

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4463818号
(P4463818)

(45) 発行日 平成22年5月19日 (2010.5.19)

(24) 登録日 平成22年2月26日 (2010.2.26)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 B 11/16 (2006.01)	GO 1 B 11/16 Z
GO 1 D 5/353 (2006.01)	GO 1 D 5/26 D
GO 1 K 11/12 (2006.01)	GO 1 K 11/12 F

請求項の数 12 (全 44 頁)

(21) 出願番号	特願2006-527618 (P2006-527618)	(73) 特許権者	303021609
(86) (22) 出願日	平成16年6月25日 (2004.6.25)		ニューブレクス株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2004/009352		兵庫県神戸市中央区栄町通1丁目1番24
(87) 国際公開番号	W02006/001071		号 403A号室
(87) 国際公開日	平成18年1月5日 (2006.1.5)	(74) 代理人	100067828
審査請求日	平成19年5月11日 (2007.5.11)		弁理士 小谷 悦司
		(74) 代理人	100096150
			弁理士 伊藤 孝夫
		(74) 代理人	100099955
			弁理士 樋口 次郎
		(74) 代理人	100111453
			弁理士 櫻井 智

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 分布型光ファイバセンサ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ブリルアン散乱現象を利用して歪み及び／又は温度を測定する分布型光ファイバセンサにおいて、

内側に向かうほど光強度が大きくなるように光強度が階段状になった光パルスを生成する階段状光パルス光源と、

連続光を生成する連続光光源と、

前記光パルスがプローブ光として入射されると共に前記連続光がポンプ光として入射され、前記プローブ光と前記ポンプ光との間でブリルアン散乱現象が生じる検出用光ファイバと、

前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定するブリルアン時間領域検出計とを備えることを特徴とする分布型光ファイバセンサ。

【請求項2】

ブリルアン散乱現象を利用して歪み及び／又は温度を測定する分布型光ファイバセンサにおいて、

予め設定された時間幅及び光強度の光パルス前方光と予め設定された時間幅及び前記光パルス前方光の光強度よりも大きな光強度の光パルスとを生成する階段状光パルス光源と

連続光を生成する連続光光源と、
前記光パルス前方光及び前記光パルスがプローブ光として入射されると共に前記連続光がポンプ光として入射され、前記プローブ光と前記ポンプ光との間でブリルアン散乱現象が生じる検出用光ファイバと、
前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定するブリルアン時間領域検出計とを備えることを特徴とする分布型光ファイバセンサ。

10

【請求項 3】

前記プローブ光は、前記検出用光ファイバの一方端から入射し、
前記ポンプ光は、前記検出用光ファイバの他方端から入射し、
前記ブリルアン時間領域検出計は、前記検出用光ファイバの一方端から射出したブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定すること
を特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の分布型光ファイバセンサ。

20

【請求項 4】

前記プローブ光は、前記検出用光ファイバの一方端から入射し、
前記ポンプ光は、前記検出用光ファイバの一方端から入射し、
前記検出用光ファイバは、伝播する前記ポンプ光をその他方端で反射し、
前記ブリルアン時間領域検出計は、前記検出用光ファイバの一方端から射出したブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定すること
を特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の分布型光ファイバセンサ。

30

【請求項 5】

前記検出用光ファイバから射出したブリルアン散乱現象に係る光に基づく前記検出用光ファイバの長尺方向の 1 m 以下の各領域部分におけるブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルが実質的にローレンツ曲線であること
を特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 の何れか 1 つに記載の分布型光ファイバセンサ。

【請求項 6】

入射光の光強度を調整すると共に入射光の偏光面をランダムに変更して射出する光強度・偏光調整部と、
入射光の光強度を調整する光強度調整部とをさらに備え、
前記プローブ光は、前記光強度・偏光調整部を介して前記検出用光ファイバに入射し、
前記ポンプ光は、前記光強度調整部を介して前記検出用光ファイバに入射すること
を特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 の何れか 1 つに記載の分布型光ファイバセンサ。

40

【請求項 7】

前記階段状光パルス光源及び前記連続光光源は、
線幅の狭い所定の周波数であって略一定の光強度である光を連続的に発光する発光素子と、
前記発光素子の温度を実質的に一定に保持する温度制御部と、
前記発光素子が発光する前記光の周波数を実質的に一定に保持する周波数制御部とを備えること
を特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 の何れか 1 つに記載の分布型光ファイバセンサ。

【請求項 8】

50

前記階段状光パルス光源は、
線幅の狭い所定の周波数であって略一定の第1光強度である光を連続的に発光する発光素子と、

入射光の光強度を変調する第1及び第2光強度変調器と、

前記第1光強度よりも小さい第2光強度の連続的な光の中に前記第1光強度の光パルスが在るように、前記発光素子から連続的に入射された光の光強度を変調するように第1光強度変調器を駆動する第1光強度変調器駆動部と、

前記光パルスの前後にそれぞれ所定の幅だけ前記第2光強度の連続的な光を残して残余が除去されるように、前記第1光強度変調器から入射された光の光強度を変調するように第2光強度変調器を駆動する第2光強度変調器駆動部とを備えること

を特徴とする請求項1、請求項3及び請求項4の何れか1つに記載の分布型光ファイバセンサ。

【請求項9】

前記階段状光パルス光源は、内側に向かうほど光強度が大きくなるように光強度が階段状になった第1光パルスを生成すると共に、前記第1光パルスの時間幅と等しい時間幅であって、前記第1光パルスの最も低い光強度と等しい光強度である第2光パルスを生成するものであり、

前記ブリルアン時間領域検出計は、前記階段状光パルス光源に前記第2光パルスを生成させてプローブ光として前記検出用光ファイバに入射させると共に、前記連続光光源に前記連続光を生成させてポンプ光として前記検出用光ファイバに入射させ、前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光の第1光強度を記憶し、前記階段状光パルス光源に前記第1光パルスを生成させてプローブ光として前記検出用光ファイバに入射させると共に、前記連続光光源に前記連続光を生成させてポンプ光として前記検出用光ファイバに入射させ、前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光の第2光強度を記憶し、前記記憶した第1光強度及び第2光強度に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定すること

を特徴とする請求項1、請求項3及び請求項4の何れか1つに記載の分布型光ファイバセンサ。

【請求項10】

前記検出用光ファイバと同質であって空間分解能に相当する長さであり、かつ、前記光パルスの時間幅の逆数によって表される歪みよりも大きな歪みを持つ基準光ファイバをさらに備え、

前記ブリルアン時間領域検出計は、前記階段状光パルス光源に前記光パルスを生成させてプローブ光として前記基準光ファイバに入射させると共に、前記連続光光源に前記連続光を生成させてポンプ光として前記基準光ファイバに入射させ、前記基準光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルの中心周波数を求めて基準値として記憶し、前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルの中心周波数を検出値として求め、予め記憶された補正值変換式に基づいて前記基準値と前記検出値と前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルとから補正值を求め、求めた前記補正值に基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定すること

を特徴とする請求項1、請求項3及び請求項4の何れか1つに記載の分布型光ファイバセンサ。

【請求項11】

前記検出用光ファイバは、周期的にブリルアン周波数シフト量に変化する光ファイバであること

を特徴とする請求項1乃至請求項4の何れか1つに記載の分布型光ファイバセンサ。

【請求項 12】

前記検出用光ファイバは、歪み及び／又は温度を測定すべき計測対象物に固定されること

を特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 の何れか 1 つに記載の分布型光ファイバセンサ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光ファイバをセンサとして用い、その長尺方向について歪み及び／又は温度を高精度かつ高空間分解能で測定し得る分布型光ファイバセンサに関する。

【背景技術】

10

【0002】

従来、歪みや温度を測定する技術として、光ファイバ中で起こるブリルアン散乱現象に基づく方法がある。この方法において光ファイバは、当該光ファイバの置かれる環境における歪み及び／又は温度を検出する媒体として利用される。

【0003】

ブリルアン散乱現象とは、光ファイバ中で周波数の異なる 2 個の光がすれ違うとき、高い周波数の光から低い周波数の光へ、光ファイバ中の音響フォノンを介してパワーが移動する現象である。すれ違う 2 光波間の周波数差を νd とするとき、移動するパワーは、近似的に式 1 で定義されるブリルアン・ゲイン・スペクトル $B S g(\nu d)$ に比例する。

$$B S g(\nu d) = 1 / (1 + (2(\nu d - \nu b) / \Delta \nu b)^2) \quad \dots \text{式 1} \quad 20$$

ここで、 νb は、ブリルアン周波数シフトであり、 $\Delta \nu b$ は、ブリルアンゲイン線幅（半値全幅）と呼ばれ、これらはブリルアン・ゲイン・スペクトル $B S g(\nu d)$ を特徴づけるパラメータである。

【0004】

ブリルアン周波数シフト νb は、式 2 で与えられる。

$$\nu b = 2 n v a / \lambda \quad \dots \text{式 2}$$

ここで、 n は、光ファイバの屈折率であり、 $v a$ は、光ファイバ中の音速であり、 λ は、光ファイバに入射する光の波長である。

【0005】

音速 $v a$ が光ファイバの歪み及び温度に依存するので、ブリルアン周波数シフト νb を測定することによって歪み及び／又は温度が測定され得る。 30

【0006】

従って、光ファイバの長尺方向における光ファイバの歪み分布及び／又は温度分布を測定するためには、光ファイバの各部分におけるブリルアン・ゲイン・スペクトルをそれぞれ測定すればよい。そして、高空間分解能を達成するためには、この部分の長さを短くする必要がある。

【0007】

図 24 は、背景技術に係る分布型光ファイバセンサの構成及びプローブ光を示す図である。図 24 (A) は、背景技術に係る分布型光ファイバセンサの構成を示すブロック図であり、図 24 (B) は、第 1 のプローブ光を示す図であり、そして、図 24 (C) は、第 2 のプローブ光を示す図である。図 25 は、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルを示す図である。図 25 の横軸は、周波数であり、その縦軸は、ロス／ゲインである。 40

【0008】

図 24 において、背景技術に係る分布型光ファイバセンサ 500 は、プローブ光光源 501 と、光カプラ 502 と、検出用光ファイバ 503 と、ポンプ光光源 504 と、検出器 505 とを備えて構成される。

【0009】

プローブ光光源 501 は、図 24 (B) に示すパルス状の光パルスを生成し、この生成した光パルスをプローブ光として射出する。プローブ光光源 501 から射出されたプローブ光は、光カプラ 502 を介して検出用光ファイバ 503 の一方端に入射される。検出用 50

光ファイバ503は、置かれた環境における歪み及び／又は温度を検出するための光ファイバであり、センサとして用いられている。ポンプ光光源504は、プローブ光の周波数よりも低い周波数の連続した光を生成し、この生成した連続光（CW光）をポンプ光として射出する。ポンプ光光源504から射出されたポンプ光は、検出用光ファイバ503の他方端に入射される。検出用光ファイバ503では、プローブ光とポンプ光とがブリルアン散乱現象を起し、このブリルアン散乱現象に係る光は、光カプラ502を介して検出器505に入射される。検出器505は、ブリルアン散乱現象に係る光の光強度を時間領域で測定する。分布型光ファイバセンサ500は、ポンプ光又はプローブ光の周波数を順次に変化させながら周波数ごとにブリルアン散乱現象に係る光の光強度を時間領域で測定し、検出用光ファイバ503の長尺方向に沿った各部分のブリルアン・ゲイン・スペクトルBSg(vd)をそれぞれ求め、検出用光ファイバ503に沿った歪み分布及び／又は温度分布を求める。

10

【0010】

なお、上述では、ブリルアン・ゲイン・スペクトルBSg(vd)から歪み及び／又は温度を求める方法を示したが、ポンプ光の周波数をプローブ光の周波数よりも高くすることにより、ブリルアン・ゲイン・スペクトルBSg(vd)の代わりにブリルアン・ロス・スペクトルBSl(vd)を用いても同様に歪み及び／又は温度を求めることができる。

【0011】

この分布型光ファイバセンサ500の空間分解能は、測定に用いられる光パルスの幅で制限される。即ち、光ファイバ中の光の速度を v_g [m/s]とした場合に、光パルス幅が T_p [s]の光パルスを用いた測定では、空間分解能 Δz は、 $v_g T_p / 2$ [m]となる。具体的には、光ファイバの材質によって光ファイバ中の光の速度が若干異なるが通常使用される一般的な光ファイバでは、ブリルアン・ゲイン・スペクトルBSg(vd)又はブリルアン・ロス・スペクトルBSl(vd)（以下、「ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルBSl/g(vd)」と略記する。）は、光パルスの光パルス幅が30nsまではローレンツ曲線（Lorentzian curve）（図25に示す曲線a）であり、それよりも光パルス幅を短くすると広帯域な曲線（図25に示す曲線b）となって中心周波数近傍で急峻さを失ったなだらかな形状となる。このため、空間分解能 Δz は、約2～3mとなる。空間分解能を向上させるためには短い光パルス幅の光パルスを必要とするが、この場合光パルスの持つスペクトル幅が広がるため、結果的に歪みの測定精度が悪くなってしまう。そのため、高精度（例えば200μm以下）で高空間分解（例えば1m以下）に歪み及び／又は温度の分布を測定することは、困難とされ、高精度で高空間分解に歪み及び／又は温度の分布を測定することが要望されていた。なお、100μm = 0.01%である。

20

30

【0012】

そのため、例えば、下記文献1乃至文献3に開示されているように、プローブ光光源501が図24（C）に示すように、微弱な光強度 Cs^2 の連続光（漏れ光）を検出用光ファイバ503に入射しながら所定の光強度 As^2 の光パルスを入射することによって、図25において曲線aで示すように、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルBSl/g(vd)が中心周波数を明らかに認識することができる略中心周波数で急峻なピークを持つ略ローレンツ曲線となるので、高精度で高空間分解に歪み及び／又は温度を測定することができることが知られている。

40

【0013】

ここで、ローレンツ曲線は、ローレンツ関数 $g(x)$ の式3で一般に表される。

$$g(x) = 1 / \pi a / (a^2 + (x - a)^2) \quad \dots \text{式3}$$

【0014】

文献1

X.Bao and A.Brown,M. DeMerchant,J.Smith, " Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short(<10-ns)pulses ",OPTICS LETTERS,Vol.24,No.8,April 15,1999

文献2

50

V.Lecoeuche,D.J.Webb,C.N.Pannell,and D.A.Jackson, "Transient response in high-resolution Brillouin-based distributed sensing using probe pulses shorter than the acoustic relaxation time",OPTICS LETTERS,Vol.25,No.3,February 1,2000

文献 3

Shahraam Afshar V.,Graham A.Ferrier,Xiaoyi Bao,and Liang Chen, "Effect of the finite extinction ratio of an electro-optic modulator on the performance of distributed probe-pump Brillouin sensor systems",OPTICS LETTERS,Vol.28,No.16,August 15,2003

【0015】

ところで、漏れ光の光強度 Cs^2 の設定は、検出用光ファイバの長さに依存するため、測定のたびに検出用光ファイバのファイバ長に合わせてマニュアルで微妙な調整を行う必要があった。このため、分布型光ファイバセンサを工業製品とした場合に、ユーザがこの難しいマニュアル調整を行う必要があり、このことが分布型光ファイバセンサを工業製品化する妨げとなっていた。

【0016】

そして、文献 2 では、その筆者らは、シミュレーションを行うことにより文献 1 の現象を確認しているが理論解析的には明らかにしていない。文献 2 では、微弱な光強度の連続光（漏れ光）を検出用光ファイバに入射しながら所定の光強度の光パルスを入射することによって高精度で高空間分解に歪み及び／又は温度を測定することができるその要因が明らかではなかった。そのため、高精度で高空間分解に歪み及び／又は温度を測定するために、微弱な光強度の連続光と所定の光強度の光パルスとにおける物理的な諸量をどのように調整すれば良いかが明らかではなかった。

【0017】

さらに、背景技術に係る分布型光ファイバセンサでは、歪みが広範囲（例えば、設定した空間分解能の 25 倍以上）に均等に分布している場合において、その中の $200\mu\epsilon$ 以下の微小な歪みを検出することが困難であった。

【0018】

本発明は、このような事情に鑑みて為されたものであり、かかる現象を理論解析的に明らかにし、この理論解析結果に基づいて、検出用光ファイバのファイバ長に合わせて漏れ光の光強度のマニュアル調整が不要な分布型光ファイバセンサを提供することを目的とする。そして、歪みが広範囲に均等に分布している場合において、その中の $200\mu\epsilon$ 以下の微小な歪みを検出可能な分布型光ファイバセンサを提供することを目的とする。

【発明の開示】

【0019】

上述の目的を達成するために、本発明に係る一態様の、ブリルアン散乱現象を利用して歪み及び／又は温度を測定する分布型光ファイバセンサは、内側に向かうほど光強度が大きくなるように光強度が階段状になった光パルスを生成する階段状光パルス光源と、連続光を生成する連続光光源と、階段状の前記光パルスがプローブ光として入射されると共に前記連続光がポンプ光として入射され、前記プローブ光と前記ポンプ光との間でブリルアン散乱現象が生じる検出用光ファイバと、前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定するブリルアン時間領域検出計とを備えることを特徴とする。

【0020】

また、本発明に係る他の一態様の、ブリルアン散乱現象を利用して歪み及び／又は温度を測定する分布型光ファイバセンサは、予め設定された時間幅及び光強度の光パルス前方光と予め設定された時間幅及び前記光パルス前方光の光強度よりも大きな光強度の光パルスとを生成する階段状光パルス光源と、連続光を生成する連続光光源と、前記光パルス前方光及び前記光パルスがプローブ光として入射されると共に前記連続光がポンプ光として

入射され、前記プローブ光と前記ポンプ光との間でブリルアン散乱現象が生じる検出用光ファイバと、前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定するブリルアン時間領域検出計とを備えることを特徴とする。

【0021】

そして、それら上述の一態様に係る分布型光ファイバセンサにおいて、前記プローブ光は、前記検出用光ファイバの一方端から入射し、前記ポンプ光は、前記検出用光ファイバの他方端から入射し、前記ブリルアン時間領域検出計は、前記検出用光ファイバの一方端から射出したブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定することを特徴とする。

10

【0022】

また、それら上述の一態様に係る分布型光ファイバセンサにおいて、前記プローブ光は、前記検出用光ファイバの一方端から入射し、前記ポンプ光は、前記検出用光ファイバの一方端から入射し、前記検出用光ファイバは、伝播する前記ポンプ光をその他方端で反射し、前記ブリルアン時間領域検出計は、前記検出用光ファイバの一方端から射出したブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定することを特徴とする。

20

【0023】

さらに、それら上述の分布型光ファイバセンサにおいて、前記検出用光ファイバから射出したブリルアン散乱現象を受けたポンプ光に基づく前記検出用光ファイバの長尺方向の1m以下の各領域部分におけるブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルが実質的にローレンツ曲線であることを特徴とする。

【0024】

そして、それら上述の分布型光ファイバセンサにおいて、入射光の光強度を調整すると共に入射光の偏光面をランダムに変更して射出する光強度・偏光調整部と、入射光の光強度を調整する光強度調整部とをさらに備え、前記プローブ光は、前記光強度・偏光調整部を介して前記検出用光ファイバに入射し、前記ポンプ光は、前記光強度調整部を介して前記検出用光ファイバに入射することを特徴とする。

30

【0025】

また、それら上述の分布型光ファイバセンサにおいて、前記階段状光パルス光源及び前記連続光光源は、線幅の狭い所定の周波数であって略一定の光強度である光を連続的に発光する発光素子と、前記発光素子の温度を実質的に一定に保持する温度制御部と、前記発光素子が発光する前記光の周波数を実質的に一定に保持する周波数制御部とを備えることを特徴とする。

40

【0026】

また、それら上述の分布型光ファイバセンサにおいて、前記階段状光パルス光源は、線幅の狭い所定の周波数であって略一定の第1光強度である光を連続的に発光する発光素子と、入射光の光強度を変調する第1及び第2光強度変調器と、前記第1光強度よりも小さい第2光強度の連続的な光の中に前記第1光強度の光パルスが在るように、前記発光素子から連続的に入射された光の光強度を変調するように第1光強度変調器を駆動する第1光強度変調器駆動部と、前記光パルスの前後にそれぞれ所定の幅だけ前記第2光強度の連続的な光を残して残余が除去されるように、前記第1光強度変調器から入射された光の光強度を変調するように第2光強度変調器を駆動する第2光強度変調器駆動部とを備えることを特徴とする。

50

【0027】

さらに、それら上述の分布型光ファイバセンサにおいて、前記階段状光パルス光源は、内側に向かうほど光強度が大きくなるように光強度が階段状になった第1光パルスを生成すると共に、前記第1光パルスの時間幅と等しい時間幅であって、前記第1光パルスの最も低い光強度と等しい光強度である第2光パルスを生成するものであり、前記ブリルアン時間領域検出計は、前記階段状光パルス光源に前記第2光パルスを生成させてプローブ光として前記検出用光ファイバに入射させると共に、前記連続光光源に前記連続光を生成させてポンプ光として前記検出用光ファイバに入射させ、前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光の第1光強度を記憶し、前記階段状光パルス光源に前記第1光パルスを生成させてプローブ光として前記検出用光ファイバに入射させると共に、前記連続光光源に前記連続光を生成させてポンプ光として前記検出用光ファイバに入射させ、前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光の第2光強度を記憶し、前記記憶した第1光強度及び第2光強度に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルを求め、求めた前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルに基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定することを特徴とする。

10

【0028】

そして、それら上述の分布型光ファイバセンサにおいて、前記検出用光ファイバと同質であって空間分解能に相当する長さであり、かつ、前記光パルスの時間幅の逆数によって表される歪みよりも大きな歪みを持つ基準光ファイバをさらに備え、前記ブリルアン時間領域検出計は、前記階段状光パルス光源に前記光パルスを生成させてプローブ光として前記基準光ファイバに入射させると共に、前記連続光光源に前記連続光を生成させてポンプ光として前記基準光ファイバに入射させ、前記基準光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルの中心周波数を求めて基準値として記憶し、前記検出用光ファイバから射出されるブリルアン散乱現象に係る光に基づいてブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルの中心周波数を検出値として求め、予め記憶された補正值変換式に基づいて前記基準値と前記検出値と前記ブリルアン・ロス・スペクトル又はブリルアン・ゲイン・スペクトルとから補正值を求め、求めた前記補正值に基づいて前記検出用光ファイバに生じた歪み及び／又は温度を測定することを特徴とする。

20

30

【0029】

また、歪みが広範囲に均等に分布している場合において、その中の $200\mu\epsilon$ 以下の微小な歪みを検出可能とする観点から、それら上述の分布型光ファイバセンサにおいて、前記検出用光ファイバは、周期的にブリルアン周波数シフト量に変化する光ファイバであることを特徴とする。

【0030】

さらに、それら上述の分布型光ファイバセンサにおいて、前記検出用光ファイバは、歪み及び／又は温度を測定すべき計測対象物に固定されることを特徴とする。

【0031】

このような構成の分布型光ファイバセンサでは、光強度が階段状になった光パルス（以下、「光強度階段状光パルス」と呼称することとする。）をプローブ光に用いる。このため、最も光強度の強い部分の前方の限られた部分のみに、あるいは、最も光強度の強い部分の前方の限られた部分及び後方の限られた部分のみに背景技術の漏れ光に相当する光強度の弱い部分が存在することになり、背景技術のように連続した漏れ光ではなくなる。その結果、光強度階段状光パルスの波形を予め設定することができるから、背景技術のように測定のたびに検出用光ファイバのファイバ長に合わせてプローブ光（光パルス）の漏れ光の光強度 Cs^2 をマニュアルで調整する必要がない。よって、本発明に係る分布型光ファイバセンサを工業製品化することも可能である。

40

【0032】

そして、以下、光強度階段状光パルスをプローブ光として用いた場合におけるブリルア

50

ン散乱現象の理論解析について図 1 乃至図 3 を用いて説明し、そして、光強度階段状光パルスの波形について図 4 及び図 5 を用いて説明する。

【0033】

図 1 は、本発明に係るブリルアン散乱現象の理論解析を説明するための図である。図 1 (A) は、本発明に係るブリルアン散乱現象の理論解析における測定系を示し、図 1 (B) は、ポンプ光を示し、そして、図 1 (C) は、プローブ光を示す。図 2 は、論理解析に基づくシミュレーションの一例を示す図 (その 1) である。図 3 は、論理解析に基づくシミュレーションの一例を示す図 (その 2) である。図 4 は、光強度階段状光パルスの波形を示す図である。図 5 は、論理解析に基づく比 P_{rx} に対する $H2 / (H1 + H3 + H4)$ のシミュレーションを示す図である。

10

【0034】

まず、理論解析について説明する。図 1 において、本理論解析は、光強度 AL^2 である連続光 (CW) のポンプ光が検出用光ファイバ SOF の一方端から入射され、時間幅 Tf で光強度 Cs^2 である光パルス前方光 OPf とパルス幅 D で光強度 $(As + Cs)^2$ である光パルス OP とからなる光強度階段状光パルス OPs がプローブ光として検出用光ファイバ SOF の他方端から入射される場合におけるブリルアン・ロス・スペクトルを導出するものである。光強度 As^2 は、光パルス前方光 OPf の光強度 Cs^2 を基準とした光強度である。

【0035】

ここで、本明細書では、この光強度階段状光パルス OPs の光パルス OP における前方に所定の時間幅 Tf で残された連続的な漏れ光を光パルス前方光 OPf と呼称し、光強度階段状光パルス OPs の光パルス OP における後方に所定の時間幅 Tb で残された連続的な漏れ光を光パルス後方光 OPb と呼称することとする。

20

【0036】

本理論解析において、検出用光ファイバ SOF の長さを L とし、検出用光ファイバ SOF の長尺方向における位置座標を z ($0 \leq z \leq L$ 、原点は、検出用光ファイバ SOF の一方端とする) とし、そして、時間座標を t とすると、検出用光ファイバに歪みがある場合のブリルアン散乱の方程式は、式 4 乃至式 6 によって表される。

【0037】

【数 1】

30

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \right) E_L = i\beta E_A E_S \quad \cdots (\text{式} 4)$$

【0038】

【数 2】

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \right) E_S = i\beta E_A^* E_L \quad \cdots (\text{式} 5)$$

40

【0039】

【数 3】

$$\left(\frac{1}{\Gamma} \frac{\partial}{\partial t} + 1 + i \frac{\Omega_B(z) - \Omega}{\Gamma} \right) E_A = iE_L E_S^* \quad \cdots (\text{式} 6)$$

ここで、 v_g は検出用光ファイバ SOF 中における光の群速度 ($v_g = c / n$ 、 c は光速で

50

あり、 n は検出用光ファイバSOFの屈折率である）であり、 E_L はポンプ光の電界強度であり、 E_S はストークス光の電界強度であり、 E_A は $\Gamma \times \rho / \Lambda$ である。 $*$ は共役であることを示す。 Γ は $\Gamma_B / 2$ であり、 ρ は検出用光ファイバの密度であり、 Λ は $(\gamma \times q \times q) / (16 \times \pi \times \Omega)$ である。 Γ_B は、音響フォノンの寿命を τ_B とすると $\Gamma_B = 1 / \tau_B$ であり、 γ は電歪結合定数（Electrostrictive Coupling Constant）と呼ばれ誘電率を ε とすると $\gamma = \rho (\delta \varepsilon / \delta \rho)$ であり、 q はポンプ光の波数を k_L としストークス光の波数を k_S とすると $q = k_L + k_S$ であり、 Ω は歪みが発生しない場合のブリルアン角周波数シフトであり、ポンプ光の角周波数を ω_L としストークス光の角周波数を ω_S とすると $\Omega = \omega_L - \omega_S$ であり、 Ω_B は或る歪みが生じている場合のブリルアン角周波数シフトであり、ポンプ光の角周波数を ω_{BL} としストークス光の角周波数を ω_{BS} とすると $\Omega_B = \omega_{BL} - \omega_{BS}$ である。 i は複素単位であり、 $i \times i = -1$ である。 β は $\kappa \times \Lambda / \Gamma$ であり、 κ は $(\gamma \times \omega_L) / (4 \times \rho_0 \times n \times c)$ $(\gamma \times \omega_S) / (4 \times \rho_0 \times n \times c)$ である。 ρ_0 は、検出用光ファイバの密度の平均値である。また、 β は、誘導ブリルアン散乱（SBS）の利得係数を g_{SBS} とすると、 $g_{SBS} = 16 \times \pi \times \beta / (n \times c)$ であり、 $g_{SBS} = 2.5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$ であることが例えば、文献4に示されている。

10

【0040】

文献4

A.L.Gaeta and R.W.Boyd, "Stochastic dynamics of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber", Physical Review A, Vol.44, no.5, 1991, pp3205-3209

【0041】

20

式4は、ポンプ光に関する式であり、式5は、プローブ光に関する式であり、式6は、音響フォノンの寿命に関する式である。これら式4乃至式6を解いて、近似解として、ブリルアン・ロス $V(t, \Omega)$ を求めると、式7乃至式11となる。

【0042】

【数4】

$$V(t, \Omega) = \frac{1}{2} \beta A_L^2 (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) + \text{c.c} \quad \dots (\text{式7})$$

30

【0043】

【数5】

$$H_1 = A_S^2 \int_{v_g(t-T_f-D)/2}^{v_g(t-T_f)/2} \int_0^{t-T_f-2\zeta/v_g} h^c(\zeta, s) ds d\zeta \quad \dots (\text{式8})$$

【0044】

【数6】

40

$$H_2 = A_S C_S \int_{v_g(t-T_f-D)/2}^{v_g(t-T_f)/2} \int_0^{t-2\zeta/v_g} h^c(\zeta, s) ds d\zeta \quad \dots (\text{式9})$$

【0045】

【数 7】

$$H_3 = A_S C_S \int_{v_g(t-T_f-D)/2}^{v_g(t-T_f)/2} \int_0^{t-T_f-2\zeta/v_g} h^c(\zeta, s) ds d\zeta \quad \cdots(\text{式}10)$$

【0046】

【数 8】

$$H_4 = C_S^2 \int_{v_g(t-T_f-D)/2}^{v_g t/2} \int_0^{t-2\zeta/v_g} h^c(\zeta, s) ds d\zeta \quad \cdots(\text{式}11)$$

10

ここで、 ζ は検出用光ファイバの長尺方向における位置であり、 s は時間である。 c は、定数であり、 $h(z, s)$ は、検出用光ファイバの全長を LL とすると、位置 z で時間 s における $\Gamma \times e^{-(\Gamma + i(\Omega_B(z) - \Omega))}$ であり、 $h^c(\zeta, s) = h(z, s) = h((LL - \zeta), s)$ である。

【0047】

この式8によって示される $H1$ は、光パルス OP とポンプ光とにより励起される音響フォノンに基づくブリルアン・ロス・スペクトルを示す。式9によって示される $H2$ は、光パルス前方光 OPf とポンプ光とにより励起されさらに光パルス OP とポンプ光とにより励起される音響フォノンに基づくブリルアン・ロス・スペクトルを示す。式10によって示される $H3$ は、光パルス OP とポンプ光とにより励起されさらに光パルス前方光 OPf とポンプ光とにより励起される音響フォノンに基づくブリルアン・ロス・スペクトルを示す。式11によって示される $H4$ は、光パルス前方光 OPf とポンプ光とにより励起される音響フォノンに基づくブリルアン・ロス・スペクトルを示す。

20

【0048】

一例として、光強度階段状光パルス OPs におけるその時間幅を 14 ns 、光パルス OP の時間幅 D を 1 ns 、 $10 \times \log((As + Cs)^2 / Cs^2)$ を 20 dB とし、検出用光ファイバ $SO F$ （全長 10 m の零歪みの束取りファイバ）における 3.05 m の所に $100\text{ }\mu\text{m}$ の歪みが生じ、 $3.05\text{ m} \pm 0.2\text{ m}$ の所では歪みが生じていない場合について、 $3.05\text{ m} - 0.2\text{ m}$ 、 3.05 m 、 $3.05\text{ m} + 0.2\text{ m}$ における $H1 + H3$ 、 $H2$ 及び $H4$ に対する各シミュレーションの結果を図2及び図3に示す。図2(A)は $H1 + H3$ の場合であり、図2(B)は $H2$ の場合であり、図3(A)は、 $H4$ の場合であり、図3(B)は、 $H (= H1 + H2 + H3 + H4)$ の場合である。各図の横軸は、周波数であり、実線は、 $100\text{ }\mu\text{m}$ の歪みがある場合であり、破線は、歪みがない場合である。そして、各図は、ブリルアン・ロス・スペクトルが中心周波数（ブリルアン・ロス・スペクトルのピークにおける周波数）を中心軸として左右対称であることから、右半分について示している。即ち、各図の縦軸が中心周波数であり、中心軸である。図2から $H2$ の成分のみが顕著にブリルアン周波数シフトを示していることが分かる。

30

40

【0049】

式7乃至式11から分かるように、 $H3$ 及び $H4$ は、プローブ光からポンプ光へのエネルギーの転移が広範囲に亘ることから、局所的な歪みの情報が得難い。一方、 $H1$ 及び $H2$ は、プローブ光からポンプ光へのエネルギーの転移が局所的に行われることから、局所的な歪みの情報が得易い。ところで、シミュレーションの結果によると、 $H3$ は、他の $H1$ 、 $H2$ 及び $H4$ に較べて1桁小さく、 $H1$ の半値全幅は、例えば図2(A)から分かるように約 1 GHz に及ぶため、 $H2$ に較べて $H1$ は、広帯域な曲線となって中心周波数を見つけ難い。

【0050】

従って、 $H2$ を検出することができるように設定することによって、短いパルス幅の光

50

パルスを用いて高精度で高空間分解能で歪み及び／又は温度を検出することができる。

【0051】

次に、このH2を検出することができる光強度階段状光パルスOPsの波形について説明する。

【0052】

本発明におけるプローブ光は、波形を予め設定して検出用光ファイバのファイバ長に応じた調整を不要とするために、例えば図4に示す光強度階段状光パルスOPsとする必要がある。

【0053】

ここで、本明細書では、この光強度階段状光パルスOPsの光パルスOPにおける前方に所定の時間幅Tfで残された連続的な漏れ光を光パルス前方光OPfと呼称し、光強度階段状光パルスOPsの光パルスOPにおける後方に所定の時間幅Tbで残された連続的な漏れ光を光パルス後方光OPbと呼称することとする。

【0054】

この光強度階段状光パルスOPsの波形を規定するためには、光パルス前方光OPfの時間幅Tf、光パルスOPのパルス幅（時間幅）Tp及び光パルス後方光OPbの時間幅Tb、並びに、光パルスOPの光強度P1及び光パルス前方光OPfの光強度P2（光パルス後方光OPbの光強度P2）を規定する必要がある。

【0055】

まず、光パルス前方光OPfの時間幅Tf、光パルスOPのパルス幅Tp及び光パルス後方光OPbの時間幅Tbについて説明する。

【0056】

この光パルス前方光OPfの時間幅Tfは、例えば現在一般に使用されている1300nm帯シングルモード光ファイバや1550nm帯シングルモード光ファイバを検出用光ファイバSOFに使用する場合に、音響フォノンの立上り時間に応じてその音響フォノンが90%に立ち上がった場合で、そのブリルアン散乱スペクトルの半値全幅が約35MHzであるから、 $T_p < T_f \leq (1 / 35 \text{ MHz}) = 28.57 \text{ ns}$ であればよい。

【0057】

また、光パルス前方光OPfの時間幅Tfを長くすると（ $T_f > 28.57 \text{ ns}$ ）、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルBSI/g(vd)の形状がよりローレンツ曲線に近くなるので、ブリルアン周波数シフトの値が精度よく得られ歪み及び／又は温度の精度が良くなる一方で、検出用光ファイバSOFの或る位置におけるブリルアン周波数シフトにこの或る位置の周辺におけるブリルアン周波数シフトの情報が混じってしまうのでこの或る位置におけるブリルアン周波数シフトのSNR（Signal to Noise Ratio）が悪くなってこの或る位置における歪み及び／又は温度の精度が悪くなる。このように光パルス前方光OPfの時間幅Tfを長くすることは、歪み及び／又は温度の精度の点で良くなる方向と悪くなる方向とに作用する。

【0058】

光パルスOPのパルス幅Tpは、1m以下の高空間分解能を得るために $10 \text{ ns} \geq T_p > 0$ であればよい。光パルス後方光OPbの時間幅Tbは、 $T_b < T_f$ であって短い程よく、0でもよい。

【0059】

そして、本発明では、光強度階段状光パルスOPsが検出用光ファイバSOF内で図4（C）ではなく図4の波形で存在する必要がある。このため、上述の範囲で、まず光パルス前方光OPfの時間幅Tf、光パルスOPの時間幅Tp及び光パルス後方光OPbの時間幅Tbが決定され、この決定された各時間幅を持つ光強度階段状光パルスOPsが検出用光ファイバSOF内で図4の波形で存在する検出用光ファイバSOFの最小の長さが規定される。従って、この規定された最小の長さ以上の光ファイバを検出用光ファイバSOFに使用することにより、背景技術のように測定のために検出用光ファイバSOFのファイバ長に応じてプローブ光をマニュアルで調整する必要がなくなる。

10

20

30

40

50

【0060】

次に、光パルスOPの光強度P1及び光パルス前方光OPfの光強度P2（光パルス後方光OPbの光強度P2）について説明する。

【0061】

ここで、光パルス前方光OPfの光強度P2（光パルス後方光OPbの光強度P2）に対する光パルスOPの光強度P1の比Prxを式12によって定義する。

$$\begin{aligned} \text{Prx} &= 10 \times \log (P1/P2) \\ &= 10 \times \log ((As + Cs)^2 / Cs^2) \end{aligned} \quad \dots \text{式12}$$

【0062】

そして、上述のH2を容易に検出する条件を調べるため、式12によって定義される比Prxに対するH2/(H1+H3+H4)をシミュレーションした。なお、H2/(H1+H3+H4)は、H1、H2、H3及びH4の各ピークの値をそれぞれ用いて計算した。一例として、光パルス前方光OPfの時間幅Tfが11nsであり、光パルスOPの時間幅Tpが1nsであり、そして、光パルス後方光OPbの時間幅Tbが0nsである光強度階段状光パルスOPsを用いた場合の論理解析に基づくシミュレーションの結果を図5に示す。図5の横軸はdB単位で表す比Prxであり、図5の縦軸はH2/(H1+H3+H4)である。なお、シミュレーションにおける検出用光ファイバSOF（全長10mの零歪みの光ファイバ）には、3.05mの所で100μεの歪みが生じ、3.05±0.2mの所では歪みが生じていないと仮定してシミュレーションを行った。

【0063】

図5から分かるように、比Prxに対するH2/(H1+H3+H4)を示す曲線は、比Prxが所定の値でピークを持つ上に凸形状の高次曲線である。H2を検出するためには、H2/(H1+H3+H4)が0.5以上であればよいことから、このような曲線を得ることによって、H2/(H1+H3+H4)が0.5以上となる比Prxの範囲（a≤比Prx≤b）を求めることができ、最も精度よくH2を検出するためには、H2/(H1+H3+H4)が最高値、即ちピークとなる比Prxの値（比Prx=c）とすればよい。

【0064】

従って、各時間幅が上述のように設定した光強度階段状光パルスOPsを用いる場合において、高精度で高空間分解能で歪み及び／又は温度を検出するためにはH2/(H1+H3+H4)が約0.5以上となる比Prxの範囲内の値に、そして、最も高精度で高空間分解能で歪み及び／又は温度を検出するためにはH2/(H1+H3+H4)がピークとなる比Prxの値に、光強度階段状光パルスOPsの比Prxを設定すればよい。

【0065】

以上の説明から、高精度で高空間分解能に歪み及び／又は温度を検出し、そして、微小な歪みの変化を検出するためには、上述の各範囲で光強度階段状光パルスOPsの各時間幅Tf、Tp、Tbをそれぞれ決定し、この決定した各時間幅Tf、Tp、Tbを持つ光強度階段状光パルスOPsにおいて、式12によって定義される比Prxに対するH2/(H1+H3+H4)を式8乃至式11に基づいてシミュレーションし、そして、シミュレーションの結果におけるH2/(H1+H3+H4)が0.5以上となる比Prx、特にこのH2/(H1+H3+H4)がピークとなる比Prxを光強度階段状光パルスの比Prxに設定すればよい。また、この決定した各時間幅Tf、Tp、Tbを持つ光強度階段状光パルスOPsから検出用光ファイバSOFにおける使用可能な最小の長さが規定される。

【発明を実施するための最良の形態】

【0066】

以下、本発明に係る実施形態を図面に基づいて説明する。なお、各図において同一の構成については、同一の符号を付し、その説明を省略する。

【0067】

（第1の実施形態）

本発明に係る第1の実施形態における分布型光ファイバセンサは、歪み及び／又は温度を検出するための検出用光ファイバの一方端から光強度階段状パルス光のプローブ光を入

10

20

30

40

50

射すると共にこの検出用光ファイバの他方端から連続光のポンプ光を入射して、検出用光ファイバで生じたブリルアン散乱現象に係る光を受光し、ブリルアン・ゲイン・スペクトラム時間領域分析（ $B^{Gain}-OTDA$ 、Brillouin Gain Optical Time Domain Analysis）又はブリルアン・ロス・スペクトラム時間領域分析（ $B^{Loss}-OTDA$ 、Brillouin Loss Optical Time Domain Analysis）を行うことにより、ブリルアン周波数シフトに基づいて歪み及び／又は温度の分布を検出するものである。以下、ブリルアン・ゲイン・スペクトラム時間領域分析又はブリルアン・ロス・スペクトラム時間領域分析をブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域分析と略記する。このブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域分析では、ブリルアン散乱現象に係る光は、ブリルアン減衰／増幅を受けた光である。

10

【0068】

図6は、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成を示すブロック図である。図7は、分布型光ファイバセンサにおける階段状光パルス光源の構成を示すブロック図である。図8は、分布型光ファイバセンサにおける自動温度制御器の構成を示すブロック図である。図9は、分布型光ファイバセンサにおける自動周波数制御器の構成を示すブロック図及びその動作原理を説明するための図である。図10は、階段状光パルスの生成を説明するための図である。図11は、分布型光ファイバセンサにおける光強度・偏光調整部の構成を示すブロック図である。図12は、第1の実施形態の分布型光ファイバセンサにおけるCW光源の構成を示すブロック図である。図13は、分布型光ファイバセンサにおける光強度調整部の構成を示すブロック図である。

20

【0069】

図6において、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサ1は、階段状光パルス光源11と、光カプラ12と、光強度・偏光調整部13と、光サーキュレータ14と、光コネクタ15と、制御処理部16と、ブリルアン時間領域検出計17と、検出用光ファイバ18と、CW光源19と、光カプラ20と、光強度調整部21と、光コネクタ22とを備えて構成される。

【0070】

階段状光パルス光源11は、制御処理部16によって制御され、内側に向かうほど光強度が大きくなるように光強度が階段状になった光パルスを生成する光源装置である。このような光パルスは、見かけ上、互いに異なる光強度の光パルスが多重されているように見える。階段状光パルス光源11の出力端子（射出端子）は、光カプラ12の入力端子（入射端子）に光学的に接続される。

30

【0071】

このような階段状光パルス光源11は、例えば、図7に示すように、基板101と、温度検出素子102と、発光素子103と、光カプラ104と、ファブリペローエタロンフィルタ（Fabry-perot Etalon Filter以下、「EF」と略記する。）105と、第1受光素子106と、第2受光素子107と、温度調整素子108と、自動温度制御器（Automatic Temperature Controller、以下、「ATC」と略記する。）109と、自動周波数制御器（Automatic Frequency Controller、以下、「AFC」と略記する。）110と、第1光強度変調器111と、第1光強度変調器駆動部112と、第2光強度変調器113と、第2光強度変調器駆動部114とを備えて構成される。

40

【0072】

基板101は、温度検出素子102、発光素子103、光カプラ104、EF105、第1受光素子106及び第2受光素子107が載置される架台である。

【0073】

温度検出素子102は、発光素子103の近傍に配置され、発光素子103の温度を検出するための部品であり、例えば、抵抗値が温度変化に応じて変化することによって温度を検出するサーミスタである。温度検出素子102が発光素子103の温度を精度よく検出し得る観点から、基板101は、例えば、アルミニウムや銅等の熱伝導率の高い金属材料（合金を含む）であることが好ましい。また、基板101は、温度変化を少なくするこ

50

とができるように、その熱容量が大きいことが好ましい。

【0074】

温度調整素子108は、発熱及び吸熱を行うことにより基板101の温度を調整する部品であり、例えば、ペルチェ素子やゼーベック素子等の熱電変換素子である。本実施形態では、P型とN型の熱電半導体を銅電極にはんだ付けしたペルチェ素子が用いられ、発光素子103等が配置された基板101の面と逆の面にこのペルチェ素子が密着状態で配置される。

【0075】

ATC109は、温度検出素子102の検出出力に基づいて温度調整素子108を制御することによって、基板101の温度を所定の温度に自動的に略一定に保持する回路である。

10

【0076】

ATC109は、例えば、図8に示すように、温度検出素子102の検出出力と制御処理部16からの参照電圧Vref1とが入力されこれらの差分を出力する増幅器201と、増幅器201の差分出力が入力される例えばローパスフィルタ回路から成る積分回路202と、増幅器201の差分出力が入力される例えばハイパスフィルタ回路から成る微分回路203と、積分回路202の積分出力及び微分回路203の微分出力が入力されその比例を出力する比例回路204と、比例回路204のプラス出力及びマイナス出力に応じて温度調整素子ドライバ207を駆動する出力を得る増幅器205、206と、比例回路204の比例出力に応じて温度調整素子108の駆動電流を生成するブリッジ回路からなる温度調整素子ドライバ207とを備えて構成される。即ち、ATC109は、温度検出素子102の検出出力に基づいて温度調整素子108をPID制御する構成である。参照電圧Vref1は、基板101が所定の温度である場合における温度検出素子102の検出出力と同じ値に設定される。

20

【0077】

このような構成によって、ATC109は、基板101が所定の温度よりも高い場合には、温度調整素子108が吸熱するように温度調整素子108を駆動し、基板101が所定の温度よりも低い場合には、温度調整素子108が発熱するように温度調整素子108を駆動する。本実施形態では、温度調整素子108であるペルチェ素子に吸熱時には+1.4Aの電流が供給され、発熱時には-0.6Aの電流が供給される。このようにATC109が温度調整素子108を駆動することによって基板101の温度が所定の温度に自動的に略一定に保持される。その結果、発光素子103の温度も所定の温度に自動的に略一定に保持される。そのため、発光素子103が発光する光の周波数が温度依存性を有する場合に、その温度依存性が抑制される。そして、所定の温度は、発振すべき発振周波数 f_0 で発光素子103が発振する場合における温度である。また、比例回路204の比例出力は、基板101の温度安定度をモニタするために、アナログ／デジタル変換されて制御処理部16に出力される。

30

【0078】

図7に戻って、発光素子103は、線幅の狭い所定の周波数の光を発光すると共に素子温度や駆動電流を変更することによって発振波長（発振周波数）を変えることができる素子であり、例えば、多量子井戸構造DFBレーザや可変波長分布ブラッグ反射型レーザ等の波長可変半導体レーザ（周波数可変半導体レーザ）である。周波数可変半導体レーザが発光するレーザ光の周波数は、温度に依存するが、上述のようにATC109によって所定の温度に自動的に略一定に保持されるため発振周波数の温度依存性が抑制され、周波数可変半導体レーザは、駆動電流によって発振周波数を安定的に変更し得る。

40

【0079】

光カプラ104は、入射光を2つの光に分配して射出する光部品であり、例えば、ハーフミラー等のビームスプリッタである。EF105は、周波数（波長）の変化に従って周期的に透過光強度が変化する周期的な透過周波数特性（周期的な透過波長特性）を持つ周期的フィルタである。EF105のFSR（Free Spectral Range）は、本実施形態では

50

100GHzである。第1及び第2受光素子106、107は、受光した光の光強度に応じた電流を発生し、この発生した電流を電圧に変換して出力する光電変換素子であり、例えば、ホトダイオードや抵抗器を備えて構成される。

【0080】

発光素子103の前方及び後方から射出される光（本実施形態では、レーザ光）は、それぞれ第1光強度変調器111及び光カプラ104に入射される。発光素子103の後方から光カプラ104に入射された光は、光カプラ104で所定の分配比で2つに分配され、分配された一方の光は、第2受光素子107に入射され、分配された他方の光は、EF105を介して第1受光素子106に入射される。第1及び第2受光素子106、107は、入射された光の光強度に応じた電圧を受光出力としてそれぞれAFC110へ出力する。

10

【0081】

AFC110は、第1及び第2受光素子106、107の受光出力PDv1、PDv2に基づいて発光素子103を制御することによって、発光素子103が発光する光の周波数を所定の周波数に自動的に略一定に保持する回路である。

【0082】

AFC110は、例えば、図9（A）に示すように、第1受光素子106の受光出力PDv1を増幅する増幅器211と、第2受光素子107の受光出力PDv2を増幅する増幅器212と、増幅器211で増幅された第1受光素子106の受光出力PDv1を増幅器212で増幅された第2受光素子106の受光出力PDv2で割る割り算を行う割算回路213と、割算回路213の割算出力PDv1/PDv2を増幅しアナログ／デジタル変換を行って制御処理部16へ出力する増幅器216と、割算回路213の割算出力PDv1/PDv2と制御処理部16からの参照電圧Vref2とが入力されこれらの差分を出力する増幅器214と、増幅器214の差分出力を増幅しアナログ／デジタル変換を行って制御処理部16へ出力する増幅器217と、増幅器214の差分出力と制御処理部16からの参照電圧Vref3とが入力されこれらの差分を出力する増幅器215とを備えて構成される。

20

【0083】

発光素子103が発光する光の周波数を発光素子103が発振すべき所定の周波数 f_0 に自動的に略一定に保持するAFC110の動作について説明する。

【0084】

上述の割算出力PDv1/PDv2は、発光素子103から周期的な透過周波数特性を持つEF105を介して受光した光の光強度（受光出力PDv1）を発光素子103から直接受光した光の光強度（受光出力PDv2）で割った値であるから、図9（B）に示す曲線cのように、EF105のFSRに合わせて周波数の変化に従って周期的に変化することになる。

30

【0085】

発光素子103が発振すべき発振周波数 f_0 （即ち、発光素子103が発光すべき光の周波数 f_0 ）に対応する曲線c上の点をロックポイント（Lock Point）とし、その割算出力PDv1/PDv2の値をロックポイント値LP₀とする。

【0086】

従って、仮に発光素子103の光の周波数が、発振すべき発振周波数 f_0 よりも高くなると割算出力PDv1/PDv2がロックポイント値LP₀よりも大きくなり、逆に、発振周波数 f_0 よりも低くなると割算出力PDv1/PDv2がロックポイント値LP₀よりも小さくなる。

40

【0087】

そこで、AFC110は、割算出力PDv1/PDv2がロックポイント値LP₀よりも大きい場合には、発光素子103の光の周波数が、発振すべき発振周波数 f_0 よりも高い場合であるから、発光素子103の光の周波数が下がるように発光素子103を駆動し、一方、割算出力PDv1/PDv2がロックポイント値LP₀よりも小さい場合には、発光素子103の光の周波数が、発振すべき発振周波数 f_0 よりも低い場合であるから、発光素子

50

103の光の周波数が上がるように発光素子103を駆動すればよい。

【0088】

このため、上述の参照電圧Vref3は、発光素子103の光の周波数が、発振すべき発振周波数 f_0 で駆動されている場合の割算出力 P_{Dv1}/P_{Dv2} と同じ値に設定され、そして、上述の参照電圧Vref2は、微調整を行うための参照電圧であり、さらに正確にロックポイント値 LP_0 に合わせるべく参照電圧Vref2が設定される。このように参照電圧Vref2、Vref3は、発光素子103の光の周波数が発振すべき発振周波数 f_0 で駆動するロックポイント値 LP_0 になるように設定される。

【0089】

このように参照電圧Vref2及びVref3が設定され、AFC110が動作することによって、AFC110は、発光素子103の光の周波数が、発振すべき発振周波数 f_0 からズレを生じると、このズレを解消するように発光素子103を駆動することができる。本実施形態では、発光素子103に周波数可変半導体レーザが用いられるから、AFC110は、発振すべき発振周波数 f_0 からのズレに応じて注入電流を調整するので、波長可変半導体レーザは、自動的に略一定に保持された所定の周波数 f_0 でレーザ光を発光することができる。

【0090】

このため、光カプラ104、EF105、第1及び第2受光素子106、107及びAFC110は、発光素子103が発光する光の波長（周波数）を略固定する所謂波長ロッカーを構成している。

【0091】

第1及び第2光強度変調器111、113は、入射光の光強度を変調する光部品であり、例えば、マッハツェンダ型光変調器（以下、「MZ光変調器」と略記する。）や半導体電界吸収型光変調器等である。

【0092】

MZ光変調器は、例えばニオブ酸リチウム、タンタル酸リチウム、ニオブ酸リチウム・タンタル酸リチウム固有体等の電気光学効果を有する基板に、光導波路と信号電極と接地電極とが形成される。光導波路は、2個のY分岐導波路でその中間部分が2本に分かれて第1および第2導波路アームを形成して、マッハ・ツェンダ干渉計（Mach-Zehnder interferometer）を構成する。信号電極は、この2本の導波路アーム上にそれぞれ形成され、接地電極は、所定の間隔で信号電極と平行するように基板上に形成される。MZ光変調器に入射された光は、光導波路を伝播し、第1Y分岐導波路で2つに分岐し、それぞれ各導波路アームを伝播し、第2Y分岐導波路で再び合波され、光導波路から射出される。ここで、各信号電極に電気信号、例えば、高周波信号を印加すると電気光学効果によって各導波路アームの屈折率が変化するため、第1及び第2導波路アームを伝播する第1及び第2光は、進行速度が変化することになる。このため、各電気信号間で所定の位相差を設けることで、第2Y分岐導波路で第1光と第2光とが異なる位相で合波されることになり、合波された光は、入射した光のモードと異なるモード、例えば、高次モードになる。この異なるモードの合波光は、光導波路を伝播することができないので、光が強度変調されることになる。MZ光変調器は、電気信号→屈折率変化→位相変化→強度変化というプロセスで入射光の光強度を変調する。電気光学効果を利用したもの他、磁気光学効果を利用した磁気光学変調器、音響光学効果を利用した音響光学変調器およびフランツ・ケルディッシュ効果（Franz-Keldysh effect）や量子閉込めシュタルク効果（quantum-confined Stark effect）を利用した電界吸収型光変調器などもある。

【0093】

第1及び第2光強度変調器駆動部112、114は、制御処理部16によってそれぞれ制御され、それぞれ第1及び第2光強度変調器111、113を駆動するドライバ回路であり、例えば、第1及び第2光強度変調器111、113に印加する電圧パルスが発生するパルス発生回路と、この電圧パルスの発生タイミングを制御するタイミング発生回路とを備えて構成される。この電圧パルスは、第1及び第2光強度変調器111、113がM

10

20

30

40

50

Z光変調器である場合には、上述の電気信号に相当する。

【0094】

このような構成の階段状光パルス光源11が階段状光パルスを生成する動作について説明する。図10(A)は、発光素子103の出力光(図7に示す矢印Aの位置)を示す図であり、図10(B)は、第1光強度変調器111の出力光(図7に示す矢印Bの位置)を示す図であり、そして、図10(C)は、第2光強度変調器113の出力光、即ち、階段状光パルス光源11の出力光(図7に示す矢印Cの位置)を示す図である。

【0095】

図10(A)に示すように、発光素子103は、制御処理部16の制御に基づくAFC110によって、線幅の狭い所定の周波数 f_0 であって略一定の光強度P1である光CW₀を連続的に発光し射出する。この発光素子103によって射出された連続光CW₀は、第1光強度変調器111に入射される。

【0096】

背景技術では光強度変調器は、通常状態ではオフであり、所定のタイミングでオン・オフすることによって図24(B)に示す光パルスを生成するものである。光強度変調器がマッハツェンダ型光変調器である場合には、導波路に印加される電圧を調整することにより、オフは、第1導波路アームを伝播する光と第2導波路アームを伝播する光との位相差を180度に設定することによって実現され、オンは、第1導波路アームを伝播する光と第2導波路アームを伝播する光の位相を揃えることによって実現される。

【0097】

図10(B)に示すように、本実施形態の第1光強度変調器111は、通常状態では第1光強度変調器111から射出される光の光強度が光強度P1より小さく微弱な光強度P2となるように、制御処理部16の制御に基づく第1光強度変調器駆動部112によって駆動され、タイミングT1でオンすると共にタイミングT2で通常状態に戻るように、制御処理部16の制御に基づく第1光強度変調器駆動部112によって駆動される。このように第1光強度変調器駆動部112によって第1光強度変調器111が駆動されることによって、第1光強度変調器111に入射した連続光CW₀は、タイミングT1まで光強度P2に変調され、タイミングT1からタイミングT2まで変調を受けずに光強度P1のままに為され、タイミングT2から再び光強度P2に変調される。即ち、このように第1光強度変調器駆動部112によって駆動されることによって、第1光強度変調器111は、図10(B)に示す光強度P2の連続的な漏れ光CWLの中に光強度P1の光パルスOPが在る光を射出する。この光強度P1は、図1及び図4における光強度 $P1 = (As + Cs)^2$ に対応し、光強度P2は、図1及び図4に示す光パルス前方光OPf及び光パルス後方光OPbの光強度 $P2 = Cs^2$ に対応する。光強度変調器がマッハツェンダ型光変調器である場合には、第1光強度変調器駆動部112は、マッハツェンダ型光変調器の第1及び第2導波路アームに印加される電圧を調整することにより、通常状態では光強度がP2となるように第1導波路アームを伝播する光と第2導波路アームを伝播する光との位相差を調整し、タイミングT1では第1導波路アームを伝播する光と第2導波路アームを伝播する光の位相を揃え、タイミングT2では通常状態の光強度がP2となるように第1導波路アームを伝播する光と第2導波路アームを伝播する光との位相差を調整する。

【0098】

そして、連続的な漏れ光CWLと光パルスOPから成る図10(B)に示す波形の光が第1光強度変調器111から第2光強度変調器113に入射される。図10(C)に示すように、第2光強度変調器113は、通常状態ではオフであり、タイミングT3でオンすると共にタイミングT4で通常状態のオフに戻るように、制御処理部16の制御に基づく第2光強度変調器駆動部114によって駆動される。このように第2光強度変調器駆動部114によって第2光強度変調器113が駆動されることによって、第1光強度変調器111から第2光強度変調器113に入射した図10(B)に示す波形の光は、タイミングT3まで光強度0に変調され(オフされ)、タイミングT3からタイミングT4まで変調を受けずにそのままに為され、タイミングT4から再び光強度0に変調される(オフにされ

10

20

30

40

50

る)。即ち、このように第2光強度変調器駆動部114によって駆動されることによって、第2光強度変調器113は、光パルスOPの前方だけ光強度P2の連続的な漏れ光OPf（光パルス前方光OPf）を残して残余を除去する。これによって第2光強度変調器113は、光強度P2の光パルスの中に光強度P2よりも大きい光強度P1の光パルスが在る光強度が一段階変化する階段状であって線幅の狭い光強度階段状光パルスOPsを生成する。なお、タイミングT4を調整することによって光パルス後方光OPbを持つ光強度階段状光パルスOPsとしてもよい。

【0099】

ここで、この光強度階段状光パルスOPsにおける光パルス前方光OPfの時間幅Tf、光パルスOPの時間幅Tp及び式12で定義される比Prxは、前述のように設定される。

10

【0100】

本実施形態では、光パルス前方光OPfの時間幅Tfは、例えば、5nsや10nsや15nsや20ns等に設定した。また、光パルスOPのパルス幅Tpは、前述したように1m以下の高空間分解能を得るために10ns以下に設定する必要があるが、検出用光ファイバ18の或る位置におけるブリルアン周波数シフトにこの或る位置の周辺におけるブリルアン周波数シフトの情報が混じることを抑制し得る観点から、ブリルアン・ロス/ゲイン・スペクトルBSI/g(vd)をブリルアン時間領域検出計17が測定する場合におけるサンプリング時間間隔に合わせると好適であり、本実施形態では、光パルスOPのパルス幅Tpは、5nsや2nsや1nsに設定した。そして、比Prxは、前述したように、比Prxに対する $H2 / (H1 + H3 + H4)$ を式8乃至式11に基づいてシミュレーションし、そして、そのシミュレーションの結果に基づいて設定される。本実施形態では、ブリルアン・ロス・スペクトルBSI/g(vd)のピークを検出する上で最も良好なローレンツ曲線を得ることができ、最も高精度で高空間分解能に歪み及び/又は温度を検出することができることから、比Prxは、シミュレーションの結果における $H2 / (H1 + H3 + H4)$ のピークを与える値に設定される。比Prxは、シミュレーションの結果における $H2 / (H1 + H3 + H4)$ の値が0.5以上となる比Prxの値に設定しても、高精度で高空間分解能に歪み及び/又は温度を検出することができる。例えば、光パルス前方光OPfの時間幅Tfが12nsであって光パルスOPの時間幅Tpが1nsである場合において、比Prxは、約15dB～約27dBの間の値に、そして、最も良好なローレンツ曲線を得るためには約21dBに設定される。

20

30

【0101】

なお、第1光強度変調器111及び第2光強度変調器113の損失を補償するために光を増幅する光増幅器115を発光素子103から光カプラ12の光路上に配置してもよい。特に、雑音となる自然放出光(ASE、Amplifier Spontaneous Emission)の少ないうちに増幅する観点から図7に破線で示すように第1光強度変調器111と第2光強度変調器113との間の光路上に配置することが好ましい。光増幅器115は、例えば、発光素子103が発光する光の周波数に対し利得を持つ光ファイバ増幅器や半導体光増幅器である。光ファイバ増幅器は、例えば、エルビウム(元素記号; Er)、ネオジム(元素記号; Nd)、プラセオジウム(元素記号; Pr)及びツリウム(元素記号; Tm)等の希土類元素を光ファイバに添加した希土類元素添加光ファイバ増幅器やラマン増幅を利用したラマン増幅光ファイバ増幅器等がある。

40

【0102】

図6に戻って、光カプラ12、22は、入射光を2つの光に分配して射出する光部品であり、例えば、ハーフミラー等の微少光学素子形光分岐結合器や溶融ファイバの光ファイバ形光分岐結合器や光導波路形光分岐結合器等を利用することができる。光カプラ12の一方の出力端子は、光強度・偏光調整部13の入力端子に光学的に接続され、他方の出力端子は、ブリルアン時間領域検出計17の第1入力端子に光学的に接続される。

【0103】

光強度・偏光調整部13は、制御処理部16によって制御され、入射光の光強度を調整すると共に入射光の偏光面をランダムに変更して射出する部品である。光強度・偏光調整

50

部 1 3 の出力端子は、光サーキュレータ 1 4 の第 1 端子に光学的に接続される。

【0104】

光強度・偏光調整部 1 3 は、例えば、図 1 1 に示すように光可変減衰器 1 2 1 と、偏光制御器 1 2 2 とを備えて構成される。光可変減衰器 1 2 1 は、入射光の光強度を減衰して射出するとともにその減衰量を変更することができる光部品である。光可変減衰器 1 2 1 は、例えば、入射光と射出光との間に減衰円板を挿入し、減衰円板の表面には回転方向に厚みが連続的に変えてある金属膜を蒸着して、この減衰円板を回転させることにより減衰量を調節する光可変減衰器や、入射光と射出光との間に磁気光学結晶およびこの磁気光学結晶の射出側に偏光子を挿入し、磁気光学結晶に磁界を印加してこの磁界の強さを変えることにより減衰量を調整する光可変減衰器等を利用することができる。偏光制御器 1 2 2 は、入射光の偏光面をランダムに変えて射出する光部品である。光強度・偏光調整部 1 3 に入射した入射光は、光可変減衰器 1 2 1 で制御処理部 1 6 の制御により光強度が所定の光強度に調整されて偏光制御器 1 2 2 に入射され、偏光制御器 1 2 2 で偏光面がランダムに変えられて射出される。

10

【0105】

光サーキュレータ 1 4 は、第 1 乃至第 3 の 3 端子の光サーキュレータであり、入射光と射出光とがその端子番号に循環関係を有する非可逆性の光部品である。即ち、第 1 端子に入射した光は、第 2 端子から射出されると共に第 3 端子からは射出されず、第 2 端子に入射した光は、第 3 端子から射出されると共に第 1 端子からは射出されず、第 3 端子に入射した光は、第 1 端子から射出されると共に第 2 端子からは射出されない。光コネクタ 1 5 、 2 2 は、光ファイバ同士や光部品と光ファイバとを光学的に接続する光部品である。光サーキュレータ 1 4 の第 2 端子は、光コネクタ 1 5 を介して検出用光ファイバ 1 8 の一端に光学的に接続され、光サーキュレータ 1 4 の第 3 端子は、ブリルアン時間領域検出計 1 7 の第 3 入力端子に光学的に接続される。

20

【0106】

CW光源 1 9 は、制御処理部 1 6 によって制御され、所定の周波数範囲 f_r で光強度が略一定の連続光 CW_{pump1} を発光する装置である。CW光源 1 9 は、例えば、図 1 2 に示すように、基板 1 3 1 と、温度検出素子 1 3 2 と、発光素子 1 3 3 と、光カプラ 1 3 4 と、EF 1 3 5 と、第 1 受光素子 1 3 6 と、第 2 受光素子 1 3 7 と、温度調整素子 1 3 8 と、ATC 1 3 9 と、AFC 1 4 0 とを備えて構成される。即ち、CW光源 1 9 は、所定の周波数範囲 f_r で光強度が略一定の連続光 CW_{pump1} を発光すればよいから、発光素子 1 3 3 が射出する連続光を階段状光パルス光源 1 1 のように光強度が階段状の光パルスに形成する必要がないので、階段状光パルス光源 1 1 における第 1 及び第 2 光強度変調器 1 1 1 、 1 1 3 と第 1 及び第 2 光強度変調器駆動部 1 1 2 、 1 1 4 とを備えない構成である。CW光源 1 9 における基板 1 3 1 、温度検出素子 1 3 2 、発光素子 1 3 3 、光カプラ 1 3 4 、EF 1 3 5 、第 1 受光素子 1 3 6 、第 2 受光素子 1 3 7 、温度調整素子 1 3 8 、ATC 1 3 9 及び AFC 1 4 0 は、AFC 1 4 0 が制御処理部 1 6 の制御に基づき発光素子 1 3 3 の光の周波数を変更することを除き、光学的な接続関係や電氣的な接続関係を含めて階段状光パルス光源 1 1 における基板 1 0 1 、温度検出素子 1 0 2 、発光素子 1 0 3 、光カプラ 1 0 4 、EF 1 0 5 、第 1 受光素子 1 0 6 、第 2 受光素子 1 0 7 、温度調整素子 1 0 8 、ATC 1 0 9 及び AFC 1 1 0 とそれぞれ同様なので、その説明を省略する。

30

40

【0107】

本実施形態の分布型光ファイバセンサ 1 は、プローブ光である階段状光パルスの周波数 f_0 を固定し、ポンプ光である連続光 CW_{pump1} の周波数を所定の周波数範囲 f_r で走査することによってブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $BSI/g(vd)$ を測定し、ブリルアン周波数シフト ν_b を測定するものである。

【0108】

そのため、制御処理部 1 6 が走査するための周波数に合わせて AFC 1 4 0 における参照電圧 V_{ref2} 及び参照電圧 V_{ref3} を変更することによって、AFC 1 4 0 のロックポイント値 LP_0 を変更し、走査するための周波数に保持された連続光 CW_{pump1} を発光するよ

50

うに構成されている。

【0109】

本実施形態では、図9(C)に示すように、所定の周波数範囲 f_r が4GHzであり、この所定の周波数範囲 f_r の下限周波数 f_L に対応するロックポイント値をロックポイント値 L_{PL} とし、この所定の周波数範囲の上限周波数 f_u に対応するロックポイント値をロックポイント値 L_{Pu} とすると、ロックポイント値 L_{P_0} は、 $L_{PL} \leq L_{P_0} \leq L_{Pu}$ の範囲で変更されることになる。

【0110】

CW光源19の出力端子は、光カップラ20の入力端子に光学的に接続される。光カップラ20の一方の出力端子は、光強度調整部21の入力端子に光学的に接続され、他方の出力端子は、ブリルアン時間領域検出計17の第2入力端子に光学的に接続される。

10

【0111】

図6に戻って、光強度調整部21は、制御処理部16によって制御され、入射光の光強度を調整して射出する部品である。光強度調整部21の出力端子は、光コネクタ22を介して検出用光ファイバ18の他方端に光学的に接続される。

【0112】

光強度調整部21は、例えば、図13に示すように光可変減衰器151と、光アイソレータ152とを備えて構成される。光可変減衰器151は、光可変減衰器121と同様に、入射光の光強度を減衰して射出する光部品である。光アイソレータ152は、入力端子から出力端子へ一方向のみ光を透過する光部品であり、例えば、45度ずれた状態の2つの偏光子の間にファラデー回転子を配置することによって構成することができる。光アイソレータ152は、分布型光ファイバセンサ1内における各光部品の接続部などで生じる反射光の伝播やプローブ光のCW光源19への伝播を防止する役割を果たす。光強度調整部21に入射した入射光は、光可変減衰器151で光強度が所定の光強度に調整されて光アイソレータ152を介して射出される。

20

【0113】

なお、検出用光ファイバ18を伝播したポンプ光は、光コネクタ15及び光サーキュレータ14を介してブリルアン時間領域検出計17に入射するので、光強度・偏光調整部13や階段状光パルス光源11に入射することはない。ここで、光サーキュレータ14の代わりに光カップラを用いる場合には、ポンプ光が光強度・偏光調整部13や階段状光パルス光源11に入射することを防止するために、光強度・偏光調整部13の出力端子に光アイソレータ又はポンプ光を遮断し階段状光パルスOPsを透過する光フィルタを配置することが好ましい。

30

【0114】

検出用光ファイバ18は、歪み及び／又は温度を検出するセンサ用の光ファイバであり、その一方端からプローブ光が入射され、その他方端からポンプ光が入射され、ブリルアン散乱現象の作用を受けたプローブ光及びポンプ光がその他方端及び一方端からそれぞれ射出される。ここで、橋、トンネル、ダム、建物等の構造物や地盤等の計測対象物に生じた歪み及び／又は温度を測定する場合には、検出用光ファイバ18を計測対象物に固定することによって測定することができる。

40

【0115】

制御処理部16は、ブリルアン時間領域検出計17と信号を入出力することによって、検出用光ファイバ18の長尺方向における検出用光ファイバ18の歪み及び／又は温度の分布を高空間分解能で測定するように、階段状光パルス光源11、光強度・偏光調整部13、CW光源19及び光強度調整部21を制御する電子回路であり、例えば、マイクロプロセッサ、ワーキングメモリ、及び、ATC109用の参照電圧 V_{ref1} 、AFC110用の参照電圧 V_{ref2} 、 V_{ref3} 、ATC139用の参照電圧 V_{ref1} 、AFC140用の参照電圧 V_{ref2} 、 V_{ref3} 、タイミングT1、T2、T3、T4、比Prx等の各データを記憶するメモリ等を備えて構成される。

【0116】

50

ブリルアン時間領域検出計 17 は、分布型光ファイバセンサ 1 の各部を制御し、所定のサンプリング間隔で受光したブリルアン散乱現象に係る光を検出することによって検出用光ファイバ 18 の長尺方向における検出用光ファイバ 18 の各領域部分のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{SI/g}(v_d)$ をそれぞれ求め、求めた各領域部分のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{SI/g}(v_d)$ に基づいて各領域部分のブリルアン周波数シフト v_b をそれぞれ求め、求めた各領域部分のブリルアン周波数シフト v_b に基づいて検出用光ファイバ 18 の歪み分布及び／又は温度分布を検出する。そして、ブリルアン時間領域検出計 17 は、ローレンツ曲線が得られる上述の比 P_{rx} が記憶されており、階段状光パルス光源 11 が射出した光強度階段状光パルス OPs の光強度を検出し、光強度階段状光パルス OPs の $P1/P2$ がこの比 P_{rx} となるように制御処理部 16 に通知する。さらに、
10
ブリルアン時間領域検出計 17 は、ローレンツ曲線を得るべく最適なプローブ光の光強度及び最適なポンプ光の光強度が記憶されており、階段状光パルス光源 11 が射出した光強度階段状光パルス OPs の光強度を検出すると共に CW 光源 19 が射出した連続光 CW_{pump} の光強度を検出し、この最適なプローブ光の光強度及び最適なポンプ光の光強度となるように光強度・偏光調整部 13 及び光強度調整部 21 を調整すべく制御処理部 16 に通知する。ブリルアン時間領域検出計 17 は、光スイッチ、スペクトルアナライザ及びコンピュータ等を備えて構成される。

【0117】

このようにローレンツ曲線が得られる上述の比 P_{rx} をブリルアン時間領域検出計 17 に予め記憶することができるのは、プローブ光が階段状光パルスであるからである。また、
20
ローレンツ曲線が得られる上述の比 P_{rx} がブリルアン時間領域検出計 17 に予め記憶されるので、背景技術のように測定のたびに検出用光ファイバのファイバ長に合わせて光パルスをマニュアルで調整する必要がない。

【0118】

次に、第 1 の実施形態に係る分布型光ファイバセンサの動作について説明する。

【0119】

図 14 は、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルの分布及び距離 $L1$ と距離 $L2$ とにおけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルを示す図である。図 14 (A) は、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルの分布を示し、 x 軸は、検出用光ファイバ 18 の一方端からの距離であり、 y 軸は、周波数であり、 z 軸は、光強度である。図 14 (B) は、距離
30
 $L1$ と距離 $L2$ とにおけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルを示し、 x 軸は、周波数であり、 y 軸は、光強度である。また、説明の都合上、距離 $L1$ では、検出用光ファイバ 18 に歪みが生じていないものとし、距離 $L2$ では、検出用光ファイバ 18 に歪みが生じているものとする。

【0120】

まず、ブリルアン時間領域検出計 17 は、光カプラ 12 を介して階段状光パルス光源 11 からの光のスペクトルを測定するように準備し、階段状光パルス光源 11 から光を射出させる信号を制御処理部 16 に通知する。

【0121】

この信号を受けると、制御処理部 16 は、既定の $ATC109$ 用の参照電圧 V_{ref1} と $AF C110$ 用の参照電圧 V_{ref2} 、 V_{ref3} とを $ATC109$ と $AF C110$ とにそれぞれ印加し、発光素子 103 を発光させ、階段状光パルス光源 11 から光を射出させる。
40

【0122】

階段状光パルス光源 11 から射出された光は、光カプラ 12 を介してブリルアン時間領域検出計 17 に入射され、ブリルアン時間領域検出計 17 は、その光のスペクトルを測定する。ブリルアン時間領域検出計 17 は、この測定結果から階段状光パルス光源 11 が所定の発振周波数 f_0 の光を射出しているか否かを確認する。所定の発振周波数 f_0 ではない場合には、ブリルアン時間領域検出計 17 は、所定の発振周波数 f_0 となるように $AF C110$ 用の参照電圧 V_{ref2} 、 V_{ref3} を調整する信号を制御処理部 16 に通知する。

【0123】

10

20

30

40

50

この信号を受けると、制御処理部16は、所定の発振周波数 f_0 となるようにAFC110用の参照電圧Vref2、Vref3を調整する。階段状光パルス光源11から射出された光の発振周波数 f が所定の発振周波数 f_0 になると、ブリルアン時間領域検出計17は、その光強度P1を制御処理部16に通知する。

【0124】

制御処理部16は、この通知された光強度P1及び記憶している比Prxに基づいて、光強度階段状光パルスOPsにおける光パルス前方光OPf（光パルス後方光OPbがある場合には、光パルス前方光OPf及び光パルス後方光OPb）の光強度P2に対する光パルスOPの光強度P1の比が前述した所定の比Prxとなるように、第1光強度変調器111を第1光強度変調器駆動部112を制御すると共に、光強度階段状光パルスOPsを射出するように第2光強度変調器113を第2光強度変調器駆動部113を制御する。

10

【0125】

階段状光パルス光源11から射出された光強度階段状光パルスOPsは、光カプラ12を介してブリルアン時間領域検出計17に入射され、ブリルアン時間領域検出計17は、その光強度階段状光パルスOPsのスペクトルを測定する。ブリルアン時間領域検出計17は、この測定結果から階段状光パルス光源11が所定の比Prxの光強度階段状光パルスOPsを射出しているか否かを確認する。所定の比Prxではない場合には、ブリルアン時間領域検出計17は、所定の比Prxとなるように第1光強度変調器111を調整する信号を制御処理部16に通知する。

20

【0126】

この信号を受けると、制御処理部16は、所定の比Prxとなるように第1光強度変調器111を調整する。このような調整を繰り返し、階段状光パルス光源11から射出された光強度階段状光パルスOPsの比が所定の比Prxになると、ブリルアン時間領域検出計17は、スペクトルの測定結果から階段状光パルス光源11が射出した光強度階段状光パルスOPsが、ローレンツ曲線のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルBSI/g(vd)を得られる最適な光強度で検出用光ファイバ18に入射するように、光強度・偏光調整部13の減衰量を調整する信号を制御処理部16に通知する。

【0127】

この信号を受けると、制御処理部16は、光強度・偏光調整部13の減衰量を調整し、制御処理部16は、減衰量の調整が終了した旨を示す信号をブリルアン時間領域検出計17に通知する。

30

【0128】

この信号を受けると、ブリルアン時間領域検出計17は、階段状光パルス光源11が所定の光強度階段状光パルスOPsを射出する準備が整ったと判断し、所定の光強度階段状光パルスOPsの射出を止めるように階段状光パルス光源11を制御処理部16に制御させる。

【0129】

そして、ブリルアン時間領域検出計17は、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルBSI/g(vd)の測定を開始する。

【0130】

40

まず、ブリルアン時間領域検出計17は、光カプラ20を介してCW光源19からの光のスペクトルを測定するように準備する。そして、ブリルアン時間領域検出計17は、走査する周波数範囲における最低の周波数 f_L の連続光をCW光源19から射出させる信号を制御処理部16に通知する。

【0131】

この通知を受けると、制御処理部16は、既定のATC139用の参照電圧Vref1と最低の周波数 f_L に対応するAFC140用の参照電圧Vref2、Vref3とをATC139とAFC140とにそれぞれ印加し、発光素子133を発光させ、CW光源19から連続光を射出させる。

【0132】

50

CW光源19から射出された連続光は、光カプラ20を介してブリルアン時間領域検出計17に入射され、ブリルアン時間領域検出計17は、その光のスペクトルを測定する。ブリルアン時間領域検出計17は、CW光源11が最低の周波数 f_L の連続光を射出しているか否かを確認する。最低の周波数 f_L ではない場合には、ブリルアン時間領域検出計17は、最低の周波数 f_L となるようにAFC110用の参照電圧 V_{ref2} 、 V_{ref3} を調整する信号を制御処理部16に通知する。さらに、ブリルアン時間領域検出計17は、スペクトルの測定結果からCW光源19が射出した連続光が、ローレンツ曲線のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ を得られる最適な光強度で検出用光ファイバ18に入射するように、光強度調整部21の減衰量を調整する信号を制御処理部16に通知する。

10

【0133】

これらの信号を受けると、制御処理部16は、最低の周波数 f_L となるようにAFC140用の参照電圧 V_{ref2} 、 V_{ref3} を調整する。さらに、制御処理部16は、光強度調整部21の減衰量を調整し、制御処理部16は、減衰量の調整が終了した旨を示す信号をブリルアン時間領域検出計17に通知する。

【0134】

この信号を受け、CW光源19から射出された光の周波数が最低の周波数 f_L になると、光サーキュレータ14を介したブリルアン散乱現象に係る光のスペクトルを測定するように準備し、ブリルアン時間領域検出計17は、階段状光パルス光源11から光強度階段状光パルスOPsを射出させる信号を制御処理部16に通知する。

20

【0135】

この信号を受けると、制御処理部16は、階段状光パルス光源11に光強度階段状光パルスOPsを射出させ、射出させたタイミングを知らせる信号をブリルアン時間領域検出計17に通知する。

【0136】

階段状光パルス光源11から射出された光強度階段状光パルスOPsは、光カプラ12を介して光強度・偏光調整部13に入射され、光強度・偏光調整部13でその光強度及び偏光面が調整され、光サーキュレータ14及び光コネクタ15を介してプローブ光として検出用光ファイバ18の一方端に入射する。検出用光ファイバ18の一方端に入射したプローブ光（光強度階段状光パルスOPs）は、検出用光ファイバ22の他方端から入射され検出用光ファイバ18を伝播するポンプ光（連続光CWpump1）とブリルアン散乱現象を生じさせながら検出用光ファイバ18の一方端から他方端へ伝播する。

30

【0137】

ブリルアン散乱現象に係る光は、検出用光ファイバ18の一方端から射出され、光サーキュレータ14を介してブリルアン時間領域検出計17に入射される。ブリルアン時間領域検出計17は、制御処理部16から通知された光強度階段状光パルスOPsを射出したタイミングに基づいて、受光したブリルアン散乱現象に係る光を時間領域分析し、検出用光ファイバ18の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布を測定する。

【0138】

このようにブリルアン時間領域検出計17は、CW光源19に最低の周波数 f_L の連続光をポンプ光として射出させると共に階段状光パルス光源11に光強度階段状光パルスOPsをプローブ光として射出させ、検出用光ファイバ18でこれらプローブ光及びポンプ光によってブリルアン散乱現象を生じさせ、ブリルアン散乱現象に係る光を時間領域分析し、検出用光ファイバ18の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布を測定する。このように測定することによって、最低の周波数 f_L のポンプ光に対応するブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布である図14（A）に示す曲線 m_1 が得られる。

40

【0139】

ここで、ブリルアン散乱現象に係るプローブ光とポンプ光との間における相互作用の程

50

度は、プローブ光の偏光面とポンプ光の偏光面との相対関係に依存する。本実施形態に係る分布型光ファイバセンサ 1 は、測定ごとに光強度・偏光調整部 13 で光強度階段状光パルス O P s の偏光面がランダムに変わるので、最低の周波数 f_L のポンプ光に対応するブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布の測定を複数回実行してその平均値を採用することによって、この依存性を実質的に解消することができる。そのため、精度よくブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 m_1 を得ることができる。本実施形態では、例えば、500回や1000回の測定が実行される。

【0140】

ブリルアン時間領域検出計 17 は、最低の周波数 f_L のポンプ光に対応するブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 m_1 の測定が終わると、次の周波数のポンプ光に対応するブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布を測定すべく、ブリルアン時間領域検出計 17 は、上述と同様の動作によって、まず、CW光源 19 に次の周波数のポンプ光としての連続光を射出させ、階段状光パルス光源 11 にプローブ光としての光強度階段状光パルス O P s を射出させる。そして、ブリルアン時間領域検出計 17 は、検出用光ファイバ 18 の一方端から射出され光サーキュレータ 14 を介してブリルアン時間領域検出計 17 に入射されたブリルアン散乱現象に係る光を、光強度階段状光パルス O P s を射出したタイミングに基づいて時間領域分析し、次の周波数に対する、検出用光ファイバ 18 の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 m_2 を測定する。

【0141】

ブリルアン時間領域検出計 17 は、次の周波数のポンプ光に対応するブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 m_2 の測定が終わると、次々と順次にポンプ光の周波数を最高の周波数 f_u まで変えて、当該周波数のポンプ光に対応するブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 m_3 、 m_4 、 $\dots$ 、 m_n の測定を上述と同様に行う。ここで、分布 m_n は、走査周波数範囲における n 番目の周波数のポンプ光に対応するブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 m を表す。

【0142】

このように測定することによって、図 14 (A) に示すように、走査周波数範囲の各周波数における検出用光ファイバ 18 の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 $\dots$ 、 m_n が高精度かつ高空間分解能で得られ、その結果、検出用光ファイバ 18 の長尺方向の各領域部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ が高精度かつ高空間分解能で得られる。

【0143】

そして、ブリルアン時間領域検出計 17 は、検出用光ファイバ 18 に歪みを生じていない部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ のピークに対応する周波数を基準に、検出用光ファイバ 18 の長尺方向の各領域部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ のピークに対応する周波数の差を求めることによって、検出用光ファイバ 18 の長尺方向の各部分におけるブリルアン周波数シフト v_b を高精度かつ高空間分解能で求める。

【0144】

例えば、図 14 (A)、(B) に示すように、検出用光ファイバ 18 の一方端から距離 L_1 の部分では、歪みが無く、距離 L_2 の部分で歪みが生じているとする。距離 L_1 におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ は、図 14 (B) で実線の曲線 e で示され、距離 L_1 におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ は、図 14 (B) で破線の曲線 f で示されている。この場合では、距離 L_1 におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ のピークに対応する周波数 v_{b1} と距離 L_2 におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ のピークに対応する周波数 v_{b2} と差を求めて、ブリルアン周波数シフト $v_b = v_{b2} - v_{b1}$ が求められる。

【0145】

そして、ブリルアン時間領域検出計 17 は、この各領域部分のブリルアン周波数シフト v_b から検出用光ファイバ 18 の長尺方向の各領域部分における歪み及び／又は温度を高

10

20

30

40

50

精度かつ高空間分解能で求める。この求めた検出用光ファイバ18の長尺方向の各領域部分における歪み及び／又は温度の分布は、CRT表示装置やXYプロッタやプリンタ等の不図示の出力部に提示される。

【0146】

このように第1の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ1は、プローブ光に光強度階段状光パルスOPsを用いるので、ローレンツ曲線が得られる上述の比Prxをブリルアン時間領域検出計17に予め記憶することができるから、背景技術のように測定のために検出用光ファイバ18のファイバ長に合わせて光パルスをマニュアルで調整する必要がない。従って、分布型光ファイバセンサ1を工業製品化することも可能である。また、論理解析の結果、最適な比Prxに設定し得るので、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルBSl/g(vd)は、ローレンツ曲線となるから、高精度かつ高空間分解能で検出用光ファイバ18に生じた歪み及び／又は温度を測定することができる。

【0147】

(第2の実施形態)

本発明に係る第2の実施形態における分布型光ファイバセンサは、歪み及び／又は温度を検出するための検出用光ファイバの一方端からプローブ光及びポンプ光を入射して、検出用光ファイバでブリルアン散乱現象の作用を受けたポンプ光を受光し、ブリルアン・ゲイン・スペクトラム時間領域反射分析(B^{Gain}-OTDR、Brillouin Gain Optical Time Domain Reflectometer)又はブリルアン・ロス・スペクトラム時間領域反射分析(B^{Loss}-OTDR、Brillouin Loss Optical Time Domain Reflectometer)を行うことにより、ブリルアン周波数シフトに基づいて歪み及び／又は温度を検出するものである。以下、ブリルアン・ゲイン・スペクトラム時間領域反射分析又はブリルアン・ロス・スペクトラム時間領域反射分析をブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域反射分析と略記する。このブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域反射分析では、ブリルアン散乱現象に係る光は、ブリルアン散乱光である。

【0148】

まず、第2の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成について説明する。図15は、第2の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成を示すブロック図である。図16は、第2の実施形態の分布型光ファイバセンサにおけるCW光源の構成を示すブロック図である。

【0149】

図15において、第2の実施形態における分布型光ファイバセンサ2は、階段状光パルス光源11と、光カップラ12と、光強度・偏光調整部13と、光サーキュレータ14と、光カップラ33と、光コネクタ15と、制御処理部31と、ブリルアン時間領域検出計17と、検出用光ファイバ18と、CW光源32と、光カップラ20と、光強度調整部21とを備えて構成される。

【0150】

階段状光パルス光源11の出力端子は、光カップラ12の入力端子に光学的に接続される。光カップラ12の一方の出力端子は、光強度・偏光調整部13の入力端子に光学的に接続される。光強度・偏光調整部13の出力端子は、光サーキュレータ14の第1端子に光学的に接続される。光サーキュレータ14の第2端子は、光カップラ33の一方の入力端子に光学的に接続される。光カップラ33の出力端子は、光コネクタ15を介して検出用光ファイバ18の一方端に光学的に接続される。

【0151】

また、CW光源32の出力端子は、光カップラ20の入力端子に光学的に接続される。光カップラ20の一方の出力端子は、光強度調整部21の入力端子に光学的に接続される。光強度調整部21の出力端子は、光カップラ33の他方の入力端子に光学的に接続される。

【0152】

そして、光カップラ12の他方の出力端子は、ブリルアン時間領域検出計31の第1入力端子に光学的に接続され、光カップラ20の他方の出力端子は、ブリルアン時間領域検出計

31の第2入力端子に光学的に接続され、光サーキュレータ14の第3端子は、ブリルアン時間領域検出計31の第3入力端子に光学的に接続される。

【0153】

これら階段状光パルス光源11、光カップラ12、光強度・偏光調整部13、光サーキュレータ14、光コネクタ15、ブリルアン散乱現象検出計17、検出用光ファイバ18、光カップラ20及び光強度調整部21は、第1の実施形態と同様なので、その説明を省略する。

【0154】

光カップラ33は、入射光を2つの光に分配して射出する光部品であり、光カップラ12、22と同様の光部品である。

【0155】

CW光源32は、制御処理部16によって制御され、所定の周波数範囲 f_r で略一定の連続光CWpump2を発光する装置であり、連続光CWpump2は、所定のタイミングで所定の期間だけ射出される。CW光源32は、例えば、図16に示すように、基板131と、温度検出素子132と、発光素子133と、光カップラ134と、EF135と、第1受光素子136と、第2受光素子137と、温度調整素子138と、ATC139と、AFC140と、第3光強度変調器161と、第3光強度変調器駆動部162とを備えて構成される。即ち、CW光源32は、連続光CWpump2を所定のタイミングで所定の期間だけ射出する必要があるため、図12に示すCW光源19に第3光強度変調器161及びこれを駆動する第3光強度変調器駆動部162をさらに備えた構成である。CW光源32における基板131、温度検出素子132、発光素子133、光カップラ134、EF135、第1受光素子136、第2受光素子137、温度調整素子138、ATC139及びAFC140は、AFC140が制御処理部16の制御に基づき発光素子133の発振周波数を変更することを除き、光学的な接続関係や電氣的な接続関係を含めて階段状光パルス光源11における基板101、温度検出素子102、発光素子103、光カップラ104、EF105、第1受光素子106、第2受光素子107、温度調整素子108、ATC109及びAFC110とそれぞれ同様なので、その説明を省略する。

【0156】

第3光強度変調器161は、第1及び第2光強度変調器111、113と同様に、入射光の光強度を変調する光部品である。第3光強度変調器駆動部162は、第1及び第2光強度変調器駆動部112、114と同様に、制御処理部16によって制御され、第3光強度変調器161を駆動するドライバ回路である。発光素子133からの光は、第3光強度変調器161に入射される。第3光強度変調器161は、この発光素子133からの連続光CWpump2を第3光強度変調器駆動部162の制御に基づいてオン・オフする。第3光強度変調器161がオンの場合に第3光強度変調器161から射出された光は、CW光源32の出力光として光カップラ20に入射される。CW光源32は、このように動作することによって所定のタイミングで所定の期間だけ連続光CWpump2を射出する。

【0157】

なお、図16に破線で示すように、第3光強度変調器161の損失を補償するために光を増幅する光増幅器163を第3光強度変調器161の後に配置してもよい。

【0158】

制御処理部31は、ブリルアン時間領域検出計17と信号を入出力することによって、検出用光ファイバ18の一方端に入射したポンプ光が他方端で反射したタイミングでプローブ光が検出用光ファイバ18の一方端に入射するようにポンプ光及びプローブ光を検出用光ファイバ18に伝播させ、検出用光ファイバ18の長尺方向における検出用光ファイバ18の歪み及び／又は温度の分布を高空間分解能で測定するように、階段状光パルス光源11、光強度・偏光調整部13、CW光源19及び光強度調整部21を制御する電子回路であり、例えば、マイクロプロセッサ、ワーキングメモリ及びデータを記憶するメモリ等を備えて構成される。

【0159】

なお、検出用光ファイバ18の一方端から他方端へ伝播したポンプ光がこの他方端でパワーを損失することなく効率よく反射するようにするために、検出用光ファイバ18の他方端にさらに入射光を反射する鏡部を備えてもよく、また、検出用光ファイバ18の他方端を鏡面処理してもよい。

【0160】

次に、第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサの動作について説明する。

【0161】

第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ2は、第1の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ1と同様の動作によって所定の比 P_{rx} を持つ光強度階段状光パルス O_{Ps} を階段状光パルス光源11から射出させる。第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ2は、第1の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ1と同様の動作によって、ローレンツ曲線のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl/g}(v_d)$ を得られる最適な光強度で光強度階段状光パルス O_{Ps} がプローブ光として検出用光ファイバ18に入射するように、光強度・偏光調整部13の減衰量を調整する。調整が終了すると、第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ2は、所定の光強度階段状光パルス O_{Ps} の射出を止めるように階段状光パルス光源11を制御処理部16に制御させる。

【0162】

そして、第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ2は、第1の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ1と同様の動作によって、ローレンツ曲線のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl/g}(v_d)$ を得られる最適な光強度にポンプ光の光強度を調整すべくCW光源11及び光強度調整部21を制御する。調整が終了すると、第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ2は、連続光 CW_{pimp2} の射出を止めるようにCW光源19を制御処理部16に制御させる。

【0163】

そして、第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ2は、走査周波数範囲 f_r の各周波数における検出用光ファイバ18の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 $\dots$ 、 m_n を高精度かつ高空間分解能で得るべく、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl/g}(v_d)$ の測定を開始する。

【0164】

ここで、第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ2は、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域反射分析を行うので、走査周波数範囲 f_r の各周波数において、検出用光ファイバ18の一方端に入射したポンプ光が他方端で反射したタイミングでプローブ光が検出用光ファイバ18の一方端に入射するようにポンプ光及びプローブ光を検出用光ファイバ18に伝播させ、ブリルアン散乱現象に係る光をブリルアン散乱現象検出計17で分析する。

【0165】

こうして高精度かつ高空間分解能で得られた走査周波数範囲 f_r の各周波数における検出用光ファイバ18の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 $\dots$ 、 m_n に基づき、第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ2は、第1の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ1と同様の動作によって、検出用光ファイバ18の長尺方向の各領域部分における歪み及び／又は温度を高精度かつ高空間分解能で求め、不図示の出力部に提示する。

【0166】

このように第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ2は、第1の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ1と同様に、プローブ光に階段状光パルスを用いるので、ローレンツ曲線が得られる上述の比 P_{rx} をブリルアン時間領域検出計17に予め記憶することができるから、背景技術のように測定のたびに検出用光ファイバ18のファイバ長に合わせて光パルスをマニュアルで調整する必要がない。従って、分布型光ファイバセンサ2を工業製品化することも可能である。また、論理解析の結果、最適な比 P_{rx} に設定し得るので、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl/g}(v_d)$ は、ローレンツ曲線となるから

、高精度かつ高空間分解能で検出用光ファイバ１８に生じた歪み及び／又は温度を測定することができる。

【０１６７】

（第３の実施形態）

本発明に係る第３の実施形態における分布型光ファイバセンサは、１台でブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域分析及びブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域反射分析を行うことができるものである。

【０１６８】

まず、第３の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成について説明する。図１７は、第３の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成を示すブロック図である。

10

【０１６９】

図１７において、第３の実施形態における分布型光ファイバセンサ３は、階段状光パルス光源１１と、光カップラ１２と、光強度・偏光調整部１３と、光サーキュレータ１４と、光カップラ３３と、光コネクタ１５と、制御処理部４１と、ブリルアン時間領域検出計１７と、検出用光ファイバ１８と、ＣＷ光源３２と、光カップラ２０と、光強度調整部２１と、光スイッチ４２と、光コネクタ２２とを備えて構成される。

【０１７０】

階段状光パルス光源１１の出力端子は、光カップラ１２の入力端子に光学的に接続される。光カップラ１２の一方の出力端子は、光強度・偏光調整部１３の入力端子に光学的に接続される。光強度・偏光調整部１３の出力端子は、光サーキュレータ１４の第１端子に光学的に接続される。光サーキュレータ１４の第２端子は、光カップラ３３の一方の入力端子に光学的に接続される。光カップラ３３の出力端子は、光コネクタ１５を介して検出用光ファイバ１８の一方端に光学的に接続される。

20

【０１７１】

また、ＣＷ光源３２の出力端子は、光カップラ２０の入力端子に光学的に接続される。光カップラ２０の一方の出力端子は、光強度調整部２１の入力端子に光学的に接続される。光強度調整部２１の出力端子は、光スイッチ４２の入力端子に光学的に接続される。光スイッチ４２の一方の出力端子は、光カップラ３３の他方の入力端子に光学的に接続され、他方の出力端子は、コネクタ２４を介して検出用光ファイバ１８の他方端に光学的に接続される。

30

【０１７２】

そして、光カップラ１２の他方の出力端子は、ブリルアン時間領域検出計１７の第１入力端子に光学的に接続され、光カップラ２０の他方の出力端子は、ブリルアン時間領域検出計１７の第２入力端子に光学的に接続され、光サーキュレータ１４の第３端子は、ブリルアン時間領域検出計１７の第３入力端子に光学的に接続される。

【０１７３】

制御処理部４１は、ブリルアン時間領域検出計１７の出力が入力され、また、階段状光パルス光源１１、光強度・偏光調整部１３、ＣＷ光源３２、光強度調整部２１及び光スイッチ４２をそれぞれ制御する。

【０１７４】

40

これら階段状光パルス光源１１、光カップラ１２、光強度・偏光調整部１３、光サーキュレータ１４、光コネクタ１５、ブリルアン時間領域検出計１７、検出用光ファイバ１８、光カップラ２０、光強度調整部２１及び光コネクタ２２は、第１の実施形態と同様なので、その説明を省略する。そして、ＣＷ光源３２及び光カップラ３３は、第２の実施形態と同様なので、その説明を省略する。

【０１７５】

また、光スイッチ４２は、１入力２出力である１×２の光スイッチであり、制御処理部４１の制御に基づいて入力端子から入射された光を２個の出力端子の何れか一方に選択的に射出する。

【０１７６】

50

光スイッチ42は、例えば、機械式光スイッチや光導波路スイッチなどを利用することができる。機械式光スイッチは、プリズム、ロッドレンズおよび鏡などの微少光学素子や光ファイバ自体を移動・回転させることによって光路を切り換える光学部品である。さらに、半導体微細加工技術を用いて光導波路間に屈折率整合液を封入して該整合液を機械的に動かしたり、鏡を静電アクチュエータで動かしたりする光微少電気機械システム（Opto Micro ElectroMechanical Systems）の光スイッチもある。光導波路スイッチは、例えば、光導波路でマッハ・ツェンダ型干渉型を構成し、各光導波路アームに電界を印加することによって各光導波路アームの屈折率を変化させ、光路を切り換える光学部品である。また、キャリア注入による屈折率変化を利用した半導体光スイッチや光半導体増幅器をオン・オフのゲートとして用いた分配合流型の半導体光スイッチも知られている。

10

【0177】

制御処理部31は、ブリルアン時間領域検出計17と信号を入出力することによって、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域分析及びブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域反射分析により、検出用光ファイバ18の長尺方向における検出用光ファイバ18の歪み及び／又は温度の分布を高空間分解能で測定するように、階段状光パルス光源11、光強度・偏光調整部13、CW光源19、光強度調整部21及び光スイッチ42を制御する電子回路であり、例えば、マイクロプロセッサ、ワーキングメモリ及びデータを記憶するメモリ等を備えて構成される。

【0178】

次に、第3の実施形態に係る分布型光ファイバセンサの動作について説明する。

20

【0179】

まず、第3の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ3を用いてブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域分析を行う場合には、制御処理部41は、入力端子から入射された光が光コネクタ22を介して検出用光ファイバ18の他方端に光学的に接続される出力端子から射出するように光スイッチ42を制御する。そして、第3の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ3は、第1の実施形態に係る分布型光ファイバセンサと同様に動作するので、その説明を省略する。

【0180】

次に、第3の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ3を用いてブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトラム時間領域反射分析を行う場合には、制御処理部41は、入力端子から入射された光が光カプラ33及び光コネクタ15を介して検出用光ファイバ18の一方端に光学的に接続される出力端子から射出するように光スイッチ42を制御する。そして、第3の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ3は、第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサと同様に動作するので、その説明を省略する。

30

【0181】

なお、この場合において、検出用光ファイバ18でプローブ光とブリルアン散乱現象の相互作用を受け、検出用光ファイバ18の一方端から射出されるポンプ光は、光カプラ33で2つに分配され、その一方が光サーキュレータ14を介してブリルアン時間領域検出計17に入射されることになる。即ち、相互作用を受けたポンプ光は、光カプラ33でそのパワーが損失する。そのため、この損失を補償するために、光サーキュレータ14からブリルアン時間領域検出計17までの光路上に光増幅器をさらに備えてもよい。あるいは、ポンプ光を受光素子で受光し光電変換した後に増幅するように増幅器をブリルアン時間領域検出計17にさらに備えてもよい。

40

【0182】

このように第3の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ3は、第1及び第2の実施形態に係る分布型光ファイバセンサ1、2と同様に、プローブ光に階段状光パルスを用いるので、ローレンツ曲線が得られる上述の比Prxをブリルアン時間領域検出計17に予め記憶することができるから、背景技術のように測定のたびに検出用光ファイバ18のファイバ長に合わせて光パルスをマニュアルで調整する必要がない。従って、分布型光ファイバセンサ3を工業製品化することも可能である。また、論理解析の結果、最適な比Prxに設

50

定し得るので、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ は、ローレンツ曲線となるから、高精度かつ高空間分解能で検出用光ファイバ 18 に生じた歪み及び／又は温度を測定することができる。

【0183】

(第4の実施形態)

第1乃至第3の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサ1、2、3は、プローブ光に光強度階段状光パルス $O P s$ を用いることによって検出用光ファイバ 18 の長さに応じて光パルスをマニュアル調整することなく高精度かつ高空間分解能で検出用光ファイバ 18 に生じた歪み及び／又は温度を測定するものである。第4の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、第1乃至第3の実施形態における分布型光ファイバセンサ1、2、3の構成で、光パルス前方光 $O P f$ の光強度 $P 2$ のパルス光と光強度階段状光パルス $O P s$ とにおけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 $M 1$ 、 $M 2$ をそれぞれ測定し、これら測定したブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 $M 1$ 、 $M 2$ の差 $M 2 - M 1$ を求めて、検出用光ファイバ 18 の長尺方向の各領域部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ を求めることによって、第1乃至第3の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサ1、2、3で検出した結果に生じる誤差、特に、 $1 / (T p + T f)$ の付近に生じる誤差を改善するものである。

【0184】

そして、第4の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、このように構成することにより誤差を改善することができるから、第1乃至第3の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサ1、2、3では光強度階段状光パルス $O P s$ の光パルス前方光 $O P f$ の時間幅 $T f$ を $T p < T f \leq (1 / 35 \text{ MHz}) = 28.57 \text{ ns}$ の範囲内の値に設定したが、第4の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、 $T p < T f \leq 28.57 \text{ ns}$ の範囲を越えた光パルス前方光 $O P f$ の時間幅 $T f$ 、例えば時間幅 $T f = 50 \text{ ns}$ を用いることができる。もちろん、 $T p < T f \leq 28.57 \text{ ns}$ の範囲内の光パルス前方光 $O P f$ の時間幅 $T f$ を用いることができることは言うまでもない。さらに、第4の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、このように構成することにより誤差を改善することができるから、歪みが広範囲に均等に分布している場合においてその中の $200 \mu \varepsilon$ 以下の微小な歪みを検出する場合に好適である。

【0185】

第4の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成は、ブリルアン時間領域検出計17が後述するように動作することにより検出用光ファイバ 18 の長尺方向の各領域部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B S I / g (v d)$ を求めることを除き、第1乃至第3の実施形態と同様であるので、その説明を省略する。

【0186】

図18は、第4の実施形態における光強度階段状光パルス及び漏れ光光パルスを示す図である。図19は、第4の実施形態における分布型光ファイバセンサの動作を示す図である。

【0187】

図19において、第4の実施形態では、ブリルアン時間領域検出計17は、まず、連続光のポンプ光を射出させると共に、階段状光パルス光源11にプローブ光として図18(B)に示す漏れ光光パルス $O P L$ を射出させ ($S 101$)、検出用光ファイバ 18 の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 $M 1$ を測定し、この測定結果を記憶する ($S 102$)。

【0188】

図18(A)に示す時間幅 $T p$ で光強度 $P 1$ の光パルス $O P$ と時間幅 $T f$ で光強度 $P 2$ の光パルス前方光 $O P f$ とからなる光強度階段状光パルス $O P s$ を光強度階段状光パルスに用いる場合、漏れ光光パルス $O P L$ は、図18(B)に示すように、時間幅 $(T p + T f)$ で光強度 $P 2$ の光パルスである。即ち、漏れ光光パルス $O P L$ は、その時間幅が光強度階段状光パルス $O P s$ の時間幅であって、その光強度が光強度階段状光パルス $O P s$ における最も光

強度が小さい光パルス前方光OPfの光強度である。

【0189】

図19に戻って、次に、ブリルアン時間領域検出計17は、連続光のポンプ光を射出させると共に、階段状光パルス光源11にプローブ光として図18(A)に示す光強度階段状光パルスOPsを射出させ(S103)、検出用光ファイバ18の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布M2を測定し、この測定結果を記憶する(S104)。

【0190】

次に、ブリルアン時間領域検出計17は、処理S102における分布M1と処理S104における分布M2との差分 $M2-M1$ を求め、この差分 $M2-M1$ を記憶する(S105)。

10

【0191】

このような処理S101乃至処理S105の動作を走査周波数範囲の各周波数において実行し(S106)、検出用光ファイバ18の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 $m1$ 、 $m2$ 、 $m3$ 、 $m4$ 、...、 mn を求め、これらから検出用光ファイバ18の長尺方向の各領域部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $BSI/g(vd)$ を求め、求めたブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $BSI/g(vd)$ に基づいて検出用光ファイバ18の長尺方向における歪み分布及び／又は温度分布を求める(S107)。

【0192】

20

このように動作することによって、第4の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、第1乃至第3の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサ1、2、3よりも誤差が改善され、また、光パルス前方光OPfの時間幅 Tf が $Tp < Tf \leq 28.57 ns$ の範囲を越えた時間幅の光強度階段状光パルスOPsを用いたとしても、高精度かつ高空間分解能で検出用光ファイバ18に生じた歪み及び／又は温度を測定することができる。そして、第4の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、歪みが広範囲に均等に分布している場合においてその中の $200 \mu\epsilon$ 以下の微小な歪みを検出することができる。また、言うまでもなく、第4の実施形態においても、背景技術のように測定のたびに検出用光ファイバ18のファイバ長に合わせて光パルスをマニュアルで調整する必要がない。従って、分布型光ファイバセンサ3を工業製品化することも可能である。

30

【0193】

(第5の実施形態)

第4の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、第1乃至第3の実施形態における分布型光ファイバセンサ1、2、3の構成で、プローブ光として光パルス前方光OPfの光強度P2のパルス光と光強度階段状光パルスOPsとを用いることにより、第1乃至第3の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサ1、2、3で検出した結果に生じる誤差を改善するものであるが、第5の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、第1乃至第3の実施形態における分布型光ファイバセンサ1、2、3の構成において基準光ファイバを検出用光ファイバ18の一方端に接続し、基準光ファイバから求めた基準値に基づいて測定結果のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $BSI/g(vd)$ における中心周波数を補正することにより、第1乃至第3の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサ1、2、3で検出した結果に生じる誤差を改善するものである。

40

【0194】

図20は、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサに対応する第5の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成を示すブロック図である。

【0195】

図20において、第5の実施形態における分布型光ファイバセンサ5の構成は、検出用光ファイバ18の一方端、図20に示す例では、ポンプ光が入射される端に基準光ファイバ51をさらに接続し、ブリルアン時間領域検出計17の代わりに、後述の補正值変換式を記憶すると共に、後述するように動作することにより基準光ファイバ51から求めた基

50

準値に基づいて補正值変換式から補正值を求め、測定結果のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ における中心周波数をこの補正值で補正するブリルアン時間領域検出計 52 を用いることを除き、第 1 乃至第 3 の実施形態と同様であるので、その説明を省略する。

【0196】

基準光ファイバ 51 は、検出用光ファイバ 18 と同質であって、この分布型光ファイバセンサ 5 の空間分解能に相当する長さである光ファイバである。そして、基準光ファイバ 51 には、この分布型光ファイバセンサ 5 に用いる光強度階段状光パルス OPs の時間幅 $(Tp + Tf)$ の逆数によって表される歪みよりも十分に大きな歪み、例えば、 $2 / (Tp + Tf)$ によって表される歪みや $3 / (Tp + Tf)$ によって表される歪みや $4 / (Tp + Tf)$ によって表される歪みが与えられる。

10

【0197】

図 21 は、第 5 の実施形態における分布型光ファイバセンサの動作を示す図である。図 22 は、周波数誤差比に対する補正值を表す周波数誤差比－補正值特性曲線を示す図である。

【0198】

図 21 において、ブリルアン時間領域検出計 52 は、まず、基準光ファイバ 51 におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ を求め、求めたブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ のピークにおける周波数（中心周波数）を求めて基準値 f_{H0} とする（S201）。即ち、ブリルアン時間領域検出計 52 は、走査周波数範囲の各周波数における基準光ファイバ 51 におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度をそれぞれ測定する。次に、ブリルアン時間領域検出計 52 は、この測定した各光強度から基準光ファイバ 51 におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ を求める。そして、ブリルアン時間領域検出計 52 は、そのブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ における中心周波数を求め、その値を基準値 f_{H0} とする。

20

【0199】

次に、ブリルアン時間領域検出計 52 は、第 1 乃至第 3 の実施形態と同様の動作によって、検出用光ファイバ 18 の長尺方向の各領域部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ を求め、これら各領域部分において、各ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ のピークにおける周波数（中心周波数）をそれぞれ求めて各検出値 f_{Hn} とする（S202）。即ち、ブリルアン時間領域検出計 52 は、走査周波数範囲の各周波数における検出用光ファイバ 18 の長尺方向におけるブリルアン散乱現象に係る光の光強度の分布 $m1$ 、 $m2$ 、 $m3$ 、 $m4$ 、 $\dots$ 、 mn を測定する。次に、ブリルアン時間領域検出計 52 は、この測定した分布 $m1$ 、 $m2$ 、 $m3$ 、 $m4$ 、 $\dots$ 、 mn から検出用光ファイバ 18 の長尺方向の各領域部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ をそれぞれ求め、各ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ の中心周波数をそれぞれ求め、それら各値を各検出値 f_{Hn} とする。ここで、検出値 f_{Hn} は、 n 番目の領域部分における検出値 f_H を表す。

30

【0200】

次に、ブリルアン時間領域検出計 52 は、各領域部分において、式 13 によって定義される、基準値 f_{H0} に対する検出値 f_H の比 f_{rx} （周波数誤差比）をそれぞれ求め（S203）、求めた各周波数誤差比 f_{rxn} を補正值変換式に用いて周波数誤差比 f_{rxn} に対応する補正值 f_{En} をそれぞれ求める（S204）。ここで、周波数誤差比 f_{rxn} は、 n 番目の領域部分における周波数誤差比 f_{rx} を表し、補正值 f_{En} は、 n 番目の領域部分における補正值 f_E を表す。補正值変換式は、H4 が H2 に与える誤差分に関する式であり、プローブ光として用いる光強度階段状光パルス OPs に応じて、検出用光ファイバに所定の歪みを与えたと仮定して上述の式 7 乃至式 11 を用いてシミュレーションを行って得た値とその所定の歪みとの差に基づいて求めた関数式であり、例えば図 22 に示すような周波数誤差比 f_{rx} に対する補正值 f_E を表す周波数誤差比－補正值特性曲線の関数式である。図 22 に示す周波数誤差比－補正值特性曲線は、 $Tp = 1 \text{ ns}$ 、 $Tf = 14 \text{ ns}$ 、比 $Prx =$

40

50

22 dBの条件でシミュレーションしたものである。

$$f_{rx} = (f_{H0} - f_H) / f_{H0} \quad \dots \text{式13}$$

【0201】

なお、本実施形態では、ブリルアン時間領域検出計52は、関数式の形態で記憶した補正值変換式を用いて周波数誤差比 f_{rx} から補正值に変換したが、テーブルの形態で記憶した周波数誤差比 f_{rx} と補正值とを対応付けたルックアップ・テーブルを用いて周波数誤差比 f_{rx} から補正值に変換してもよい。

【0202】

次に、ブリルアン時間領域検出計52は、各領域部分のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ において、その各検出値 f_{Hn} から低周波数側におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ の各面積 S_{Ln} 、及び、その検出値 f_{Hn} から高周波数側におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ の各面積 S_{Rn} をそれぞれ求める(S205)。ここで、面積 S_{Ln} は、 n 番目の領域部分における面積 S_L を表し、面積 S_{Rn} は、 n 番目の領域部分における面積 S_R を表す。

【0203】

そして、ブリルアン時間領域検出計52は、各領域部分のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ において、求めた各面積 S_{Ln} 及び各面積 S_{Rn} に基づいて処理S204で求めた各補正值 f_{En} の符号をそれぞれ決定する(S206)。即ち、ブリルアン時間領域検出計52は、面積 $S_L > \text{面積} S_R$ の場合には、処理S204で求めた補正值 f_E の符号をマイナス(−)とし、面積 $S_L < \text{面積} S_R$ の場合には、処理S204で求めた補正值 f_E の符号をプラス(+)とする。なお、面積 $S_L = \text{面積} S_R$ の場合は、補正值 $f_E = 0$ である。

【0204】

次に、ブリルアン時間領域検出計52は、各領域部分において、処理S202で求めたブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ の各検出値 f_{Hn} に処理S206による各符号付き補正值 f_{En} をそれぞれ加算し(補正值 f_E の符号がプラスの場合は検出値 f_H に補正值 f_E を加え、補正值 f_E の符号がマイナスの場合は検出値 f_H から補正值 f_E を引く)、補正後のブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ の検出値 f_{Hn} (補正後検出値 f_{HEn})をそれぞれ求める(S207)。

【0205】

次に、ブリルアン時間領域検出計52は、検出用光ファイバ18に歪みを生じていない部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ の中心周波数を基準に、検出用光ファイバ18の長尺方向の各領域部分におけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(vd)$ の補正後検出値 f_{HEn} との差を求めることによって、検出用光ファイバ18の長尺方向の各部分におけるブリルアン周波数シフト v_b をそれぞれ求め、ブリルアン時間領域検出計52は、求めた検出用光ファイバ18の長尺方向の各部分におけるブリルアン周波数シフト v_b に基づいて検出用光ファイバ18の長尺方向における歪み分布及び／又は温度分布を求める(S208)。

【0206】

なお、上述では、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサ1の構成に対応する第5の実施形態における分布型光ファイバセンサ5について説明したが、第2及び第3の実施形態における分布型光ファイバセンサ2、3の構成において上述の処理S201乃至処理208を実行することによって、同様に、第2及び第3の実施形態における分布型光ファイバセンサ2、3の構成に対応する第5の実施形態における分布型光ファイバセンサを構成することができる。

【0207】

このように動作することによって、第5の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、第1乃至第3の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサ1、2、3よりも誤差が改善され、より高精度かつ高空間分解能で検出用光ファイバ18に生じた歪み及び／又は温度を測定することができる。そして、第5の実施形態にかかる分布型光ファイバセンサは、

歪みが広範囲に均等に分布している場合においてその中の $200 \mu\epsilon$ 以下の微小な歪みを検出することができる。また、言うまでもなく、第5の実施形態においても、背景技術のように測定のたびに検出用光ファイバ18のファイバ長に合わせて光パルスを手動で調整する必要がない。従って、分布型光ファイバセンサ3を工業製品化することも可能である。

【0208】

また、第1乃至第3の実施形態において、歪みが広範囲に均等に分布している場合において、その中の $200 \mu\epsilon$ 以下の微小な歪みを検出可能とする観点から、周期的にブリルアン周波数シフト量に変化する光ファイバを検出用光ファイバ18に用いてもよい。

【0209】

図23は、検出用光ファイバの長尺方向におけるブリルアン周波数シフト量を示す図である。

【0210】

このような周期的にブリルアン周波数シフト量に変化する検出用光ファイバ18は、例えば、図23に示すように、第1のブリルアン周波数シフト量 $\nu_b(1)$ を持つ長さ l_1 の部分DM1と第1のブリルアン周波数シフト量 $\nu_b(1)$ とは異なる第2のブリルアン周波数シフト量 $\nu_b(2)$ を持つ長さ l_2 の部分DM2とが繰り返された光ファイバである。この第1及び第2のブリルアン周波数シフト量 $\nu_b(1)$ 、 $\nu_b(2)$ は、光ファイバに適宜歪みを与えることによって実現することができる。

【0211】

なお、第1乃至第5の実施形態において、分布型光ファイバセンサ1、2、3は、プローブ光である階段状光パルスの周波数 f_0 を固定し、ポンプ光である連続光 CW_{pump1} の周波数を所定の周波数範囲 f_r で走査することによってブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(\nu_d)$ を測定し、ブリルアン周波数シフト ν_b を測定するものである。このため、階段状光パルス光源11の発光素子103は、必ずしも周波数可変半導体レーザである必要はなく、半導体レーザでもよい。また、上述の実施形態において、分布型光ファイバセンサ1、2、3は、プローブ光である階段状光パルスの周波数 f_0 を所定の周波数範囲 f_r で走査し、ポンプ光である連続光 CW_{pump1} の周波数を固定することによってブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトル $B_{Sl}/g(\nu_d)$ を測定し、ブリルアン周波数シフト ν_b を測定するように構成してもよい。

【0212】

本願発明を表現するために、上述において図面を参照しながら実施形態を通して本願発明を適切且十分に説明したが、当業者であれば上述の実施形態を変更及び/又は改良することは容易に為し得ることであると認識すべきである。従って、当業者が実施する変更形態又は改良形態が、請求の範囲に記載された請求項の権利範囲を離脱するレベルのものでない限り、当該変更形態又は当該改良形態は、当該請求項の権利範囲に包括されると解釈される。

【図面の簡単な説明】

【0213】

【図1】図1は、本発明に係るブリルアン散乱現象の理論解析を説明するための図である。

【図2】図2は、論理解析に基づくシミュレーションの一例を示す図（その1）である。

【図3】図3は、論理解析に基づくシミュレーションの一例を示す図（その2）である。

【図4】図4は、光強度階段状光パルスの波形を示す図である。

【図5】図5は、論理解析に基づく比 Pr_x に対する $H_2 / (H_1 + H_3 + H_4)$ のシミュレーションを示す図である。

【図6】図6は、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成を示すブロック図である。

【図7】図7は、分布型光ファイバセンサにおける階段状光パルス光源の構成を示すブロック図である。

10

20

30

40

50

【図 8】図 8 は、分布型光ファイバセンサにおける自動温度制御器の構成を示すブロック図である。

【図 9】図 9 は、分布型光ファイバセンサにおける自動周波数制御器の構成を示すブロック図及びその動作原理を説明するための図である。

【図 10】図 10 は、階段状光パルスの生成を説明するための図である。

【図 11】図 11 は、分布型光ファイバセンサにおける光強度・偏光調整部の構成を示すブロック図である。

【図 12】図 12 は、第 1 の実施形態の分布型光ファイバセンサにおける C W 光源の構成を示すブロック図である。

【図 13】図 13 は、分布型光ファイバセンサにおける光強度調整部の構成を示すブロック図である。

10

【図 14】図 14 は、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルの分布及び距離 L1 と距離 L2 とにおけるブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルを示す図である。

【図 15】図 15 は、第 2 の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成を示すブロック図である。

【図 16】図 16 は、第 2 の実施形態の分布型光ファイバセンサにおける C W 光源の構成を示すブロック図である。

【図 17】図 17 は、第 3 の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成を示すブロック図である。

【図 18】図 18 は、第 4 の実施形態における光強度階段状光パルス及び漏れ光パルスを示す図である。

20

【図 19】図 19 は、第 4 の実施形態における分布型光ファイバセンサの動作を示す図である。

【図 20】図 20 は、第 1 の実施形態における分布型光ファイバセンサに対応する第 5 の実施形態における分布型光ファイバセンサの構成を示すブロック図である。

【図 21】図 21 は、第 5 の実施形態における分布型光ファイバセンサの動作を示す図である。

【図 22】図 22 は、周波数誤差比に対する補正值を表す周波数誤差比－補正值特性曲線を示す図である。

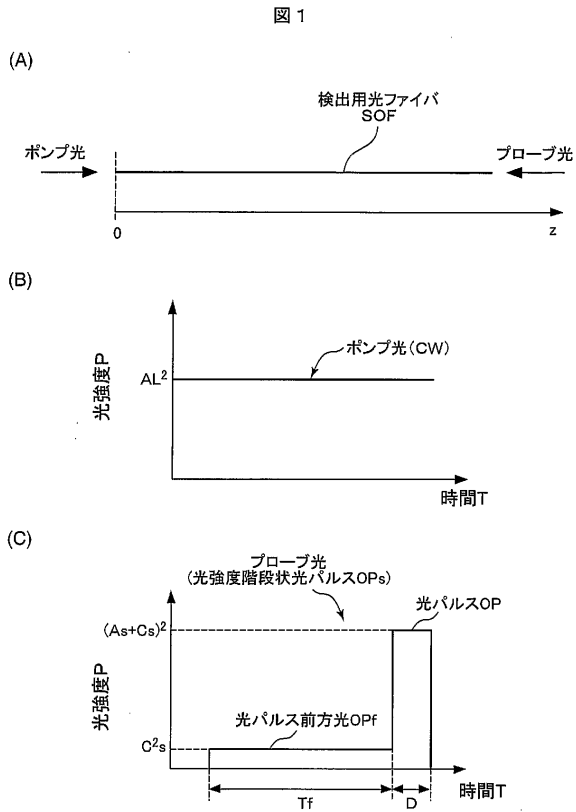
【図 23】図 23 は、検出用光ファイバの長尺方向におけるブリルアン周波数シフト量を示す図である。

30

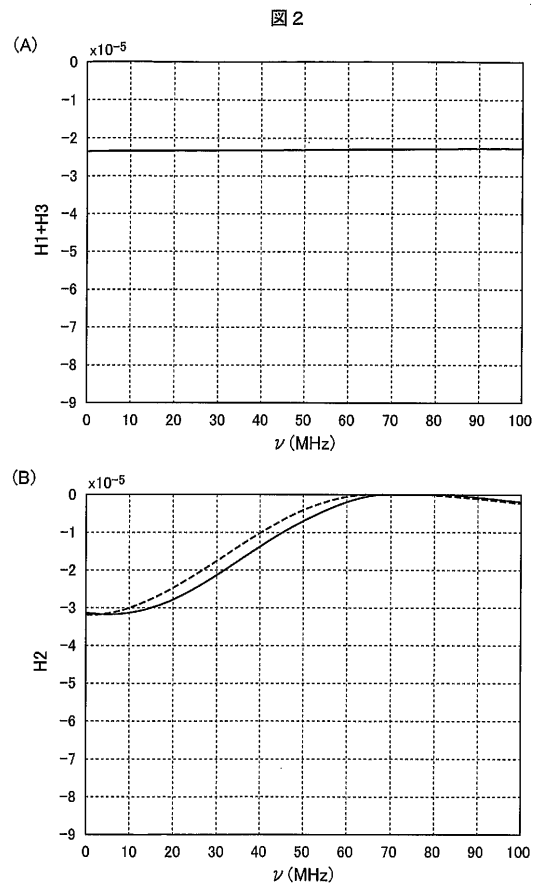
【図 24】図 24 は、背景技術に係る分布型光ファイバセンサの構成及びプローブ光を示す図である。

【図 25】図 25 は、ブリルアン・ロス／ゲイン・スペクトルを示す図である。

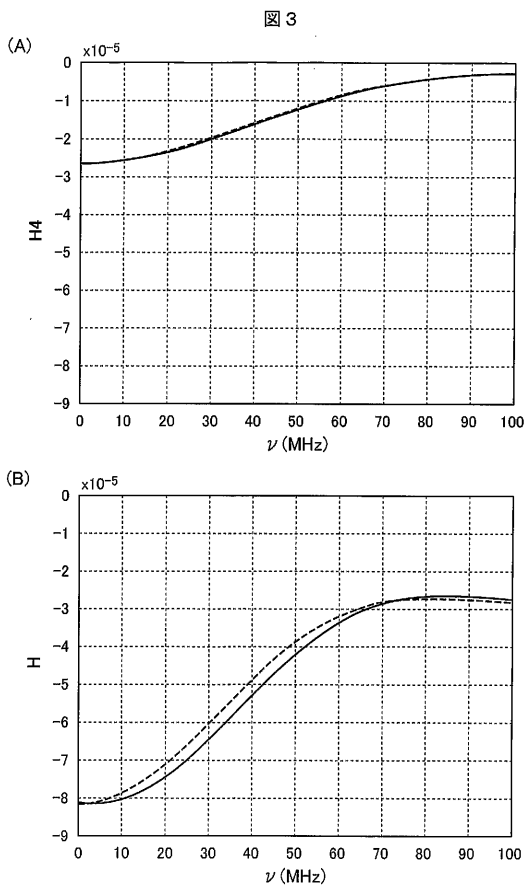
【図 1】



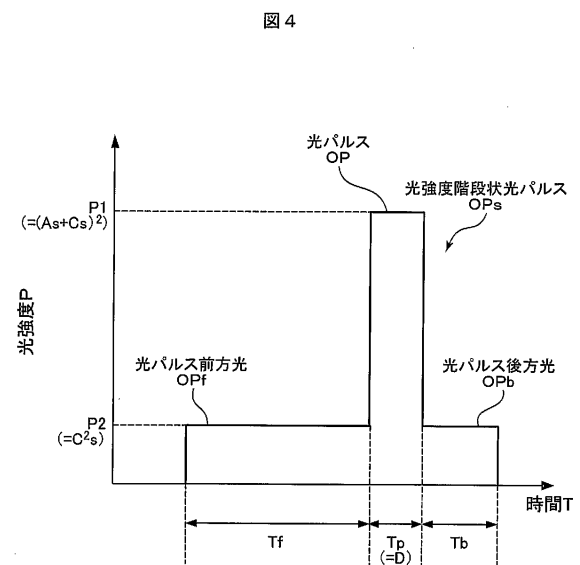
【図 2】



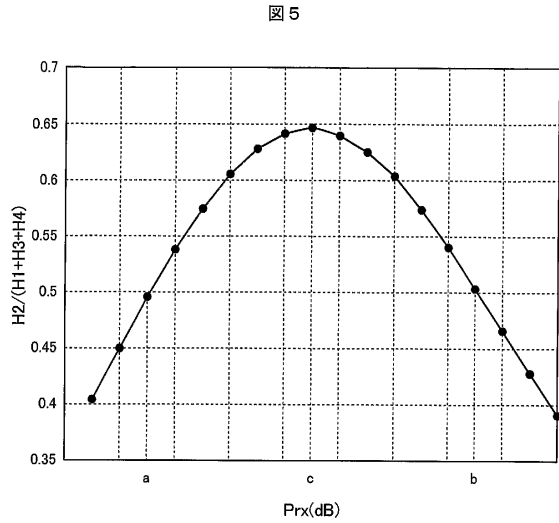
【図 3】



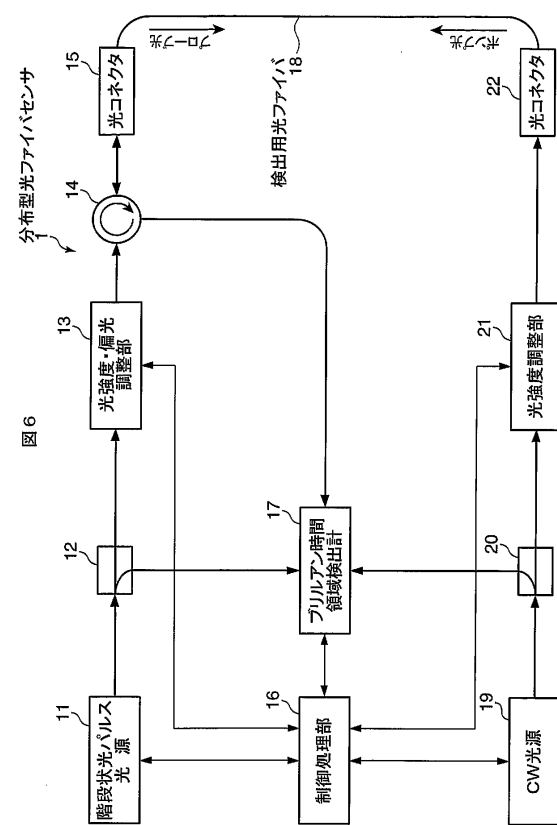
【図 4】



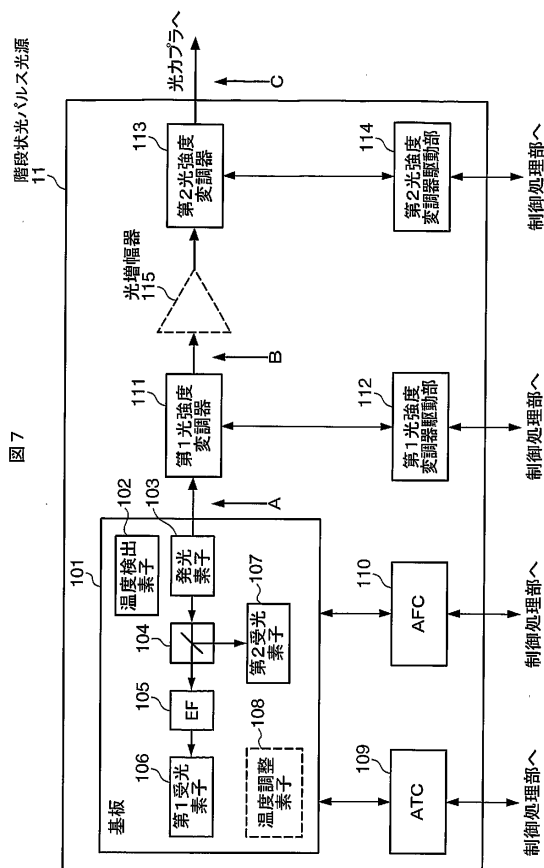
【図 5】



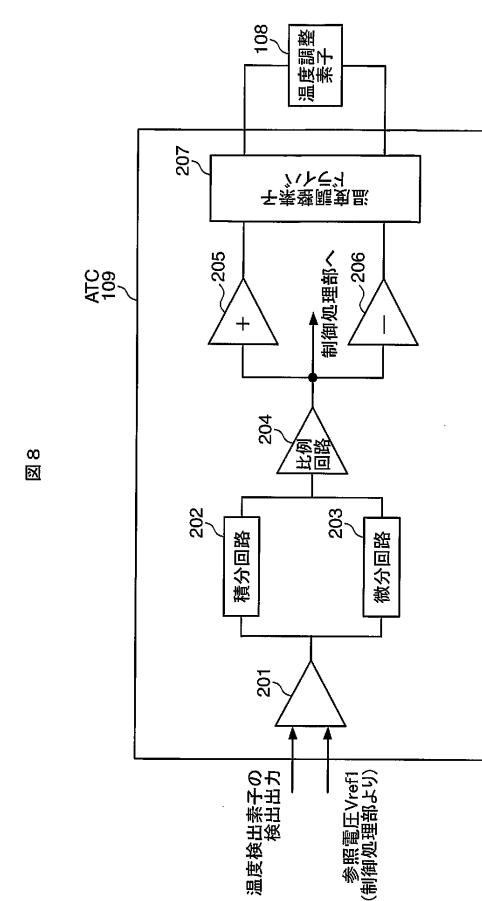
【図 6】



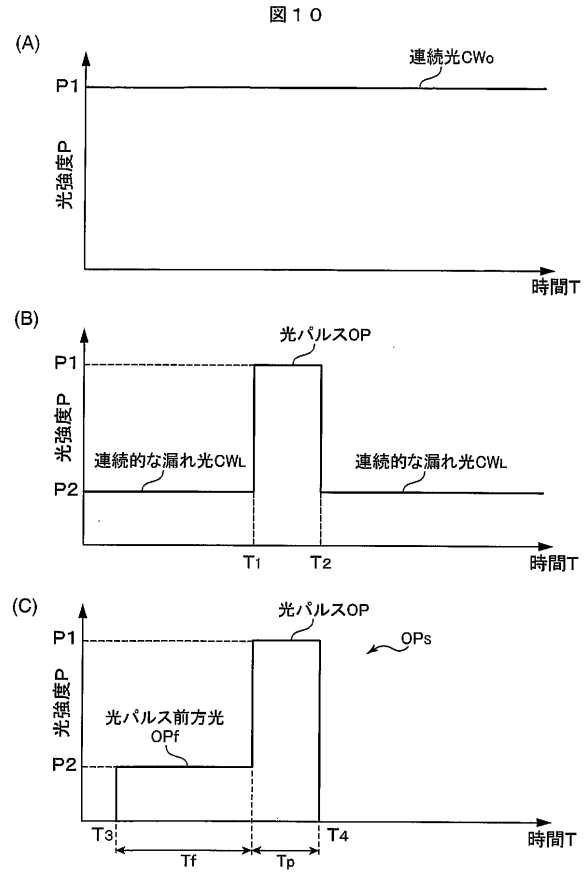
【圖 7】



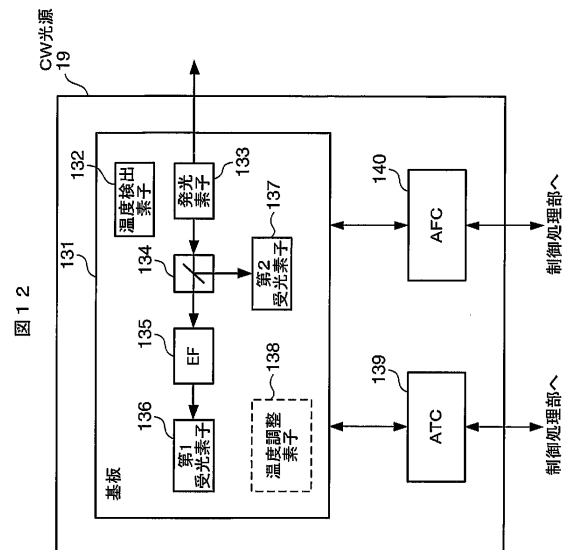
【图 8】



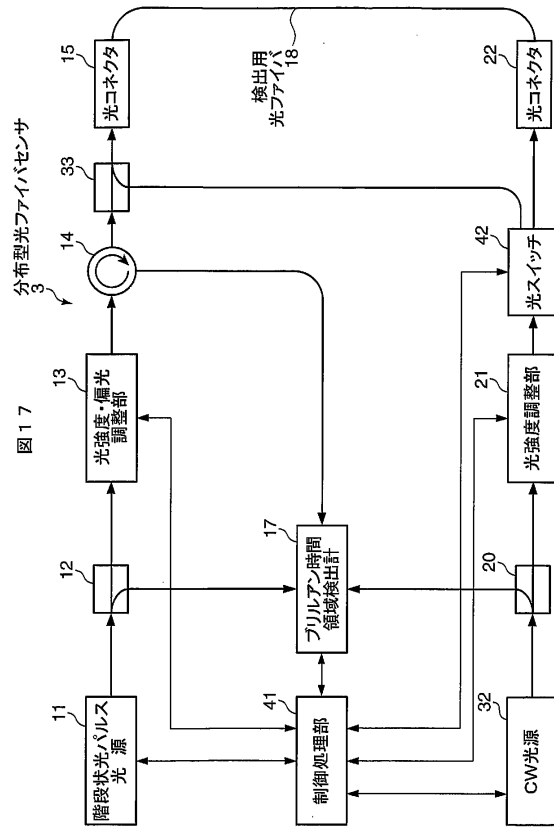
【図 10】



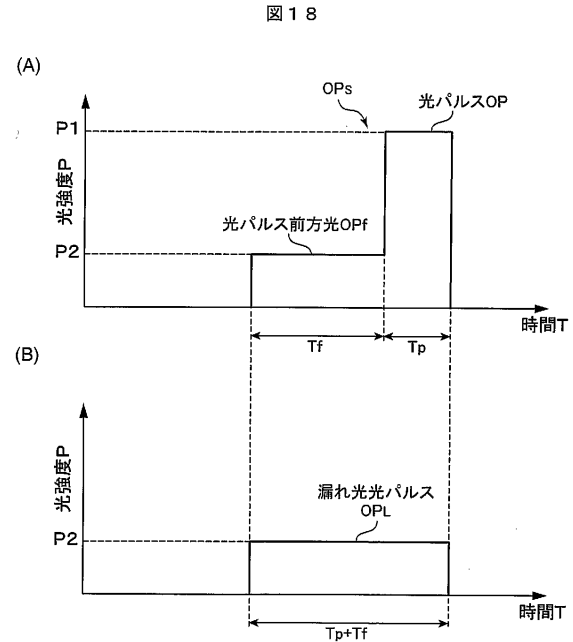
【图 1 2】



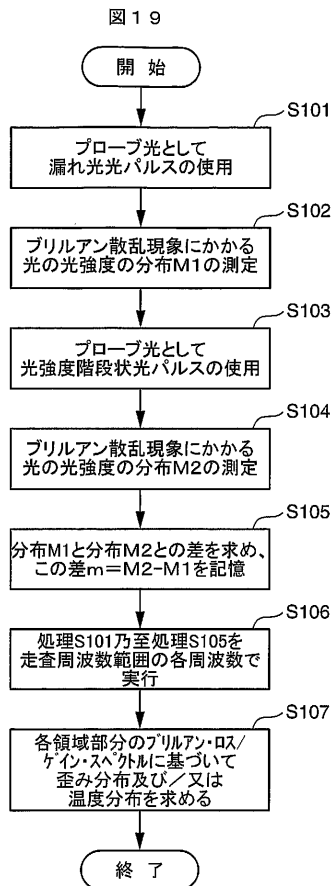
【図 17】



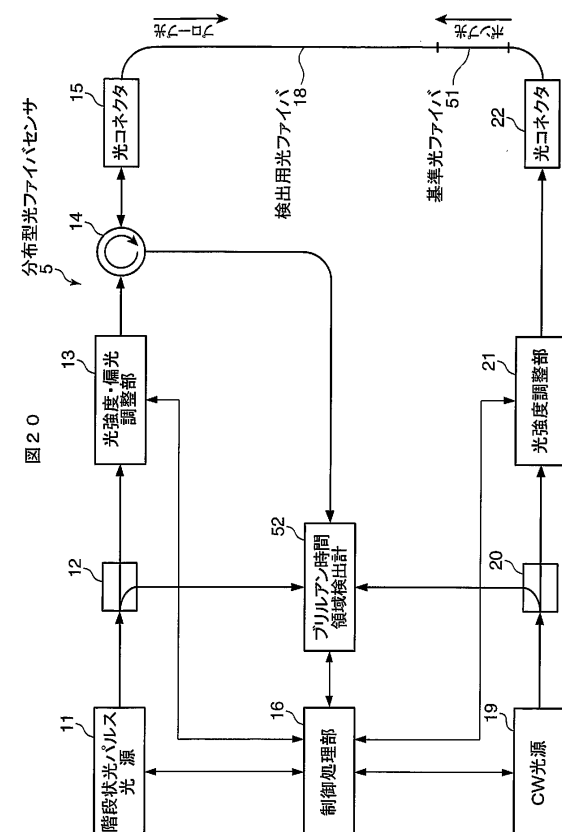
【図 18】



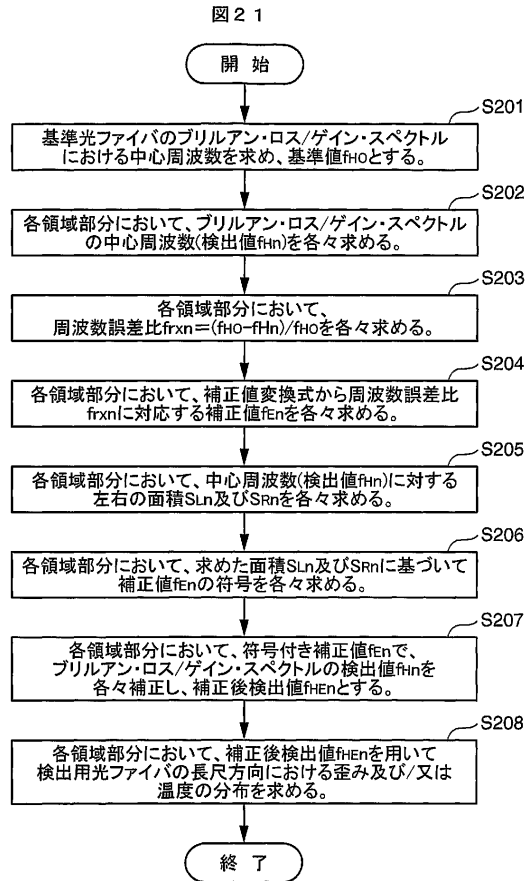
【図 19】



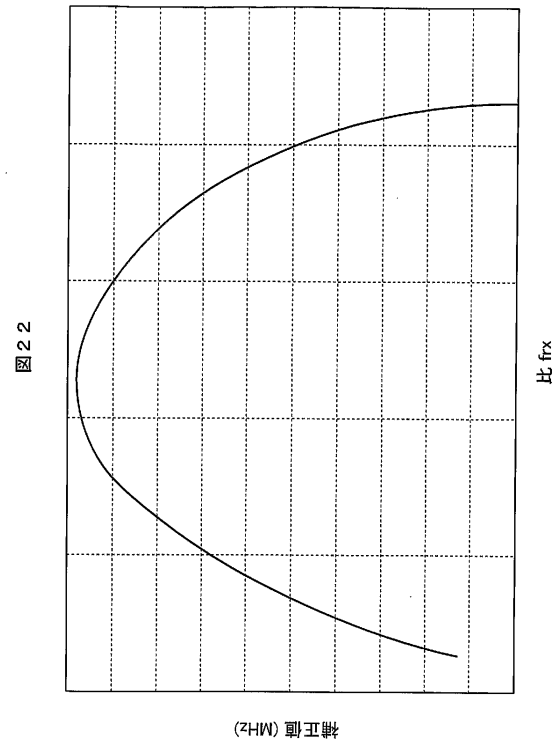
【図 20】



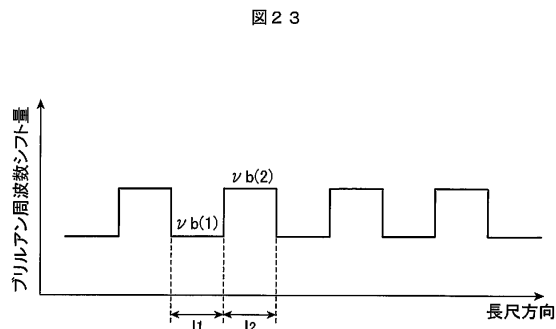
【図 2 1】



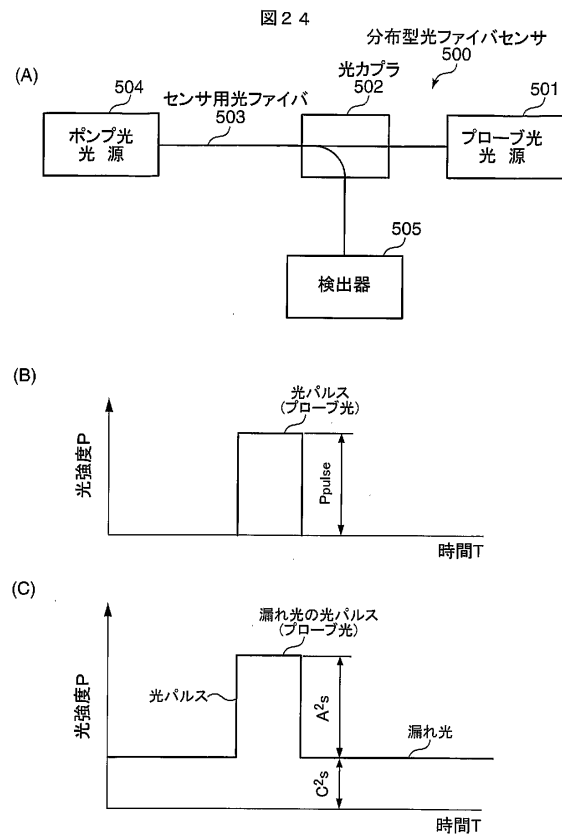
【図 2 2】



【図 2 3】

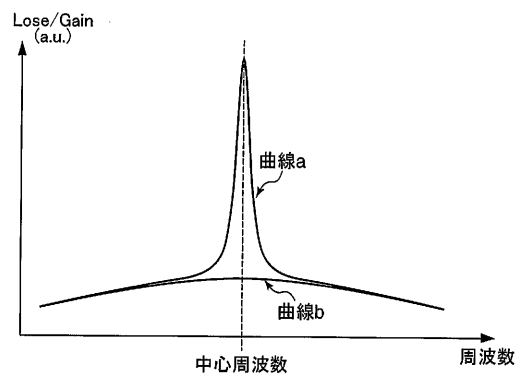


【図 2 4】



【図 2 5】

図 2 5



フロントページの続き

- (72)発明者 岸田 欣増
兵庫県神戸市中央区栄町通1丁目1番24号 403A号室 ニューブレクス株式会社内
- (72)発明者 李 哲賢
兵庫県神戸市中央区栄町通1丁目1番24号 403A号室 ニューブレクス株式会社内
- (72)発明者 林 縄續
兵庫県神戸市中央区栄町通1丁目1番24号 403A号室 ニューブレクス株式会社内

審査官 岡田 卓弥

- (56)参考文献 特表2001-507446 (JP, A)
特開平11-183135 (JP, A)
特開平10-111171 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B11/16
G01D 5/353
G01K11/12 -11/08