(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第5506595号
(P5506595)

(45)発行日　平成26年5月28日(2014.5.28)　(24)登録日　平成26年3月28日(2014.3.28)

| (51)Int.Cl. | | F I | | |
|---|---|---|---|---|
| G01N 21/17 | (2006.01) | G01N | 21/17 | N |
| G01N 21/45 | (2006.01) | G01N | 21/45 | A |
| G01K 11/12 | (2006.01) | G01K | 11/12 | H |
| G01D 21/00 | (2006.01) | G01D | 21/00 | G |

請求項の数 16　外国語出願　(全 12 頁)

| | |
|---|---|
| (21)出願番号 | 特願2010-182809 (P2010-182809) |
| (22)出願日 | 平成22年8月18日 (2010.8.18) |
| (65)公開番号 | 特開2011-39063 (P2011-39063A) |
| (43)公開日 | 平成23年2月24日 (2011.2.24) |
| 審査請求日 | 平成22年12月17日 (2010.12.17) |
| (31)優先権主張番号 | 61/234,834 |
| (32)優先日 | 平成21年8月18日 (2009.8.18) |
| (33)優先権主張国 | 米国 (US) |
| (31)優先権主張番号 | 12/853,710 |
| (32)優先日 | 平成22年8月10日 (2010.8.10) |
| (33)優先権主張国 | 米国 (US) |

(73)特許権者　509094034
オーエフエス　ファイテル，エルエルシー
アメリカ合衆国　３００７１　ジョージア，ノアクロス，ノースイースト　エクスプレスウェイ　２０００
(74)代理人　100094112
弁理士　岡部　讓
(74)代理人　100085176
弁理士　加藤　伸晃
(74)代理人　100104352
弁理士　朝日　伸光
(74)代理人　100128657
弁理士　三山　勝巳
(74)代理人　100160967
弁理士　▲濱▼口　岳久

最終頁に続く

(54)【発明の名称】コイル状エバネッセント光学センサ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

周囲環境の所定のパラメータを解析するエバネッセント光学センサであって、

コイル半径Ｒ、コイル長さＬ、コイルの隣接し合う巻き相互間の空間であるピッチＰを示すように形成され、所定の半径ｒを有する光ファイバを備えた光ファイバコイルを備え、前記光ファイバコイルは入力および出力を有すると定められ、さらに、

伝搬する基本モードの光信号を複数のウィスパリング・ギャラリ・モードに変換する、前記光ファイバ・コイルの入口に配設された入力光学モード変換器を備え、前記複数のウィスパリング・ギャラリ・モードが、その後、前記光ファイバ・コイルに沿って伝搬し、さらに、

前記複数のウィスパリング・ギャラリ・モード間の干渉を考察し且つ関連の前記周囲環境の所定のパラメータを解析する、前記光ファイバ・コイルに結合された光学スペクトル解析構成とを備える、エバネッセント光学センサ。

【請求項２】

伝搬する前記複数のモードを捕え、次いで、前記複数のモードを光出力信号に変換する、前記光ファイバ・コイルの出力と前記光学スペクトル解析構成との間に配設された出力光学モード変換器をさらに備える、請求項１に記載のエバネッセント光学センサ。

【請求項３】

前記光ファイバ・コイルは標準的な単一モードのファイバのコイルを備える、請求項１に記載のエバネッセント光学センサ。

【請求項４】
前記光ファイバ・コイルは１０ミクロンから１００ミクロン程度の直径の光ファイバのコイルを備える、請求項１に記載のエバネッセント光学センサ。
【請求項５】
前記光ファイバ・コイルは光マイクロファイバのコイルを備える、請求項１に記載のエバネッセント光学センサ。
【請求項６】
解析された前記所定のパラメータは、温度、圧力、音、および屈折率からなる群から選択される、請求項１に記載のエバネッセント光学センサ。
【請求項７】
前記入力光学モード変換器は断熱モード変換器を備える、請求項１に記載のエバネッセント光学センサ。
【請求項８】
入力光学断熱モード変換器は先細りの光ファイバの部分を備える、請求項７に記載のエバネッセント光学センサ。
【請求項９】
前記出力光学モード変換器は断熱モード変換器を備える、請求項２に記載のエバネッセント光学センサ。
【請求項１０】
出力光学断熱モード変換器は先細りの光ファイバの部分を備える、請求項９に記載のエバネッセント光学センサ。
【請求項１１】
前記光ファイバ・コイルは、前記複数の伝搬するモードとしてウィスパリング・ギャラリ・モードを生成する、請求項１に記載のエバネッセント光学センサ。
【請求項１２】
周囲媒質の環境的変化を感知する方法であって、
解析すべき周囲媒質に、コイル半径Ｒ、コイル長さＬ、およびコイルの隣接し合う巻き相互間の空間であるピッチＰを示す光学コイルを浸漬し、
入力モード変換器を通じて前記光学コイルの入口に入力基本モード光信号を結合し、
前記入力基本モード光信号を複数のウィスパリング・ギャラリ・モードに変換し、前記複数のウィスパリング・ギャラリ・モードを前記光学コイルへ導入し、
前記周囲媒質に浸漬した前記光学コイルを通じて前記複数のウィスパリング・ギャラリ・モードを伝搬し、そして、
前記周囲媒質の環境的変化の存在を感知するために、前記光学コイルの出口において、前記複数のウィスパリング・ギャラリ・モード間の干渉と関連付けられる透過スペクトルを解析する、ことを含む方法。
【請求項１３】
前記光学コイルは光ファイバのコイルを備える、請求項１２に記載の方法。
【請求項１４】
前記光学コイルは光マイクロファイバのコイルを備える、請求項１２に記載の方法。
【請求項１５】
前記光学コイルの前記出口において、出力モード変換器を通じて前記複数のモードを伝搬することをさらに含む、請求項１２に記載の方法。
【請求項１６】
前記光学コイルは、複数のウィスパリング・ギャラリ伝搬モードを生成する、請求項１２に記載の方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
関連出願の相互参照

本出願は、２００９年８月１８日申請の米国特許仮出願第６１／２３４，８３４号の便益を主張するものであり、参照によって本明細書に組み込まれる。

【０００２】

本発明は、エバネッセント光学センサに関し、より詳細には、ファイバ・コイルの形態のエバネッセント光学センサに関する。

【背景技術】

【０００３】

光導波路、具体的には、光ファイバは、しばしば周囲媒質の変化を感知するために使用される。光学センサは、温度、圧力、音、屈折率などの様々なパラメータの変化を測定するために使用されている。多くの場合、これらの変化は、光がその周囲の中に配設された光導波路に沿って伝搬するので、その透過（または反射）スペクトルを監視することによって検出される。いくつかの光学センサは、周囲の環境中にエバネッセントに浸透する光学モードにより、光導波路を通じて伝搬する光の変化の検出に基づいたエバネッセント・センサとして機能する。

【０００４】

実際、エバネッセント波動吸収は、様々なタイプの環境的感知を行うための効果的な技術である。光のビームが光ファイバに沿って伝搬するとき、電磁場は、コア／クラッディング界面で、突然、ゼロに下がらない。そうではなく、入射ビームと、内部反射ビームとの重なりは、ファイバのコア領域に隣接する媒質内に浸透する場につながる。隣接する媒質の中に減衰するこの電磁場は、「エバネッセント場」と定められる。

【０００５】

周囲媒質パラメータの変化に対する透過（または反射）スペクトルの応答を強めるために、光学センサが、一般に、少なくとも２つの個別アームを有するマッハツェンダ干渉計（ＭＺＩ）として構成され、そのアームに沿って光信号が伝搬することになる。所与の波長λにおいて、Ｎ個アームのＭＺＩの出力パワーは、以下の方程式によって決められる。

【数１】

$$P = \left| \sum_{n=1}^{N} A_n \exp(iL_n\beta_n) \right|^2$$

ただし、$L_n$は、導波路ｎの長さとして定義され、$A_n$および$B_n$は、導波路ｎに沿って伝搬する特定の光信号の振幅係数および伝搬係数である。ｎ＝２、かつそれぞれのアームが同じ長さＬを有する単純な場合は、上述の方程式は、以下の関係式

【数２】

$$P = |A|^2 \{1 + \cos[L(\beta_1 - \beta_2)]\}$$

に変形する。例示的な測定パラメータｑ（ただし、ｑは、例えば、温度、屈折率などであってよい）の解析においては、ｑの変動は、伝搬係数のうちの少なくとも１つの変動、例えば$B_1$（ｑ）をもたらす。上述より、センサの感度は以下に比例することが明らかである。

【数３】

$$\left|\frac{\partial P}{\partial q}\right| = L\left|A \sin[\mathrm{L}(\beta_1 - \beta_2)]\right|\left|\frac{\partial \beta_1}{\delta q}\right|$$

したがって、その感度は、ＭＺＩアームの長さＬに比例的に高まることが分かる。この理由で、できるだけ長い干渉計アームを作製することが望ましい。一方、長さＬの増大は、センサの全体的な物理的大きさの増大をもたらす。センサの全体的な物理的大きさが増大することは、少なくとも２つの理由で望ましくない。第１に、これにより、測定の空間的な非局在化がもたらされ、それは、周囲が干渉計アームの長さについて変化し得るからである。第２に、多くの用途には、（例えば、「ラブ・オン・チップ」用途における）「小型」センサの使用が必要である。

【０００６】

平面フォトニック回路として使用されるように、折り畳まれ、または螺旋状に曲げられるフォトニック・ワイヤに基づいた小型ＭＺＩセンサを製造することは、以前に提案されている。しかし、これらのデバイスは、比較的高い損失を受けることが知られており、多くの用途に必要な感度の程度をもたらすことは不可能である。これらのフォトニック・ワイヤ・デバイスに／からの入力／出力結合はまた、問題をはらんでおり、システム内に望ましくない光学的損失をもたらす。

【０００７】

したがって、当技術分野には、より大きい、複数の部品構成と概括的に関連付けられる感度を示す「小型」光学センサの必要性が残っている。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００８】

従来技術に残っている必要性は、本発明によって対処され、本発明は、エバネッセント光学センサに関し、より詳細には、ファイバ・コイルの形態のエバネッセント光学センサに関する。

【課題を解決するための手段】

【０００９】

本発明により、エバネッセント光学センサが、光ファイバまたは光マイクロファイバのいずれかのコイルとして形成される。ファイバ／マイクロファイバをコイル状に巻くことによって、「直線経路」のファイバ・センサに比較すると、センサの大きさは著しく抑えられ、さらには同程度の感度を示す。例えば、長さ１５ｃｍの光ファイバの部分から形成される従来技術のセンサが、ここでは、寸法３ｍｍ×３ｍｍ×４ｍｍのコイルとして形成可能である。

【００１０】

動作中、光信号が、解析すべき周囲内に浸漬されたコイルに結合される。コイル構成の使用は、コイルを形成する湾曲したファイバ／マイクロファイバの表面から反射することによって、コイルに沿って伝搬することになる複数のウィスパリング・ギャラリ・モード（ＷＧＭ）の生成を結果的にもたらす。これらのモード（すなわち、少なくとも２つのモード）間の干渉は、コイルがその中に浸漬される周囲環境の特性の関数として修正される。つまり、環境的変化が、様々なモードによって「見られる」コイルの光路長の変動をもたらし、モード間／中の干渉は、コイルの出力における透過スペクトルを考察することによって解析される。

【００１１】

本発明のコイル状構造の緻密性の利点は、比較的「長い」従来技術のセンサと関連付けられる測定の空間的な非局在化が基本的に取り除かれることである。

【００１２】

本発明の他のおよびさらなる利点ならびに態様は、以下の議論の経過中に、および添付の図面を参照することによって明らかになるであろう。

以下、図面を参照する。

【図面の簡単な説明】

【００１３】

【図１】本発明によるエバネッセント光学センサとして有用な例示的なファイバ・コイル

の図である。
【図２】（複数のモードの伝搬を示す）複数個アームのＭＺＩ、および周囲「変動媒質」とのその相互作用の簡略図である。
【図３ａ】図１のコイルと関連付けられる数値モデリングを示し、コイルの長さに沿う例示的な場分布を示すグラフである。
【図３ｂ】図１のコイルと関連付けられる数値モデリングを示し、図１のコイルの出力における波長の関数としての例示的な透過パワーを示すグラフである。
【図３ｃ】比較するために含まれた従来のファイバ・ループ温度センサと関連付けられる透過パワーの従来技術のグラフである。
【図４】本発明により形成された例示的なコイル状ファイバ・エバネッセント光学センサの写真である。
【図５】本発明により形成された例示的なコイル状マイクロファイバ・エバネッセント光学センサの透過スペクトルを示す図である。
【図６ａ】図４ａのコイル状ファイバ・エバネッセント光学センサのための波長の関数としての透過パワーのグラフである。
【図６ｂ】図４ｂのコイル状ファイバ・エバネッセント光学センサのための波長の関数としての透過パワーのグラフである。
【発明を実施するための形態】
【００１４】
周囲環境の様々なパラメータ（例えば、温度、圧力、音響、屈折率など）を解析するために有用なエバネッセント光学センサが、光ファイバまたは光マイクロファイバのコイル状構成から形成される。本発明の目的のため、用語「マイクロファイバ」は、１ミクロン程度（あるいはファイバを通じて伝搬する光信号の波長より小さい／またはその波長程度）の直径のファイバとして定められる。本発明のコイル状センサは、（１０ミクロンから１００ミクロン程度の直径の）従来の光ファイバまたはマイクロファイバのいずれかから構成可能であることが企図され、ただし、様々な実施形態の感度における差の原因は、１つには、ファイバまたはマイクロファイバのいずれかの選択にあり得る。
【００１５】
図１は、本発明のエバネッセント光学センサを形成するために使用可能な例示的なコイル１０を示している。コイル１０は、光ファイバまたは光マイクロファイバのいずれかから形成可能であり、コイルの半径Ｒ、コイルの長さＬ、（コイルの隣接し合う巻き相互間の空間である）ピッチＰ、コイルを形成するファイバの半径ｒ、およびファイバ／マイクロファイバの屈折率プロファイルを含むが、それらに限定されないパラメータによって定められる。また、ファイバから形成される入力カプラが、光信号をコイル１０に導入するために使用される。入力カプラ１２は、モード変換器として機能して、伝搬する基本モードの光信号を複数の光信号モードに転送し、ただし、ファイバ・コイルの場合には、これらのモードは、コイル状ファイバの内面に反射することによって、コイル１０に沿って伝搬するウィスパリング・ギャラリ・モード（ＷＧＭ）の形態をとる。出力カプラ１４が、コイル１０から出ていく信号を捕えるために使用され、ただし、この信号は、その後、複数の伝搬モードの存在に基づいて、伝搬光信号のスペクトル（透過または反射）に対する周囲ベースの変化を調べるために、光学スペクトル・アナライザ１６（または他の適切なデバイス）に入力として供給される。
【００１６】
コイルの曲率半径Ｒは、（それぞれのカプラ１２、１４内の）無限大間で徐々に遷移され、信号として選択された値は、コイルそれ自体の内外に結合されることが好ましい（つまり、カプラ１２と１４は、断熱カプラおよびモード変換器の形態をとることが好ましい）。しかし、出力カプラ１４は、モード変換機能を行う必要はない。従来の「平面」光学センサに比較すると、本発明のコイル状構成は、比較的密な範囲の中に（さらなる感度をもたらす）長い光路長を生成する。
【００１７】

動作中、入ってくる光信号が、入力光カプラ１２の入口において、基本モードの信号として伝搬している。光カプラ１２は、その信号をコイル１０内に導入し、伝搬する光信号を複数のモードに、具体的には、その後、コイル１０に沿って伝搬することになるウィスパリング・ギャラリ・モード（ＷＧＭ）の形態で分割するために、モード変換器として機能し、ただし、少なくとも２つのモードが、出ていくためには必要である。コイル１０の外面により近いモード（複数可）は、周囲によって影響を受けるＬ$_1$Ｂ$_1$およびＬ$_2$Ｂ$_2$を示す図２に示すように、より大量の周囲と必然的に相互作用することになる。周囲は、モードによって「見られる」屈折率に影響を及ぼし、したがって、コイルの出力において、光信号のスペクトルに影響を及ぼすことになる。一実施形態における出力カプラ１４はまた、複数のモードを光出力信号に結合するモード変換器として機能することが可能であり、その信号は、その後、ＯＳＡ１６への入力として印加される。あるいは、複数モードの出力信号は、ＯＳＡ１６に直接、結合可能である。

【００１８】

図３ａおよびｂは、図１のコイル状ファイバ・センサ１０の数値的モデリングを実行する結果を示している。このモデリングでは、コイル１０は、（半径ｒが６２．５μｍの）標準的な単一モードのファイバから形成されると見なされた。コイルそれ自体は、半径Ｒが２．５ｍｍであるように形成され、コイル長さＬは４ｃｍが使用された。本発明により、コイル１０の感度は、周囲媒質の屈折率によって決まる。入力カプラ１２およびコイル１０の間の交点において、伝搬する入力信号の基本モードは、複数のモードに分割される。図３ａおよびｂの図面を作成するために使用されるシミュレーションは、ビーム伝搬法（ＢＰＭ）によって実行された。コイル１０に沿う場分布は、図３ａに示している。波長の関数としての透過パワーは、図３ｂに示している。比較の目的で含まれた図３ｃは、温度センサとして使用される従来技術の光ファイバ・ループ・センサについての透過スペクトルのグラフである。

【００１９】

この解析の目的で、コイル１０を囲む周囲媒質の屈折率は、曲線Ａに対して値１．０００に、および曲線Ｂに対して１．００１に設定された。透過パワーの特性振動は、図３ｃに示すように、従来技術のファイバ・ループ・センサと関連付けられる透過のものよりも比較的頻出することが分かる。また、曲線Ａの最大傾斜は、図３ｃの透過スペクトルの傾斜よりも約４０倍大きい。そのため、図３の考察から、０．００１による周囲媒質の屈折率の変動は、約１．２ｎｍ程度のスペクトル・シフトをもたらし、１２００ｎｍ／ＲＩＵ（屈折率単位）程度の感度のシフトを生じさせることが分かる。上述したように、感度は、適切な波長間隔を選択することによって、およびコイルそれ自体のパラメータを修正すること（例えば、ピッチを下げ、巻き数を増やすことなど）によって最適化可能である。

【００２０】

図４ａおよびｂは、例示的なコイル状ファイバ・センサのデジタル・カメラ写真であり、ただし、図４ａのコイルは、外径６ｍｍの石英管に巻かれ、図４ｂのコイルは、外径３ｍｍの石英管に巻かれている。両方の場合において、半径６２．５ミクロンの標準的な光ファイバが、作成される長さＬ４ｍｍのコイルを形成するために使用された。図４ａのコイルは、巻き１１回、ピッチ３７７μｍであり、２０７ｍｍのファイバを備える。このコイルの全体の大きさは、６ｍｍ×６ｍｍ×４ｍｍである。図４ｂのコイルは、巻き１６回、ピッチ２４５μｍであり、全体の大きさが３ｍｍ×３ｍｍ×４ｍｍの合計１５１ｍｍのファイバを備える。

【００２１】

図４ａおよびｂの例示的なコイル状ファイバ・センサが、エバネッセント屈折率測定センサとして使用される場合、それを考察した。具体的には、これらのコイルについての透過スペクトルの変動は、コイルが、水と、エタノール水溶液とに交互に浸漬されるときに、解析された。図４ａのコイルは、まず、水（屈折率１．３３３３）に浸漬され、その後、１０％エタノール槽（屈折率１．３３９）に浸漬され、次いで、２度目の水への浸漬、

最後に、２度目の１０％エタノール槽への浸漬が続いた。図４ｂのコイルは、水と、５％のエタノール溶液（屈折率１．３３６）との間で異なる槽に浸漬された。

【００２２】

より小さい直径の管に巻かれた図４ｂに示すコイルの方が、より優れた感度を示すことが分かった。測定の結果は、図６ａおよびｂに示し、図６ａのスペクトルは、図４ａのコイルと関連付けられ、図６ｂのスペクトルは、図４ｂのコイルと関連付けられる。屈折率変動によって生じるスペクトルの変位は、スペクトルの局所的なシフトおよび変形として明らかである。図６ａを参照すると、長方形で輪郭をとり、図面の右側に拡大された領域は、約０．４９ｎｍとして示されている最大シフトを受けた下落を示している。２つの溶液の屈折率相互間の知られている差（０．００６）から、このコイルの感度は、約８０ｎｍ／ＲＩＵであると推定された。同様の解析が、図６ｂの図面で行われた場合、それは、約１６０ｎｍ／ＲＩＵの（屈折率の差が０．００３である）感度もたらす。

【００２３】

上述したように、本発明のエバネッセントのコイル状光学センサは、標準的な光ファイバまたは光マイクロファイバのいずれかから形成可能である。図５ａおよびｂは、比較的小さい直径の石英棒に巻かれた光マイクロファイバの形態のコイルの透過スペクトルを示している。図５ａは、半径５ミクロンの光マイクロファイバにより形成され、半径０．５５ｍｍの石英棒に巻かれた例示的なコイルの５倍拡大図であり、図５ｂは、半径０．４５ミクロンの光マイクロファイバにより形成され、同様の石英棒に巻かれた例示的なコイルの１００倍拡大図である。

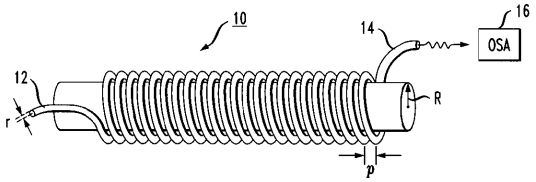
【００２４】

様々な修正形態をコイル状エバネッセント光学センサとともに使用して、その感度をさらに向上させることが可能である。例えば、比較的薄いファイバ（またはマイクロファイバ）、ならびに先細りの、かつ／またはコイル状の入力および出力カプラの使用は、システムにおける挿入損失を著しく抑えることになる。また、基本モードと、他の生成されたモードとの間のモード変換器として機能することも可能な入力および出力接続部の最適化は、干渉ＷＧＭの励起を可能にすることができ、それは、より大きな感度をもたらす。コイル状センサの感度はまた、コイルを形成するファイバおよびコイルそれ自体の両方の直径が小さくなるにつれて増大することになる。

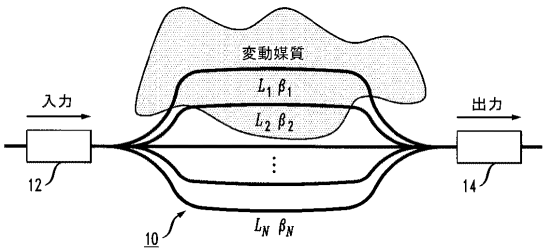
【００２５】

本発明を、具体的な実施形態を参照して具体的に説明し、示してきたが、当業者は、本明細書に添付の特許請求の範囲によって規定される本発明の趣旨および範囲から逸脱することなく、形態および詳細における様々な変更が、それらの実施形態に対してなされることが可能であることを理解すべきである。

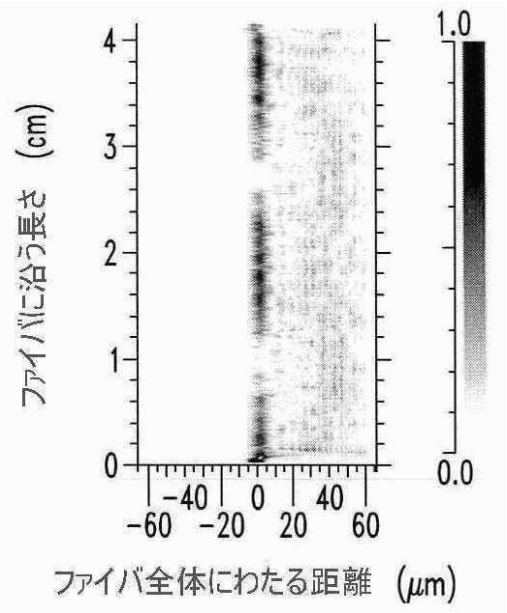
【図１】



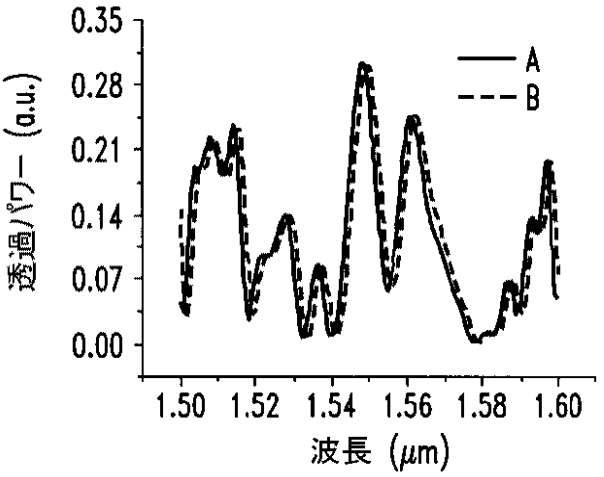

【図２】



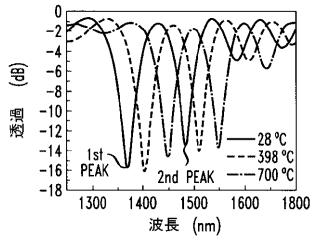

【図３ａ】



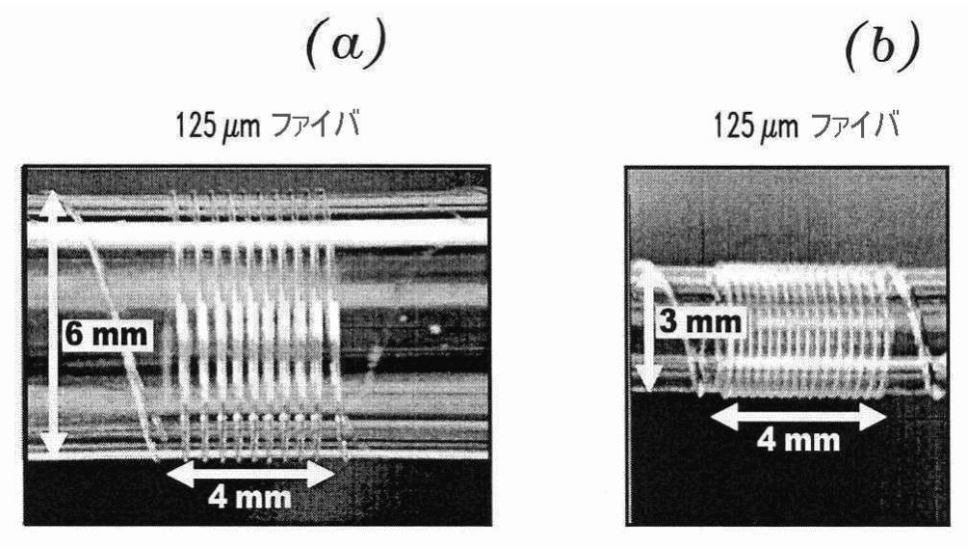

【図３ｂ】



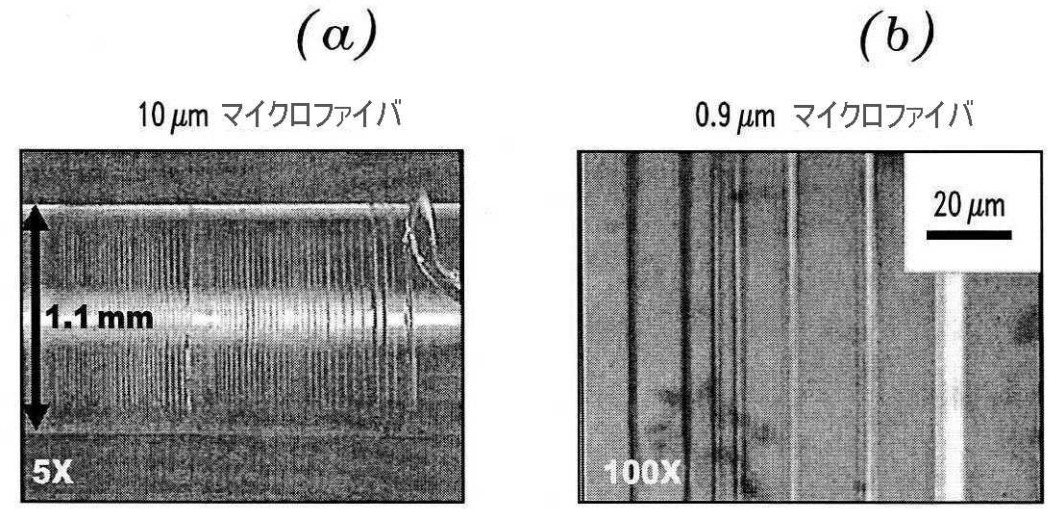

【図３ｃ】



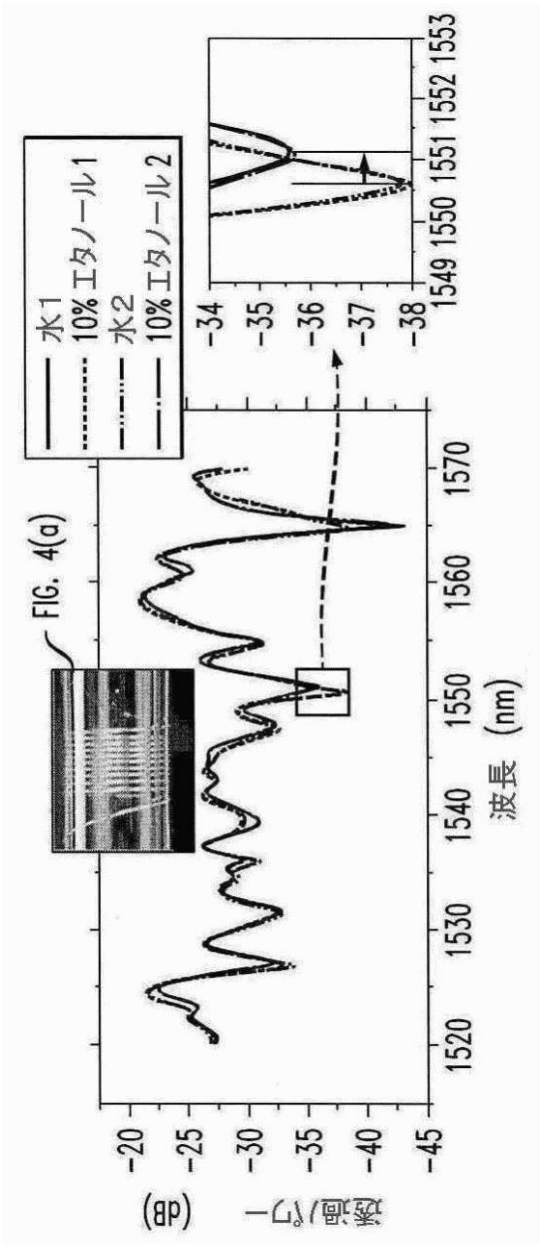
【図４】


(a)
125 μm ファイバ
6 mm
4 mm
(b)
125 μm ファイバ
3 mm
4 mm

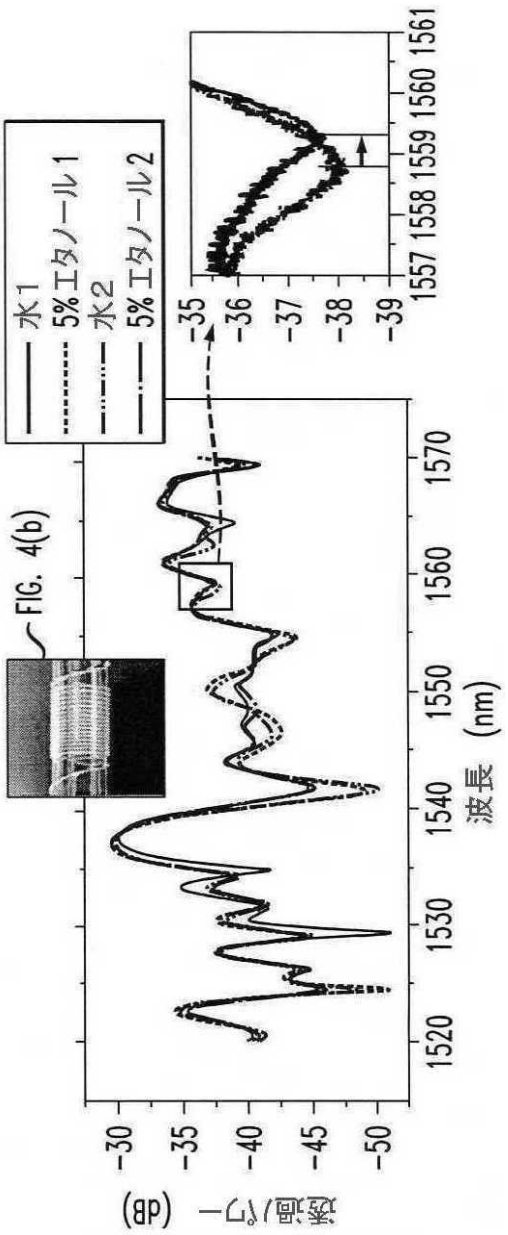
【図５】


(a)
10 μm マイクロファイバ
1.1 mm
5X
(b)
0.9 μm マイクロファイバ
20 μm
100X

【図６ａ】


水1
10%エタノール1
水2
10%エタノール2
FIG. 4(a)
透過パワー (dB)
波長 (nm)
-20
-25
-30
-35
-40
-45
1520
1530
1540
1550
1560
1570
-34
-35
-36
-37
-38
1549
1550
1551
1552
1553

【図６ｂ】


水1
5%エタノール1
水2
5%エタノール2
FIG. 4(b)
透過パワー (dB)
波長 (nm)
-30
-35
-40
-45
-50
1520
1530
1540
1550
1560
1570
-35
-36
-37
-38
-39
1557
1558
1559
1560
1561

フロントページの続き

(72)発明者　ミックハイル　サメットスキー
アメリカ合衆国　０８８０７　ニュージャーシィ，ブリッジウォーター，ボニー　コート　１００

審査官　横尾　雅一

(56)参考文献　特開昭６１－１７８６２２（ＪＰ，Ａ）
特開平０９－３２９５４６（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－０７５６４５（ＪＰ，Ａ）
特表２００３－５１５７３７（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ０１Ｎ２１／００－２１／６１