RZECZPOSPOLITA POLSKA

Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **236171**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **430153**

(22) Data zgłoszenia: **06.12.2017**

(86) Data i numer zgłoszenia międzynarodowego:
06.12.2017, PCT/PL17/050059

(87) Data i numer publikacji zgłoszenia międzynarodowego:
14.06.2018, WO18/106134

(51) Int.Cl.
G01B 9/02 (2006.01)
G01B 11/06 (2006.01)
G02B 6/00 (2006.01)

(54) **Interferometr falowodowy**

(30) Pierwszeństwo:
06.12.2016, PL, P.419701

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
04.11.2019 BUP 23/19

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
14.12.2020 WUP 20/20

(73) Uprawniony z patentu:
INPHOTECH SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ, Ołtarzew, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
TOMASZ NASIŁOWSKI, Warszawa, PL
MAREK NAPIERAŁA, Warszawa, PL
ŁUKASZ OSTROWSKI, Nieporęt, PL
ŁUKASZ SZOSTKIEWICZ, Toruń, PL
KAROL WYSOKIŃSKI, Gdynia, PL
ANNA MĄKOWSKA, Warszawa, PL
ANNA PYTEL, Warszawa, PL
MICHAŁ MURAWSKI, Warszawa, PL
DAWID BUDNICKI, Sanniki, PL
JANUSZ FIDELUS, Mucharz, PL
ZBIGNIEW HOŁDYŃSKI, Warszawa, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Marek Bury

PL 236171 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest interferometr wykonany na falowodzie wielordzeniowym, w szczególności falowodzie włóknistym lub planarnym, którego istotą jest zastosowanie procesu aktywacji rdzeni, ujawnionego w dalszej części opisu.

Pomiar grubości geometrycznej warstw prowadzony przy pomocy zestawów mikrometrycznych wymaga fizycznego objęcia przyrządem pomiarowym całej ocenianej warstwy, co jest utrudnione w wypadku pomiarów elementów odkształcalnych lub substancji ciekłych. Użycie tego typu urządzeń jest także niemożliwe w przypadku badania roztworów lub substancji biologicznych albo badań medycznych, na przykład obserwacji bakterii i wirusów.

Z kolei grubość optyczna (ang. *optical thickness*) nazywana jest także długością drogi optycznej i wyraża się poprzez iloczyn geometrycznej grubości warstwy i jej współczynnika załamania. W dalszej części opisu stosowana jest terminologia grubości optycznej w opisanym znaczeniu.

Badania tego typu substancji (odkształcalnych, ciekłych itp.) prowadzi się zwykle mikroskopowo, co jest czasochłonne oraz wymaga drogiego i mało uniwersalnego sprzętu pomiarowo-obserwacyjnego. Utrudniona w realizacji jest także koncepcja badań *in situ*.

W ogólności, pomiary grubości optycznej mogą być realizowane z wykorzystaniem interferometrów i tak np. znane są pomiary grubości elementów fazowych z wykorzystaniem interferometrów, np. interferometru Michelsona czy Macha-Zehndera. Za pomocą interferometrów objętościowych nie jest jednak możliwe mierzenie *in situ* zmian grubości optycznej relatywnie małych warstw, rzędu kilku-kilkuset nanometrów czy pojedynczych mikrometrów.

W technice znane są różne konstrukcje interferometrów falowodowych, w szczególności światłowodowych. Znane są również metody pomiarowe z ich wykorzystaniem.

Konstrukcja interferometru na światłowodzie poprzez wykonanie na nim przewężeń światłowodowych została opisana w artykule “Tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for Liquid Level Sensing” autorstwa Hun-Pin Chang i innych, opublikowanego w PIERS Proceedings, 2013. Konstrukcja elementu opiera się na wykorzystaniu standardowego włókna jednomodowego i wykonaniu na nim dwóch nieadiabatycznych przewężeń. Nieadiabatyczne przewężenia skutkują w pojawieniu się modów płaszczowych za przewężeniem. Idea działania interferometru opiera się na pomiarze interferencji tych modów, która następuje na drugim przewężeniu. Interferometr ten jest wykorzystywany do badania poziomu cieczy. W przedstawionym rozwiązaniu nie wykorzystuje się falowodów wielordzeniowych.

W artykule pt. “Simple all-microstructured-optical-fiber interferometr built via fusion splicing” autorstwa Joel Villatoro i innych, opublikowanego w Optics Express, 2007, przedstawiono koncepcję interferometru na jednordzeniowym światłowodzie fotonicznym, w którym wykonuje się dwa spawy zasklepiające otwory pełniące rolę sprzęgaczy.

Przeglądowy artykuł pt. “Recent Progress of In-Fiber Integrated Interferometers” autorstwa Libo Yuan, opublikowany w PhotonicSensors, 2011 prezentuje koncepcję konstrukcji interferometru Macha-Zehndera jak i interferometru Michelsona na przewężanych dwurdzeniowych światłowodach. Interferometr Michelsona w proponowanej konstrukcji ma zwierciadło na całej płaszczyźnie czoła końca światłowodu. Sygnał przechodzący przez przewężkę i odbity od zwierciadła interferują.

Koncepcja lokalnego przewężania włókien dwurdzeniowych jest także zaprezentowana w artykule pt. “Gemini Fiber for Interferometry and Sensing Applications” autorstwa E. Zetterlund i innych opublikowanym w Journal of Sensors, 2009. W ujawnionej koncepcji rozwiązania nie nakłada się żadnych substancji na rdzenie włókien światłowodowych (nie aktywuje się ich). Przykład opisany w artykule charakteryzuje się równymi ramionami.

Konstrukcja interferometru na światłowodzie wielordzeniowym została także opisana w artykule “All-solid multi-core fiber-based multipath Mach-Zehnder interferometer for temperature sensing” autorstwa Ming Tang i innych, opublikowanego w Applied Physics B, 2013. Autorzy wskazują na zastosowanie czujnikowe interferometru, w szczególności do pomiaru temperatury. Idea działania światłowodu bazuje na realizacji spawu ze światłowodem SMF-28 nie do środków poszczególnych rdzeni, ale w obszar płaszcza pomiędzy rdzeniami. Autorzy wskazują na korzystanie w tym przypadku z wielowiązkowej interferencji. Rolę sprzęgaczy w tradycyjnych interferometrach pełnią tu spawy wykonane do przestrzeni międzyrdzeniowych.

Artykuł “Multicore microstructured optical fibre for sensing applications” autorstwa L. Sojka i innych opublikowany w Optics Communications, 2015 ujawnia koncepcję wielowiązkowego interfe-

rometru Macha-Zehndera na mikrostrukturalnym światłowodzie siedmiordzeniowym. Rolę sprzęgaczy pełnią spawy wykonane do obu końców włókna. Wykorzystywane włókno ma sprzężone rdzenie, co sprawia, że realnie badany jest wpływ czynników zewnętrznych na transfer mocy między rdzeniami.

Możliwość konstrukcji wieloparametrowego czujnika wykorzystującego światłowody wielordzeniowe (multipleksację przestrzenną), a dokładniej światłowody wielordzeniowe z heterogenicznymi rdzeniami, została przedstawiona w artykule pt. "Spatial-Division Multiplexed Mach-Zehnder Interferometers in Heterogeneous Multicore Fiber for Multiparameter Measurement" autorstwa Lin Gan i innych, opublikowanym w IEEE Photonics Journal, 2016. Koncepcja realizowana jest poprzez utworzenie interferometru Macha-Zehndera na włóknie siedmiordzeniowym (dwie przewężki). Wszystkie siedem rdzeni pobudzane jest na wejściu poprzez element typu fan-in/fan-out. Na końcu układu moc odbierana jest ze wszystkich rdzeni również poprzez element typu fan-in/fan-out. Poprzez zmianę parametrów przewężenia, na wyjściu zbiera się na detektorze inne obrazy interferencyjne. Koncepcja dedykowana jest do pomiarów temperatury i naprężenia, a autorzy wskazują, że czułość krzyżowa może zostać wyeliminowana.

Innym przykładem konstrukcji czujnika ujawnionym w opisie US4653906 wykorzystującej światłowody wielordzeniowe jest urządzenie do pomiarów naprężeń. W rozwiązaniu światłowód dwurdzeniowy umieszczony jest nieruchomo w konstrukcji przenoszącej naprężenia. Naprężenia zmieniają wartość przesłuchu między rdzeniami, na podstawie czego wnioskuje się o naprężeniu oddziałującym na światłowód. W artykule A. Zhou *et al.*, "Asymmetrical Twin-Core Fiber Based Michelson Interferometer for Refractive Index Sensing," opublikowanym w *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 19, pp. 2985–2991, Oct.1, 2011 ujawniono układ pomiarowy z interferometrem Michelsona do pomiaru współczynnika załamania. W interferometrze zastosowano światłowód dwurdzeniowy zakończony pasywną warstwą odbijającą, w którym poprzez trawienie płaszcza z boku światłowodu odsłonięto jeden z rdzeni uzyskując głowicę pomiarową.

Przedstawione rozwiązania oparte na interferometrach wykonanych na światłowodach wielordzeniowych dedykowane są przede wszystkim pomiarom naprężenia i temperatury. Z wykorzystaniem konstrukcji interferometrów znanych w literaturze nie jest możliwy efektywny pomiar grubości optycznej warstw. Konstrukcje układów nie wprowadzają także sposobów aktywowania rdzeni.

Dlatego celem wynalazku było opracowanie interferometru falowodowego, w szczególności światłowodowego, który umożliwi pomiar grubości optycznej i/lub absorpcji cienkich warstw. Zastosowanie interferometrów falowodowych otwiera możliwości wykorzystania pomiarów interferometrycznych w badaniach, które wymagają znacznej miniaturyzacji – takie zastosowanie nie było dostępne dla interferometrów objętościowych. Efektywny pomiar z wykorzystaniem wynalazku jest możliwy dzięki procesowi aktywowania ramion, co jest jego istotą. Dodatkowo zaletą wynalazku jest zawarcie w jego koncepcji znanego z optyki objętościowej korzystnego efektu niezrównoważenia interferometru. Dodatkowo celem wynalazku było opracowanie konstrukcji interferometru także do pośrednich pomiarów innych wielkości fizycznych takich jak: temperatura, wydłużenie/rozciągnięcie, naprężenie, ciśnienie, stężenie gazów i innych. Zmiany tych parametrów będą w dalszej części opisu nazywane zmianami czynników w otoczeniu.

Interferometr do pomiaru parametrów fizycznych, w szczególności zmian grubości geometrycznej warstw i/lub współczynnika załamania światła w warstwach o zmiennej grubości optycznej według wynalazku, działa w konfiguracji odbiciowej i zawiera przyłączony do źródła światła sprzęgacz wykonany na falowodzie, w szczególności falowodzie włóknistym lub planarnym, co najmniej dwurdzeniowym, w którym czoło co najmniej jednego rdzenia jest uaktywnione, a co najmniej jeden rdzeń falowodu, w szczególności włóknistego, przyłączony jest bezpośrednio lub pośrednio do detektora sygnału znajdującego się po tej samej stronie światłowodu wielordzeniowego, co źródło światła.

Przez uaktywnienie co najmniej jednego z rdzeni rozumie się działanie wybrane korzystnie spośród:

- pokrycie co najmniej jedną substancją aktywną chemicznie, do której może przyłączać się inna substancja,
- pokrycie co najmniej jedną substancją aktywną chemicznie, która może się odłączać w wyniku oddziaływania środowiska,
- pokrycie co najmniej jedną substancją zmieniającą swoje parametry, w szczególności grubość i/lub współczynnik załamania i/lub absorpcję w wyniku oddziaływania środowiska,
- dołączenie dowolną znaną metodą odcinka dielektryka.

Przez uaktywnianie poprzez dołączenie dowolną znaną metodą do czoła co najmniej jednego rdzenia odcinka dielektryka rozumiany jest przypadek gdy interferometr wykorzystywany jest do pomiaru czynników zewnętrznych, w szczególności temperatury, wydłużenia/rozciągnięcia, naprężenia, ciśnienia, wpływających na ten dołączony odcinek dielektryka.

Przez pokrycie rdzenia co najmniej jedną substancją aktywną chemicznie rozumie się pokrycie tą substancją lub jej mieszaninami powierzchni czoła światłowodu, w obszarze w którym znajduje się dany rdzeń.

W ogólności substancja uaktywniająca zmienia swoją grubość optyczną i/lub absorpcję reagując z otoczeniem. W szczególności substancja aktywna jest sorbentem substancji chemicznych z otoczenia i/lub substancją pęczniejącą/kurczącą się pod wypływem czynników zewnętrznych i/lub substancją wiążącą substancje chemiczne z otoczenia.

W szczególności, każdy z rdzeni może być uaktywniany jednym z wymienionych sposobów, w szczególności każdy z rdzeni może być pokryty inną substancją. Taka korzystna konfiguracja umożliwia pomiar zmiany grubości optycznej warstw różnych substancji z wykorzystaniem jednego interferometru według wynalazku.

Sprzęgacz na falowodzie wielordzeniowym, w szczególności światłowodzie, wykonany jest dowolnym znanym sposobem, korzystnie poprzez przewężenie i/lub zasklepienie otworów, jeśli struktura falowodu posiada otwory. W szczególności sposobem analogicznym do znanego np. z opisu patentowego zgłoszenia wynalazku P.411430. Poprzez zasklepienie otworów bez przewężenia rozumie się takie działanie, w którym otwory zostają zasklepione bez przyłożonego dodatkowo naprężenia rozciągającego. Niemniej jednak, w przypadku zasklepienia otworów bez tego dodatkowego rozciągania, również występuje zmniejszenie wymiarów poprzecznych falowodu, w szczególności światłowodu (przewężenie), ponieważ szkło zapada się w miejsca otworów.

Poprzez falowód wielordzeniowy wykorzystywany w interferometrze według wynalazku rozumie się również co najmniej dwa światłowody co najmniej jednordzeniowe zestawione razem, w szczególności w kapilarze lub zamocowane na wspólnym podłożu.

Korzystnie, gdy wykorzystywany do konstrukcji interferometru falowód jest falowodem, w szczególności światłowodem, podtrzymującym polaryzację. Korzystnie, gdy współpracujące z falowodem elementy służące do konstrukcji układu pomiarowego są również elementami podtrzymującymi polaryzację.

Korzystnie, gdy oprócz uaktywnienia rdzenia, co najmniej jeden rdzeń falowodu ma inną długość niż pozostałe. W szczególności, do co najmniej jednego rdzenia falowodu, w szczególności światłowodu, wielordzeniowego dołączony jest dowolną znaną metodą odcinek dielektryka (w szczególności szkła, w szczególności falowodu). Dołączenie realizuje się korzystnie poprzez spawanie, klejenie lub butt-coupling. Dołączony odcinek dielektryka umożliwia efektywniejsze selektywne aktywowanie wybranego rdzenia falowodu. W tym korzystnym wariancie, poprzez niezrównoważenie interferometru, możliwe jest optymalizowanie czułości interferometru pod spodziewane zmiany parametrów optycznych substancji aktywujących. W szczególności, możliwe jest uaktywnienie tego ramienia interferometru, do którego dołączono odcinek dielektryka, poprzez pokrycie czoła dołączonego odcinka dielektryka substancją aktywną. W innym korzystnym przykładzie wykonania, jeden z rdzeni falowodu wielordzeniowego może mieć fabrycznie inną długość niż pozostałe lub długość zmienioną innym sposobem. Korzystnie, gdy wykorzystywanym źródłem światło jest źródło szerokospektralne, w szczególności może to być źródło typu supercontinuum, lampa halogenowa lub dioda superluminescencyjna. Podobne rezultaty można uzyskać stosując przestrajane lasery. Korzystnie, gdy detektor jest analizatorem widma lub spektrometr optyczny. Przy zastosowaniu przestrajanego lasera korzystnym do zastosowania detektorem jest fotodioda.

Korzystnie, gdy światło wprowadzane jest do rdzenia lub rdzeni falowodu, korzystnie światłowodu, wielordzeniowego pośrednio poprzez cyrkulator optyczny, sprzęgacz optyczny, albo urządzenie typu fan-in/fan-out.

W innym korzystnym wariancie wykonania sygnał ze źródła światła kieruje się światłowodem do pierwszego portu cyrkulatora. Port drugi cyrkulatora połączony jest z jednym z rdzeni światłowodu wielordzeniowego, w szczególności dwurdzeniowego a port trzeci z detektorem. Źródłem światła w tym korzystnym wariancie wykonania jest dioda superluminescencyjna lub źródło typu supercontinuum, a detektor ma korzystnie postać spektrometru. Światłowód jest połączony ze światłowodem wielordzeniowym zawierającym sprzęgacz wykonany dowolną znaną metodą, w szczególności poprzez przewężanie i/lub zasklepianie otworów, jeśli wykorzystywany światłowód ma otwory. Jeden

z rdzeni światłowodu wielordzeniowego jest na wyjściu uaktywniony poprzez dołączenie dowolną znaną metodą odcinka dielektryka, w tym przypadku włókna światłowodowego, w szczególności poprzez spawanie, klejenie lub butt-coupling. Uaktywniony rdzeń powoduje również korzystne zróżnicowanie dróg optycznych ramion interferometru.

Sygnał wychodzący z portu drugiego cyrkulatora jest kierowany poprzez światłowód jednordzeniowy do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego zawierającego sprzęgacz. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza, który powoduje rozdzielenie sygnału korzystnie na oba rdzenie światłowodu. Sygnał w jednym z rdzeni odbija się od końca dołączonego światłowodu, a sygnał z drugiego rdzenia odbija się od warstwy dołączonej do jego wyjścia. Światło odbite wraca poprzez światłowód dwurdzeniowy i wykonany na nim sprzęgacz i poprzez cyrkulator do detektora. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od wydłużenia, naprężenia, zmiany temperatury i innych oddziaływań.

W innym korzystnym wariancie wykonania sygnał ze źródła światła kieruje się światłowodem na port pierwszy cyrkulatora. Port drugi cyrkulatora połączony jest z jednym z rdzeni światłowodu wielordzeniowego, w szczególności dwurdzeniowego o korzystnie homogenicznych rdzeniach. Sygnał odbity wraca światłowodem do portu drugiego cyrkulatora i z portu trzeciego cyrkulatora poprzez światłowód kierowany jest do detektora. Źródłem światła w tym korzystnym wariancie wykonania jest dioda superluminescencyjna lub źródło typu supercontinuum, a detektor korzystnie zawiera spektrometr. Światłowód jest połączony ze światłowodem wielordzeniowym zawierającym sprzęgacz wykonany dowolną znaną metodą, w szczególności poprzez przewężanie i/lub zasklepianie otworów, jeśli wykorzystywany światłowód ma otwory. Jeden z rdzeni światłowodu wielordzeniowego jest na wyjściu uaktywniony poprzez nałożenie warstwy. Do drugiego z rdzeni dołączony jest dowolną znaną metodą odcinek dielektryka, w tym przypadku włókna światłowodowego, w szczególności poprzez spawanie, klejenie lub butt-coupling. Dołączony odcinek osłania rdzeń, do którego nie jest przyłączana substancja oraz powoduje korzystne zróżnicowanie dróg optycznych ramion interferometru.

Sygnał wychodzący z portu drugiego cyrkulatora jest kierowany poprzez światłowód jednordzeniowy do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego zawierającego sprzęgacz. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza, który powoduje rozdzielenie sygnału korzystnie na oba rdzenie światłowodu. Sygnał w jednym z rdzeni odbija się od końca dołączonego światłowodu, a sygnał z drugiego rdzenia odbija się od warstwy na jego wyjściu. Światło odbite wraca poprzez światłowód dwurdzeniowy i wykonany na nim sprzęgacz poprzez cyrkulator do detektora. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależą od zmiany parametrów dołączonego włókna optycznego, które mogą być wynikiem wydłużenia, naprężenia, zmiany temperatury i innych oddziaływań.

W innym korzystnym wariancie wykonania sygnał ze źródła światła kieruje się światłowodem na port pierwszy cyrkulatora. Port drugi cyrkulatora połączony jest z jednym z rdzeni światłowodu wielordzeniowego, w szczególności dwurdzeniowego o korzystnie homogenicznych rdzeniach. Sygnał odbity wraca światłowodem do portu drugiego cyrkulatora i z portu trzeciego cyrkulatora poprzez światłowód kierowany jest do detektora. Źródłem światła w tym korzystnym wariancie wykonania jest dioda superluminescencyjna lub źródło typu supercontinuum, a detektor korzystnie zawiera spektrometr. Światłowód jest połączony ze światłowodem wielordzeniowym zawierającym sprzęgacz wykonany dowolną znaną metodą, w szczególności poprzez przewężanie i/lub zasklepianie otworów, jeśli wykorzystywany światłowód ma otwory. Jeden z rdzeni światłowodu wielordzeniowego jest na wyjściu uaktywniony poprzez nałożenie warstwy. Do drugiego z rdzeni dołączony jest dowolną znaną metodą odcinek dielektryka, w tym przypadku włókna światłowodowego, w szczególności poprzez spawanie, klejenie lub butt-coupling. Dołączony odcinek osłania rdzeń, do którego nie jest przyłączana substancja oraz powoduje korzystne zróżnicowanie dróg optycznych ramion interferometru.

Sygnał wychodzący z portu drugiego cyrkulatora jest kierowany poprzez światłowód jednordzeniowy do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego zawierającego sprzęgacz. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza, który powoduje rozdzielenie sygnału korzystnie na oba rdzenie światłowodu. Sygnał w jednym z rdzeni odbija się od końca dołączonego światłowodu, a sygnał z drugiego rdzenia odbija się od warstwy na jego wyjściu. Światło odbite wraca poprzez światłowód dwurdzeniowy i wykonany na nim sprzęgacz poprzez cyrkulator do detektora. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie

spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależą od zmiany parametrów dołączonego włókna optycznego, które mogą być wynikiem wydłużenia, naprężenia, zmiany temperatury i innych oddziaływań.

W innym korzystnym wariancie wykonania sygnał ze źródła kierowany jest do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego, korzystnie trzyrdzeniowego. Źródło światła w tym korzystnym wariancie wykonania stanowi źródło typu supercontinuum lub dwie połączone diody superluminescencyjne, doprowadzające światło poprzez jednordzeniowy światłowód doprowadzający, korzystnie do środkowego rdzenia światłowodu wielordzeniowego, korzystnie trzyrdzeniowego. Do pozostałych rdzeni światłowodu dołączone są detektory poprzez światłowody doprowadzające. Na włóknie wielordzeniowym wykonany jest sprzęgacz, a dwa z rdzeni na wyjściu są uaktywnione poprzez nałożenie początkowych grubości warstw. Do trzeciego z rdzeni w celu zróżnicowania dróg optycznych ramion interferometru dołączony jest dowolną znaną metodą odcinek dielektryka, korzystnie pręcika szklanego, w szczególności poprzez spawanie, klejenie lub butt-coupling. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza, który powoduje rozdzielenie sygnału na rdzenie światłowodu.

Sprzęgacz wykonany jest dowolną znaną metodą, w szczególności poprzez przewężanie i/lub zasklepianie otworów, jeśli wykorzystywany światłowód ma otwory. Rdzenie światłowodu mają tak dobrane średnice, że dzięki wykonanemu sprzęgaczowi, dla długości światła $\lambda 1$, światło propaguje się w rdzeniu centralnym i jednym z rdzeni zewnętrznych, a dla długości światła $\lambda 2$, światło propaguje się w rdzeniu centralnym i drugim z rdzeni zewnętrznych.

Po przejściu światła przez sprzęgacz propaguje się ono dalej poszczególnymi rdzeniami i odbijając się od warstw mierzonych i dołączonego światłowodu, wraca tą samą drogą przez światłowód wielordzeniowy do detektorów. Na detektorach widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstw.

W innym korzystnym wariancie wykonania sygnał ze źródła kierowany jest do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego, korzystnie siedmiordzeniowego. Na włóknie wielordzeniowym wykonany jest sprzęgacz. Źródło światła w tym korzystnym wariancie wykonania stanowi źródło typu supercontinuum lub połączone diody superluminescencyjne, doprowadzające światło poprzez jednordzeniowy światłowód doprowadzający, korzystnie do środkowego rdzenia światłowodu wielordzeniowego, korzystnie siedmiordzeniowego. Do pozostałych rdzeni światłowodu dołączone są detektory poprzez światłowody doprowadzające. Detektory mogą być przyłączone do każdego ze światłowodów lub jeden detektor może być przełączany między światłowodami, np. ręcznie lub z wykorzystaniem przełącznika optycznego. Do jednego z rdzeni, w celu zróżnicowania dróg optycznych ramion interferometru, korzystnie środkowego rdzenia dołączony jest dowolną znaną metodą odcinek pręcika szklanego, w szczególności poprzez spawanie, klejenie lub butt-coupling. Pozostałe rdzenie są na wyjściu uaktywnione poprzez nałożenie początkowych grubości warstwy. W innym korzystnym wariancie wynalazku na każdy z rdzeni może być nałożona inna substancja. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza, który powoduje rozdzielenie sygnału na rdzenie światłowodu.

Sprzęgacz wykonany jest dowolną znaną metodą, w szczególności poprzez przewężanie i/lub zasklepianie otworów, jeśli wykorzystywany światłowód ma otwory. Rdzenie światłowodu mają tak dobrane średnice, że dzięki wykonanemu sprzęgaczowi, poszczególne długości fali propagują się w rdzeniu centralnym oraz poszczególnych rdzeniach zewnętrznych.

Po przejściu światła przez sprzęgacz propaguje się ono dalej poszczególnymi rdzeniami i odbijając się od warstw mierzonych i dołączonego pręcika szklanego, wraca tą samą drogą przez światłowód wielordzeniowy do detektorów. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstwy. W takim przypadku zmiana grubości optycznej warstwy mierzonej zmienia położenie prążków interferencyjnych.

W innym korzystnym wariancie wykonania sygnał ze źródła światła kieruje się światłowodem do portu pierwszego cyrkulatora. Port drugi cyrkulatora poprzez światłowody przyłącza się do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego, korzystnie dwurdzeniowego. Źródło światła w tym korzystnym wariancie wykonania stanowi źródło typu supercontinuum lub dioda superluminescencyjna. Światłowód jest połączony ze światłowodem wielordzeniowym zawierającym sprzęgacz wykonany dowolną znaną metodą, w szczególności poprzez przewężanie i/lub zasklepianie otworów, jeśli wykorzystywa-

ny światłowód ma otwory. Jeden z rdzeni światłowodu wielordzeniowego jest na wyjściu uaktywniony poprzez nałożenie warstwy. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza, który powoduje rozdzielenie sygnału na rdzenie światłowodu.

Sygnał wychodzący z portu drugiego cyrkulatora jest kierowany poprzez światłowód jednordzeniowy do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego zawierającego sprzęgacz. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza, który powoduje rozdzielenie sygnału korzystnie na oba rdzenie światłowodu. Sygnał w jednym z rdzeni odbija się od końca światłowodu, a sygnał z drugiego rdzenia odbija się od warstwy na jego wyjściu. Światło odbite wraca poprzez światłowód dwurdzeniowy i wykonany na nim sprzęgacz i poprzez cyrkulator i światłowód kierowany jest do detektora. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstwy. W takim przypadku zmiana grubości optycznej warstwy mierzonej zmienia położenie prążków interferencyjnych.

W innym korzystnym wariancie wykonania wynalazku wykorzystuje się technologię falowodów planarnych, bazującą na dzielnikach PLC (ang. *Planar Lightwave Circuit splitter*). W tym korzystnym wariancie wykorzystuje się korzystnie dzielnik o równym podziale mocy na wykorzystywanej długości fali i korzystnej konfiguracji 2×2. Jako źródło fali wykorzystuje się źródło szerokospektralne. Jedno z wyjść dzielnika jest uaktywnione poprzez nałożenie początkowych grubości warstwy. Drugie z wyjść dzielnika jest korzystnie fabrycznie przedłużone lub skrócone i korzystnie schowane wewnątrz obudowy dzielnika zapewniając niezrównoważenie interferometru i stabilność pracy.

Sygnał ze źródła światła jest kierowany poprzez światłowód doprowadzający do portu wejściowego dzielnika. Do drugiego portu wejściowego dołącza się detektor poprzez światłowód doprowadzający. Detektor stanowi korzystnie optyczny analizator widma. Sygnał ze źródła światła jest dzielony na dzielniku PLC i odbija się odpowiednio od warstwy oraz wyjścia przedłużonego ramienia schowanego w obudowie. Światło odbijając się od wyjścia oraz warstwy wraca tą samą drogą przez dzielnik. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstwy. W takim przypadku zmiana grubości optycznej warstwy mierzonej zmienia położenie prążków interferencyjnych.

Wynalazek może być wykorzystywany w szczególności jako czujnik do pomiaru parametrów fizycznych, w szczególności grubości optycznej i/lub absorpcji warstw co pozwala w szczególności na pomiar ich przyrostu.

Przedmiot wynalazku może być wykorzystany do bezpośredniego pomiaru grubości optycznej i/lub absorpcji warstw lub pośrednio – do pomiaru innych wielkości fizycznych, które na te warstwy mają wpływ (temperatura, wilgotność, stężenie gazu i inne). Z wykorzystaniem wynalazku możliwy jest pomiar innych parametrów jak np. naprężenie/wydłużenie, ciśnienie czy temperatura. Zaletą wynalazku jest możliwość badania nanometrowych zmian grubości optycznych warstw. Dodatkową zaletą wynalazku jest możliwość zwiększenia czułości interferometru, poprzez niezrównoważenie jego ramion.

Przedstawione poniżej przykłady wykonania wynalazku nie ograniczają jego możliwych wariantów wynikających z opisanej istoty wynalazku. W szczególności mierzona zmiana grubości optycznej i/lub absorpcji warstwy mierzonej może być spowodowana oddziaływaniem różnych czynników zewnętrznych (temperatura, wydłużenie, ciśnienie, kurczenie, pęcznienie, wilgotność, stężenie gazów itd.). Sposób wywołania zmiany grubości optycznej (grubości, współczynnika załamania) i/lub absorpcji warstwy nie ma wpływu na fizyczną zasadę działania wynalazku, która jest we wszystkich przypadkach taka sama.

Wynalazek przedstawiono w przykładach wykonania na rysunku, na którym:

Fig. 1 przedstawia korzystny wariant wynalazku z przykładu 1, na którym widoczne jest: źródło światła 1, detektor 2, cyrkulator światłowodowy 3, doprowadzające światłowody jednordzeniowe 4, światłowód wielordzeniowy 6, sprzęgacz 7 wykonany na światłowodzie wielordzeniowym 6, odcinek jednordzeniowego światłowodu 8 o długości d dołączony do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego 6.

Fig. 2 przedstawia zbliżenie na korzystny wariant wykonania sprzęgacza 7 poprzez przewężenie światłowodu wielordzeniowego, w którym światłowód 6 o początkowej średnicy d1 zostaje przewężony do średnicy d2, przy czym przewężenie właściwe ma długość c a strefy przejściowe przewężenia – opadająca i wznosząca mają długość odpowiednio b1 i b2. Długość

światłowodu poza przewężeniem jest równa odpowiednio a1 i a2, odpowiednio od strony doprowadzenia światła i od strony, w której następuje odbicie sygnału.

Fig. 3 przedstawia przekrój światłowodu 6 możliwy do zastosowania w przykładzie 1, w którym elementy mikrostruktury – rdzenie 9.1, 9.2 oraz otwory 10 znajdują się w jednej linii w odstępach Λ w płaszczu 11.

Fig. 4 przedstawia korzystny wariant wynalazku z przykładu 2 i 6, na którym widoczne jest: źródło światła 1, detektor 2, cyrkulator światłowodowy 3, doprowadzające światłowody jednordzeniowe 4, nałożoną na jeden z rdzeni warstwę uaktywniającą 5, światłowód wielordzeniowy 6, sprzęgacz 7 wykonany na światłowodzie wielordzeniowym 6, odcinek jednordzeniowego światłowodu 8 o długości d dołączony do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego 6.

Fig. 5 przedstawia przekrój światłowodu 6 możliwy do zastosowania w przykładzie 2, w którym elementy mikrostruktury – rdzenie 9.1 i 9.2 oraz otwory 10 znajdują się w węzłach siatki heksagonalnej o stałej sieci Λ w płaszczu 11.

Fig. 6 przedstawia korzystny wariant wynalazku z przykładu 3, na którym widoczne jest: źródło światła 1, dwa detektory 2, doprowadzające światłowody jednordzeniowe 4, nałożone na dwa z rdzeni warstwy uaktywniające 5.1 i 5.2, światłowód wielordzeniowy 6, sprzęgacz 7 wykonany na światłowodzie wielordzeniowym 6, odcinek jednordzeniowego światłowodu 8 o długości d dołączony do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego 6.

Fig. 7 przedstawia przekrój światłowodu 6 możliwy do zastosowania w przykładzie 3, w którym elementy mikrostruktury – rdzenie 9.1, 9.2 i 9.3 oraz otwory 10 znajdują się w jednej linii w odstępach Λ w płaszczu 11.

Fig. 8 przedstawia korzystny wariant wynalazku z przykładu 4, na którym widoczne jest: źródło światła 1, detektory 2, doprowadzające światłowody jednordzeniowe 4 połączone ze światłowodem wielordzeniowym 6 poprzez element typu fan-in/fan-out 12, nałożoną na dwa z rdzeni warstwę uaktywniającą 5, światłowód wielordzeniowy 6, sprzęgacz 7 wykonany na światłowodzie wielordzeniowym 6, odcinek jednordzeniowego światłowodu 8 o długości d dołączony do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego 6.

Fig. 9 przedstawia przekrój światłowodu 6 możliwy do zastosowania w przykładzie 4, w którym elementy mikrostruktury – rdzenie 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6, 9.7 oraz otwory 10 znajdują się w węzłach siatki heksagonalnej o stałej sieci Λ w płaszczu 11.

Fig. 10 przedstawia korzystny wariant wynalazku z przykładu 5, na którym widoczne jest: źródło światła 1, detektor 2, cyrkulator światłowodowy podtrzymujący polaryzację 3, doprowadzające światłowody jednordzeniowe podtrzymujące polaryzację 4, nałożoną na jeden z rdzeni warstwę uaktywniającą 5, światłowód wielordzeniowy 6, sprzęgacz 7 wykonany na światłowodzie wielordzeniowym 6.

Fig. 11 przedstawia przekrój światłowodu 6 możliwy do zastosowania w przykładzie 5, w którym elementy mikrostruktury - rdzenie 9.1, 9.2 oraz otwór 10 znajdują się w jednej linii w odstępach Λ w płaszczu 11.

Fig. 12 przedstawia przekrój światłowodu 6 możliwy do zastosowania w przykładzie 6, w którym rdzenie 9.1, 9.2 znajdują się w jednej linii w odstępach Λ w płaszczu 11.

Fig. 13 przedstawia korzystny wariant wynalazku z przykładu 7, na którym widoczne jest: źródło światła 1, detektor 2, dzielnik PLC 13 o dwóch ramionach wyjściowych 13.1 i 13.2, który znajduje się w obudowie 14 oraz nałożoną na koniec jednego z ramion warstwę uaktywniającą 5.

Przykład 1

Źródło 1 przyłączone jest poprzez światłowód 4 do portu pierwszego C1 cyrkulatora 3, a do portu drugiego C2 przyłączone są światłowody 4 przyłączone do światłowodu dwurdzeniowego 6 z wykonanym na nim sprzęgaczem 7, a czoło jednego z rdzeni światłowodu dwurdzeniowego 6 jest uaktywnione poprzez dospawanie odcinka włókna światłowodowego 8. Do portu trzeciego C.3 cyrkulatora 3 przyłączony jest światłowodem 4 detektor.

Sygnał ze źródła 1 kieruje się światłowodem 4 na port pierwszy C.1 cyrkulatora 3. Port drugi C.2 cyrkulatora 3 poprzez światłowody 4 wyprowadza się do jednego z rdzeni światłowodu dwurdzeniowego 6 a port trzeci C.3 do detektora 2. Źródło światła 1 stanowi dioda superluminescencyjna, a rolę detektora pełni spektrometr. Jeden z rdzeni światłowodu wielordzeniowego 6 jest na wyjściu uaktywniony poprzez dołączenie dowolną znaną metodą odcinka włókna światłowodowego 8, w szczególności poprzez spawanie. Uaktywniony rdzeń powoduje również korzystne zróżnicowanie dróg optycznych ramion interferometru.

Światłowód posiada:

- dwa rdzenie 9.1 i 9.2 z SiO_2 domieszkowanego GeO_2 o średnicach 8,2 μm, domieszkowane 3,5% mol GeO_2,
- płaszcz 11 o średnicy d1 = 125 μm wykonany z niedomieszkowanej krzemionki SiO_2,
- siedem otworów powietrznych pomiędzy rdzeniami o średnicach 7,2 μm.

Rdzenie i otwory znajdują się na jednej linii, a ich środki znajdują się w odległości Λ = 9 μm od siebie.

Długość dospawanego odcinka światłowodu 8 wynosi 1 mm.

Sprzęgacz 7 wykonany jest jako przewężenie z zasklepieniem otworów. Parametry przewężenia: b1 = 7 mm, c = 10 mm, b2 = 8 mm. Światłowód przewężony jest w takim stopniu, że d2 = 0,3·d1.

Sygnał wychodzący z portu drugiego C.2 cyrkulatora 3 jest kierowany poprzez światłowód jednordzeniowy 4 do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego 6 zawierającego sprzęgacz 7. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym 6 propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza 7, który powoduje rozdzielenie sygnału na oba rdzenie światłowodu 6. Sygnał w jednym z rdzeni odbija się od końca dołączonego światłowodu 8, a sygnał z drugiego rdzenia odbija się od końca światłowodu dwurdzeniowego. Światło odbite wraca poprzez światłowód dwurdzeniowy 6 i wykonany na nim sprzęgacz 7 i poprzez cyrkulator 3 do detektora 2. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany parametrów światłowodu 8. W tym przypadku mierzona zmiana położenia prążków interferencyjnych wynosi ok. 5 nm dla wydłużenia odcinka 8 o ok. 1 με.

Przykład 2

Źródło 1 przyłączone jest poprzez światłowód 4 do portu C.1 cyrkulatora 3, a do portu C.2 przyłączony jest światłowód 4 przyłączony do światłowodu dwurdzeniowego 6 z wykonanym na nim sprzęgaczem 7, a czoło jednego z rdzeni światłowodu dwurdzeniowego 6 jest uaktywnione poprzez pokrycie go warstwą 5, a do drugiego z rdzeni światłowodu dwurdzeniowego 6 dospawany jest odcinek włókna światłowodowego 8. Do portu C.3 cyrkulatora 3 przyłączony jest światłowodem 4 detektor.

Sygnał ze źródła światła 1 – diody superelektroluminescencyjnej kieruje się światłowodem jednordzeniowym 4 na cyrkulator 3. Port drugi C.2 cyrkulatora 3 poprzez światłowody jednordzeniowe 4 przyłączony jest do jednego z rdzeni światłowodu dwurdzeniowego 6, o homogenicznych rdzeniach 9.1 i 9.2. Port trzeci C.3 cyrkulatora 3 prowadzi do detektora 2 – analizatora widma w postaci spektrometru. Światłowód 4 jest połączony ze światłowodem dwurdzeniowym 6 zawierającym sprzęgacz 7 wykonany poprzez zasklepieniem otworów bez dodatkowego przewężania. Jeden z rdzeni światłowodu wielordzeniowego 6 jest na wyjściu uaktywniony poprzez nałożenie warstwy 5. Do drugiego 9.1 z rdzeni falowodu wielordzeniowego 6 dołączony jest poprzez spawanie odcinek włókna jednordzeniowego 8.

Światłowód posiada:

- dwa domieszkowane rdzenie 9.1 i 9.2 z SiO_2 domieszkowanego 3,5% mol GeO_2, średnicach 8,2 μm; odległość między rdzeniami wynosi 126 μm,
- płaszcz 11 o średnicy d1 = 250 μm wykonany z niedomieszkowanej krzemionki SiO_2,
- otwory powietrzne 10, które umieszczone są wraz z rdzeniami w węzłach siatki heksagonalnej o stałej sieci Λ = 18 μm, przy czym stosunek d/Λ = 0,8, tzn. średnice otworów mają wymiar 0,8·Λ.

Sprzęgacz 7 wykonany jest jako zasklepienie otworów na długości 3 mm (zasklepienie otworów bez dodatkowego przewężania). Odcinek włókna jednordzeniowego 8 przyspawanego do włókna dwurdzeniowego charakteryzuje się takim samym domieszkowaniem i wymiarem rdzenia jak rdzenie 9.1 i 9.2 i ma długość 50 μm.

Substancją 5 przyłączaną do rdzenia 9.2 jest perfluorowany polimer o współczynniku załamania równym ok. 1,33. Substancję 5 można umieścić na rdzeniu 9.2 poprzez zanurzenie światłowodu w roztworze polimeru. W wyniku wystawienia na działanie czynników chłodniczych, będących związkami węgla z chlorem i fluorem takich, jak 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroetan odnotowuje się pęcznienie warstwy. W tej konfiguracji daje to zmianę grubości substancji o ok. 10 nm, co odpowiada przesunięciu prążków o ok. 2 nm.

Sygnał wchodzący do cyrkulatora 3 poprzez port pierwszy C.1 jest kierowany poprzez port drugi C.2 i światłowód jednordzeniowy 4 do światłowodu dwurdzeniowego 6 zawierającego sprzęgacz 7. Sygnał w światłowodzie dwurdzeniowym 6 propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza 7, który powoduje rozdzielenie sygnału na rdzenie światłowodu. Sygnał w jednym z rdzeni

odbija się od końca dołączonego światłowodu 8, a sygnał z drugiego rdzenia odbija się od warstwy 5 na jego końcu. Światło odbite wraca poprzez światłowód dwurdzeniowy 6 i wykonany na nim sprzęgacz 7 i poprzez cyrkulator 3 do detektora 2. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej długości fali, których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstwy 5.

Przykład 3

Źródło 1 przyłączone jest poprzez światłowód 4 do wejścia jednego z rdzeni światłowodu trzyrdzeniowego 6, na jakim wykonany jest sprzęgacz 7, za sprzęgaczem do czoła jednego rdzenia przyspawany jest pręt szklany 8, a pozostałe czoła rdzeni światłowodu trzyrdzeniowego 6 są uaktywnione poprzez nałożenie warstw 5.1 i 5.2, a rdzenie światłowodu trzyrdzeniowego 6 po stronie źródła przyłączone są do detektorów 2 światłowodami 4.

Sygnał ze źródła 1 kierowany jest do jednego z rdzeni światłowodu trzyrdzeniowego 6. Źródło światła 1 stanowi źródło typu supercontinuum, doprowadzające światło poprzez jednordzeniowy światłowód doprowadzający 4, do środkowego rdzenia światłowodu trzyrdzeniowego. Do pozostałych rdzeni światłowodu 6 dołączone są detektory poprzez światłowody doprowadzające 4. Na włóknie trzyrdzeniowym 6 wykonany jest sprzęgacz 7, a dwa z rdzeni są na wyjściu uaktywnione poprzez nałożenie początkowej grubości warstw 5.1 i 5.2. Do trzeciego z rdzeni 9.1 dołączony jest poprzez spawanie odcinek pręcika szklanego 8. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym 6 propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza 7, który powoduje rozdzielenie sygnału na trzy rdzenie światłowodu.

Sprzęgacz 7 wykonany jest poprzez zasklepianie otworów światłowodu 6 bez dodatkowego przewężenia.

Światłowód posiada:

- trzy rdzenie 9.1, 9.2 i 9.3 z SiO_2 domieszkowanego GeO_2: centralny rdzeń 9.1 o średnicy 8,2 μm, domieszkowany 3,5% mol GeO_2, boczny rdzeń 9.2 o średnicy 6,1 μm, domieszkowany 4,5% mol GeO_2, boczny rdzeń 9.3 o średnicy 6,24 μm, domieszkowany 4,5% mol GeO_2,
- płaszcz 11 o średnicy d1 = 125 μm wykonany z niedomieszkowanej krzemionki SiO_2,
- dwa otwory powietrzne pomiędzy rdzeniami o średnicach 10 μm.

Rdzenie 9 i otwory 10 znajdują się na jednej linii, a ich środki znajdują się w odległości Λ = 20 μm od siebie.

Sprzęgacz 7 wykonany jest jako zasklepienie otworów na długości 5 mm (zasklepienie otworów bez dodatkowego przewężania). Rdzenie światłowodu mają tak dobrane średnice, że dzięki wykonanemu sprzęgaczowi, dla długości fali światła 1,57 μm, światło propaguje się w rdzeniu centralnym 9.1 i jednym z rdzeni zewnętrznych 9.3, a dla długości fali światła 1,45 μm, światło propaguje się w rdzeniu centralnym 9.1 i drugim z rdzeni zewnętrznych 9.2. Odcinek pręcika szklanego 8 przyspawanego do włókna trzyrdzeniowego 6 ma długość 80 μm i jest wykonany z krzemionki.

Substancją 5.1 przyłączaną do rdzenia 9.2 jest tlenek itru o niewielkiej porowatości o współczynniku załamania równym ok. 1,8. Substancję 5.1 otrzymać można z wykorzystaniem impulsów lasera o wysokiej mocy skierowanego na tlenek itru tak, by jego pary mogły osadzać się na światłowodzie. Tak dobrana warstwa może służyć jako czujnik alarmowy zalania kwasem solnym. W przypadku wystawienia na działanie kwasu solnego, grubość warstwy zmienia się o ok. 50 nm, co spowoduje przesunięcie prążków o ok. 5 nm.

Jednocześnie do rdzenia 9.3 przyłączona jest substancja 5.2, którą w tym wypadku jest perfluorowany polimer o współczynniku załamania równym ok. 1,33. Substancję 5.2 można umieścić na rdzeniu 9.3 poprzez zanurzenie światłowodu w roztworze polimeru. W wyniku wystawienia na działanie czynników chłodniczych, będących związkami węgla z chlorem i fluorem takich, jak 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroetan odnotowuje się pęcznienie warstwy. W tej konfiguracji daje to zmianę grubości substancji o ok. 10 nm, co odpowiada przesunięciu prążków o ok. 2 nm. Po przejściu światła przez sprzęgacz 7 propaguje się ono dalej poszczególnymi rdzeniami i odbijając się od warstw mierzonych 5.1 i 5.2 i dołączonego światłowodu 8, wraca tą samą drogą przez światłowód wielordzeniowy 6 do detektorów 2.

Na detektorach widoczne są odpowiednie prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej długości fali, których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstw 5.1 i 5.2.

Przykład 4

Źródło 1 przyłączone jest poprzez światłowód 4 do wejścia jednego z rdzeni światłowodu siedmiordzeniowego 6 poprzez element typu fan-in/fan-out 12, a na światłowodzie siedmiordzeniowym

wykonany jest sprzęgacz 7, za którym do czoła rdzenia 9.1 środkowego przyspawany jest pręt szklany 8, a czoła zewnętrznych rdzeni światłowodu siedmiordzeniowego 6 są uaktywnione poprzez nałożenie warstw 5, a rdzenie światłowodu siedmiordzeniowego 6 po stronie źródła przyłączone są do detektorów 2 światłowodami 4 przechodząc uprzednio przez element typu fan-in/fan-out 12.

Sygnał ze źródła 1 kierowany jest do jednego z rdzeni światłowodu siedmiordzeniowego 6. Źródło światła 1 w tym przykładzie wykonania stanowi źródło typu supercontinuum, doprowadzające światło do środkowego rdzenia światłowodu wielordzeniowego 6 poprzez jednordzeniowy światłowód doprowadzający 4. Do pozostałych rdzeni światłowodu 6 dołącza się detektory 2 poprzez światłowody doprowadzające 4. Detektory 2 mogą być przyłączone do każdego ze światłowodów lub przełączany między światłowodami może być jeden detektor, np. ręcznie lub z wykorzystaniem przełącznika optycznego. Na włóknie siedmiordzeniowym 6 wykonany jest sprzęgacz 7, a zewnętrzne rdzenie na wyjściu są uaktywnione poprzez nałożenie początkowej grubości warstwy 5. Do środkowego z rdzeni 9.1 dołączony jest poprzez spawanie odcinek pręcika szklanego 8. Sygnał w światłowodzie siedmiordzeniowym 6 propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza, który powoduje rozdzielenie sygnału na rdzenie światłowodu.

Sprzęgacz 7 wykonany jest poprzez zasklepianie otworów światłowodu 6 bez dodatkowego przewężania. Rdzenie światłowodu mają tak dobrane średnice, że dzięki wykonanemu sprzęgaczowi, poszczególne długości światła propagują się w rdzeniu centralnym oraz poszczególnych rdzeniach zewnętrznych.

Światłowód posiada:

- siedem rdzeni 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6 i 9.7 z SiO_2 domieszkowanego GeO_2:
- centralny rdzeń 9.1 o średnicy 8,2 μm, domieszkowany 3,5% mol GeO_2,
- zewnętrzny rdzeń 9.2 o średnicy 6,24 μm, domieszkowany 4,5% mol GeO_2,
- zewnętrzny rdzeń 9.3 o średnicy 6,1 μm, domieszkowany 4,5% mol GeO_2,
- zewnętrzny rdzeń 9.4 o średnicy 5,96 μm, domieszkowany 4,5% mol GeO_2,
- zewnętrzny rdzeń 9.5 o średnicy 5,82 μm, domieszkowany 4,5% mol GeO_2,
- zewnętrzny rdzeń 9.6 o średnicy 5,68 μm, domieszkowany 4,5% mol GeO_2,
- zewnętrzny rdzeń 9.7 o średnicy 5,54 μm, domieszkowany 4,5% mol GeO_2,
- płaszcz 11 o średnicy d1 = 300 μm wykonany z niedomieszkowanej krzemionki SiO_2,
- otwory powietrzne pomiędzy rdzeniami o średnicach 10 μm.

Środki rdzeni i otworów znajdują się w węzłach siatki heksagonalnej o stałej sieci Λ = 20 μm.

Sprzęgacz 7 wykonany jest jako zasklepienie otworów na długości 10 mm (zasklepienie otworów bez dodatkowego przewężania). Rdzenie światłowodu mają tak dobrane średnice, że dzięki wykonanemu sprzęgaczowi:

- długości fali w okolicy 1,57 μm, propagują się w parze rdzeni 9.1 i 9.2,
- długości fali w okolicy 1,45 μm, propagują się w parze rdzeni 9.1 i 9.3,
- długości fali w okolicy 1,35 μm, propagują się w parze rdzeni 9.1 i 9.4,
- długości fali w okolicy 1,25 μm, propagują się w parze rdzeni 9.1 i 9.5,
- długości fali w okolicy 1,15 μm, propagują się w parze rdzeni 9.1 i 9.6,
- długości fali w okolicy 1,05 μm, propagują się w parze rdzeni 9.1 i 9.7.

Odcinek pręcika szklanego 8 ma długość 100 μm i jest wykonany z krzemionki.

Przyłączaną substancją 5 jest zhydrolizowany kolagen o współczynniku załamania równym 1. Przyłączanie substancji 5 odbywa się poprzez zanurzenie światłowodu w 1% wodnym roztworze zhydrolizowanego kolagenu i wysuszenie. W tej konfiguracji możliwy jest pomiar wilgotności, w związku z pęcznieniem kolagenu pod wpływem zimnej wody i wilgoci z powietrza. Po zanurzeniu w wodzie o temperaturze 20°C kolagen pęcznieje, w wyniku czego zmienia się jego grubość ze 100 nm do 200 nm oraz następuje przesunięcie prążków o ok. 2 nm. Po przejściu światła przez sprzęgacz 7 propaguje się ono dalej poszczególnymi rdzeniami i odbijając się od warstw mierzonych 5 i dołączonego światłowodu 8, wraca tą samą drogą przez światłowód wielordzeniowy 6 do detektorów 2. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej długości fali, których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstwy 5. W takim przypadku zmiana grubości warstw mierzonych 5 zmienia położenie prążków interferencyjnych.

Przykład 5

Źródło 1 przyłączone jest poprzez światłowód podtrzymujący polaryzację 4 do portu pierwszego C.1 cyrkulatora podtrzymującego polaryzację 3, a do portu drugiego C.2 przyłączone są świa-

tłowody podtrzymujące polaryzację 4 przyłączone do światłowodu dwurdzeniowego 6 z wykonanym na nim sprzęgaczem 7, a czoło jednego z rdzeni światłowodu dwurdzeniowego 6 jest uaktywnione poprzez pokrycie go warstwą 5. Do portu trzeciego C.3 cyrkulatora 3 przyłączony jest światłowodem 4 detektor.

Sygnał ze źródła światła 1 kieruje się światłowodem 4 na port pierwszy C.1 cyrkulatora 3. Cyrkulator 3 jest cyrkulatorem podtrzymującym polaryzację. Port drugi C.2 cyrkulatora 3 poprzez światłowody podtrzymujące polaryzację 4 wyprowadza się do jednego z rdzeni światłowodu dwurdzeniowego 6. Źródło światła 1 stanowi dioda superluminescencyjna.

Sygnał wychodzący z portu drugiego C.2 cyrkulatora 3 jest kierowany poprzez światłowód jednordzeniowy podtrzymujący polaryzację 4 do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego 6 zawierającego sprzęgacz 7. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym 6 propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza 7, który powoduje rozdzielenie sygnału na oba rdzenie światłowodu 6. Sygnał w jednym z rdzeni odbija się od końca światłowodu 6, a sygnał z drugiego rdzenia odbija się od warstwy 5 na jego wyjściu. Światło odbite wraca poprzez światłowód dwurdzeniowy 6 i wykonany na nim sprzęgacz 7 i poprzez cyrkulator podtrzymujący polaryzację 3 do detektora 2. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej długości fali, których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstwy 5. W takim przypadku zmiana grubości optycznej warstwy mierzonej 5 zmienia położenie prążków interferencyjnych.

Sprzęgacz 7 wykonany jest dowolną znaną metodą, w szczególności poprzez przewężanie z zasklepianiem otworów.

Światłowód posiada:

- dwa rdzenie 9.1 i 9.2 z SiO_2 domieszkowanego GeO_2 o średnicach 8,2 μm, domieszkowane 3,5% mol GeO_2,
- płaszcz 11 o średnicy d1 = 125 μm wykonany z niedomieszkowanej krzemionki SiO_2,
- otwór powietrzny pomiędzy rdzeniami o średnicach 15 μm.

Rdzenie i otwory znajdują się na jednej linii, a ich środki znajdują się w odległości Λ = 15 μm od siebie. Światłowód dwurdzeniowy 6 jest włóknem podtrzymującym polaryzację.

Sprzęgacz 7 wykonany jest jako przewężenie z zasklepieniem otworów. Parametry przewężenia: b1 = b2 = 5 mm, c = 5 mm. Światłowód przewężony jest w takim stopniu, że d2 = 0,6·d1.

Przyłączaną substancją 5 jest polistyren o współczynniku załamania równym ok. 1,5. Substancja 5 osadza się na powierzchni włókna w wyniku zanurzenia w 1% roztworze w chlorku metylenu i późniejszym wyciągnięciu światłowodu i jego wysuszeniu. Warstwa taka pęcznieje w wyniku kontaktu z acetonem, w związku z czym światłowód może być wykorzystany jako czujnik acetonu. Zanurzenie w acetonie w temperaturze pokojowej wywołuje zmianę grubości warstwy o ok. 900 nm i powoduje przesunięcie prążków o ok. 120 nm.

Przykład 6

Źródło 1 przyłączone jest poprzez światłowód 4 do portu pierwszego C.1 cyrkulatora 3, a do portu drugiego C.2 przyłączony jest światłowód 4 przyłączony do światłowodu dwurdzeniowego 6 z wykonanym na nim sprzęgaczem 7, a czoło jednego z rdzeni 9.1 światłowodu dwurdzeniowego 6 jest uaktywnione poprzez pokrycie rdzenia substancją aktywną. Do portu trzeciego C.3 cyrkulatora 3 przyłączony jest światłowodem 4 detektor.

Sygnał ze źródła światła 1 kieruje się światłowodem 4 na port pierwszy C.1 cyrkulatora 3. Port drugi C.2 cyrkulatora 3 przez światłowody 4 wyprowadza się do jednego z rdzeni światłowodu dwurdzeniowego 6. Źródło światła 1 stanowi dioda superluminescencyjna.

Sygnał wychodzący z portu drugiego C.2 cyrkulatora 3 jest kierowany poprzez światłowód jednordzeniowy 4 do jednego z rdzeni światłowodu wielordzeniowego 6 zawierającego sprzęgacz 7. Sygnał w światłowodzie wielordzeniowym 6 propaguje się jednym rdzeniem do momentu napotkania sprzęgacza 7, który powoduje rozdzielenie sygnału na oba rdzenie światłowodu 6. Sygnał w jednym z rdzeni odbija się od końca dołączonego światłowodu 8, a sygnał z drugiego rdzenia odbija się od warstwy 5 na jego wyjściu. Światło odbite wraca poprzez światłowód dwurdzeniowy 6 i wykonany na nim sprzęgacz 7 i poprzez cyrkulator 3 do detektora 2. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstwy 5. W takim przypadku zmiana grubości optycznej warstwy mierzonej 5 zmienia położenie prążków interferencyjnych.

Sprzęgacz 7 wykonany jest dowolną znaną metodą, w szczególności poprzez przewężanie.

Światłowód posiada:

- dwa rdzenie 9.1 i 9.2 z SiO_2 domieszkowanego GeO_2 o średnicach 8,2 μm, domieszkowane 3,5% mol GeO_2,
- płaszcz 11 o średnicy d1 = 125 μm wykonany z niedomieszkowanej krzemionki SiO_2.

Rdzenie znajdują się na jednej linii, a ich środki znajdują się w odległości Λ = 25 μm od siebie.

Sprzęgacz 7 wykonany jest jako przewężenie. Parametry przewężenia: b1 = b2 = 5 mm, c = 5 mm. Światłowód przewężony jest w takim stopniu, że d2 = 0,5·d1.

Odcinek włókna jednordzeniowego 8 przyspawanego do włókna dwurdzeniowego charakteryzuje się takim samym domieszkowaniem i wymiarem rdzenia jak rdzenie 9.1 i 9.2 i ma długość 75 μm.

Światłowód przygotowuje się poprzez umieszczenie przez godzinę w roztworze zawierającym stężony kwas siarkowy i 30% perhydrol w stosunku objętościowym 3:1. Tak przygotowana powierzchnia jest aktywna i gdy światłowód zostanie umieszczony w roztworze zawierającym poli(chlorowodorek alliloaminy), to nastąpi przyłączenie warstwy polimeru o grubości ok. 2 nm i współczynniku załamania ok. 1,5 do światłowodu. Przyłączenie 2 nm warstwy spowoduje przesunięcie prążków o 0,5 nm. Czujnik służy do wykrywania poli(chlorowodorku alliloaminy).

P r z y k ł a d 7

W korzystnym przykładzie wykonania wynalazku wykorzystuje się technologię planarną, bazującą na dzielnikach PLC (*Planar Lightwave Circuit splitter*). Źródło 1 poprzez światłowód 4 przyłączone jest do dzielnika PLC 13. Jedno z wyjść dzielnika 13.1 jest uaktywnione poprzez nałożenie początkowych grubości warstwy 5, a drugie z wyjść dzielnika PLC 13.2 jest fabrycznie przedłużone o 40 μm i schowane wewnątrz obudowy 14 dzielnika 13, zapewniając niezrównoważenie interferometru i stabilność pracy. Ramię powrotne dzielnika przyłączone jest poprzez światłowód 4 do dekodera 2.

Sygnał ze źródła światła jest prowadzony włóknem optycznym do portu wejściowego dzielnika. Detektor jest przyłączony do drugiego portu dzielnika za pośrednictwem włókna. Sygnał ze źródła światła podlega podziałowi w dzielniku PLC i odbija się od warstwy znajdującej się na końcówce wydłużonego ramienia umieszczonego w obudowie. Po odbiciu od warstwy na końcówce światło wraca tą samą drogą, przez dzielnik. Detektor wyświetla widmowe (długość fali) prążki interferencyjne oraz przesunięcie i/lub kontrast pozostające w zależności od zmiany grubości optycznej i/lub absorbcji warstwy. W niniejszym przypadku zmiana grubości optycznej warstwy podlegającej badaniu zmienia położenie prążków interferencyjnych.

W tym wariancie wykorzystuje się dzielnik 13 o równym podziale mocy na długości fali 1500 nm i konfiguracji 2×2. Jako źródło fali wykorzystuje się żarówkę wolframową o kolorze świecenia odpowiadającemu ciału doskonale czarnemu o temperaturze 1900 stopni K.

Sygnał ze źródła światła 1 jest kierowany poprzez światłowód doprowadzający 4 do portu wejściowego dzielnika. Do drugiego portu wejściowego dołącza się detektor 2 poprzez światłowód doprowadzający 4. Detektor stanowi optyczny analizator widma. Sygnał ze źródła światła 1 jest dzielony na dzielniku PLC i odbija się odpowiednio od warstwy 5 oraz wyjścia przedłużonego ramienia schowanego w obudowie 13.2. Światło odbijając się od wyjścia oraz warstwy 5 wraca tą samą drogą przez dzielnik 13. Na detektorze 2 widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej długości fali, których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany grubości optycznej i/lub absorpcji warstwy 5. W takim przypadku zmiana grubości optycznej warstwy mierzonej 5 zmienia położenie prążków interferencyjnych.

Przyłączaną substancją 3 do portu wyjściowego wychodzącego na zewnątrz jest etyloceluloza o współczynniku załamania równym ok. 1,4. Przyłącza się ją poprzez zanurzenie falowodu dwurdzeniowego w 0,5% roztworze w octanie butylu a następnie wyciągnięcie i wysuszenie. Światłowód pokryty taką warstwą reaguje na pary etanolu, który wywołuje pęcznienie warstwy. Zmiana grubości warstwy o ok. 50 nm powoduje przesunięcie prążków o ok. 10 nm.

Zastrzeżenia patentowe

1. Interferometr falowodowy, do pomiaru parametrów optycznych, wyposażony w źródło światła (1) doprowadzające światło do jednego końca falowodu wielordzeniowego (6), za pośrednictwem dzielnika (7, 13), przy czym falowód wielordzeniowy (6) ma przynajmniej pierwszy rdzeń i drugi rdzeń, przy czym przynajmniej pierwszy rdzeń ma wyjście na przeciwnym końcu falowodu wielordzeniowego (6), **znamienny tym**, że

dzielnik (7, 13) znajduje się na falowodzie wielordzeniowym (6), zaś wyjście przynajmniej jednego rdzenia jest pokryte przynajmniej jedną aktywną chemicznie substancją (5, 5.1, 5.2) i przynajmniej pierwszy rdzeń jest połączony bezpośrednio lub pośrednio z detektorem (2) sygnału, od strony tego końca falowodu wielordzeniowego (6), do którego doprowadza światło źródło światła (1).

2. Interferometr według zastrz. 1, **znamienny tym**, że przynajmniej jedna aktywna chemicznie substancja (5) jest przyłączalna do innych substancji.
3. Interferometr według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że przynajmniej jedna aktywna chemicznie substancja (5) jest odłączalna przy ekspozycji na określone warunki środowiskowe.
4. Interferometr według zastrz. 1 albo 2 albo 3, **znamienny tym**, że przynajmniej jedna aktywna chemicznie substancja (5) jest dobrana tak, że zmienia grubość i/lub absorbcję i/lub współczynnik załamania przy ekspozycji na określone warunki środowiskowe.
5. Interferometr według dowolnego z poprzednich zastrz., **znamienny tym**, że falowód wielordzeniowy (6) ma więcej niż dwa rdzenie.
6. Interferometr według dowolnego z poprzednich zastrz., **znamienny tym**, że pierwszy rdzeń falowodu wielordzeniowego (6) ma inną długość niż drugi rdzeń.
7. Interferometr według dowolnego z poprzednich zastrz., **znamienny tym**, że wyjście przynajmniej jednego rdzenia falowodu wielordzeniowego (6) jest przedłużone za pomocą przynajmniej jednego odcinka (8) dielektrycznego wybranego z grupy obejmującej, pręcik szklany, falowód, włókno optyczne.
8. Interferometr według zastrz. 5, **znamienny tym**, że ma urządzenie fan-in/fan-out (12) dołączone do falowodu wielordzeniowego (6) i więcej niż jeden detektor (2) oraz źródło światła (1) dołączone do urządzenia fan-in/fan-out (12).
9. Interferometr według dowolnego z poprzednich zastrz., **znamienny tym**, że jest wyposażony w cyrkulator (3), który ma pierwszy port (C.1) połączony ze źródłem światła (1), trzeci port (C.3) połączony z detektorem (2) sygnału oraz drugi port (C.2) połączony z falowodem wielordzeniowym (6).
10. Interferometr według dowolnego z poprzednich zastrz., **znamienny tym**, że ma przynajmniej dwa rdzenie, które są pokryte różnymi substancjami aktywnymi chemicznie (5.1, 5.2).
11. Interferometr według dowolnego z zastrz. poprzednich, **znamienny tym**, że falowód wielordzeniowy (6) stanowi światłowód utrzymujący polaryzację.
12. Interferometr według dowolnego z poprzednich zastrz., **znamienny tym**, że falowód wielordzeniowy (6) stanowi światłowód wielordzeniowy i zawiera otwory (10) pomiędzy pierwszym rdzeniem a drugim rdzeniem.
13. Interferometr według dowolnego z zastrz. od 1 do 12, **znamienny tym**, że falowód wielordzeniowy (6) stanowi światłowód wielordzeniowy a dzielnik stanowi wielordzeniowy sprzęgacz światłowodowy (7), zapewniony na tym światłowodzie wielordzeniowym jako obszar o zredukowanych wymiarach poprzecznych.
14. Interferometr według dowolnego z zastrz. od 1 do 12, **znamienny tym**, że dzielnik stanowi planarny dzielnik światła (13), zaś falowód stanowi falowód planarny.
15. Interferometr według dowolnego z poprzednich zastrz., **znamienny tym**, że substancja chemicznie aktywna (5, 5.1, 5.2) zawiera substancję wybraną z grupy obejmującej tlenek itru, polimer perfluorowany, zhydrolizowany kolagen, polistyren, etylocelulozę.
16. Zastosowanie interferometru jak określono w dowolnym z zastrz. od 1 do 15 do wykrywania określonych substancji z otoczenia.
17. Sposób wykrywania określonej substancji chemicznej z otoczenia, **znamienny tym**, że stosuje się w nim interferometr, jak określono w dowolnym z zastrz. od 1 do 15, a wyjście przynajmniej jednego rdzenia pokryte aktywną chemicznie substancją wprowadza się w kontakt z otoczeniem i stwierdza się wykrycie określonej substancji jeżeli dochodzi do przesunięcia prążków interferencyjnych obserwowanych na detektorze.
18. Sposób według zastrz. 17, **znamienny tym**, że aktywna chemicznie substancja zawiera polistyren a wykrywaną określoną substancję stanowi aceton.

Rysunki

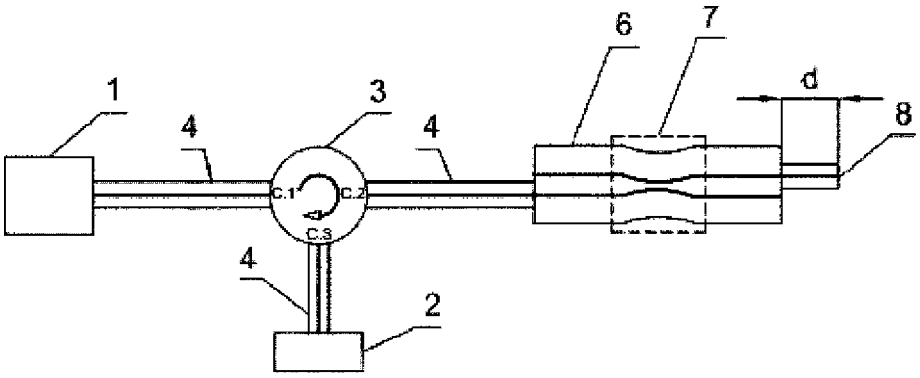

FIG. 1

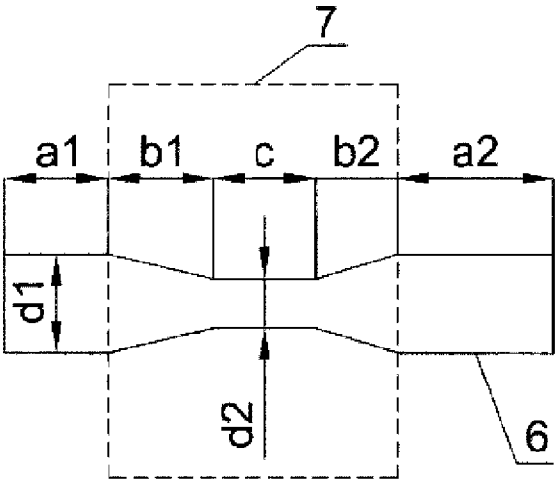

FIG. 2

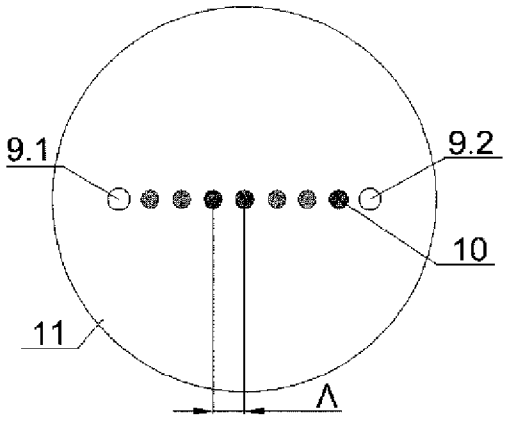

FIG. 3

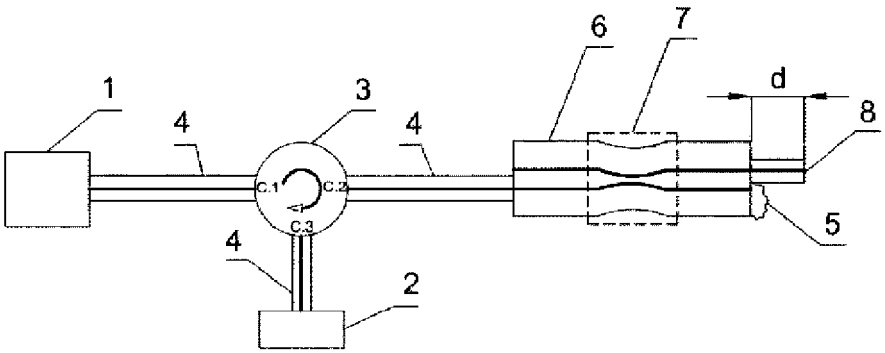

FIG. 4

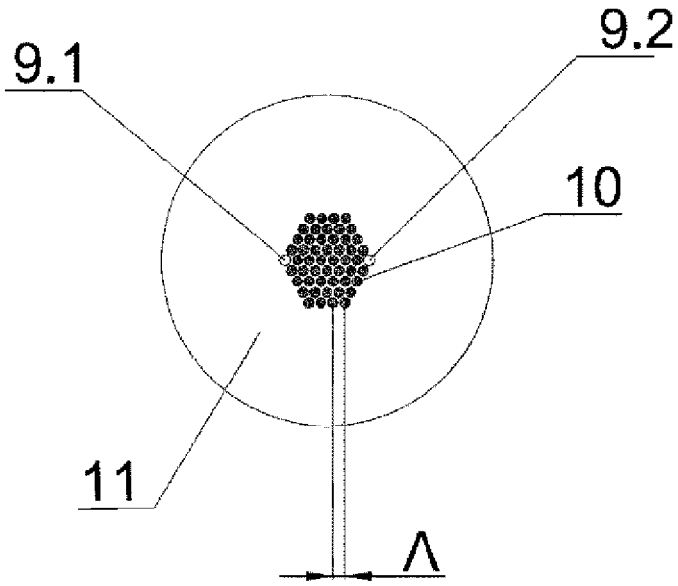

FIG. 5

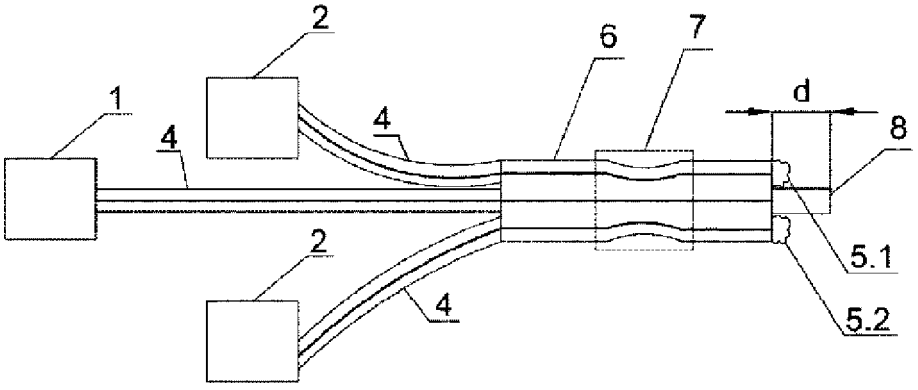

FIG. 6

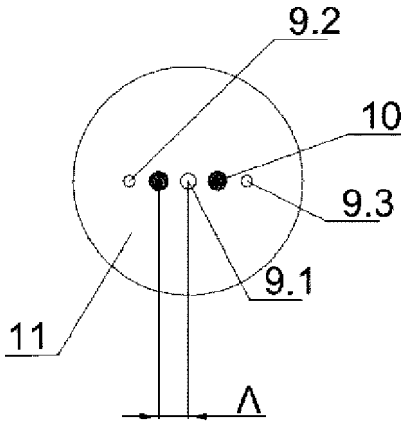

FIG. 7

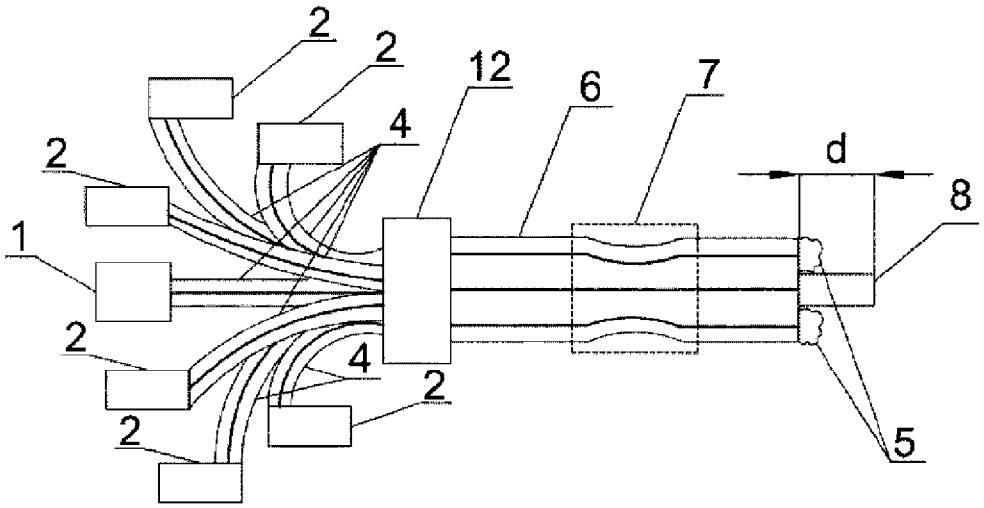

FIG. 8

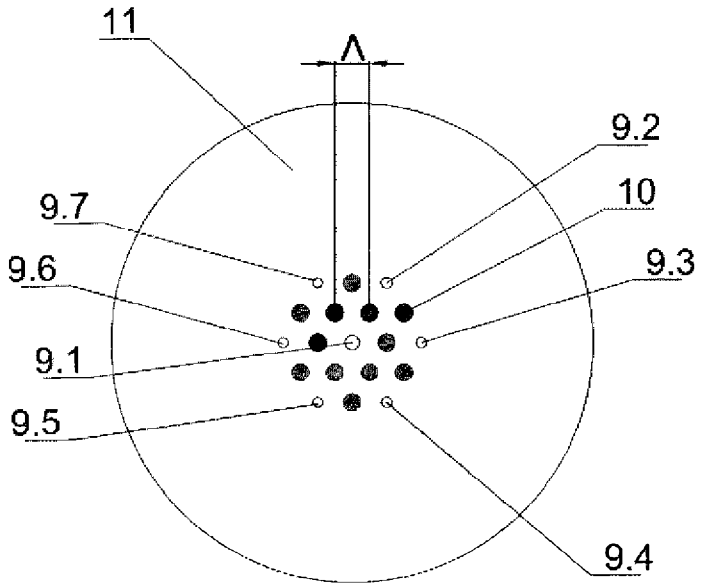

FIG. 9

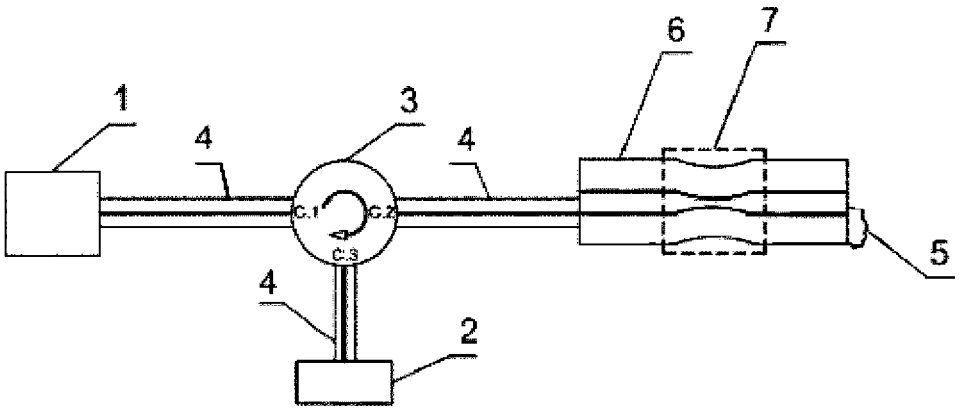

FIG. 10

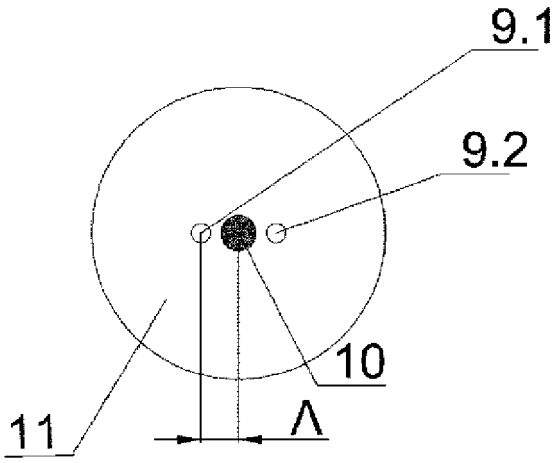

FIG. 11

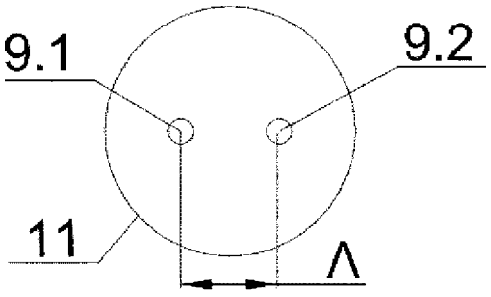

FIG. 12

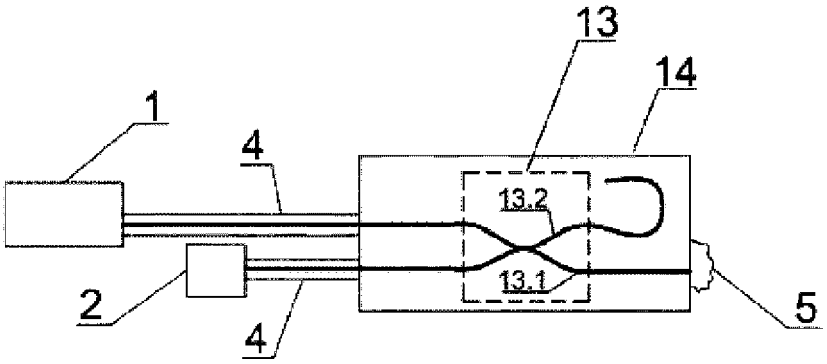

FIG. 13