

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **235138**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **430622**

(51) Int.Cl.
G02B 6/02 (2006.01)
G02B 6/10 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **16.07.2019**

(54) **Sposób wytwarzania skośnej światłowodowej siatki Bragga o zwiększonej rozdzielczości pomiaru współczynnika refrakcji**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
02.12.2019 BUP 25/19

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
01.06.2020 WUP 06/20

(73) Uprawniony z patentu:
POLITECHNIKA LUBELSKA, Lublin, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
KRZYSZTOF SKORUPSKI, Lurów, PL
SŁAWOMIR CIĘSZCZYK, Lipiny, PL
PATRYK PANAS, Chełm, PL

(74) Pełnomocnik:
rzech. pat. Maciej Nowicki

PL 235138 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób wytwarzania skośnej światłowodowej siatki Bragga o zwiększonej rozdzielczości pomiaru współczynnika refrakcji. Ma on swoje zastosowanie na klasycznym światłowodzie telekomunikacyjnym.

Światłowodowe skośne siatki Bragga TFBG (ang. tilted fiber Bragg grating) są wykorzystywane jako czujniki współczynnika refrakcji SRI (ang. surrounding refractive index).

Określenie wartości współczynnika refrakcji polega na zanurzeniu światłowodu z naniesioną strukturą periodyczną TFBG w badanej cieczy i jednoczesnym wyznaczeniu jej widma transmisji. Do pomiaru widma wykorzystuje się szerokopasmowe źródło i analizator widma. Współczynnik refrakcji badanej substancji oblicza się na podstawie otrzymanego widma, które zawiera kilkadziesiąt pików związanych z tzw. modami płaszczowymi siatki. Algorytmy do wyznaczania SRI wykorzystują zanikanie poszczególnych pików transmisyjnych wraz ze zwiększaniem się SRI. Rozdzielczość pomiaru jest więc ograniczona odległościami między poszczególnymi pikami modów w widmie. Zagęszczenie pików transmisyjnych, a więc zwiększenie ilości modów płaszczowych, spowoduje polepszenie rozdzielczości pomiaru, a więc polepszy właściwości metrologiczne układu z rozpatrywanym czujnikiem.

Opis zgłoszenia patentowego nr JP2013054273 (A) przedstawia metodę wytwarzania siatek TFBG, której celem jest zwiększona dokładność pomiaru. Siatka jest wytwarzana metodą maski fazowej, w taki sposób, że posiada inny kąt nachylenia zmian współczynnika refrakcji na swojej długości. Jest to osiągnięte poprzez dodatkowe pochylenie maski fazowej wzdłuż światłowodu w procesie zapisu struktury Bragga. Wykorzystana jest tutaj metoda kontroli amplitudy oraz okresu siatki wzdłuż jej długości stosowana dla klasycznych siatek Bragga opisana w opisie zgłoszenia patentowego nr US5748814 (A).

Z opisu zgłoszenia patentowego CN108318963 (A) znana jest metoda wytwarzania skośnych siatek TFBG o wielu kątach (paralel multi-angle tilted fiber Bragg grating). Struktura taka zawiera zapisane na tym samym odcinku światłowodu klasyczne siatki TFBG różniące się kątem nachylenia modulacji współczynnika załamania. W dokumencie tym określono rodzaje masek fazowych, parametry pracy lasera oraz sposoby regulowania maski fazowej w stosunku do światłowodu tak by osiągnąć zamierzone kąty nachylenia siatek składowych.

W artykule Caucheteur, C., Paladino, D., Pilla, P., Cutolo, A., Campopiano, S., Giordano, M., & Megret, P. (2008). External refractive index sensitivity of weakly tilted fiber Bragg gratings with different coating thicknesses. *IEEE Sensors Journal*, 8(7), 1330–1336 opisano metodę modyfikacji widma siatki TFBG, która jednak wymaga zaawansowanego procesu pokrywania światłowodu warstwami o ściśle kontrolowanej grubości. Rozwiązanie to poszerza zakres mierzony SRI bez zwiększania rozdzielczości pomiaru.

W artykule Chen, X., Xu, J., Zhang, X., Guo, T., & Guan, B. O. (2017). Wide range refractive index measurement using a multi-angle tilted fiber Bragg grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, 29(9), 719–722 zaproponowano strukturę TFBG złożoną z połączenia kilku klasycznych struktur TFBG o różnych kątach nachylenia zmian współczynnika refrakcji w stosunku do osi światłowodu. Struktura taka charakteryzuje się poszerzeniem zakresu pomiarowego SRI bez zwiększania rozdzielczości pomiaru.

W artykule Wang, T., Liu, K., Jiang, J., Xue, M., Chang, P., & Liu, T. (2017). Temperature insensitive refractive index sensor based on tilted moire FBG with high resolution. *Optics express*, 25(13), 14900–14909 zaproponowano strukturę TFBG typu moire poprzez zapisanie dwóch struktur o różnych kątach nachylenia na tym samym odcinku światłowodu. W efekcie powstają dwie grupy pików w widmie transmisyjnym, które są położone spektralnie obok siebie. Jest to równoznaczne jednoczesnemu pomiarowi SRI dwoma siatkami TFBG. Rozwiązanie takie wymaga do wytworzenia struktury dwóch różnych masek fazowych oraz dwóch różnych kątów nachylenia maski podczas zapisu struktury. Proces takiego zapisu jest skomplikowany w porównaniu do zapisu z jedną maską fazową. Struktura wymaga konieczności znacznie szerszego zakresu pomiaru widma w stosunku do klasycznej struktury TFBG co nie zawsze jest możliwe ze względu na ograniczenie analizatorów widma i źródeł szerokopasmowych, a dodatkowo znacznie wydłuża czas pomiaru.

W artykule Jiang, B., Bi, Z., Wang, S., Xi, T., Zhou, K., Zhang, L., & Zhao, J. (2018). Cascaded tilted fiber Bragg grating for enhanced refractive index sensing. *Chinese Physics B*, 27(11), 114220 zaproponowano kaskadowe połączenie dwóch TFBG wytworzonych na światłowodach o różnych średnicach. W efekcie powstaje zagęszczenie pików transmisyjnych widma i możliwość pomiaru SRI ze zwiększeniem rozdzielczości. Jednakże wymaga to skomplikowanego połączenia światłowodów

o dwóch różnych średnicach oraz wytworzenia jednakowej struktury na obydwu światłowodach. Tego typu światłowody to z reguły włókna specjalne, które cechuje utrudnione łączenie w układzie pomiarowym z innymi elementami układu, a często występuje konieczność używania specjalnych elementów łączeniowych i technik obróbki. W tym rozwiązaniu nie jest więc możliwe zastosowanie klasycznego światłowodu telekomunikacyjnego o znormalizowanej średnicy i parametrach.

Celem wynalazku jest wytworzenie skośnej światłowodowej siatki Bragga o zwiększonej rozdzielczości pomiaru współczynnika refrakcji, który umożliwi pomiar współczynnika załamania medium ze zwiększoną rozdzielczością, poprzez technikę wytwarzania struktury periodycznej w postaci siatki skośnej o zwiększonej liczbie modów płaszczowych w jej widmie optycznym. Siatka przesłuchiwana będzie z wykorzystaniem szerokopasmowego źródła oraz optycznego analizatora widma. Wykorzystany zostanie klasyczny światłowód telekomunikacyjny o znormalizowanych typowych parametrach. Dodatkowo w procesie zapisu wykorzystana będzie jedna maska fazowa i ten sam kąt jej ustawienia w stosunku do osi światłowodu. Sposób ten nie wymaga zmiany kąta nachylenia maski fazowej.

Istotą sposobu wytwarzania światłowodowej siatki skośnej, w którym odcinek światłowodu poddaje się działaniu wiązki laserowej przestrzenie zmodulowanej jest to, że włókno światłowodowe jednomodowe mocuje się w pierwszym uchwycie stałym i drugim uchwycie przesuwным wzdłuż osi mocowania włókna światłowodowego jednomodowego. Następnie na odcinek włókna światłowodowego jednomodowego znajdujący się pomiędzy uchwytami podaje się wiązkę laserową przestrzennie zmodulowaną, której kierunek padania tworzy z włóknom optycznym kąt w zakresie od 1 do 8°, do momentu utworzenia struktury periodycznej w rdzeniu włókna światłowodowego. W dalszej kolejności wyłącza się promieniowanie laserowe i przesuwa się drugi uchwyt w kierunku zgodnym z osią włókna światłowodowego powodując rozciągnięcie jego odcinka. Dalej ponownie na tym samym odcinku włókna światłowodowego poddaje się wiązkę laserową przestrzennie zmodulowaną, której kierunek padania tworzy z włóknom optycznym kąt w zakresie od 1 do 8° do momentu utworzenia zagęszczonej struktury periodycznej w rdzeniu włókna światłowodowego. W dalszym etapie wyłącza się promieniowanie i odciąża się odcinek włókna światłowodowego, co powoduje powrót jego długości do wymiarów początkowych.

Wiązkę laserową przestrzennie zmodulowaną wytwarza się za pomocą lasera ekscymerowego i maski fazowej, lub za pomocą lasera ekscymerowego i układu interferometru.

Korzystnym skutkiem wytwarzania skośnej światłowodowej siatki Bragga o zwiększonej rozdzielczości pomiaru współczynnika refrakcji, według wynalazku jest to, że siatka ta posiada zwiększone zagęszczenie modów płaszczowych. Struktura siatki jest tak zmieniana, że w jej widmie obserwowane jest zagęszczenie pików transmisyjnych. Oznacza to możliwość zwiększenia rozdzielczości pomiaru współczynnika refrakcji. Jednocześnie proces wytworzenia struktury nie wymaga pokrywania światłowodu specjalnymi dodatkowymi warstwami oraz nie zmienia mechanicznej wytrzymałości światłowodu. Zastosowany jest klasyczny światłowód telekomunikacyjny nie wymagający mechanicznej ingerencji i zmiany jego przekroju. Światłowód taki jest znacznie tańszy od ewentualnie możliwych do zastosowania światłowodów specjalnych, które dodatkowo mogą posiadać gorsze właściwości mechaniczne.

Sposób według wynalazku został bliżej objaśniony w przykładzie wykonania na rysunku, na którym poszczególne figury przedstawiają:

fig. 1 – schemat układu do zapisu światłowodowych struktur periodycznych w pierwszym przykładzie wykonania,

fig. 2 – schemat układu do zapisu światłowodowych struktur periodycznych w drugim przykładzie wykonania,

fig. 3 – wykres widma transmisyjnego struktury skośnej siatki Bragga wykonanej na włóknie światłowodowym w procesie jednorazowego zapisu,

fig. 4 – wykres widma transmisyjnego struktury skośnej siatki Bragga wykonanej na włóknie światłowodowym w procesie dwukrotnego zapisu,

fig. 5 – zestawienie wycinka A1 widma transmisyjnego struktury skośnej siatki Bragga wykonanej na włóknie światłowodowym w procesie jednorazowego zapisu i wycinka A2,

fig. 6 – przedstawia zależność ilości modów w funkcji długości fali dla wycinka widma transmisyjnego struktury skośnej siatki Bragga wykonanej na włóknie światłowodowym w procesie dwukrotnego zapisu.

Układ do zapisu światłowodowych struktur periodycznych w przykładach wykonania przedstawionych na fig. 1 i fig. 2 rysunku składa się z uchwytu stałego 2a i uchwytu przesuwного 2b wzdłuż osi mocowania włókna światłowodowego jednomodowego 1. Uchwytami są uchwyty światłowodowe Thorlabs HFF001. Drugi uchwyt 2b został umieszczony na manipulatorze mikrometrycznym Thorlabs PT1/M 5.

W pierwszej odmianie układu (fig. 1) nad miejscem mocowania włókna światłowodowego jednomodowego 1 pomiędzy uchwytem stałym 2a i uchwytem przesuwным 2b znajduje się źródło światła w postaci lasera ekscymerowego 6 Coherent BraggStarM, który emituje promieniowanie o długości 248 nm. Pod laserem 6 ekscymerowym znajduje się maska fazowa 7 Ibsen Photonics o okresie 1080 nm i fali iluminacji 248 nm.

W drugiej odmianie układu (fig. 2) nad miejscem mocowania włókna światłowodowego jednomodowego 1 pomiędzy uchwytem stałym 2a i uchwytem przesuwным 2b znajduje się źródło światła w postaci lasera ekscymerowego 6 Coherent BraggStarM, który emituje promieniowanie o długości 248 nm. Pod laserem ekscymerowym 6 znajduje się układ interferometru dwuwiązkowego w konfiguracji Macha-Zhendera składający się z elementu światłodzielnego 8, poniżej którego znajduje się para zwierciadeł 9.

Wykonanie próbki referencyjnej

Z użyciem pierwszej odmiany układu wytworzono referencyjną skośną światłowodową siatkę Bragga o standardowej rozdzielczości pomiaru współczynnika refrakcji, na włóknie światłowodowym jednomodowym 1 Corning® SMF-28® Ultra. Włókno to poddano uprzednio procesowi wodorowania w celu podniesienia jego fotoczułości. Proces wodorowania wykonany był według procedury polegającej na umieszczeniu włókna światłowodowego w atmosferze wodoru pod ciśnieniem 20 MPa w temperaturze 20°C na czas 10 dni. Następnie włókno światłowodowe jednomodowe 1 zostało umieszczone w uchwytach światłowodowych (2a i 2b) Thorlabs HFF001. Przeprowadzono procedurę, w której wytworzono skośną strukturę Bragga o kącie nachylenia 6° i standardowej liczbie modów płaszczowych w widmie struktury. Proces wytwarzania pojedynczej siatki Bragga polegał na tym, że włókno światłowodowe jednomodowe 1 mocowano w pierwszym uchwycie stałym 2a i uchwycie przesuwным 2b. Następnie na odcinek włókna światłowodowego jednomodowego 1 znajdujący się pomiędzy uchwytami 2a, 2b, przez czas 60 s, podawano wiązkę laserową przestrzennie zmodulowaną 3 o energii impulsów wynoszącej 100mJ i repetycji 20 Hz, której kierunek padania tworzy z włóknem optycznym kąt 4 równy 6°. Spowodowało to utworzenie struktury periodycznej w rdzeniu włókna światłowodowego 1.

Następnie z zastosowaniem wytworzonej siatki przeprowadzono badania współczynnika refrakcji SRI w ten sposób, że badany światłowód został podłączony do źródła promieniowania szerokopasmowego i analizatora widma, a część światłowodu z zapisaną siatką Bragga zanurzono w roztworze o określonym współczynniku załamania światła. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano wykres przedstawiony na fig. 3 rysunku.

Wykonanie próbki o zwiększonej ilości modów płaszczowych w widmie

Sposób wytwarzania skośnej światłowodowej siatki Bragga o zwiększonej rozdzielczości pomiaru współczynnika refrakcji został wykonany na włóknie takim samym i po takich samych procesach jak dla próbki referencyjnej. Sposób zrealizowano z użyciem układu opisanego w przykładzie wykonania dotyczącym próbki referencyjnej. Włókno światłowodu jednomodowego 1 zostało umieszczone w uchwytach światłowodowych 2a i 2b Thorlabs HFF001. Wytworzono skośną strukturę Bragga o kącie nachylenia 6° i zwiększonej liczbie modów płaszczowych w widmie struktury. Proces wytwarzania siatki Bragga polegał na tym, że w włókno światłowodowe jednomodowe 1 mocowano w pierwszym uchwycie stałym 2a i uchwycie przesuwным 2b. Następnie na odcinek włókna światłowodowego jednomodowego 1 znajdujący się pomiędzy uchwytami 2a, 2b, przez czas 60 s, podawano wiązkę laserową przestrzennie zmodulowaną 3 o energii impulsów wynoszącej 100mJ i repetycji 20 Hz, której kierunek padania tworzy z włóknem optycznym kąt 4 równy 6°. Spowodowało to utworzenie struktury periodycznej w rdzeniu włókna światłowodowego 1. Następnie wyłączono laser i za pomocą pierwszego uchwytu stałego 2a i drugiego uchwytu przesuwного 2b rozciągnięto włókno światłowodu 1 jednomodowego o 4,2 μm. Po rozciągnięciu światłowodu ponownie włączono laser i na odcinek włókna światłowodowego jednomodowego 1 znajdujący się pomiędzy uchwytami 2a, 2b, przez czas 60 s, podawano wiązkę laserową przestrzennie zmodulowaną 3 o energii impulsów wynoszącej 100mJ i repetycji 20 Hz, której kierunek padania tworzy z włóknem optycznym kąt 4 równy 6°. Spowodowało to utworzenie struktury periodycznej o zwiększonej liczbie modów płaszczowych w rdzeniu włókna światłowodowego 1. Po wykonaniu procesu zapisu włókno światłowodowe zostało odprężone.

Następnie z zastosowaniem wytworzonej siatki przeprowadzono badania współczynnika refrakcji SRI w sposób jak dla próbki referencyjnej. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano wykres przedstawiony na fig. 4 rysunku.

Pomiar charakterystyk widmowych wytworzonych struktur periodycznych przedstawiony na fig. 3, fig. 4 i fig. 5 rysunkach został wykonany w układzie transmisyjnym składającym się ze światłowodu

z zapisaną strukturą Bragga przyłączoną do źródła światła, diody super luminescencyjnej Thorlabs S5FC1005S oraz analizatora widma optycznego Yokogawa AQ6370D.

Na podstawie pomiaru widm określono liczbę modów płaszczowych w zakresie spektralnym od 1495 nm do 1545 nm. Siatka zagęszczona ma w tym zakresie 90 modów płaszczowych, siatka typowa 45 modów.

Wykaz oznaczeń

1. Włókno światłowodowe jednomodowe
2. Uchwyty włókna światłowodowego
- 2a Uchwyt stały
- 2b Uchwyt przesuwny
3. Obszar modulacji przestrzennej wiązki (interferencji)
4. Kąt zawarty pomiędzy światłowodem a liniami pola interferencyjnego
5. Mechaniczny układ posuwu wzdłużnego
6. Laser ekscymerowy
7. Maski fazowa
8. Element światłodzielnicy
9. Zwierciadło

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób wytwarzania światłowodowej siatki skośnej, w którym odcinek światłowodu poddaje się działaniu wiązki laserowej przestrzenie zmodulowanej, **znamienny tym**, że włókno światłowodowe jednomodowe (1) mocuje się w pierwszym uchwycie stałym (2a) i drugim uchwycie przesuwym (2b) wzdłuż osi mocowania włókna światłowodowego jednomodowego (1), po czym na odcinek włókna światłowodowego jednomodowego (1) znajdujący się pomiędzy uchwytami (2a), (2b) podaje się wiązkę laserową przestrzenie zmodulowaną (3), której kierunek padania tworzy z włóknem optycznym kąt (4) w zakresie od 1 do 8°, do momentu utworzenia struktury periodycznej w rdzeniu włókna światłowodowego (1), a następnie wyłącza się promieniowanie laserowe i przesuwa się drugi uchwyt (2b) w kierunku zgodnym z osią włókna światłowodowego (1) powodując rozciągnięcie jego odcinka i ponownie na tym samym odcinku włókna światłowodowego (1) poddaje się wiązkę laserową przestrzenie zmodulowaną (3), której kierunek padania tworzy z włóknem optycznym kąt (4) w zakresie od 1 do 8° do momentu utworzenia zagęszczonej struktury periodycznej w rdzeniu włókna światłowodowego (1) po czym wyłącza się promieniowanie i odciąża się odcinek włókna światłowodowego, co powoduje powrót jego długości do wymiarów początkowych.
2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wiązkę laserową przestrzenie zmodulowaną (3) wytwarza się za pomocą lasera ekscymerowego (6) i maski fazowej (7).
3. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wiązkę laserową przestrzenie zmodulowaną (3) wytwarza się za pomocą lasera ekscymerowego (6) i układu interferometru.

Rysunki

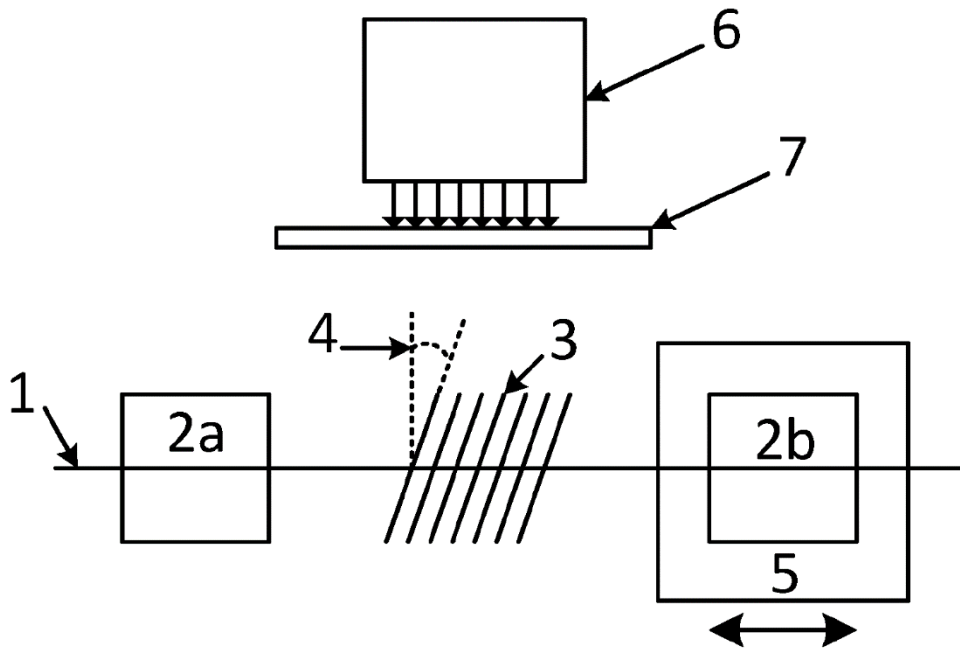


Fig. 1

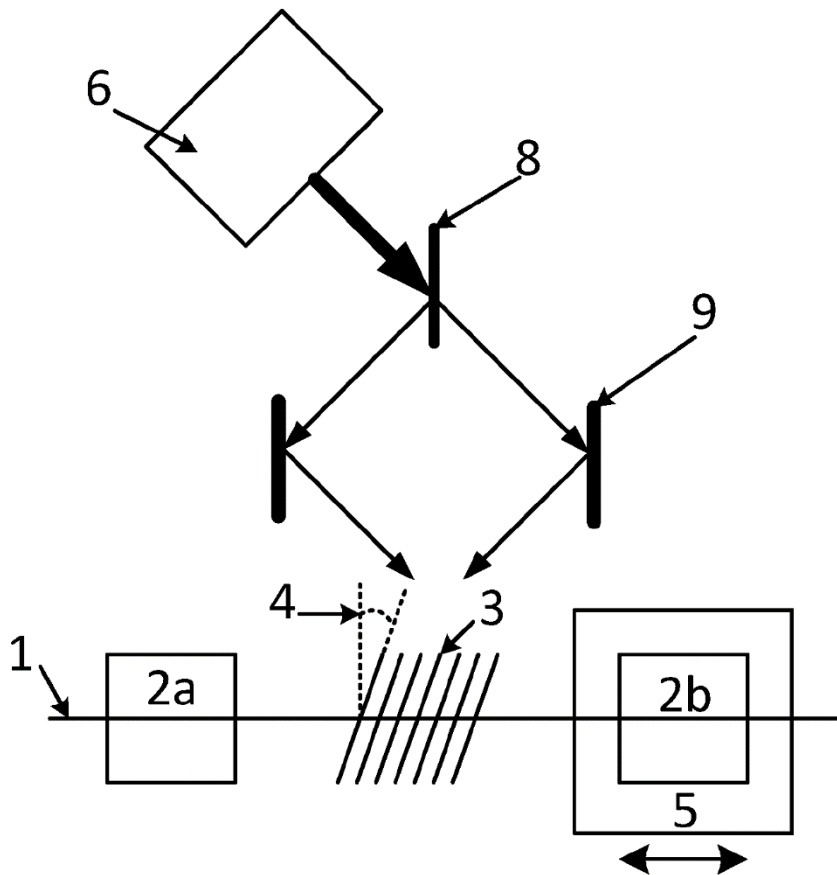


Fig. 2

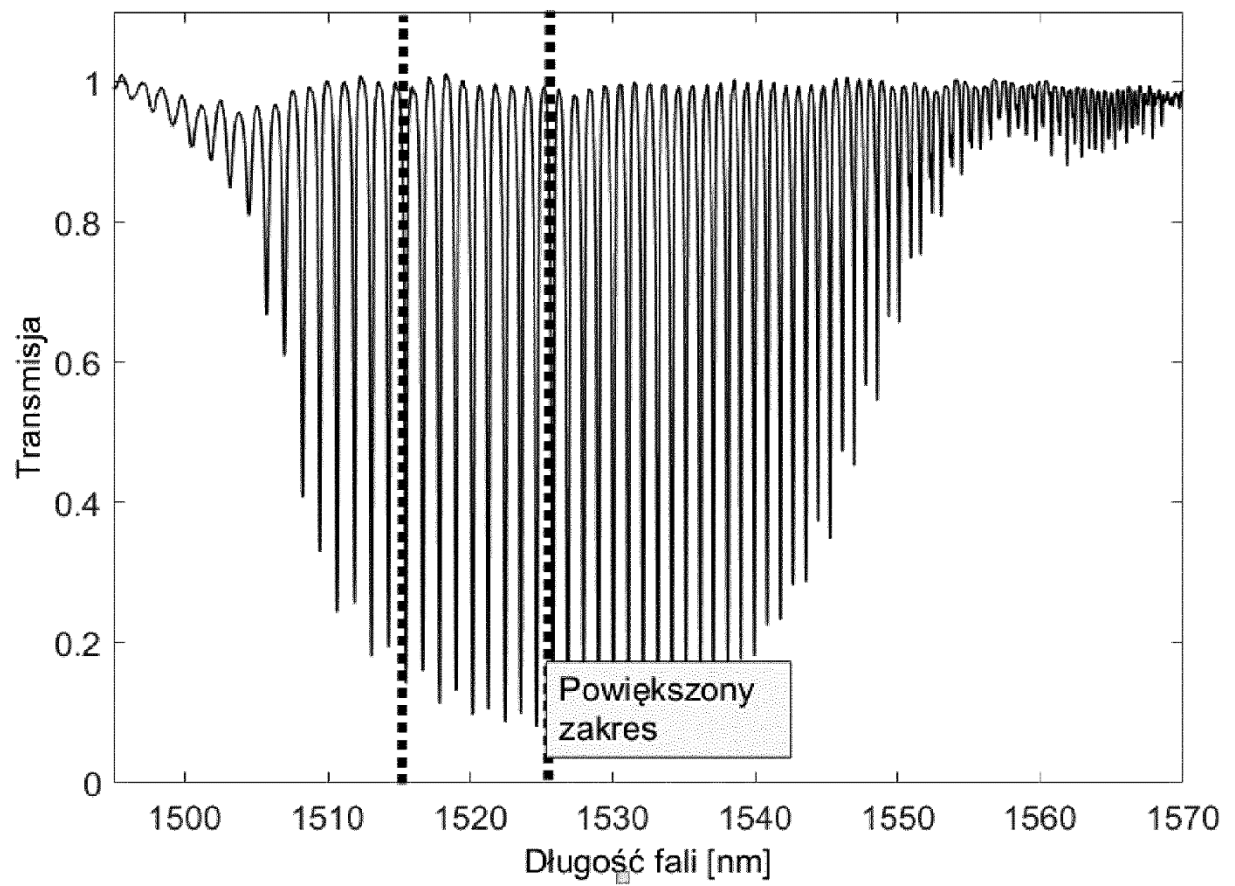


Fig. 3

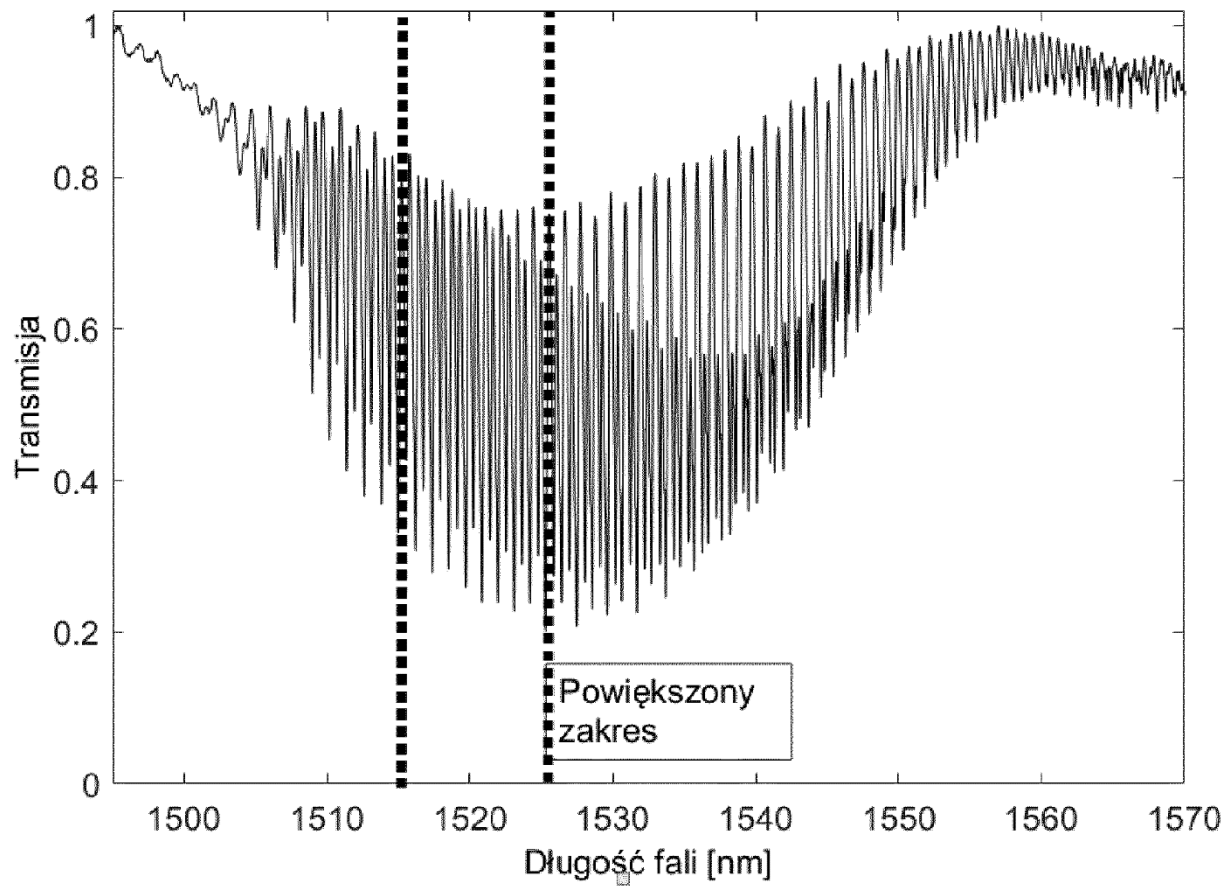


Fig. 4

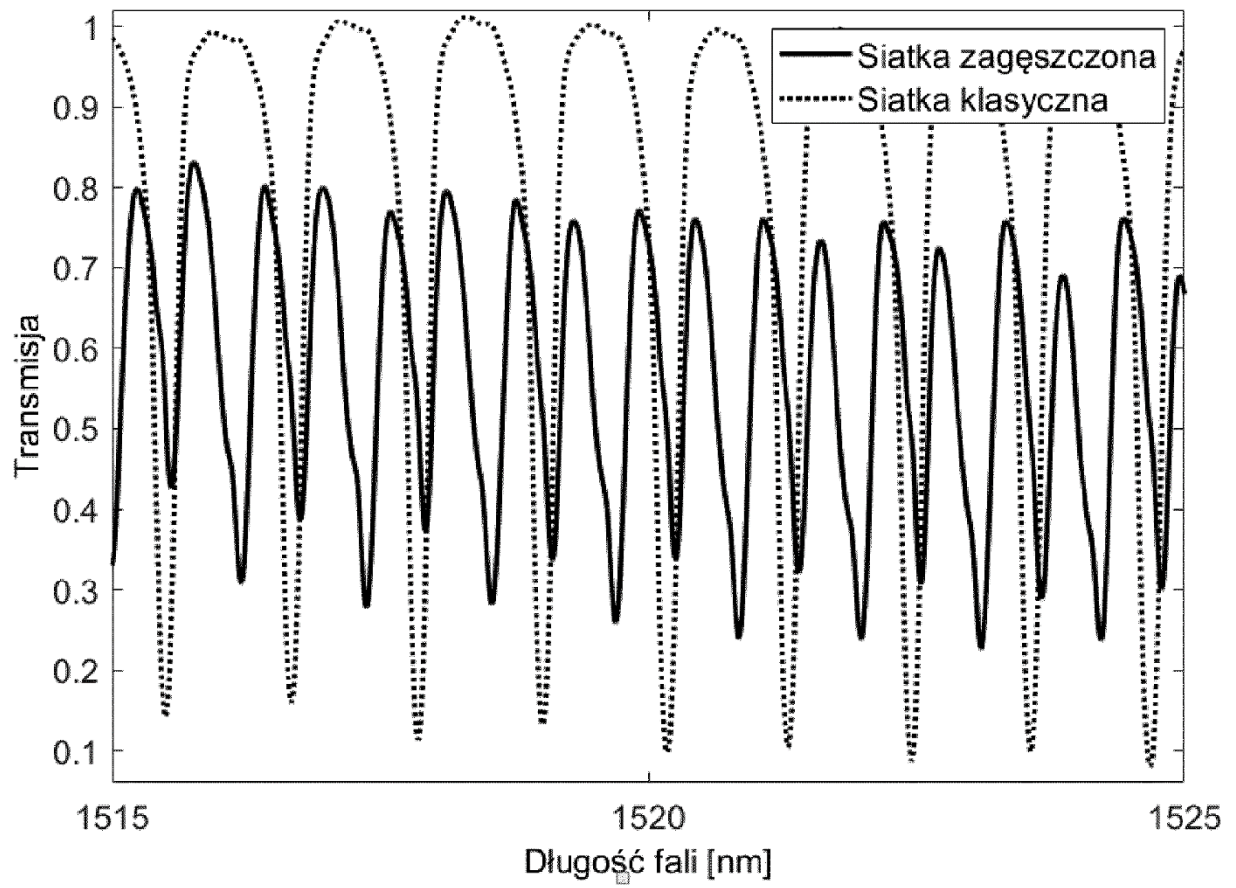


Fig. 5

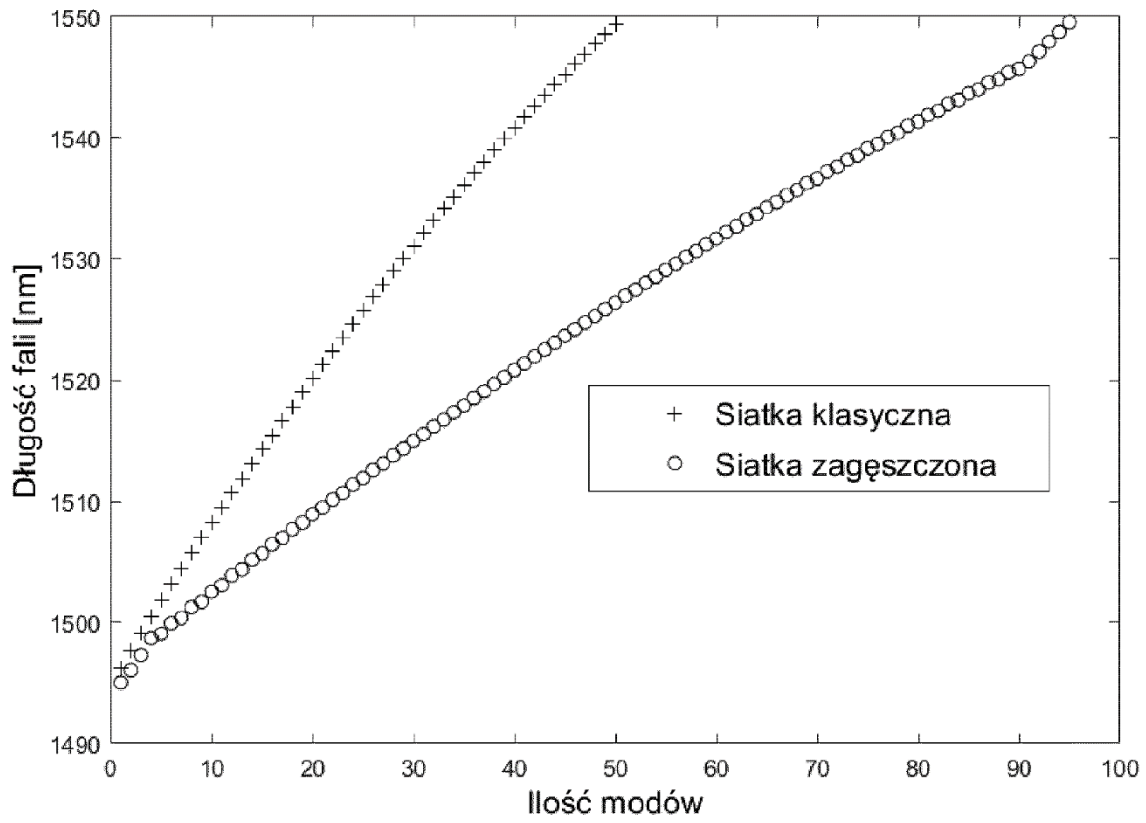


Fig. 6