

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **236751**
(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **425972**

(22) Data zgłoszenia: **18.06.2018**

(51) Int.Cl.
G02B 6/00 (2006.01)
G02B 6/122 (2006.01)
G01B 9/02 (2006.01)
G01N 21/00 (2006.01)

(54)

Czujnik falowodowy

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

02.01.2020 BUP 01/20

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

08.02.2021 WUP 03/21

(73) Uprawniony z patentu:

**INPHOTECH SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ
ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ, Ołtarzew, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

TOMASZ NASIŁOWSKI, Warszawa, PL
MAREK NAPIERAŁA, Warszawa, PL
ŁUKASZ SZOSTKIEWICZ, Toruń, PL
DAWID BUDNICKI, Sanniki, PL
KAROL WYSOKIŃSKI, Gdynia, PL
KRZYSZTOF WILCZYŃSKI, Węgorzewo, PL
KRZYSZTOF POTURAJ, Lublin, PL
MARIUSZ MAKARA, Lublin, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Marek Bury

PL 236751 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest czujnik falowodowy, w szczególności światłowodowy pozwalający na pomiar zmiany grubości optycznej dielektryka oraz korzystnie zmiany grubości warstwy aktywnej, oparty na zasadzie działania interferometru Fabry-Perot.

Interferometr Fabry-Perot jest jednym z tzw. interferometrów wielowiązkowych i wykorzystywany jest do badań fal świetlnych, a wykorzystuje się w nim zjawisko wielokrotnego odbicia wiązki świetlnej pomiędzy dwoma równoległymi i częściowo przepuszczającymi zwierciadłami. Powstająca fala stojąca może być obserwowana na ekranie.

Interferometr tego typu, stanowi podstawę konstrukcji rezonatorów Fabry-Perot, jakie stosowane są w czujnikach optycznych stosowanych wraz z światłowodami. Przykładowo znany jest czujnik fazowy, w jakim światło ze źródła światła kierowane jest poprzez sprzęgacz do rezonatora Fabry-Perot a następnie do detektora światła przechodzącego. Odbita część wiązki świetlnej (w rezonatorze) kierowana jest poprzez sprzęgacz do detektora światła odbitego.

Znane są także czujniki na przykład temperatury, w których interferometr Fabry-Perot jest elementem wrażliwym na mierzoną zmianę. W układach takich, światło ze źródła kieruje się przez sprzęgacz do interferometru Fabry-Perot wykonanego na końcu światłowodu z materiału rozszerzającego się pod wpływem wzrostu temperatury, albo z wykorzystaniem takiego materiału. W takim urządzeniu działającym w konfiguracji odbiciowej w skutek zmiany odległości pomiędzy zwierciadłami (zmiana wymiarów wnęki), określić można zmianę temperatury pośrednio w oparciu o zmianę wymiarów wnęki.

Znane rozwiązania wykorzystujące właściwości interferometru Fabry-Perot w technice światłowodowej mają przeróżne zastosowania. Przykładem może być ujawniony w opisie EP 3054272 czujnik poziomu paliwa, w którym na światłowodzie wykonano optyczną wnękę za pomocą materiału półprzewodnikowego, np. arsenku galu. Wnęką optyczną jest przyłączona do dolnej powierzchni przepony, a wynikająca ze zmiany nacisku przepony na wnękę zmiana wymiarów wnęki umożliwia interpretację wyniku jako stan rezerwy paliwa.

Z kolei w opisie CN103697923 ujawniona jest metoda demodulacji długości wnęki w interferometrze Fabry-Perot. Metoda demodulacji opisana w dokumencie może być wykorzystana w różnego typu czujnikach.

Z kolei w opisie TW201144752 ujawniono interferometryczną metodę pomiaru przemieszczenia, który wykorzystuje zasadę działania interferometru Fabry-Perot. Zmiana położenia początku/końca wnęki w umieszczonym na włóknie światłowodowym interferometrze skutkuje zmianą w odczytywanych wartościach sygnału. Przy czym twórcy nie ujawniają, czy zaproponowany układ działa w sposób transmisyjny czy odbiciowy.

W rozwiązaniu według US 2008/049228 ujawniono macierz składającą się z wielu interferometrów Fabry-Perot, z których każdy składa się z dwóch równoległych lusterek, jakie w razie potrzeby są wzajemnie zbliżane lub oddalane, co skutkuje zwiększeniem lub zmniejszeniem wiązki wydostającej się przez lustro.

Znane rozwiązania znajdują z małymi wyjątkami zastosowanie głównie laboratoryjne, a zastosowania przemysłowe, jak choćby czujniki poziomu płynów dają jedynie możliwość zarejestrowania zaistnienia określonego stanu, bez określenia dokładniejszych danych na temat np. ilości paliwa w zbiorniku. Zastosowanie interferometrów falowodowych otwiera możliwości wykorzystania pomiarów interferometrycznych w badaniach, które wymagają znacznej miniaturyzacji – takie zastosowania nie było dostępne dla interferometrów objętościowych. Dlatego celowym było opracowanie czujnika falowodowego wykorzystującego konstrukcję interferometru Fabry-Perot, który umożliwi pomiar grubości optycznej i/lub absorpcji cienkich warstw. Czujnik według wynalazku może także zostać wykorzystany do pomiaru wielu wielkości takich jak stężenie gazów i innych, pomiar pH, obecność i ilość związków chemicznych, oraz także do pośrednich pomiarów innych wielkości fizycznych takich jak: temperatura, wydłużenie/rozciąganie, naprężenie, ciśnienie.

Czujnik falowodowy, korzystnie światłowodowy według wynalazku zawiera:

- co najmniej jedno źródło światła,
- co najmniej jeden detektor,
- co najmniej jeden sprzęgacz falowodowy, korzystnie światłowodowy lub korzystnie cyrkulator falowodowy, korzystnie światłowodowy,
- falowód, w szczególności światłowód, jednordzeniowy lub wielordzeniowy, korzystnie jednomodowy.

Czujnik falowodowy, korzystnie światłowodowy według wynalazku zbudowany jest tak, że do wejściowego światłowodu jednordzeniowego lub wielordzeniowego przysunięty jest odcinek dielektryka, w szczególności światłowodu, korzystnie jednomodowego. Powierzchnie czoła falowodu, w szczególności światłowodu oraz dielektryka są korzystnie równoległe. Przeciwny koniec światłowodu wejściowego przyłączony jest do sprzęgacza lub cyrkulatora, który to sprzęgacz lub cyrkulator połączone są ze źródłem i detektorem.

Korzystnie, gdy stosunek drogi optycznej pomiędzy wejściowym falowodem, w szczególności światłowodem, korzystnie jednomodowym, a przysuniętym do niego odcinkiem dielektryka oraz drogi optycznej warstwy dielektryka, jest większy niż 0 i mniejszy bądź równy 0,2. Można to opisać wzorem:

$$0 \leq \frac{a \cdot n_1}{b \cdot n_2} \leq 0,2$$

gdzie:

- a to odległość pomiędzy falowodem, a przysuniętym do niego odcinkiem dielektryka, dalej określona jako szerokość a ,
- n_1 to współczynnik załamania substancji, który wypełnia przestrzeń a ,
- b to grubość dielektryka,
- n_2 to współczynnik załamania materiału, z którego wykonany jest dielektryk.

Innym korzystnym wariantem wynalazku (w którym powierzchnie wejściowego falowodu, w szczególności światłowodu oraz odcinka dielektryka nie muszą być równoległe) jest taka konstrukcja przestrzeni pomiędzy falowodem, w szczególności światłowodem, korzystnie jednomodowym, a przysuniętym do niego odcinkiem dielektryka, że stosunek współczynników odbicia od końca falowodu, w szczególności światłowodu do współczynnika odbicia od powierzchni dielektryka spełnia warunek:

$$\frac{R_1}{R_2} \leq 0,5$$

gdzie:

- R_1 to współczynnik odbicia od końcówki falowodu, w szczególności światłowodu,
- R_2 to współczynnik odbicia od powierzchni dielektryka.

Korzystnie, gdy różnica między współczynnikami załamania n_1 i n_2 jest większa niż 30% czyli:

$$\frac{|n_2 - n_1|}{n_1} \geq 0,3$$

Korzystnie, gdy przestrzeń między końcem wejściowego falowodu, w szczególności światłowodu, korzystnie jednomodowego oraz przysuniętym do niego odcinkiem dielektryka wypełniona jest gazem lub mieszaniną gazów, w szczególności powietrzem, lub cieczami z grupy fluorowodorów lub mieszaninami tych cieczy.

Korzystnie, gdy jedna z powierzchni dielektryka, przez którą propaguje się sygnał świetlny pokryta jest warstwą aktywną. Przez pokrycie powierzchni dielektryka warstwą aktywną 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.

W ogólności substancja aktywna 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 wpływem czynników zewnętrznych i/lub substancją wiążącą substancje chemiczne z otoczenia.

Przez pokrycie rdzenia co najmniej jedną substancją aktywną chemicznie rozumie się pokrycie tą substancją lub jej mieszaninami powierzchni dielektryka, w szczególności w obszarze, w którym znajduje się rdzeń światłowodu, jeśli dielektryk ma postać światłowodu.

W przypadku, gdy powierzchnia dielektryka nie jest pokryta warstwą aktywną, rozumiany jest przypadek gdy interferometr wykorzystywany jest do pomiaru czynników zewnętrznych, w szczególności temperatury, wydłużenia/rozciągnięcia, naprężenia, ciśnienia i inne, wpływających bezpośrednio na ten dołączony odcinek dielektryka.

W wyniku przyłączania/odłączania się substancji lub zmiany parametrów substancji na powierzchni dielektryka lub zmiany parametrów samego dielektryka pod wpływem czynników zewnętrznych, zmienia się droga optyczna dla światła przechodzącego przez dielektryk i ewentualnie dla znajdujących się na nim substancji. W wyniku zmiany tej drogi optycznych następuje przesunięcie prążków interferencyjnych na detektorze. Na podstawie analizy przesunięcia prążków interferencyjnych możliwe jest obliczenie wartości grubości przyłączonej/odłączonej warstwy, zmiany czynników zewnętrznych działających na przyłączoną warstwę lub dielektryk (w szczególności takich jak: temperatura, wydłużenie/rozciągnięcie, naprężenie, ciśnienie i inne).

Korzystnie, gdy źródłem światła jest źródło o szerokim spektrum, np. dioda superluminescencyjna, źródło typu supercontinuum, zestaw korzystnie co najmniej dwóch źródeł światła o szerokim spektrum, lampa halogenowa, przestrajalne źródło wąskospektralne. Korzystnie, gdy detektor jest analizatorem widma lub spektrometr optyczny.

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. W jednym z korzystnych przykładów wykonania źródła, którym jest dioda superluminescencyjna o centralnej długości fali 1400 nm i spektrum o szerokości połowkowej 50 μm , przyłączone jest poprzez światłowód jednomodowy do portu pierwszego cyrkulatora, a do portu drugiego cyrkulatora przyłączony jest światłowód jednomodowy, do którego przysunięty jest odcinek wejściowego światłowodu jednomodowego, na którego czole znajduje się warstwa aktywna. Stosunek drogi optycznej pomiędzy światłowodem jednomodowym a przysuniętym do niego odcinkiem światłowodu jednomodowego z naniesioną warstwą aktywną oraz drogi optycznej warstwy światłowodu jednomodowego, wynosi $0 < \frac{a \cdot n_1}{b \cdot n_2} \leq 0,2$, gdzie:

- a to odległość pomiędzy falowodem, w szczególności światłowodem, jednomodowym, a przysuniętym do niego odcinkiem światłowodu jednomodowego, dalej określona jako szerokość a ,
- n_1 to współczynnik załamania substancji, który wypełnia przestrzeń a ,
- b to grubość dielektryka,
- n_2 to współczynnik załamania materiału, z którego wykonany jest dielektryk.

Do portu trzeciego cyrkulatora dołączony jest detektor, w szczególności optyczny analizator widma.

Światło poprzez cyrkulator trafia do wejściowego światłowodu jednomodowego, gdzie poprzez przestrzeń powietrzną trafia na dołączony odcinek światłowodu jednomodowego i warstwę aktywną. W ten sposób powstaje wielowętkowy interferometr Fabry-Perot. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany parametrów wnęki. Korzystnie, gdy przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 2 \mu\text{m}$, a grubość dołączonego dielektryka ma $b = 20 \mu\text{m}$.

Substancją przyłączaną do odcinka wejściowego światłowodu jest w szczególności perfluorowany polimer o współczynniku załamania równym ok. $n_1 = 1,33$. Przy czym korzystnie, gdy substancja z jakiej wykonana jest warstwa aktywna umieszczona jest na dielektryku poprzez zanurzenie go 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 10 μm , co odpowiada przesunięciu prążków w okolicy długości fali 1400 μm o 1 μm .

W innym korzystnym przykładzie wykonania źródło, którym w tym konkretnym przypadku jest źródło typu supercontinuum, przyłączone jest poprzez wejściowy światłowód jednomodowy. Do wejściowego światłowodu przyłączony jest odcinek dielektryka, w szczególności szkła krzemionkowego. Pomiedzy wejściowym światłowodem jednomodowym a dielektrykiem, w szczególności szkłem krzemionkowym znajduje się przestrzeń powietrzna. Dielektryk, w szczególności szkło krzemionkowe pokryte jest substancją zmieniającą swoją grubość optyczną pod wpływem obecności innej substancji. Stosunek drogi optycznej pomiędzy wejściowym światłowodem jednomodowym a przysuniętym do

niego odcinkiem dielektryka z naniesioną warstwą aktywną oraz drogi optycznej warstwy dielektryka, wynosi $0 < \frac{a \cdot n_1}{b \cdot n_2} \leq 0,2$, gdzie:

- a to odległość pomiędzy falowodem, w szczególności światłowodem jednomodowym, a przysuniętym do niego odcinkiem dielektryka, dalej określona jako szerokość a ,
- n_1 to współczynnik załamania substancji, który wypełnia przestrzeń a ,
- b to grubość dielektryka,
- n_2 to współczynnik załamania materiału, z którego wykonany jest dielektryk.

Za warstwą aktywną pokrywającą dielektryk, w szczególności szkło krzemionkowe znajduje się światłowód wielomodowy podłączony do optycznego analizatora widma.

Światło, poprzez wejściowy światłowód jednomodowy, bezpośrednio ze źródła, kierowane jest do przestrzeni powietrznej, a następnie do dielektryka – szkła krzemionkowego i substancji aktywnej gdzie powstaje wielonękowy rezonator Fabry-Perot. W tym korzystnym przykładzie wykonania przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 5 \mu\text{m}$ a grubość dołączonego szkła krzemionkowego ma $b = 40 \mu\text{m}$. Odległość między substancją aktywną a czołem światłowodu wielomodowego jest równa $c = 1 \text{ mm}$.

Substancją przyłączaną do dielektryka w szczególności szkła krzemionkowego jest korzystnie tlenek itru o niewielkiej porowatości i o współczynniku załamania równym ok. 1,8. Substancję (6) otrzymać można z wykorzystaniem impulsów lasera o wysokiej mocy skierowanego na tlenek itru tak, by jego pary mogły osadzać się na szkłe. 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. 4 nm w okolicach długości fali 1550 nm.

W innym korzystnym przykładzie wykonania zestaw szeroko spektralnych źródeł, którymi w szczególności są 3 diody superluminescencyjne o długościach fali 1310 nm, 1450 nm i 1550 nm oraz o spektrach o szerokości połówkowej $50 \mu\text{m}$, zestaw ten podłączony jest poprzez cyrkulatory do wejścia urządzenia typu Fan-In/Fan-out wprowadzający sygnał do wejściowego światłowodu korzystnie 3-rdzeniowego. Do czoła światłowodu wielordzeniowego przysunięty jest kawałek dielektryka, w szczególności szkła ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$), pokryty warstwą aktywną. Pomiędzy szkłem ZBLAN a światłowodem wielordzeniowym znajduje się obszar powietrzny o szerokości a . Stosunek drogi optycznej pomiędzy światłowodem wielordzeniowym a przysuniętym do niego odcinkiem dielektryka z naniesioną warstwą aktywną oraz drogi optycznej warstwy światłowodu jednomodowego, wynosi między 0 a 0,2. Do portu trzeciego cyrkulatorów dołączone są co najmniej dwa detektory, w szczególności optyczne analizatory widma.

Światło, poprzez światłowody jednomodowe kierowane jest do cyrkulatorów i następnie do urządzenia typu fan-in/fan-out do wejściowego światłowodu 3-rdzeniowego o trójkątnym ułożeniu rdzeni, stałej sieci $\Lambda = 80 \mu\text{m}$, średnicy rdzeni równej $8,2 \mu\text{m}$ i aperturze numerycznej 0,12. Następnie światło kierowane jest do wnęki powietrznej, szkła ZBLAN i warstwy aktywnej. W ten sposób dla każdego z rdzeni powstaje wielonękowy rezonator Fabry-Perot. W tym korzystnym przykładzie wykonania przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 1 \mu\text{m}$, a grubość dołączonego szkła ZBLAN ma $b = 50 \mu\text{m}$.

Przyłączaną substancją jest korzystnie polistyren o współczynniku załamania równym ok. 1,5, jaki osadzony jest na powierzchni dielektryka, w szczególności szkła ZBLAN w wyniku zanurzenia w 1% roztworze w chlorku metylenu, 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 w okolicy długości fali 1550 nm o ok. 4 nm, w okolicy długości fali 1450 nm o 1 nm, w okolicy długości fali 1310 nm o ok. 3 nm.

W innym korzystnym przykładzie wykonania źródło, w szczególności lampa halogenowa emitująca światło z zakresu $400\text{--}700 \mu\text{m}$, przyłączone jest poprzez światłowód dwójłomny (podtrzymujący polaryzację) oraz jednomodowy na długości fali pracy do portu pierwszego cyrkulatora utrzymującego polaryzację, a do portu drugiego cyrkulatora przyłączony jest światłowód dwójłomny (podtrzymujący polaryzację) oraz wejściowy jednomodowy na długości fali pracy, do którego przysunięty jest odcinek szkła ołowiowego o współczynniku załamania 1,8, na którego czole znajduje się warstwa aktywna. Pomiędzy dołączonym kawałkiem szkła ołowiowego a drugim światłowodem powstaje przerwa powietrzna. Stosunek drogi optycznej pomiędzy wejściowym światłowodem dwójłomnym a przysuniętym do niego kawałkiem szkła ołowiowego z naniesioną warstwą aktywną oraz drogi optycznej kawałka szkła ołowiowego, wynosi $0 < \frac{a \cdot n_1}{b \cdot n_2} \leq 0,2$

gdzie:

- a to odległość pomiędzy falowodem – światłowodem dwójłomnym (podtrzymującym polaryzację), a przysuniętym do niego kawałkiem szkła ołowiowego, dalej określona jako szerokość a ,
- n_1 to współczynnik załamania substancji, który wypełnia przestrzeń a ,
- b to grubość dielektryka,
- n_2 to współczynnik załamania materiału, z którego wykonany jest dielektryk.

Do portu trzeciego cyrkulatora podtrzymującego polaryzację dołączony jest detektor, którym w tym konkretnym przypadku jest spektroskop.

Światło poprzez cyrkulator podtrzymujący polaryzację trafia do wejściowego światłowodu dwójłomnego oraz jednomodowego o drodze zdudnień 3 mm dla długości fali 550 nm, gdzie poprzez przestrzeń powietrzną trafia na dołączony odcinek szkła ołowiowego i warstwę aktywną. W ten sposób powstaje wielonękowy interferometr Fabry-Perot. Na detektorze widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany parametrów wnęki. W tym korzystnym przykładzie wykonania przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 0,1 \mu\text{m}$ a grubość dołączonego szkła ołowiowego ma $b = 200 \mu\text{m}$.

Światłowód wejściowy 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 0,05 nm dla długości fali 550 nm. Czujnik służy do detekcji poli(chlorowodoru alliloaminy).

W innym korzystnym przykładzie wykonania źródło, detektor oraz falowody są zintegrowane na jednej płytce planarnej. Źródło, którym jest wąkospektralne źródło światła przestrzajalne w zakresie 1450–1600 nm, przyłączone jest poprzez wejściowy jednomodowy falowód planarny, do którego przyłączony jest odcinek dielektryka, w szczególności szkła krzemionkowego. Pomiędzy będącym pod kątem $8,3^\circ$ czołem wejściowego falowodu jednomodowego a dielektrykiem, w szczególności szkłem krzemionkowym znajduje się przestrzeń powietrzna. Dielektryk, w szczególności szkło krzemionkowe pokryte jest z obu stron warstwą aktywną zmieniającą swoją grubość optyczną pod wpływem obecności innej substancji. Za warstwą substancji pokrywającą szkło krzemionkowe znajduje się jednomodowy falowód planarny o czołem będącym pod kątem $8,3^\circ$ podłączony do detektora mocy. Przestrzeń pomiędzy falowodem, w szczególności światłowodem, korzystnie jednomodowym, a przysuniętym do niego kawałkiem szkła krzemionkowego, spełnia warunek $\frac{R_1}{R_2} \leq 0,5$, gdzie R_1 to współczynnik odbicia od końcówki falowodu i R_2 to współczynnik odbicia od powierzchni szkła krzemionkowego.

Światło, poprzez jednomodowy falowód planarny, bezpośrednio ze źródła kierowane jest do przestrzeni powietrznej a następnie na substancję przyrastającą pokrywającą kawałek szkła krzemionkowego. Następnie sygnał trafia na drugą warstwę substancji przyrastającej. W ten sposób powstaje wielonękowy rezonator Fabry-Perot. W tym korzystnym przykładzie wykonania przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 2 \mu\text{m}$ a grubość dołączonego szkła krzemionkowego ma $b = 125 \mu\text{m}$. Odległość od substancji przyrastającej a czołem światłowodu jednomodowego jest równa $c = 2 \mu\text{m}$.

Przyłączaną substancją jest etyloceluloza o współczynniku załamania równym ok. 1,4. Przyłącza się ją poprzez zanurzenie szkła krzemionkowego w 0,5% roztworze w octanie butylu a następnie wyciągnięcie i wysuszenie. Kawałek szkła krzemionkowego pokryty taką warstwą reaguje na pary etanolu, który wywołuje pęcznienie warstwy. Zmiana grubości warstwy o ok. 50 nm powoduje przesunięcie prążków o ok. 14 nm dla długości fali 960 nm.

Czujnik światłowodowy według wynalazku przedstawiono na rysunku na którym fig. 1 prezentuje czujnik w jakim zastosowano cyrkulator i fragment światłowodu jednomodowego, fig. 2 przedstawia czujnik z dwoma przerwami powietrznymi, fig. 3 przedstawia czujnik wykorzystujący światłowód wielordzeniowy, fig. 4 przedstawia korzystny przekrój światłowodu trzyrdzeniowego, fig. 5 przedstawia czujnik w jakim źródłem jest łąpa halogenowa oraz elementy podtrzymujące polaryzację, fig. 6 prezentuje czujnik skompresowany na płytce planarnej.

Przykład 1

Ten korzystny przykład wykonania został przedstawiony na fig. 1. Źródło (1), którym jest dioda superluminescencyjna o centralnej długości fali 1400 nm i spektrum o szerokości połówkowej 50 nm, przyłączone jest poprzez światłowód jednomodowy do portu pierwszego (C.1) cyrkulatora (3), a do portu drugiego (C.2) przyłączony jest światłowód jednomodowy (4), do którego przysunięty jest na odległość

(a) odcinek światłowodu jednomodowego (5), na którego czole znajduje się warstwa aktywna (6). Pomiedzy dołączonym odcinkiem światłowodu (5) a światłowodem (4) powstaje przerwa powietrzna o szerokości (a). Do portu trzeciego (C.3) cyrkulatora (3) dołączony jest detektor (2), którym w tym konkretnym przypadku jest optyczny analizator widma.

Wejściowy światłowód jednomodowy (4) oraz światłowód jednomodowy (5) pokryty warstwą aktywną (6) umieszczone są w szklanej kapilarze przeciętej wzdłuż jej długości tak, że ma on kształt litery U.

Światło poprzez cyrkulator (3) trafia do światłowodu (4) gdzie poprzez przestrzeń powietrzną o szerokości (a) trafia na dołączony odcinek światłowodu jednomodowego (5) i warstwę aktywną (6). W ten sposób powstaje wielownękowy interferometr Fabry-Perot. Na detektorze (2) widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany parametrów wnęki. W tym korzystnym przykładzie wykonania przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 2 \mu\text{m}$, a grubość dołączonego dielektryka ma $b = 20 \mu\text{m}$.

Substancją (6) przyłączaną do odcinka światłowodu (5) jest perfluorowany polimer o współczynniku załamania równym ok. 1,33. Substancję (6) można umieścić na dielektryku poprzez zanurzenie go 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 10 nm, co odpowiada przesunięciu prążków w okolicy długości fali 1400 nm o 1 nm.

Przykład 2

Ten korzystny przykład wykonania został przedstawiony na fig. 2. Źródło (1), którym jest źródło typu supercontinuum, przyłączone jest poprzez wejściowy światłowód jednomodowy (4), a do wejściowego światłowodu jednomodowego (4) przyłączony jest odcinek szkła krzemionkowego (5). Pomiedzy wejściowym światłowodem jednomodowym (4) a szkłem krzemionkowym (5) znajduje się przestrzeń powietrzna o szerokości (a). Szkło krzemionkowe (5) pokryte jest substancją (6) zmieniającą swoją grubość optyczną pod wpływem obecności innej substancji. Za warstwą substancji (6) pokrywającej szkło krzemionkowe (5) znajduje się światłowód wielomodowy (7) podłączony do detektora, w tym przypadku optycznego analizatora widma (2).

Wejściowy światłowód jednomodowy (4) znajduje się w szklanej kapilarze, do której końca dołączone jest szkło krzemionkowe (5) pokryte warstwą aktywną (6).

Światło, poprzez wejściowy światłowód jednomodowy (4), bezpośrednio ze źródła (1), kierowane jest do przestrzeni powietrznej o szerokości (a) a następnie do szkła krzemionkowego (5) i substancji aktywnej (6) gdzie powstaje wielownękowy rezonator Fabry-Perot. W tym korzystnym przykładzie wykonania przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 5 \mu\text{m}$ a grubość dołączonego szkła krzemionkowego (5) ma $b = 40 \mu\text{m}$. Odległość między substancją aktywną (6) a czołem światłowodu wielomodowego jest równa $c = 1 \text{ mm}$.

Substancją (6) przyłączaną do szkła krzemionkowego (5) jest tlenek itru o niewielkiej porowatości o współczynniku załamania równym ok. 1,8. Substancję (6) otrzymać można z wykorzystaniem impulsów lasera o wysokiej mocy skierowanego na tlenek itru tak, by jego pary mogły osadzać się na szkłe. 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. 4 nm w okolicach długości fali 1550 nm.

Przykład 3

Ten korzystny przykład wykonania został przedstawiony na fig. 3 i fig. 4. Zestaw szeroko spektralnych źródeł (1), którymi w tym konkretnym przypadku są 3 diody superluminescencyjne o długościach fali 1310 nm, 1450 nm i 1550 nm oraz o spektrach o szerokości połówkowej 50 nm, podłączony jest poprzez cyrkulatory (3) do wejścia urządzenia typu Fan-In/Fan-out (8) wprowadzający sygnał do wejściowego światłowodu 3-rdzeniowego (4). Do czoła światłowodu wejściowy 3-rdzeniowego (4) przysunięty jest kawałek szkła ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) (5), pokryty warstwą aktywną (6). Pomiedzy szkłem ZBLAN (5) a wejściowym światłowodem wielordzeniowym (4) znajduje się obszar powietrzny o szerokości (a). Do portu trzeciego (C.3) cyrkulatorów (3) dołączone są detektor, którymi w tym konkretnym przypadku są optyczne analizatory widma.

Wejściowy, światłowód wielordzeniowy (4) umieszczony jest w V-rowku. Do V-rowka dołączony jest kawałek szkła ZBLAN (5) pokryty warstwą aktywną (6).

Światło, poprzez światłowody jednomodowe kierowane jest do cyrkulatorów (3) i następnie do urządzenia typu fan-in/fan-out (8) do wejściowego światłowodu 3-rdzeniowego (4) o trójkątnym ułożeniu

rdzeni (9.1, 9.2, 9.3), stałej sieci $\Lambda = 80 \text{ }\mu\text{m}$, średnicy rdzeni (9.1, 9.2, 9.3) równej $8,2 \text{ }\mu\text{m}$ i aperturze numerycznej 0,12. Następnie światło kierowane jest do wnęki powietrznej, szkła ZBLAN (5) i warstwy aktywnej (6). W ten sposób dla każdego z rdzeni (9.1, 9.2, 9.3) powstaje wielownękowy rezonator Fabry-Perot. W tym korzystnym przykładzie wykonania przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 1 \text{ }\mu\text{m}$, a grubość dołączonego szkła ZBLAN ma $b = 50 \text{ }\mu\text{m}$.

Przyłączaną substancją (6) jest polistyren o współczynniku załamania równy ok. 1,5. Substancja osadza się na powierzchni szkła ZBLAN (5) 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 w okolicy długości fali 1550 nm o ok. 4 nm, w okolicy długości fali 1450 nm o 1 nm, w okolicy długości fali 1310 nm o ok. 3 nm.

Przykład 4

Ten korzystny przykład wykonania został przedstawiony na fig. 5. Źródło (1), którym w tym przypadku jest lampa halogenowa emitująca światło z zakresu 400–700 nm, przyłączone jest poprzez światłowód dwójłomny (podtrzymujący polaryzację) oraz jednomodowy na długości fali pracy (4) do portu pierwszego (C.1) cyrkulatora utrzymującego polaryzację (3), a do portu drugiego (C.2) przyłączony jest światłowód dwójłomny (podtrzymujący polaryzację) oraz wejściowy jednomodowy na długości fali pracy (4), do którego przysunięty jest odcinek szkła ołowiowego (5) o współczynniku załamania 1,8, na którego czole znajduje się warstwa aktywna (6). Pomiedzy dołączonym kawałkiem szkła ołowiowego (5) a światłowodem wejściowym (4) powstaje przerwa powietrzna. Do portu trzeciego (C.3) cyrkulatora podtrzymującego polaryzację (3) dołączony jest detektor (2), którym w tym konkretnym przypadku jest spektroskop.

Wejściowy światłowód utrzymujący polaryzację (4) oraz odcinek szkła ołowiowego (5) pokryty warstwą aktywną (6) umieszczone są w szklanej kapilarze przeciętej wzdłuż jej długości tak, że ma on kształt litery U.

Światło poprzez cyrkulator podtrzymujący polaryzację (3) trafia do światłowodu dwójłomnego oraz wejściowego jednomodowego (4) o drodze zdudnień 3 mm dla długości fali 550 nm, gdzie poprzez przestrzeń powietrzną trafia na dołączony odcinek szkła ołowiowego (5) i warstwę aktywną (6). W ten sposób powstaje wielownękowy interferometr Fabry-Perot. Na detektorze (2) widoczne są prążki interferencyjne w dziedzinie spektralnej (długości fali), których przesunięcie i/lub kontrast zależy od zmiany parametrów wnęki. W tym korzystnym przykładzie wykonania przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ a grubość dołączonego szkła ołowiowego ma $b = 200 \text{ }\mu\text{m}$.

Światłowód przygotowuje się poprzez umieszczenie przez godzinę w roztworze zawierającym stężony kwas siarkowy i 30% perhydrol w stosunku objętościowym 3:1. Tak przygotowana powierzchnia (6) 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 0,05 nm dla długości fali 550 nm. Czujnik służy do detekcji poli(chlorowodoru alliloaminy).

Przykład 5

Ten korzystny przykład wykonania został przedstawiony na fig. 6. Czujnik falowodowy, w szczególności światłowodowy zrealizowany jest w technologii planarnej. Źródło, detektor oraz falowody są zintegrowane na jednej płycie planarnej. Źródło (1), którym w tym konkretnym przypadku jest wąskospektralne źródło światła przestrajalne w zakresie 1450–1600 nm, przyłączone jest poprzez wejściowy jednomodowy falowód planarny (4), do którego przyłączony jest odcinek szkła krzemionkowego (5). Pomiedzy będącym pod kątem $8,3^\circ$ czołem falowodu (4), a szkłem krzemionkowym (5) znajduje się przestrzeń powietrzna. Szkło krzemionkowe (5) pokryte jest z obu stron substancją (6) zmieniającą swoją grubość optyczną pod wpływem obecności innej substancji. Za warstwą substancji (6) pokrywającej szkło krzemionkowe (5) znajduje się wejściowy jednomodowy falowód planarny (4) o czole będącym pod kątem $8,3^\circ$ podłączony do detektora mocy (2).

Światło, poprzez wejściowy jednomodowy falowód planarny (4), bezpośrednio ze źródła (1) kierowane jest do przestrzeni powietrznej a następnie na substancję aktywną (6) pokrywającą kawałek szkła krzemionkowego (5). Następnie sygnał trafia na drugą warstwę substancji aktywnej (6). W ten sposób powstaje wielownękowy rezonator Fabry-Perot. W tym korzystnym przykładzie wykonania przestrzeń powietrzna ma szerokość $a = 2 \text{ }\mu\text{m}$ a grubość dołączonego szkła krzemionkowego (6) ma

$b = 125 \mu\text{m}$. Odległość między substancją aktywną (6) a czołem światłowodu jednomodowego jest równa $c = 2 \mu\text{m}$.

Przyłączaną substancją (6) jest etyloceluloza o współczynniku załamania równym ok. 1.4. Przyłącza się ją poprzez zanurzenie szkła krzemionkowego (5) w 0,5% roztworze w octanie butylu a następnie wyciągnięcie i wysuszenie. Kawałek szkła krzemionkowego (5) pokryty taką warstwą (6) reaguje na pary etanolu, który wywołuje pęcznienie warstwy. Zmiana grubości warstwy o ok. 50 nm powoduje przesunięcie prążków o ok. 14 nm dla długości fali 960 nm.

Zastrzeżenia patentowe

1. Czujnik falowodowy, według wynalazku zawierający co najmniej jedno źródło światła (1), co najmniej jeden detektor (2), co najmniej jeden sprzęgacz falowodowy, lub cyrkulator falowodowy (3), oraz falowód (4), jednordzeniowy lub wielordzeniowy, **znamienny tym**, że do wejściowego falowodu (4) jednordzeniowego lub wielordzeniowego przysunięty jest odcinek dielektryka (5), przeciwny koniec światłowodu wejściowego (4) przyłączony jest do sprzęgacza lub cyrkulatora (3), który to sprzęgacz lub cyrkulator (3) połączone są ze źródłem (1) i detektorem (2) a przestrzeń między końcem wejściowego falowodu (4), a przysuniętym do niego odcinkiem dielektryka (5) wypełniona jest gazem lub mieszaniną gazów, w szczególności powietrzem, lub cieczami z grupy fluorowodorów lub mieszaninami tych cieczy a co najmniej jedna z powierzchni dielektryka (5), przez którą propaguje się sygnał świetlny pokryta jest warstwą aktywną (6).
2. Czujnik według zastrz. 1, **znamienny tym**, że falowód (4) jest światłowodem.
3. Czujnik według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że cyrkulator (3) lub sprzęgacz (3) są elementami światłowodowymi.
4. Czujnik według zastrz. 1 albo 2 albo 3, **znamienny tym**, że pokrycie warstwą aktywną (6) powierzchni dielektryka (4) ma postać wybraną spośród:
 - pokrycia co najmniej jedną substancją aktywną chemicznie (6), do której może przyłączać się inna substancja,
 - pokrycie co najmniej jedną substancją aktywną chemicznie (6), która może się odłączać w wyniku oddziaływania środowiska,
 - pokrycie co najmniej jedną substancją aktywną chemicznie (6) zmieniającą swoje parametry, w szczególności grubość i/lub współczynnik załamania i/lub absorpcję w wyniku oddziaływania środowiska.
5. Czujnik według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4, **znamienny tym**, że substancja aktywna chemicznie (6) jest sorbentem substancji chemicznych z otoczenia i/lub substancją pęczniającą/kurczącą się pod wpływem czynników zewnętrznych i/lub substancją wiążącą substancje chemiczne z otoczenia.
6. Czujnik według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4 albo 5, **znamienny tym**, że przez pokrycie powierzchni dielektryka co najmniej jedną substancją aktywną chemicznie (6) ma postać naniesienia tej substancji lub jej mieszanin na powierzchnię dielektryka, w szczególności w obszarze, w którym znajduje się rdzeń światłowodu, jeśli dielektryk ma postać światłowodu z rdzeniem.
7. Czujnik według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4 albo 5 albo 6, **znamienny tym**, że falowód (4) jest falowodem podtrzymującym polaryzację, współpracujące z falowodem (4) elementy służące do konstrukcji układu pomiarowego są również elementami podtrzymującymi polaryzację.
8. Czujnik według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4 albo 5 albo 6 albo 7, **znamienny tym**, że falowód jest falowodem jednomodowym na wykorzystywanej długości fali.
9. Czujnik według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4 albo 5 albo 6 albo 7 albo 8, **znamienny tym**, że powierzchnie czoła falowodu (4), oraz dielektryka są równoległe.
10. Czujnik według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4 albo 5 albo 6 albo 7 albo 8 albo 9, **znamienny tym**, że stosunek drogi optycznej pomiędzy wejściowym falowodem (4), a przysuniętym do niego odcinkiem dielektryka (5) oraz drogi optycznej warstwy dielektryka (5) jest większy niż 0 i mniejszy bądź równy 0,2:

$$0 < \frac{a \cdot n_1}{b \cdot n_2} \leq 0,2$$

gdzie:

- a to odległość pomiędzy falowodem, a przysuniętym do niego odcinkiem dielektryka,
- n_1 to współczynnik załamania substancji, który wypełnia przestrzeń a ,
- b to grubość dielektryka,
- n_2 to współczynnik załamania materiału, z którego wykonany jest dielektryk.

11. Czujnik według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4 albo 5 albo 6 albo 7 albo 8, **znamienny tym**, że czoła falowodu (4) oraz odcinka dielektryka nie są nierównoległe, a stosunek współczynników odbicia od końca falowodu (4), w szczególności światłowodu do współczynnika odbicia od powierzchni dielektryka (6) spełnia warunek:

$$\frac{R_1}{R_2} \leq 0,5$$

gdzie:

- R_1 to współczynnik odbicia od końcówki falowodu, w szczególności światłowodu,
- R_2 to współczynnik odbicia od powierzchni dielektryka.

12. Czujnik według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4 albo 5 albo 6 albo 7 albo 8 albo 9 albo 10, **znamienny tym**, że różnica między współczynnikami załamania n_1 i n_2 jest większa lub równa niż 30% czyli: $\frac{|n_2 - n_1|}{n_1} \geq 0,3$.

Rysunki

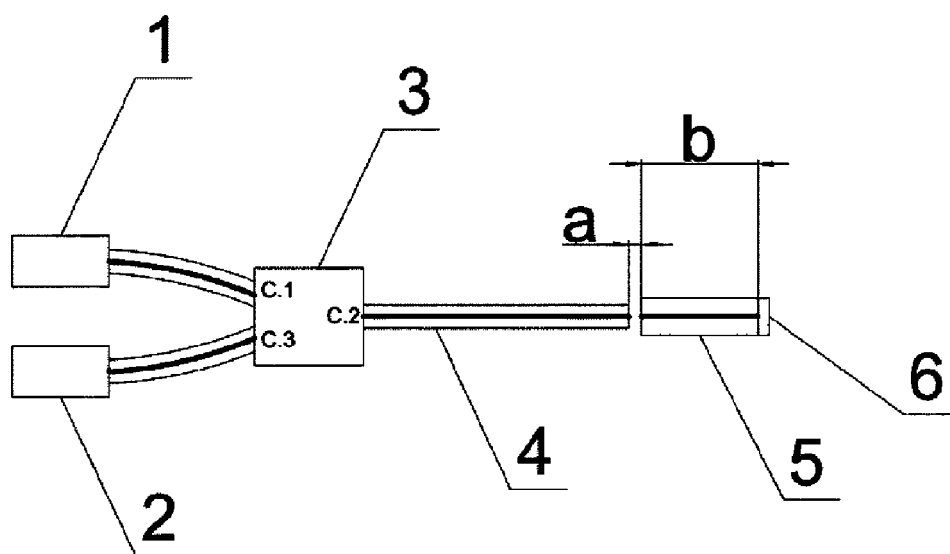


FIG.1

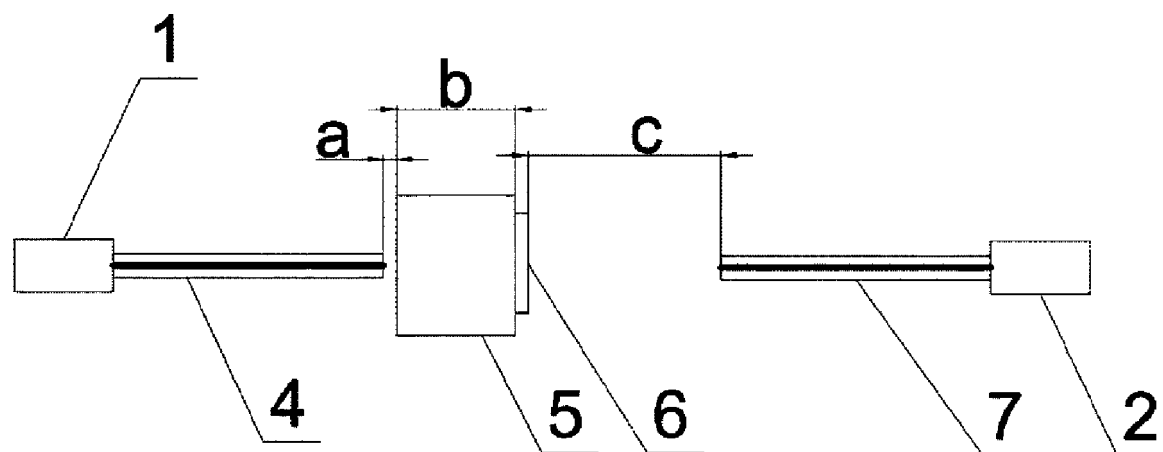


FIG.2

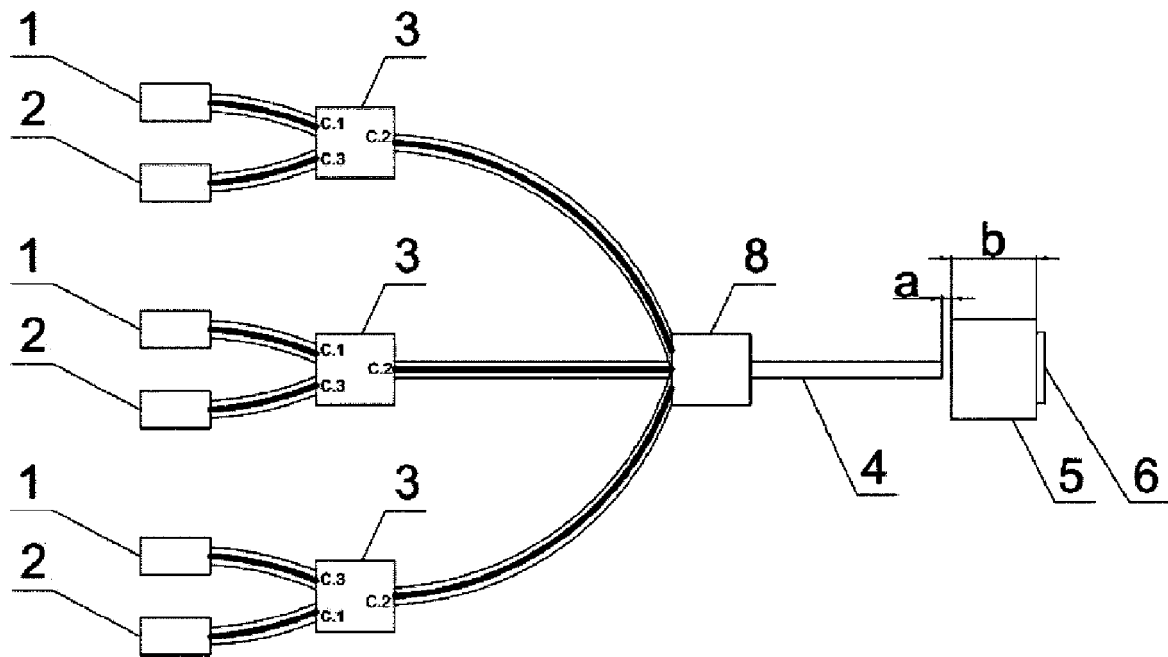


FIG. 3

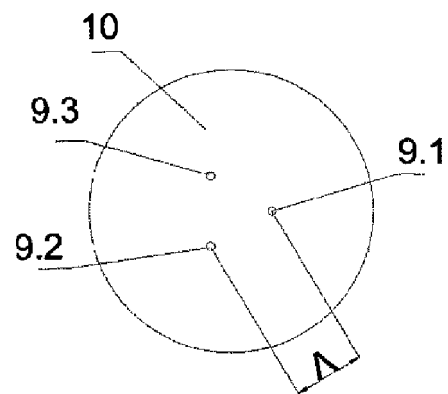


FIG. 4

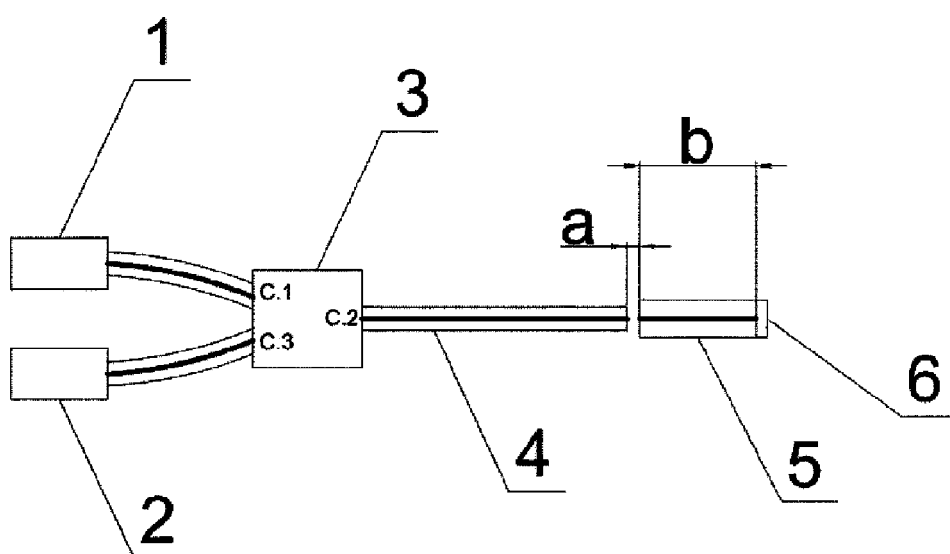


FIG. 5

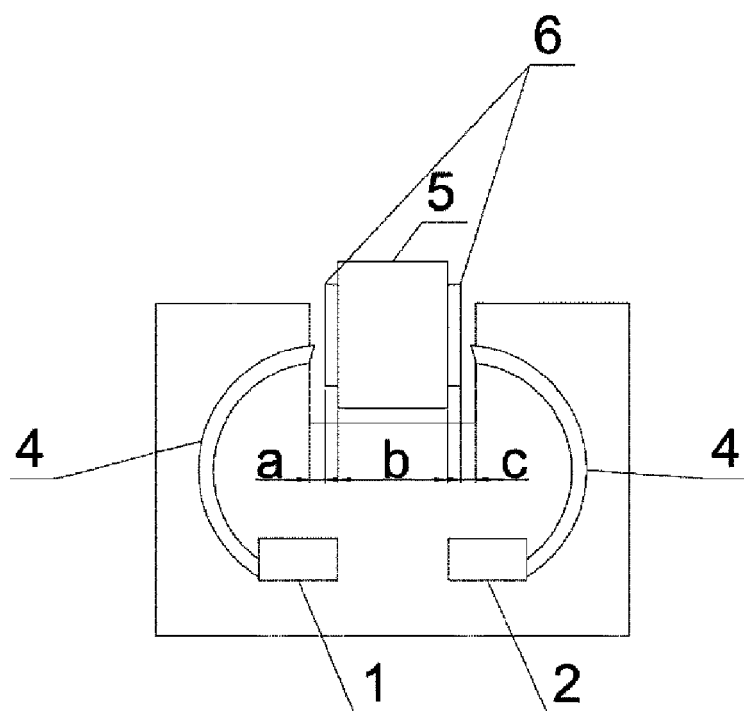


FIG. 6