

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2008-107141
(P2008-107141A)

(43) 公開日 平成20年5月8日(2008.5.8)

(51) Int. Cl. F I テーマコード (参考)
GO 1 K 11/12 (2006.01) GO 1 K 11/12 Z 2 F 0 6 5
GO 1 B 11/16 (2006.01) GO 1 B 11/16 G

審査請求 有 請求項の数 11 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2006-288631 (P2006-288631)
 (22) 出願日 平成18年10月24日 (2006.10.24)

(71) 出願人 504237050
 独立行政法人国立高等専門学校機構
 東京都八王子市東浅川町701番2
 (72) 発明者 佐野 安一
 神奈川県逗子市久木4丁目22番の7
 Fターム(参考) 2F065 AA65 CC14 EE02 FF48 FF51
 GG24 JJ01 LL02 LL22 LL42

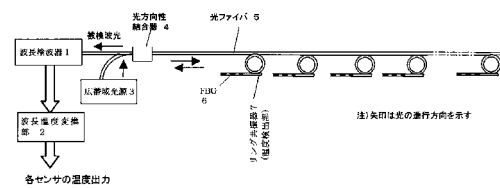
(54) 【発明の名称】 リング共振器とブラッググレーティングを用いた光波長検波型物理量計測センサ

(57) 【要約】

【課題】光ファイバ分布計測システムにおいて従来の分布計測システムの使用する波長帯域幅以下の波長帯域幅で接続可能なセンサ数を増加させ、かつセンサとしての応答速度を向上させる。

【解決手段】リング共振器と光ファイバブラッググレーティングあるいは導波路にブラッググレーティングを描画した導波路ブラッググレーティングを組み合わせるセンサとする。これにより従来、センサとして使用されていた光ファイバブラッググレーティングの反射帯域幅より遥かに狭いピコメータオーダの単一のスペクトルを得ることができ僅かな波長シフトでも帯域通過型の例えばファブリペロー干渉計を用いた波長検波器でSN良く波長を検出できる。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

広帯域光源からの光を光方向性結合器あるいはサーキュレータに入射させ該光方向性結合器あるいはサーキュレータからの出射光を光ファイバあるいは光導波路から成る光信号伝送ライン經由1個のセンサに導き、あるいは複数のセンサを光信号伝送ラインを用いて直列に接続した直列回路に導きこれら1個あるいは複数のセンサからの反射光は逆の経路をたどって光方向性結合器あるいはサーキュレータ經由波長検波器に導かれ該検波器において測定されたこれらセンサからの反射スペクトルを、あらかじめ測定したセンサの反射波長と温度との関係を記憶したメモリとそれを制御するための制御部からなる記憶装置に入力させることによりセンサが検出すべき温度の変化あるいは温度を測定する温度計測システムであって、前記各センサは1個のFBGあるいは光導波路にブラッググレーティングを描画した素子（以下WBG：Waveguide Bragg Grating）がリング共振器のドロップポートに接続されており前記光信号伝送ラインとは入射ポート及びスルーポートを介して接続されたことを特徴とした点型あるいは分布型温度計測システム

10

【請求項 2】

請求項 1 においてFBGあるいはWBGの半値全幅をリング共振器のフリースペクトルレンジよりも狭くしたことを特徴とする点型あるいは分布型温度計測システム

【請求項 3】

前記請求項 2 の分布型温度計測システムにおいてリング共振器及びFBGあるいはWBGは同一の温度に成る様に空間的に互いに近傍に配置されておりかつ該FBGあるいはWBGの反射中心波長の温度依存性は接続するリング共振器のスペクトルの温度依存性に等しいことを特徴とした点型あるいは分布型温度計測システム

20

【請求項 4】

前記請求項 3 の点型温度計測システムであってリング共振器の入射ポートとドロップポート間の楕型透過スペクトルのうち特定のスペクトルの変動の範囲はセンシング対象である温度の測定範囲に対応しておりかつ前記FBGあるいはWBGの反射波長帯域より狭いことを特徴とする点型温度計測システム

【請求項 5】

前記請求項 3 の分布型温度計測システムであってそれぞれのセンサを構成するリング共振器の入射ポートとドロップポート間の楕型透過スペクトルのうち特定の一つのスペクトルの変動の範囲はそれぞれのセンサが対象とする温度測定範囲に対応しておりかつそれぞれのセンサのリング共振器に接続されるFBGあるいはWBGの反射波長帯域より狭く、同時にこれらの反射波長帯域が互いに重なり合わないよう構成されたことを特徴とする分布型温度計測システム

30

【請求項 6】

広帯域光源からの光を光方向性結合器あるいはサーキュレータに入射させ該光方向性結合器あるいはサーキュレータからの出射光を光ファイバあるいは光導波路から成る光信号伝送ライン經由1個のセンサに導き、あるいは複数のセンサを光信号伝送ラインを用いて直列に接続した直列回路に導きこれら1個あるいは複数のセンサからの反射光は逆の経路をたどって光方向性結合器あるいはサーキュレータ經由波長検波器に導かれ該検波器において計測されたこれらセンサからの反射スペクトルを、あらかじめ測定したセンサの反射波長と歪との関係を記憶させたメモリとそれを制御するための制御部を含む記憶装置に入力させることによりセンサが検出すべき歪の変化あるいは歪を測定する歪計測システムであって、前記各センサは外力により発生する歪を検知するための第一のセンサ要素と該第一のセンサ要素の近傍に配置され該センサ要素と同一の温度とみなされ該温度を検知し第一のセンサ要素の温度特性を補正するための第二のセンサ要素とから構成されることを特徴とした点型あるいは分布型歪計測システム

40

【請求項 7】

請求項6において第一及び第二のセンサ要素はいずれも1個のリング共振器と該リング共振器のドロップポートにFBGが接続されているかあるいは該ドロップポート端部の光導波路

50

にWBGが構成されており第一及び第二のセンサ要素のリング共振器は第一のセンサ要素のリング共振器のスルーポートと第二のセンサ要素のリング共振器の入射ポートが接続されセンサとしての光入力かつ反射出力ポートは第一のセンサ要素のリング共振器の入射ポートであり光透過出力ポートは第二のセンサ要素のリング共振器のスルーポートであるか、あるいは第二のセンサ要素のリング共振器のスルーポートと第一のセンサ要素のリング共振器の入射ポートが接続されセンサとしての光入力かつ反射出力ポートは第二のセンサ要素のリング共振器の入射ポートであり光透過出力ポートは第一のセンサ要素のリング共振器のスルーポートであることを特徴とした点型あるいは分布型歪計測システム

【請求項 8】

請求項 7 に記した点型あるいは分布型歪計測システムであって歪は第一のセンサ要素のリング共振器にWBGの光軸に平行な方向に歪を印加することを特徴としたことを特徴とする点型あるいは分布型歪計測システム

10

【請求項 9】

請求項 8 に記した点型あるいは分布型歪計測システムであってリング共振器はレーストラック型の形状をしており該レーストラックの直線部はWBGの光軸と平行であり、更に該直線部の長さはレーストラックの曲線部よりも長くこれによりレーストラック型リングの歪による共振波長の変化はWBGの反射波長の変化にほぼ等しいことを特徴とする点型あるいは分布型歪計測システム

【請求項 10】

請求項 7 の点型歪計測システムであって第一のセンサ要素であるリング共振器の入射ポートとドロップポート間の櫛型透過スペクトルのうちの特定の一つのスペクトルの変動の範囲はセンシング対象である歪の測定範囲に対応しておりかつ該スペクトルの変動の範囲は該リング共振器に接続されるFBGあるいはWBGの反射波長帯域内にあることを特徴とし、更に第二のセンサ要素であるリング共振器の入射ポートとドロップポート間の櫛型透過スペクトルのうちの特定の一つのスペクトルの変動範囲はセンサが使用される温度変動範囲に対応しておりかつ該スペクトルの変動範囲は該リング共振器に接続されるFBGあるいはWBGの反射波長帯域内にあることを特徴とした点型歪計測システム

20

【請求項 11】

前記請求項 7 の分布型歪計測システムであってそれぞれのセンサを構成する歪検出用センサ要素のリング共振器の入射ポートとドロップポート間の櫛型透過スペクトルのうち各リング共振器の特定のスペクトルの変動の範囲は複数のセンサそれぞれが対象とする歪測定範囲に対応しておりかつ該これらのスペクトルの変動範囲はこれらリング共振器に接続されるFBGあるいはWBGの反射波長帯域内にあり、更にこれらの歪検出用リング共振器と対であってこれらリング共振器に隣接する補正用温度検出センサ要素各々のリング共振器の入射ポートとドロップポート間の櫛型透過スペクトルのうち各リング共振器ごとに特定な一つのスペクトルの変動範囲はセンサそれぞれの使用温度の変動範囲に対応しておりかつ該スペクトルの変動範囲は該これらのリング共振器に接続されるFBGあるいはWBGの反射波長帯域内にあり、同時にこれらのFBGあるいはWBGいずれの反射波長帯域は互いに重なり合わないよう構成されたことを特徴とした分布型歪計測システム

30

【発明の詳細な説明】

40

【技術分野】

【0001】

光ファイバブラッググレーティング（以下FBG）を用いた分布型光ファイバセンサの技術分野に関する。

【背景技術】

【0002】

本発明の背景技術としては第一の背景技術、第二の背景技術、第三の背景技術および第四の背景技術がある。まず、第一の背景技術につき説明する。図10を用いて従来技術を用いた分布型温度センサについて説明する。広帯域光源 3 からの光は光方向性結合器 4 を経てシングルモードファイバ（以下SMF）に入力され該SMFには 1 個または複数のFBGが描画

50

されている。検出すべき温度はセンサのFBGの反射中心波長とリンクするため、これらの反射中心波長を測定することにより各センサの温度を測定することができる。各々のFBGの反射中心波長はそれらの帯域幅も含め互いにすべての測定範囲に亘ってオーバーラップしないようにシステム設計されている。FBGからの反射光は前記SMFを逆にたどって光源側に戻っていき光源直前に設置されている前記光方向性結合器4によりファブリペロー干渉計型波長検波器1などの波長検波器1に入力される。各々のFBGの反射中心波長は該ファブリペロー干渉計により測定される。ファブリペロー干渉計は狭帯域な櫛型帯域通過フィルタである。この通過帯域は例えば圧電素子などを使用し該干渉計の半透鏡の間隔を繰り返し該圧電素子に印加する電圧により変化させることができるため例えば該印加電圧を鋸波状に変化させれば前記ファブリペロー干渉計の狭帯域な櫛型帯域通過フィルタスペクトルも周期的に変化する。図11はこの従来技術を用いた分布型温度計測システムのスペクトラムの相関を示す図である。使用される複数のFBGの占有する全波長帯域より広いフリースペクトルレンジ（以下FSR）になるようにファブリペロー干渉計を設計しておく。更にファブリペロー干渉計の複数存在する通過中心波長の内の1つ通過中心波長が前記圧電素子に印加する電圧の変化でFSRだけ掃引される。これにより各々のFBGの反射光の反射中心波長は該ファブリペロー干渉計からの出射光量を前記圧電素子への印加電圧とリンクして観測することにより印加電圧がいくらのとき最大になるかを計測することができる。一方あらかじめ該印加電圧と前記複数のFBGの占有する全波長帯域内に存在する単一のファブリペロー干渉計の透過スペクトル中心波長との関係は測定されており、このためファブリペロー干渉計からの出射光量を極大にする前記印加電圧を測定することにより前記複数のFBGの反射中心波長を測定することができる（非特許文献1参照）。これらあらかじめ各センサの反射中心波長と温度との関係を測定しておきデータとして例えばProgramable Read Only Memory（以下PROM）に記憶しておき波長歪変換部を構成するメモリとなる。波長変換部は波長検波器1に接続され入力されてきた各センサの波長に対応した各センサの温度を出力する。

10

20

【0003】

次に第二の背景技術である分布型の歪センサシステムに関する技術について説明する。このうちの1つの技術は基本的には前記温度センサと同じ構成のものであってそのシステム構成を図12に示す。これは温度ではなくFBGに印加される歪の検出を行うものであり「非特許文献2」により公知の技術である。また光導波路にブラッググレーティングを描画した素子（以下WBG: Waveguide Bragg Grating）の歪による信号と温度による信号を分離するための技術が「非特許文献6」により知られている。この技術はセンサを2つのWBGから構成するものであって、空間的に互いに近傍に配置し両者がほぼ同一の温度になるようにし、かつ一方には外部から歪が印加でき他方には歪は印加できないような構造になっている。歪が印加されない構造になっているWBGからは補正用温度信号を得、歪が印加される構造になっているWBGからは歪と温度の両方の影響を受けた信号が得られ前記補正用温度信号を用いて歪信号のみを検出する歪検出技術である。

30

【0004】

次に第三の背景技術につき説明する。この技術は光通信の分野で波長多重通信のために研究されているリング共振器に関する技術である。リング共振器は波長多重通信のための狭帯域アド/ドロップ光フィルタであり、2入力2出力の光方向性結合器を2つ用いて光導波路ループが出来るように該2つの光方向性結合器を接続した構成になっている。接続されず残った光方向性結合器の4つの入出射端子のうち1つは光入射ポート、1つはスルーポート、1つはドロップポート、他の1つはアドポートとして使用される。光入射ポートからスルーポートへの透過率は繰り返しの櫛形バンドリジエクトフィルタ特性を示す。また光入射ポートからドロップポートへの透過率は繰り返しの櫛形バンドパスフィルタ特性を示す。更にアドポートからスルーポートへの透過特性も櫛形バンドパスフィルタ特性を示す（非特許文献3、非特許文献4、非特許文献5参照）。

40

【0005】

次に第四の背景技術につき説明する。第四の背景技術は光導波路にブラッググレーティン

50

グを描画する技術である。コアにゲルマニウムをドープしたSiO₂を用いた場合が報告されている（非特許文献6参照）。またブラッググレーティングではないがTa₂O₅-SiO₂からなるコアの屈折率を紫外線でトリミングできることが報告されている（非特許文献3参照）。

【非特許文献1】P. Eigenraam, B. S. Douma, A. P. Koopman, Applications of Fiber Optic Sensors & Instrumentation in the Oil and Gas Industry, in Proc. of OFS-13, pp602-607, 1999

【非特許文献2】A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter, Optics Lett. Vol. 18, No.16, pp.1370-1372, 1993

【非特許文献3】「マイクロリング共振器型光ルーティング素子」国分泰雄、応用物理、第72巻、第11号、pp1364 - 1373、2003年

【非特許文献4】S. Suzuki, K. Oda, and Y. Hibino, Integrated-Optic Double-Ring Resonators with a Wide Spectral Range of 100GHz, J. Lightwave Technol., vol.13 no.8, pp.1766-1771,1995

【非特許文献5】B. E. Little, S. T. Chu, W. Pan, D. Ripin, T. Kaneko, Y. Kokubun and E. Ippen, Vertically Coupled Glass Microring Resonator Channel Dropping Filter, IEEE Photon. Technol. Lett, vol.11, no.2, pp215-217,1999

【非特許文献6】Y. Sano, T. Hirayama, J. K. Kurihara, T. Goto, K. Taniguchi, J. Nishii, K. Kintaka, and T. Yoshino, Planar Waveguide Bragg Grating Pressure Sensor on a Micro-Machined Silicon Diaphragm, in Proc. of OFS-16, pp694-697, 2003

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

10

20

FBGの反射スペクトルは一般にガウス関数で与えられそのピークにおける波長に対するスペクトル密度の微分係数は零である。従って中心波長近傍の波長ではファブリペロー干渉計を經由し受光素子へ入力する光量の差は非常に小さい。一般にFBGの半値全幅(以下FWHM)は狭くても100pm程度である。FBGの反射スペクトルをガウス関数で表し、FBGのFWHMを100pm、広帯域光源3の代表的な光パワー密度-10dBm/nmの光がFBGに入力したとし反射中心波長の反射率を100%とする。ファブリペロー干渉計のFWHMを15.5pmピーク透過率100%としこれを簡単のためピーク透過率100%底辺31pmの二等辺三角形形状のスペクトルとすれば、FBGの反射中心波長とファブリペロー干渉計の透過中心波長が一致した場合、 $(100\mu W/nm) \times 0.5 \times 15.5pm = 725pW$ の光量が受光素子へ入射する。一般に光パワーメータの最高感度が-90dBm(=1pW)程度であることから考えFBGの中心波長がXpmシフトして1pWの光量の変化が発生したとしXを求めると $(100\mu W/nm) \times 0.5 \times 15.5pm - (100\mu W/nm) \times 0.5 \times 15.5pm \times \exp\{-4(\ln 2) \times (Xpm)^2 / (100pm)^2\} = 1pW$ よりXは2.25pmとなる。すなわち理論的には受光回路自身で発生する回路ノイズだけで2.25pm程度の測定誤差が発生することになる。加えて受光素子への外来電磁ノイズが受光回路内で発生するノイズに重畳されるため実際の波長測定誤差は2.25pmよりも大きく(2.25+α)pmとなる。従来の電気方式の温度、歪センサなどのダイナミックレンジ(=測定範囲/測定分解能)は少なくとも1000以上はあるのでこれに対応するためにはFBGの波長変化を測定範囲で(2.25+α)pm×1000=(2.25+α)nmとしなければならない。1つのFBGで(2.25+α)nmの帯域を占有するのでCバンドの帯域幅の約50nmで考えると多重できるFBGの数22個程度とあまり多くの数ではなく分布計測の意味が小さく波長の利用率が低いという課題があった。従来技術では多重数を多くする目的で上記回路内部で発生するノイズを少なくすべく多数回測定によりその平均値をデータとして使用することが必要となり結局計測速度が遅くなるという課題があった。

【課題を解決するための手段】

【0007】

リング共振器とFBGまたは導波路にブラッググレーティングを描画した素子(以下WBG)からセンサを構成する。このセンサは従来のFBGに相当するものでこれ以外の広帯域光源3、光方向性結合器4、ファブリペロー干渉計からなる波長検波器1、SMFなどは上記従来の分布計測システムと同様である。FBGまたはWBGはリング共振器のドロップポートに接続される。該共振器のアポートにはなにも接続しない。SMFは入射ポートに接続されスルーポートは再びSMFに接続され次のセンサを構成するリング共振器の入射ポートに接続されていく。

【0008】

リング共振器のドロップポートにFBGあるいはWBGではなく広帯域の反射フィルタで反射させた場合、再度リング共振器を経て光方向性結合器經由その同様に繰返し櫛型スペクトル特性を持った帯域通過フィルタのファブリペロー干渉計を通したのでは測定すべき波長帯域以外でも両者のスペクトル特性が一致するチャンスが発生し本来の測定波長とは大幅に異なった出力する場合が発生する。これを防ぐためにリング共振器と帯域反射フィルタ特性を持つFBGまたはWBGと組合せる。これによりリング共振器7の櫛型の繰返し透過特性は取り除かれ櫛型フィルタスペクトルのうちの1つのスペクトルだけがFBGまたはWBGで反射された後リング共振器の入射ポート10、光方向性結合器4を經由して例えばファブリペロー干渉計からなる波長検波器1へ入力される。

【0009】

温度あるいは歪などの物理量などの変化により発生するFBGの反射中心波長の波長シフト量と、該FBGの反射帯域内のリング共振器7の入射ポート/ドロップポート間の透過スベ

クトルの中心波長の波長シフト量が同一になるように両者は同一の材料で構成する。これにより確実にFBGの反射波長領域内にリング共振器7の線スペクトル1個だけが存在することとなり、前述のような櫛型繰り返しスペクトル特性をもったものどうしを組み合わせた場合に発生するような大きな測定誤差は発生しなくなる。

【発明の効果】

【0010】

次に波長検波器1のファブリペロー干渉計およびセンサの FWHM、FSR はいずれも 15.5pm、26.6nm とし（この実現性については後述の「発明の実施の形態」で記述する）、センサの波長が 0.1pm 変化した場合受光素子が受光する電力の変化量を求める。簡単のためセンサの FBG 及びリング共振器7を合わせた総合的な反射率を中心波長で1、また波長検波器1のファブリペロー干渉計も中心波長で透過率1、更にこれらのスペクトルは底辺31pmの二等辺三角形形状（FWHM=15.5pmに相当）とし、センサへの入射光量は前述の従来技術の場合と同じ-10dBm/nm=100μW/nmとするとその差は

$$\begin{aligned}
 & 100\mu W / nm \times \int_{0pm}^{5.5pm} \left(\frac{\lambda}{15.5pm} \right)^2 d\lambda + 100\mu W / nm \times \int_{5.5pm}^{1pm} \left(\frac{\lambda}{15.5pm} \right) \left(\frac{-\lambda}{15.5} + 2 \right) d\lambda \\
 & - 100\mu W / nm \times \int_{0.1pm}^{5.5pm} \left(\frac{\lambda}{15.5pm} \right) \left(\frac{\lambda}{15.5pm} - \frac{1}{15.5pm} \right) d\lambda - 100\mu W / nm \times \int_{5.5pm}^{5.6pm} \left(\frac{\lambda}{15.5pm} - \frac{1}{15.5pm} \right) \left(\frac{-\lambda}{15.5pm} + 2 \right) d\lambda \\
 & - 100\mu W / nm \times \int_{5.6pm}^{1pm} \left(\frac{-\lambda}{15.5pm} + 2 \right) \left(\frac{-\lambda}{15.5pm} + \frac{32}{15.5pm} \right) d\lambda = 516pW
 \end{aligned}$$

となる。前述の従来技術では受光素子への入力変化は 2.25pm の波長のシフトで 1pW であったのに比べると 0.1pm 変化で 516pW もの大きなパワー変化が受光素子への入力変化として生じ外来電磁ノイズに対しても安定なセンサとすることができる。さらに 516pW の光量変化は充分弁別できる変化であるので 0.1pm の波長分解能を実現できる。ダイナミックレンジを従来技術と同様に 1000 とすれば測定範囲は 0.1nm の波長範囲に相当する。このとき C バンドの 50nm 帯に接続可能なセンサ数は 50nm/0.1nm=500 個となり従来技術の 22 個より遥かに多数のセンサを接続できることになり波長利用効率は格段に良くなる。更に 0.1pm の波長シフトで従来の 1pW に比べ 516pW の光量変化があるためその分耐外来電磁ノイズ性能が向上する。また平均化処理も光量変化が大きいため平均回数を従来よりも減らすことができる。このためセンサとしての応答速度を従来よりも高速にできる効果がある。

【実施例】

【0011】

第一の発明の実施形態の分布型温度計測システムの全体構成を図1に示す。図2は図1に示すシステムのキーとなるセンサの構成を示す。図1において広帯域光源3から出射した光はSMF、光方向性結合器4を経てSMFに入射する。このSMFにはセンサが1個あるいは複数直列に接続されている。センサに入射した広帯域光は線スペクトルになって反射され光方向性結合器4経由ファブリペロー型干渉計からなる波長検波器1に入射する。入射した光の波長はこの検波器で波長が計測される。それぞれのセンサはそれぞれのセンサに与えられる温度の変化によって後述の理由から反射波長が変化する。したがってそれぞれのセンサの反射波長を波長検波器1で検波することにより各センサでの温度を測定できる。

【 0 0 1 2 】

センサの反射波長が温度、歪などの物理量により変化する理由を述べる。センサは図2に示すようにリング共振器7とFBGから構成されている。SMFとは入射ポート10及びスルーポート11により接続される。リング共振器7のアドポートには何も接続せずドロップポート15にはFBGが接続されるかあるいはドロップポート15端部の光導波路にWBG14が構成されている。WBG14の複素反射率を $R_f(\lambda)$ を結合波方程式から求め、リング共振器7の入射ポート11からドロップポート15への複素透過率を $T_r(\lambda)$ とすると本発明のセンサの反射率 $|R(\lambda)|$ は(1)式で示される。

$$|R(\lambda)| = |R_f(\lambda)T_r^2(\lambda)|, \quad (1)$$

10

但し

$$|R_f(\lambda)| = \frac{4\kappa^2 \sin^2(\omega L_0)}{\Theta^2 \sin^2(\omega L_0/2) + \omega^2 \cos^2(\omega L_0/2)}, \quad (2)$$

$$|T_r^2(\lambda)| = \frac{\sin^4(\kappa'l) \exp(-\alpha L)}{\left[\{1 - \cos^2(\kappa'l) \exp(-\alpha L)\}^2 + 4 \cos^2(\kappa'l) \exp(-\alpha L) \sin^2\left(\frac{\pi m' L}{\lambda}\right) \right]}, \quad (3)$$

20

$\omega = \sqrt{\Theta^2 - 4\kappa^2}$, $\Theta = \pi^2(\lambda - \lambda_B)/(\Lambda^2 n_0)$, $\lambda_B = 2n\Lambda$, $\kappa = \pi(n_0 - n)/\lambda$, L はリング共振器7のコア長、 L_0 はFBGの長さ、 l はリング共振器7の光方向性結合部の結合長、 α はリング共振器7の単位長さ当たりの電力損失係数、 κ' はリング共振器7の光方向性結合部の結合長、 n_0 はFBGまたはWBG14のコア部の平均屈折率、 n はWBGの基底屈折率、 n' は図2のリングコアの実効屈折率、 Λ はFBGまたはWBGのグレーティング周期、 λ は波長である。ここでWBG長 $L_0 = 3 \text{ mm}$ 、WBGの基底屈折率 $n = 1.451$ 、グレーティング周期 $\Lambda = 533.96 \text{ nm}$ 、平均屈折率 $n_0 = 1.45125$ 、リング長 $L = 62.83 \mu \text{ m}$ 、リングコア実効屈折率 $n' = 1.751$ 、 $\kappa'l = 0.0036$ 、 $\alpha L = 0.0036$ として(3)式により m を共振次数としてFSRを求めると1550nm近傍では m を共振次数として $m=70$ の場合共振波長は1549.557nm、 $m=71$ の場合共振波長は1571.693の差としてFSR=22.1nmとなる。このときのWBGの反射率を $|R_f(\lambda)|$ とリング共振器7の透過率 $|T_r(\lambda)|$ を図3に示す。また図3と同じ波長範囲でのセンサの複素反射率 $|R(\lambda)|$ を図4に示す。図4に示すスペクトルを拡大した図を図5に示す。これからセンサのFWHMは15.5pmであることがわかる。

30

40

【 0 0 1 3 】

次に(1),(2),(3)式から分かるように図2に示すリング共振器7はその $n'L$ 積の値によって共振波長が変化する。温度 T の変化に対する nL 積の変化は次のように(4)式で示される。

$$\frac{d(n'L)}{dT} = \frac{\partial(n'L)}{\partial n'} \frac{dn'}{dT} + \frac{\partial(n'L)}{\partial L} \frac{dL}{dT} = L \frac{dn'}{dT} + n' \frac{dL}{dT} \quad (4)$$

この式からリング長 L の熱膨張係数、及びリング導波路13のコア屈折率 n' の温度依存係数がゼロでなければ温度変化により $n'L$ 積が変化し共振波長が変化する。実際温度により共振波長が温度により変化することは公知である(非特許文献3参照)。また非特許文献4によれば、ゲルマニウムをドーブした SiO_2 コアの場合 $12\text{pm}/^\circ\text{C}$ であることが知られている。これはリングに印加される歪についても同様であることが(4)式から分かる。即ちリング共振器7の共振波長はその温度によって変化し印加される歪によっても変化する。

10

【0014】

一方、温度の如何にかかわらずセンサから反射するスペクトルを1つの線スペクトルにするためにはWBGの反射波長 λ_B とリング共振器7の共振波長 λ_f の温度変化に対する変化の割合を同じにすればよい。そのためには上述のように $\lambda_B = 2n\Lambda$ であるので温度により λ_B は

20

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = \frac{\partial(2n\Lambda)}{\partial n} \frac{dn}{dT} + \frac{\partial(2n\Lambda)}{\partial \Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} = 2\Lambda \frac{dn}{dT} + 2n \frac{d\Lambda}{dT} \quad (5)$$

の様に変化する。また λ_f は m を自然数とすると $\lambda_f = 2n'L/m$ であり(5)と同様にして

$$\frac{d\lambda_f}{dT} = \frac{\partial(2n'L/m)}{\partial n'} \frac{dn'}{dT} + \frac{\partial(2n'L/m)}{\partial(L/m)} \frac{d(L/m)}{dT} = 2(L/m) \frac{dn'}{dT} + 2n' \frac{d(L/m)}{dT} \quad (6)$$

30

を得る。従って $L/m = \Lambda$ になるように設計しかつコア屈折率の温度依存性及び、 L/m と Λ の熱膨張係数を同一にすれば $n' \cong n$ であるのでWBGの反射波長 λ_B とリング共振器7の共振波長 λ_f の温度変化に対する変化の割合は同じになる。これは近似的にはWBGとリング共振器7を構成する材料を同一にすればよいことは明らかである。WBGの反射帯域内にリング共振器7の共振波長の線スペクトルが1本存在するような測定範囲であれば仮にこれらの変化の割合が同じでなくてもよいことは明らかである。

40

【0015】

実際のリング共振器7の製作方法を図2を用いて次に述べる。製作方法は従来知られているリング共振器の製作プロセス(非特許文献5参照)と同じである。シリコン8のサブストレートの上にクラッド層として SiO_2 を成膜しその上に直線導波路12のコアに相当する層として Ta_2O_5 - SiO_2 をRFスパッタにより成膜する。そしてCrマスクと CF_4 を用いたドライエッチングによりコアを形成する。コア屈折率は Ta_2O_5 と SiO_2 の%モル比で種々の値に制御できる。 Ta_2O_5 が30%モル比 SiO_2 が70%モル比のとき Ta_2O_5 - SiO_2 の屈折率は1.7825と成る。コア形成後 SiO_2 膜を更に成膜しクラッド9を構成しこのプロセスで直線導波路12が完成する。更にこの上にリング導波路13を形成するために Ta_2O_5 - SiO_2 をRFスパッタにより成膜する。そして直線導波路12の場合と同じようにCrマスクと CF_4 を用いたドライエッチングによりリング導波路13のコアを形成する。このリング導波路13のクラッ

50

ドはエアクラッドである。

【 0 0 1 6 】

次にWBG14の製作方法を述べる。この方法はアルゴンレーザの波長244nmの2次高調波をコアに照射すると屈折率が変化する（非特許文献3参照）ことを利用する。この紫外線をフェーズマスクを通してコアに照射すればWBG14を構成できる。もちろん直線導波路12のコアがゲルマニウムドープのSiO₂で構成されているものであっても同様な方法でWBG14を構成できる（非特許文献6参照）。図3のWBG14のスペクトルはコアはゲルマニウムドープのSiO₂で設計している。

【 0 0 1 7 】

図6は本発明の技術を用いた分布型温度計測システムのスペクトラムの相関を示す図である。各々のセンサからの反射中心波長はセンサを構成するWBGの帯域幅も含め互いにすべての測定範囲に亘ってオーバーラップしないようにシステム設計されている。使用される複数のFBGの占有する全波長帯域より広いFSRになるようにファブリペロー干渉計を設計しておく。更にファブリペロー干渉計の複数存在する通過中心波長の内の1つ通過中心波長が圧電素子に印加する電圧の変化でFSRだけ掃引される。これにより各々のセンサの反射光の反射中心波長は該ファブリペロー干渉計からの出射光量を前記圧電素子への印加電圧とリンクして観測することにより印加電圧がいくらのとき最大になるかを計測することができる。一方あらかじめ該印加電圧と前記複数のWBGの占有する全波長帯域内に存在する単一のファブリペロー干渉計の透過スペクトル中心波長との関係は測定されており、このためファブリペロー干渉計からの出射光量を極大にする前記印加電圧を測定することにより前記複数のWBGの反射中心波長を測定することができる。一方これらあらかじめ各センサの反射中心波長と温度との関係を測定しておきデータとして例えばPROMに記憶しておく。波長温度変換部2は該PROMとそれを制御するマイクロコンピュータで構成する。波長温度変換部2は波長検波器1に接続され入力されてきた各センサの波長に対応した各センサの温度を出力する。

【 0 0 1 8 】

次に第二の発明の実施形態の分布型歪計測システムの全体構成を図7に示す。歪印加部となるセンサ構造を図8に示す。図7において広帯域光源3からの光を光方向性結合器4（サーキュレータでもよい）に入射させ該光方向性結合器4あるいはサーキュレータからの出射光を光ファイバ5あるいは光導波路から成る光信号伝送ライン経由、複数のセンサを光信号伝送ラインを用いて直列に接続した直列回路に導きこれらの複数のセンサからの反射光は逆の経路をたどって光方向性結合器4あるいはサーキュレータ経由波長検波器1に導かれ該検波器において計測されたこれらセンサからの反射スペクトルを、あらかじめ測定された各センサを構成するための歪検出のためのセンサ要素からの反射波長と歪との関係及び、該歪検出用センサの温度補正をするためのセンサ要素からの温度と反射波長との関係を記憶した記憶装置である波長歪変換部21に入力させることにより各センサが検出すべき歪の変化あるいは歪を測定する歪計測システムである。ただし前記各センサは外力により発生する歪を検知するための第一のセンサ要素と該第一のセンサ要素の近傍に配置され該センサ要素と同一の温度とみなされ該温度を検知ししかし外力は印加されない第一のセンサ要素の温度特性を補正するための第二のセンサ要素とから構成されている。そして第一及び第二のセンサ要素はいずれも1個のリング共振器17、19と該リング共振器のドロップポート端部の光導波路にWBG16、18が構成されている。更に第一及び第二のセンサ要素のリング共振器17、19は第一のセンサ要素のリング共振器17のスルーポート11と第二のセンサ要素のリング共振器19の入射ポート10が接続されセンサとしての光入力かつ反射出力ポートは第一のセンサ要素のリング共振器17の入射ポート10であり光透過出力ポートは第二のセンサ要素のリング共振器19のスルーポート11である。また第一のセンサ要素であるリング共振器の入射ポート10とドロップポート15間の楕型透過スペクトルのうちの特定の一つのスペクトルの変動の範囲はセンシング対象である歪の測定範囲に対応しておりかつ該スペクトルの変動の範囲は該リング共振器に接続されるFBGあるいはWBGの反射波長帯域内にあり更に第二のセンサ要素であるリング共振器の入射ポート10とドロップポート15

10

20

30

40

50

間の楕型透過スペクトルのうちの特定の一つのスペクトルの変動範囲はセンサが使用される温度変動範囲に対応しており同時に該スペクトルの変動範囲は該リング共振器に接続されるFBGあるいはWBGの反射波長帯域内にあるよう構成されている。そしてこれらのFBGあるいはWBGいずれの反射波長帯域も互いに重なり合わないようシステム設計されている。

【 0 0 1 9 】

以上のようにすることにより第一のセンサ要素からは歪と温度にリンクした反射波長が、また第二のセンサ要素からは温度にリンクした波長が温度歪検出部に入力される。温度補正が必用な理由を以下に述べる。上記(4)式をここで再び示し、さらに外力で発生する歪により変化するリング長の変化を L_a とすると次の(7)式と合わせて以下の連立方程式ができる。ここで外力で発生する歪を求めるにはこれらの連立方程式から未知数 L_a を求め初期の長さ L との比をとればこれが求めるべき外力により発生した歪である。

$$\frac{d(n'L)}{dT} = \frac{\partial(n'L)}{\partial n'} \frac{dn'}{dT} + \frac{\partial(n'L)}{\partial L} \frac{dL}{dT} = L \frac{dn'}{dT} + n' \frac{dL}{dT} \quad (4)$$

$$\frac{d(n'L+n'L_a)}{dT} = \frac{\partial(n'L+n'L_a)}{\partial n'} \frac{dn'}{dT} + \frac{\partial(n'L+n'L_a)}{\partial L} \frac{dL}{dT} = (L+L_a) \frac{dn'}{dT} + n' \frac{dL}{dT} \quad (7)$$

(7)−(4)を実施すれば(8)式を得る。

$$\frac{d(n'L+n'L_a)}{dT} - \frac{d(n'L)}{dT} = L_a \frac{dn'}{dT} \quad (8)$$

(8)式の左辺の第一項は第二のセンサ要素の反射スペクトルが極大値を示す波長とリンクした値であり、第二項は第一のセンサ要素の反射スペクトルが極大値を示す波長とリンクした値であるのであらかじめ例えば PROM などの記憶装置に記憶させておけば左辺は計算により求められる。右辺の dn'/dT も屈折率の温度依存性の物性値として既知である。よって(8)式から外力により変化した長さ L_a を求めることができる。これらの演算は CPU (マイクロコンピュータ) を用いて演算しても良いし入力アドレスに演算すべきデータを入力し、別に種々の入力データに対する演算結果をあらかじめ計算させておきこれらを記憶装置に記憶させておき、入力データに対する演算結果を出力する形でもよい。

【 0 0 2 0 】

この記憶装置を使用する波長歪変換部の構成例を図9に示す。波長検波器からは測定されたスペクトルの極大値を示す波長データが各センサのセンサ要素ごと出力される。このスペクトルの極大値を示す波長算出のための演算は電子回路によって行われるがすでに公知の技術であって種々の光スペクトラムアナライザ(例えばアンリツのMS9710B)で行われているところである。一般にこれらのデータは8ビットパラレルあるいは16ビットパラレルに測定のタイミングごと時系列に出力される。これを受け波長歪変換部21は各センサ要素ごとに温度データと対で記憶されたピーク波長データに対する歪データを出力する。なお記憶装置だけでこれを実現するのは困難で実際は記憶装置を制御するためのマイクロコンピュータを使用することになる。なおこのマイクロコンピュータに上記(4),(7),(8)式を演算させ記憶装置の記憶容量を減らすことも可能である。なお第一の発明の実施形

態では詳しく触れなかったが波長温度変換部 2 はこれと同じようにして構成できることは明らかである。

【0021】

歪センサに用いるリング共振器の形状は図 2 に示すような円形でも良いし、図 8 に示すようなレーストラック型でも良い。いずれの場合も WBG の光軸に平行に外力は印加されそれに対応してリング共振器は歪む。図 2 のような円形であれば直線導波路間の距離は印加される外力の方向が直線導波路に並行であるため変化しない。従って外力によりリング共振器の形状は楕円になる。即ち印加される外力によりリング長は伸びることになり共振波長が変化することになる。一方図 8 に示すレーストラック型のリングの場合は印加される外力に平行な直線部が存在するため前記円形の場合より歪みに対する感度が上がる。

10

【0022】

歪みセンサの場合のスペクトルの相関を示す図は特に示さないが図 6 と同様になる。但しすべてが図 6 のように温度センサのためだけに使用されるわけではなく、図 7 に示すようにセンサは歪み検出用のセンサ要素と、補正用温度検出用のセンサ要素のペアで 1 つのセンサを構成するため図 6 の反射スペクトルのうち半数は歪み検出用に使用され、残り半数は補正温度検出用に使用される。

【産業上の利用可能性】

【0023】

上述の発明は建築構造物が致命的ダメージをおう前に建築構造物をメンテナンスし維持していこうとするいわゆる建築構造物（ビル、橋、鉄橋など）のヘルスマonitoring の分野のほかに、航空宇宙における例えば翼などの筐体の故障予知の分野などへの適用が可能である。

20

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図 1】本発明の第一の実施形態のシステム全体を示す図である。

【図 2】本発明のセンサの構成の第一の例を示す図

【図 3】本発明のセンサを構成するリング共振器と WBG（導波路ブラッググレーティング）のそれぞれの透過率と反射率の一例を示す図

【図 4】本発明のセンサの反射スペクトルの一例を示す図

【図 5】図 4 に示す本発明のセンサの反射スペクトルの一例を拡大して示した図

30

【図 6】本発明の第一の実施形態において複数のセンサが使用された際のセンサ、WBG、及びリング共振器のスペクトルの一例を示す図

【図 7】本発明の第二の実施形態のシステム全体を示す図である。

【図 8】本発明のセンサの構成の第二の例を示す図

【図 9】各センサからの波長データを各センサの歪データにするための波長歪変換部の一例を示す図

【図 10】従来の FBG を用いた分布型光ファイバ温度センサシステムの構成を示す図

【図 11】従来の FBG を用いた分布型光ファイバ温度センサシステムのスペクトルの相関を示す図

【図 12】従来の FBG を用いた分布型光ファイバ歪みセンサシステムの構成を示す図

40

【符号の説明】

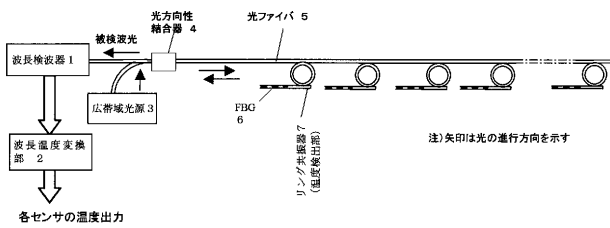
【0025】

- 1・・・波長検波器
- 2・・・波長温度変部
- 3・・・広帯域光源
- 4・・・光方向性結合器
- 5・・・光ファイバ
- 6・・・FBG
- 7・・・リング共振器
- 8・・・シリコンサブストレート

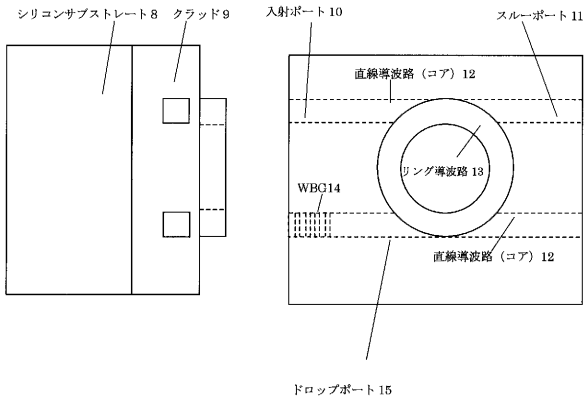
50

- 9 . . . クラッド
- 10 . . . 入射ポート
- 11 . . . スルーポート
- 12 . . . 直線導波路
- 13 . . . リング導波路
- 14 . . . WBG (導波路ブラッググレーティング)
- 15 . . . ドロップポート
- 16 . . . WBG (システムに接続した例)
- 17 . . . リング共振器 (歪検出用)
- 18 . . . WBG (システムに接続した例)
- 19 . . . リング共振器 (補正用温度検出用)
- 20 . . . レーストラック型リング導波路
- 21 . . . 波長歪変換部

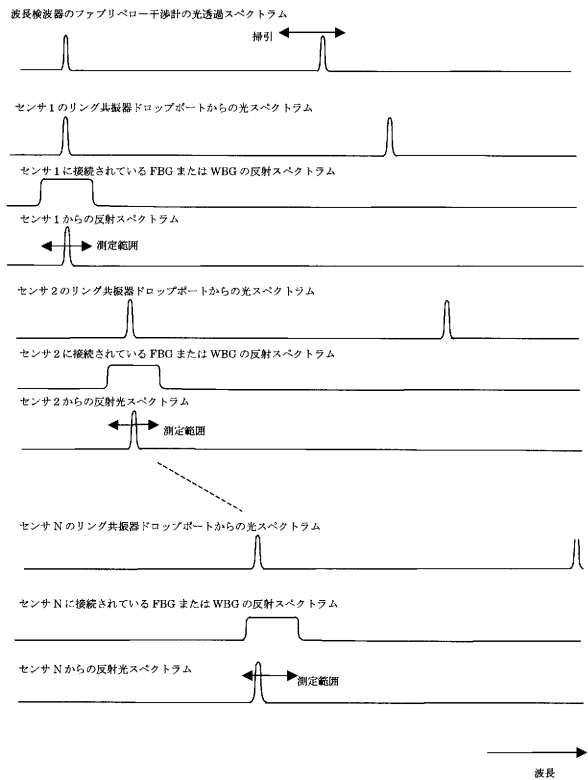
【 図 1 】



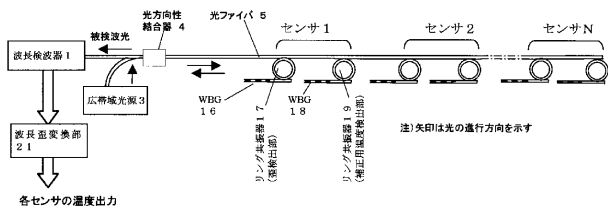
【 図 2 】



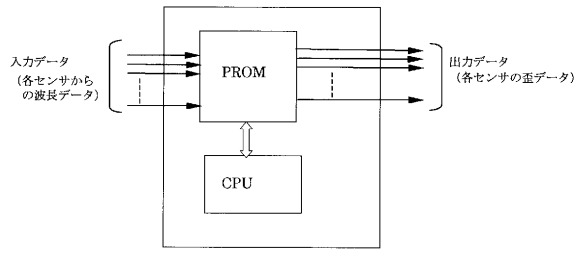
【 図 6 】



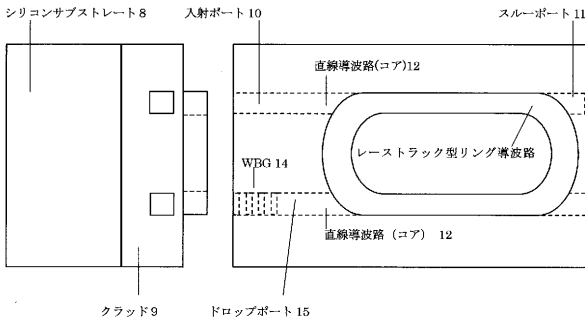
【 図 7 】



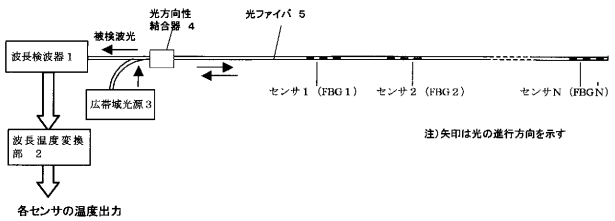
【 図 9 】



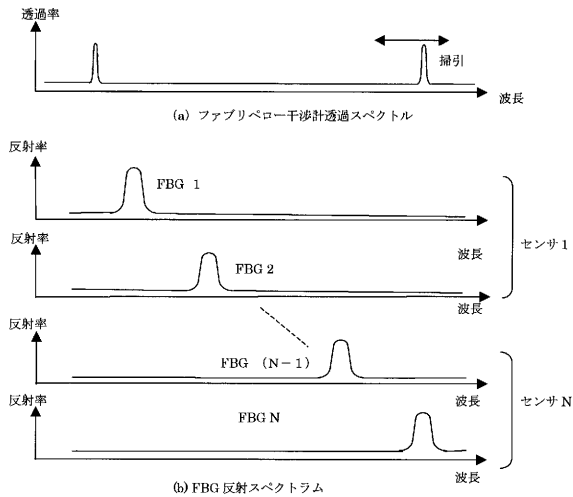
【 図 8 】



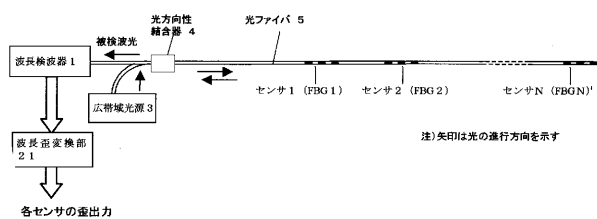
【 図 10 】



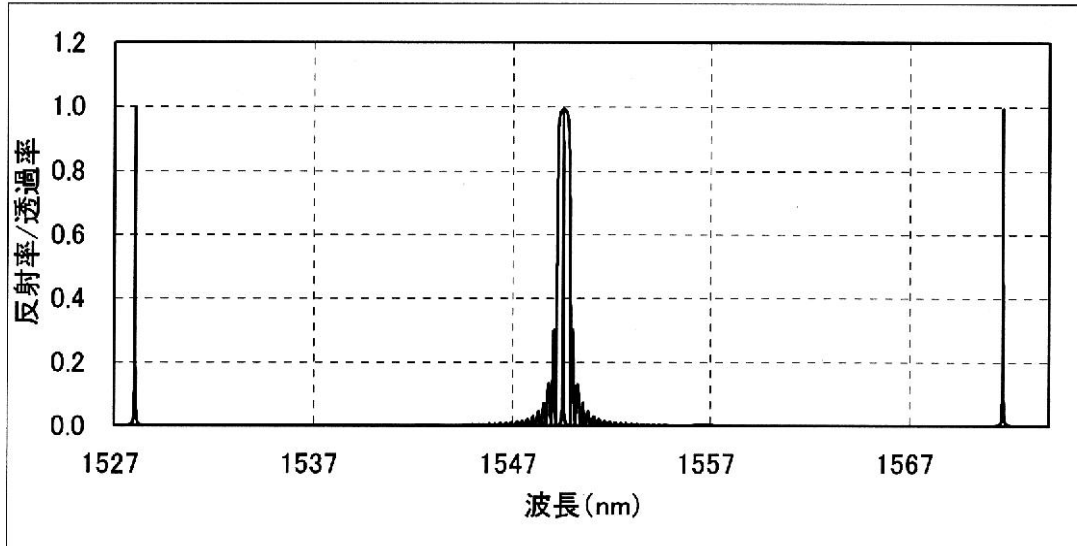
【 図 11 】



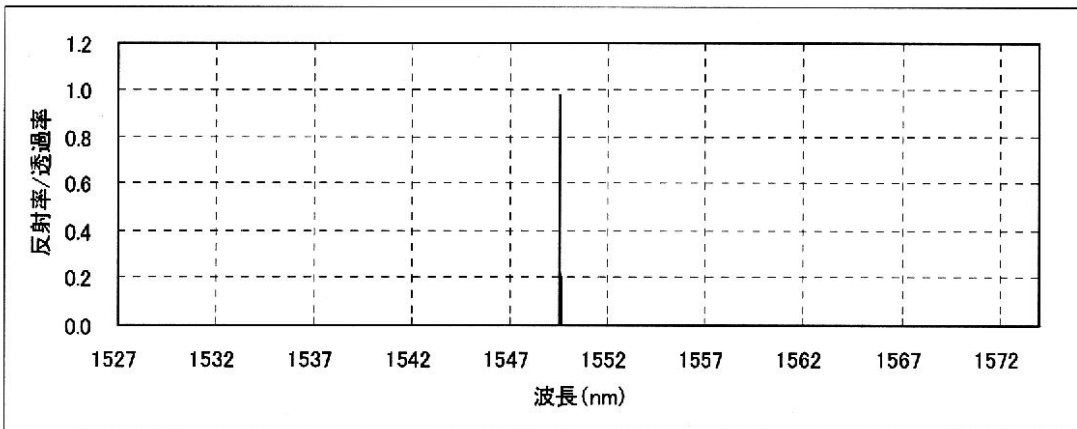
【 図 12 】



【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】

