

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4742271号
(P4742271)

(45) 発行日 平成23年8月10日(2011.8.10)

(24) 登録日 平成23年5月20日(2011.5.20)

(51) Int. Cl. F I
GO 1 K 11/12 (2006.01) GO 1 K 11/12 F
GO 1 B 11/16 (2006.01) GO 1 B 11/16 G

請求項の数 8 (全 13 頁)

<p>(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) (65) 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) 審査請求日 平成19年1月31日(2007.1.31)</p>	<p>(73) 特許権者 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 審査官 古川 直樹</p>
---	---

最終頁に続く

(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を有する計測システム

(57) 【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経由で1個のセンサに導き、あるいは複数のセンサを前記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、前記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前記光方向性結合器あるいはサーキュレータ経由で波長検波器に導かれ該波長検波器において測定された前記センサからの反射スペクトルに基づいて温度若しくは歪が計測される計測システムであって、

前記センサは、前記光信号伝送ラインに接続されたリング共振器を含むとともに、1個のFBG(Fiber Bragg Grating)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)という。)が前記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、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であり、

前記センサにおいて、前記リング共振器の楕形透過スペクトルは前記FBGあるいはWBGの反射波長帯域より狭帯域の線スペクトルを有し、一つの前記線スペクトルだけが前記反射波長帯域内に含まれる測定範囲で前記反射スペクトルに基づいて計測が行われることを特徴とする計測システム。

【請求項2】

10

20

前記センサにおいて、前記FBGあるいはWBGの前記反射波長帯域の半値全幅を前記リング共振器の前記櫛形透過スペクトル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請求項 1 に記載の計測システム。

【請求項 3】

前記センサにおいて、前記FBGあるいはWBGの前記反射波長帯域の反射中心波長の温度依存性は前記リング共振器の前記線スペクトルの温度依存性に等しいことを特徴とする請求項 1 に記載の計測システム。

【請求項 4】

前記センサにおいて、前記リング共振器の前記櫛型透過スペクトルのうちの特定の前記一つの線スペクトルの変動の範囲が前記FBGあるいはWBGの前記反射波長帯域より狭い測定範囲で計測が行われることを特徴とする請求項 1 に記載の計測システム。

10

【請求項 5】

前記光信号伝送ラインには複数の前記センサが直列に接続され、前記複数のセンサにおいて、それぞれの前記リング共振器の前記櫛型透過スペクトルのうち特定の前記一つの線スペクトルの変動の範囲が前記FBGあるいはWBGの反射波長帯域より狭いそれぞれの測定範囲で計測が行われ、しかも前記測定範囲では同時に前記反射波長帯域が前記複数のセンサ間で互いに重なり合わないよう構成されることを特徴とする請求項 1 に記載の計測システム。

【請求項 6】

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、
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しての前記センサと、該第一のセンサ要素に隣接して直列に接続配置され、温度を検知し前記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しての前記センサと、を有することを特徴とする請求項 1 に記載の計測システム。

20

【請求項 7】

前記第一のセンサ要素の前記リング共振器に、前記FBGあるいはWBGの光軸に平行な方向に歪が印加されるよう構成されることを特徴とする請求項 6 に記載の計測システム。

【請求項 8】

前記第一のセンサ要素の前記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前記FBGあるいはWBGの光軸と平行であることを特徴とする請求項 7 に記載の計測システム。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光ファイバブラッググレーティング（以下FBG）を用いた光ファイバセンサとして構成する場合に好適な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、第四の背景技術および第五の背景技術がある。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 により例えばファブリペロー干渉計から構成される波長検波器 1に入力される（非特許文献 1 参照）。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

40

50

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互の関係を示す図である。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。そして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）に記憶しておけばこれが図10の波長温度変換部2を構成するメモリとなる。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。

10

【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。

20

【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）。

30

【0005】

次に第四及び第五の背景技術につき説明する。第三の背景技術は光導波路にブラッググレーティングを描画する技術である。コアにゲルマニウムをドーブしたSiO₂を用いた場合が報告されている（非特許文献6参照）。また第五の背景技術は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）。

40

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

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光パワー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に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 λ_c 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、

$$\frac{100\mu W / nm \int_{0pm}^{\infty pm} \exp\left[-4(\ln 2)\left\{\frac{(\lambda - \lambda_c)}{100pm}\right\}^2\right] \exp\left[-4(\ln 2)\left\{\frac{(\lambda - \lambda_c)}{15.5pm}\right\}^2\right] d\lambda}{}$$

$\approx (100\mu W / nm) \times 0.5 \times 31pm = 1450pW$ 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シフトして余裕をみて2pWの光量の変化が発生したとしXを求めると

$$(100\mu W / nm) \times 0.5 \times 31pm - (100\mu W / nm) \times 0.5 \times 31pm \times \exp\left\{-4(\ln 2) \times \frac{(Xpm)^2}{(100pm)^2}\right\} = 2pW \text{ より}$$

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 \times 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 $\alpha = 0$ としても多重できるFBGの数は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効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も行われているがこの場合は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WBG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あるいはサーキュレータ、例えばファブリペロー干渉計からなる波長検波器1、SMFなどの光信号伝送ラインは上記従来の分布計測システムと同様に用いられる。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。光信号伝送ラインは入射ポートに接続されスルーポートは再び光信号伝送ラインに接続され、次のセンサを構成する場合はそのリング共振器の入射ポートに接続されていく。

【0008】

リング共振器と帯域反射フィルタ特性を持つFBGまたはWBGを組み合わせる。これによりリング共振器7の楕型繰返し透過特性は取り除かれ楕型フィルタスペクトルのうちの1つの狭帯域の線スペクトルだけが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あるいはサーキュレータ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に入力される。

10

20

30

40

50

【 0 0 0 9 】

温度あるいは歪などの物理量の変化により発生するFBGあるいはWBGの反射中心波長の波長シフト量と、該FBGあるいはWBG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ペ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あるいはWBG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る。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 0 】

リング共振器は非特許文献 3,4,5 に記載されているようにその FWHM は狭いものでも 100pm 程度の FBG に比べ非常に狭くできる。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 をいずれも 15.5pm、同干渉計の FSR を 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 変化した際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共振波長における反射率を 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=100 μW/nm とするとその差は

$$\begin{aligned}
 & 100 \mu W / nm \times \int_{0 pm}^{15.5 pm} \left(\frac{\lambda}{15.5 pm} \right)^2 d\lambda + 100 \mu W / nm \times \int_{15.5 pm}^{31 pm} \left(\frac{\lambda}{15.5 pm} \right) \left(\frac{-\lambda}{15.5 pm} + 2 \right) d\lambda \\
 & - 100 \mu W / nm \times \int_{0.1 pm}^{15.5 pm} \left(\frac{\lambda}{15.5 pm} \right) \left(\frac{\lambda}{15.5 pm} - \frac{0.1}{15.5} \right) d\lambda \\
 & - 100 \mu W / nm \times \int_{15.5 pm}^{15.6 pm} \left(\frac{\lambda}{15.5 pm} - \frac{0.1}{15.5 pm} \right) \left(\frac{-\lambda}{15.5 pm} + 2 \right) d\lambda \\
 & - 100 \mu W / nm \times \int_{15.6 pm}^{31.1 pm} \left(\frac{-\lambda}{15.5 pm} + 2 \right) \left(\frac{-\lambda}{15.5 pm} + \frac{31.1}{15.5} \right) d\lambda = 516 pW
 \end{aligned}$$

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 2pW 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 516 pW 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。このときセンサの FSR は 26.6nm であるので接続可能なセンサ数は 26.6nm/0.1nm=266 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 1 pW 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 】

【 0 0 1 1 】

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 WBG14 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 15a には何も接続せずドロップポート 15 端部には 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 10 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。

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

但し

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

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

$\omega = \sqrt{\Theta^2 - 4\kappa^2}$, $\Theta = \pi^2(\lambda - \lambda_B)/(\Lambda^2 n_0)$, $\lambda_B = 2n\Lambda$, $\kappa = \pi(n_0 - n)/\lambda$, L は リング導波路 13 のコア長、 L_0 は WBG 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 リング導波路 13 の単位長さ当たりの電力損失係数、 $\kappa' l$ はリング共振器 7 の光方向性結合部の結合長、 n_0 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 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 1550 nm 近傍では $m=70$ の場合共振波長は 1549.557 nm 、 $m=71$ の場合共振波長は 1571.693 nm であるのでその差として FSR は求められ $\text{FSR} = 22.1 \text{ nm}$ 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。中央幅広のスペクトルは $|R_f(\lambda)|$ であり繰り返し現れている線スペクトルが $|T_r(\lambda)|$ である。また図 3 と同じ波長範囲でのセンサの反射率 $|R(\lambda)|$ 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 15.5 pm であることがわかる。

【 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 $n'L$ 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' の温度依存係数が零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プした 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。即ちリング共振器7の共振波長は $n'L$ 積の変化により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。

【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

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

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

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

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 $n' \approx n$ 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 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。

【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のクラッドはエアクラッドである。

10

20

30

40

50

【 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WBG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極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。更に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。なお上述においてリング共振器のドロップポートに接続されるWBGの代わりにFBGを用いても良いことは明らかである。

【 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は広帯域光源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シングルモード光ファイバ5あるいは光導波路から成る光信号伝送ライン經由、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經由波長検波器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間の櫛型透

10

20

30

40

50

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。なお上記のWBGの代わりにFBGを用いても良いことは明らかである。

【 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)式と合わせて示し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。

$$\frac{d(n'L+n'L_a)}{dT} - \frac{\partial(n'L)}{\partial T} = L_a \frac{dn'}{dT} \quad (8)$$

(8)式の左辺の第一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り、第二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るので実験によりあらかじめ記憶装置に記憶させておけば右辺の dn'/dT も屈折率の温度依存性の物性値として既知であるので(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ビット平行あるいは16ビット平行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

10

20

30

40

50

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。

【 0 0 2 1 】

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。

【 0 0 2 2 】

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 】

【 0 0 2 3 】

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）のヘルスマニタリングの分野のほかに、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。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 2 4 】

【 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

【 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 1 0 】 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 1 1 】 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 各個所のスペクトルを示す図

【 図 1 2 】 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

【 符号の説明 】

【 0 0 2 5 】

- 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 シングルモード光ファイバ
- 7 リング共振器
- 8 シリコンサブストレート
- 9 クラッド
- 1 0 入射ポート
- 1 1 スルーポート
- 1 2 直線導波路
- 1 3 リング導波路

10

20

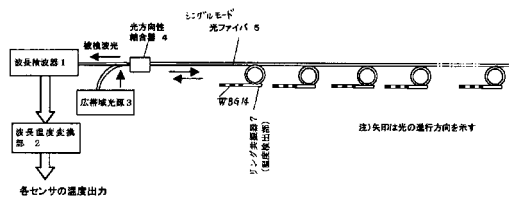
30

40

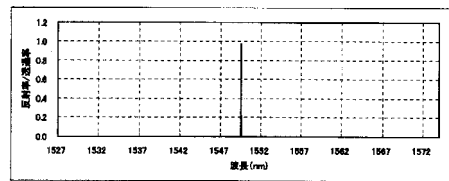
50

- 14・・・WBG（導波路ブラッググレーティング）
- 15・・・ドロップポート
- 15a・・・アドポート
- 16・・・WBG
- 17・・・リング共振器（歪検出用）
- 18・・・WBG
- 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

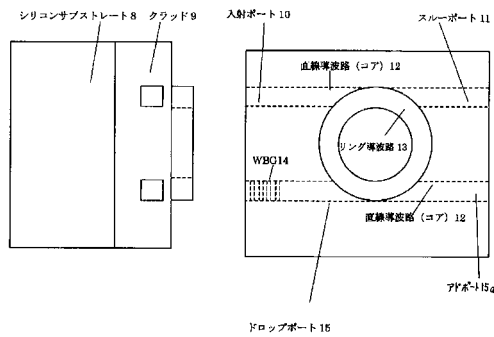
【図1】



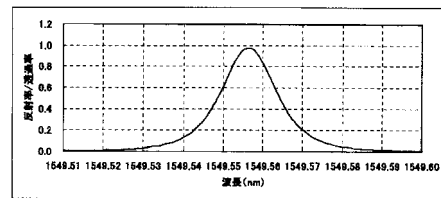
【図4】



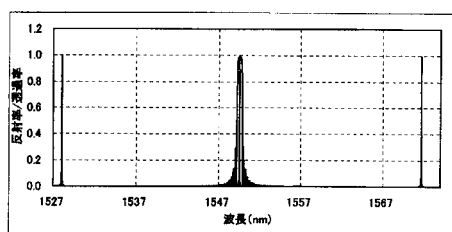
【図2】



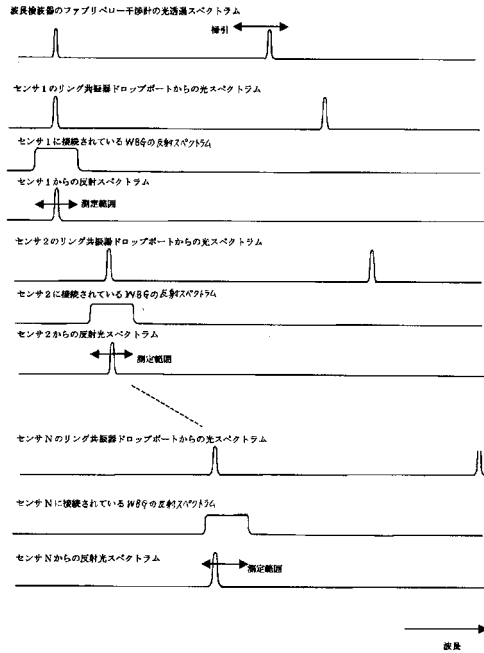
【図5】



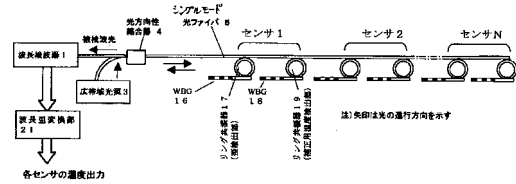
【図3】



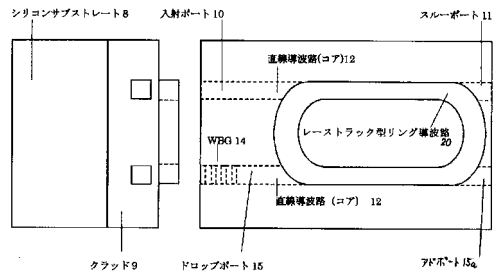
【図6】



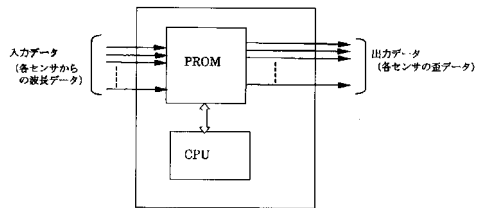
【図7】



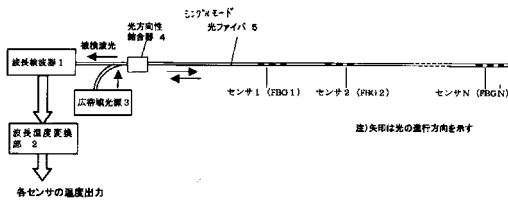
【図8】



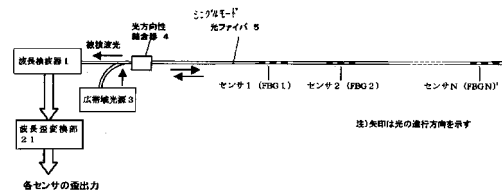
【図9】



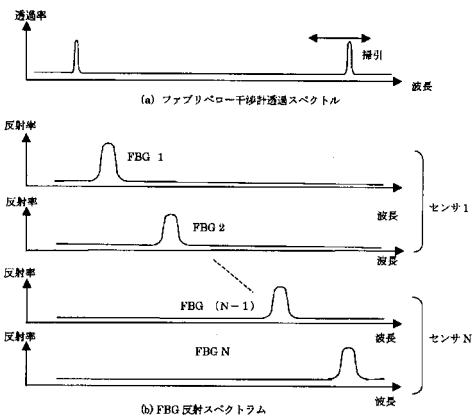
【図10】



【図12】



【図11】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2002-310729(JP,A)
特開2005-128442(JP,A)
特開2004-233070(JP,A)
特開2004-347554(JP,A)
特開2000-346722(JP,A)
特開2000-111319(JP,A)
特開2000-208840(JP,A)
特開平05-181028(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01K 1/00 - 19/00
G01B 11/00 - 11/30
G02B 6/12