

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ  
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ im. ST. STASZICA W KRAKOWIE**

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**ANALIZA WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW UKŁADU  
DO ZAPISU ŚWIATŁOWODOWYCH STRUKTUR PERIODYCZNYCH  
NA CHARAKTERYSTYKI SPEKTRALNE WYTWARZANYCH SIATEK BRAGGA  
W OPARCIU O ZDEFINIOWANE WSKAŹNIKI JAKOŚCIOWE**

mgr inż. Krzysztof Skorupski

*Promotor:* dr hab. inż. Piotr Kisała

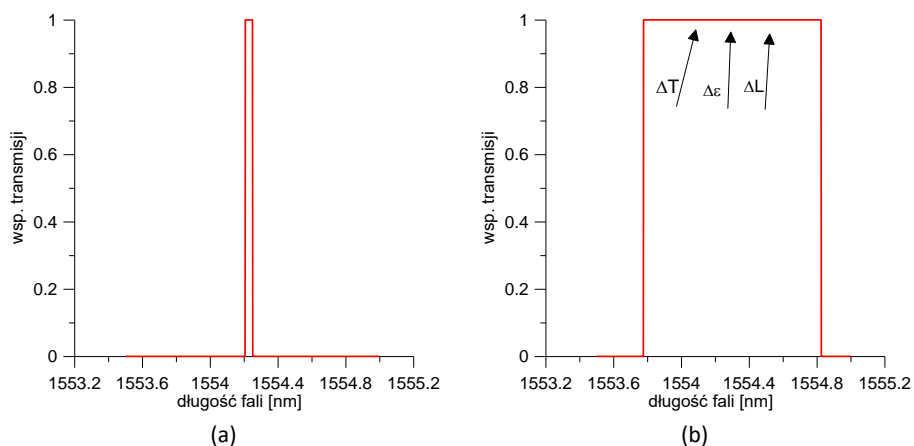
*Promotor pomocniczy:* dr inż. Sławomir Cięszczyk

Dyscyplina: Elektronika

## 1. Wstęp

Dynamiczny rozwój sieci telekomunikacyjnych rozpoczęty w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych sprawił, że podstawowym medium transmisyjnym stały się włókna światłowodowe. Technologia ta dominuje do chwili obecnej i jest stale rozwijana. Jej nieodłącznym elementem są światłowodowe siatki Bragga FBG (ang.: *Fiber Bragg Grating*) wykorzystywane w sieciach transmisyjnych, jako element multipleksacji i demultipleksacji sygnałów optycznych [1,2]. Równolegle następuje rozwój techniki czujników o konstrukcji opartej na siatkach Bragga [3,4]. Czujniki tego typu odnajdują swoje zastosowanie głównie w obszarach, w których użycie czujników elektronicznych jest utrudnione lub niemożliwe. Powstają wyspecjalizowane systemy czujnikowe przeznaczone do pomiaru żądanych wielkości fizycznych w ściśle określonych warunkach. Opracowywanie nowych rodzajów czujników wymaga odpowiedniego kształtowania charakterystyk widmowych siatek Bragga, stosowanych w charakterze przetworników pomiarowych [5,6].

Kształt charakterystyki widmowej siatki Bragga przeznaczonej do zastosowań telekomunikacyjnych musi posiadać określone właściwości. Wymagana jest struktura, której charakterystyka widmowa jest dopasowana do szerokości pojedynczego kanału w systemach transmisji zwielokrotnienia długości fali oraz musi cechować się wysokim współczynnikiem odbicia. Taki rodzaj siatek Bragga znajduje również zastosowanie czujnikowe, jednak w znaczącej części aplikacji wymagane są struktury, których widmo odbiega od typowego teoretycznego widma struktury telekomunikacyjnej [7,8,9]. Zostało to schematycznie przedstawione na rysunku 1. Charakterystyka widoczna na rys. 1b posiada widmo o większej szerokości w porównaniu z widmem przeznaczonym do zastosowań telekomunikacyjnych widocznym na rys. 1a. Wpływ wybranych wielkości fizycznych może być wtedy wyznaczony poprzez zmianę kształtu widma, a nie wyłącznie jako jego przesunięcie spektralne. Na rysunku 1b zaznaczono część charakterystyki widmowej, na której kształt mają wpływ zmiany parametrów fizycznych takich jak temperatura, naprężenie czy wydłużenie.



Rys 1. Charakterystyki spektralne siatek Bragga do zastosowań telekomunikacyjnych (a) oraz czujnikowych (b)

O ile w przypadku siatek Bragga do zastosowań telekomunikacyjnych nie ma problemu z dostępnością handlową, o tyle w przypadku pozostałych struktur dostępność jest ograniczona i w zasadzie zawęża się do współpracy z nielicznymi ośrodkami naukowymi dysponującymi technologią wytwarzania światłowodowych siatek Bragga. Zapis nietypowych struktur Bragga często wymaga zastosowania innego rodzaju włókien niż standardowe telekomunikacyjne [10], w tym włókien fotonicznych [11,12]. Rozwój światłowodowej techniki czujnikowej jest więc ograniczony dostępnością technologii wytwarzania odpowiednich struktur. Wytwarzanie siatek Bragga, jak każda

zaawansowana technologia jest osiągnięciem poszczególnych zespołów badawczych i z reguły nie jest wiedzą upowszechnioną. Prace opublikowane w tym obszarze przedstawiają efekty prowadzonych badań w postaci struktur Bragga możliwych do uzyskania za pomocą konkretnej techniki wytwarzania. Poszczególne kroki wykonywane w konkretnym procesie, ustawienia konfiguracyjne, jak też schematy zastosowanych układów nie są szczegółowo prezentowane. O możliwościach wytworzenia określonej struktury decydują także, a może przede wszystkim, umiejętności osób zajmujących się daną technologią (tzw. *know-how*). Niniejsza praca obejmuje kompletną analizę technologii wytwarzania światłowodowych siatek Bragga metodą maski fazowej. Obejmuje ona projekt i realizację układ do zapisu światłowodowych struktur periodycznych jak też analizę eksperymentalną wpływu poszczególnych parametrów tego układu na wskaźniki jakościowe opisujące wytwarzane struktury.

## **2. Cel i zakres pracy**

Celem niniejszej pracy było wykazanie możliwości uzyskania określonych parametrów światłowodowych siatek Bragga poprzez zmianę warunków prowadzenia wiązki lasera UV zapisującego siatki, w tym również wykazanie możliwości uzyskania optymalnych wartości parametrów siatek, pożądaných w zastosowaniach telekomunikacyjnych i czujnikowych, poprzez odpowiedni dobór parametrów optycznych, mechanicznych i elektrycznych układu laserowego do zapisu siatek.

Zakres pracy obejmował przeprowadzenie obliczeń numerycznych światłowodowych siatek Bragga, które pozwoliły na uzyskanie widm transmisyjnych i odbiciowych dla struktur o żądanych parametrach wejściowych. Pozwoliło to na analizę zdefiniowanych parametrów jakościowych siatek Bragga na podstawie ich właściwości spektralnych. Zakres obejmował również przegląd możliwych do zastosowania w warunkach laboratoryjnych technik zapisu siatek Bragga pod kątem m.in. metody zapisu oraz wyboru źródła światła umożliwiającego zapis siatek. Część doświadczalna pracy obejmowała zaprojektowanie układu optycznego przeniesienia wiązki promieniowania lasera, zaprojektowanie mechanicznego układu mikromanipulacji włókna światłowodowego, wykonanie i uruchomienie kompletnego układu do zapisu siatek Bragga oraz zestawienie układu do charakteryzacji właściwości optycznych wytworzonych struktur w świetle odbiciowym i przechodzącym. Ostatnim elementem było przeprowadzenie analizy wpływu wybranych parametrów opracowanego układu w oparciu o zdefiniowane kryteria jakościowe

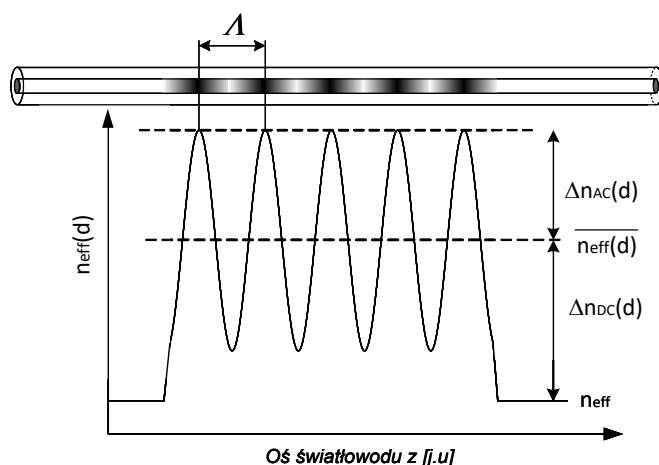
## **3. Teza pracy**

Dobór parametrów układu laserowego do zapisu siatek Bragga oraz zdefiniowanie odpowiednich kryteriów jakościowych siatek na podstawie ich widm, pozwala na wytworzenie struktur periodycznych o właściwościach odpowiednich do zastosowań w układach czujnikowych.

## **4. Światłowodowe siatki Bragga i technologia ich wytwarzania**

Światłowodowa siatka Bragga jest strukturą zapisaną w rdzeniu światłowodu składającą się ze skończonej liczby następujących po sobie obszarów szkła o zmieniającej się wartości współczynnika załamania. Zmiany te mają charakter sinusoidalny. Właściwości tej struktury określone są poprzez okres tych zmian  $\Lambda$  oraz ich amplitudę  $\Delta n$ . Typowa wartość okresu  $\Lambda$ , nazwanego stałą siatki Bragga,

dla włókien ze szkła krzemionkowego przeznaczonych do pracy w trzecim oknie transmisyjnym, wynosi około 500 nm. Przy długości struktury rzędu kilku milimetrów uzyskujemy sieć o kilku tysiącach okresów. Amplituda zmian, czyli głębokość modulacji współczynnika załamania, mieści się zazwyczaj w zakresie od  $10^{-5}$  do  $10^{-2}$ . Na rysunku 2 przedstawiono schemat siatki Bragga oraz wykres modulacji współczynnika załamania wewnątrz siatki.



Rys 2. Schemat światłowodowej siatki Bragga oraz wykres modulacji współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu

W procesie zapisu FBG ekspozycja fotoczułego rdzenia światłowodu na działanie promieniowania o określonej długości fali powoduje modyfikację współczynnika załamania proporcjonalną do dostarczonej energii promieniowania  $E$ . Zapis siatek Bragga następuje poprzez umieszczenie włókna w obszarze pola interferencyjnego, tworzącego się za elementem dyfrakcyjnym. Uzyskuje się w ten sposób rozkład współczynnika załamania w osi włókna światłowodowego opisany równaniem:

$$n_{eff}(z, E) = n_{eff} + \Delta n(z, E) = n_{eff} + (\Delta n_{DC}(E) + \Delta n_{AC}(E) \cdot \sin(2\pi/\Lambda \cdot z)), \quad (1)$$

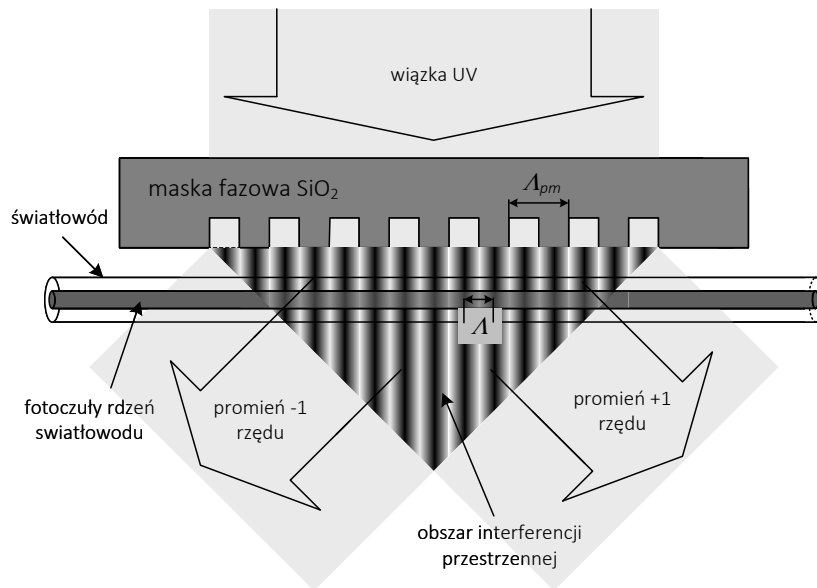
gdzie  $n_{eff}$  jest wartością efektywnego współczynnika załamania rdzenia światłowodu poza siatką Bragga,  $\Delta n$  określa zmianę współczynnika załamania w siatce Bragga i jest sumą składowej stałej  $\Delta n_{DC}$  oraz składowej zmiennej  $\Delta n_{AC}$  o rozkładzie opisanym w osi włókna światłowodowego przez funkcję sinus.

Struktura Bragga jest rozłożonym reflektorem zdolnym do wstecznego odbicia określonej długości fali spełniającej warunek Bragga:

$$m\lambda_B = 2 \cdot \overline{n_{eff}} \cdot \Lambda, \quad (2)$$

gdzie  $\overline{n_{eff}}$  jest uśrednioną wartością składowej zmiennej modulacji współczynnika załamania w strukturze Bragga,  $\lambda_B$  jest długością fali Bragga,  $m$  jest liczbą naturalną i określa rząd odbicia promieniowania,  $\Lambda$  jest stałą sieci [13].

Spśród czterech głównych metod wytwarzania FBG do wytwarzania struktur przeznaczonych do pracy czujnikowej wybrano technikę wykorzystującą element dyfrakcyjny. Na rysunku 3 przedstawiono schemat układu do zapisu siatek Bragga z wykorzystaniem maski fazowej. Równoległa wiązka promieniowania pada na powierzchnię maski, promienie ugięte za maską po nałożeniu powodują powstanie obszaru interferencji przestrzennej, w którym następuje zapis struktury periodycznej.

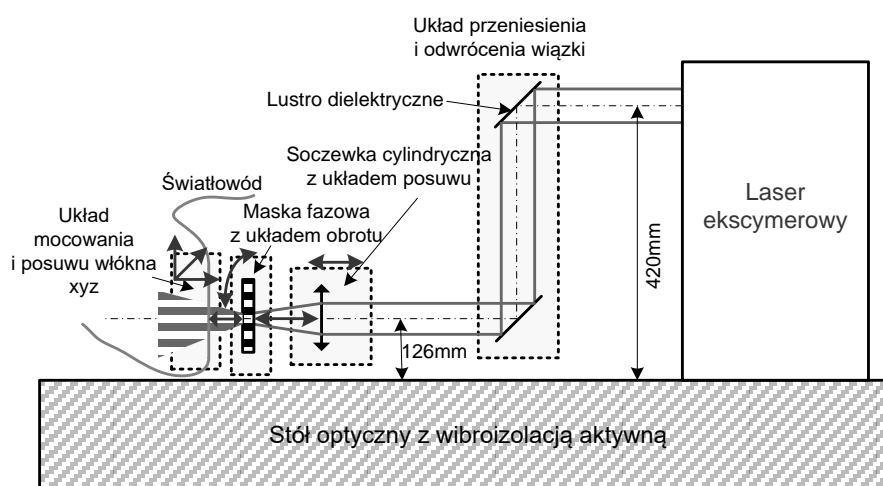


Rys. 3. Schemat układu do zapisu siatek Bragga metodą maski fazowej

Jedną z zalet tej metody wytwarzania jest zastosowanie jednego elementu optycznego powodującego tworzenie się pola interferencyjnego. Element ten zastępuje rozbudowany układ interferometru dwuwiązkowego wykorzystywany w pozostałych metodach. Dodatkowo odległość pomiędzy maską fazową i światłowodem jest niewielka i zazwyczaj nie przekracza grubości włókna światłowodowego. Cechy te znacząco wpływają na stabilność mechaniczną układu.

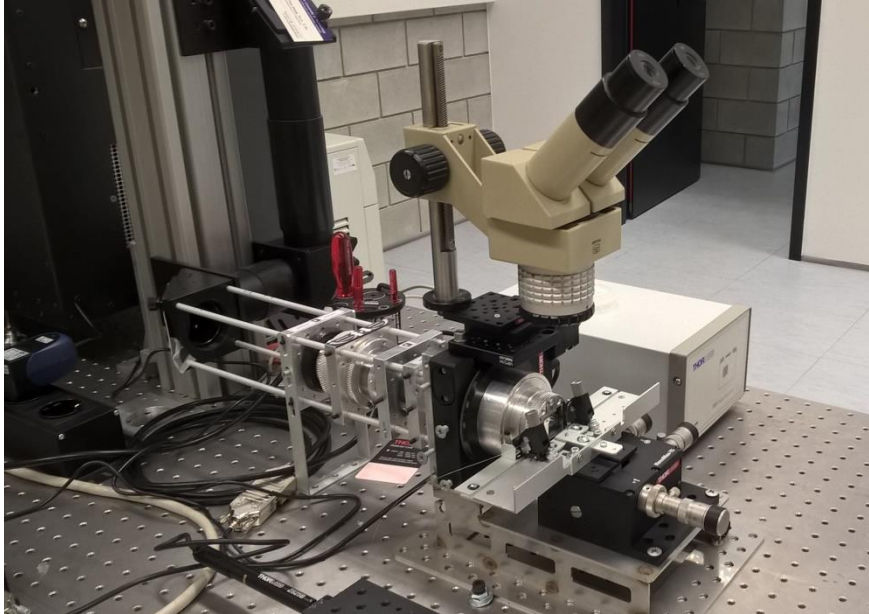
## 5. Układ do zapisu światłowodowych struktur periodycznych

W ramach niniejszej pracy zaprojektowano układ do zapisu światłowodowych struktur periodycznych. Składa się on z lasera ekscymerowego układu przeniesienia wiązki promieniowania, układu formowania wiązki oraz układów mocowania i mikromanipulacji maski fazowej oraz włókna światłowodowego (rysunek 4).



Rys. 4. Schemat układu do zapisu światłowodowych struktur periodycznych

Zadaniem tego układu jest przeniesienie wiązki optycznej z wyjścia lasera ekscymerowego na włókno światłowodowe. Włókno powinno zostać umieszczone w polu. Kształt wiązki powinien być dopasowany do wymiarów włókna. Konieczne było zatem skupienie wiązki optycznej w jednej z osi, tak by oświetlić kilkunastomilimetrowy odcinek światłowodu promieniowaniem o znacznym natężeniu. Umożliwiło to zapis struktury periodycznej z wykorzystaniem różnych rodzajów włókien, także tych o niskiej fotoczułości. Na rysunku 5 przedstawiono zdjęcie zestawionego systemu z widocznym układem obserwacji położenia włókna światłowodowego względem maski fazowej.



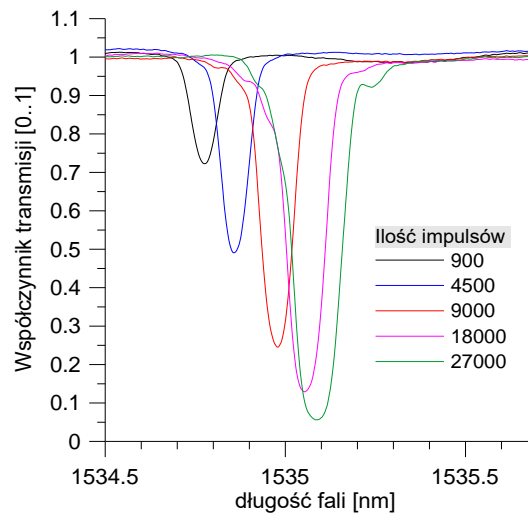
Rys. 5. Zdjęcie układu do zapisu światłowodowych struktur periodycznych

Dobór elementów optycznych oraz konfiguracja układu został poprzedzony określeniem warunków bezpiecznych dla elementów optycznych. Warunki te charakteryzowane są za pomocą parametru *LIDT* (ang.: Laser Induced Damage Threshold). Określa on maksymalną powierzchniową gęstość mocy, powyżej której następuje uszkodzenie elementu optycznego. Poziom ten zależy od rodzaju użytego szkła, jego technologii wytwarzania, jakości powierzchni oraz jej czystości. Wyznaczenie *LIDT* polega na eksperymentalnym określeniu progu, przy którym następują uszkodzenia. Wykorzystanie *LIDT* polega natomiast na ustaleniu adekwatności wyników literaturowych i warunków ich przeprowadzenia z warunkami dla danej aplikacji [14]. Dla zestawionego układu przeprowadzono również pomiar rozkładu wiązki promieniowania w ognisku soczewki. Pozwoliło to na wyznaczenie gęstości mocy oraz profilu promieniowania przetworzonej wiązki optycznej.

## 6. Wyniki badań wytworzonych struktur periodycznych

Realizacja układu do zapisu struktur periodycznych pozwoliła na znalezienie korelacji pomiędzy parametrami układu takimi jak energia impulsu, czas ekspozycji, kształt wiązki zapisującej po przejściu przez układ optyczny, położenie włókna względem wiązki promieniowania, repetycja pracy lasera oraz właściwościami wytworzonych siatek Bragga. Właściwości te zostały określone przez zdefiniowane parametry jakościowe charakteryzujące struktury FBG na podstawie ich widm.

Badania przeprowadzono dla dwóch rodzajów światłowodu o różnej fotoczułości na promieniowanie ultrafioletowe. Fotoczułość tych włókien wywołana była zwiększeniem stężenia domieszki tlenku germanu w rdzeniu światłowodu, co w przeciwieństwie do procesu wodorowania zapewnia stałą w czasie fotoczułość. Na rysunku 6 przedstawione zostały przykładowe charakterystyki widmowe wytworzonych struktur w zależności od ilości impulsów laserowych użytych w procesie zapisu.

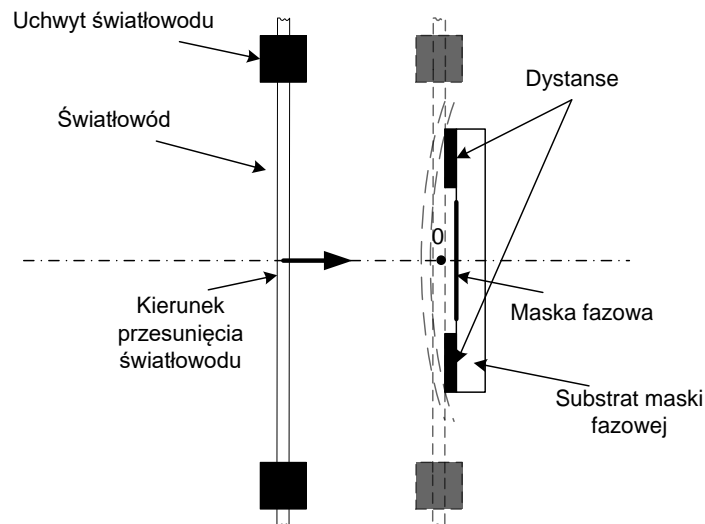


Rys. 6. Wykresy widmowe struktur Bragga wytworzone dla różnej liczby impulsów laserowych

Właściwości wytworzonych struktury Bragga zostały sparametryzowane poprzez wprowadzenie zdefiniowanych wskaźników jakościowych wyznaczanych na podstawie ich widm. Wśród tych parametrów znalazły się: reflektancja  $R$ , określająca maksymalną wartość odbicia struktury, długość fali Bragga  $\lambda_B$ , która określa centralną długość fali odbitej od struktury, szerokość połówkowa  $FWHM$  (ang.: *Full Width at Half Maximum*), określająca zakres spektralny odbitego promieniowania, reflektancja płatów bocznych  $L$ , określająca stopień odbicia promieniowania o długościach fali będących w sąsiedztwie pików centralnego struktury oraz kąt nachylenia zbocza centralnego pików siatki  $\alpha$ .

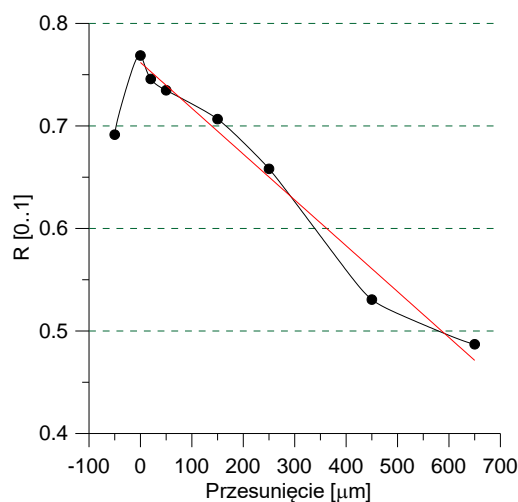
Jednym z kluczowych elementów w układzie do zapisu siatek jest odpowiednie ustawienie położenia włókna światłowodowego w stosunku do maski fazowej i wiązki promieniowania. W celu określenia wpływu parametrów układu do zapisu siatek Bragga na wskaźniki jakościowe wytwarzanych struktur, zostały przeprowadzone pomiary mające na celu wyznaczenia wpływu odległości włókna światłowodowego od maski fazowej oraz odległości włókna od osi optycznej układu do zapisu siatek. Ze względu na długość drogi spójności źródła światła wraz ze wzrostem odległości włókna światłowodowego od maski fazowej maleje kontrast prążków w obrazie interferencyjnym, a co za tym idzie zmniejsza się skuteczność zapisu siatek [15].

Na rysunku 7 przedstawiono schemat doświadczenia pozwalającego na wyznaczenie wpływu odległości włókna światłowodowego od maski fazowej w procesie zapisu struktur periodycznych. Doświadczenie polegało na ustawieniu światłowodu w osi optycznej układu i zapisie siatek Bragga dla różnych odległości światłowodu od maski fazowej.



Rys. 7. Schemat układu do pomiaru wpływu odległości włókna światłowodowego od maski fazowej na charakterystyki spektralne siatek Bragga

Na rysunku 8 przedstawiony został wykres uzyskanej zależności reflektancji w funkcji odległości światłowodu od maski fazowej. Widoczny jest wyraźny spadek reflektancji siatki wraz z rosnącą odległością światłowodu od maski fazowej. Zależność ta ma w przybliżeniu charakter liniowy. Oddalenie światłowodu o  $50\ \mu\text{m}$  w stosunku do położenia zerowego, powoduje spadek reflektancji wytworzonej struktury o 4,4%. Obliczony spadek reflektancji o 5% następuje dla odległości równej połowie średnicy włókna światłowodowego. Natomiast przesunięcie światłowodu o  $25\ \mu\text{m}$  i powodujące jego wygięcie skutkuje spadkiem reflektancji o 10%.

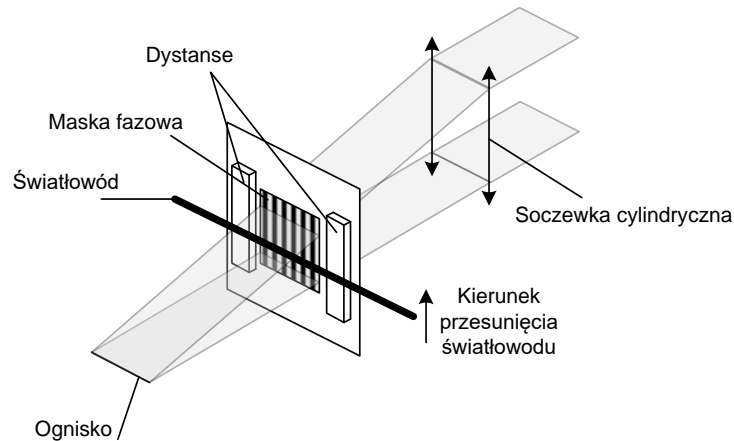


Rys. 8. Zależność reflektancji struktury Bragga w funkcji odległości względem maski fazowej w procesie zapisu

W ramach badań wpływu parametrów układu do zapisu siatek Bragga na wskaźniki jakościowe wytwarzanych struktur wykonano analizę wpływu przesunięcia włókna światłowodowego w osi pionowej względem osi optycznej układu. Rysunek 9 przedstawia schemat przeprowadzonego doświadczenia. Włókno światłowodowe zostało umieszczone w odległości  $50\ \mu\text{m}$  od maski fazowej. Obliczona szerokość połówkowa wiązki promieniowania dla warunków, w których przeprowadzono doświadczenie wynosiła  $630\ \mu\text{m}$ . Doświadczenie polegało na umieszczeniu włókna światłowodowego poniżej wiązki laserowej, a następnie przesunięciu poprzecznie w stosunku do wiązki promieniowania

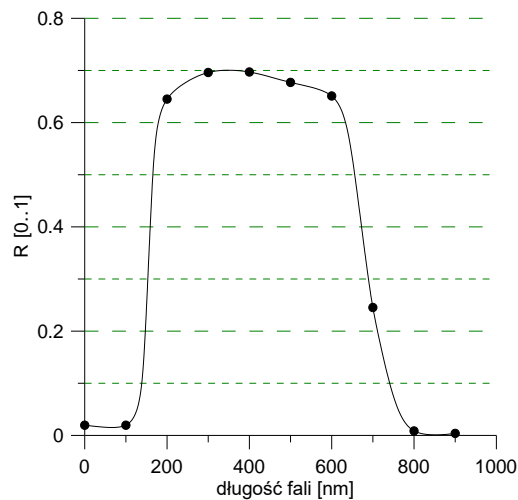


laserowego z krokiem 100  $\mu\text{m}$ . Dla każdej pozycji położenia włókna światłowodowego wykonano zapis siatki Bragga.



Rys. 9 Schemat układu pomiarowego do pomiaru wpływu położenia włókna światłowodowego względem osi optycznej układu na charakterystyki spektralne siatek Bragga

Rysunek 10 przedstawia zależność obliczonej reflektancji  $R$  wytworzonych struktur w funkcji analizowanego przesunięcia. Na wykresie widoczny jest zakres ustawienia włókna, dla którego reflektancja zapisanych struktur jest równa zero lub jest bliska wartości zerowej. W praktyce odpowiada to ustawieniu włókna światłowodowego poza wiązką promieniowania laserowego.



Rys. 10. Rozkład reflektancji struktury Bragga w funkcji przesunięcia włókna w osi Y

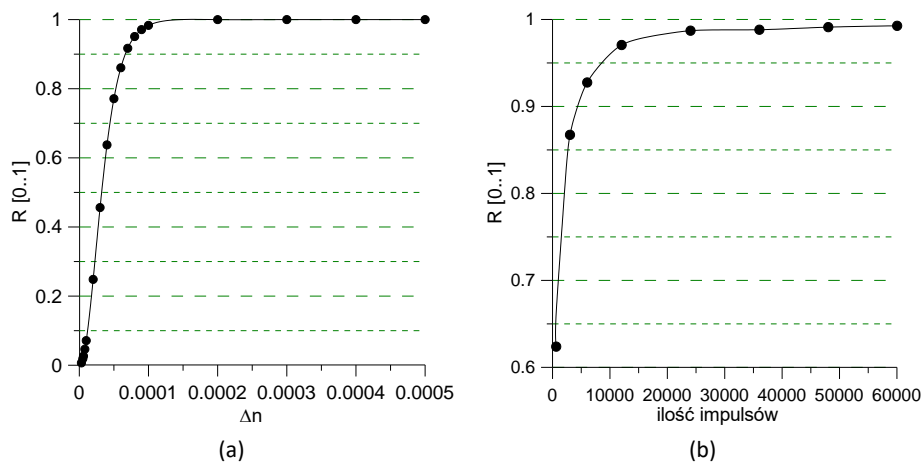
Dla otrzymanej charakterystyki określono szerokość połówkową  $FWHM$ , dla której reflektancja zapisanych struktur zmniejsza się o połowę w funkcji przesunięcia włókna światłowodowego. Wyznaczona wartość  $FWHM$  wynosi 525  $\mu\text{m}$ . Uwzględniając  $FWHM$  wiązki promieniowania dla odległości włókna od soczewki, dla której wykonano doświadczenie, wynoszącą 630  $\mu\text{m}$  oraz średnicę włókna światłowodowego wynoszącą 125  $\mu\text{m}$  (w strukturze, którego znajduje się rdzeń włókna o średnicy  $\sim 10 \mu\text{m}$ ), uzyskano wynik, który z dużą dokładnością potwierdza zgodność obliczonych parametrów geometrycznych wiązki promieniowania z wpływem przesunięcia włókna na możliwość zapisu na nim siatek Bragga. Z przeprowadzonego doświadczenia wynika również, że wpływ przesunięcia włókna w zakresie 400  $\mu\text{m}$  powoduje spadek reflektancji wytworzonych struktur o 5% w stosunku do reflektancji maksymalnej. Zakres ten można więc przyjąć jako roboczy przedział

wartości przy ustawieniu włókna powodującym skuteczny zapis struktur Bragga w zaprojektowanym układzie.

Na potrzeby rozprawy przeprowadzono modelowanie struktur periodycznych. Obliczenia przeprowadzono dla parametrów światłowodów zbliżonych do włókien, dla których wykonano doświadczenia wytwarzania siatek Bragga w zaprojektowanym układzie.

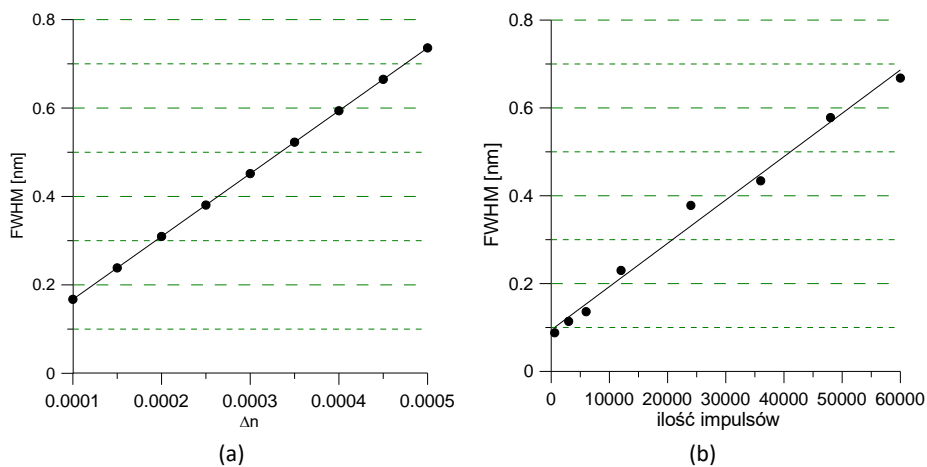
Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń numerycznych oraz zależności parametrów jakościowych uzyskane podczas przeprowadzonych prób zapisu.

Na rysunku 11 przedstawione zostały wykresy zależności reflektancji struktur Bragga w funkcji głębokości współczynnika załamania uzyskane z wykorzystaniem przeprowadzonych obliczeń numerycznych oraz reflektancji struktur rzeczywistych dla różnej ilości impulsów laserowych w doświadczeniu, w którym zmianie ulegała częstotliwość pracy lasera ekscymerowego.



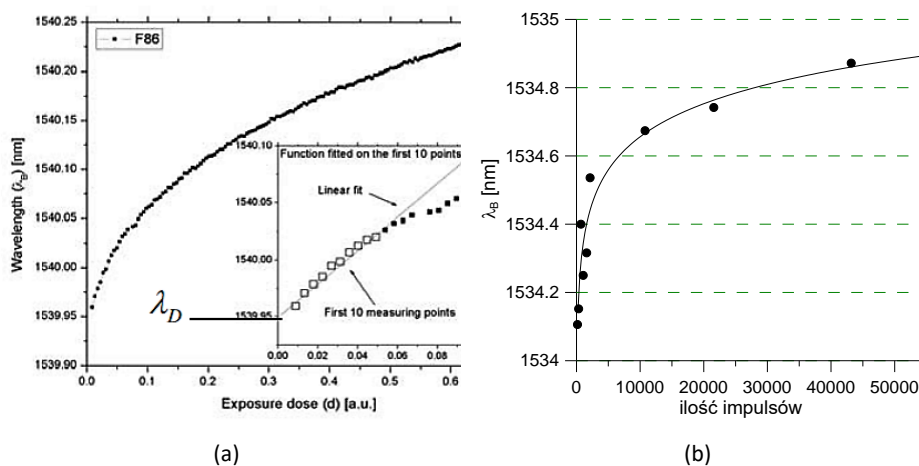
Rys. 11 Zależność reflektancji siatek Bragga w zależności od głębokości modulacji współczynnika załamania struktury uzyskanej z wykorzystaniem obliczeń numerycznych (a) oraz dla wytworzonych struktur dla różnej ilości impulsów laserowych wywołanej zmienną częstotliwością pracy źródła światła (b)

Na rysunku 12 przedstawiono wykresy zależności szerokości połówkowej FWHM w funkcji głębokości modulacji współczynnika załamania (wynik modelowania) oraz ilości impulsów laserowych o stałej energii w doświadczeniu, w którym zmianie ulegał czas ekspozycji włókna światłowodowego na działanie wiązki zapisującej (wyniki eksperymentalne).



Rys. 12 Zależność szerokości połówkowej w zależności od głębokości modulacji współczynnika załamania (wynik modelowania) oraz ilości impulsów laserowych uzyskanej dla zmiennego czasu ekspozycji włókna laserowego (wynik eksperymentalny)

Na rysunku 13 przedstawiona zależność przesunięcia długości fali Bragga od ilości impulsów laserowych wygenerowanych w procesie zapisu. Rysunek 13a przedstawia zależność zamieszczoną w publikacji [16] (w powiększonym fragmencie widoczne jest dopasowanie liniowe dla pierwszych dziesięciu punktów pomiarowych), natomiast rys.13b przedstawia zależność uzyskaną eksperymentalnie. Uzyskany kształt charakterystyki jest zgodny z doniesieniami literaturowymi. Widoczne jest przesunięcie długości fali Bragga w stronę fal dłuższych wraz z rosnącą ilością energii dostarczonej w procesie zapisu. Jest to zjawisko charakterystyczne dla struktur Bragga I typu.



Rys. 8.33 Zależność długości fali Bragga w funkcji ilości impulsów laserowych dla siatek Bragga zapisanych na włóknie o wysokiej fotoczułości [16]

## 7. Ocena wpływu wybranych parametrów układu do zapisu siatek Bragga w oparciu o zdefiniowane wskaźniki jakościowe

Wyniki przeprowadzonych pomiarów pozwoliły na analizę wpływu szeregu parametrów układu do zapisu struktur periodycznych na wskaźniki jakościowe wytworzonych siatek Bragga. Analiza wpływu parametrów geometrycznych układu pozwoliła na określenie wymaganej dokładności ustawienia włókna światłowodowego względem maski fazowej. Ze względu na wysoką energię generowanych impulsów laserowych możliwe było ustawienie układu optycznego tak, by zapis struktur Bragga realizowany był dla wiązki o relatywnie dużej szerokości w stosunku do średnicy światłowodu. Pozwoliło to na zmniejszenie wymaganej dokładności ustawienia włókna w kierunku równoległym do maski dyfrakcyjnej. Przeprowadzone doświadczenia pozwoliły wyznaczyć zakres roboczy ustawienia światłowodu, który określono dla pięcioprocentowej granicznej wartości spadku reflektancji wytwarzanych struktur. Wyniósł on 400  $\mu\text{m}$ . Doświadczalne określenie wpływu położenia włókna światłowodowego w zależności od odległości od maski fazowej pozwoliło na określenie, dla założonego pięcioprocentowego poziomu spadku reflektancji wytwarzanych struktur, wymaganego przedziału ustawienia włókna światłowodowego. Mieściło się ono w zakresie położenia włókna od położenia zerowego (włókno światłowodowe dotyka dystansów umieszczonych na masce fazowej), do położenia oddalonego od elementów dystansujących o 62,5  $\mu\text{m}$  (połowa średnicy światłowodu).

Analiza wpływu parametrów pracy lasera ekscymerowego na wskaźniki jakościowe widm wytwarzanych siatek Bragga pozwoliła na określenie zakresów regulacji poszczególnych parametrów oraz określenie charakteru analizowanych zależności w tym liniowych zakresów zmian. Zauważono, że wpływ zmiany energii impulsów laserowych w zakresie pozwalającym na wytwarzanie siatek I typu jest niewielki. W zakresie regulacji energii użytego lasera ekscymerowego (pomiędzy progiem emisji

laserowej, a wartością powodującą zniszczenie elementów optycznych układu) zmiana energii powoduje zmianę reflektancji wytworzonych struktur nie większą niż 20%. W przypadku zmiany czasu ekspozycji i częstotliwości zmiany wskaźników widm można regulować w znacznie szerszym zakresie. W przypadku zmiany czasu ekspozycji w zakresie odpowiedzi liniowej uzyskano zmianę reflektancji wytworzonych struktur  $R$  od 0,05 do 0,995 oraz zmianę szerokości połówkowej  $FWHM$  w zakresie od 0,075 nm do 0,87 nm. Doświadczenie określające jednocześnie wpływ częstotliwości i czas ekspozycji włókna światłowodowego pozwoliło na określenie warunków, przy których zapis struktur Bragga jest skuteczniejszy. Warunki te występują przy wysokiej częstotliwości pracy lasera ekscymerowego i skróconym czasie ekspozycji włókna światłowodowego.

Analizując wszystkie otrzymane w ramach pracy zależności określono warunki skutecznego zapisu światłowodowych siatek Bragga. Występują one przy wyższych częstotliwościach pracy lasera ekscymerowego oraz przy sterowaniu czasem ekspozycji światłowodu, który można uznać za główny parametr wpływający na wskaźniki jakościowe wytworzonych struktur. Wpływ zmiany energii impulsów laserowych, w zakresie regulacji użytego lasera, jest relatywnie niewielki, co umożliwia zapis dla niskich wartościach energii generowanych impulsów (około 50 mJ). Pozwala to na zachowanie zbliżonych warunków pracy lasera przez cały czas pracy pomiędzy wymianą mieszaniny gazów roboczych. Jest to szczególnie istotne za względu na „starzenie” się gazu wypełniającego rezerwar lasera. W praktyce zużywanie się gazu powoduje spadek energii generowanych impulsów. Sterując napięciem przyspieszającym lasera możliwe jest więc utrzymanie stałej (niskiej) wartości energii impulsów przez cały cykl pracy lasera pomiędzy wymianą gazów roboczych.

## 8. Wnioski

W niniejszej pracy przedstawiony został projekt układu do zapisu struktur periodycznych. Wyniki przeprowadzonych pomiarów pozwoliły na analizę wpływu szeregu parametrów układu do zapisu struktur periodycznych na wskaźniki jakościowe wytworzonych siatek Bragga. Przeprowadzono analizę wpływu parametrów geometrycznych układu, która pozwoliła na określenie wymaganej dokładności ustawienia włókna światłowodowego względem maski fazowej. Analiza wpływu parametrów pracy lasera ekscymerowego na wskaźniki jakościowe widm wytwarzanych siatek Bragga pozwoliła na określenie zakresów regulacji poszczególnych parametrów oraz określenie charakteru analizowanych zależności w tym liniowych zakresów zmian.

Jako rezultat przeprowadzonych doświadczeń uzyskano struktury Bragga, których reflektancja zmienia się w zakresie od 0,05 do 0,995. Regulacja szerokości połówkowej wytworzonych struktur jest możliwa do realizacji w zakresie 0,075 nm do 0,87 nm.

Analizując wszystkie otrzymane w ramach pracy zależności określono warunki skutecznego zapisu światłowodowych siatek Bragga. Pozwala to na wykorzystanie zrealizowanego układu do wytwarzania struktur Bragga o pożądanymi właściwościami spektralnymi, dedykowanych do zastosowań telekomunikacyjnych oraz czujnikowych.

## Literatura

- [1] Cheng-Ling L., Ray-Kuang L., Yee-Mou K.; Design of multichannel DWDM fiber Bragg grating filters by Lagrange multiplier constrained optimization; Optics Express, vol. 14, issue 23, pp. 11002-11011, 2006

- [2] Tae-Hyun P., Jin-Soo S., Guanghao H., Woo-Sung Ch., Min-Cheol O.; Tunable channel drop filters consisting of a tilted Bragg grating and a mode sorting polymer waveguide; *Optics Express* Vol. 24, Issue 6, pp. 5709-5714, 2016
- [3] Silva S.; Coelho L.; Frazao O; Santos J.; Malcata F.; A Review of Palladium-Based Fiber-Optic Sensors for Molecular Hydrogen Detection; *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, issue 1, 2012
- [4] Hang Z. Y.; Xue G. Q.; Yu P. W.; Muhammad M. A.; Man H. L.; Kok S. L.; Harith A.; In-Fiber Gratings for Simultaneous Monitoring Temperature and Strain in Ultrahigh Temperature; *IEEE Photonics Technology Letters*; vol. 27, issue: 1, 2015
- [5] Sulejmani S.; Sonnenfeld C., Geernaert, T., Luyckx, G., Van Hemelrijck, D., Mergo, P.; Urbanczyk W, Chah K., Caucheteur Ch., Mégret P, Thienpont, H., Berghmans F.; Shear stress sensing with Bragg grating-based sensors in microstructured optical fibers; *Optics Express*, vol. 21, issue 17, pp. 20404-20416, 2013
- [6] Osuch T., Jurek T., Markowski K., Jedrzejewski K.; Simultaneous Measurement of Liquid Level and Temperature Using Tilted Fiber Bragg Grating; *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, issue: 5, 2016
- [7] Kisala P.; Measurement of the maximum value of non-uniform strain using a temperature-insensitive fibre Bragg grating method; *Opto-electronics review*, nr 3, vol. 21, s. 293-302, 2013
- [8] Kisala P.; Generation of a zone chirp in uniform Bragg grating as a way of obtaining double functionality of a sensor; *Metrology and measurement systems*, nr 4, vol. 19, s. 727-738, 2012
- [9] Ciężczyk S., Kisała P.; Inverse problem of determining periodic surface profile oscillation defects of steel materials with a fiber Bragg grating sensor; *Applied Optics*, vol. 55, issue 6, pp. 1412-1420, 2016
- [10] Sulejmani S., Sonnenfeld C., Geernaert T., Mergo P., Makara M., Poturaj K., **Skorupski K.**, Martynkien T., Satkiewicz-Barabach G., Olszewski J., Urbanczyk W., Caucheteur C., Chah K., Megret P., H. Terry H., Van Roosbroeck J., Berghmans F., Thienpont H.; Control over the pressure sensitivity of Bragg grating-based sensors in highly birefringent microstructured optical fibers; *IEEE Photonics Technology Letters*, 24 (6), art. no. 6125218, pp. 527-529, 2012
- [11] Sulejmani S., Sonnenfeld C., Geernaert T., Luyckx G., Van Hemelrijck D., Mergo P., **Skorupski K.**, Urbanczyk W., Chah K., Thienpont H., Berghmans F.; Microstructured optical fiber Bragg grating-based shear stress sensing in adhesive bonds; *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9157, art. no. 91577P, 2014
- [12] Tenderenda T., Murawski M., Szymanski M., Becker M., Rothhardt M., Bartelt H., Mergo P., Poturaj K., Makara M., **Skorupski K.**, Marc P., Jaroszewicz L., Nasilowski T.; Fiber Bragg Gratings in few-mode highly birefringent microstructured optical fibers for sensing applications; *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8421, art. no. 84217X, 2012
- [13] Orthonos A, Kalli K. ; *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*; London, Artech House, 1999
- [14] Kafka K., Talisa N., Tempea G., Austin D., Neacsu C., Chowdhury E.; Few-cycle pulse laser induced damage threshold determination of ultra-broadband optics; *Optics Express*, vol. 24, issue 25, pp. 28858-28868, 2016
- [15] Othonos A., Lee X.; Novel and Improved Methods of Writing Bragg Gratings with Phase Masks; *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, no. 10, 1995
- [16] Liu Y., Williams J.A.R., Zhang L., Bennion I.; Abnormal spectral evolution of fibre Bragg gratings in hydrogenated fibres, *Opt. Lett.*, 27, pp. 586–588, 2002