

(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2008-232878

(P2008-232878A)

(43) 公開日 平成20年10月2日(2008.10.2)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO1K 11/12 (2006.01)	GO1K 11/12 C	2F056
GO1D 5/353 (2006.01)	GO1D 5/26 D	2F103

審査請求 有 請求項の数 2 O L (全 25 頁)

(21) 出願番号 特願2007-73986 (P2007-73986)
 (22) 出願日 平成19年3月22日 (2007. 3. 22)

(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
 (72) 発明者 窪田 純
 駒ヶ根市梨ノ木2の29
 Fターム(参考) 2F056 VF03 VF11 VF12 VF16
 2F103 CA04 CA06 EC08 EC10

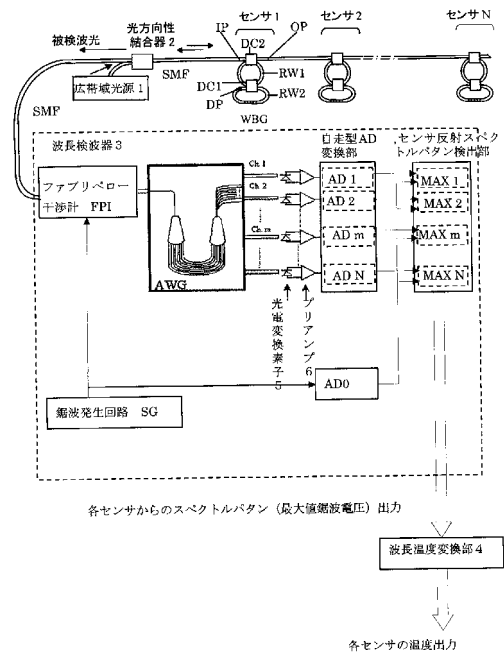
(54) 【発明の名称】 光スペクトルパタンマッチング法による分布型センサシステム

(57) 【要約】

【課題】 光ファイバ分布計測システムに使用される光ファイバブラッググレーティング (以下FBG) は中心波長が変化しても反射光量の変化はほんのわずかであるため信号対雑音比が小さく波長検波器内の受光素子への外来電磁ノイズにより前記中心波長の測定値が大きく変動するという欠点があった。

【解決手段】 2つのリング導波路を1つの光方向性結合器で接続し一方のリング導波路中にブラッググレーティングを内蔵させ他方のリング導波路は光方向性結合器で信号伝送用光ファイバに接続してなるセンサを複数直列に接続し該センサからの反射光を波長可変な櫛型チューナブルフィルタを1入力多チャンネル出力のアレイ導波路格子に導き各チャンネルの波長帯域は各センサのブラッググレーティングの波長帯域に等しく各チャンネル出力それぞれを最大にする前記チューナブルフィルタ制御電圧を測定することにより各センサの温度を十分な信号対雑音比で測定する。

【選択図】 図1



各センサからのスペクトルパタン (最大値検波電圧) 出力

各センサの温度出力

【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光サーキュレータに入射させ該光方向性結合器あるいは該光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シングルモード光ファイバ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前記光方向性結合器あるいは前記光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これらセンサからの反射スペクトルを計測することによりセンサが検出すべき温度を測定する計測システムであって、前記各センサは第一のリング導波路とブラッググレーティングを内蔵した第二のリング導波路を第一の光方向性結合器で結合すると同時に第一のリング導波路を第二の光方向性結合器を介して前記シングルモード光ファイバからなる前記光信号伝送ラインに結合させることにより第一のリング共振器を構成し該リング共振器の入射ポートからドロップポートへの透過帯域フィルタ特性が狭帯域特性を持った櫛型フィルタ特性となるように第一のリング導波路のリング長を決定し、該櫛型フィルタ透過特性を第二のリング導波路内のブラッググレーティングの反射帯域幅を第一のリング共振器のフリースペクトルレンジよりも広くすることにより該導波路内のブラッググレーティングの反射帯域においてはセンサのスペクトルパタンを複数の狭帯域反射スペクトルからなるスペクトルパタン特性とし、同時に該導波路内のブラッググレーティングの透過帯域における第一のリング共振器の入射ポートから出射ポートへの透過スペクトルを両リングのコアの光路長を同一にすることにより平坦なスペクトルとし、換言すれば隣接して接続されるセンサを構成するリング共振器への入射スペクトルを平坦なスペクトルとし、前記導波路内のブラッググレーティングの反射帯域をセンサごとに異なるようにし、更に各センサの測定範囲をそれぞれのセンサの該導波路内のブラッググレーティングの帯域幅以下とし、波長検波器はハーフミラー間の距離を例えば該ハーフミラーのうち一方を圧電素子と一体に構成し該圧電素子に印加する電圧によりその櫛型透過スペクトルが変化するファブリペロー干渉計のように電圧によりその狭帯域な櫛型帯域通過フィルタ特性の変更が可能な干渉計の入力端を入力端とし対象とする複数のセンサの数と同数のチャンネルを備えこれらの各チャンネルを各センサに対応させ1入力多出力のアレイ導波路格子の入力端に前記干渉計の出力端を接続し該アレイ導波路格子の各チャンネルの出力端に光電変換素子を接続し該光電変換素子の各々の出力を最大にするような圧電素子への印加電圧がそれぞれのセンサからの反射スペクトルパタンすなわち各センサの温度に対応することを利用し該光電変換素子の各々の出力を電子回路から成る信号処理回路に導き該処理回路で各センサそれぞれの温度計測をさせしめることを特徴とした光スペクトルパタンマッチング法に基づく分布型温度計測システム。

10

20

30

【請求項 2】

請求項 1 において第一のリング導波路の長さをミリメートル程度とすることにより第一のリング共振器をピコメータオーダの狭帯域特性としたことを特徴とする分布型温度計測システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

40

【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及び第二の背景技術を説明する。まず、第一の背景技術につき説明する。図 3 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 1 からの光は光方向性結合器 2 を経てシングルモード光ファイバ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の反射中心波長と相関があるため、これらの反射中心波長を測定することにより各セ

50

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を逆にたどって広帯域光源1側に戻っていき該光源直前に設置されている前記光方向性結合器2によりファブリペロー干渉計などの光学干渉計から構成される波長検波器3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波長検波器3により検波、すなわち測定される。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。一方、圧電素子を使用し時間に対して鋸波状の電圧を該圧電素子に印加させると圧電素子はその電圧により変位を生ずるため該干渉計の半透鏡を圧電素子に接続しておけば2つの半透鏡の間隔を変化させることができる。従って圧電素子に印加する電圧を周期的に変化させれば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を周期的に変化させることができる。図4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)になるように波長検波器3を構成するファブリペロー干渉計を設計しておく。更に該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だけ掃引されるようにシステム設計を行う。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それぞれ別々に計測することにより測定することが可能となる。これは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からである。図3に示す波長温度変換部4はProgramable Read Only Memory(以下PROM)などのメモリから構成されている。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これをデータとして上記メモリに記憶させておく。これにより波長温度変換部4は波長検波器3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を説明する。これは「非特許文献2」により公知の技術である。図5はこの第二の背景技術を用いた分布型温度センサのシステム構成図である。第一の背景技術と異なる点は波長検波器3である。他の個所は皆同一である。その特徴は第一の背景技術の波長検波器3はファブリペロー型干渉計の干渉中心波長を圧電素子などを使って機械的に掃引する方式であるが、この第二の背景技術はファブリペロー型干渉計ではなくアレイ導波路格子AWGを用いることにより機械的な可動部をなくし第一の背景技術よりも波長検波器3の信頼性をあげると同時に、並列信号処理により高速に波長検波できる点が大きな特徴である。次に図6を用いてこのAWGから成る波長検波器の動作を説明する。FBGの反射中心波長を b_i 、AWGの隣接するチャンネル m とチャンネル $m+1$ の透過中心波長をそれぞれ a_m 、 a_{m+1} とする。 b_i が a_m 及び a_{m+1} の中心波長と一致している場合、AWGのチャンネル m とチャンネル $m+1$ から出射する光量は同一であるのでそれらを受光素子で光電変換した後の電流値の比は1である。仮に b_i が短波長側にシフトすればその比は1より小さくなり長波長側にシフトすれば比は1より大きくなる。 b_i は $a_m < b_i < a_{m+1}$ の範囲で変動するようシステム設計される。FBGの反射中心波長 b_i はFBGの温度と一対一で対応している。従ってFBGの温度と前記の比の関係も一対一の関係となる。この関係をシステム製作段階であらかじめ求めておきPROMなどの記憶装置に記憶させておく。図5の波長温度変換部4はこの記憶装置である。このようにして構成されたシステムを用い同図に示すように光電変換素子5、プリアンプ6により光電変換された後の電流値を使ってマイクロコンピュータ7により比演算を行い、演算結果を前記の記憶装置に入力させれば記憶装置の出力はそのときのFBGの温度となる。一般にAWGは2つ以上の多数のチャンネルを備えているので複数のFBGの反射中心波長を並列に同時に計測できる。これが第二の背景技術である。

30

40

50

【非特許文献1】A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, Multiploded 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2】Y. Sano and T. Yoshino, Fast Optical Wavelength Interrogator Employing Arrayed Waveguide Grating for Distributed Fiber Bragg Grating Sensors, J. Lightwave Technol., vol.21, pp.132-139, 2003

【非特許文献3】S. Suzuki, K. Oda, and Y. Hibino, Integrated-optic Double-Ring Resonators with a Wide Spectral Range of 100 GHz, J. Lightwave Technol., vol.13, no.8, pp.1766-1771, 1995

【非特許文献4】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, pp.694-696, 2003

10

【特許文献1】特願2006-288631、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、発明者：佐野安一、特許出願人：独立行政法人国立高等専門学校機構、代表者：河野伊一郎

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

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波長検波器1を構成するファブリペロー干渉計を経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1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を例えば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の反射中心波長と波長検波器3を構成するファブリペロー干渉計の透過中心波長が一致した場合、 $(100\mu\text{W/nm}) \times 0.5 \times 31\text{pm} = 1450\text{pW}$ 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はノイズレベルが -90dBm 程度であるのでその倍の -87dBm ($=2\text{pW}$)程度である。FBGの中心波長が $X\text{pm}$ シフトして 2pW の光量変化が発生したとし X を求めると $(100\mu\text{W/nm}) \times 0.5 \times 31\text{pm} - (100\mu\text{W/nm}) \times 0.5 \times 31\text{pm} \times \exp\{-4(\ln 2) \times (X\text{pm})^2 / (100\text{pm})^2\} = 2\text{pW}$ より X は 2.25pm となる。すなわち理論的には受光回路のノイズにより 2.25pm 程度の測定分解能になってしまうことが分かる。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分可能は 2.25pm よりも大きく $(2.25 + \beta)\text{pm}$ となる。従来の電気方式の温度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 $(2.25 + \beta)\text{pm} \times 1000 = (2.25 + \beta)\text{nm}$ としなければならない。1つのFBGで $(2.25 + \beta)\text{nm}$ 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効率が低いという課題があった。上記背景技術1、背景技術2いずれの技術においても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。

10

20

30

40

50

【課題を解決するための手段】

【0005】

広帯域光源からの光を光方向性結合器あるいは光サーキュレータに入射させ該光方向性結合器あるいは該光サーキュレータからの出射光をSMFから成る光信号伝送ライン経由1個のセンサに導き、あるいは複数のセンサをSMF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前記光方向性結合器あるいは前記光サーキュレータ経由波長検波器に導かれ該検波器においてこれらセンサからの反射光の波長を計測することによりセンサが検出すべき温度を測定する計測システムにおいて、センサに対する課題解決手段と波長検波器に対する課題解決手段について記す。これら2つの解決手段を同時に実施することによりシステム全体に対する課題解決手段となる。

最初にセンサに対する課題解決手段を述べる。前記各センサは第一のリング導波路とブラッググレーティングを内蔵した第二のリング導波路を第一の光方向性結合器で結合すると同時に第一のリング導波路を第二の光方向性結合器を介して前記SMFからなる前記光信号伝送ラインに結合させることにより第一のリング共振器を構成し該リング共振器の入射ポートからドロップポートへの透過帯域フィルタ特性が狭帯域特性を持った櫛型フィルタ特性となるように第一のリング導波路のリング長を決定し、該櫛型フィルタ透過特性を第二

のリング導波路内のブラッググレーティングの反射帯域幅を第一のリング共振器のFSRよりも広くすることにより該導波路内のブラッググレーティングの反射帯域における前記リング共振器の櫛型フィルタ特性がそのまま該ブラッググレーティングによりセンサのスペクトル特性として光方向性結合器2を經由して波長検波器に入力される。なおセンサを構成するリング共振器のリングの光路長はこのセンサのスペクトル特性が複数の狭帯域な反射線スペクトルからなるように決定される。同時に該導波路内のブラッググレーティングの透過帯域における第一のリング共振器の入射ポートから出射ポートへの透過スペクトルを両リングのコアの光路長を同一にすることにより平坦なスペクトルとし、換言すれば隣接して接続されるセンサを構成するリング共振器への入射スペクトルを平坦なスペクトルとし、かつ前記導波路内のブラッググレーティングの反射帯域をセンサごとに異なるようにし、更に各センサの測定範囲はそれぞれのセンサの該導波路内のブラッググレーティングの帯域幅に等しくしなるように決定される。

次に波長検波器は透過型ファブリペロー干渉計出力を1入力多出力のAWGの入力に接続させ該AWGの複数のチャンネル各々の出力端子に受光素子を接続する。チャンネル数はセンサ数と同じ数であって、各々のセンサと各々のチャンネルを対応させ各チャンネルの波長帯域はセンサの使用温度範囲内で各センサの第二のリング導波路内のブラッググレーティングの反射波長帯域が温度変化により変動する範囲以上の帯域幅を持つAWGとする。透過型ファブリペロー干渉計の櫛型透過スペクトル特性はファブリペロー干渉計を構成する半透鏡間の距離を例えば一方の半透鏡と圧電素子を一体に構成しこの圧電素子に印加する電圧を変化させることにより制御される。AWGの全チャンネルをカバーする波長帯域において前記ファブリペロー干渉計の櫛型透過スペクトル特性と前記圧電素子に印加する電圧との関係はシステム構築前にあらかじめ取得しておく。前記ファブリペロー干渉計からAWGのあるチャンネルを經由して光電変換素子にいたるルートは前述の様に1つのセンサに対応している。ファブリペロー干渉計の透過スペクトルはセンサから反射してくる櫛型狭帯域スペクトルのFWHMとFSRが同一のスペクトルになるようにし、両者の差はスペクトルの複数のピークを与える波長が異なるのみになるようにする。従ってこの複数のピークを与える波長を該ファブリペロー干渉計のFSRだけ前記圧電素子の駆動電圧を制御することによりAWGの各々のチャンネル出力はいずれかの電圧で最大値を示す。この時ファブリペロー干渉計の櫛型透過スペクトルの透過率のピークを与える複数の波長とセンサから戻ってくる櫛型反射スペクトルの反射率のピークを与える複数の波長は一致していると考えられる。一方センサの温度によりセンサから戻ってくる櫛型反射スペクトルは変化する。センサの測定範囲はシステム設計の段階でこの櫛型反射スペクトルのFSRより狭い波長範囲とすると該センサの温度とセンサからの櫛型反射スペクトルは一対一で対応する。この関係をあらかじめデータとして記憶しておくことによりAWGの任意のチャンネルの出力の最大値を与える電圧からそのチャンネルに対応するセンサの温度を測定することができる。以上が本発明の課題に対する解決手段である。

【発明の効果】

【0006】

10

20

30

数値計算例を示し発明の効果を説明する。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、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 変化した際受光素子がセンサの楕型反射スペクトルのうちの一つの線スペクトルから受光する電力の変化量を求める。簡単のため第二のリング導波路内に描画されたブラッググレーティング（以下 WBG）及び第一のリング共振器を往復し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

$$\begin{aligned}
 & 100\mu W / nm \times \int_{0pm}^{15.5pm} \left(\frac{\lambda}{15.5pm} \right)^2 d\lambda + 100\mu W / nm \times \int_{15.5pm}^{31pm} \left(\frac{\lambda}{15.5pm} \right) \left(\frac{-\lambda}{15.5pm} + 2 \right) d\lambda \\
 & - 100\mu W / nm \times \int_{0.1pm}^{15.5pm} \left(\frac{\lambda}{15.5pm} \right) \left(\frac{\lambda}{15.5pm} - \frac{1}{15.5pm} \right) d\lambda \\
 & - 100\mu W / nm \times \int_{15.5pm}^{15.6pm} \left(\frac{\lambda}{15.5pm} - \frac{1}{15.5pm} \right) \left(\frac{-\lambda}{15.5pm} + 2 \right) d\lambda \\
 & - 100\mu W / nm \times \int_{15.6pm}^{31pm} \left(\frac{-\lambda}{15.5pm} + 2 \right) \left(\frac{-\lambda}{15.5pm} + \frac{31.1}{15.5pm} \right) d\lambda = 562pW
 \end{aligned}$$

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 562pW 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。加えて段落番号 0005 で述べたよう各々のセンサから反射されて波長検波器に戻ってくるスペクトルは複数の線スペクトルであり、この線スペクトルの数を N_s とすれば N_s は整数であってこの 562pW は $562N_s$ pW となる。 $N_s=3$ なら 1,686pW となり 2.25pm に比べれば非常に大きなパワー変化となる。

さらに $562N_s$ 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。このことから本発明によれば段落番号 0010 で述べるように帯域幅 50nm の光源を用いてダイナミックレンジは $N_s = 2$ の場合、10000 以上が可能であり同時にセンサを 38 個接続できる。これに対して FBG を用いた従来技術の場合、前述の段落番号 0004 で記したように 22 個程度が接続可能なセンサ数でありダイナミックレンジは 1000 である。

以上のことから本発明は①システムに接続可能なセンサ数が多い、②各センサのダイナミックレンジが広い、③受光素子への外来電磁ノイズの影響が小さい、④信号対雑音比が大きい、⑤このため一般に信号対雑音比改善のため行われる信号の平均化処理も平均回数を従来よりも減らすことができ従ってセンサとしての応答速度を従来よりも高速にできるなどの効果がある。

【発明を実施するための最良の形態】

10

20

30

40

50

【 0 0 0 7 】

第一の実施形態である分布型温度計測システムの全体構成を図1に示す。またその動作を示すため同システムの各個所のスペクトルを図2に示す。以下図1、図2を用いてその構成・動作を示す。図1において広帯域光源1から出射した光はSMF、光方向性結合器2（光方向性結合器はサーキュレータでもよい）を経てSMFに入射する。このSMFにはN個のセンサ（Nは1以上の整数）がSMFを介して直列に接続される。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2経由波長検波器3に導かれ該検波器においてこれらセンサからの反射スペクトルを計測することによりセンサが検出すべき温度を測定する。前記各センサは第一のリング導波路RW1とブラッググレーティングWBGを内蔵した第二のリング導波路RW2を第一の光方向性結合器DC1で結合しかつ第一のリング導波路RW1を第二の光方向性結合器DC2を介して前記SMFからなる前記光信号伝送ラインに結合させることにより第一のリング共振器を構成し該リング共振器の入射ポートIPからドロップポートDPへの透過帯域フィルタ特性を第一のリング導波路RW1のリング長を例えばミリメートル程度にすることにより例えばピコメータオーダの図2のスペクトルS2に示すような狭帯域透過楕型フィルタ特性としこの楕型透過フィルタ特性と、第二のリング導波路RW2内のブラッググレーティングWBGの帯域幅を図2のスペクトルS3、S6に示すように第一のリング共振器のFSRよりも広くすることによりWBGにより反射される反射スペクトル特性をピコメータのオーダのFWHMの図2のスペクトルS4、S7に示すような複数の狭帯域反射スペクトル特性とする。この複数の狭帯域反射スペクトルは該リング共振器の入射ポートIPからドロップポートDPへの透過スペクトルのうちの1部分であるが同時にこれはドロップポートDPから入射ポートIPに向かって入射した光の透過スペクトルに等しいはずであるのでWBGにより反射された前記複数の狭帯域反射スペクトルS4、S7は入射ポートIPからドロップポートDPを経て光方向性結合器2に向かって伝播していくことになる。即ちセンサとしての反射スペクトルは各々が狭帯域の複数の反射スペクトルとなる。この反射スペクトル各々が狭帯域特性を持っているがゆえに本発明のセンサはその反射スペクトルのうちエネルギーのピークを与える複数の波長のいずれの波長においてもその波長近傍での波長に対する反射スペクトルのエネルギー密度の変化は、これよりも遥かに広いFWHMをもったFBGを用いた従来の分布計測システムの場合よりも格段に大きくなる。この反射スペクトルの波長に対するエネルギー密度の変化をよりの確に捉えるために波長検波器3も狭帯域フィルタ特性を備えさせる。例えばファブリペロー干渉計などを用いてこの特性を備えさせる。また各センサのWBGの反射帯域は温度変化により変化するがシステムの使用温度範囲のいずれにおいてもこの反射帯域はセンサごとに異なるようにシステム設計を行う。さらに各センサの測定範囲はそれぞれのセンサのWBGの帯域幅とする。波長検波器3について詳しく述べると次のようである。波長検波器3は図1に示すようにファブリペロー干渉計FPI、鋸波発生回路SG、アレイ導波路格子AWG、光電変換素子、プリアンプ、自走型アナログデジタル変換器AD0~ADN, センサ反射スペクトルパタン検出回路MAX1~MAXNから成り立っている。この図1を用いて波長検波器の動作を以下に説明する。ファブリペロー干渉計FPIは鋸波発生回路SGの出力の鋸波電圧によりその楕型フィルタ特性が変化する。これには例えばシングルモードファイバに直接接続可能なMICRON OPTICS社 (<http://www.micronoptics.com>) のFFP-SI（ファブリペロー干渉計）、FFP-C（鋸波発生回路）を用いることができる。自走型アナログデジタル変換器は自ら繰り返し測定するいわゆるデジタル電圧計である。図2に示す光方向性結合器2経由センサから反射されてきたスペクトル例えばS4、S7の楕型光スペクトラムは、図2のスペクトルS9、S10、S11に示すような前記鋸波電圧によりその透過スペクトルの変化するファブリペロー干渉計FPIとAWGの直列光回路の透過スペクトルとのスペクトルパタンマッチング演算が行われそのパタン一致度に比例した光量がAWGの各チャンネルから出力される。これら各チャンネルからの光出力は光電変換素子、プリアンプを介して電圧として出力される。この電圧は前記自走型アナログデジタル変換器AD1~ADNによりそれぞれデジタル値に変換される。センサ反射スペクトルパタン検出回路MAX1~MAXNはそれぞれセンサ1~センサNの温度を計測するためのものでありそれぞれ鋸波発生回路が鋸波を発生する一周期の間に前記AWG各チャンネルからの出

力光量に比例した即ちスペクトルパターン一致度に比例した電圧値の最大値を与える鋸波の電圧を出力し、鋸波電圧をデジタル値にしたアナログデジタル変換回路AD 0の出力と自走型アナログデジタル変換器AD 1~AD Nの出力を入力として動作するものでありいわゆるメモリとマイクロコンピュータにより構成される。図2の場合スペクトルS4と最もスペクトルパターンが一致するのはスペクトルS9、S10、S11の間ではS11であってこのスペクトルS11を発生するための鋸波電圧V3がこのプリアンプの出力電圧の最大値を与える鋸波電圧となる。このようにして鋸波電圧が特定されるとそれに対応しセンサからの反射スペクトルパターンも特定される。センサからのスペクトルパターンはその変化がそのパタンのFSR以内の変化であればセンサの温度に一对一に対応しているためスペクトルパターンが特定されることによりセンサの温度も特定されることになる。以上が実施例の構成と動作を基にした説明である。

10

【0008】

更に詳しく実施例を説明する。まず WBG の反射帯域におけるセンサの反射スペクトルを理論的に示す。WBG の複素反射率を $R_f(\lambda)$ を結合波方程式から求め、第一のリング共振器の入射ポート IP からドロップポート DP への複素透過率を $T_r(\lambda)$ とするとセンサの反射率 $|R(\lambda)|$ は(1)式で示される。

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

20

但し

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

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

30

$\omega = \sqrt{\Theta^2 - 4\kappa^2}$, $\Theta = \pi^2(\lambda - \lambda_B)/(\Lambda^2 n_0)$, $\lambda_B = 2n\Lambda$, $\kappa = \pi(n_0 - n)/\lambda$, L は該リング共振器のコア長、 L_0 は WBG の長さ、 l はリング共振器の光方向性結合器 DC1、DC2 の結合長、 α はリング共振器の単位長さ当たりの電力損失係数、 κ' はリング共振器 RR1 の光方向性結合器 DC1、DC2 の結合長、 n_0 は WBG のコア部の平均屈折率、 n は WBG の基底屈折率、 n' は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 $L_0 = 15\text{mm}$ 、WBG の基底屈折率 $n = 1.451$ 、グレーティング周期 $\Lambda = 536\text{nm}$ 、平均屈折率 $n_0 = 1.45105$ 、リング長 $L = 20.6\text{mm}$ 、リングコア実効屈折率 $n' = 1.451$ 、 $\kappa' l = 0.02$ 、 $\alpha L = 0.02$ として (3) 式より FSR を求めると 1550nm 近傍では $\text{FSR} = 81\text{pm}$ となる。このときの WBG の反射率を $|R_f(\lambda)|$ とリング共振器の透過率 $|T_r(\lambda)|$ を図7に示す。また図7と同じ波長範囲でのセンサの複素反射率 $|R(\lambda)|$ を図8に示す。図8に示すスペクトルを拡大した図を図9に示す。これからセンサの FWHM は 0.3pm であることがわかる。

40

【0009】

SMF から入射してくる光が WBG の透過帯域の場合について図2、図10、図11を用いて述べる。図10はこの場合のセンサの等価回路である。同図において光方向性結合器 DC1、光方

50

向性結合器DC 2、リング導波路RW 1 から成り立つリング共振器の光路長と、リング導波路RW 2 の光路長を等しく設計する。ドロップポートDPから出射する光スペクトラムは図11のスペクトラム(b)に示すような櫛型スペクトルとなる。該共振器のアドポートAPからDC 1 に入射するスペクトルは上記ドロップポートDPから出射するスペクトルと両リングの光路長が同じであることから同一で図11のスペクトル(d)のようになる。すなわちリング共振器からドロップポートDPを経て抜けた光スペクトルと同一の光スペクトルがアドポートAPから入射する。リング導波路RW2がなければリング共振器の出射ポートOPから出射するスペクトルは図11のスペクトル(c)に示すようにリング共振器のフリースペクトルレンジで決まる波長ごとに帯域阻止特性を示すが、阻止された光スペクトルが同リング共振器のアドポートAPから入射するので結果としてリング共振器の出射ポートOPの出射スペクトルは図12のスペクトル(e)あるいは図2のスペクトラムS5に示す様にWBGの透過帯域においてはフラットに成る。なお前述したように各センサの測定範囲をオーバーラップさせないためにWBGの反射帯域は重なり合わないようシステム設計される。

10

【0010】

センサ自身の製作は本願の発明人が出願している「特許文献1」に記載されているようにいわゆるシリコン、石英などを材料とした平面光導波路製作技術により製作できることは明らかである。またWBGの製作方法もゲルマニウムをドーブした石英コアに空間的に周期的な紫外線を照射することにより製作できることも同文献に記載されている。石英コアにゲルマニウムをドーブしたコアを用いたリング共振器のスペクトルの温度依存性は12pm/°Cであることが「非特許文献3」により知られている。さらに石英コアにゲルマニウムをドーブしたコアを用いたWBGの温度依存性も「非特許文献4」によりその反射中心波長の温度依存性は11.5 pm/°Cでありほぼリング共振器のスペクトルの温度依存性に等しい。従って図1に示すシステムの場合、センサの温度が変化するとリング共振器の線スペクトルはWBGの反射中心波長とほぼ同じ量だけ波長シフトする。従ってこの波長のシフト量を考慮して隣接するWBGの中心波長間隔は決定されねばならない。使用温度範囲が100°Cとするとこのシフト量は100°C × 12pm/°C で1.2nmとなる。50nmの光源帯域幅、WBGの帯域を0.1nmとするとこのシステムで多重測定可能なセンサは50nm/(100 +1200)pm =38個となる。各センサの波長分解能は段落番号0006に記載したように0.1pmが得られるのでダイナミックレンジは1.2nm/0.1pm=12000となる。

20

【産業上の利用可能性】

30

【0011】

上述の発明は建築構造物が致命的ダメージを負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。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】本発明の第一の実施形態例

【図2】本発明の第一の実施形態例におけるシステムの動作原理

【図3】第一の従来技術によるシステムの主要構成

【図4】第一の従来技術を用いたシステムの動作を示すための各個所のスペクトル

【図5】第二の従来技術によるシステムの主要構成

【図6】第二の従来技術によるシステムの動作を示すための各個所のスペクトル

【図7】WBGの反射スペクトルとリング共振器1の入射ポートドロップポート間透過スペクトル例

【図8】入射ポートから光方向性結合器2側への反射光スペクトル例

【図9】入射ポートから光方向性結合器2側への反射光スペクトル例(拡大図)

【図10】SMFから入射してくる光がセンサ1のWBGの透過帯域の場合のセンサの透過回路

【図11】SMFから入射してくる光がセンサ1のWBGの透過帯域の場合における各点の光スペクトル

40

50

【符号の説明】

【0013】

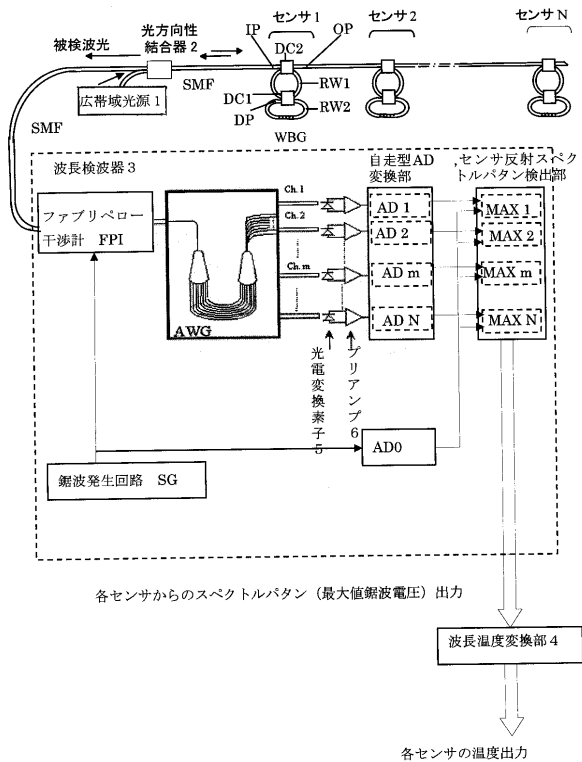
- 1・・・広帯域光源
- 2・・・光方向性結合器
- 3・・・波長検波器
- 4・・・波長温度変換部
- 5・・・光電変換素子
- 6・・・プリアンプ
- 7・・・マイクロコンピュータ
- SMF・・・シングルモード光ファイバ
- IP・・・リング共振器入射ポート
- DP・・・リング共振器ドロップポート
- AP・・・リング共振器アドポート
- OP・・・リング共振器出射ポート

10

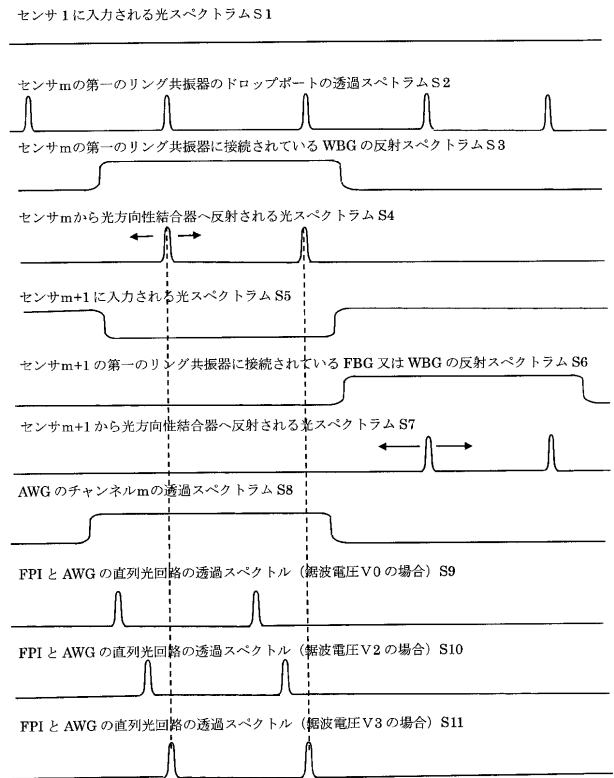
- FBG・・・光ファイバブラッググレーティング
- WBG・・・光導波路ブラッググレーティング
- RW1・・・リング導波路1
- RW2・・・リング導波路2
- DC1・・・光方向性結合器
- DC2・・・光方向性結合器
- AWG・・・アレイ導波路格子

20

【図1】

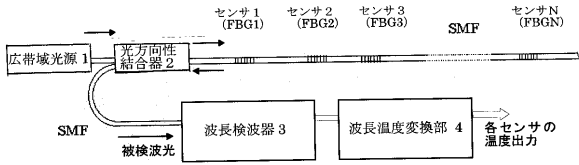


【図2】

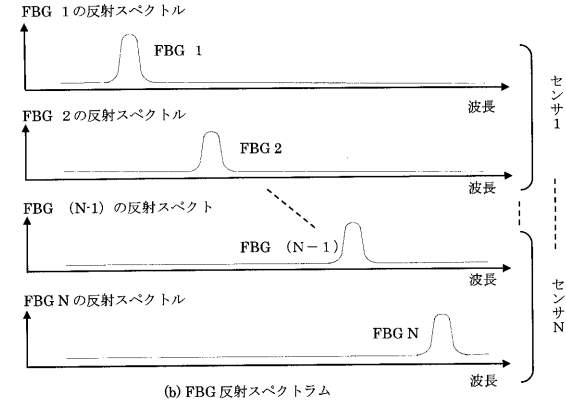
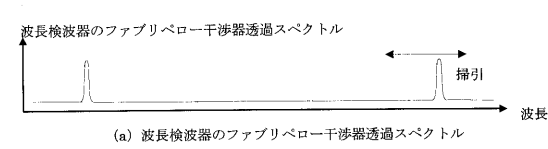


(注) V1≠V2、V1≠V3、V2≠V3

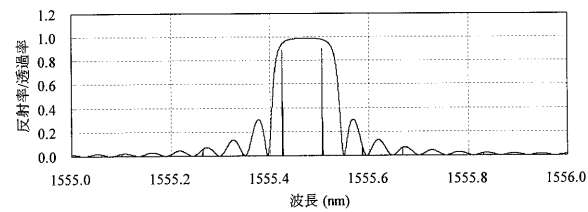
【 図 3 】



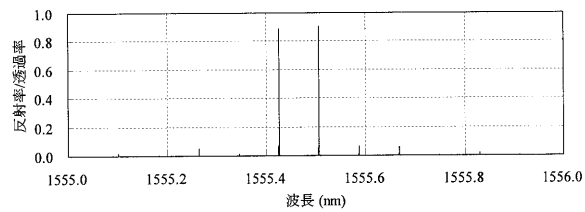
【 図 4 】



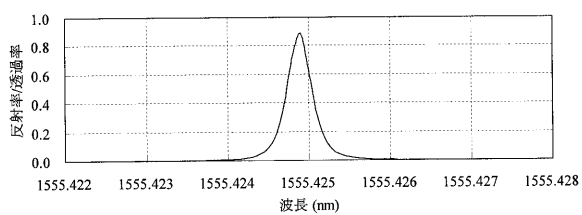
【 図 7 】



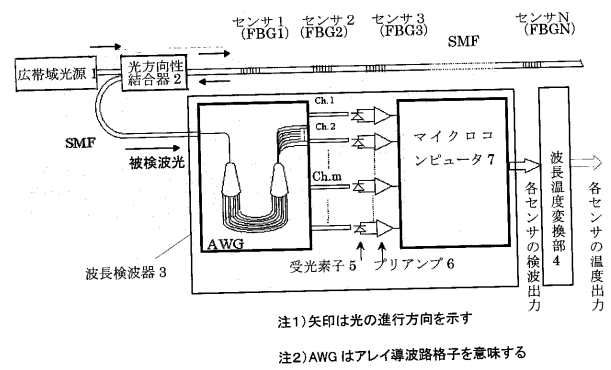
【 図 8 】



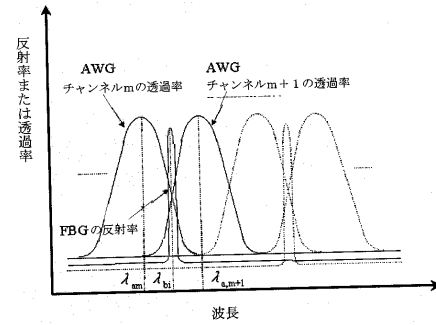
【 図 9 】



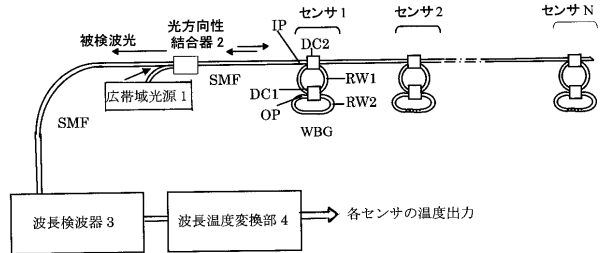
【 図 5 】



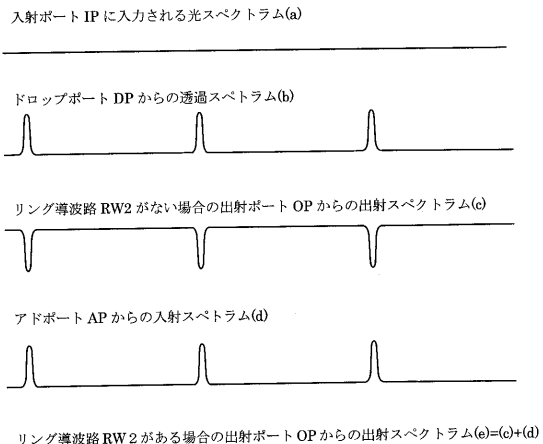
【 図 6 】



【 図 10 】



【 図 11 】



【手続補正書】

【提出日】平成20年4月15日(2008.4.15)

【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】請求項1

【補正方法】変更

【補正の内容】

【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光サーキュレータに入射させ該光方向性結合器あるいは該光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から成る光信号伝送ライン経由1個のセンサに導き、あるいは複数のセンサをシングルモード光ファイバ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前記光方向性結合器あるいは前記光サーキュレータ経由波長検波器に導かれ該検波器においてこれらセンサからの反射スペクトルを計測することによりセンサが検出すべき温度を測定する計測システムであって、前記各センサは第一のリング導波路とブラッググレーティングを内蔵した第二のリング導波路を第一の光方向性結合器で結合すると同時に第一のリング導波路を第二の光方向性結合器を介して前記シングルモード光ファイバからなる前記光信号伝送ラインに結合させることにより第一のリング共振器を構成し該リング共振器の入射ポートからドロップポートへの透過帯域フィルタ特性が狭帯域特性を持った櫛型フィルタ特性となるように第一のリング導波路のリング長を決定し、第二のリング導波路内のブラッググレーティングの反射帯域幅を第一のリング共振器のフリースペクトルレンジFSRよりも広くすることにより該導波路内のブラッググレーティングの反射帯域においてはセンサのスペクトルパターンを複数の狭帯域反射スペクトルからなるスペクトルパターン特性とし、同時に該導波路内のブラッググレーティングの透過帯域における第一のリング共振器の入射ポートから出射ポートへの透過スペクトルを両リングのコアの光路長を同一にすることにより平坦なスペクトルとし、換言すれば隣接して接続されるセンサを構成するリング共振器への入射スペクトルを平坦なスペクトルとし、前記導波路内のブラッググレーティングの反射帯域をセンサごとに異なるようにし、更に各センサの測定範囲即ち各センサから光方向性結合器あるいは光サーキュレータに戻ってくる櫛型光スペクトルの変動範囲を前記のFSR以下とし、波長検波器はハーフミラー間の距離を例えば該ハーフミラーのうちの一方を圧電素子と一体に構成し該圧電素子に印加する電圧によりその櫛型透過スペクトルが変化するファブリペロー干渉計のように電圧によりその狭帯域な櫛型帯域通過フィルタ特性の変更が可能なる干渉計の入力端を入力端とし対象とする複数のセンサの数と同数のチャンネルを備えこれらの各チャンネルを各センサに対応させ1入力多出力のアレイ導波路格子の入力端に前記干渉計の出力端を接続し該アレイ導波路格子の各チャンネルの出力端に光電変換素子を接続し該光電変換素子の各々の出力を極大にするような圧電素子への印加電圧を信号処理回路により求め該それぞれの印加電圧が各センサの温度に対応することを利用して各センサそれぞれの温度を求めることを特徴とした分布型温度計測システム。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0002

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0002】

本発明の背景技術として第一の背景技術及び第二の背景技術を説明する。まず、第一の背景技術につき説明する。図3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1からの光は光方向性結合器2を経てシングルモード光ファイバ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の反射中心波長と相関があるため、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を逆にたどって広帯域光源1側に戻っていき該光源直前に設置されている前記光方向性結合器2によりファブリペロー干渉計などの光学干渉計から構成される波長検波器3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波長検波器3により検波、すなわち測定される。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。一方、圧電素子を使用し時間に対して鋸波状の電圧を該圧電素子に印加させると圧電素子はその電圧により変位を生ずるため該干渉計の半透鏡を圧電素子に接続しておけば2つの半透鏡の間隔を変化させることができる。従って圧電素子に印加する電圧を周期的に変化させれば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を周期的に変化させることができる。図4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)になるように波長検波器3を構成するファブリペロー干渉計を設計しておく。更に該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つの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だけ掃引されるようにシステム設計を行う。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極大になるかをそれぞれ別々に計測することにより測定することが可能となる。これは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からである。図3に示す波長温度変換部4はProgramable Read Only Memory(以下PROM)などのメモリから構成されている。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これをデータとして上記メモリに記憶させておく。これにより波長温度変換部4は波長検波器3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。

【手続補正3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0004

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0004】

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波長検波器 3 を構成するファブリペロー干渉計を経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1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を例えば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 と波長検波器3を構成するファブリペロー干渉計の透過中心波長が一致した場合、

$$\frac{(100\mu W/nm) \times \int_0^{\infty} \exp\left\{-4\ln 2 \left(\frac{\lambda-\lambda_c}{100pm}\right)^2\right\} \exp\left\{-4\ln 2 \left(\frac{\lambda-\lambda_c}{15.5pm}\right)^2\right\} d\lambda}{\approx (100\mu W/nm) \times \int_0^{\infty} \exp\left\{-4\ln 2 \left(\frac{\lambda-\lambda_c}{15.5pm}\right)^2\right\} d\lambda}$$

$\approx (100\mu W/nm) \times 0.5 \times 31pm = 1450pW$ 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はノイズレベルが-90dBm程度であるのでその倍の-87dBm(=2pW)程度である。FBGの中心波長がXpmシフトして2pWの光量変化が発生したとしXを求めると

$(100\mu W/nm) \times 0.5 \times 31pm - (100\mu W/nm) \times 0.5 \times 31pm \times \exp\left\{-4(\ln 2) \times (Xpm)^2 / (100pm)^2\right\} = 2pW$ よりXは2.25pmとなる。すなわち理論的には受光回路のノイズにより2.25pm程度の測定分解能になってしまうことが分かる。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分可能は2.25pmよりも大きく $(2.25 + \beta) pm$ となる。従来の電気方式の温度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 $(2.25 + \beta) pm \times 1000 = (2.25 + \beta) nm$ としなければならない。1つのFBGで $(2.25 + \beta) nm$ 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。上記背景技術1、背景技術2いずれの技術においても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。

【手続補正4】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0005

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0005】

広帯域光源からの光を光方向性結合器あるいは光サーキュレータに入射させ該光方向性結合器あるいは該光サーキュレータからの出射光をSMFから成る光信号伝送ライン経由1個のセンサに導き、あるいは複数のセンサをSMF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前記光方向性結合器あるいは前記光サーキュレータ経由波長検波器に導かれ該検波器においてこれらセンサからの反射光の波長を計測することによりセンサが検出すべき温度を測定する計測システムにおけるセンサに対する課題解決手段と波長検波器に対する課題解決手段について記す。これら2つの解決手段を同時に実施することによりシステム全体に対する課題解決手段となる。

最初にセンサに対する課題解決手段を述べる。前記各センサは第一のリング導波路とブラッググレーティングを内蔵した第二のリング導波路を第一の光方向性結合器で結合すると同時に第一のリング導波路を第二の光方向性結合器を介して前記SMFからなる前記光信号伝送ラインに結合させることにより第一のリング共振器を構成し該リング共振器の入射ポ

ートからドロップポートへの透過帯域フィルタ特性が狭帯域特性を持った櫛型フィルタ特性となるように第一のリング導波路のリング長を決定し、第二のリング導波路内のブラッググレーティングの反射帯域幅を第一のリング共振器のFSRよりも広くすることにより該導波路内のブラッググレーティングの反射帯域における前記リング共振器の櫛型フィルタ特性がそのまま該ブラッググレーティングによりセンサのスペクトル特性として光方向性結合器2を經由して波長検波器に入力される。なおセンサを構成するリング共振器のリングの光路長はこのセンサのスペクトル特性が複数の狭帯域な反射線スペクトルからなるように決定される。同時に該導波路内のブラッググレーティングの透過帯域における第一のリング共振器の入射ポートから出射ポートへの透過スペクトルを両リングのコアの光路長を同一にすることにより平坦なスペクトルとし、換言すれば隣接して接続されるセンサを構成するリング共振器への入射スペクトルを平坦なスペクトルとし、かつ前記導波路内のブラッググレーティングの反射帯域をセンサごとに異なるようシステム設計を行う。

次に波長検波器に対する解決手段を述べる。波長検波器では透過型ファブリペロー干渉計出力を1入力多出力のAWGの入力に接続させ該AWGの複数のチャンネル各々の出力端子に受光素子を接続する。チャンネル数はセンサ数と同じ数であって、各々のセンサと各々のチャンネルを対応させ各チャンネルの波長帯域はセンサの使用温度範囲内で各センサの第二のリング導波路内のブラッググレーティングの反射波長帯域が温度変化により変動する範囲以上の帯域幅を持つAWGとする。前記透過型ファブリペロー干渉計の櫛型透過スペクトル特性はファブリペロー干渉計を構成する半透鏡間の距離を例えば一方の半透鏡と圧電素子を一体に構成しこの圧電素子に印加する電圧を変化させることにより制御される。AWGの全チャンネルをカバーする波長帯域において前記ファブリペロー干渉計の櫛型透過スペクトル特性と前記圧電素子に印加する電圧との関係はシステム構築前にあらかじめ取得しておく。前記ファブリペロー干渉計からAWGのあるチャンネルを經由して光電変換素子にいたるルートは前述の様に1つのセンサに対応している。各々のセンサの波長帯域におけるファブリペロー干渉計の透過スペクトルはセンサから反射してくる櫛型狭帯域スペクトルのFWHMとFSRが略同一のスペクトルになるようし、両者の差はスペクトルの複数のピークを与える波長が異なるのみになるようにする。そして該ファブリペロー干渉計の透過スペクトルをFSRだけ前記圧電素子の駆動電圧の制御により変化させることによりAWGの各々のチャンネル出力はいずれかの電圧で極大値を示す。この時ファブリペロー干渉計の櫛型透過スペクトルの透過率のピークを与える複数の波長とセンサから戻ってくる櫛型反射スペクトルの反射率のピークを与える複数の波長は一致していると考えられる。一方センサの温度によりセンサから戻ってくる櫛型反射スペクトルは変化する。センサの測定範囲はシステム設計の段階でこの櫛型反射スペクトルのFSRより狭い波長範囲とすると該センサの温度とセンサからの櫛型反射スペクトルは一対一に対応する。この関係をあらかじめデータとして記憶しておくことによりAWGの任意のチャンネルの出力の極大値を与える電圧からそのチャンネルに対応するセンサの温度を測定することができる。以上が本発明の課題に対する解決手段である。

【手続補正5】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0006

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0006】

数値計算例を示し発明の効果を説明する。波長検波器 3 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 0.3pm、81pm とし（この実現性については後述の「発明を実施するための最良の形態」で記述する）、センサの波長が 0.1pm 変化した際受光素子がセンサの楕型反射スペクトルのうちの一つの線スペクトルから受光する電力の変化量を求める。簡単のため第二のリング導波路内に描画されたブラッググレーティング（以下 WBG）及び第一のリング共振器を往復した総合的な反射率を中心波長で 1、また波長検波器 3 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 0.6pm の二等辺三角形形状（FWHM=0.3pm 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 $-10\text{dBm/nm}=100\mu\text{W/nm}$ とするとその差は段落番号 0004 と同様にして

$$\begin{aligned} & \frac{100\mu\text{W/nm} \times \int_{0\text{pm}}^{0.3\text{pm}} \left(\frac{\lambda}{0.3\text{pm}} \right)^2 d\lambda + 100\mu\text{W/nm} \times \int_{0.3\text{pm}}^{0.6\text{pm}} \left(\frac{-\lambda}{0.3\text{pm}} + 2 \right)^2 d\lambda}{-100\mu\text{W/nm} \times \int_{0.1\text{pm}}^{0.3\text{pm}} \left(\frac{\lambda}{0.3\text{pm}} \right) \left(\frac{\lambda}{0.3\text{pm}} - \frac{0.1}{0.3\text{pm}} \right) d\lambda} \\ & \frac{-100\mu\text{W/nm} \times \int_{0.3\text{pm}}^{0.4\text{pm}} \left(\frac{\lambda}{0.3\text{pm}} - \frac{0.1}{0.3\text{pm}} \right) \left(\frac{-\lambda}{0.3\text{pm}} + 2 \right) d\lambda}{-100\mu\text{W/nm} \times \int_{0.4\text{pm}}^{0.6\text{pm}} \left(\frac{-\lambda}{0.3\text{pm}} + 2 \right) \left(\frac{-\lambda}{0.3\text{pm}} + \frac{0.7}{0.3\text{pm}} \right) d\lambda} = 368\text{nW} \end{aligned}$$

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 368nW 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。加えて段落番号 0005 で述べたよう各々のセンサから反射されて波長検波器に戻ってくるスペクトルは複数の線スペクトルであり、この線スペクトルの数を N_s とすれば N_s は整数であってこの 368nW は 368N_s nW となる。 $N_s=2$ なら 736nW となり 2pW に比べれば非常に大きなパワー変化となる。

さらに 736N_s nW の光量変化は充分弁別できることは自明であってよって 0.1pm の波長分解能を実現できることが分かる。このことから本発明によれば段落番号 0010 で述べるように帯域幅 50nm の光源を用いてダイナミックレンジは $N_s = 2$ の場合、10000 以上が可能であり同時にセンサを 35 個接続できる。これに対して FBG を用いた従来技術の場合、前述の段落番号 0004 で記したように 22 個程度が接続可能なセンサ数でありダイナミックレンジは 1000 である。

以上のことから本発明は①システムに接続可能なセンサ数が多い、②各センサのダイナミックレンジが広い、③受光素子への外来電磁ノイズの影響が小さい、④信号対雑音比が大きい、⑤このため一般に信号対雑音比改善のため行われる信号の平均化処理も平均回数を従来よりも減らすことができ従ってセンサとしての応答速度を従来よりも高速にできるなどの効果がある。

【手続補正 6】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0007

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0007】

最良の実施形態である分布型温度計測システムの全体構成を図 1 に示す。またその動作を示すため同システムの各個所のスペクトルを図 2 に示す。以下図 1、図 2 を用いてその構成・動作を示す。図 1 において広帯域光源 1 から出射した光は SMF、光方向性結合器 2（光

方向性結合器はサーキュレータでもよい)を経てSMFに入射する。このSMFにはN個のセンサ(Nは1以上の整数)がSMFを介して直列に接続される。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2經由波長検波器3に導かれ該検波器においてこれらセンサからの反射スペクトルを計測することによりセンサが検出すべき温度を測定する。前記各センサは第一のリング導波路RW1とブラッググレーティングWBGを内蔵した第二のリング導波路RW2を第一の光方向性結合器DC1で結合しかつ第一のリング導波路RW1を第二の光方向性結合器DC2を介して前記SMFからなる前記光信号伝送ラインに結合させることにより第一のリング共振器を構成し該リング共振器の入射ポートIPからドロップポートDPへの透過帯域フィルタ特性を第一のリング導波路RW1のリング長を例えばミリメートル程度にすることにより例えばピコメータオーダの図2のスペクトルS2に示すような狭帯域透過楕型フィルタ特性としこの楕型透過フィルタ特性と、第二のリング導波路RW2内のブラッググレーティングWBGの帯域幅を図2のスペクトルS3、S6に示すように第一のリング共振器のFSRよりも広くすることによりWBGにより反射される反射スペクトル特性をピコメータのオーダのFWHMの図2のスペクトルS4、S7に示すような複数の狭帯域反射スペクトル特性とする。この複数の狭帯域反射スペクトルは該リング共振器の入射ポートIPからドロップポートDPへの透過スペクトルのうちの1部分であるが同時にこれはドロップポートDPから入射ポートIPに向かって入射した光の透過スペクトルに等しいはずであるのでWBGにより反射された前記複数の狭帯域反射スペクトルS4、S7は入射ポートIPからドロップポートDPを経て光方向性結合器2に向かって伝播していくことになる。即ちセンサとしての反射スペクトルは各々が狭帯域の複数の反射スペクトルとなる。この反射スペクトル各々が狭帯域特性を持っているがゆえに本発明のセンサはその反射スペクトルのうちエネルギーのピークを与える複数の波長のいずれの波長においてもその波長近傍での波長に対する反射スペクトルのエネルギー密度の変化は、これよりも遥かに広いFWHMをもったFBGを用いた従来の分布計測システムの場合よりも格段に大きくなる。この反射スペクトルの波長に対するエネルギー密度の変化をよりの確に捉えるために波長検波器3も狭帯域フィルタ特性を備えさせる。例えばファブリペロー干渉計などを用いてこの特性を備えさせる。また各センサのWBGの反射帯域は温度変化により変化するがシステムの使用温度範囲のいずれにおいてもこの反射帯域はセンサごとに異なるようにシステム設計を行う。さらに各センサの測定範囲はそれぞれのセンサの第一のリング共振器のFSR以下の帯域幅とする。波長検波器3について詳しく述べると次のようである。波長検波器3は図1に示すようにファブリペロー干渉計FPI、鋸波発生回路SG、アレイ導波路格子AWG、光電変換素子、プリアンプ、自走型アナログデジタル変換器AD0~ADN、センサ反射スペクトルパターン検出回路MAX1~MAXNから成り立っている。この図1を用いて波長検波器の動作を以下に説明する。ファブリペロー干渉計FPIは鋸波発生回路SGの出力の鋸波電圧によりその楕型フィルタ特性が変化する。これには例えばシングルモードファイバに直接接続可能なMICRON OPTICS社(<http://www.micronoptics.com>)のFFP-SI(ファブリペロー干渉計)、FFP-C(鋸波発生回路)を用いることができる。自走型アナログデジタル変換器は自ら繰り返し測定するいわゆるデジタル電圧計である。図2に示す光方向性結合器2經由センサから反射されてきたスペクトル例えばS4、S7の楕型光スペクトラムは、図2のスペクトルS9、S10、S11に示すような前記鋸波電圧によりその透過スペクトルの変化するファブリペロー干渉計FPIとAWGの直列光回路の透過スペクトルとのスペクトルパターンマッチング演算が行われそのパターン一致度に比例した光量がAWGの各チャンネルから出力される。これら各チャンネルからの光出力は光電変換素子、プリアンプを介して電圧として出力される。この電圧は前記自走型アナログデジタル変換器AD1~ADNによりそれぞれデジタル値に変換される。センサ反射スペクトルパターン検出回路MAX1~MAXNはそれぞれセンサ1~センサNの温度を計測するためのものでありそれぞれ鋸波発生回路が鋸波を発生する一周期の間に前記AWG各チャンネルからの出力光量に比例した即ちスペクトルパターン一致度に比例した電圧値の極大値を与える鋸波の電圧を出力し、鋸波電圧をデジタル値にしたアナログデジタル変換回路AD0の出力と自走型アナログデジタル変換器AD1~ADNの出力を入力として動作するものでありいわゆるメモリとマイクロコンピュータにより構成される。図2の場合スペクト

ルS4と最もスペクトルパターンが一致するのはスペクトルS9、S10、S11の間ではS11であってこのスペクトルS11を発生するための鋸波電圧V3がこのプリアンプの出力電圧の極大値を与える鋸波電圧となる。このようにして鋸波電圧が特定されるとそれに対応しセンサからの反射スペクトルパターンも特定される。センサからのスペクトルパターンはその変化がそのパターンのFSR以内の変化であればセンサの温度に一対一で対応しているためスペクトルパターンが特定されることによりセンサの温度も特定されることになる。以上が本発明の最良の実施形態の構成と動作を基にした説明である。

【手続補正7】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0008

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0008】

更に詳しく実施例を説明する。まず WBG の反射帯域におけるセンサの反射スペクトルを理論的に示す。WBG の複素反射率を $R_f(\lambda)$ を結合波方程式から求め、第一のリング共振器の入射ポート IP からドロップポート DP への複素透過率を $T_r(\lambda)$ とするとセンサの反射率 $|R(\lambda)|$ は(1)式で示される。

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

但し

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

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

$\omega = \sqrt{\Theta^2 - 4\kappa^2}$, $\Theta = \pi^2(\lambda - \lambda_B)/(\Lambda^2 n_0)$, $\lambda_B = 2n\Lambda$, $\kappa = \pi(n_0 - n)/\lambda$, L は該リング共振器のコア長、 L_0 は WBG の長さ、 l はリング共振器の光方向性結合器 DC1、DC2 の結合長、 α はリング共振器の単位長さあたりの電力損失係数、 κ' はリング共振器 RR1 の光方向性結合器 DC1、DC2 の単位長さあたりの結合係数、 n_0 は WBG のコア部の平均屈折率、 n は WBG の基底屈折率、 n' は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 $L_0 = 15\text{mm}$ 、WBG の基底屈折率 $n = 1.451$ 、グレーティング周期 $\Lambda = 536\text{nm}$ 、平均屈折率 $n_0 = 1.45105$ 、リング長 $L = 20.6\text{mm}$ 、リングコア実効屈折率 $n' = 1.451$ 、 $\kappa' l = 0.02$ 、 $\alpha L = 0.02$ として (3) 式より FSR を求めると 1550nm 近傍では $\text{FSR} = 81\text{pm}$ となる。このときの WBG の反射率 $|R_f(\lambda)|$ (幅広スペクトル) とリング共振器の透過率 $|T_r(\lambda)|$ (線スペクトル) を図7に示す。また図7と同じ波長範囲でのセンサの複素反射率の絶対値 $|R(\lambda)|$ を図8に示す。図8に示すスペクトルを拡大した図を図9に示す。これからセンサの FWHM は 0.3pm であることがわかる。

【手続補正8】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0009

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0009】

SMFから入射してくる光がWBGの透過帯域の場合についてセンサの動作を図2、図10、図11

を用いて述べる。図10はセンサ1のWBGの透過帯域におけるシステムの等価回路である。同図において光方向性結合器DC1、光方向性結合器DC2、リング導波路RW1から成り立つリング共振器の光路長と、リング導波路RW2の光路長を等しく設計する。ドロップポートDPから出射する光スペクトラムは図11のスペクトラム(b)に示すような櫛型スペクトルとなる。該共振器のアドポートAPからDC1に入射するスペクトラムは上記ドロップポートDPから出射するスペクトラムと両リングの光路長が同じであることから同一で図11のスペクトラム(d)のようになる。すなわちリング共振器からドロップポートDPを経て抜けた光スペクトルと同一の光スペクトルがアドポートAPから入射する。リング導波路RW2がなければリング共振器の出射ポートOPから出射するスペクトラムは図11のスペクトラム(c)に示すようにリング共振器のフリースペクトルレンジで決まる波長ごとに帯域阻止特性を示すが、阻止された光スペクトラムが同リング共振器のアドポートAPから入射するので結果としてリング共振器の出射ポートOPの出射スペクトラムは図11のスペクトル(e)あるいは図2のスペクトラムS5に示す様にWBGの透過帯域においてはフラットに成る。なお前述したように各センサの測定範囲をオーバーラップさせないためにWBGの反射帯域は重なり合わないようシステム設計される。

【手続補正9】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0010

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0010】

センサ自身の製作は本願の発明人が出願している「特許文献1」に記載されているようにいわゆるシリコン、石英などを材料とした平面光導波路製作技術により製作できることは明らかである。またWBGの製作方法もゲルマニウムをドーブした石英コアに空間的に周期的な紫外線を照射することにより製作できることも同文献に記載されている。石英コアにゲルマニウムをドーブしたコアを用いたリング共振器のスペクトルの温度依存性は $12\text{pm}/$ であることが「非特許文献3」により知られている。さらに石英コアにゲルマニウムをドーブしたコアを用いたWBGの温度依存性も「非特許文献4」によりその反射中心波長の温度依存性は $11.5\text{pm}/$ でありほぼリング共振器のスペクトルの温度依存性に等しい。従って図1に示すシステムの場合、センサの温度が変化するとリング共振器の線スペクトルはWBGの反射中心波長とほぼ同じ量だけシフトする。従ってこの波長のシフト量を考慮して隣接するWBGの中心波長間隔は決定されねばならない。使用温度範囲が 100 とするとこのシフト量は $100 \times 12\text{pm}/$ で 1.2nm となる。50nmの光源帯域幅、WBGの帯域を 0.2nm とし段落番号0008で述べた $\text{FSR} = 81\text{pm}$ 、 $\text{FWHM} = 0.3\text{pm}$ のセンサの場合 $N_s = 2$ とするとこのシステムで多重測定可能なセンサは $50\text{nm}/(200+1200)\text{pm} = 35$ 個となる。各センサの波長分解能は段落番号0006に記載したように 0.1pm が得られるのでダイナミックレンジは $1.2\text{nm}/0.1\text{pm} = 12000$ となる。

【手続補正10】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0012

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0012】

【図1】本発明の最良の実施形態

【図2】本発明の最良の実施形態におけるシステムの動作原理

【図3】第一の従来技術によるシステムの主要構成

【図4】第一の従来技術を用いたシステムの動作を示すための各個所のスペクトル

【図5】第二の従来技術によるシステムの主要構成

【図6】第二の従来技術によるシステムの動作を示すための各個所のスペクトル

【図7】WBGの幅広反射スペクトルとリング共振器1の入射ポートドロップポート間透過

線スペクトル例

【図 8】入射ポートから光方向性結合器 2 側への反射光スペクトル例

【図 9】入射ポートから光方向性結合器 2 側への反射光スペクトル例（拡大図）

【図 10】SMFから入射してくる光がセンサ 1 のWBGの透過帯域の場合のシステムの等価回路

【図 11】SMFから入射してくる光がセンサ 1 のWBGの透過帯域の場合における各点の光スペクトル

【手続補正 1 1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0 0 1 3

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0 0 1 3】

- 1 . . . 広帯域光源
- 2 . . . 光方向性結合器
- 3 . . . 波長検波器
- 4 . . . 波長温度変換部
- 5 . . . 光電変換素子（受光素子）
- 6 . . . プリアンプ
- 7 . . . マイクロコンピュータ
- SMF . . シングルモード光ファイバ
- IP . . . リング共振器入射ポート
- DP . . . リング共振器ドロップポート
- AP . . . リング共振器アドポート
- OP . . . リング共振器出射ポート
- FBG . . 光ファイバブラッググレーティング
- WBG . . 光導波路ブラッググレーティング
- RW1 . . リング導波路1
- RW2 . . リング導波路2
- DC1 . . 光方向性結合器
- DC2 . . 光方向性結合器
- AWG . . アレイ導波路格子

【手続補正 1 2】

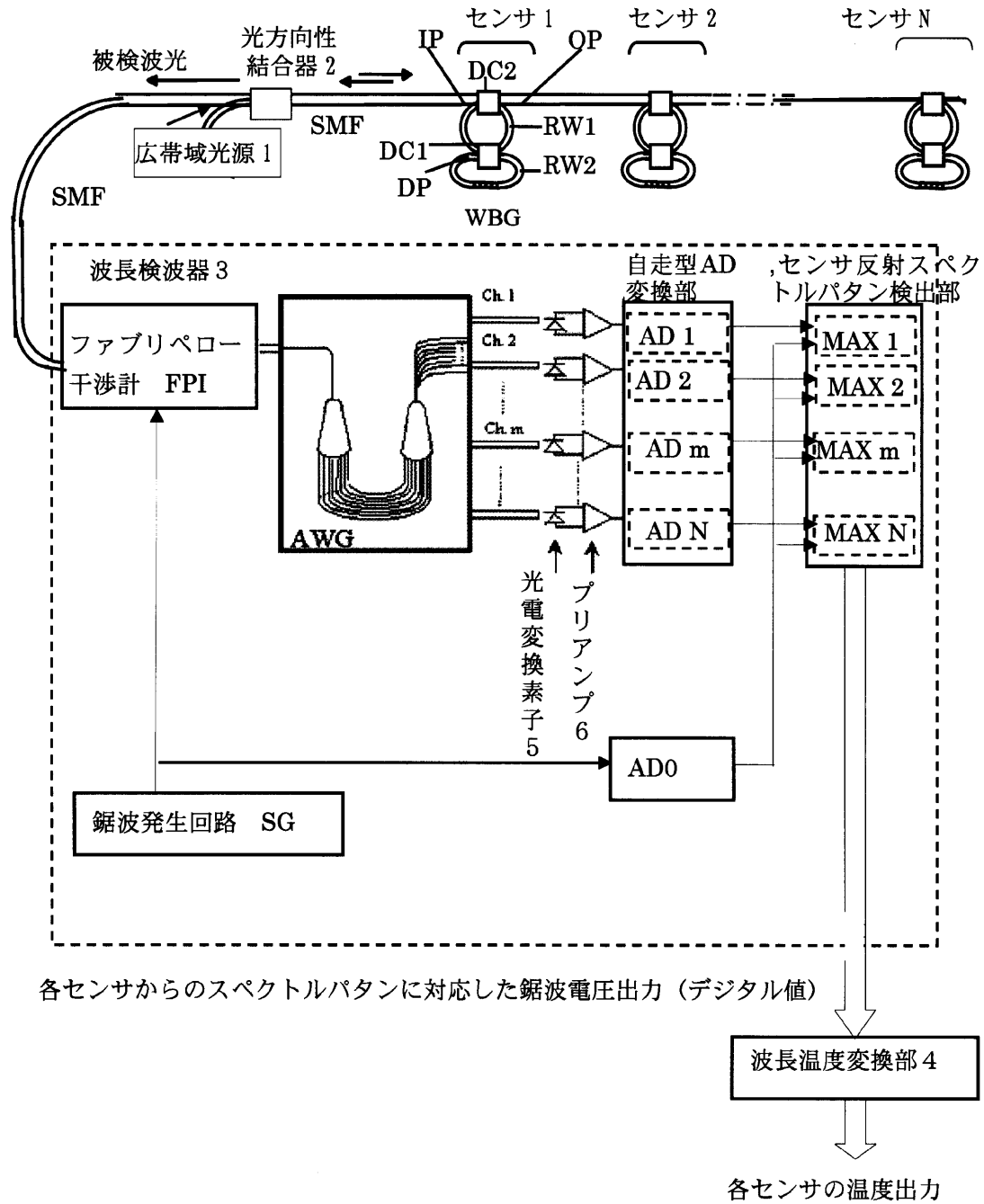
【補正対象書類名】図面

【補正対象項目名】図 1

【補正方法】変更

【補正の内容】

【 図 1 】



【 手続補正 1 3 】

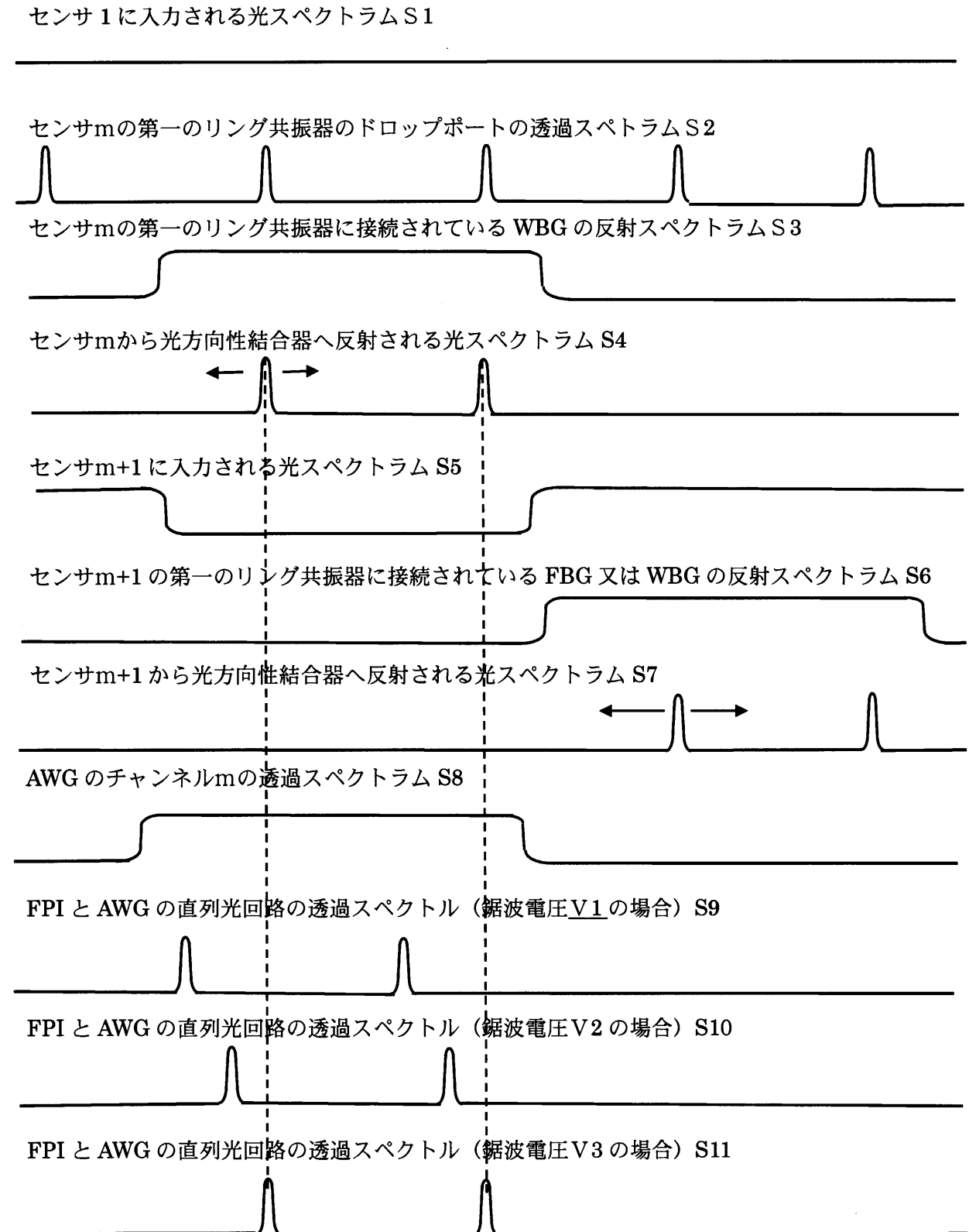
【 補正対象書類名 】 図面

【 補正対象項目名 】 図 2

【 補正方法 】 変更

【 補正の内容 】

【図 2】

(注) $V1 \neq V2$ 、 $V1 \neq V3$ 、 $V2 \neq V3$

【手続補正 1 4】

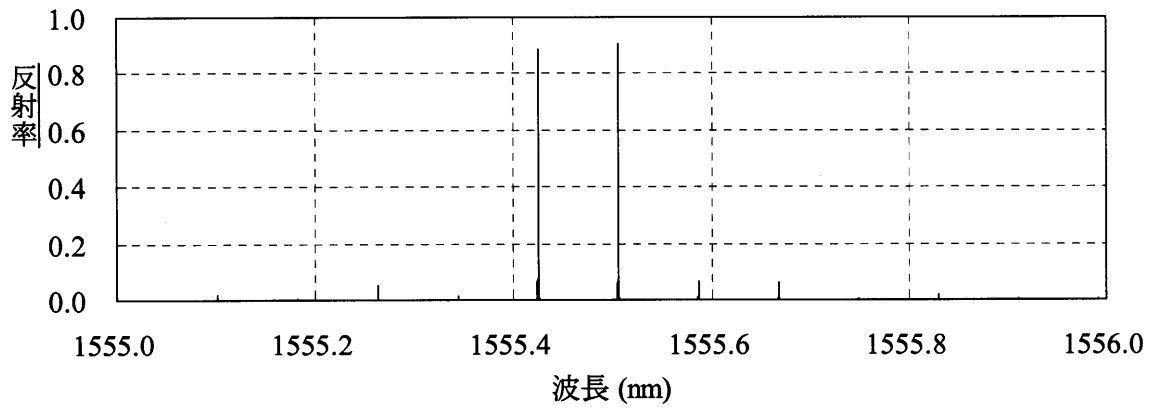
【補正対象書類名】図面

【補正対象項目名】図 8

【補正方法】変更

【補正の内容】

【図 8】



【手続補正 1 5】

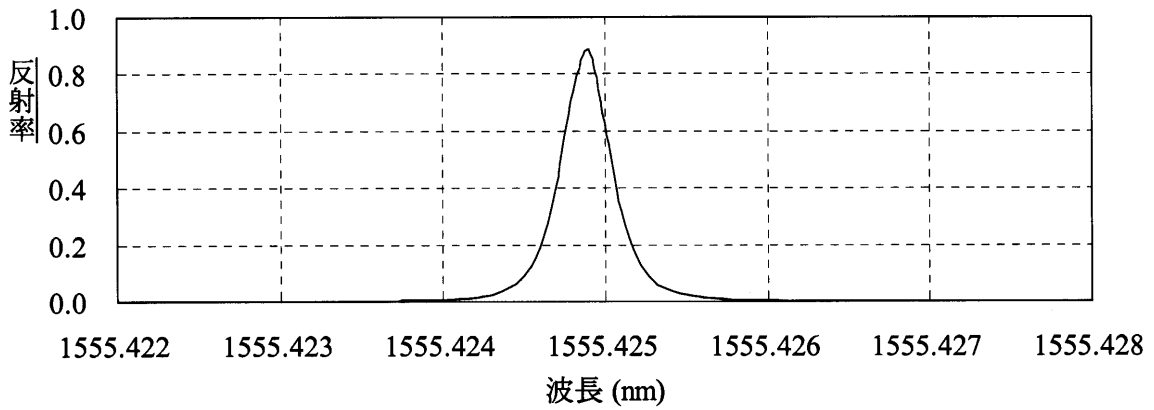
【補正対象書類名】図面

【補正対象項目名】図 9

【補正方法】変更

【補正の内容】

【図 9】



【手続補正 1 6】

【補正対象書類名】図面

【補正対象項目名】図 1 0

【補正方法】変更

【補正の内容】

【図 10】

