

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4083809号
(P4083809)

(45) 発行日 平成20年4月30日 (2008. 4. 30)

(24) 登録日 平成20年2月22日 (2008. 2. 22)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 L 1/24 (2006. 01)	GO 1 L 1/24 A
GO 1 B 11/16 (2006. 01)	GO 1 B 11/16 Z
GO 1 D 5/36 (2006. 01)	GO 1 D 5/36 D
GO 1 K 11/12 (2006. 01)	GO 1 K 11/12 F

請求項の数 25 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願平10-512979
(86) (22) 出願日	平成9年9月8日 (1997. 9. 8)
(65) 公表番号	特表2001-510556 (P2001-510556A)
(43) 公表日	平成13年7月31日 (2001. 7. 31)
(86) 国際出願番号	PCT/US1997/015812
(87) 国際公開番号	W01998/010242
(87) 国際公開日	平成10年3月12日 (1998. 3. 12)
審査請求日	平成16年9月7日 (2004. 9. 7)
(31) 優先権主張番号	08/707, 861
(32) 優先日	平成8年9月9日 (1996. 9. 9)
(33) 優先権主張国	米国 (US)

(73) 特許権者	エリック ウド アメリカ合衆国, オレゴン 97060, トルートデイル, ノースイースト ツーハ ンドレッドアンドフィフス アベニュー 2555
(74) 代理人	弁理士 小橋 正明
(72) 発明者	エリック ウド アメリカ合衆国, オレゴン 97060, トルートデイル, ノースイースト ツーハ ンドレッドアンドフィフス アベニュー 2555

審査官 越川 康弘

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバグレーチング横歪みセンサーシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光ファイバーにおける横応力を検知するシステムにおいて、
第一光ビームを発生する光源、
前記光源からの第一光ビームを受取り且つそれを第二及び第三光ビームへ分割させるべく
接続されているビームスプリッタ、
前記ビームスプリッタからの前記第二光ビームを受取るべく接続されている光ファイバー
、前記光ファイバーは、横応力に露呈させるためにその中に形成されている第一光学的グ
レーチングを有しており、前記光学的グレーチングは前記第二光ビームの一部をスペクト
ル強度の2つの最大値をもった第四光ビームとして反射し、該2つの最大値のスペクトル
間隔は前記第一光学的グレーチングにおける前記光ファイバーへ付与された横応力と共に
変化し、
前記スペクトル強度の2つの最大値のスペクトル間隔を測定し且つ前記光ファイバーにお
ける横応力を表わす第一出力を発生させる検知器
を有するシステム。

【請求項 2】

請求項 1 において、前記検知器が前記第四光ビームの一部を受取るために前記ビームスプ
リッタへ接続されているシステム。

【請求項 3】

請求項 1 において、前記光ファイバーがその周りに付与される圧力に対して非対称的な物

理的応答を持った複屈折光ファイバーであり、それにより、前記横応力を表わす第一出力が前記第一光学的グレーチングにおける前記複屈折光ファイバーへ付与された圧力を表わすものであるシステム。

【請求項 4】

請求項 1 において、前記検知器が前記スペクトル強度の 2 つの最大値のスペクトル間隔を測定して前記第一光学的グレーチングにおいて前記光ファイバーへ付与された横応力を表わす第一出力を発生するシステム。

【請求項 5】

請求項 1 において、前記検知器が前記スペクトル強度の 2 つの最大値のうちの少なくとも 1 つのスペクトル拡散を測定し且つ前記第一光学的グレーチングにおいて前記光ファイバーへ付与された横歪み勾配を表わす第一出力を発生するシステム。

10

【請求項 6】

請求項 1 において、前記第一光学的グレーチングが、第一グレーチング間隔を有しており、従って前記第一光学的グレーチングはほぼ第一周波数で第二光ビームの第一部分を反射し、前記光ファイバーは、更に、第二光学的グレーチングを有しており、前記第二光学的グレーチングは、前記第二光学的グレーチングにおいて前記光ファイバーへ付与された横応力と共にそのスペクトル間隔が変化するスペクトル強度の 2 つの最大値を持った第五光ビームとして前記第二光ビームの第二部分を反射させるために横応力へ露呈させるために前記第一光学的グレーチングと同一の位置に位置されており、前記第二光学的グレーチングは、前記第一グレーチング間隔と異なる第二グレーチング間隔を有しており、従って前記第二光学的グレーチングは前記第一周波数と異なる第二周波数周りににおいて前記第二光ビームの第二部分を反射させる、システム。

20

【請求項 7】

請求項 1 において、前記第一光学的グレーチングが、第一グレーチング間隔を有しており、従って前記第一光学的グレーチングは第四光ビームとして第一周波数周りににおいて前記第二光ビームの第一部分を反射し、前記光ファイバーは、更に、横応力へ露呈するために前記第一光学的グレーチングから離隔している第二光学的グレーチングを有しており、前記第二光学的グレーチングは前記第二光学的グレーチングへ付与される横応力と共にスペクトル間隔が変化するスペクトル強度の 2 つの最大値を持った第五光ビームとして前記第二光ビームの第二部分を反射させ、前記第二光学的グレーチングは、前記第一グレーチング間隔と異なる第二グレーチング間隔を有しており、従って前記第二光学的グレーチングは前記第一周波数と異なる第二周波数周りににおいて前記第二光ビームの第二部分を反射させる、システム。

30

【請求項 8】

請求項 7 において、前記検知器が第四及び第五光ビームにおけるスペクトル強度の 2 つの最大値を測定して第四光ビームにおけるスペクトル強度の 2 つの最大値を表わす第一出力及び第五光ビームにおけるスペクトル強度の 2 つの最大値を表わす第二出力を発生するシステム。

40

【請求項 9】

請求項 1 において、前記光ファイバーがその周りに付与される圧力に対して非対称的な物理的応答を有する第一複屈折光ファイバーであり、且つ、それにより、横応力を表わす第一出力がそれに対して付与される圧力を表わしており、前記第一光学的グレーチングが、第一グレーチング間隔を有しており、従ってそれは第一周波数周りににおいて第二光ビームの第一部分を反射し、前記システムは、更に、その周りに付与される圧力に対する非対称的な物理的応答を有する前記第一複屈折光ファイバーへ接続している第二複屈折光ファイバーを有しており、前記第二複屈折光ファイバー

50

は、

横応力に露呈させるための第二光学的グレーチングを有しており、前記第二光学的グレーチングは第二光ビームの第二部分をスペクトル間隔が前記第二光学的グレーチングへ付与される横応力と共に変化するスペクトル強度の2つの最大値を有する第五光ビームとして反射させ、前記第二光学的グレーチングが、

前記第一グレーチング間隔とは異なる第二グレーチング間隔を有しており、従って前記第二光学的グレーチングは前記第一周波数とは異なる第二周波数周りにおいて前記第二光ビームの第二部分を反射する、

システム。

【請求項10】

10

請求項9において、前記第一複屈折光ファイバーが非複屈折光ファイバーによって前記第二複屈折光ファイバーへ接続されているシステム。

【請求項11】

その上に光学的グレーチングを書込んだ光ファイバーに対する横応力の付与を検知する方法において、

第一光ビームを発生し、

横応力がそれに対して付与されている場合に前記第一光ビームを光学的グレーチング上に入射させて前記第一光学的グレーチングにおいて前記光ファイバーへ付与された横応力と共にそのスペクトル間隔が変化するスペクトル強度の2つの最大値を持った第一光ビームの一部の反射を発生させ、

20

前記スペクトル強度の2つの最大値を検知し、

前記スペクトル強度の2つの検知した最大値から前記光ファイバーへ付与した横応力を表わす第一出力を発生させる、

方法。

【請求項12】

請求項11において、前記スペクトル強度の2つの最大値を検知する場合に、

前記スペクトル強度の2つの最大値の間の間隔を検知し、且つ前記スペクトル強度の2つの最大値を表わす第一出力を発生させる場合に、

前記スペクトル強度の2つの最大値の間隔を表わす第一出力を発生する、

方法。

30

【請求項13】

請求項12において、前記光ファイバーが複屈折光ファイバーであり、前記光学的グレーチングにおいて前記複屈折光ファイバーへ付与された圧力は前記光学的グレーチングに対して横応力を発生させ、且つ前記スペクトル強度の2つの最大値を表わす第一出力を発生させる場合に、

前記光学的グレーチングにおいて前記複屈折光ファイバーへ付与される圧力を表わす第一出力を発生する、

方法。

【請求項14】

請求項12において、前記第一光学的グレーチングが第一スペクトルを反射し、且つ前記光ファイバーが前記第一スペクトルと異なる第二スペクトルを反射する第二光学的グレーチングを有する複屈折光ファイバーであり、前記第二光学的グレーチングにおいて前記複屈折光ファイバーへ付与された圧力は前記第二光学的グレーチングに対して横応力を発生し、前記スペクトル強度の2つの最大値を表わす第一出力を発生させる場合に、

40

前記第一光学的グレーチングにおいて前記複屈折光ファイバーへ付与された圧力及びその温度を表わす第一出力を発生し、且つ

前記第二光学的グレーチングにおいて前記複屈折光ファイバーへ付与された圧力及びその温度を表わす第二出力を発生し、従って圧力及び温度を前記第一及び第二出力から派生させることが可能である方法。

【請求項15】

50

請求項 14 において、前記第一及び第二光学的グレーチングが同一の位置に位置されている方法。

【請求項 16】

請求項 14 において、前記第一及び第二光学的グレーチングが、基本的に同一の圧力及び温度に露呈されるように位置されている方法。

【請求項 17】

請求項 11 において、前記光ファイバーが非複屈折光ファイバーであり、前記光学的グレーチングにおいて前記複屈折光ファイバー周りに付与された歪み勾配がそのスペクトルがスペクトル強度の 2 つの最大値のうちの少なくとも 1 つを拡散させるように前記光学的グレーチングに対して横応力を発生させ、前記スペクトル強度の 2 つの最大値を表わす第一出力を発生させる場合に、

前記光学的グレーチングにおいて前記非複屈折光ファイバー周りに付与される歪み勾配を表わす第一出力を発生させる、

方法。

【請求項 18】

圧力の付与を検知するシステムにおいて、

第一光ビームを発生する光源、

前記第一光ビームを受取るべく接続されている複屈折光ファイバー、前記複屈折光ファイバーは、前記複屈折光ファイバーへ付与される圧力によって発生される横応力へ露呈させるためにその中に第一光学的グレーチングが形成されており、前記第一光学的グレーチングは第一光ビームの第一部分をスペクトル強度の 2 つの最大値を持った第二光ビームとして反射させ、前記スペクトル強度の最大値のスペクトル間隔は前記第一光学的グレーチングにおいて前記複屈折光ファイバーへ付与される圧力と共に変化し、

前記第二光ビームのスペクトル強度の 2 つの最大値を測定し且つ前記複屈折光ファイバーに付与された圧力を表わす第一出力を発生する検知器、
を有するシステム。

【請求項 19】

請求項 18 において、前記検知器が前記第二光ビームのスペクトル強度の 2 つの最大値の間隔を測定し且つそれからの第一光学的グレーチングへ付与される圧力を表わす第一出力を発生するシステム。

【請求項 20】

請求項 18 において、前記複屈折光ファイバーが、更に、

前記複屈折光ファイバーによって付与された圧力及びその温度によって発生される横応力へ露呈させるためにその中に形成されている第二光学的グレーチングを有しており、前記第二光学的グレーチングは、スペクトル強度の 2 つの最大値をもった第三光ビームとして前記第一部分と異なる周波数において前記第一光ビームの第二部分を反射させ、前記第三光ビームのスペクトル強度の最大値のスペクトル間隔は、前記第二光学的グレーチングにおいて前記複屈折光ファイバーへ付与される圧力及びその温度と共に変化し、前記検知器は、更に、前記第三光ビームのスペクトル強度の 2 つの最大値の間隔を測定し且つ前記第二光学的グレーチングへ付与される圧力及びその温度を表わす第二出力を発生する、

【請求項 21】

光ファイバーにおける横歪みを検知するシステムにおいて、

第一光ビームを発生する光源、

前記光源から第一光ビームを受取るべく接続されている光ファイバー、前記光ファイバーは、横応力に露呈させるためにその中に形成されている第一光学的グレーチングを具備しており、前記第一光学的グレーチングは前記第一光学的グレーチングにおいて前記光ファイバーへ付与された横方向に付与された応力と共にそのスペクトル間隔が変化するスペクトル強度の 2 つの最小値を持った第二光ビームとして前記第一光ビームの一部を透過させ、

10

20

30

40

50

スペクトル強度の２つのスペクトル最小値を測定し且つそのスペクトル間隔を表わす第一出力を発生する検知器、
を有するシステム。

【請求項 2 2】

請求項 2 1 において、前記光ファイバーがその周りに付与される圧力に対して非対称的な物理的応答を有する複屈折光ファイバーであり、前記横応力を表わす第一出力が前記第一光学的グレーチングにおいて前記複屈折光ファイバーへ付与される圧力を表わすシステム。

【請求項 2 3】

請求項 2 1 において、前記第一光学的グレーチングが、
第一グレーチング間隔を有しており、従って前記第一光学的グレーチングは第一周波数周りに
において前記第一光ビームの一部を透過させ、前記光ファイバーが、更に、
横応力へ露呈させるために前記第一光学的グレーチングと同一の位置に位置している第二
光学的グレーチングを有しており、前記第二光学的グレーチングは、前記第二光学的グレー
チングにおいて前記光ファイバーへ付与される横応力と共にそのスペクトル間隔が変化
するスペクトル強度の２つの最小値をもった第三光ビームとして前記第一光ビームの第二
部分を透過させ、前記第二光グレーチングが、
前記第一グレーチング間隔と異なる第二グレーチング間隔を有しており、従って前記第二
光学的グレーチングは、前記第一周波数と異なる第二周波数周りににおいて前記第二光ビー
ムの第二部分を透過させる、
システム。

【請求項 2 4】

請求項 2 1 において、前記第一光学的グレーチングが、
第一グレーチング間隔を有しており、従って前記第一光学的グレーチングは第一周波数周
りの前記第一光ビームの第一部分を第三光ビームとして透過させ、前記光ファイバーは、
更に、
横応力へ露呈させるために前記第一光学的グレーチングから比較されている第二光学的グ
レーチングを有しており、前記第二光学的グレーチングは、前記第二光学的グレーチング
へ付与される横応力と共にそのスペクトル間隔が変化するスペクトル強度の２つの最大値
を持った第四光ビームとして前記第一光ビームの第二部分を透過させ、前記第二光学的グ
レーチングは、
前記第一グレーチング間隔とは異なった第二グレーチング間隔を有しており、従って前記
第二光学的グレーチングは、前記第一周波数とは異なった第二周波数周りににおいて前記第
二光ビームの第二部分として反射させる、
システム。

【請求項 2 5】

請求項 2 4 において、前記検知器は前記第三及び第四光ビームにおけるスペクトル強度の
２つの最大値を測定して前記第三光ビームにおけるスペクトル強度の２つの最大値を表わ
す第一出力及び前記第四光ビームにおけるスペクトル強度の２つの最大値を表わす第二出
力を発生させるシステム。

【発明の詳細な説明】

発明の背景

横歪み及び横歪み勾配を測定するための正確で且つ応答性のある環境センサーシステムに
対する必要性が存在している。更に、ほぼ温度依存性であり且つ又は温度補償することの
可能な横歪み測定に基づいた圧力センサーに対する必要性が存在している。このタイプの
横センサーシステムの適用例は、飛行機又は宇宙構造物における横歪みの位置、識別及び
測定を包含するものである。これらの構造物は、それらの任務を成し遂げるために、横歪
み負荷を含む実時間においてのそれらのステータスの連続的な表示を提供することが可能
なものでなければならない。ほぼ温度独立性であるか又は温度補償型の横歪みに基づいた
ファイバグレーチング圧力センサーは、液体酸素及び水素タンク及びその他の危険な区

10

20

30

40

50

域においての圧力を測定するために使用することが可能である。これらのセンサーの土木構造物の適用例は、橋、建物又は高速道路構造物にわたっての横歪み及び鉞山の屋根の横負荷の測定を包含するものである。これらのセンサーは、又、地震やハリケーン等の災害の後における住居及びオフィス用の建物に対する構造上の損傷を識別するために使用することが可能なシステムをサポートするために使用することも可能である。圧力センサーは、食品及び化学物質の処理制御を包含する多様な産業上の適用例に対して使用することが可能である。

これらのセンサーに対するその他の適用例は、製造を増加させ、非破壊的な評価を実施し、構造物に対する健康管理システムを実現し、且つ制御システムを補強するために使用される環境パラメータをモニタするためにセンサーが使用される高度に敏感な構造物の新生の分野を包含している。これらの構造物は実時間でそれらの条件を連続してモニタすることが可能であることを必要とする。それらは、低パワーで極めて長い時間にわたって動作することが可能なものでなければならない。これらの構造物をサポートするために使用されるセンサーは、環境信号における小さな変化を正確に測定することが可能なものであり尚且つ広いダイナミックレンジ能力を維持することが可能なものでなければならない。

これらの要件の多くのものを満足する可能性を有する光ファイバーセンサーに対して光ファイバーグレーチングが提案されている。ファイバーグレーチングは、光ファイバーのコアを例えばゲルマニウム等の物質でドーピングすることによって構成される。光に露呈された場合に、適宜のコアドーパントを有するシリカをベースとしたファイバーの光学的コアの屈折率は修正された屈折率を有するものであることが判明した。フェーズマスク (p h a s e m a s k) 又は干渉用レーザービームを使用することによって、内部グレーチング構造を発生するファイバーコアの長さに沿って屈折率において多数の変化を発生することが可能であることが証明された。ファイバーグレーチングの形成過程に周期の間隔を調節することは、そのスペクトル伝送及び反射特性を変化させる。

ファイバーグレーチングが例えば歪み、温度、圧力、又は振動等の環境効果に露呈された場合には、光ファイバーの長さが変化され、従ってファイバーグレーチングの周期が変化される。一例として、W. W. Morey は、「分散型ファイバーグレーチングセンサー (Distributed Fiber Grating Sensors)」、第7回光ファイバーセンサー会議のプロシーディングズ、285 - 288 頁、オーストラリア、シドニー、1990年12月において、典型的な温度変化はアンドリュー (Andrew) PMファイバーの場合には833 nmにおいて0.0043 nm / であり且つ824 nmにおいてコーニングフレックスコア (Corning FlexCore) ファイバーの場合には0.0074 nm / であることを報告している。ファイバーに歪みが発生すると、ファイバーの長さも変化する。ブラック波長変化がMoreyによって測定され、820 nmにおいてマイクロ歪み当たり 5.2×10^{-4} nm のシフトが発生していた。

多くの適用例に対して、温度と歪みの両方を同時的に測定することが必要である。E. Udd 及び T. E. Clark は、「環境効果を検知するための光ファイバーグレーチングセンサーシステム (Fiber Optic Grating Sensor Systems for Sensing Environmental Effects)」、米国特許第5,380,995号において、例えば1.3及び1.5ミクロン等の異なる波長における2つの重畳させたファイバーグレーチングをどのように使用して単一の点における例えば歪みと温度等の2つの環境パラメータを測定することが可能であるかについて記載している。最近、M. G. Xu、H. Geiger 及び J. P. Dakin は、「多重点及び段階的 - 連続的ファイバーグレーチングをベースとしたセンサー：構造上のモニタリングに対する実際的センサー (Multiplexed Point and Stepwise - Continuous Fibre Grating Based Sensors: Practical Sensor for Structural Monitoring?)」、プロシーディングズ・オブ・SPIE、2294 巻、69 - 80 頁、1994年において、1.3及び0.85ミクロンの波長

10

20

30

40

50

を使用し且つ点測定用の重畳型ファイバークレーチングを使用して歪み及び温度の同時的測定を検証している。構造物内部の歪みの完全なる測定を行なうためには、3つの歪み成分すべてを測定することが必要であることがしばしばである。R. M. Measures、D. Hogg、R. D. Turner、T. Valis、M. J. Giliertoは、「構造的に一体化させた光ファイバースtrainローゼット (Structurally Integrated Fiber Optic Strain Rosette)」、Proceedings of SPIE、986巻、32-42頁、1988年において、3つの別々のファイバースセンサーからなる光ファイバースtrainローゼットを実証している。これらのファイバースセンサーは配列されておらず且つ温度変動を補償する手段が使用されていなかったため、これらのローゼットは、その使用が非常に制限されたものであった。Eric Uddは、米国特許出願第08/438,025号「マルチパラメータ光ファイバークレーチングシステム (Multiparameter Fiber Optic Grating System)」において、横歪みを含み3軸の歪み及び温度を測定することを可能とする複屈折ファイバーに書込んだデュアル即ち二重の重畳させたファイバークレーチングに基づいたファイバークレーチングセンサーを記載している。然しながら、横歪み測定能力及び圧力及び歪み勾配の支援測定を改善し且つ洗練化することの継続した必要性が存在している。

10

本発明の簡単な説明

本発明においては、ファイバークレーチングをシングルモード光ファイバース上に書込んで横歪みセンサーを形成する。該ファイバーが通常のシングルモードファイバーである場合には、ファイバーへ適用された横歪みがファイバークレーチングのスペクトル分布を2つのピークへ分割させる。これらの2つのピークの間のスペクトル分離の測定を行なって、該ファイバーの横方向負荷の量を表わすことが可能である。このアプローチは、付与した負荷の方向に関してファイバークレーチング横方向センサーのオリエンテーション即ち配向状態が未知である場合に有用である。1例として、これは、採鉱シャフトの屋根に関する測定を支援し且つ測定を行なうために使用される引抜成形したビーム内に配置される場合等がある。然しながら、小さな横方向負荷の場合には、スペクトルピークは非常に近接しており、ピークとピークの間を正確に測定することを困難なものとしている。ファイバークレーチングを例えば楕円形のコアを有する偏光 (分極) 持続性ファイバー等の複屈折光ファイバー又は応力複屈折を誘起させるクラッドイングの上にファイバークレーチングを書込むことによって、スペクトルピークの間を明確な分離が可能であり且つ横方向負荷における非常に小さな変化に対して正確な測定を行なうことが可能である。非対称的なファイバークラッドイング、例えば楕円形のクラッドイング又は側部空気孔が関与する場合等においては、圧力変化が横方向歪みにおける変化を誘起させる。ファイバークレーチングがこのタイプのファイバーのコアの上に書込まれる場合には、ファイバース圧力センサーを形成するために使用することが可能である。2つの応力によって誘起されるピークの間を空間的な分離は小さなものであるから、温度に起因するピークとピークとの分離における変化は小さい。然しながら、ピークの全体的なスペクトルシフトは、通常のファイバークレーチングのものと同様の態様で歪み及び温度に応答し、且つUdd及びClarkによって記載されているようにデュアル重畳型ファイバークレーチングを使用して測定することが可能である。

20

30

40

本システムは、異なる波長で動作する複数のファイバークレーチングを使用することによって、及び又は時分割多重化技術を使用することによって、歪み又は圧力の複数の測定を支援するために使用することが可能である。

従って、負荷方向とは独立的な横歪みを測定するために通常のシングルモードファイバース上に書込んだファイバークレーチングからなるセンサーシステムを提供することが本発明の1つの目的である。

本発明の別の目的とするところは、時間的に変化する環境信号の振幅及び位置を測定することの可能な環境センサーシステムを提供することである。

本発明の別の目的とするところは、横歪みにおいて非常に小さな変化を測定することの可

50

能な横歪みセンサーを提供することである。

本発明の別の目的とするところは、圧力を測定することである。

本発明の別の目的とするところは、横歪み勾配を測定することである。

本発明の別の目的とするところは、横歪み勾配を測定し且つ光ファイバーの軸に関するそれらの配向状態を識別することである。

本発明の別の目的とするところは、採鉱シャフトにおける横方向負荷を測定することの可能なシステムを提供することである。

本発明の別の目的とするところは、処理制御用の多点圧力及び温度センサーを提供することである。

本発明の別の目的とするところは、単一の光ファイバー長さに沿って横歪み及び圧力/温度測定の両方を与えることである。本発明の別の目的とするところは、ユーザが矯正動作を行なう必要性の警告を与えるためにダムの信頼性に関する構造上の情報を提供することである。

10

本発明のこれら及びその他の目的及び利点は、以下の詳細な説明及び添付の図面を考慮した後に、当業者にとって明らかなものとなる。

【図面の簡単な説明】

図1は環状対称シングルモード光ファイバー上に書込んだファイバークレーチングの模式図である。

図2は反射モードで動作すべく形態とされた基本的なファイバークレーチング復調システムを示している。

20

図3Aは横方向負荷なしで環状対称光ファイバーに書込んだファイバークレーチングの反射されたスペクトルの分布を示しており、且つ図3Bは横方向負荷が存在する場合の環状対称光ファイバーに書込んだファイバークレーチングの反射されたスペクトルの分布を示している。

図4は横方向負荷に露呈されるロッド内に形成されている光ファイバーにおける多重型ファイバークレーチングを示している。

図5はそのコア上にファイバークレーチングが書込まれている偏光(分極)持続用ファイバーとすることの可能な複屈折光ファイバーを示している。

図6はそのコア上にデュアル重畳型ファイバークレーチングが書込まれている偏光(分極)持続用ファイバーとすることの可能な複屈折光ファイバーを示している。

30

図7A及び7Bは3M偏光持続用複屈折ファイバー上に1300及び1550nmで書込んだデュアル重畳型ファイバークレーチングからの反射されたスペクトルを示している。

図8A, 8B, 8C, 8D, 8E, 8F, 8Gは、複屈折偏光持続用ファイバーの種々のタイプの断面を示している。

図9は空気側部孔を有する光ファイバー上にファイバークレーチングを書込むことに基づいたファイバークレーチングをベースとした圧力センサーを示している。

図10は空気孔をシールするために2つの長さの光ファイバーの間でスプライスしたファイバークレーチングをベースとした圧力センサーを示している。

図11は単一のファイバーラインにおける一連の多重型ファイバークレーチングをベースとした圧力センサーを示している。

40

図12は多重型ファイバークレーチングをベースとした圧力センサーの復調(検波)を支援するシステムを示している。

図13は側部孔ファイバー上に書込んだデュアル重畳型ファイバークレーチングを有するファイバークレーチングをベースとした圧力センサーを示している。

図14は圧力及び温度を測定するためにその上にファイバークレーチングが書込まれており且つ別の長さの光ファイバー上に第二ファイバークレーチングが書込まれている側部孔ファイバーとすることが可能な複屈折ファイバーのセクションから構成されているファイバークレーチングセンサーを示している模式図である。

図15はファイバークレーチングが書込まれており且つそれに対して横歪み勾配が付与される複屈折ファイバーを示している模式図である。

50

図 1 6 はニートな（即ち、小綺麗な）エポキシ樹脂円筒内に埋込まれておりその上にファイバークレーチングが書込まれており平坦なプレートを通じて 3 0 0 ポンドの負荷が付与される偏光持続用ファイバーからの反射されたスペクトルを示している模式図である。

図 1 7 はニートな（小綺麗な）エポキシ樹脂円筒内に埋込まれておりその上にファイバークレーチングが書込まれており平坦なプレートを通じて 4 0 0 ポンドの負荷が負荷される偏光持続用ファイバーからの反射されたスペクトルを示している模式図である。

図 1 8 はニートな（小綺麗な）エポキシ樹脂円筒内に埋込まれておりその上にファイバークレーチングが書込まれており平坦なプレートを通じて 4 5 0 ポンドの負荷が付与される偏光持続用ファイバーからの反射されたスペクトルを示している模式図である。

図 1 9 は伝送におけるファイバークレーチングのスペクトルピークを測定するためのテストセットを示した模式図である。

図 2 0 は複屈折偏光持続用ファイバー内に 1 3 0 0 及び 1 5 5 0 n m において書込んだデュアル重畳型ファイバークレーチングのスペクトル曲線を示している。

図示した実施例の詳細な説明

図面を参照し、更に詳細には参照番号によれば、図 1 における 2 2 は環状に対称的なある長さのシングルモード光ファイバーを示している。この光ファイバーのコア 2 4 上にはファイバークレーチング 2 6 が書込まれている。ファイバークレーチング 2 6 が、図 2 に示したように、ファイバークレーチング復調（検波）システム 3 0 へ取り付けられると、例えば歪み及び温度等の環境変化に起因するファイバークレーチングの周期変化を、ファイバークレーチングから反射されるか又はそれを透過する光におけるスペクトルシフトを測定することによって決定することが可能である。図 2 に示した復調システムの場合においては、例えば発光ダイオード等の高帯域光源又は比較的幅の狭い帯域の同調可能な光源とすることの可能な光源 3 2 を使用して、光をファイバー端部 3 4 内へ結合させる。結合された光ビーム 3 6 は、例えばファイバービームスプリッター 3 8 のようなビームスプリッターを介して指向される。ファイバービームスプリッター 3 8 の 1 つのポートは非反射性の端部 4 0 で終端させることが可能であり、又は、それは付加的なファイバークレーチングに対する測定を支援するために使用することが可能である。光ビーム 3 6 の一部はビームスプリッター 3 8 の出力ポート 4 2 内へ分割されて光ビーム 4 4 となる。出力ポート 4 2 はスプライス又はコネクタ 4 6 を介してファイバークレーチング 2 6 へ接続されている。ファイバークレーチング 2 6 によって反射された光ビーム 4 4 の部分 4 8 は、ビームスプリッター 3 8 へ戻るべく指向され、且つその一部は光ビーム 5 2 としてビームスプリッターポート 5 0 内へ指向される。次いで、この光ビーム 5 2 はスペクトル分析器 5 4 へ入り、それは環境効果によって誘起されたファイバークレーチング 2 6 の状態における変化に起因する光ビーム 5 2 におけるスペクトルシフトを測定する。

図 3 A は、ファイバークレーチング 2 6 が横ストレス（応力）に露呈されない場合にスペクトル復調器 5 4 によって決定されるようなファイバークレーチング 2 6 のスペクトル反射分布を示している。注意すべきことであるが、分布 1 0 0 においては単一のピークが存在している。これは、存在する場合であっても、誘起された複屈折がほとんど存在しない場合に対応している。横応力がファイバークレーチング 2 6 へ付与されると、反射分布 1 0 0 は、図 3 B に示した 1 0 2 のようなデュアルロブ（d u a l l o b ）即ち 2 つの山を有する分布が存在するまで分割し始める。横応力の量は、誘起された複屈折に比例し、それはピーク 1 0 6 と 1 0 8 との間の空間的な分布 1 0 4 を決定する。

一時的には、ピークとピークとの分離 1 0 4 は比較的溫度とは独立している。何故ならば、ピーク 1 0 6 及び 1 0 8 の両方共ほぼ同一の波長にあり且つ溫度はピーク 1 0 6 及び 1 0 8 の両方をほぼ同一のスペクトルシフトによって同一の全体的な方向に移動させるからである。環状対称単一モードオブチカルファイバーに書込んだファイバークレーチングを使用するアプローチは、低コストの遠距離通信用の光ファイバーを使用し且つ負荷方向とは独立している横方向感度を有しているという利点を持っている。このことをどのようにして使用することが可能であるかという 1 つの例として、製造過程中にロッド 1 6 0 の中心近くの位置に配置させた一連ファイバークレーチング 1 5 4 , 1 5 6 , 1 5 8 , . . .

10

20

30

40

50

を包含する環状対称光ファイバーの図4に示した場合について検討する。その製造は、引抜成形等のプロセスによって行なうことが可能である。ロッド160が、建物、採掘坑又はトンネルの屋根である場合がある横方向負荷を担持する構造物内に配置された場合には、その長さに沿って横方向負荷162, 164, 166における変動に露呈される。次いで、これらの負荷は、ファイバークレーチング154, 156, 158の反射されたスペクトル分布のピークからピークへの分離を決定することにより測定することが可能である。

環状対称シングルモード光ファイバーを使用することの1つの欠点は、小さな横方向負荷の場合には、ピークとピークとの分離が測定することが極めて困難な場合があるということである。何故ならば、それらのピークがノイズに埋もれる場合があるからである。この問題を排除するために、ファイバークレーチングを図5に示したように、偏光(分極)持続用ファイバー200内にファイバークレーチングを書込むことが可能である。この場合には、偏光即ち分極持続用ファイバー200は異なる実効的な屈折率を有する2つのファイバー軸202及び204を有している。ファイバークレーチング206がファイバー200上に書込まれる場合には、横応力が、復調器30によって検査した場合に、図3Bと同様な2つの分離されたスペクトルピークを発生させる。又、図6に示したように、離隔された波長において偏光即ち分極持続用ファイバー200上にデュアル重畳型ファイバークレーチング250及び252を書込むことが可能である。これは、4個の実効的なファイバークレーチングとなり、且つ、Eric Uddによって米国特許出願第08/438, 025号において記載されているように、3つの軸の歪み及び温度を測定するために使用することが可能である。

図7A及び7Bは3M会社によって製造された分極(偏光)持続用光ファイバー上に夫々1300及び1550nmで書込んだデュアル重畳型ファイバークレーチングからのスペクトル反射応答を示している。1300nmにおけるピークとピークとの分離は約0.427nmであり、1550nmにおけるピークとピークとの分離は約0.488nmである。この分離は、ピークを明確に区別することが可能であり、横歪みを決定するのに必要なピークとピークとの分離の正確な測定を行なうことを可能とするものであるので充分である。

ファイバークレーチングは3Mによって製造された分極持続用ファイバーを含む横歪み検知用に対する妥当性を判別するために幾つかの異なるタイプの分極持続用ファイバー上にファイバークレーチングを書込んだ。これらのファイバーの各々は図8Aに断面で示した光ファイバー300の楕円形クラッドリング298と同様な楕円形クラッドリングを有している。この場合に、ファイバー300のコア302は、環状対称光ファイバー300を形成するためにその上に重ね合わせたガラス306の被覆と異なる硬さを持ったガラスから構成されている楕円形クラッドリング構造物298によって取り囲まれている。図8B及び8Cの光ファイバー320及び322の断面に示したものと同様の構造を持ったフジクラ分極維持用光ファイバーも使用した。フジクラファイバーにおいては、環状対称ファイバーコア328及び330を介して異なる応力を誘起させるために応力ロッド324及び326を使用する。誘起される応力の量は、応力ロッド324及び326の間の直径における差として、図8A及び8Bに示したような応力ロッドの直径を変化させることによって制御することが可能である。それは、又、応力ロッドの硬さと相対的に周りのガラスの硬さを変化させることによって変化させることも可能である。応力ロッド型のファイバー上にファイバークレーチングを成功裡に書込んだが、光源に対するファイバーの配向状態及びファイバークレーチングを書込むために使用したフェーズマスクは、応力ロッドがファイバーコアをマスクすることがないように調節せねばならなかった。図8Dに示してあり且つファイバーコア(Fiber core)によって供給されている3番目のタイプのファイバー360は、横歪み測定のためにその上にファイバークレーチングを書込んだ。ファイバー360はソフトなガラス側ピット362及び364を有している。このファイバー360は、側部ピット362及び364と対称的なファイバー360を形成するためにその周りに使用されているガラス368との間の硬さにおける差によって発生される

10

20

30

40

50

円形コア 366 を横断して誘起される応力を有している。これらの全てのファイバータイプはコーニング (C o r n i n g) によって供給されている楕円形のコアのファイバー 380, 382, 384 と同じく横歪み測定のために適切な明確なピークとピークとの分離を実証した (図 8 E, 8 F, 8 G)。ファイバー 380, 382, 384 は、楕円形のコア 390, 392, 394 を有する一連の光ファイバー断面を示している。テストしたコーニングのファイバーは円形クラディング内の楕円形のコアを有するものであったが、横歪み感度を増強させるのに役立つような態様でクラディング構造を調節することが可能である。ファイバー 380 は平坦な側部 396 を有しており、ファイバー 382 は楕円コア 392 の主軸 401 に平行に配向されている応力ロッド 398 及び 400 を有しており、一方ファイバー 384 は楕円コア 394 の主軸 406 と垂直に配向されている応力ロッド 402 及び 404 を有している。横方向感度を増加させるのに役立つようなその他の幾何学的形状を有することも可能である。

光ファイバー内にファイバークレーチングを書込むことによって形成される横歪みセンサーの 1 つの適用例は圧力の測定である。図 9 はファイバークレーチングをベースとした圧力センサー 450 を示している。それは、ファイバークレーチング 454 が書込まれているファイバーコア 452 から構成されている。450 のクラディング 456 内にはデュアル側部孔 458 及び 460 が閉じ込められており、それらは空気又はその他の気体及び物質を収容することが可能である。センサー 450 は光ファイバー 470 及び 472 の長さにスプライス即ち接合することが可能であり、それらは図 10 に示したようにシングルモード光ファイバーとすることが可能である。外側圧力がセンサー 450 へ付与されると、それは主軸 474 及び 476 に沿ってファイバー圧力センサー 450 の複屈折を変化させる。ファイバー圧力センサー 450 の感度は、側部孔 478 及び 480 の寸法及び幾何学的形状を変更することによって調節することが可能である。

ファイバー圧力センサー 450 は図 11 に示したように多重化させることが可能である。この場合には、約波長 λ_1 のところに中心位置決めされたファイバークレーチング 502 を有するファイバー圧力センサー 500 が光ファイバーセグメント 504 及び 506 の間でスプライス即ち接合される。セグメント 506 は、更に、約波長 λ_2 のところに中心位置決めされたファイバークレーチング 510 を有するファイバー圧力センサー 508 へスプライス即ち接合される。光ファイバーセグメント 512 は、ファイバー圧力センサー 508 の他端とそのファイバークレーチング 516 がほぼ波長 λ_3 のところに位置決めされているファイバー圧力センサー 514 との間にスプライス即ち接合される。ファイバー圧力センサー 514 の反対側の端部は光ファイバーセグメント 518 へスプライス即ち接合される。このように、多数のファイバークレーチングをベースとした圧力センサーを一体的にスプライス即ち接合させ、且つ波長分割多重化を使用して多重化させることが可能である。更に、ファイバークレーチングの反射率が光源から更に離れているファイバークレーチング圧力センサーを「シェーディング」することを回避するために 100% 未満である限り、同様の波長で動作するファイバークレーチングをベースとした圧力センサーを使用することによって時分割多重化技術を使用することも可能である。

図 12 は多重化させたファイバークレーチングをベースとした圧力センサー 552, 554, 556 のシステム 550 を示している。例えば発光ダイオードのような広帯域光源又は同調可能な狭い帯域の光源とすることの可能な光源 558 を使用して光ビーム 560 をファイバー端部 562 へ結合させることが可能である。光ビーム 560 はビームスプリッタ 564 内へ通過し、そこで、光ビーム 566 と 568 とに分割される。光ビーム 568 は終端されている端部 570 を介してシステムの外部へ出る (変形例として、光ビーム 568 は別の 1 組のファイバークレーチング圧力センサーを照明するために使用することが可能である)。光ビーム 566 はファイバークレーチング圧力センサー 552 に入り且つこの光ビーム 566 の一部は光ビーム 574 としてファイバークレーチング 572 から反射される。光ビーム 574 はビームスプリッタ 564 へ戻り且つその一部は光ビーム 578 としてビームスプリッタ 576 の端部へ指向される。次いで、光ビーム 578 はスペクトル復調器 580 へ入り、該復調器はスキャニングファブリ・ペロー (F a b r y - P e

10

20

30

40

50

rot) フィルター又は音響・光学同調可能フィルターをベースとしたシステムとすることが可能であり且つ圧力によって誘起された複屈折に起因するピークとピークとの分離を表わす出力が出力 582 として読取られる。これは、圧力 584 を読取るために解釈することが可能である。分布の全体的なスペクトルシフトは軸方向歪み及び温度に依存しこれが読み出し 586 である。

軸歪みが圧力のみ起因するものであってその他のタイプの負荷に起因するものではない場合には、歪み及び温度を決定するために単一のファイバグレーチングで十分な場合がある。然しながら、一般的には、軸方向負荷の存在は、長手軸方向に誘起された歪みも測定することを必要とする。このことは、図 3 に示したようなデュアル即ち二重の重畳型ファイバグレーチングを使用することによって行なうことが可能である。この場合には、ファイバグレーチングをベースとした圧力センサー 600 は波長 λ_1 におけるファイバグレーチング 602 を有しており、その上に波長 λ_2 における 2 番目のファイバグレーチング 604 が重畳されている。これは 4 つの実効的なファイバグレーチングを形成し、それは 3 つの軸の歪み及び温度を測定するために使用することが可能である。

別のアプローチが図 14 に示されている。この場合には、波長 λ_1 におけるファイバグレーチング 652 を具備するファイバグレーチングをベースとした圧力センサー 650 が波長 λ_2 におけるファイバグレーチング 656 を具備する環状対称ファイバー 654 の第二セグメントと多重化動作される。ファイバグレーチング 652 はファイバグレーチング 656 と異なって横歪みに応答する。特に、圧力によって誘起される複屈折はファイバグレーチング 652 からの反射されるか又は透過された信号における測定可能なスペクトルピークとスペクトルピークとの分離を発生させる。然しながら、ファイバグレーチング 656 は歪み及び温度に依存する全体的なスペクトルシフトを具備する単一のピークを有している。ファイバグレーチング 652 及び 656 の全体的なスペクトルシフト (ファイバグレーチング 652 に対するピークからピークへの分離を平均) を比較することによって、歪み及び温度を測定することが可能である。ファイバグレーチング 652 及び 656 を異なるタイプの光ファイバーセグメント 650 及び 654 上に書込むことによって、歪み及び温度の 2 つの未知数における 2 つの方程式をインポートさせる容易性は、付加的な自由度によって簡単化させることが可能である。然しながら、注意すべきことであるが、このような方法は、存在するとしても、短時間での温度及び歪みの変動が殆ど存在しない環境において有用なものである。何故ならば、グレーチング 652 及び 654 は同一の場所に存在するものではないからである。

注意すべきことであるが、図 9 乃至 14 においてファイバグレーチングをベースとした圧力センサーを示すために側部孔型の複屈折ファイバーを使用した。例えば図 8 に示したようなその他のタイプの非対称的分極 (偏光) 持続用ファイバーをその代わりに使用することも可能である。

横歪みセンサーの別の適用例は横歪み勾配の測定である。図 15 は複屈折光ファイバーに基づいたファイバグレーチングをベースとした横歪みセンサー 700 を示している。ファイバグレーチング 702 は主軸 708 及び 710 を有する複屈折光ファイバー 706 のコア 704 上に書込まれている。横歪み勾配 712 及び 714 が軸 708 及び 710 に沿って付与されると、歪み勾配の結果として、ピークスペクトル分布内に変化が発生する。

図 16 は、ニート (neat) な即ち小綺麗なエポキシの円筒内にモールドされており且つ 300 ポンドで平行な平坦なプレートで横方向に負荷がかけられたそのコア上に 1550 nm ファイバグレーチングを書込んだファイバーコア (Fiber core) の偏光 (分極) 持続用ファイバーの結果を示している。両方のピークを明確に見ることが可能であるが、反射スペクトルのある程度の拡散が発生している。図 17 は 400 ポンドの負荷における結果的に発生した反射スペクトルを示している。横軸のうちの 1 つに対応する右側のピークは横歪み勾配に起因して広く拡散し始めており、一方他方はいまだにその元の形状をある程度維持している。図 18 は、450 ポンドの負荷を印加した場合の結果を示している。この場合には、横軸のうちの 1 つは横歪み勾配に起因してかなりの拡散を示し

10

20

30

40

50

ており、一方他方は丁度実質的な歪みを示し始めたところである。この拡散の幅及び強度スペクトルを測定することによって、横歪み勾配を測定することが可能である。

従って、これまで説明した本発明は全て反射で動作するものとして説明した。又、歪み、圧力及び歪み勾配の測定のために透過型で横歪みセンサーを動作させることが可能である。図19は基本的な形態500を示している。広帯域光源又は同調可能な狭い帯域の光源とすることの可能な光源502が、ファイバー端部504内へ光を結合させ且つ光ファイバー508を伝搬する光ビーム506を発生する。光ビーム506は光ファイバー508内に書込まれている1個又はそれ以上のファイバークレーチング510へ伝搬する。ファイバークレーチング510の領域内における光ファイバー508は複屈折型とすることが可能であり及び、又は先の知見に関連して説明したような幾何学的な形状とさせることが可能である。光ビーム506の一部は光ビーム512としてファイバークレーチング510を貫通して通過し且つ光ファイバー508に沿って出力スペクトル分析器/プロセサ514へ指向される。スペクトル分析器/プロセサ514は出力516を発生し、それは横歪み、圧力又は歪み勾配を表わすことが可能である。

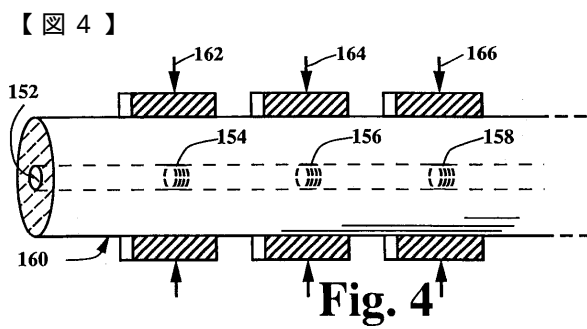
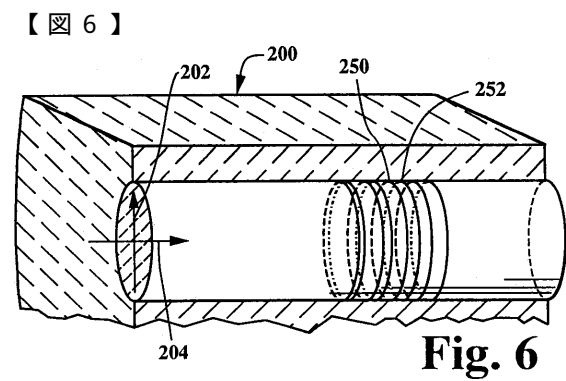
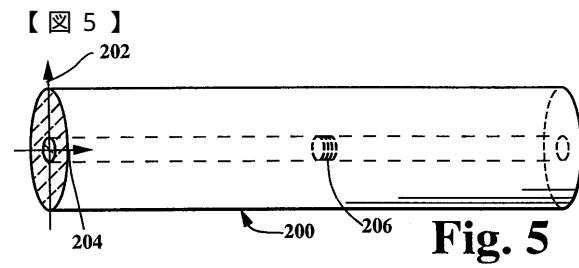
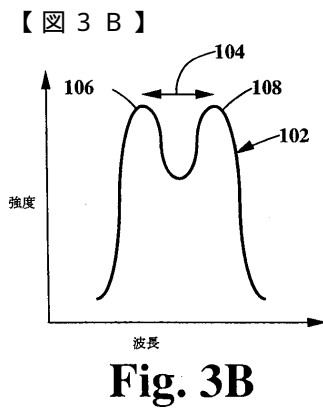
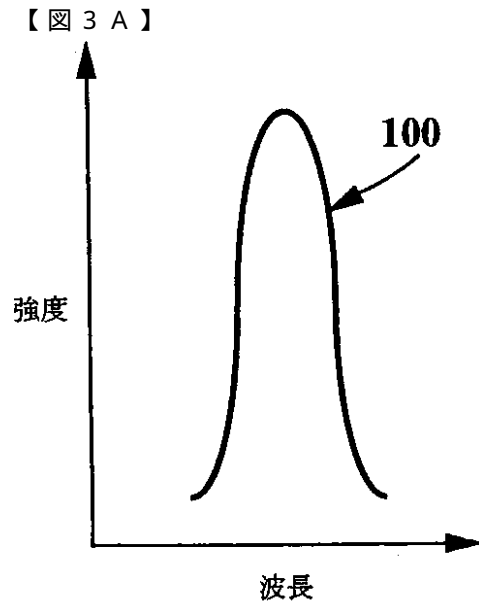
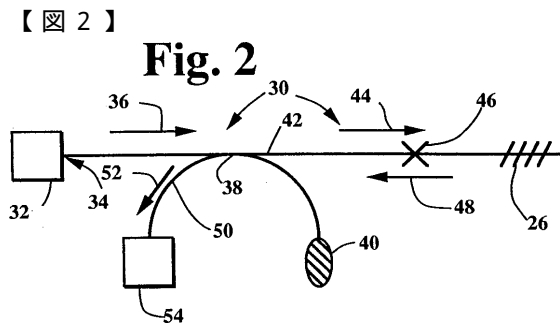
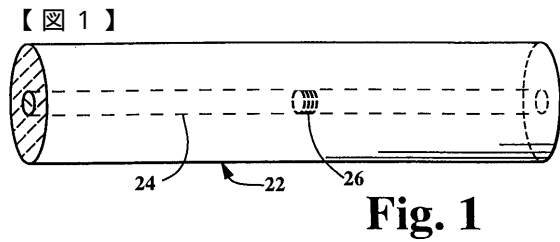
10

図20A及び図20Bは図19に示したものと同様の形態を使用するデュアル重畳型ファイバークレーチング横方向センサーからの透過された出力スペクトルを示している。この場合に使用される光源は中心波長が1300及び1550nmで動作する端部射出型の発光ダイオードから構成されている。これらの光源は波長分割多重化要素を使用して単一の実効的な光源に結合させるか又は個別的に使用することが可能である。図20A及び20Bに示したデータに対応するファイバークレーチングはフジクラ(Fujikura)偏光(分極)持続用光ファイバー上の実質的に同一の位置に1300及び1550nmで書込んだ。図20Aは2つの透過ディップの間のピークからピークへの分離が1300nmにおいて約0.320nmであることを示している。図20Bは、2つの透過ディップの間のピークからピークへの分離が1550nmにおいて約0.406nmであることを示している。図20A及び20Bから理解される様に、図19と同様な透過形態における動作も、先の図に関連して説明したものと同様の態様で、横歪み、圧力又は歪み勾配を決定するためにピークからピークへの測定を行なうことを可能とする。先の図について説明した反射形態を使用することと比較して図19に関連する透過型アプローチの1つの欠点は、横方向ファイバーセンサーの両方の端部へのアクセスを必要とするということである。ある適用例においては、特に、検知領域と情報が処理されるべき区域との間でかなりの距離が存在する場合には、かなりのコストを付加する場合がある。

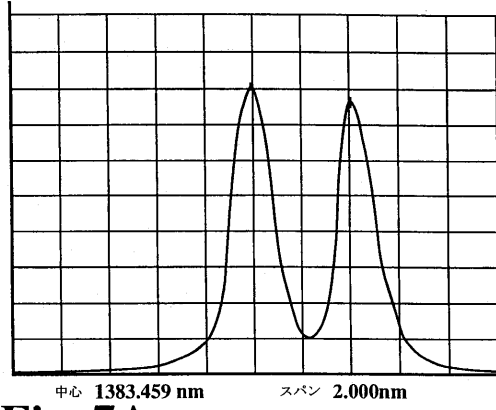
20

30

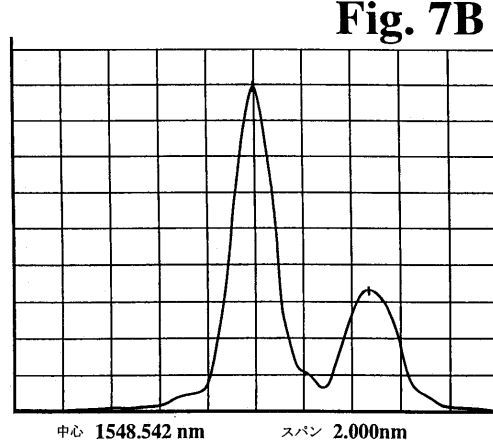
従って、圧力、温度及び横歪み勾配を測定し且つそのための全ての目的及び利点を満足するために使用することの可能な新規な横歪みセンサーについて示し且つ説明した。本発明の多くの変更、修正、変形例、使用及び適用例は、本明細書及び添付の図面を考慮した後に当業者にとって自明なものとなる。このような変更、修正、変形例及びその他の使用及び適用例の全ては本発明の精神及び範囲から逸脱するものではなく以下の請求の範囲によってのみ制限される本発明によってカバーされるものである。



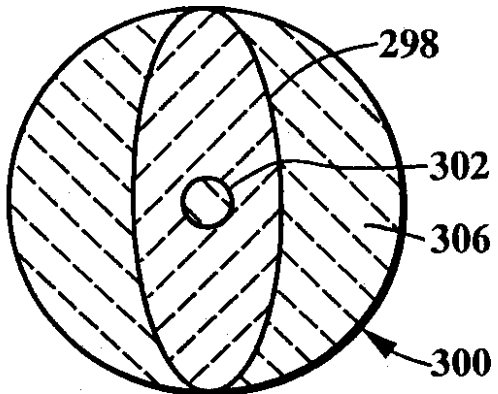
【図 7 A】

**Fig. 7A**

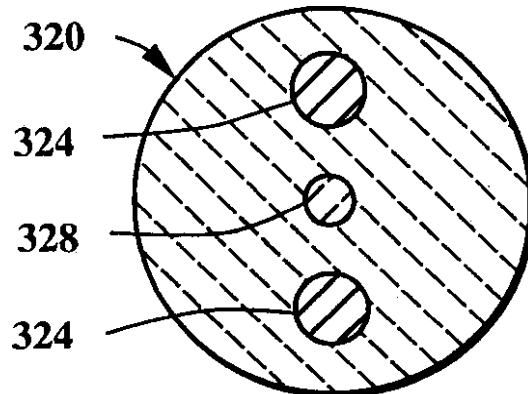
【図 7 B】

**Fig. 7B**

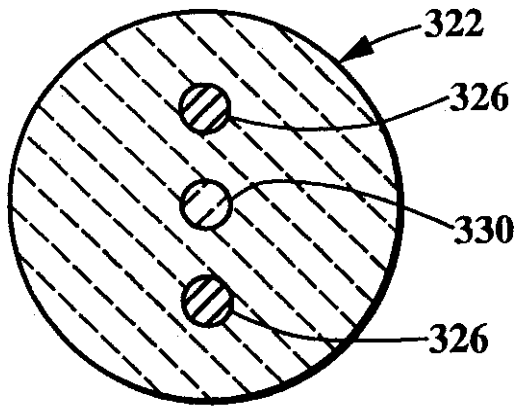
【図 8 A】

**Fig. 8A**

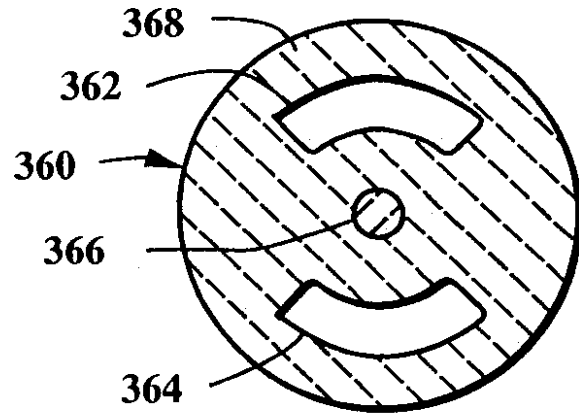
【図 8 B】

**Fig. 8B**

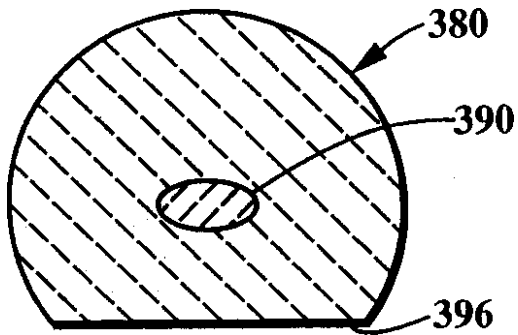
【図 8 C】

**Fig. 8C**

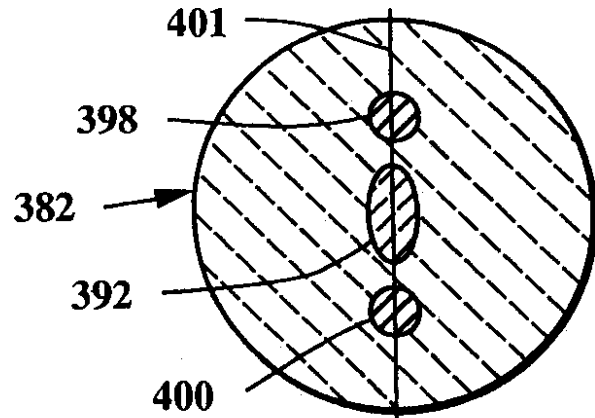
【図 8 D】

**Fig. 8D**

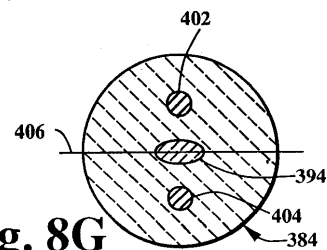
【図 8 E】

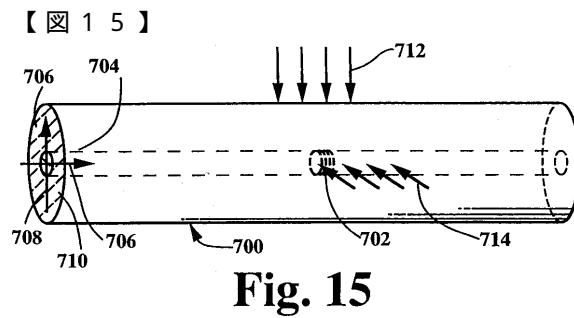
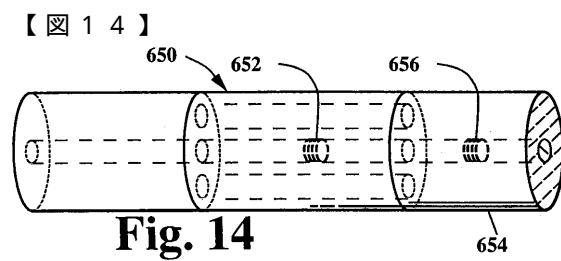
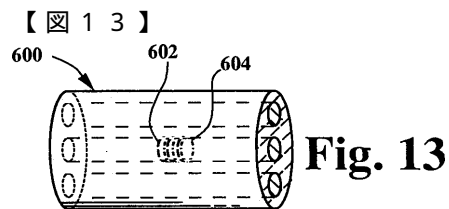
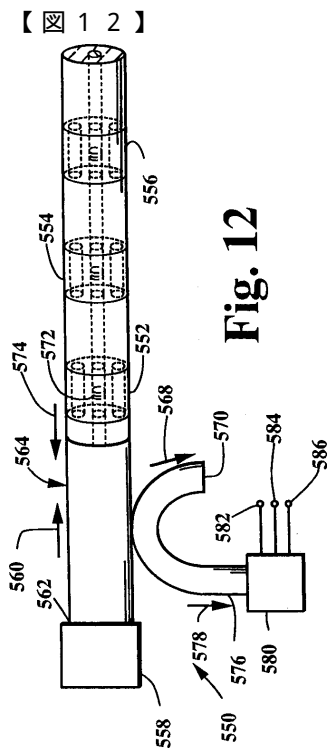
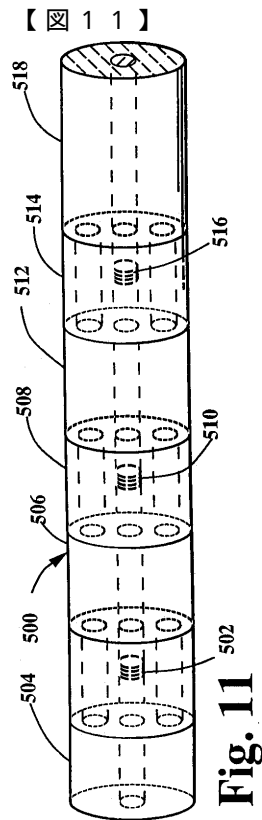
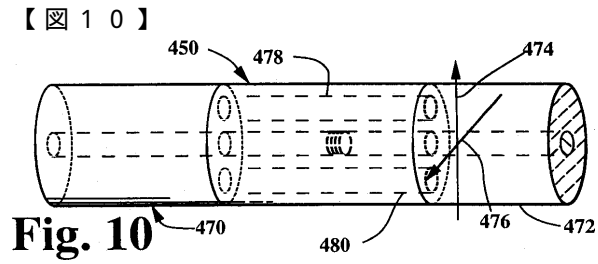
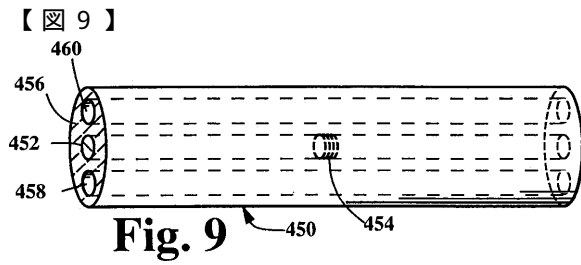
**Fig. 8E**

【図 8 F】

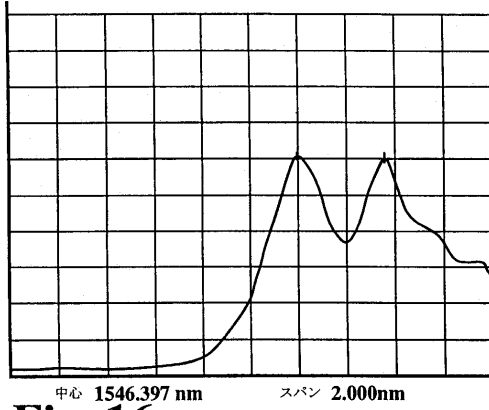
**Fig. 8F**

【図 8 G】

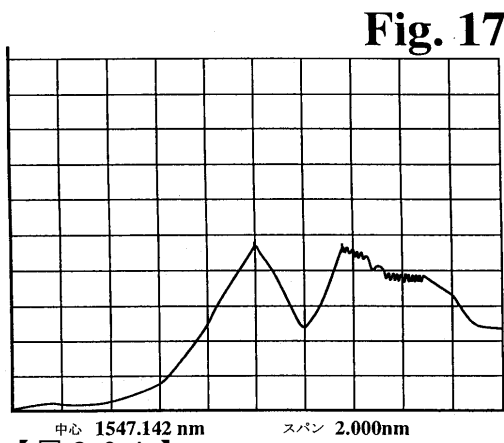
**Fig. 8G**



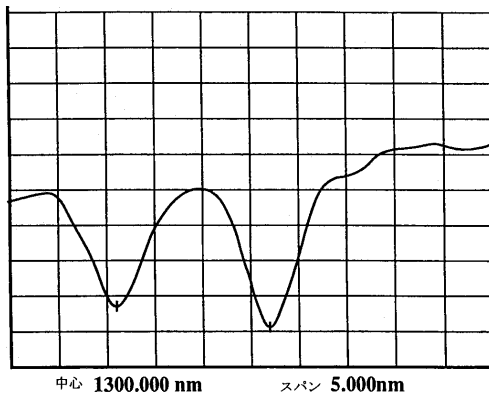
【図 16】

**Fig. 16**

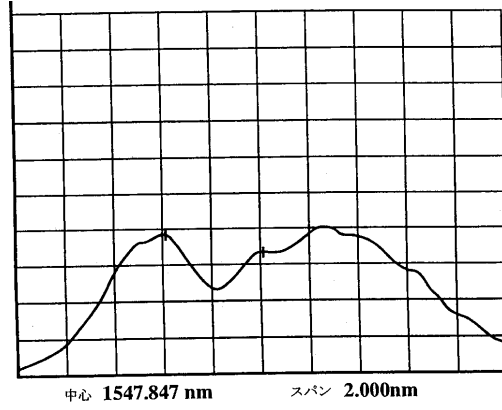
【図 17】

**Fig. 17**

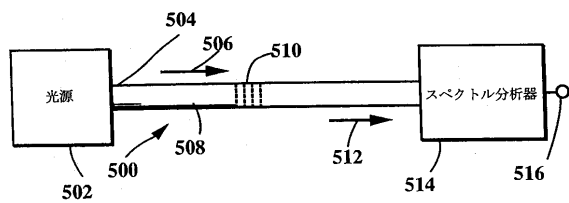
【図 20 A】

**Fig. 20A**

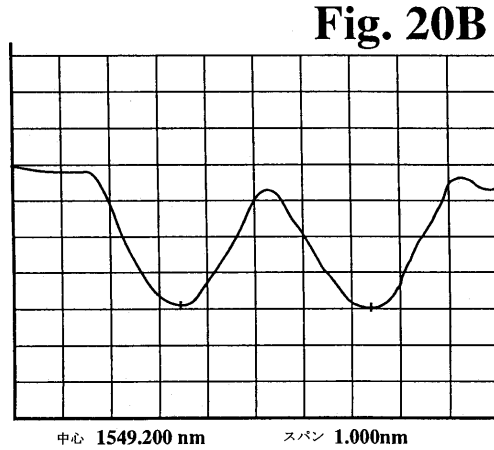
【図 18】

**Fig. 18**

【図 19】

**Fig. 19**

【図 20 B】

**Fig. 20B**

フロントページの続き

- (56)参考文献 米国特許第05319435(US,A)
米国特許第05380995(US,A)
米国特許第05591965(US,A)
米国特許第05426297(US,A)
米国特許第05399854(US,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01L 1/24