien: GF1 dodatkowo wodorowanym, SMF-28 wodorowanym oraz GF1 bez procesu wodorowania. Wszystkie siatki zapisywane były w tych samych warunkach i o takich samych parametrach ustawienia lasera: częstotliwość repetycji wynosiła 20 Hz, energia zapisu 85 mJ. Zmiennym parametrem był czas naświetlania, który wynosił 3 s, 5 s, 10 s, 20 s, 30 s, 60 s, 120 s i 180 s.



Rys. 6.6. Zależność FWHM od czasu naświetlania dla trzech rodzajów światłowodów, na których zapisywane były siatki

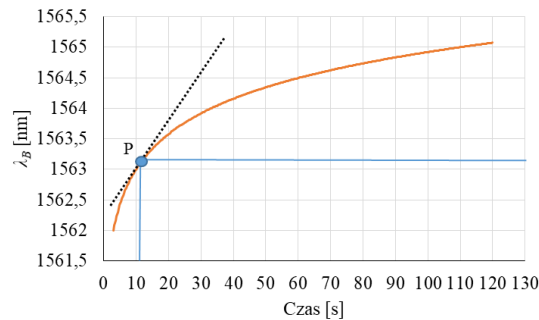


Rys. 6.7. Zależność przesunięcia długości fali Bragga od czasu naświetlania dla trzech rodzajów światłowodów, na których zapisywane były siatki



Rys. 6.8. Zależność współczynnika odbicia od czasu naświetlania dla trzech rodzajów włókien

W dalszej części rozdziału przedstawiono analizę zmian długości fali Bragga oraz parametru $FWHM$ w początkowej fazie zapisu struktury. W związku z tym, że proces zapisu siatki przebiega szybciej w początkowej fazie ekspozycji włókna na światło UV, to w niniejszym rozdziale analizie poddano zmiany parametrów struktury w początkowym etapie jej zapisu tj. po czasie równym 10 s. Przeanalizowano prędkość zmian długości fali Bragga i wartość szerokości połówkowej wytworzonej struktury dla trzech różnych przypadków przedstawionych powyżej, tj dla włókna SMF-28 wodorowanego (SMF-28+H₂), GF1 oraz GF1 wodorowanego (GF1+H₂). Wyznaczono współczynnik czułości długości fali Bragga w czasie, który oznaczono jako $K_t^{\lambda_B}$ oraz współczynnik czułości parametru $FWHM$ w czasie, który oznaczono jako K_t^{FWHM} , a także współczynnik czułości reflektancji w czasie K_t^R . Rysunek 6.8 przedstawia sposób wyznaczania zdefiniowanych powyżej współczynników czułości. W punkcie P odpowiadającym 10 s wyznaczono styczną do krzywej przedstawiającej zmiany parametru siatki, a następnie obliczono wartości współczynników czułości



Rys. 6.9. Wyznaczanie stycznej w punkcie do charakterystyki przedstawiającej zmiany długości fali Bragga w czasie

Tabela 6.1. Zestawienie wyników współczynników zmiany czułości przesunięcia rezonansu Bragga, szerokości spektralnej i współczynnika odbicia dla różnych włókien optycznych wykorzystywanych w badaniach laboratoryjnych

	GF1	SMF-28+H ₂	GF1+H ₂
$K_t^{\lambda_B} \left[\frac{nm}{s} \right]$	0,0073	0,0145	0,0780
$K_t^{FWHM} \left[\frac{nm}{s} \right]$	0,0016	0,0031	0,0564
$K_t^R \left[\frac{\%}{s} \right]$	2,7265	1,5468	-0,0566

Na podstawie wyznaczonych czułości widać, iż światłowód fotouczulony GF1 dodatkowo poddany procesowi wodorowania osiąga po czasie 3 s wartość współczynnika odbicia równą 1, dlatego wartość czułości K_t^R dla 10 s jest równa -0,0566. Drugą z kolei pod względem wartości współczynnika odbicia jest siatka zapisana na włóknie SMF-28 wodorowanym. Jej współczynnik odbicia wynosi 0,82 i czułość K_t^R dla 10 s wynosi 1,5468, natomiast najmniejsza wartość współczynnika odbicia występuje dla siatki

zapisanej na włóknie GF1 nie poddanym wodorowaniu, przy czym jego współczynnik odbicia po 3 s wynosi 0,62 i czułość K_t^R dla 10 s wynosi 2,7265.

Jeżeli chodzi o współczynnik szybkość zmian długości fali $K_t^{\lambda_B}$ to największą wartość – 0,078 nm/s – osiąga włókno GF1 dodatkowo wodorowane, następnie włókno SMF-28 wodorowane, dla którego $K_t^{\lambda_B}$ wynosi 0,0145 nm/s. Włóknom o najmniejszej szybkości zmian długości fali jest włókno GF1, dla którego szybkość przesunięcia fali Bragga w czasie wynosi 0,0073 nm/s.

Podobnie wygląda sytuacja dla szybkości zmiany parametru $FWHM$. Najszybciej zmienia się parametr $FWHM$ dla włókna GF1 wodorowanego jest to wartość 0,0564 nm/s. W wodorowanym SMF-28 zmiana parametru $FWHM$ wynosi 0,0031 nm/s, natomiast najwolniejsze zmiany parametru $FWHM$ występują dla włókna GF1 nie poddanego procesowi wodorowania, dla którego K_t^{FWHM} wynosi 0,0016 nm/s.

Wyższe wartości współczynnika czułości wynikają z faktu, że włókno GF1 jest już włóknom fotouczulonym i dodatkowe jego wodorowanie powoduje większą zmianę badanych parametrów w czasie w stosunku do pozostałych włókien. Powyższe zależności należy brać pod uwagę przy wytwarzaniu struktur FBG zarówno do zastosowań czujnikowych jak i telekomunikacyjnych.

Następnie przeprowadzono pomiary dla trzech wartości ciśnienia wodorowania 190 barów, 100 barów oraz 50 barów, wyniki umieszczono w tabelach.

Tabela 6.2. Parametry wytworzonych siatek Bragga dla dwóch rodzajów włókien dla ciśnienia wodorowania równego 190 barów

	SMF-28		GF1	
Czas [s]	10	30	10	30
$FWHM$ [nm]	0,096	0,180	0,760	1,264
λ_B [nm]	1561,86	1562,19	1562,82	1563,33
R	0,81	0,94	100	100
$\Delta\lambda$ [nm]	0,334		0,51	

Tabela 6.3. Parametry wytworzonych siatek Bragga dla dwóch rodzajów włókien dla ciśnienia wodorowania równego 100 barów

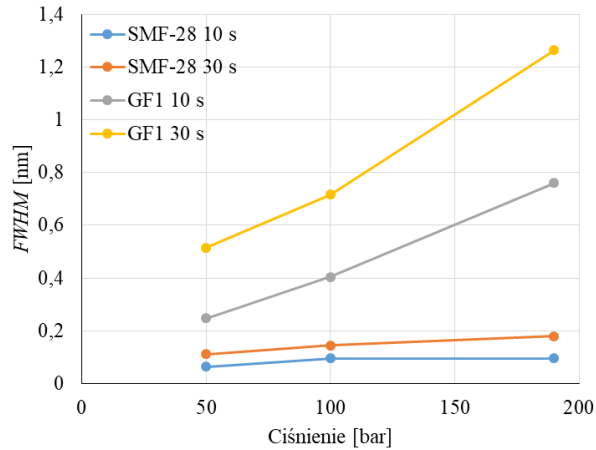
	SMF-28		GF1	
Czas [s]	10	30	10	30
$FWHM$ [nm]	0,096	0,144	0,404	0,716
λ_B [nm]	1562,15	1562,33	1563,07	1563,69
R	0,79	0,94	100	100
$\Delta\lambda$ [nm]	0,176		0,62	

Tabela 6.4. Parametry wytworzonych siatek Bragga dla dwóch rodzajów włókien dla ciśnienia wodorowania równego 50 barów

	SMF-28		GF1	
Czas [s]	10	30	10	30
$FWHM$ [nm]	0,064	0,112	0,248	0,515
λ_B [nm]	1562,28	1562,45	1563,10	1563,82
R	0,18	0,83	0,85	0,99
$\Delta\lambda$ [nm]	0,168		0,72	

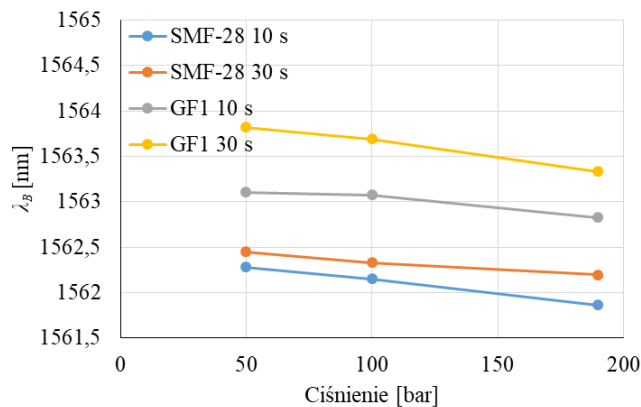
Największa wartość parametru $FWHM$ występuje dla włókna GF1 wodorowanego pod ciśnieniem 190 barów i wynosi on 1,3 nm. Tak wytworzona struktura Bragga osiąga wartość współczynnika odbicia równy 1. Przy 50 barach $FWHM$ dla włókna SMF-28 uzyskuje najmniejszą wartość 0,064 nm

i najmniejszą wartość współczynnika odbicia na poziomie 0,18. Przesunięcie wartości λ_B powodowane czasem ekspozycji promieniowania UV posiada największą wartość dla włókna GF1 przy ciśnieniu wodorowania 50 barów, najmniejsza dla włókna SM-28 wodorowanego pod ciśnieniem 190 barów. W celu zobrazowania wpływu parametrów procesu wodorowania na parametry siatek Bragga na rysunku 6.10 przedstawiono zależność parametru $FWHM$ od ciśnienia gazu podczas procesu wodorowania.



Rys. 6.10. Zależność $FWHM$ od ciśnienia dla światłowodu SMF-28 i GF1

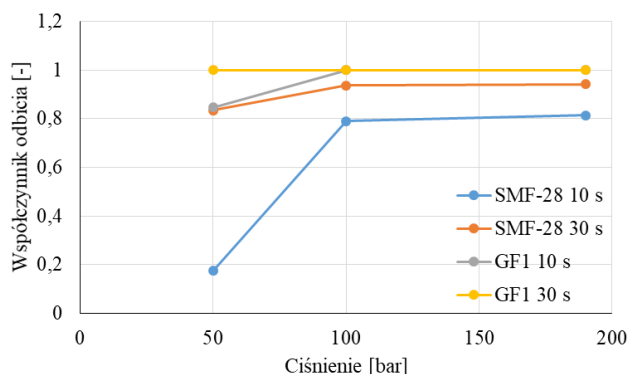
Wraz ze wzrostem ciśnienia zwiększa się połowkowa szerokość spektralna $FWHM$ (Rys. 6.10). Średnia wartość nachylenia charakterystyki dla włókna SMF-28, przedstawionej na rysunku 6.10, wynosi $3 \cdot 10^{-4}$ nm/bar natomiast dla włókien o zwiększonej zawartości germanu GF1 średnia wartość nachylenia jest ok 15-krotnie większa i wynosi $45,5 \cdot 10^{-4}$ nm/bar. Wrażliwość na wartość ciśnienia wodorowania w wypadku włókna GF1 jest zatem 15-to krotnie większe w stosunku do włókna wodorowanego SMF-28. Na rysunku 6.11 przedstawiono zależność centralnej długości fali Bragga od ciśnienia gazu podczas procesu wodorowania.



Rys. 6.11. Zależność centralnej długości fali Bragga od ciśnienia dla dwóch rodzajów światłowodów SMF-28 i GF1, dla czasów naświetlania 10 s oraz 30 s

Efektywność zapisu siatek jest większa dla włókien wodorowanych, dlatego początkowe przesunięcie w kierunku fal dłuższych jest większe w porównaniu z włóknami niewodorowanymi. Późniejsza częściowa ucieczka wodoru, który nie jest związany w obszarze siatki powoduje, że długość fali Bragga przesuwa się szybciej w kierunku fal krótkich dla włókien wodorowanych. Wyniki uzyskane w tej części pracy wskazują jednoznacznie, że wartość ciśnienia podczas wodorowania włókien ma istotne znaczenie i należy je uwzględniać podczas projektowania struktur Bragga na tego typu włóknach. Czas po jakim stężenie wodoru spadnie do ok 5% w warunkach normalnych wynosi 10 dni, dlatego włókna po zapisie powinny zostać poddane procesowi wygrzewania aby całkowicie usunąć wodór. Na

rysunku 6.12 przedstawiono zmianę współczynnika odbicia siatek wytworzonych na włóknach wodorowanych w zależności od ciśnienia wodorowania.



Rys. 6.12. Zależność współczynnika odbicia siatki Bragga od ciśnienia dla dwóch rodzajów światłowodów SM i GF1 dla dwóch różnych czasów naświetlania 10 s oraz 30 s

Największa wartość współczynnika odbicia (Rys. 6.12) uzyskana została dla siatki wodorowanej o podwyższonym stężeniu Ge i jest to wartość bliska 1. Włókna SMF-28 dla tych samych parametrów osiągają wartości współczynnika odbicia w zakresie od 0,2 do 0,9 w zależności od ciśnienia wodoru. Zwiększenie ciśnienia dla włókna SMF-28 10 s ze 100 barów do 190 barów nieznacznie wpływa na współczynnik odbicia włókna, natomiast zmiana z 50 barów do 100 barów objawia się zmianą współczynnika odbicia o 0,6.

7. Podsumowanie i wnioski

Poruszone w pracy zagadnienia wpływu parametrów procesu wytwarzania siatek Bragga na ich charakterystyki spektralne są istotne ze względu na znaczącą ilość zastosowań tego typu przetworników jako elementów czujników. W pracy wykazano, że poprzez odpowiedni dobór parametrów zapisu struktur periodycznych można uzyskać dużo szerszy zakres możliwych do uzyskania parametrów optycznych. Dla każdego rodzaju struktur oznacza to modyfikację innych właściwości optycznych i metrologicznych czujnika.

Proces wytwarzania struktur zaczyna się od przygotowania włókna. Dla klasycznych włókien jednomodowych SMF-28 znaczący okazał się proces ich wodorownia. Od niego bowiem zależą możliwości uzyskania siatek o dużej refleksyjności, przy czym stężenie wodoru spada szybciej dla włókien GF1 o zwiększonej zawartości germanu niż w przypadku włókien SMF-28. Po procesie wodorownia na koncentrację wodoru znacząco wpływa temperatura przechowywania włókna. Dodatkowym problemem pojawiającym się w przypadku włókien poddawanych procesowi wodorowania okazały się również pojawiające się podczas ich spawania defekty. Długość tych defektów może być pośrednim wskaźnikiem poziomu koncentracji wodoru. Aby uniknąć problemów podczas spawania zaproponowana została metoda wygrzewania samych końcówek, które bezpośrednio podlegają procesowi spawania. Wygrzewanie przyspiesza usuwanie wodoru z włókna i umożliwia wykonanie spawu bez defektu.

Podczas procesu naświetlania włókien światłowodowych występuje również zjawisko zmiany długości fali Bragga zapisywanej struktury. Fakt ten należy uwzględniać przy wykorzystywaniu określonej maski fazowej przystosowanej na konkretną długość fali. W pracy wykazano, że zmiana czasu naświetlania o 100 s powoduje przesunięcie długości fali zapisywanej struktury nawet o 3 nm, a sama zmiana nie jest liniowa. Wraz z wydłużaniem czasu wytwarzania siatki zwiększa się efektywny współczynnik załamania rdzenia, który powoduje to charakterystyczne przesunięcie w kierunku dłuższych fal, określane jako tzw. „red shift”. Wraz z wydłużeniem czasu wytwarzania siatki zwiększa się również wartość parametru *FWHM*. Podobny efekt poszerzenia połówkowej szerokości spektralnej

uzyskuje się wraz ze wzrostem ciśnienia wodoru, przy czym zmiana ta jest 15-krotnie większa dla włókna GF1 w stosunku do włókna wodorowanego SMF-28.

Do najważniejszych osiągnięć autora należą:

1. Analiza numeryczna i eksperymentalna charakterystyk widmowych siatek prostych, skośnych, chirpowych oraz skośnych chirpowych.
Parametry optyczne struktur przeanalizowane zostały pod kątem ich związku z parametrami wytwarzania. Zmieniano parametry fizyczne siatek takie jak: chirp, długość siatki, kształt profilu apodyzacyjnego i kąt naświetlania.
2. Wykonanie układu do wytwarzania światłowodowych struktur periodycznych FBG oraz CFBG.
Zbudowany układ umożliwia zadawanie parametrów w szerokich granicach. Wykorzystywana jest metoda wytwarzania za pomocą elementu dyfrakcyjnego w postaci maski fazowej. Zastosowanie precyzyjnego mechanizmu obrotowego umożliwiło wywarzenie struktur prostych oraz zmianę kąta nachylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych w zakresie od 0 do 90°. Zaprojektowany i wykonany układ opto-mechaniczny pozwala na umieszczenie elementów dyfrakcyjnych o dowolnych parametrach, np. apodyzacja, chirp czy długość fali.
3. Projekt i wykonanie stanowiska do wodorowania włókien światłowodowych w celu zwiększenia ich fotoczułości przy zapisie z wykorzystaniem lasera ekscymerowego.
Dzięki procesowi wodorowania możliwe było wytwarzanie struktur Bragga na większości rodzajów światłowodów. Opracowane stanowisko stworzyło również możliwości szybszego wytwarzania struktur złożonych, szczególnie siatek skośnych i chirpowych oraz siatek krótkich, ale posiadających jednocześnie duże wartości współczynnika odbicia.
4. Analiza wpływu ciśnienia wodorowania na parametry wytworzonych siatek Bragga.
Wodorowanie przeprowadzono dla włókien SMF-28 oraz GF1, przy czym dla włókien GF1 oznacza to podwójne fotouczulenie powodujące znaczące skrócenie czasu zapisu w stosunku do włókna niewodorowanego GF1 oraz wodorowanego SMF-28. Jest to zjawisko bardzo korzystne z punktu widzenia ekonomicznego ze względu na mniejsze zużycie gazów i energii elektrycznej, co zmniejsza koszty jednostkowe wytworzenia pojedynczej struktury.
5. Wykazanie występowania zmian długości defektu powstającego podczas spawania włókna wodorowanego od czasu wpływającego pomiędzy wodorowaniem a procesem spawania.
Zaobserwowano silną zależność długości defektu od czasu wpływającego od chwili zakończenia procesu wodorowania do momentu zapisu struktur. Wykazano, że zjawisko to jest zależne od stężenia wodoru w rdzeniu światłowodu.
6. Wykazanie występowania różnic w czułości na promieniowanie UV włókien wodorowanych oraz włókien o podwyższonej zawartości germanu.
W pracy udowodniono, że najbardziej czułym na promieniowanie UV jest włókno podwójnie fotouczulone, tzn. włókno o zwiększonej zawartości germanu, dodatkowo poddane procesowi wodorowania.
7. Opracowanie nowatorskiego sposobu zmiany apodyzacji struktury poprzez umieszczenie szczeliny w wiązce promieniowania UV.
Wykazano możliwość regulowania parametrów struktur poprzez zastosowanie szczelin przesłaniających wiązkę promieniowania UV i umieszczonych niecentrycznie w stosunku do osi wiązki.
8. Analiza wpływu parametru chirpu na szerokość połówkową charakterystyki spektralnej oraz na współczynnik odbicia wytwarzanych struktur.
9. Określenie wpływu temperatury i wydłużenia na zmianę długości rezonansu Bragga siatek prostych jednorodnych oraz na przesunięcie modu „ghosta” dla siatek skośnych.

10. Określenie wpływu długości struktury oraz kształtu funkcji apodyzacji na współczynnik odbicia, nachylenie zbocza charakterystyki spektralnej oraz na połówkową szerokość spektralną.
11. Analiza wpływu kąta obrotu maski fazowej oraz chirpu na przesunięcie rezonansu Bragga oraz na zakres spektralny występowania rezonansów modów płaszczowych i szerokości grzebienia siatki TFBG.
12. Wyjaśnienie efektu poszerzenia charakterystyki spektralnej siatki TFBG przy zmianach wartości parametru chirpu.
13. Wykazanie możliwości sterowania charakterystykami spektralnymi siatek chirpowych skośnych i ich dostosowywania w zależności od specyfiki wymagań.
Istnieje możliwość zmiany kształtu oraz zakresu obszaru widma, dla którego występują mody płaszczowe oraz możliwość zmiany intensywności modów płaszczowych wyższych rzędów.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki projektowania, badań oraz wykonanych analiz z pewnością nie wyczerpują wszystkich problemów związanych z wyznaczaniem wpływu parametrów wytwarzania siatek Bragga na ich charakterystyki spektralne. W szczególności doskonalenia wymaga opracowanie efektywnych metod numerycznych, pozwalających na budowę modelu struktur chirpowych oraz ukośnych. Dostępne w chwili obecnej narzędzia nie pozwalają na ilościowe porównanie charakterystyk uzyskanych w drodze obliczeń numerycznych z charakterystykami rzeczywistymi, zmierzonymi. W przyszłych badaniach warto byłoby również zająć się problemem kształtowania charakterystyk apodyzacyjnych zgodnie z wybraną funkcją matematyczną, poprzez zastosowanie zaproponowanego w niniejszej pracy układu szczelin optycznych, umieszczonych na drodze wiązki lasera zapisującego struktury periodyczne. Również sam proces wodorowania warto byłoby poddać optymalizacji ze względu na parametry uzyskanych struktur i możliwość zmiany np. temperatury procesu wodorowania. Powyższe zadania stanowią zatem kontynuację prac podjętych w ramach niniejszej rozprawy.

Literatura

- [1] Albert J., Lepinay S., Caucheteur Ch., DeRosa M. C., *High resolution grating-assisted surface plasmon resonance fiber optic aptasensor*. *Methods* 63, 239–254 (2013).
- [2] Albert J., Shao L. Y., Caucheteur C., *Tilted fiber Bragg grating sensors*. *Laser and Photonics Reviews* 7(1), 83–108 (2013).
- [3] Aldaba A. L., González-Vila Á., Debliquy M., Lopez-Amo M., Caucheteur C., Lahemd D.,
- [4] Becker M., Elsmann T., Lorenz A., Rothhardt M., *Fiber Bragg filters For laser- and multicore fibers*. *Proc. SPIE* 10232, (2017).
- [5] Bragg W. H., Bragg W. L., *The reflection of X-rays by crystals*. *Proceedings of the Royal Society A* 88(605), 428–38 (1913)
- [6] Bueno A., Debliquy M., Lahem D., Van Baekel A., Mégret P., Caucheteur C., *NO₂ optical fiber sensor based on TFBG coated with LuPc2*. *Sensors IEEE*, 1073–1076 (2014).
- [7] Canning J., *Fibre gratings and devices for sensors and lasers*. *Laser Photonics Rev* 2(4), 275–289 (2008).
- [8] Chang H. Y., Chang Y. C., Sheng H. J., Fu M. Y., Liu W. F., Kashyap R., *An Ultra-Sensitive Liquid-Level Indicator Based on an Etched Chirped-Fiber Bragg Grating*. *IEEE Photonics Technology Letters* 28(3), 268 – 271 (2016).
- [9] Chao Chen, Yong-Sen Yu, Rui Yang, Chuang Wang, Jing-Chun Guo, Yang Xue, Qi-Dai Chen, and Hong-Bo Sun, *Reflective Optical Fiber Sensors Based on Tilted Fiber Bragg Gratings Fabricated With Femtosecond Laser*. *Journal Of Lightwave Technology* 31(3), (2013).
- [10] Chehura E., James S. W., Tatam R. P., *Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating*. *Optics Communications* 275, 344–347 (2007).

- [11] Chen X., Du F., Guo T., Lao J., Zhang X., Zhang Z., Liu Fu, Li J., Chen Ch., Guan B.-O., *Liquid Crystal-Embedded Tilted Fiber Grating Electric Field Intensity Sensor*. Journal of Lightwave Technology 35(16), 3347–3353 (2017).
- [12] Chen X., Zhou K., Zhang L., Bennion I., *In-Fiber Twist Sensor Based on a Fiber Bragg Grating With 81° Tilted Structure*. IEEE Photonics Technology Letters 18(24), 2596–2598 (2006).
- [13] Cieszczyk S., Kisała 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).
- [14] Cieszczyk S., Klimek J., Skorupski K., Kisała P., *A Study and modeling of Fabry-Perot cavities with rare earth doped fiber*. Proc. of SPIE 9228 (2014).
- [15] Dong B., Zhao Q., Zhao L., Jin L., Miao Y., Liao T., Zeng X., *Simultaneous measurement of temperature and force based on a special strain-function-chirped FBG*. Sensors and Actuators A 147, 169–172 (2008).
- [16] Ecke W., Schroeder K., Andreev A. Y., Mueller R., Willsch R., *Optical fiber grating sensor network for monitoring refractive index and temperature distributions in fluids*. Proc. SPIE 3783, 176–183 (1999).
- [17] Guo T., *Fiber Grating-Assisted Surface Plasmon Resonance for Biochemical and Electrochemical Sensing*. Journal of Lightwave Technology 35(16), 3323–3333 (2017).
- [18] Guo T., Liu F., Guan B.-O., Albert J., *Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors*, Optics & Laser Technology 78, 19–33 (2016).
- [19] Guo T., Liu F., Liang X., Qiu X., Huang Y., Xie Ch., Xu P., Mao W., Guan B.-O., Albert J., *Highly sensitive detection of urinary protein variations using tilted fiber grating sensors with plasmonic nanocoatings*. Biosensors and Bioelectronics 78, 221–228 (2016).
- [20] Guo T., Tam H., Albert J., *Chirped and tilted fiber Bragg grating edge filter for in-fiber sensor interrogation*. CLEO, Laser Applications to Photonic Applications 1–2, (2011).
- [21] Hill K. O., Fujii Y., Johnson D. C. and Kawasaki B. S., *Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication*. Appl. Phys., 32 (10), (1978).
- [22] Hwang G.-S., Huang D.-W., Ma Ch.-Ch., *Numerical Study on Reflection Spectra of an Apodized Fiber Bragg Grating Subjected to Strain Gradients*. Procedia Engineering 79, 631–639 (2014).
- [23] Jin Y. X., Charr C. C., Dong X. Y., Zhang Y. F., *Bending sensor with tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber*. Asia Communications and Photonics conference and Exhibition (ACP), (2009).
- [24] Kashyap R. and de Lacerda Rocha M., *On the group delay characteristics of chirped fibre Bragg gratings*. Opt. Commun. 153(1–3), 19–22 (1998).
- [25] Kashyap R., *Fiber Bragg gratings*, Optics And Photonics. Academic Press (1999).
- [26] Khalid K. S., Zafrullah M., Bilal S. M., Mirzad M. A., *Simulation and analysis of Gaussian apodized fiber Bragg grating strain sensor*. Journal of Optical Technology 79(10), 667–673 (2012).
- [27] Khaliq S., James S. W., Tatam R. P., *Fiber-optic liquid-level sensor using a long-period grating*. Optics Express 26(16), 1224–1226 (2001).
- [28] Khan S. S. A. and Islam M. S., *Determination of the Best Apodization Function and Grating Length of Linearly Chirped Fiber Bragg Grating for Dispersion Compensation*. J. Commun. 7(11) 840–846 (2012).
- [29] Kinet D., Mégret P., Goossen K. W., Qiu L., Heider D., and Caucheteur C., *Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions*. Sensors 14, 7394–7419 (2014).
- [30] Kisała, P., *Metrological conditions of strain measurement optoelectronic method by the use of fibre Bragg gratings*. Metrology and Measurement Systems 19(3), 471–480 (2012).
- [31] Kisała P., Cieszczyk S., *Method of simultaneous measurement of two direction force and temperature using FBG sensor head*. Applied Optics 54(10), (2015)
- [32] Kisała P., Harasim D., Mrocza J., *Temperature-insensitive simultaneous rotation and displacement (bending) sensor based on tilted fiber Bragg grating*. Optics Express 24(26), 29922–29929 (2016).

- [33] Klimek, J., Karnakova, G. and Yusupova, G., *Analysis of the effect of hydrogenation of photosensitive fibres on the parameters of the periodic structures produced*. Proc. SPIE 11045, (2019).
- [34] Klimek J., Skorupski K., Harasim D., *The influence of CTFBG gratings physical parameters on their spectral properties*. Proc. SPIE 10445, (2017).
- [35] Kreider K. G. and Ruff A. W., *Materials for thin-film wear sensors*. Surface and Coatings Technology 8687, 557–563 (1996).
- [36] Li Y., Yang K., Li X., *Temperature sensing characteristics of metal coated FBG during dynamic cooling process*. Optical Fiber Technology 45, 368–375 (2018)
- [37] Lin Z., Chen X., Wu F., Shi J., Yin Y., Xie S., *A novel method for fabricating apodized fiber Bragg gratings*. Optics and Laser Technology 35, 315–318 (2003).
- [38] Liu Y., Zhang L., Bennion I., *Fabricating fibre edge filters with arbitrary spectral response based on tilted chirped grating structures*. Measurement Science and Technology 10(1), (1999).
- [39] Loyez M., Ribaut C., Caucheteur Ch., Wattiez R., *Functionalized gold electroless-plated optical fiber gratings for reliable surface biosensing*. Sensors and Actuators B: Chemical 280, 54–61 (2019).
- [40] Markowski K., Perka A., Jędrzejewski K., and Osuch T., *Custom FBGs inscription using modified phase mask method with precise micro- and nano-positioning*. Proc. of SPIE, Vol. 10031 (2016).
- [41] Markowski K., *Metody kształtowania właściwości spektralnych przewężanych struktur braggowskich wykazujących efekt Fabry-Perota*. Rozprawa doktorska, promotor dr hab. inż. Kazimierz Piotr Jędrzejewski, promotor pomocniczy dr inż. Tomasz Przemysław Osuch, Politechnika Warszawska (2017).
- [42] Meltz G., Morey W. W. and Glenn, W. H., *Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method*. Opt. Lett., 14(15), 823 (1989).
- [43] Miao Y., Liu B., Zhang H., Li Y., Zhou H., Sun H., Zhang W. and Zhao Q., *Relative Humidity Sensor Based on Tilted Fiber Bragg Grating With Polyvinyl Alcohol Coating*. IEEE Photonics Technology Letters 21(7), 441–443 (2009).
- [44] Miao Y., Liu B., Zhao Q., *Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating*. Optical Fiber Technology 15, 233–236 (2009).
- [45] Osuch T., Jaroszewicz Z., *Numerical analysis of apodized fiber Bragg gratings formation using phase mask with variable diffraction efficiency*. Optics Communications 284, 567–572 (2011).
- [46] Osuch T., Markowski K. and Jędrzejewski K., *Fiber-Optic Strain Sensors Based on Linearly Chirped Tapered Fiber Bragg Gratings With Tailored Intrinsic Chirp*. IEEE Sensors Journal 16(20), 7508–7514 (2016).
- [47] Othonos A. and Kalli K., *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, (1999).
- [48] Shao L. Y., Laronche A., Smietana M., Mikulic P., Bock W. J., Albert J., *Highly sensitive bend sensor with hybrid long-period and tilted fiber Bragg grating*. Optics Communications 283(13), 2690–2694 (2010).
- [49] Shevchenko, Y. Y. and Albert, J., *Plasmon resonances in gold-coated tilted fiber Bragg gratings*. Opt. Lett. 32, 211–213 (2007).
- [50] Wang M., Li Z., Liu L., Wang Z., Gu X., Xu X., *Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings on large-mode-area doubled-cladding fibers by phase-mask technique*. Applied Optics 57(16), 4376–4380 (2018).
- [51] Wang M., Zhang, Y., Wang, Z., Sun J., Cao J., Leng J., Gu X., Xu X., *Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings and suppression of stimulated Raman scattering in fiber amplifiers*. OPTICS EXPRESS 25(2), (2017).
- [52] Wang Y., Rao Y., Ran Z., Zhu T. and Hu A., *A Novel Tunable Gain Equalizer Based on a Long-Period Fiber Grating Written by High-Frequency CO₂ Laser Pulses*. IEEE Photonics Technology Letters 15 (2), (2003).
- [53] Weilin L., Wangzhe L., Jianping Y., *Real-Time Interrogation of a Linearly Chirped Fiber Bragg Grating Sensor for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature*. IEEE Photonics Technology Letters 23(18), 1340 – 1342 (2011).

- [54] Wojcik, J., Czyzewska, L., Klimek, J., Chodkowska, E. and Warda, J., *Technology of silver structural elements for special waveguides production*. Proc. SPIE 5028, 35–39 (2003).
- [55] Yu J. C., Wu Z., Yang X., Han X., Zhao M., *Tilted Fiber Bragg Grating Sensor Using Chemical Plating of a Palladium Membrane for the Detection of Hydrogen Leakage*. Sensors 18(12), (2018).
- [56] Zhan Y., Yu M., Pei J., Yang X., Xiang S., *A linearity interrogation technique with enlarged dynamic range for fiber Bragg grating sensing*. Optics Communications 283, 3428–3433 (2010).
- [57] Zhang H., *A novel method of optimal apodization selection for chirped fiber Bragg gratings*. Optik - International Journal for Light and Electron Optics 125(5), 1646–1649 (2014).
- [58] Zychowicz Ł., Klimek J. and Kisała P., *Methods of producing apodized fiber Bragg gratings and examples of their applications*. Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska 89(1), 60–63 (2018).