

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2009年9月3日(03.09.2009)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2009/107839 A1

- (51) 国際特許分類:
G01D 5/353 (2006.01) G01K 11/12 (2006.01)
G01B 11/16 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2009/053899
- (22) 国際出願日: 2009年3月2日(02.03.2009)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2008-051343 2008年2月29日(29.02.2008) JP
特願 2008-239368 2008年9月18日(18.09.2008) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 株式会社フジクラ(Fujikura Ltd.) [JP/JP]; 〒1358512 東京都江東区木場1丁目5番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 大道 浩児(OMICHI, Koji) [JP/JP]; 〒2858550 千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジクラ 佐倉事業所内 Chiba (JP). 坂元 明(SAKAMOTO, Akira) [JP/JP]; 〒2858550 千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジクラ 佐倉事業所内 Chiba (JP). 平船 俊一郎(HIRAFUNE, Shunichirou) [JP/JP]; 〒

2858550 千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジクラ 佐倉事業所内 Chiba (JP).

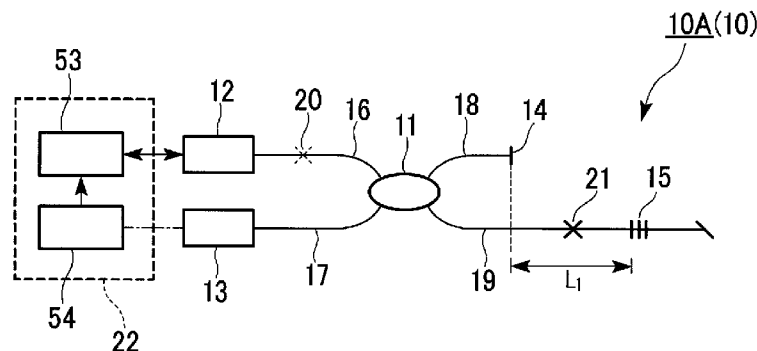
- (74) 代理人: 志賀 正武, 外(SHIGA, Masatake et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目9番2号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: PHYSICAL QUANTITY MEASURING DEVICE OF OPTICAL FREQUENCY RANGE REFLECTION MEASURING TYPE, AND TEMPERATURE AND STRAIN SIMULTANEOUS MEASURING METHOD USING THE DEVICE

(54) 発明の名称: 光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置、および、これを用いた温度と歪みの同時計測方法

[図1]



(57) Abstract: Provided is a physical quantity measuring device of optical frequency range reflection measuring type, which comprises a first polarization holding fiber connected at one end with a tunable laser and at the other end with a polarization holding coupler, a second polarization holding fiber connected at one end with the polarization holding coupler and having a reference reflecting terminal at the other end, a third polarization holding fiber having a sensor formed of a fiber Bragg grating at a core and connected at one end with the polarization holding coupler, a fourth polarization holding fiber connected at one end with the polarization holding coupler, an incident unit for making a measuring light incident on both the two orthogonal polarization axes of the second polarization holding fiber and the two orthogonal polarization axes of the third polarization holding fiber, and an optical path length adjusting unit arranged in the third polarization holding fiber for making constant the optical path lengths of the Bragg reflection lights from the two orthogonal polarization axes in the sensor. The incident unit is arranged either at the first polarization holding fiber or at both the second polarization holding fiber and the third polarization holding fiber.

(57) 要約:

[続葉有]



WO 2009/107839 A1



添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

本発明の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置は、一端がチューナブルレーザに接続され、他端が偏波保持カブラに接続された第 1 の偏波保持ファイバと、一端が前記偏波保持カブラに接続され、他端が参照用反射端である第 2 の偏波保持ファイバと、コアにファイバブラッググレーティングからなるセンサが形成され、一端が前記偏波保持カブラに接続された第 3 の偏波保持ファイバと、一端が前記偏波保持カブラに接続された第 4 の偏波保持ファイバと、前記第 2 の偏波保持ファイバの直交する 2 つの偏波軸に及び前記第 3 の偏波保持ファイバの直交する 2 つの偏波軸の両方に測定光を入射する入射部と、前記第 3 の偏波保持ファイバに配され、前記センサにおける直交する 2 つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を一定にする光路長調整部を備え、前記入射部が、前記第 1 の偏波保持ファイバ、または、前記第 2 の偏波保持ファイバと前記第 3 の偏波保持ファイバとの両方に配されている。

明 細 書

光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置、および、これを用いた温度と歪みの同時計測方法

技術分野

[0001] 本発明は、ファイバブラッググレーティング(Fiber Bragg Grating、FBG)センサを、1本の偏波保持(Polarization Maintaining、PM)ファイバに1つまたは複数配置し、このFBGセンサの位置と、FBGセンサの歪みや温度などの物理量を計測する光周波数領域反射測定(Optical Frequency Domain Reflectometry、OFDR)方式の物理量計測装置と、この物理量計測装置を用いた温度と歪みの同時計測方法に関する。

本願は、2008年2月29日に日本国に出願された特願2008-51343号と、2008年9月18日に日本国に出願された特願2008-239368号とに基づき優先権を主張し、これらの内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 光ファイバを用いて温度や歪みなどの物理量を計測するセンサは、長寿命、軽量、細径かつ柔軟性があるため、狭い空間で使用可能である。また、このセンサは、光ファイバが絶縁性を有するため、電磁ノイズに強いといった特性を有している。そのため、このセンサを、橋梁やビルなどの巨大建築物や、旅客機や人工衛星などの航空・宇宙機器などの健全性評価に用いることが期待されている。

これら構造物の健全性評価を行うためのセンサに求められる性能としては、空間分解能が高いこと、多点のセンサを有すること(検知範囲が広いこと)、及びリアルタイムで計測できることなどが挙げられる。

[0003] これまでも様々な光ファイバセンサシステムが提案されているが、上記の要求性能を十分に満たす最も有望な光ファイバセンサとしては、FBGセンサとOFDR方式の解析方法とを用いた光ファイバセンサが挙げられる。

FBGセンサとOFDR方式の解析方法とを用いた光ファイバセンサシステムは、FBGセンサからのブラッグ反射光と参照用の反射端からの反射光との干渉強度の周期的変化を利用して、FBGセンサの位置を特定する。また、この光ファイバシステムは

、ブラッグ反射光の波長の変化量から、検知部の歪みや温度を計測する。

[0004] この光ファイバセンサシステムとしては、1mm以下の高い空間分解能を有すること(例えば、非特許文献1参照)、8mの光ファイバに800個のFBGセンサを配置して、4本の光ファイバで計3,000点以上もの歪み計測を同時に行えること(例えば、非特許文献2参照)、計測のリアルタイム性に優れていること(例えば、特許文献1参照)などが開示されている。さらに、非特許文献1によれば、FBGセンサの長手方向の歪み分布(FBGセンサの長手方向に沿った歪み量が不均一であることを意味する)を計測することも可能である。この歪み分布の計測については、特許文献3にも記載されている。

[0005] 一方、光ファイバセンサシステムの一般的な問題点としては、温度や歪みなどの物理量が複数項目変化すると、それらの変化量を個別に識別して測定できないことが挙げられる。そのため、例えば、光ファイバセンサシステムを歪みセンサとして使用する場合、検知部の温度変化を歪みの変化として捉えないようにするために、別途、温度補償用のセンサを用いる必要がある。

この問題を解決する手法としては、PMファイバからなるFBGセンサを用いる方法が挙げられる(例えば、特許文献1参照)。この手法は、PMファイバの一種であるPANDAファイバを用い、このPANDAファイバからなるFBGセンサにおける直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長の変化量を測定することにより、温度と歪みを同時に計測できる方法である。

すなわち、この手法は、温度補償用のセンサが不要の歪みセンサを実現し得る方法である。

[0006] 以上説明した技術を組み合わせて、PMファイバからなるFBGセンサとOFDR方式の解析方法とを用いた光ファイバセンサシステムを使用すれば、高分解能、多点計測、リアルタイム計測、温度と歪みの同時計測を同時に達成できると考えられる。

特許文献1: 日本国特許第3740500号公報

特許文献2: 日本国特許第3819119号公報

特許文献3: 日本国特許第4102291号公報

非特許文献1: H. Murayama, H. Igawa, K. Kageyama, K. Ohta, I. Ohsawa, K. Uzawa

, M. Kanai, T. Kasai and I. Yamaguchi, "Distributed Strain Measurement with High Spatial Resolution Using Fiber Bragg Gratings and Optical Frequency Domain Reflectometry" Proceedings OFS-18, ThE40 (2006)

非特許文献2: B. Childers, M. E. Froggatt, S. G. Allison, T. C. Moore, D. A. Hare, C. F. Batten and D. C. Jegley, "Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four eight-meter optical fibers during static load test of a composite structure." Proceedings SPIE's 8th International Symposium on Smart Structure and Materials, Vol. 4332, pp. 133-142 (2001)

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0007] しかしながら、PMファイバからなるFBGセンサとOFDR方式の解析方法とを用いた光ファイバセンサシステムは、これまでに提案されていない。なぜならば、OFDR方式の解析方法により、PMファイバからなるFBGセンサにおける直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光を安定して測定するためには、測定光を、直交する2つの偏波軸に制御性良く分波して、FBGセンサおよび参照用の反射端に伝搬させる必要がある。しかしながら、通常、測定光は単一偏波で出射される。そのため、FBGセンサと参照用の反射端までの光路をPMファイバで構成すると、FBGセンサにおける直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射のうち一方は測定できるものの、他方は測定できない。この結果、上述したように直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光を測定することができない。

[0008] 単一偏波の測定光を、直交する2つの偏波軸に分波する方法としては、FBGセンサと参照用の反射端までの光路の少なくとも一部をシングルモードファイバで構成する方法が挙げられる。しかしながら、この方法では単一偏波で出射された測定光を、直交する2つの偏波軸に制御性よく分波できないという問題がある。

また、PMファイバからなるFBGセンサとOFDR方式の解析方法とを用いた光ファイバセンサシステムでは、直交する2つの偏波軸の実効屈折率が異なる。そのため、OFDR方式の解析において2つの偏波軸からのブラッグ反射光の位置が異なるという問題がある。そのため、高分解能でFBGセンサの位置を特定することが難しい。

[0009] OFDR方式の解析では、FBGセンサからのブラッグ反射光と参照用の反射端からの反射光との干渉信号の周期から、FBGセンサの位置を特定する。すなわち、得られた干渉信号に対して適当な光ファイバの実効屈折率を代入して短時間フーリエ変換(Short-time Fourier transform:以下、STFT)解析することにより、FBGセンサの位置(正確には参照用の反射端とFBGセンサのファイバ長差)を求めることができる。ここで、PMファイバからなるFBGセンサでは、直交する2つの偏波軸の実効屈折率が異なるにも関わらず、ある一定の実効屈折率を代入するために、結果として2つの偏波軸からのブラッグ反射光の位置が異なってしまう。

[0010] 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであって、FBGセンサを1本のPMファイバに1つまたは複数配置し、このFBGセンサの位置と、FBGセンサの歪みや温度などの物理量をOFDR方式の解析方法で計測する光ファイバセンサシステムにおいて、特に温度と歪みの同時計測が可能で、かつ高い空間分解能で計測することが可能なOFDR方式の物理量計測装置と、この物理量計測装置を用いた温度と歪みの同時計測方法の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0011] 本発明は、上記課題を解決して係る目的を達成するために以下の手段を採用した。

(1)本発明の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置は、測定光を出射するチューナブルレーザと;このチューナブルレーザに一端が接続された第1の偏波保持ファイバと;この第1の偏波保持ファイバの他端に接続された偏波保持カップラと;この偏波保持カップラに一端が接続され、他端が参照用反射端である第2の偏波保持ファイバと;前記偏波保持カップラに一端が接続された第3の偏波保持ファイバと;この第3の偏波保持ファイバのコアに形成されたファイバブラッググレーティングからなるセンサと;前記偏波保持カップラに一端が接続された第4の偏波保持ファイバと;この第4の偏波保持ファイバを介して前記偏波保持カップラと接続され、前記センサからのブラッグ反射光と前記参照用反射端からの参照光とを検出するフォトダイオードと;このフォトダイオードで検出された前記ブラッグ反射光と前記参照光との合波光強度変化に基づき、これらブラッグ反射光及び参照光間の干渉強度の変調を検知する制御部と

;前記第2の偏波保持ファイバの直交する2つの偏波軸及び前記第3の偏波保持ファイバの直交する2つの偏波軸の両方に、前記測定光を入射する入射部と;前記第3の偏波保持ファイバに配され、前記センサにおける直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を一定にする光路長調整部と;を備え、前記入射部は、前記第1の偏波保持ファイバ、または、前記第2の偏波保持ファイバと前記第3の偏波保持ファイバとの両方に配されている。

[0012] (2)前記入射部は、この入射部が前記第1の偏波保持ファイバに配されている場合には、この第1の偏波保持ファイバに 45° の偏波軸オフセット角度を有して形成された融着接続部であり;前記入射部が前記第2の偏波保持ファイバ及び前記第3の偏波保持ファイバの両方に配されている場合には、これら第2の偏波保持ファイバ及び前記第3の偏波保持ファイバのそれぞれに 45° の偏波軸オフセット角度を有して形成された融着接続部である;のが好ましい。

(3)前記光路長調整部は、前記センサが形成された前記第3の偏波保持ファイバに、 90° の偏波軸オフセット角度を有して形成された融着接続部であるのが好ましい。

(4)前記光路長調整部は、前記第2の偏波保持ファイバの長さに相当する位置から前記センサまでのファイバ長の中に設けられたのが好ましい。

(5)前記第3の偏波保持ファイバに、前記センサが複数配されているのが好ましい。

(6)前記光路長調整部が、隣接する前記センサ間のファイバ長の中にそれぞれ配されているのが好ましい。

(7)前記第1の偏波保持ファイバから前記第4の偏波保持ファイバのうち、少なくとも前記第3の偏波保持ファイバにおける直交する2つの偏波軸の実効屈折率差が、 4×10^{-4} 以上であるのが好ましい。

[0013] (8)本発明の温度と歪みの同時計測方法は、上記(1)ないし(7)のいずれかに記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を用いて、1つまたは複数の前記センサにおける直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長を計測する工程と;計測した前記ブラッグ反射光の波長に基づいて、前記センサにおける前記ブラ

ッグ反射光の波長の温度と歪みによる変化量を計算する工程と;計算した前記変化量に基づいて、前記センサが配された部位の温度および歪みを同時に計測する工程と;を備える。

(9)前記第3の偏波保持ファイバの、前記センサが配された部位長手方向に沿った温度分布および歪み分布を算出するのが好ましい。

発明の効果

[0014] 上記(1)に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置によれば、偏波保持ファイバのコアに形成したセンサと、このセンサを配置した偏波保持ファイバの直交する2つの偏波軸に測定光を入射するための入射部とを有するので、センサの温度と歪みの同時計測を行える。また、センサの直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を一定にするための光路長調整部を有するので、センサの位置を正確に特定でき、高い空間分解能で物理量の計測を行える。

上記(1)から(7)の何れか1項に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を用いた上記(8)に記載の温度と歪みの同時計測方法によれば、1つのFBGセンサから歪みと温度を同時に計測できる。さらに、センサの長手方向に沿った温度分布と歪み分布を同時に計測できる。

図面の簡単な説明

[0015] [図1]図1は、本発明の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置の第一の実施形態を示す概略構成図である。

[図2]図2は、同実施形態の変形例を示す概略構成図である。

[図3]図3は、PANDAファイバを用いた場合の偏波軸角度オフセット融着接続を示す概略斜視図である。

[図4]図4は、本発明の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置の第二の実施形態を示す概略構成図である。

[図5]図5は、本発明の実施例1の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を示す概略構成図である。

[図6]図6は、同実施例を用いて、センサの状態を計測した結果を示すスペクトログラムである。

[図7]図7は、比較例1の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を用いて、センサの状態を計測した結果を示すスペクトログラムである。

[図8]図8は、比較例2の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を用いて、センサの状態を計測した結果を示すスペクトログラムである。

[図9]図9は、同比較例2において、センサのスロー軸とファスト軸からのブラッグ反射光の位置ずれ量を計算した結果を示すグラフである。

[図10]図10は、本発明の実施例2の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を示す概略構成図である。

[図11]図11は、同実施例2を用いて、センサ(第1のセンサ)の状態を計測した結果を示すスペクトログラムである。

[図12]図12は、同実施例2を用いて、センサ(第2のセンサ)の状態を計測した結果を示すスペクトログラムである。

[図13]図13は、本発明の実施例3の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を用いて、センサの状態を計測した結果を示すスペクトログラムである。

[図14]図14は、同実施例3において、PANDAファイバの複屈折とPANDAファイバにより構成されたFBGからなるセンサの温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差の関係をj示すグラフである。

[図15]図15は、本発明の実施例4の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を用いて、センサの状態を計測した結果を示すスペクトログラムである。

[図16]図16は、同実施例4において、センサに生じる温度分布と歪みを計測するための実験系を模式的に示した図である。

[図17]図17は、同実施例4において、ヒータAの位置およびヒータBの位置における温度変化と歪みを計測した結果を示すスペクトログラムである。

[図18]図18は、同実施例4において、ヒータAの位置およびヒータBの位置における温度変化と歪みを計測した結果を示すグラフである。

符号の説明

[0016] 10A, 10B, 10C, 10D, 10E, 10F(10) 光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置

- 11, 31, 32, 偏波保持カプラ
- 12 チューナブルレーザ
- 13, 35 フォトダイオード
- 14, 37, 38 参照用反射端
- 15, 15a, 15b センサ
- 16, 17, 18, 19 偏波保持ファイバ
- 20 入射部
- 21, 21a, 21b 光路長調整部
- 22 制御部
- 41, 42, 43, 44, 47, 48 PANDAファイバ
- 53 システムコントローラ
- 54 A/Dコンバータ
- 60 (60A, 60B) PANDAファイバ
- 61 (61A, 61B) コア
- 62 (62A, 62a, 62B, 62b) 応力付与部

発明を実施するための最良の形態

[0017] 以下、図面を参照して本発明の光ファイバセンサシステムの実施形態を説明する。

[0018] (第一の実施形態)

図1は、本発明の光周波数領域反射測定(以下、「OFDR」と略す)方式の物理量計測装置の第一の実施形態を示す概略構成図である。

本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10A(10)は、測定光を出射するチューナブルレーザ12と;このチューナブルレーザ12に一端が接続された第1の偏波保持ファイバ16と;この第1の偏波保持ファイバ16の他端に接続された偏波保持カプラ11と;この偏波保持カプラ11に一端が接続され、他端が参照用反射端14である第2の偏波保持ファイバ18と;偏波保持カプラ11に一端が接続された第3の偏波保持ファイバ19と;この第3の偏波保持ファイバ19のコアに形成されたファイバブラッググレーティングからなるセンサ15と;偏波保持カプラ11に一端が接続された第4の偏波保持ファイバ17と;この第4の偏波保持ファイバ17を介して偏波保持カプラ11と接続さ

れ、センサ15からのブラッグ反射光と参照用反射端14からの参照光とを検出するフォトダイオード13と;このフォトダイオード13で検出された前記ブラッグ反射光と前記参照光との合波光強度変化に基づき、これらブラッグ反射光及び参照光間の干渉強度の変調を検知する制御部22と;第2の偏波保持ファイバ18の直交する2つの偏波軸及び第3の偏波保持ファイバ19の直交する2つの偏波軸の両方に、前記測定光を入射する入射部20と;第3の偏波保持ファイバ19に配され、センサ15における直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を一定にする光路長調整部21と;から概略構成されている。本実施形態において、偏波保持カプラ11は、第1～第4の偏波保持(以下、「PM」と略す)ファイバと同種のPMファイバで構成されている。

[0019] チューナブルレーザ12としては、チューナブルレーザ12から出射した測定光がセンサ15で反射してフォトダイオード13に入射するまでの光路長よりも長いコヒーレンス長を有するものが好適に用いられる。

[0020] フォトダイオード13としては、チューナブルレーザ12から出射する測定光の波長を変化させた時、2つの反射点、すなわち、参照用反射端14とセンサ15とから得られる光干渉の強度変調を検知できるカットオフ周波数を有するものが好適に用いられる。

[0021] 制御部22は、例えばフォトダイオード13からの信号をサンプリングするA/Dコンバータ54と、このサンプリングデータを解析するシステムコントローラ53とを備える。A/Dコンバータ54としては、フォトダイオード13で検知した光干渉の強度変調を検知できるサンプリング周波数を有するものが好適に用いられる。A/Dコンバータ54は、フォトダイオード13で計測したアナログの光干渉信号を、デジタル的にサンプリングする。このデジタル干渉信号は、システムコントローラ53へと伝送される。システムコントローラ53では、このデジタル干渉信号を用いて、STFT(Short Time Fourier Transform;STFT)解析が行なわれる。解析方法に関しては、後述する。このシステムコントローラ53としては、A/Dコンバータ54で得られたデジタル干渉信号をSTFT解析できるものであれば、特に限定されない。システムコントローラ53は、汎用インターフェースバス(GPIB)を介してチューナブルレーザ12に接続され、チューナブルレーザ12の制御を行なっている。

[0022] 入射部20は、第1のPMファイバ16に設けられ、チューナブルレーザ12から単一

偏波として出射された測定光を、この第1のPMファイバ16の直交する2つの偏波軸に分波する。入射部20としては、第2のPMファイバ18の直交する2つの偏波軸及び第3のPMファイバ19の直交する2つの偏波軸の両方に、測定光を入射できればよく、図2に示すように、第2のPMファイバ18と第3のPMファイバ19との両方に配されていてもよい。入射部20を1箇所だけ設けるだけでよい点で、入射部20は、センサ15が形成された第3のPMファイバ19と、参照用反射端14を有する第2のPMファイバ18との分岐部の前段(すなわち、第1のPMファイバ16)に設けられていることが好ましい。

入射部20としては、 $\lambda/2$ 板を挿入する方法、偏波軸角度オフセット融着接続を設ける方法、あるいは、チューナブルレーザ12からの単一偏波の測定光に対して、PMファイバの偏波軸が角度オフセットを有するように、PMファイバを配置し、チューナブルレーザ12からの出射光をPMファイバに結合させる方法など、単一偏波の測定光を、PMファイバの直交する2つの偏波軸に分波できる手段であれば、いかなるものでも用いられる。

その中でも、簡便である点、測定光を均等に2偏波に分波できる点から、この入射部20としては、この第1のPMファイバ16に 45° の偏波軸オフセット角度を有して形成された融着接続(以下、「 45° オフセット融着」と言う)であるのが好ましい。

[0023] ここで、偏波軸角度オフセットを有する融着接続とは、PMファイバの一方の偏波軸が、融着点であるオフセット角度を有するように、2つのPMファイバを融着接続することである。PMファイバの一方の偏波軸が、融着点であるオフセット角度を有するということは、直交する他方の偏波軸も同様のオフセット角度を有して2つのPMファイバが融着接続されることを意味する。

[0024] 図3は、PMファイバとしてPANDA(Polarization-maintaining and Absorption reducing)ファイバを用いた場合の、 45° オフセット融着の様子を模式的に示した図である。

ここで、PANDAファイバ60とは、ファイバに複屈折を持たせるために、コア61両端のクラッドに、円形の応力付与部62を設けたファイバである。この応力付与部62により、直交する2つの偏波モード間に伝搬定数差(実効屈折率差)が生じる。そのため、

それぞれの偏波モードからもう一方への偏波モードへの結合を抑制できる。この直交する2つの偏波モードが伝搬する偏波軸は、スロー軸、ファスト軸と呼ばれ、スロー軸とファスト軸の実効屈折率の差は、複屈折と呼ばれる。

この2つの応力付与部62とコア61を結んだ直線(すなわち、PANDAファイバ60Aの、2つの応力付与部62A, 62aと、コア61Aとを結んだ直線63Aと;PANDAファイバ60Bの、2つの応力付与部62B, 62bと、コア61Bとを結んだ直線63Bと;)を、2つのPANDAファイバ60A, 60Bの間で所望の偏波軸オフセット角度 θ となるように接続することで、所望のオフセット融着接続を実現できる。

[0025] 光路長調整部21としては、センサ15における直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を一定に調整できれば、いかなるものでも用いられる。例えば、PMファイバに複屈折結晶を挿入する方法や、PMファイバに偏波軸角度オフセットを有する融着接続を設ける方法などが挙げられる。

[0026] 光路長調整部21としては、簡便である点、光路長を調整しやすい点から、上記の中でも、90° オフセット融着が好ましい。

[0027] また、光路長調整部21は、センサ15における直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を一定にするために、参照用反射端14を有するPMファイバ18の長さに相当する位置からセンサ15までのファイバ長(図1に示す L_1)の中間に設けられる。光路長調整部21をこの位置に設けることで、センサ15における直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を一定にでき、直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光を解析した際に、同じ測定位置にできる。

[0028] この実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Aでは、チューナブルレーザ12とPMカプラ11との間に、チューナブルレーザ12から単一偏波として出射された測定光を、第2のPMファイバ18および第3のPMファイバ19の直交する2つの偏波軸に分岐するための入射部20が設けられている。これにより、センサ15における直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光を得ることができる。この直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長の変化により、センサ15が配された部位の温度および歪みを同時に計測できる。その結果として、温度補償用を別途必要としない歪みセンサを実現できる。

また、このOFDR方式の物理量計測装置10Aでは、参照用反射端14を有する第2のPMファイバ18の長さに相当する位置からセンサ15までのファイバ長の中に、光路長調整部21が設けられている。これにより、センサ15における直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を一定にできる。すなわち、センサ15からのブラッグ反射光と参照用反射端14からの反射光との干渉信号をSTFT解析すると、直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光は同じ位置となる。

[0029] さらに、このOFDR方式の物理量計測装置10Aを用いて、センサ15における直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長における温度と歪みによる変化量を計測することにより、検知部の温度および歪みを同時に計測できる。

[0030] <センサの位置特定方法>

次に、本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Aを用いたセンサ15の位置特定方法について説明する。第1～第4のPMファイバとして、PANDAファイバを用いた場合を例示する。

本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Aでは、フォトダイオード13に、センサ15からのブラッグ反射光と参照用反射端14からの反射光との干渉光が入射する。フォトダイオード13に入射するこの光干渉信号 D_1 は、直交する2つの偏波軸の信号の和となり、下記の式(1)で表される。

$$D_1 = R_{slow} \cos\{k(n_{slow} + n_{fast})L_1\} + R_{fast} \cos\{k(n_{slow} + n_{fast})L_1\} \quad (1)$$

上記の式(1)において、 R_{slow} と R_{fast} はPANDAファイバの直交する2つの偏波軸からの干渉光の強度、すなわち、スロー軸(X軸)とファスト軸(Y軸)からの干渉光強度を示す。 k は波数、 n_{slow} と n_{fast} はスロー軸(X軸)とファスト軸(Y軸)の実効屈折率を示す。 L_1 は第2のPANDAファイバ(PMファイバ)18におけるPMカプラ11から参照用反射端14までの長さ、第3のPANDAファイバ(PMファイバ)19におけるPMカプラ11からセンサ15までの長さとの差(ファイバ長差)を示す。つまり L_1 は、図1に示すように、第3のPANDAファイバ19において、参照用反射端14を有するPA第2のPANDAファイバ18の長さに相当する位置からセンサ15までのファイバ長を示している。

[0031] 本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Aを用いて上記 D_1 を求め、得られ

た光干渉信号 D_1 を、システムコントローラ53にてSTFT解析する。ここで、式(1)における右辺第1項および第2項における $(n_{\text{slow}} + n_{\text{fast}})_1 L$ は、チューナブルレーザ12から出射した測定光がファイバ長差 L_1 を往復する光路長を示す。つまり、第3のPANDAファイバにおける L_1 に相当する光路長は、 $(n_{\text{slow}} + n_{\text{fast}})_1 L$ の半分に相当する $\{(n_{\text{slow}} + n_{\text{fast}})_1 / 2\} L_1$ となる。

なお、本発明の物理量計測装置では、フォトダイオード13において計測した上記式(1)に相当するアナログの光干渉信号を、制御部22に備えたA/Dコンバータ54にてデジタル的にサンプリングし、このデジタル干渉信号を、制御部22に備えたシステムコントローラ53にてSTFT解析するが、本文においては、フォトダイオード13において計測した光干渉信号を制御部22に備えたシステムコントローラ53にてSTFT解析すると略記する場合も、同様の処理をおこなっていることを意味する。前記のとおり、A/Dコンバータ54は、フォトダイオード13で検知した光干渉の強度変調を検知できるサンプリング周波数を有するので、アナログの光干渉信号とサンプリングしたデジタル干渉信号とは、原理的には同じ信号である。また、アナログの光干渉信号を示す数式を用いることで、より効果的に本発明の特徴を説明できる箇所は、光干渉信号を用いて説明する。

[0032] 次いで、本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Aでは、得られた光路長 $\{(n_{\text{slow}} + n_{\text{fast}})_1 / 2\} L_1$ に対して、既知の n_{slow} と n_{fast} を代入して L_1 を求める。

この n_{slow} と n_{fast} としては、センサ15からのブラッグ反射光の波長と、センサ15の作製に使用したユニフォーム位相マスクの回折格子の間隔から計算されるグレーティング周期とから求めた値や、ニアフィールドパターン測定から求めた値などを用いることができる。ここで、式(1)における右辺第1項と右辺第2項の光路長が一定であるということは、スロー軸とファスト軸におけるブラッグ反射光がファイバ長差 L_1 に対して同じ光路長を持つことを意味している。

本実施形態では、このようにしてセンサ15における直交する2つの偏波軸からブラッグ反射光が得られる。そのため、温度と歪みを同時に計測が可能となる。これにより、本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Aを用いて歪み計測を行なう場合、温度補償用のセンサが不要となる。また、スロー軸とファスト軸におけるブラッグ反

射光が、ファイバ長差 L_1 に対して同じ光路長を持つため、センサ15の位置を正確に特定でき、高い空間分解能で歪み計測が可能となる。

[0033] <温度と歪みの計測方法>

次に、本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Aを用いた温度と歪みの計測方法について説明する。この計測方法は、センサ15の直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長のシフト量から、計算により温度と歪みを求める方法である。

まず、予めある基準温度(例えば、20℃)、基準歪み(例えば、 $0 \mu \epsilon$)におけるセンサ15の直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長を計測しておく。

[0034] 次いで、センサ15を検知したい場所(以下、「検知部」と言う)に配置し、この検知部において、センサ15の直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長を計測する。

次いで、検知部におけるブラッグ反射光の波長と、基準温度、基準歪みでのブラッグ反射光の波長差(変化量)を計算する。

次いで、得られた波長差を、下記の式(2)に代入して、検知部における温度と基準温度の差、検知部における歪みと基準歪みの差を求め、最後に既知の基準温度、基準歪みから検知部における実温度と実歪みを算出する。

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_{fast}}{\partial \epsilon}, -\frac{\partial \lambda_{slow}}{\partial \epsilon} \\ -\frac{\partial \lambda_{fast}}{\partial T}, \frac{\partial \lambda_{slow}}{\partial T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{slow} \\ \Delta \lambda_{fast} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{但し、 } D = \frac{\partial \lambda_{fast}}{\partial \epsilon} \cdot \frac{\partial \lambda_{slow}}{\partial T} - \frac{\partial \lambda_{fast}}{\partial T} \cdot \frac{\partial \lambda_{slow}}{\partial \epsilon}$$

[0035] 上記の式(2)において、 ΔT は検知部における温度と基準温度の差、 $\Delta \epsilon$ は検知部における歪みと基準歪みの差を示す。 T は検知部における温度、 ϵ は検知部における歪みを示す。 λ_{slow} と λ_{fast} は検知部におけるセンサ15の直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長を示す。 $\Delta \lambda_{slow}$ と $\Delta \lambda_{fast}$ は検知部におけるセンサ15の直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長と、基準温度、基準歪みにお

けるセンサ15の直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長との差を示す。

$\partial \lambda_{\text{slow}} / \partial \varepsilon$ と $\partial \lambda_{\text{fast}} / \partial \varepsilon$ は、単位歪み当たりのスロー軸およびファスト軸のブラッグ波長シフト量を示す。 $\partial \lambda_{\text{slow}} / \partial T$ と $\partial \lambda_{\text{fast}} / \partial T$ は、単位温度当たりのスロー軸およびファスト軸のブラッグ波長シフト量を示す。

[0036] 上記単位歪みあるいは単位温度あたりのブラッグ波長のシフト量は、OFDR方式の物理量計測装置10Aを用い、基準温度(20℃)においてセンサ15に歪みを与え、センサ15におけるスロー軸とファスト軸のブラッグ波長変化の歪み依存性を測定し、基準歪み(0 $\mu \varepsilon$)においてセンサ15に温度変化を与え、センサ15におけるスロー軸とファスト軸のブラッグ波長変化の温度依存性を測定することで求められる。

[0037] 次に、これら $\partial \lambda_{\text{slow}} / \partial \varepsilon$ 、 $\partial \lambda_{\text{fast}} / \partial \varepsilon$ 、 $\partial \lambda_{\text{slow}} / \partial T$ 、 $\partial \lambda_{\text{fast}} / \partial T$ の値から、上記式(2)に記載のD値を求める。そして、このD値と、計測結果から得られた $\Delta \lambda_{\text{slow}}$ 及び $\Delta \lambda_{\text{fast}}$ とを、上記の式(2)に代入して演算を行うことにより、 ΔT および $\Delta \varepsilon$ が求められる。そして、これらの値から基準温度、基準歪みを差し引けば検知部における温度および歪みを求められる。

これらの演算は、OFDR方式の物理量計測装置10Aのシステムコントローラ53を用いて簡単に行える。

[0038] (第二の実施形態)

図4は、本発明のOFDR方式の物理量計測装置の第二の実施形態を示す概略構成図である。本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10C(10)が、上述の第一の実施形態と異なる点は、第3のPMファイバ19に、センサ15が複数(図示例では、2つのセンサ15a, 15b)配されている点である。

また、この実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Cでは、隣接するセンサ(第1のセンサ15a, 第2のセンサ15b)間のファイバ長の間、第2の光路長調整部21b(21)が更に配されている。そのため、第1のセンサ15aと第2のセンサ15bにおける、直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を、それぞれ一定にできる。すなわち、第1のセンサ15aと第2のセンサ15bからのブラッグ反射光と参照用反射端からの反射光との干渉信号をSTFT解析すると、これらの直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光は、第1のセンサ15a及び第2のセンサ15bに固有の位置に

において、それぞれ同じ位置として検出される。その結果、個々のセンサ15a, 15bの位置を正確に特定できる。

[0039] 本実施形態のOFDR方式の物理量測定装置10Cを用いた場合も、上述した第一の実施形態の際と同様に、センサ15の位置の特定や温度と歪みの計測が行なえる。本実施形態では、第3のPMファイバ19に2つのセンサ15(第1のセンサ15aおよび第2のセンサ15b)が設けられた場合を例示したが、本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置はこれに限定されない。本実施形態のOFDR方式の物理量計測装置にあつては、第3のPMファイバ19に3つ以上のセンサ15が設けられていてもよい。この場合であっても、2つのセンサ15が設けられている本実施形態と同様に、センサ15毎に、その直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光を同じ位置として検出することができる。すなわち、第3のPMファイバ19に3つ以上のセンサ15が設けられていても、それぞれのセンサ15の位置を正確に特定でき、高い空間分解能で歪み計測を行える。

[0040] (第三の実施形態)

上述した第一の実施形態～第二の実施形態に関するOFDR方式の物理量測定装置10に関し、センサ15が配された第3のPMファイバ19が、直交する2つの偏波軸の実効屈折率差(複屈折)が大きいPMファイバで構成されているのが好ましい。

これにより、直交する2つの偏波軸における温度と歪みに対する感度差が大きくなり、より高精度の温度と歪みの同時計測を実現できる。より具体的には、直交する2つの偏波軸の実効屈折率差が、 4.4×10^{-4} 以上であるのが好ましい。この値を満たすことで、後述する実施例から得られるように、センサの温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差を $-5.0 \times 10^{-4} \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ より大きくできる。その結果、温度精度 2°C 、歪み精度 $30 \mu \varepsilon$ という、極めて高精度の温度と歪みの計測精度が得られる。

実施例

[0041] 以下、実施例により本発明をさらに具体的に説明するが、本発明は以下の実施例に限定されるものではない。

[0042] 「実施例1」

図5は、実施例1のOFDR方式の物理量計測装置10Dを示す概略構成図である。

本実施例は、上述した第一の実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Aを基に構成している。図5において、図1に示した第一の実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Aの構成要素と同じ構成要素には同一符号を付して、その説明を省略する。

実施例1のOFDR方式の物理量計測装置10Dは、図1に示すOFDR方式の物理量計測装置10Aに、更に2つのPMカプラ31, 32と、フォトダイオード35と、2つの参照用反射端37, 38と、を備える。これらはPMファイバの1種であるPANDAファイバ41, 42, 43, 44, 47, 48によって連設されている。また、第1～第4のPMファイバ及びPMカプラ11にも、PANDAファイバを用いた。

チューナブルレーザ12は、汎用インターフェイスバス(GPIB)を介して、システムコントローラ53に接続し、これにより制御を行なった。

2つのフォトダイオード13, 35からの信号は、A/Dコンバータ54によりサンプリングされ、そのサンプリングデータはシステムコントローラ53にてSTFT解析される。この解析方法に関しては、上述した第一の実施形態で記載した通りである。

[0043] PMカプラ11, 31, 32としては、フジクラ社製のPTAP-0150-2-B(型式)を用いた。

チューナブルレーザ12としては、Agilent社製の8164A(型式)を用いた。

フォトダイオード13, 35としては、New Focus社製の2117FC(型式)を用いた。

PANDAファイバ17, 18, 19, 20, 41, 42, 43, 44, 47, 48としては、フジクラ社製のSM-15-PS-U25A(型式)を用いた。

[0044] システムコントローラ53としては、National Instruments社製のPXI-8106(型式)を用いた。

A/Dコンバータ54としては、National Instruments社製のPXI-6115(型式)を用いた。

[0045] チューナブルレーザ12は、ある一定速度、ある一定波長範囲で掃引(単調増加もしくは単調減少)された単一偏波の測定光を出射する。

この実施例1では、速度10nm/sで、波長範囲1545～1555nmを掃引した測定光を出射した。

チューナブルレーザ12から出射された単一偏波の測定光は、PANDAファイバ41のスロー軸を伝搬してPMカプラ31に入射される。そして、このPMカプラ31にて光パワー分岐されて2つの光干渉計に入射する。

[0046] 上記2つの光干渉計のうちの一方は、PMカプラ32と、参照用反射端37、38と、フォトダイオード35とから概略構成されている。この一方の光干渉計では、参照用反射端37を有するPANDAファイバ47と、参照用反射端38を有するPANDAファイバ48とのファイバ長差(光路長差)に応じたトリガを生成している。この実施例1では、PANDAファイバ47とPANDAファイバ48のファイバ長差を50mとした。

[0047] このトリガは、以下の方法で生成する。

チューナブルレーザ12からある一定速度、ある一定波長範囲で掃引された測定光が、この光干渉計に入射すると、測定光は参照用反射端37、38によって反射され、その干渉光がフォトダイオード35で計測される。フォトダイオード35で取得した信号は、A/Dコンバータ54によりサンプリングされて電圧信号に変換される。この電圧信号は、システムコントローラ53に取り込まれる。チューナブルレーザ12から出射された測定光は、一定速度で波長が変化している。そのため、フォトダイオード35で計測される信号は、一定の光波数間隔で変動する正弦関数となる。したがって、ある一定の電圧値を閾値とし、システムコントローラ53にて、この閾値を超えるタイミング(閾値以下の値から閾値を上回るタイミング、もしくは、閾値以上の値から閾値を下回るタイミング)でトリガを生成することにより、生成されたトリガはある一定の光波数間隔となる。

このトリガの生成方法は、チューナブルレーザ12の掃引速度が一定でない場合でも、トリガが発生する光波数間隔は常に一定となる点で非常に効果的である。

[0048] 上記2つの光干渉計のうちの他方は、図1に示す第一の実施形態から概略構成されている。

センサ15は、KrFエキシマレーザとユニフォーム位相マスクを用いた一般的な露光方法により作製した。この実施例1では、グレーティング長(センサ長)を5mmとした。また、参照用反射端14を有するPANDAファイバ14に相当する位置からセンサ15までの距離 L_1 は、約20mとした。さらに、 L_1 の中間位置、すなわち、参照用反射端1

4を有するPANDAファイバ18の長さに相当する位置から約10mの位置に、光路長調整部21として、90° オフセット融着を設けた。入射部20としては、PANDAファイバ16に45° オフセット融着を設けた。

[0049] 次いで、得られた光干渉信号 D_1 を、システムコントローラ53にてSTFT解析する。このときの光干渉信号 D_1 は、第一の実施形態と同じく式(1)で表せる。この実施例1では、得られた光干渉信号 D_1 を約40ms間隔(チューナブルレーザ12を10nm/sの速度で、波長に換算すると約400pm間隔)に相当するウィンドウ幅で解析した。チューナブルレーザ12の掃引速度が一定でない場合、ある一定の時間間隔ではなく、ある一定の光波数間隔(つまり、ある一定の波長間隔)に相当するウィンドウ幅で解析してもよい。

[0050] 本実施例のOFDR方式の物理量計測装置10Dを用いて、センサ15の状態を計測した。結果を図6に示す。

OFDR方式の物理量計測装置10Dでは、センサ15からのブラッグ反射光をスペクトログラムで表示する。このスペクトログラムは、横軸が波長、縦軸がファイバ位置(参照用反射端14を有するPANDAファイバ18に相当する位置からのファイバ長)、色調がブラッグ反射強度を示す。

図6に示すスペクトログラムにおいて、1550.6nmのブラッグ反射光がセンサ15のスロー軸からのものであり、1550.2nmのブラッグ反射光がセンサ15のファスト軸からのものであると考えられ、それぞれの位置が約19.672mでほぼ一致する結果が得られた。

[0051] この実施例1では、センサ15の直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光が得られたので、温度と歪みを同時に計測できることが確認された。これにより、本実施例のOFDR方式の物理量計測装置10Dを用いて歪み計測を行う場合、温度補償用のセンサが不要となることが確認された。また、センサ15の位置を正確に特定できるので、高い空間分解能で歪み計測を行える。

[0052] 次に、本実施例のOFDR方式の物理量計測装置10Dを用いて、基準温度(20℃)においてセンサ15に歪みを与え、センサ15におけるスロー軸とファスト軸のブラッグ波長変化の歪み依存性を測定した。また、本実施例を用い、基準歪み($0\mu\epsilon$)にお

いてセンサ15に温度変化を与え、センサ15におけるスロー軸とファスト軸のブラッグ波長変化の温度変化依存性を測定することで、センサ15における上記の式(2)の各項を求めたところ、下記の式(3)が得られた。この式(3)を用いて計算すると、上記の式(2)におけるD値は、 $D = -9.1515 \times 10^{-7} (\text{nm}^2 / \mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C})$ となった。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \lambda_{fast}}{\partial \epsilon} &= 0.00125 \text{nm} / \mu\epsilon \\ \frac{\partial \lambda_{slow}}{\partial T} &= 0.00973 \text{nm} / ^\circ\text{C} \\ \frac{\partial \lambda_{fast}}{\partial T} &= 0.01010 \text{nm} / ^\circ\text{C} \\ \frac{\partial \lambda_{slow}}{\partial \epsilon} &= 0.00129 \text{nm} / \mu\epsilon \end{aligned} \right\} (3)$$

[0053] 計測結果から得られた $\Delta \lambda_{slow}$ と $\Delta \lambda_{fast}$ 及び上記のDを上記の式(2)に代入して演算を行うことにより、 ΔT および $\Delta \epsilon$ が求められる。そして、これらの値から基準温度、基準歪みを差し引けば検知部における温度および歪みを求められる。

[0054] 次に、本発明の効果を検証するために行った比較例1、2について説明する。この比較例1、2は従来技術ではなく、本発明の効果を検証するために実施した新たな技術である。

[0055] 「比較例1」

入射部及び光路長調整部の融着接続部の偏波軸オフセット角度を 0° としたこと以外は実施例1と同様としてOFDR方式の物理量計測装置を作製し、これを比較例1とした。この比較例1のOFDR方式の物理量計測装置を用いて、センサの状態を計測した。結果を図7に示す。

図7の結果から、この比較例1では、センサ15のスロー軸からのブラッグ反射光しか得られなかった。一方の偏波軸からのブラッグ反射光だけでは、センサ15の温度と歪みを同時に計測することは不可能である。したがって、比較例1のOFDR方式の物理量計測装置を用いて歪み計測を行う場合、温度補償用のセンサが必要となる。

[0056] 「比較例2」

光路長調整部の融着接続部の偏波軸オフセット角度を 0° としたこと以外は実施例1と同様としてOFDR方式の物理量計測装置を作製し、これを比較例2とした。この比較例2のOFDR方式の物理量計測装置を用いて、センサの状態を計測した。結果を図8に示す。

図8の結果から、比較例2では、センサ15のスロー軸およびファスト軸からのブラッグ反射光が得られた。そのため、比較例2のOFDR方式の物理量計測装置を用いて歪み計測を行う場合、実施例1と同じく、温度補償用のセンサが不要となる。しかしながら、それぞれのブラッグ反射光の位置が異なるため、センサ15の位置を正確に特定できず、結果として高い空間分解能で歪み計測を行うことができなかった。

[0057] この比較例2では、フォトダイオード13で得られる光干渉信号 D_2 は、下記の式(4)で表せる。

$$D_2 = R_{slow} \cos(k2n_{slow}L_1) + R_{fast} \cos(k2n_{fast}L_1) \quad (4)$$

第一の実施形態および実施例1で得られる光干渉信号 D_1 と異なるのは、右辺第1項および第2項における、チューナブルレーザ12から出射した測定光が、ファイバ長差 L_1 を往復する光路長が異なる点である。なぜなら、 n_{slow} と n_{fast} には、 $n_{slow} > n_{fast}$ の関係が常に成り立つためである。式(4)における右辺第1項と右辺第2項の光路長が異なるということは、スロー軸とファスト軸におけるブラッグ反射光がファイバ長差 L_1 に対して異なる光路長を持つことを意味している。すなわち、図8の結果が示すようにそれぞれのブラッグ反射光の位置が異なる。

これは、STFT解析の際、直交する2つの偏波軸の信号に対して、それぞれ別々の実効屈折率(n_{slow} と n_{fast})を用いなければいけないにもかかわらず、これらの信号は合波されてフォトダイオード13にて光干渉信号 D_2 として計測されるので、ある一定の実効屈折率(比較例2では n_{slow} を用いた)で計算せざるをえないためである。

[0058] 図8に示すスペクトログラムにおいて、センサ15のスロー軸からのブラッグ反射光の位置は約19.629m、センサ15のファスト軸からのブラッグ反射光の位置は約19.624mである。したがって、その差は約5mmである。

この差は、センサとOFDR方式の解析方法とを用いた光ファイバセンサシステムが

1mm以下の空間分解能を有するために検出できるものである。言い換えれば、他の方式の光ファイバセンサシステムではこの水準の空間分解能を持たない(あるいは、位置を特定する手段がない)ので、この位置ずれを検出できない。つまり、FBGセンサとOFDR方式の解析方法を用いた光ファイバセンサシステムのみに有効な手段である。

[0059] 次に、センサ15のスロー軸とファスト軸からのブラッグ反射光の位置ずれ量 Δl を計算した。結果を図9に示す。この図9は、下記の式(5)より求めた。

$$\left. \begin{aligned} n_{slow} \Delta l &= n_{slow} L_1 - n_{fast} L_1 \\ \therefore \Delta l &= \frac{(n_{slow} - n_{fast}) L_1}{n_{slow}} \end{aligned} \right\} (5)$$

[0060] 但し、このとき、センサ15の長さは L_1 に対して十分に短く、無視できるものとする。

上記の式(5)において、 n_{slow} と n_{fast} は、センサ15のブラッグ反射光の波長と、センサ15の作製に使用したユニフォーム位相マスクの回折格子の間隔から計算されるグレーティング周期とから求めた値、ニアフィールドパターン測定から求めた値などを用いる。

この比較例2では、下記の式(6)より、センサ15のブラッグ反射光の波長と、センサ15の作製に使用したユニフォーム位相マスクの回折格子の間隔から計算されるグレーティング周期とから求めた値、 $n_{slow} = 1.44756$ 、 $n_{fast} = 1.44720$ を用いた。

$$\left. \begin{aligned} n_{slow} &= \frac{\lambda_{slow}}{2\Lambda} \\ n_{fast} &= \frac{\lambda_{fast}}{2\Lambda} \end{aligned} \right\} (6)$$

[0061] 上記の式(6)において、 λ_{slow} と λ_{fast} はセンサ15における直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長を示す。 Λ はユニフォーム位相マスクの回折格子の間隔から計算されるグレーティング周期を示す。

[0062] 図9の結果から、ファイバ長差 L_1 、すなわち、基準となる位置からセンサ15までの距離が20mの時、センサ15のスロー軸とファスト軸からのブラッグ反射光の位置ずれ量は約5mmと計算されている。したがって、比較例2の実験結果と良く一致していることが確認された。

この計算結果によれば、FBGセンサとOFDR方式の解析方法を用いた光ファイバセンサシステムの空間分解能を1mmとした場合、基準となる位置からセンサ15までの距離が4m以上になると、センサ15におけるスロー軸とファスト軸からのブラッグ反射光の位置ずれが明瞭に確認されることが考えられる。

つまり、基準となる位置からFBGセンサまでの距離が4m以上であるとき、本発明は極めて有効となることが分かった。

[0063] 「実施例2」

図10は、実施例2のOFDR方式の物理量計測装置10Eを示す概略構成図である。本実施例2が実施例1と異なる点は、上述した第二の実施形態のOFDR方式の物理量計測装置10Cを基に作製した点である。すなわち、本実施例が実施例1と異なる点は、第3のPMファイバ(PANDAファイバ)19に、第1のセンサ15aと第2のセンサ15bとが配され、この第1のセンサ15aと第2のセンサ15bとの中間には、第2の光路長調整部21b(90° オフセット融着)が配されている点である。第2のセンサ15bは、第1のセンサ15aから5mの位置に設けた。第2の光路長調整部21bは、第1のセンサ15aと第2のセンサ15bとから約2.5mの位置に設けた。

[0064] 本実施例のOFDR方式の物理量計測装置10Eを用いて、第1のセンサ15aの状態を計測した結果を図11に、第2のセンサ15bの状態を計測した結果を図12に示す。

図11の結果から、第1のセンサ15aのスロー軸からのブラッグ反射光の位置と、第1のセンサ15aのファスト軸からのブラッグ反射光の位置とは、ともに約19.672mでほぼ一致することが確認された。

図12の結果から、第2のセンサ15bのスロー軸からのブラッグ反射光の位置と、第2のセンサ15bのファスト軸からのブラッグ反射光の位置とは、ともに約24.757mでほぼ一致することが確認された。

以上の結果から、複数のセンサが配された場合であっても、隣接するこれらセンサの間にそれぞれ光路長調製部(90° オフセット融着)を設けることにより、FBGセンサ毎に、その直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光を同じ位置にできることが確認された。

[0065] 「実施例3」

センサ15が配された第3のPMファイバ19が、スロー軸とファスト軸の実効屈折率差(複屈折)が大きいPANDAファイバで構成されていること以外は、実施例1と同様に作製し、これを実施例3とした。

この複屈折が大きいPANDAファイバは、図3を用いて説明すると、応力付与部62の配置をコア61に近づけることで実現できる。すなわち、応力付与部62の配置により、PANDAファイバの複屈折を任意に調整できる。

[0066] 本実施例のOFDR方式の物理量測定装置を用いて、センサ15の状態を計測した。結果を図13に示す。

図13に示すスペクトログラムにおいて、1551.1nmのブラッグ反射光がセンサ15のスロー軸からのものであり、1550.4nmのブラッグ反射光がセンサ15のファスト軸からのものである。

[0067] 実施例3において得られたセンサ15のスペクトログラムをより詳細に解析したところ、スロー軸とファスト軸のブラッグ波長差は0.670nmであった。また、このブラッグ波長差から計算した複屈折は 6.22×10^{-4} であった。実施例1において得られたセンサ15のスペクトログラムをより詳細に解析して得られたブラッグ波長差は0.391nmであり、このブラッグ波長差から計算した複屈折は 3.65×10^{-4} であった。すなわち、実施例3のセンサ15を構成するPANDAファイバは、実施例1のセンサ15を構成するPANDAファイバよりも2倍近く大きな複屈折を持っていた。

[0068] 次に、本実施例を用い、基準温度(20℃)においてセンサ15に歪みを与え、センサ15におけるスロー軸とファスト軸のブラッグ波長変化の歪み依存性を測定した。また、本実施例を用い、基準歪み($0 \mu \varepsilon$)においてセンサ15に温度変化を与え、センサ15におけるスロー軸とファスト軸のブラッグ波長変化の温度変化依存性を測定することで、センサ15における上記の式(2)の各項を求めたところ、下記の式(7)が得られ

た。この式を用いて計算すると、上記の式(2)におけるD値は、 $D = -10.908 \times 10^{-7} (\text{nm}^2 / \mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C})$ となった。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \lambda_{fast}}{\partial \epsilon} &= 0.00126 \text{nm} / \mu\epsilon \\ \frac{\partial \lambda_{slow}}{\partial T} &= 0.01177 \text{nm} / ^\circ\text{C} \\ \frac{\partial \lambda_{fast}}{\partial T} &= 0.01249 \text{nm} / ^\circ\text{C} \\ \frac{\partial \lambda_{slow}}{\partial \epsilon} &= 0.00128 \text{nm} / \mu\epsilon \end{aligned} \right\} (7)$$

[0069] 上記の式(2)を用いて温度と歪みを算出する際、 $\partial \lambda_{slow} / \partial \epsilon$ と $\partial \lambda_{fast} / \partial \epsilon$ の差(スロー軸とファスト軸の歪みに対するブラッグ波長のシフト特性差)、および、 $\partial \lambda_{slow} / \partial T$ と $\partial \lambda_{fast} / \partial T$ の差(スロー軸とファスト軸の温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差)が大きいほど、温度と歪みの算出精度は向上する。実施例3で得られた上記の式(7)において注目すべき点は、実施例1で得られた上記の式(3)と比較して、スロー軸とファスト軸の温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差が大きい点である。

具体的には、実施例1で得られた上記の式(3)では $-3.7 \times 10^{-4} \text{nm} / ^\circ\text{C}$ であるのに対して、実施例3で得られた上記の式(7)では $-7.2 \times 10^{-4} \text{nm} / ^\circ\text{C}$ である。すなわち、実施例3のセンサ15は、実施例1のセンサ15よりも2倍近い温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差を有していた。

これは、それぞれのセンサを構成するPANDAファイバの複屈折の差に起因していると考えられる。PANDAファイバは、温度の上昇に比例してコアに生じる複屈折が小さくなり、応力付与部の融点である800～900℃程度で複屈折がほぼ0になることが知られている。つまり、基準温度における複屈折が大きいほど、単位温度上昇当たりの複屈折の減少量が大きくなる。したがって、実施例3のセンサ15は、実施例1のセンサ15よりも2倍近い温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差を有する。

[0070] 次に、実施例3のセンサ15に任意の温度変化と歪みを与え、実施例3のOFDR方

式の物理量計測装置により温度変化と歪みを計測した。この結果を、表1に示す。

[0071] [表1]

		設定温度変化					
		20°C		40°C		100°C	
		計測値	誤差	計測値	誤差	計測値	誤差
設定歪み	257 μ ϵ	19.3°C 246 μ ϵ	-0.7°C -11 μ ϵ	38.5°C 237 μ ϵ	-1.5°C -20 μ ϵ	98.6°C 246 μ ϵ	-1.4°C -11 μ ϵ
	535 μ ϵ	19.2°C 515 μ ϵ	-0.8°C -20 μ ϵ	38.6°C 508 μ ϵ	-1.4°C -27 μ ϵ	98.9°C 519 μ ϵ	-1.1°C -16 μ ϵ
	1056 μ ϵ	18.9°C 1034 μ ϵ	-1.1°C -22 μ ϵ	38.3°C 1029 μ ϵ	-1.7°C -27 μ ϵ	98.4°C 1034 μ ϵ	-1.6°C -22 μ ϵ

[0072] 基準温度(20°C)からの温度変化を20°C、40°C、100°C(すなわち、設定温度を4

0°C、60°C、120°C)、基準歪み($0\mu\varepsilon$)からの歪み変化を $257\mu\varepsilon$ 、 $535\mu\varepsilon$ 、 $1056\mu\varepsilon$ とし、合計9通りの条件で温度と歪みを計測した。その結果、温度精度2°C以下、歪み精度 $30\mu\varepsilon$ 以下という、極めて高精度の温度と歪みの同時計測結果が得られた。

[0073] 以上説明したように、実施例3によれば、本発明のOFDR方式の物理量計測装置に用いるFBGからなるセンサは、複屈折の大きなPANDAファイバから構成されることが好ましい。FBGからなるセンサの温度変化と歪みの同時計測精度について詳細な検討を行ったところ、このセンサの温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差が $-5.0\times 10^{-4}\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ より大きなシフト特性を有することが好ましいことが分かった。

図14は、PANDAファイバの複屈折とこのファイバにより構成されたFBGからなるセンサの温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差を評価した結果を示すグラフである。

図14の結果から、PANDAファイバの複屈折が 4.4×10^{-4} 以上のとき、このセンサの温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差が $-5.0\times 10^{-4}\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ より大きなシフト特性を有する。すなわち、PANDAファイバの複屈折が 4.4×10^{-4} 以上であることが好ましい。しかしながら、複屈折を大きくするために応力付与部をコアに近づけ過ぎると、PANDAファイバの製造歩留まりが悪くなるという問題がある。ゆえに、PANDAファイバの複屈折は、歩留まりよく製造できる 2.0×10^{-3} 以下であることが好ましい。

[0074] なお、本実施例では、FBGからなるセンサの温度変化に対するブラッグ波長のシフト特性差を $-5.0\times 10^{-4}\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ より大きくするために、応力付与部をコアに近付けて複屈折が大きいPANDAファイバを用いた。本発明を実現し得る他のPANDAファイバとして、融点の低い応力付与部を備えたPANDAファイバが挙げられる。より具体的には、応力付与部の融点が600°C以下である場合、ブラッグ波長のシフト特性差を $-5.0\times 10^{-4}\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ より大きくできる。

[0075] 「実施例4」

センサ長を100mmとしたこと以外は、実施例3と同様に作製し、これを実施例4とし

た。本実施例のOFDR方式の物理量計測装置10Fを用いて、センサ15の状態を計測した。結果を、図15に示す。

[0076] 図15に示すスペクトログラムにおいて、1549.4nmのブラッグ反射光がセンサのスロー軸からのものであり、1548.7nmのブラッグ反射光がセンサのファスト軸からのものである。

このスペクトログラムをより詳細に解析して得られたブラッグ反射光の波長差は、0.670nmであった。この波長差は、センサ長が5mmの実施例3のセンサと同等である。したがって、センサ長を100mmとした本実施例のセンサ15に用いたPANDAファイバは、実施例3のセンサ15に用いたPANDAファイバと同等の複屈折である。

[0077] 図16は、本実施例のOFDR方式の物理量計測装置10Fにより、センサに生じる温度分布と歪みを計測するための実験系を模式的に示した図である。

この実験系では、分銅Wにより、センサ15の長手方向に沿って均一な歪みを与えている。また、この実験系では、独立して温度制御可能なヒータA及びヒータBにより、センサ15の長手方向に沿って不均一な温度変化を与えることができる。

[0078] 本実施例のOFDR方式の物理量計測装置10Fを用いて、図16に示す実験系によりセンサ15の状態を計測した。結果を、図17に示す。このとき、分銅Wによりセンサ15に与えた歪みは $1000\mu\epsilon$ 、ヒータAによりセンサ15に与えた温度変化は 100°C 、ヒータBによりセンサ15に与えた温度変化は 60°C である。

[0079] 図17に示すように、ヒータAにより加熱されたセンサの領域は、 $1000\mu\epsilon$ の歪みと、 100°C の温度変化に相当するブラッグ波長シフトが生じていた。一方、ヒータBにより加熱されたセンサの領域では、 $1000\mu\epsilon$ の歪みと 60°C の温度変化に相当するブラッグ波長シフトが生じていた。また、ヒータAとヒータBとの間にある非加熱領域は、 $1000\mu\epsilon$ の歪みのみに相当するブラッグ波長シフトが生じていた。つまり、この本実施例では、センサ15のスロー軸とファスト軸のブラッグ波長の変化量を、センサ15の長手方向に沿って計測することで、このセンサ15の長手方向に沿った温度分布と歪みを同時に計測できた。

[0080] 次に、図16に示す実験系において、分銅Wによりセンサ15に与えた歪みを $1000\mu\epsilon$ で一定とし、ヒータAによりセンサ15に与えた温度変化を 100°C で一定とし、ヒータ

タBによりセンサ15に与えた温度変化のみを0～100℃に変化させた。そして、ヒータAの位置およびヒータBの位置における温度変化と歪みを計測した。この結果を図18に示す。

[0081] 図18に示すように、ヒータAの位置では、計測した歪みは、 $1000\mu\epsilon$ で一定であった。また、温度変化に関しても100℃で一定であった。一方、ヒータBの位置では、計測した歪みは $1000\mu\epsilon$ で一定であり、計測した温度変化は、ヒータBの設定温度と相関して変化する結果が得られた。つまり、ヒータAの位置とヒータBの位置とに生じている温度分布と歪みを高精度に同時計測できていた。

[0082] 以上説明したとおり、本実施例によると、本発明は、FBGからなるセンサの長手方向に沿った温度分布と歪みを同時にかつ高精度に計測できる。また、本発明を用いることで、FBGからなるセンサの長手方向に沿って、温度分布と歪み分布が生じる場合でも、これらを同時にかつ高精度に計測できる。

産業上の利用可能性

[0083] 本発明のOFDR方式の物理量計測装置によれば、センサの温度と歪みの同時計測を行える。また、センサの位置を正確に特定でき、高い空間分解能で物理量の計測を行える。さらに、センサの長手方向に沿った温度分布と歪み分布を同時に計測できる。

請求の範囲

- [1] 測定光を出射するチューナブルレーザと；
このチューナブルレーザに一端が接続された第1の偏波保持ファイバと；
この第1の偏波保持ファイバの他端に接続された偏波保持カプラと；
この偏波保持カプラに一端が接続され、他端が参照用反射端である第2の偏波保持ファイバと；
前記偏波保持カプラに一端が接続された第3の偏波保持ファイバと；
この第3の偏波保持ファイバのコアに形成されたファイバブラッググレーティングからなるセンサと；
前記偏波保持カプラに一端が接続された第4の偏波保持ファイバと；
この第4の偏波保持ファイバを介して前記偏波保持カプラと接続され、前記センサからのブラッグ反射光と前記参照用反射端からの参照光とを検出するフォトダイオードと；
このフォトダイオードで検出された前記ブラッグ反射光と前記参照光との合波光強度変化に基づき、これらブラッグ反射光及び参照光間の干渉強度の変調を検知する制御部と；
前記第2の偏波保持ファイバの直交する2つの偏波軸及び前記第3の偏波保持ファイバの直交する2つの偏波軸の両方に、前記測定光を入射する入射部と；
前記第3の偏波保持ファイバに配され、前記センサにおける直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の光路長を一定にする光路長調整部と；
を備え、
前記入射部は、前記第1の偏波保持ファイバ、または、前記第2の偏波保持ファイバと前記第3の偏波保持ファイバとの両方に配されている
ことを特徴とする光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置。
- [2] 前記入射部は、
この入射部が前記第1の偏波保持ファイバに配されている場合には、この第1の偏波保持ファイバに45°の偏波軸オフセット角度を有して形成された融着接続部であり；

前記入射部が前記第2の偏波保持ファイバ及び前記第3の偏波保持ファイバの両方に配されている場合には、これら第2の偏波保持ファイバ及び前記第3の偏波保持ファイバのそれぞれに 45° の偏波軸オフセット角度を有して形成された融着接続部である；

ことを特徴とする請求項1に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置。

- [3] 前記光路長調整部は、前記センサが形成された前記第3の偏波保持ファイバに、 90° の偏波軸オフセット角度を有して形成された融着接続部であることを特徴とする請求項1または2のいずれか1項に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置。

- [4] 前記光路長調整部は、前記第2の偏波保持ファイバの長さに相当する位置から前記センサまでのファイバ長の中に設けられたことを特徴とする請求項1ないし3のいずれか1項に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置。

- [5] 前記第3の偏波保持ファイバに、前記センサが複数配されていることを特徴とする請求項1ないし4のいずれか1項に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置。

- [6] 前記光路長調整部が、隣接する前記センサ間のファイバ長の中にそれぞれ配されていることを特徴とする請求項5に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置。

- [7] 前記第1の偏波保持ファイバから前記第4の偏波保持ファイバのうち、少なくとも前記第3の偏波保持ファイバにおける直交する2つの偏波軸の実効屈折率差が、 4.4×10^{-4} 以上であることを特徴とする請求項1ないし6のいずれか1項に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置。

- [8] 請求項1ないし7のいずれか1項に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を用いて、1つまたは複数の前記センサにおける直交する2つの偏波軸からのブラッグ反射光の波長を計測する工程と；

計測した前記ブラッグ反射光の波長に基づいて、前記センサにおける前記ブラッグ反射光の波長の温度と歪みによる変化量を計算する工程と；

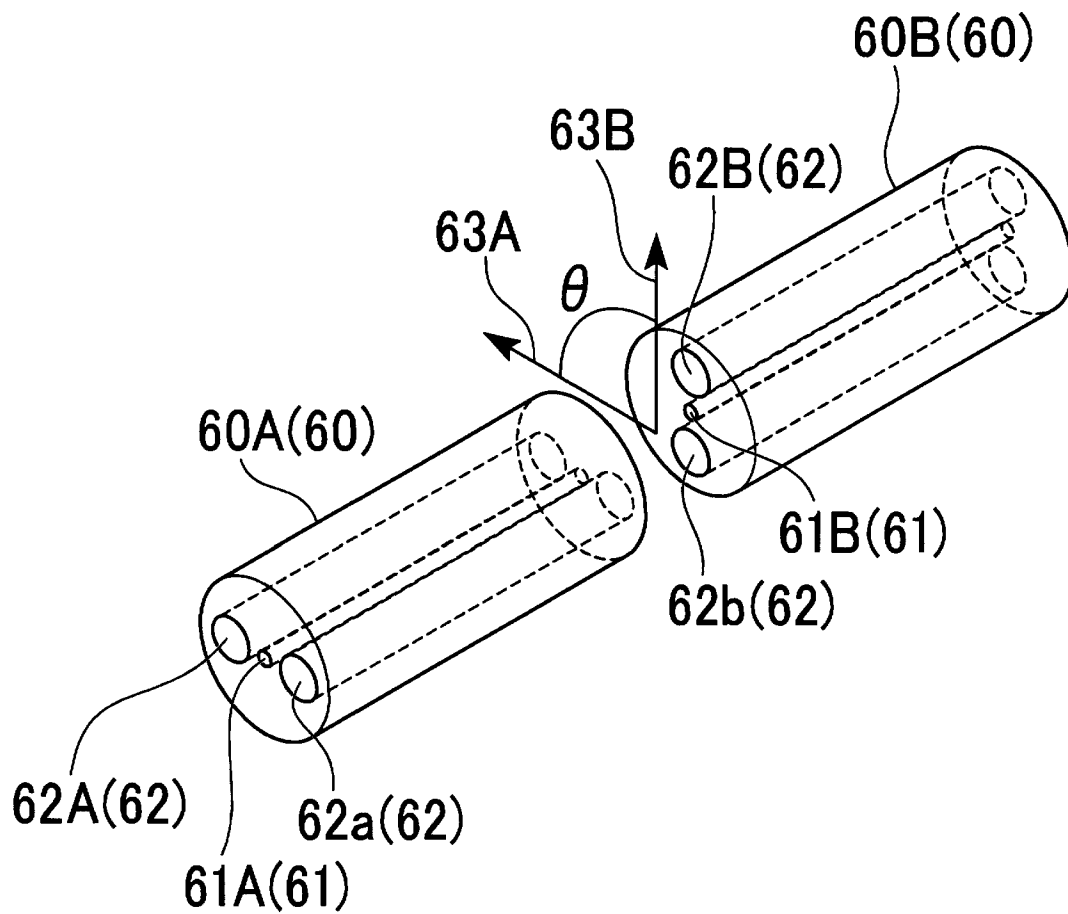
計算した前記変化量に基づいて、前記センサが配された部位の温度および歪みを

同時に計測する工程と；

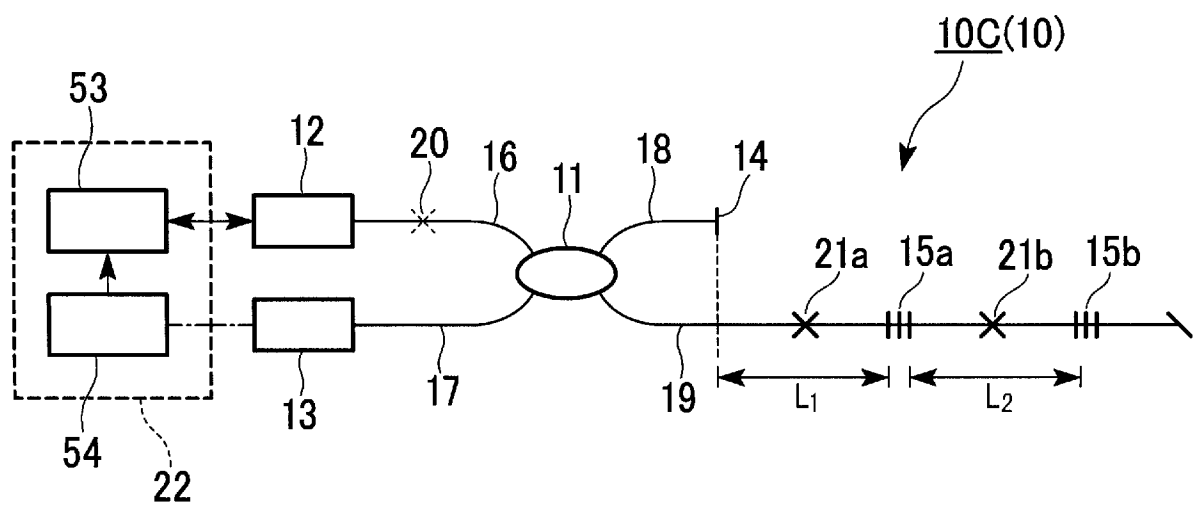
を備えることを特徴とする光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を用いた温度と歪みの同時計測方法。

- [9] 前記第3の偏波保持ファイバの、前記センサが配された部位長手方向に沿った温度分布および歪み分布を算出することを特徴とする請求項8に記載の光周波数領域反射測定方式の物理量計測装置を用いた温度と歪みの同時計測方法。

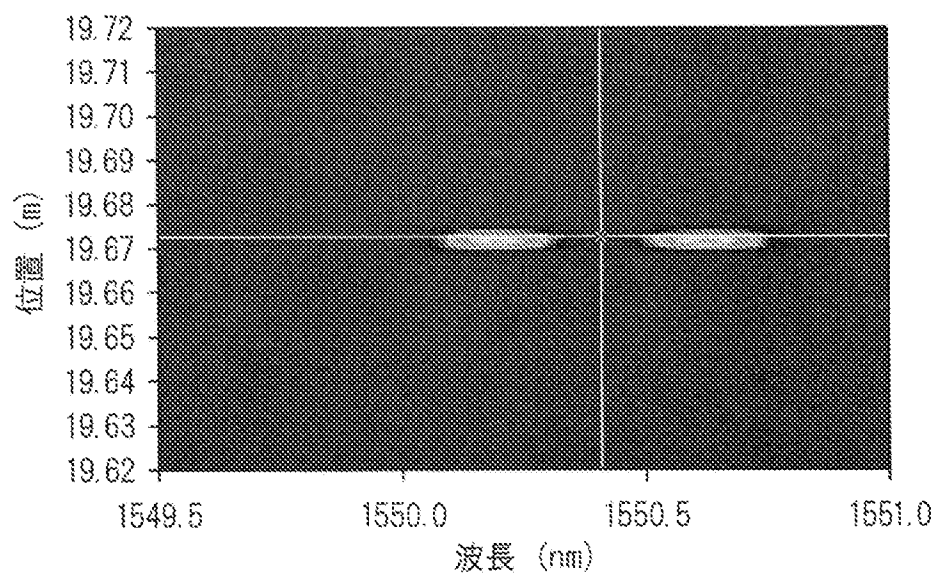
[図3]



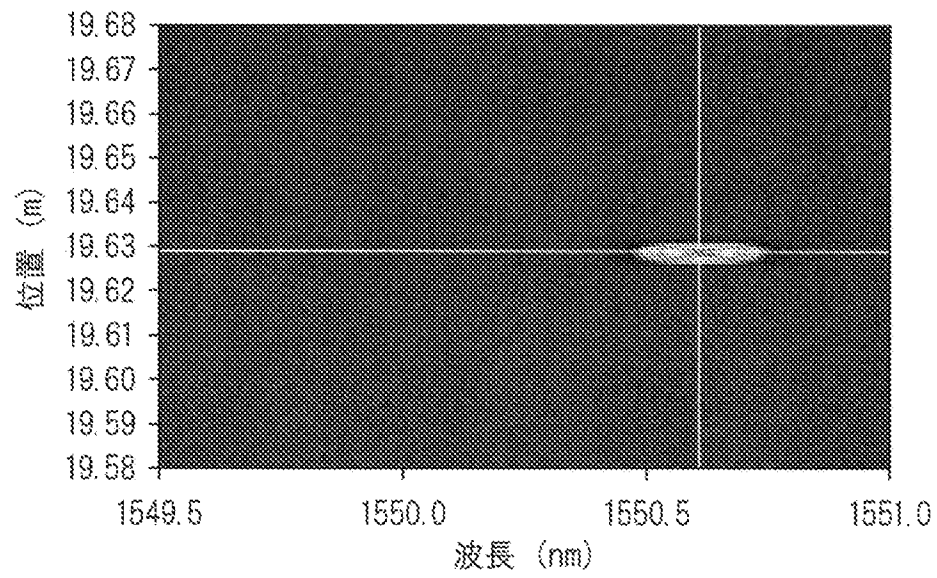
[図4]



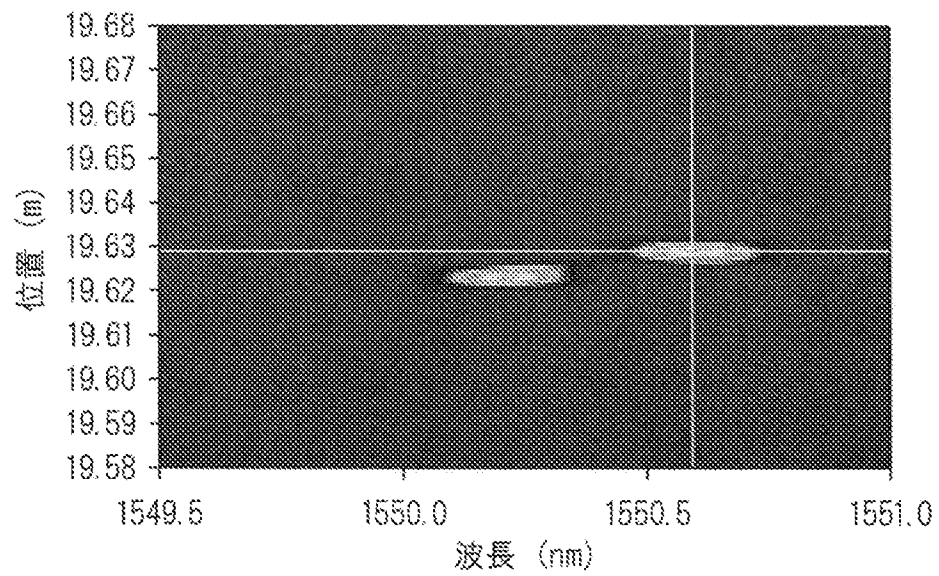
10D(10)



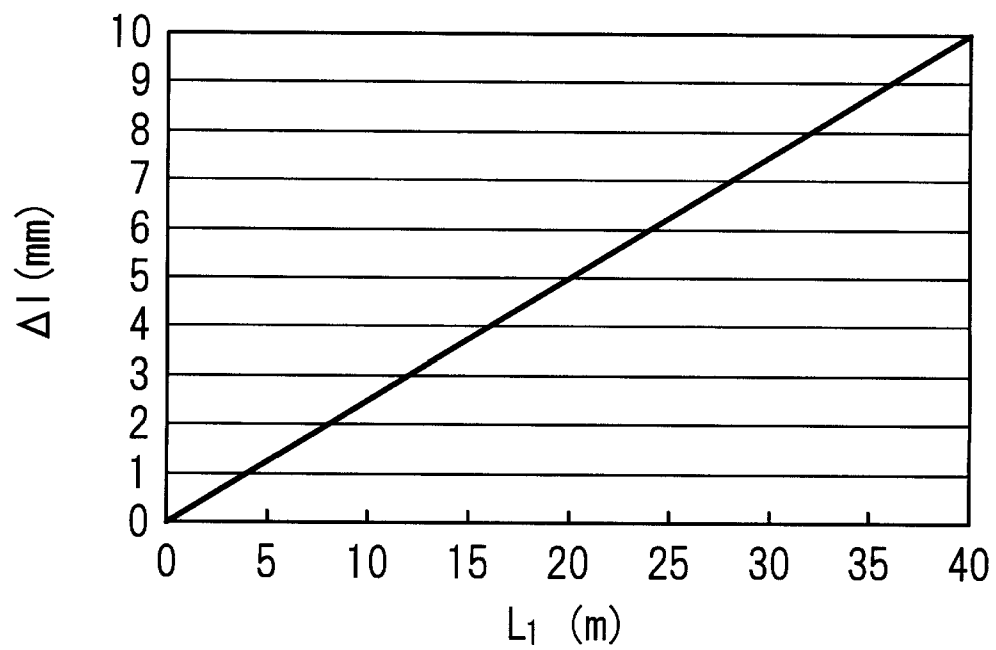
[図7]



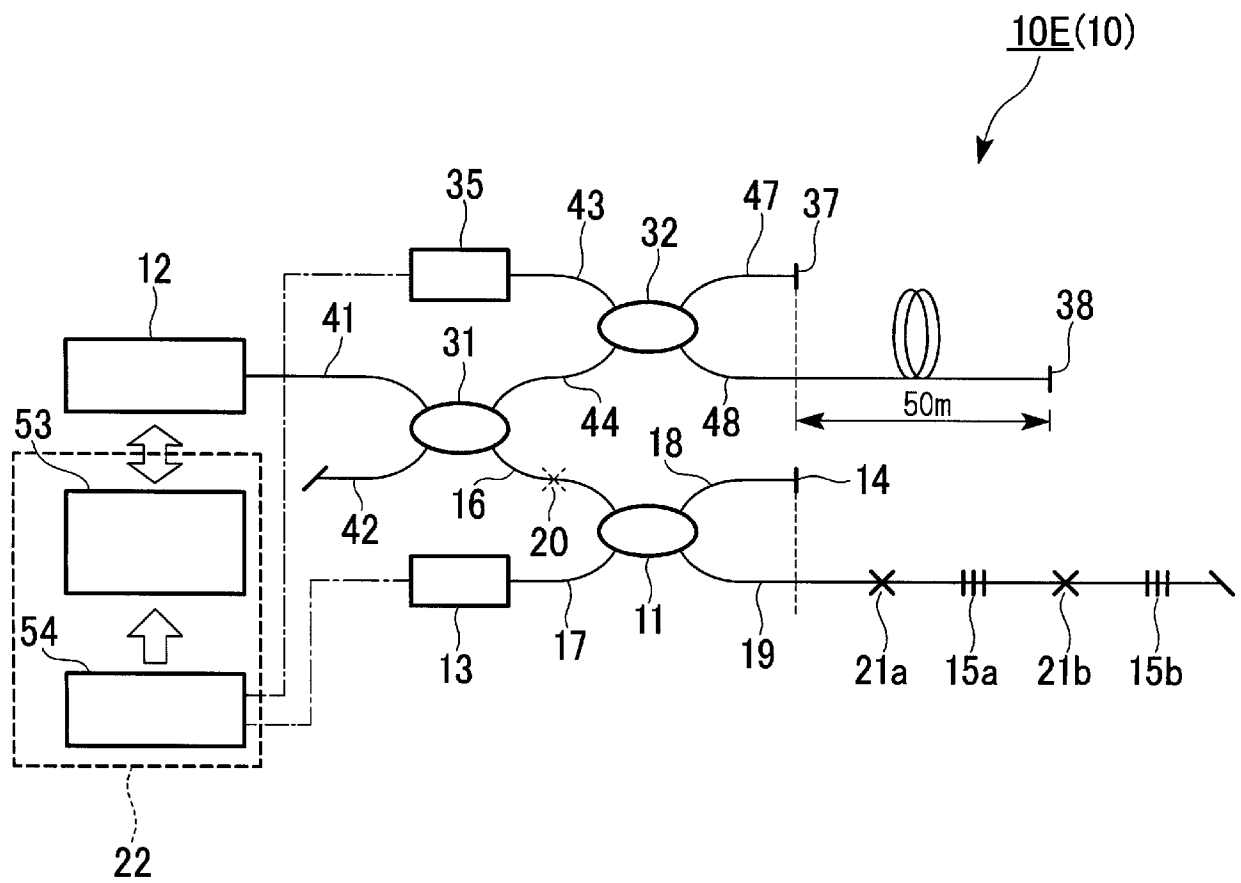
[図8]



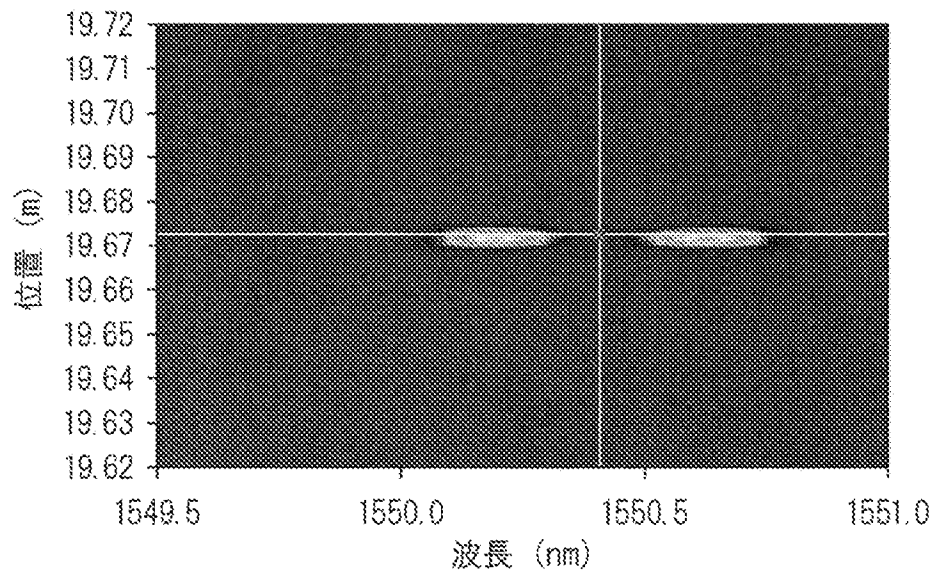
[図9]



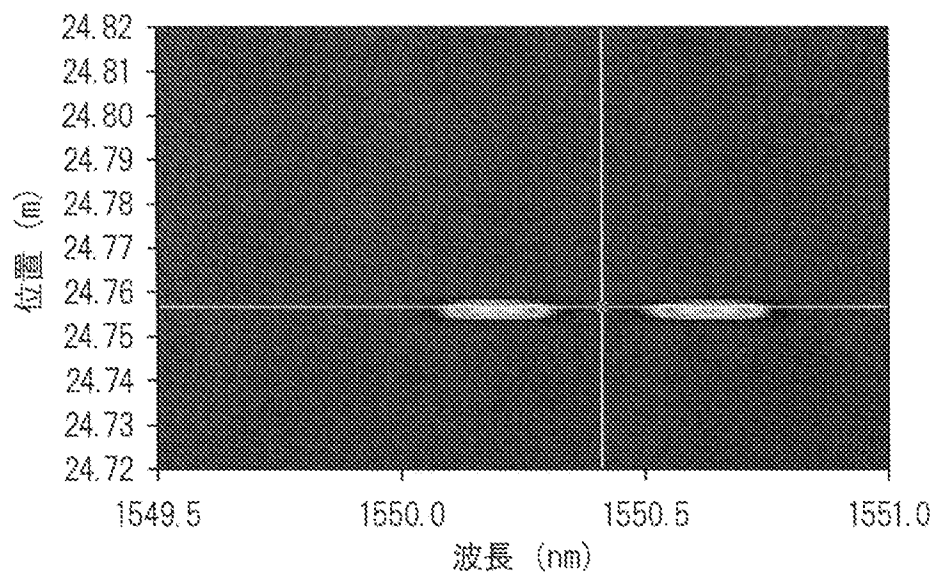
[図10]



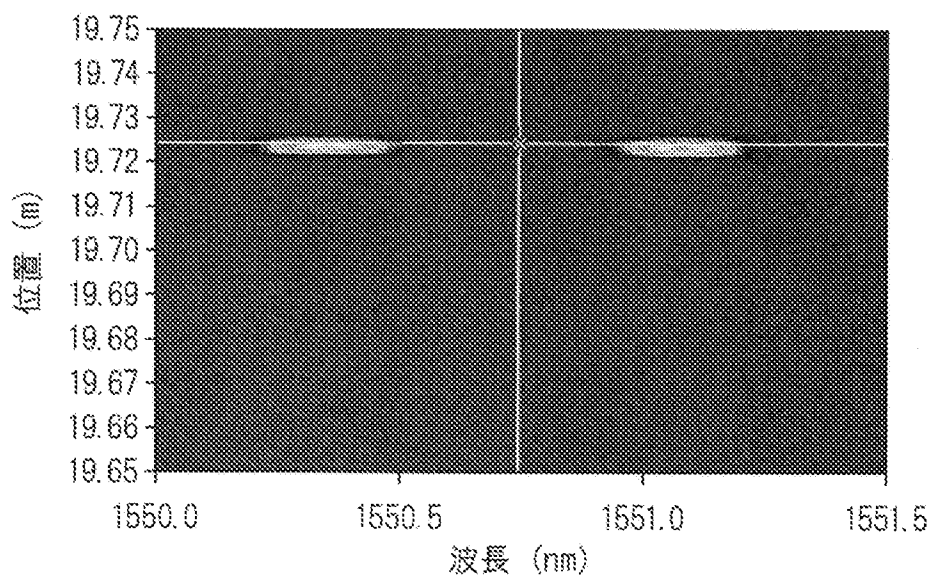
[図11]



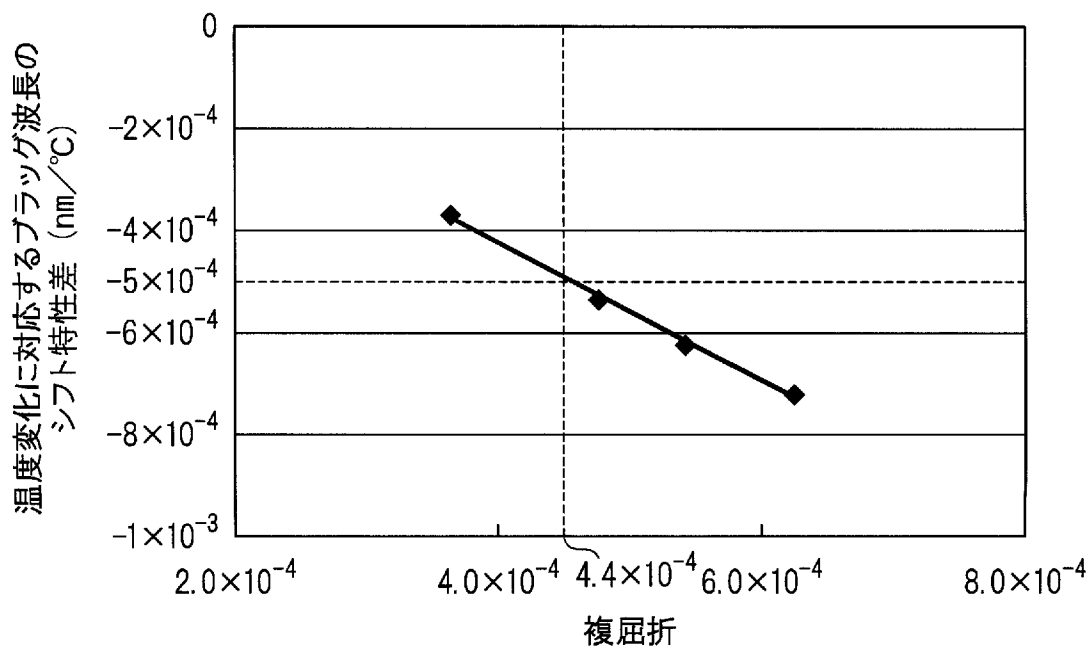
[図12]



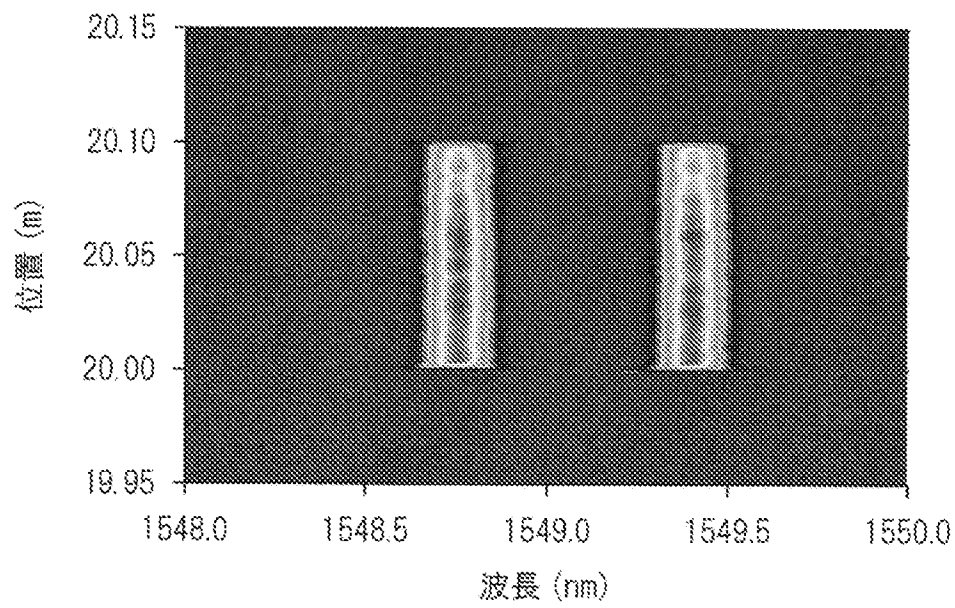
[図13]



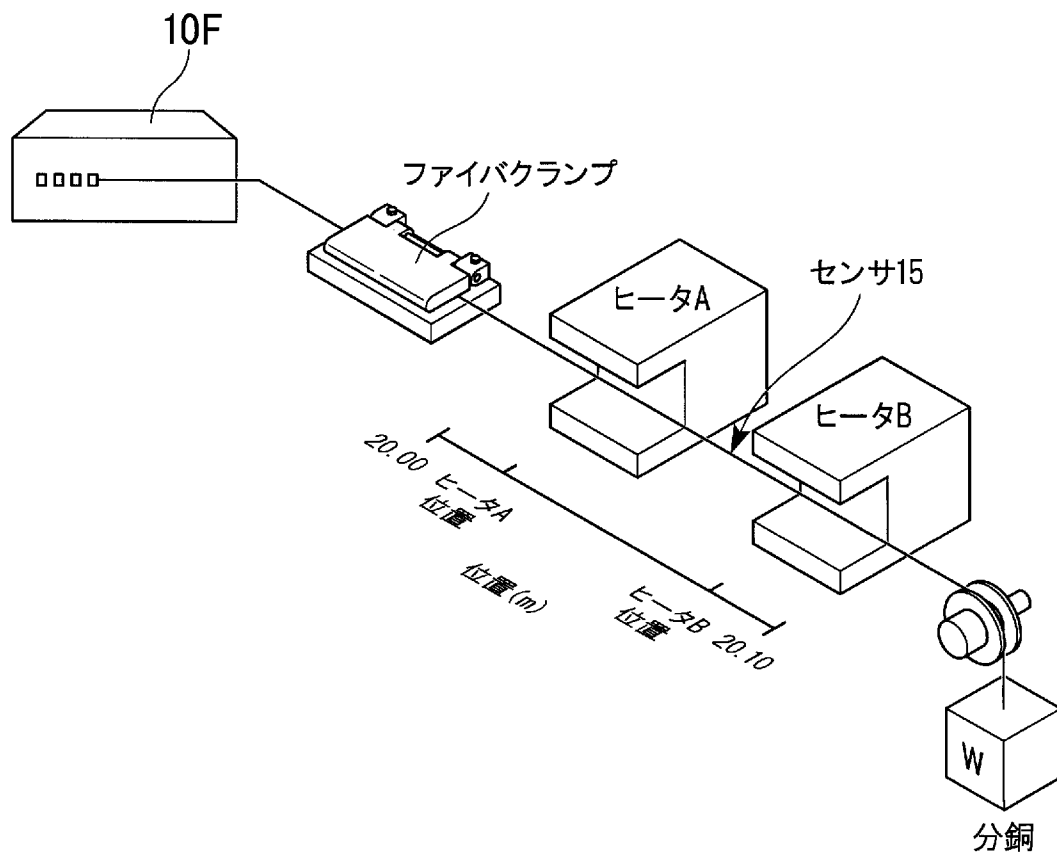
[図14]



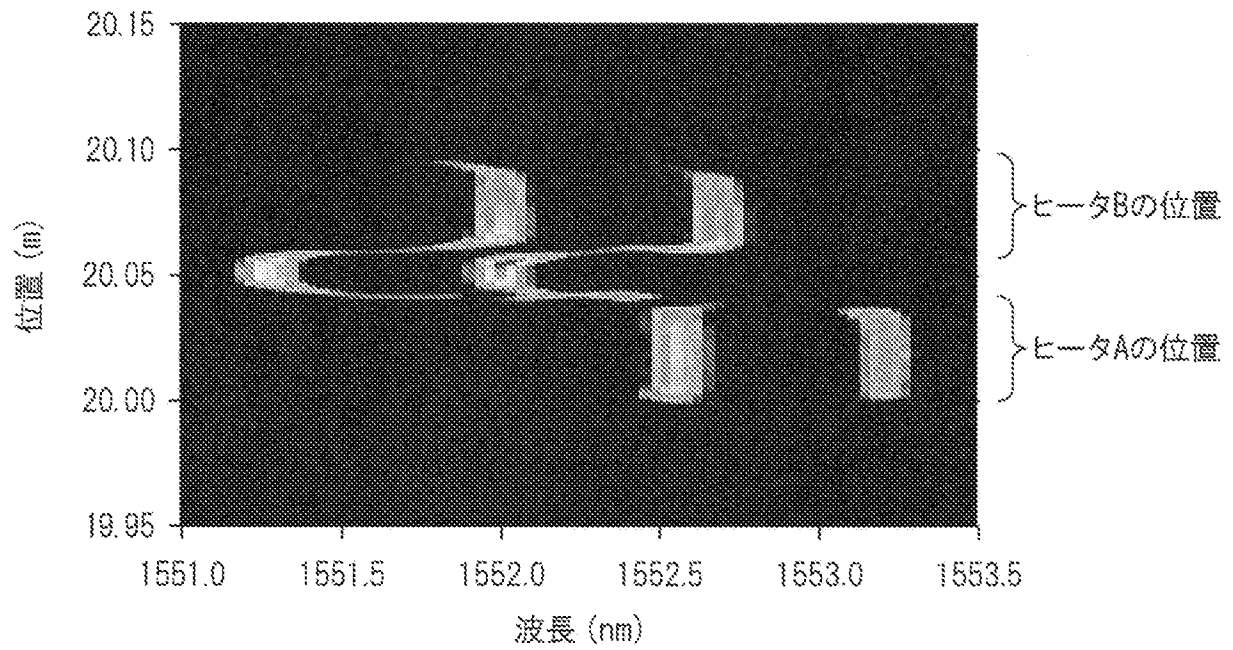
[図15]



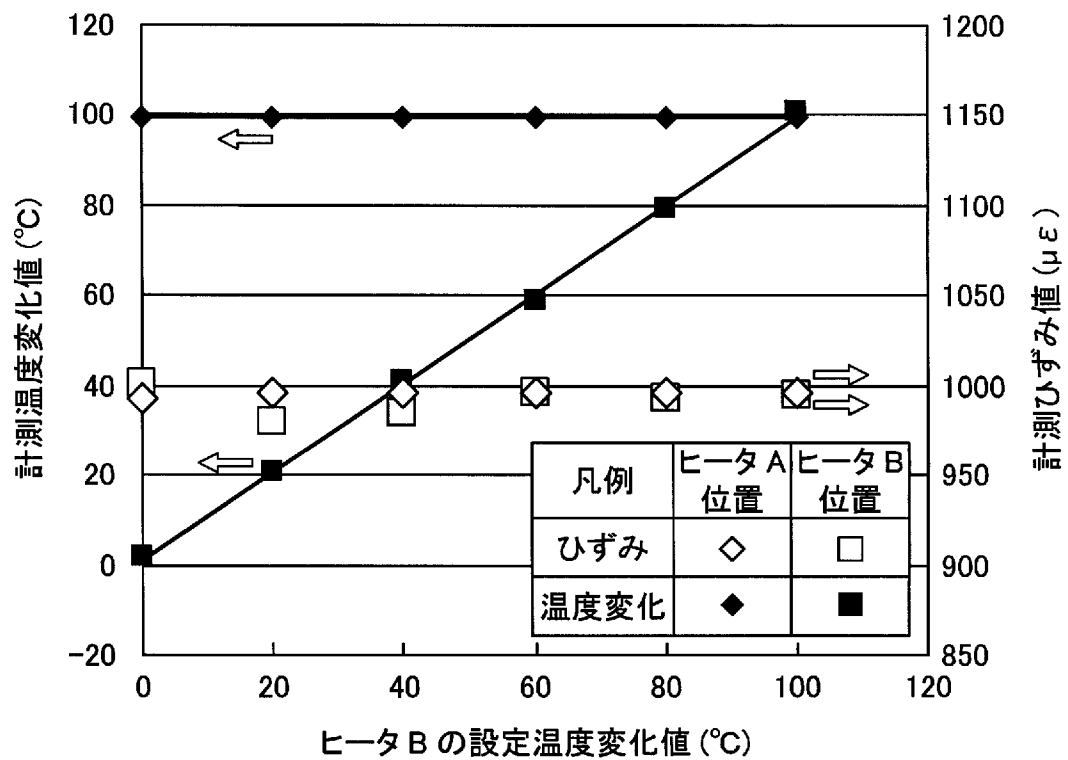
[図16]



[図17]



[図18]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/053899

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01D5/353(2006.01)i, G01B11/16(2006.01)i, G01K11/12(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01D5/353, G01B11/16, G01K11/12

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2009
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2009	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2009

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2005/015149 A1 (Bussan Nanotech Research Institute Inc.), 17 February, 2005 (17.02.05), Full text; all drawings & EP 1655592 A1 & JP 3820411 B2 & US 7426038 B2	1-9
A	JP 2004-205368 A (National Aerospace Laboratory of Japan), 22 July, 2004 (22.07.04), Full text; all drawings (Family: none)	1-9
A	JP 11-64119 A (Fujikura Ltd.), 05 March, 1999 (05.03.99), Full text; all drawings (Family: none)	1-9

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
07 May, 2009 (07.05.09)

Date of mailing of the international search report
19 May, 2009 (19.05.09)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/053899

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2005-147900 A (Japan Aerospace Exploration Agency), 09 June, 2005 (09.06.05), Full text; all drawings (Family: none)	1-9

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. G01D5/353(2006.01)i, G01B11/16(2006.01)i, G01K11/12(2006.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. G01D5/353, G01B11/16, G01K11/12			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1 9 2 2 - 1 9 9 6 年 日本国公開実用新案公報 1 9 7 1 - 2 0 0 9 年 日本国実用新案登録公報 1 9 9 6 - 2 0 0 9 年 日本国登録実用新案公報 1 9 9 4 - 2 0 0 9 年			
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
A	WO 2005/015149 A1(株式会社物産ナノテク研究所)2005.02.17, 全文、全図 & EP 1655592 A1 & JP 3820411 B2 & US 7426038 B2	1-9	
A	JP 2004-205368 A(独立行政法人航空宇宙技術研究所)2004.07.22, 全文、全図(ファミリーなし)	1-9	
A	JP 11-64119 A(株式会社フジクラ)1999.03.05, 全文、全図(ファミリーなし)	1-9	
☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。			
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献			
国際調査を完了した日 0 7 . 0 5 . 2 0 0 9		国際調査報告の発送日 1 9 . 0 5 . 2 0 0 9	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（I S A / J P） 郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官（権限のある職員） 岡田 卓弥	2 F 9 2 0 6 電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 1 6

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2005-147900 A(独立行政法人宇宙航空研究開発機構)2005.06.09, 全文、全図(ファミリーなし)	1-9