

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5152540号  
(P5152540)

(45) 発行日 平成25年2月27日(2013.2.27)

(24) 登録日 平成24年12月14日(2012.12.14)

(51) Int. Cl. F I  
**GO 1 K 11/12 (2006.01)** GO 1 K 11/12 F  
**GO 1 K 15/00 (2006.01)** GO 1 K 15/00

請求項の数 4 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2010-243399 (P2010-243399)	(73) 特許権者	000006507
(22) 出願日	平成22年10月29日(2010.10.29)		横河電機株式会社
(65) 公開番号	特開2012-27001 (P2012-27001A)		東京都武蔵野市中町2丁目9番32号
(43) 公開日	平成24年2月9日(2012.2.9)	(72) 発明者	阿川 久夫
審査請求日	平成23年10月6日(2011.10.6)		東京都武蔵野市中町2丁目9番32号 横河電機株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願2010-141538 (P2010-141538)	審査官	平野 真樹
(32) 優先日	平成22年6月22日(2010.6.22)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ温度分布測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光ファイバをセンサとして用い、ラマン後方散乱光を利用して前記光ファイバに沿った温度分布を測定するように構成された光ファイバ温度分布測定装置において、

前記センサとして用いる光ファイバの近傍に設けた基準温度測定手段と、

装置内部に設けられている温度基準部に用いる光ファイバのラマンシフト周波数、前記センサとして用いる光ファイバのラマンシフト周波数および前記基準温度測定手段で測定した真の温度をパラメータとする補正式を用いて測定温度を補正する温度補正手段、を設けたことを特徴とする光ファイバ温度分布測定装置。

【請求項2】

前記補正式として以下の式を用いることを特徴とする請求項1記載の光ファイバ温度分布測定装置。

$$T_r = \omega_1 \frac{1}{\left( \frac{\omega_r}{T} - \frac{\omega_r}{T_1} + \frac{\omega_1}{T_1} \right)}$$

$\omega_1$  : 光ファイバ3の真のラマンシフト周波数(rad/s)

$\omega_r$  : 温度基準部9の真のラマンシフト周波数(rad/s)

T : 補正前の装置で計算した温度(K)

$T_1$  : 基準温度計11で測定した基準温度(K)

$T_1'$  : 基準温度が  $T_1$  の時の補正前の測定温度 (K)

$T_r$  : 補正後の温度 (K)

【請求項 3】

前記補正式として請求項 2 の補正式とともに以下の式を用いることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバ温度分布測定装置。

$$\omega_1 = \omega_r \times \frac{T_2' - T_1'}{T_1' \times T_2'} \times \frac{T_2 \times T_1}{T_2 - T_1}$$

$\omega_1$  : 光ファイバ 3 の真のラマンシフト周波数 (rad/s)

$\omega_r$  : 温度基準部 9 に用いる光ファイバの真のラマンシフト周波数 (rad/s)

$T_1, T_2$  : 基準温度計 11 で測定した基準温度 (K)

$T_1', T_2'$  : 基準温度が  $T_1, T_2$  の時の補正前の測定温度 (K)

【請求項 4】

前記温度補正手段は、前記基準温度測定手段の温度測定データをリアルタイムに取り込むことを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれかに記載の光ファイバ温度分布測定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、後方ラマン散乱光を利用した光ファイバ温度分布測定装置に関し、詳しくは、温度補正の改善に関する。

【背景技術】

【0002】

光ファイバをセンサとして用いた分布型測定装置の一種に、光ファイバに沿った温度分布を測定するように構成された温度測定装置がある。この技術は光ファイバ内で発生する後方散乱光を利用している。

【0003】

後方散乱光には、レイリー散乱光、ブリルアン散乱光、ラマン散乱光などがあるが、温度測定には温度依存性の高い後方ラマン散乱光が利用され、この後方ラマン散乱光を波長分波して測定を行う。後方ラマン散乱光には、入射光の波長に対して短い波長側に発生するアンチストークス光 AS と、長い波長側に発生するストークス光 ST がある。

【0004】

光ファイバ温度分布測定装置は、これらアンチストークス光の強度  $I_{as}$  とストークス光の強度  $I_{st}$  とを測定してその強度比から温度を算出し、光ファイバに沿った温度分布を表示するものであり、プラント設備の温度管理、防災関連の調査・研究、発電所や大型建築物の空調関連などの分野で利用されている。

【0005】

図 5 は、光ファイバ温度分布測定装置の基本構成例を示すブロック図である。図 5 において、光源 1 は光分波器 2 の入射端に接続され、光分波器 2 の入出射端には光ファイバ 3 が接続され、光分波器 2 の一方の出射端には光電変換器（以下 O / E 変換器という）4 st が接続され、光分波器 2 の他方の出射端には O / E 変換器 4 as が接続されている。

【0006】

O / E 変換器 4 st の出力端子にはアンプ 5 st および A / D 変換器 6 st を介して演算制御部 7 に接続され、O / E 変換器 4 as の出力端子にはアンプ 5 as および A / D 変換器 6 as を介して演算制御部 7 に接続されている。なお、演算制御部 7 は、パルス発生部 8 を介して光源 1 に接続されている。

【0007】

光源 1 としてはたとえばレーザダイオードが用いられ、パルス発生部 8 を介して入力される演算制御部 7 からのタイミング信号に対応したパルス光を出射する。光分波器 2 は、その入射端に光源 1 から出射されたパルス光が入射され、その入出射端から出射されたパルス光を光ファイバ 3 に出射し、光ファイバ 3 内で発生した後方ラマン散乱光をその入出

10

20

30

40

50

射端から入射してストークス光とアンチストークス光に波長分離する。光ファイバ3は、その入射端から光分波器2から出射されたパルス光を入射し、光ファイバ3内で発生した後方ラマン散乱光をその入射端から光分波器2に向けて出射する。

【0008】

O/E変換器4stおよび4asとしてはたとえばフォトダイオードが用いられ、O/E変換器4stには光分波器2の一方の出射端から出射されたストークス光が入射され、O/E変換器4asには光分波器2の他方の出射端から出射されたアンチストークス光が入射されて、それぞれ入射光に対応する電気信号を出力する。

【0009】

アンプ5stおよび5asは、O/E変換器4stおよび4asから出力された電気信号をそれぞれ増幅する。A/D変換器6stおよび6asは、アンプ5stおよび5asから出力された信号をそれぞれデジタル信号に変換する。

【0010】

演算制御部7は、A/D変換器6stおよび6asから出力されたデジタル信号に基づいて後方散乱光の2成分、すなわち、ストークス光とアンチストークス光の強度比から温度を演算し、その時系列に基づいて光ファイバ3に沿った温度分布を表示手段(図示せず)に表示する。なお、演算制御部7にはあらかじめ、強度比と温度の関係がテーブルや式の形で記憶されている。また、演算制御部7は、光源1にタイミング信号を送り、光源1から出射される光パルスのタイミングを制御する。

【0011】

次に温度分布測定の原理を説明する。ストークス光およびアンチストークス光の信号強度を光源1における発光タイミングを基準にした時間の関数として表すと、光ファイバ3中の光速が既知であるので、光源1を基準にして光ファイバ3に沿った距離の関数に置き換えることができる。すなわち、横軸を距離とし、光ファイバの各距離地点で発生したストークス光およびアンチストークス光の強度、つまり距離分布とみなすことができる。

【0012】

一方、アンチストークス光強度 $I_{as}$ とストークス光強度 $I_{st}$ はいずれも光ファイバ3の温度に依存し、さらに、両光の強度比 $I_{as}/I_{st}$ も光ファイバ3の温度に依存する。したがって、強度比 $I_{as}/I_{st}$ が分かればラマン散乱光が発生した箇所の温度を知ることができる。ここで、強度比 $I_{as}/I_{st}$ は距離 $x$ の関数 $I_{as}(x)/I_{st}(x)$ であるから、この強度比 $I_{as}(x)/I_{st}(x)$ から光ファイバ3に沿った温度分布 $T(x)$ を求めることができる。

【0013】

図6は従来の光ファイバ温度分布測定装置の一例を示すブロック図であり、図5と共通する部分には同一の符号を付けている。

【0014】

図6において、光分波器2と光ファイバ3との間には数十m巻回された光ファイバよりなる温度基準部9がコネクタ接続部13を介して設けられていて、この温度基準部9には実際の温度を測定するためのたとえば白金測温抵抗体よりなる温度計10が設けられている。この温度計10の出力信号は、演算制御部7に入力されている。なお、温度センサとして用いる光ファイバ3の近傍にも、実際の温度を測定するためのたとえば白金測温抵抗体よりなる基準温度計11が設けられている。

【0015】

このような構成において、光ファイバ3のある区間の温度が $T(K)$ の時、温度が $T(K)$ の位置から後方散乱されるアンチストークス光(AS)とストークス光(ST)との強度比は、(1)式で求められる。

【0016】

$$\frac{I_{as}}{I_{st}} = G_{as} \times \left( \frac{\omega_0 + \omega_r}{\omega_0 - \omega_r} \right)^4 \times \exp\left( -\frac{h\omega_r}{2\pi kT} \right) \quad (1)$$

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 7 】

- $G_{as}$  : アンチストークス(AS)とストークス(ST)測定系の利得の比  
 $\omega_0$  : 光源 1 の光周波数  
 $\omega_r$  : 光ファイバ 3 のラマンシフト周波数 (rad/s)  
 $h$  : プランク定数 ( $6.626 \times 10^{-34}$  Js)  
 $k$  : ボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>)

ここで、

## 【 0 0 1 8 】

$$L_n = G_{as} \times \left( \frac{\omega_0 + \omega_r}{\omega_0 - \omega_r} \right)^4 \quad (2)$$

10

## 【 0 0 1 9 】

とした場合、実際のシステムでは  $L_n$  は未知であるが、この値は、温度基準部 9 に設けられている温度計 10 の温度データから以下のように求めることができる。

## 【 0 0 2 0 】

温度基準部 9 に設けられている温度計 10 の温度を  $T_0$ 、温度基準部 9 に用いる光ファイバから後方散乱されるアンチストークス光とストークス光の強度比  $I_{as}/I_{st}$  を  $G_0(T_0)$  とすると、式 (1)、(2) から、

## 【 0 0 2 1 】

$$L_n = G_0(T_0) \times \exp\left(\frac{h\omega_r}{2\pi kT_0}\right) \quad (3)$$

20

## 【 0 0 2 2 】

となる。

この値を使い、光ファイバ 3 の温度が  $T$  (K) の位置から後方散乱される AS と ST の光強度比 ( $I_{as}/I_{st}$ ) から温度  $T$  を求める式は、式 (1)、(3) から、

## 【 0 0 2 3 】

$$T = \frac{h\omega_r}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log\left(\frac{I_{as}}{I_{st}}\right) + \log(L_n)} = \frac{h\omega_r}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log\left(\frac{I_{as}}{I_{st}}\right) + \log(G_0(T_0)) + \frac{h\omega_r}{2\pi kT_0}} \quad (4)$$

30

## 【 0 0 2 4 】

となる。

なお、ここでは、光ファイバ 3 のラマンシフト周波数と温度基準部 9 に用いる光ファイバのラマンシフト周波数は同一と仮定している。

実際には装置本体と光ファイバ 3 の接続部分 13 での損失や、光ファイバ 3 の真のラマンシフト周波数と計算に使っているラマンシフト周波数との違いによる誤差が生じるため、光ファイバ 3 の近傍に配置した基準温度計 11 を使って真の温度を測定しておき、温度計算に用いるラマンシフト周波数 ( $\omega_r$ ) の微調整や、式 (4) で求めた温度  $T$  に対し係数やオフセットによる補正を行っている。

40

また、実際には、アンチストークス光とストークス光が光ファイバを伝搬する際の光ファイバ損失が若干異なるため、この損失差に対する補正があらかじめ行われているものとする。

## 【 0 0 2 5 】

係数およびオフセット補正の例としては次のような方法がある。

$$T_r = A \times T + C \quad (5)$$

$T_r$  : 補正後の温度 (K)

$T$  : 補正前の温度 (K)

$A$  : 係数補正值

$C$  : オフセット補正值

50

## 【0026】

また、接続部13での損失や温度基準部9に用いる光ファイバと、センサとして用いる光ファイバ3のラマンシフト周波数の違いによる誤差を無くすために、たとえば特許文献1に開示されているように、温度計算のための基準となる温度基準部を装置外部の測定用光ファイバの経路に設ける方法が提案されている。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0027】

【特許文献1】特開2008-249515号公報

## 【発明の開示】

10

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0028】

しかし、図6に示す従来の構成によれば、ラマンシフト周波数の微調整を行いフィッティングする場合、計算に使うラマンシフト周波数を微調整しながら温度を再測定するという繰り返しの作業が必要であり、校正に多くの時間を要することになる。

## 【0029】

また、ラマンシフト周波数の微調整を行っても、温度基準部9に用いている光ファイバと温度センサとして用いる光ファイバ3のラマンシフト周波数が異なることによる温度計算誤差が発生してしまう。

## 【0030】

20

また、式(5)のように係数やオフセットによる補正を行う場合、ラマン散乱強度と温度の関係が非線形であるのに対し、線形での補正を行うことになるため、補正に使った温度から離れた温度測定では誤差が生じてしまう。

## 【0031】

さらに、特許文献1に開示されているように、温度計算のための基準となる温度基準部を装置本体外部の測定用光ファイバの経路に設ける場合には、それらの構成が複雑になるとともに、温度基準部を測定用光の設置現場で構築しなければならない、温度補正に関わる作業が複雑になってしまうという問題もある。

## 【0032】

本発明はこれら課題を解決するもので、その目的は、温度補正処理を簡略化するとともに補正精度の向上が図れる光ファイバ温度分布測定装置を提供することにある。

30

## 【課題を解決するための手段】

## 【0033】

このような課題を達成するために、本発明のうち請求項1記載の発明は、光ファイバをセンサとして用い、ラマン後方散乱光を利用して前記光ファイバに沿った温度分布を測定するように構成された光ファイバ温度分布測定装置において、前記センサとして用いる光ファイバの近傍に設けた基準温度測定手段と、装置内部に設けられている温度基準部に用いる光ファイバのラマンシフト周波数、前記センサとして用いる光ファイバのラマンシフト周波数および前記基準温度測定手段で測定した真の温度値をパラメータとする補正式を用いて測定温度を補正する温度補正手段、  
を設けたことを特徴とする。

40

## 【0034】

請求項2記載の発明は、請求項1記載の光ファイバ温度分布測定装置において、前記補正式として以下の式を用いることを特徴とする。

$$T_r = \omega_1 \frac{1}{\left( \frac{\omega_r}{T} - \frac{\omega_r}{T_1'} + \frac{\omega_1}{T_1} \right)}$$

$\omega_1$  : 光ファイバ3の真のラマンシフト周波数(rad/s)

50

$\omega_r$  : 温度基準部 9 に用いる光ファイバの真のラマンシフト周波数 (rad/s)

$T$  : 補正前の装置で計算した温度 (K)

$T_1$  : 基準温度計 11 で測定した基準温度 (K)

$T_1'$  : 基準温度が  $T_1$  の時の補正前の測定温度 (K)

$T_r$  : 補正後の温度 (K)

【0035】

請求項 3 記載の発明は、

請求項 1 記載の光ファイバ温度分布測定装置において、

前記補正式として請求項 2 の補正式とともに以下の式を用いることを特徴とする。

$$\omega_1 = \omega_r \times \frac{T_2' - T_1'}{T_1' \times T_2'} \times \frac{T_2 \times T_1}{T_2 - T_1}$$

10

$\omega_1$  : 光ファイバ 3 の真のラマンシフト周波数 (rad/s)

$\omega_r$  : 温度基準部 9 の真のラマンシフト周波数 (rad/s)

$T_1, T_2$  : 基準温度計 11 で測定した基準温度 (K)

$T_1', T_2'$  : 基準温度が  $T_1, T_2$  の時の補正前の測定温度 (K)

【0036】

請求項 4 記載の発明は、

請求項 1 から 3 のいずれかに記載の光ファイバ温度分布測定装置において、

前記温度補正手段は、前記基準温度測定手段の温度測定データをリアルタイムに取り込むことを特徴とする。

20

【発明の効果】

【0037】

本発明によれば、温度校正処理を簡略化するとともに、高精度の温度補正が行える光ファイバ温度分布測定装置を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【0038】

【図 1】本発明の一実施例を示すブロック図である。

【図 2】演算制御部 7 と温度補正部 12 の具体例を示すブロック図である。

【図 3】本発明の補正式による温度補正の効果例を示す説明図である。

30

【図 4】本発明の他の実施例を示すブロック図である。

【図 5】光ファイバ温度分布測定装置の基本構成例を示すブロック図である。

【図 6】従来の光ファイバ温度分布測定装置の一例を示すブロック図である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0039】

以下、本発明の実施の形態について、図面を用いて詳細に説明する。図 1 は本発明の一実施例を示すブロック図であり、図 6 と共通する部分には同一の記号を付して重複する説明は省略する。図 1 と図 6 の相違点は、図 1 では演算制御部 7 に温度補正部 12 が接続されていることである。

【0040】

40

温度補正部 12 は、温度センサとして用いる光ファイバ 3 の任意の位置の近傍に設けられた基準温度計 11 の温度測定データと本発明による補正式を用いて装置本体の演算制御部 7 で演算される温度に対する補正を行い、高精度の温度測定結果を出力する。

【0041】

以下の説明では、温度基準部 9 に用いる光ファイバおよび光ファイバ 3 のラマンシフト周波数が異なる場合、さらに、両者の接続部 13 がアンチストークス光とストークス光で異なる損失値を有する場合を考える。

温度補正部 12 による温度補正は、以下の手順で行う。

まず、従来と同様に、アンチストークス光 AS とストークス光 ST の強度比と装置本体に内蔵された温度基準部 9 に設けられている温度計 10 の測定データを用い、式 (4) に

50

基づき温度  $T$  を求める。この時、式 (4) の計算の際に用いる光ファイバ 3 のラマンシフト周波数として、温度基準部 9 に用いる光ファイバのラマンシフト周波数  $\omega_r$  を用いる。

【0042】

次に、式 (4) により求めた温度  $T$  に対し、以下の補正式を用いて補正を行う。

【0043】

$$T_r = \omega_1 \frac{1}{\left( \frac{\omega_r}{T} - \frac{\omega_r}{T_1'} + \frac{\omega_1}{T_1} \right)} \quad (6)$$

【0044】

ここで、 $\omega_1$  は温度センサとして用いる光ファイバ 3 の真のラマンシフト周波数に相当し、基準温度計 11 の近傍にある光ファイバの一定区間 (数 m ~ 数十 m) の温度を 2 点 ( $T_1, T_2$ ) 設定し、その際に、式 (4) で得られる温度  $T_1', T_2'$  を用いて式 (7) で演算される値を用いる。

【0045】

$$\omega_1 = \omega_r \times \frac{T_2' - T_1'}{T_1' \times T_2'} \times \frac{T_2 \times T_1}{T_2 - T_1} \quad (7)$$

【0046】

- $\omega_1$  : 光ファイバ 3 の真のラマンシフト周波数 (rad/s)
- $\omega_r$  : 温度基準部 9 に用いる光ファイバの真のラマンシフト周波数 (rad/s)
- $T$  : 補正前の装置で計算した温度 (K)
- $T_1, T_2$  : 基準温度計 11 で測定した基準温度 (K)
- $T_1', T_2'$  : 基準温度が  $T_1, T_2$  の時の補正前の測定温度 (K)
- $T_r$  : 補正後の温度 (K)

基準温度計 11 の近傍にある光ファイバの一定区間 (数 m ~ 数十 m) の温度を 2 点 ( $T_1, T_2$ ) 設定する方法としては、気温の変化の少ない 2 つの時間帯を利用したり、一定区間を氷水に浸すことなどで実現できる。なお、このプロセスは常に必要なものではなく、基本的には 1 回のみでよい。

【0047】

上記式 (7) は基準温度計 11 の近傍にある光ファイバの一定区間の温度を 2 点設定して光ファイバ 3 の真のラマンシフト周波数を求める方法であるが、温度センサとして用いる光ファイバ 3 の真のラマンシフト周波数  $\omega_1$  があらかじめ分かっている場合は、式 (7) による  $\omega_1$  の計算は不要となり、式 (6) により  $T_1$  および  $T_1'$  のみを使用した 1 点温度での校正が可能となる。

【0048】

以上のように式 (6)、(7) を使って補正することで、ラマンシフト周波数の微調整や、係数、オフセットによる調整が不要となり、パラメータの追い込みも不要で、校正が短時間で行える。また校正による誤差も少なくなる。以下に、式 (6)、(7) に基づく補正について説明する。

【0049】

式 (1) から、温度基準部 9 に用いられている光ファイバから後方散乱されるアンチストークス光 (AS) とストークス光 (ST) との強度比は、以下の式で表せる。

【0050】

$$\frac{I_{as}}{I_{st}} = G_0(T_0) = L_r \times \exp\left(\frac{-h\omega_r}{2\pi kT_0}\right) \times G_{as} \quad (8)$$

【0051】

ここで、

$G_0(T_0)$  : 温度基準部 9 の温度が  $T_0$  の時に温度基準部 9 に用いる光ファイバから後

10

20

30

40

50

方散乱されるAS光とST光の強度比

$G_{as}$  : ASとST測定系の利得比  
 $\omega_0$  : 光源1の光周波数  
 $\omega_r$  : 温度基準部9に用いる光ファイバの真のラマンシフト周波数(rad/s)

であり、 $L_r$ は式(9)で表される。

【0052】

$$L_r = \left( \frac{\omega_0 + \omega_r}{\omega_0 - \omega_r} \right)^4 \quad (9)$$

【0053】

一方、演算制御部7で、光ファイバ3の任意の位置から後方散乱されるAS、STの光強度比 $\{(I_{as}/I_{st}) = G\}$ から温度Tを計算するのにあたっては、式(4)に基づく式(10)で計算される。

【0054】

$$T = \frac{h\omega_d}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log(G) + \log(G_0(T_0)) + \frac{h\omega_d}{2\pi kT_0}} \quad (10)$$

【0055】

ここで、 $\omega_d$ は演算制御部7で温度計算パラメータとして使用したラマンシフト周波数である。

【0056】

温度センサとして用いる光ファイバ3の任意の位置の温度が $T_r$ の時、その位置において後方散乱されるアンチストークス光とストークス光の光強度比 $\{(I_{as}/I_{st}) = G_1(T_r)\}$ は式(11)のようになる。

【0057】

$$G_1(T_r) = L_1 \times \exp\left(\frac{-h\omega_1}{2\pi kT_r}\right) \times G_{as} \times \Delta G_c \quad (11)$$

【0058】

ここで、式(11)における $L_1$ は式(12)で表される。

【0059】

$$L_1 = \left( \frac{\omega_0 + \omega_1}{\omega_0 - \omega_1} \right)^4 \quad (12)$$

【0060】

式(12)において、

$\omega_1$  : 温度センサとして用いる光ファイバ3の真のラマンシフト周波数(rad/s)

$G_c$  : 装置と光ファイバ3を接続するコネクタ13のAS光とST光における損失比である。

【0061】

式(10)、(11)より、光ファイバ3の任意の位置の温度が $T_r$ の時に演算制御部7で計算されるその位置の温度Tは、式(13)のように表せる。

【0062】

$$T = \frac{h\omega_d}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log\{G_1(T_r)\} + \log(G_0(T_0)) + \frac{h\omega_d}{2\pi kT_0}}$$

【0063】

10

20

30

40



$$= \frac{h\omega_d}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log(L_1) - \log(G_{as}) - \log(\Delta G_c) + \frac{h\omega_1}{2\pi kT_r} + \log(L_r) + \log(G_{as}) - \frac{h\omega_r}{2\pi kT_0} + \frac{h\omega_d}{2\pi kT_0}}$$

【 0 0 6 4 】

$$= \frac{h\omega_d}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log(L_1) - \log(\Delta G_c) + \frac{h\omega_1}{2\pi kT_r} + \log(L_r) - \frac{h}{2\pi kT_0}(\omega_r - \omega_d)} \quad (13)$$

【 0 0 6 5 】

式(13)から、装置内部の温度基準部9に用いる光ファイバの真のラマンシフト周波数( $\omega_r$ )と計算に用いるラマンシフト周波数( $\omega_d$ )が等しい場合、右辺の $T_0$ に関する項は消えて、温度センサとして用いる光ファイバ3の温度計算値は $T_0$ に依存しないことになる。従って、 $T_0$ が変動した場合でも式(13)から求められる温度測定値が変動しないようにするには、温度計算に用いるラマンシフト周波数として、本体温度基準部9に用いる光ファイバの真のラマンシフト周波数の値を使う必要がある。

10

【 0 0 6 6 】

装置内部の温度基準部9に用いる光ファイバのラマンシフト周波数が既知で、温度計算にはその真のラマンシフト周波数を用いるものとして、温度センサとして用いる光ファイバ3の温度校正について説明する。

20

【 0 0 6 7 】

式(13)において、 $\omega_d = \omega_r$ とすると、光ファイバ3の任意の位置の真の温度が $T_r$ の時のその位置の温度測定値 $T$ は以下ようになる。

【 0 0 6 8 】

$$T = \frac{h\omega_r}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log(L_1) + \log(L_r) - \log(\Delta G_c) + \frac{h\omega_1}{2\pi kT_r}} \quad (14)$$

【 0 0 6 9 】

式(14)から $T$ と $T_r$ の関係を逆に求めると式(15)のようになる。

30

【 0 0 7 0 】

$$T_r = \frac{h\omega_1}{2\pi k} \times \frac{1}{\frac{h\omega_r}{2\pi kT} + \log(L_1) - \log(L_r) + \log(\Delta G_c)} \quad (15)$$

【 0 0 7 1 】

式(15)は、演算制御部7で計算された温度 $T$ から真の温度 $T_r$ を導き出す式となる。ここで、 $X = -\log(L_1) + \log(L_r) - \log(\Delta G_c)$ とすると、 $X$ は光ファイバ3の近傍に設けられた基準温度計11の温度測定データから以下のように求めることができる。

【 0 0 7 2 】

光ファイバ3の任意の位置の真の温度 $T_r$ とそのときに演算制御部7で計算された温度 $T$ との関係は、式(14)を書き直すと式(16)のようになる。

40

【 0 0 7 3 】

$$T = \frac{h\omega_r}{2\pi k} \times \frac{1}{X + \frac{h\omega_1}{2\pi kT_r}} \quad (16)$$

【 0 0 7 4 】

基準温度計11で測定した基準温度が $T_1$ で、そのときの温度計算値が $T_1'$ であったとすると、 $X$ は式(16)から式(17)のように求められる。

50

【 0 0 7 5 】

$$X = \frac{h\omega_r}{2\pi kT_1'} - \frac{h\omega_1}{2\pi kT_1} \quad (17)$$

【 0 0 7 6 】

これら式(15)と式(17)を組み合わせることにより、式(6)に示した温度校正の演算式を以下に示すように導くことができる。

【 0 0 7 7 】

$$T_r = \frac{h\omega_1}{2\pi k} \times \frac{1}{\frac{h\omega_r}{2\pi kT} - X} \quad 10$$

【 0 0 7 8 】

$$= \frac{h\omega_1}{2\pi k} \times \frac{1}{\frac{h\omega_r}{2\pi kT} - \frac{h\omega_r}{2\pi kT_1'} + \frac{h\omega_1}{2\pi kT_1}}$$

【 0 0 7 9 】

$$T_r = \omega_1 \frac{1}{\left( \frac{\omega_r}{T} - \frac{\omega_r}{T_1'} + \frac{\omega_1}{T_1} \right)} \quad (18) \quad 20$$

【 0 0 8 0 】

T : 演算制御部7で計算した補正前の温度計算値(K)

T<sub>1</sub> : 基準温度計11で測定した基準温度(K)

T<sub>1</sub>' : 基準温度がT<sub>1</sub>の時の補正前の測定温度(K)

T<sub>r</sub> : 補正後の温度(K)

ω<sub>1</sub> : 光ファイバ3の真のラマンシフト周波数(rad/s)

ω<sub>r</sub> : 温度基準部9に用いる光ファイバの真のラマンシフト周波数(rad/s)

【 0 0 8 1 】

このように温度校正の式(18)を導く過程で、補正後の温度T<sub>r</sub>の計算がコネクタ13のAS光、ST光における損失比G<sub>c</sub>に無関係なことがわかる。これは、本補正によって、装置と温度センサとして用いる光ファイバ3の接続部であるコネクタ13における損失の影響も含まれて補正されていることを示している。

【 0 0 8 2 】

式(18)は基本的に1点での温度校正の式であって、温度基準部9に用いる光ファイバの真のラマンシフト周波数ω<sub>r</sub>およびセンサとして用いる光ファイバ3の真のラマンシフト周波数ω<sub>1</sub>があらかじめ分かっている場合に適用できる。ラマンシフト周波数ω<sub>1</sub>が分からない場合は、以下に説明するように、式(7)を使い2点での温度校正によりω<sub>1</sub>を計算すればよい。

【 0 0 8 3 】

式(1)から、式(19)が得られる。

【 0 0 8 4 】

$$\frac{h\omega_r}{2\pi kT} = -\log\left(\frac{I_{as}}{I_{st}}\right) + \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0 + \omega_r}{\omega_0 - \omega_r}\right)^4\right) \quad (19)$$

【 0 0 8 5 】

温度センサとして用いる光ファイバ3の真のラマンシフト周波数がω<sub>1</sub>で、光ファイバ3の任意の位置における真の温度がT<sub>1</sub>の時に、補正前の測定温度としてT<sub>1</sub>'と計算されたとすると、式(1)および式(19)より次式が成り立つ。

【 0 0 8 6 】

$$\frac{h \omega_r}{2\pi kT_1'} = -\log\left(\frac{I_{as}}{I_{st}}\right) + \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0 + \omega_r}{\omega_0 - \omega_r}\right)^4\right)$$

【 0 0 8 7 】

$$= \frac{h \omega_1}{2\pi kT_1'} - \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0 + \omega_1}{\omega_0 - \omega_1}\right)^4\right) + \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0 + \omega_r}{\omega_0 - \omega_r}\right)^4\right) \quad (20)$$

【 0 0 8 8 】

また、温度センサとして用いる光ファイバ3の真のラマンシフト周波数が  $\omega_1$  で、光ファイバ3の任意の位置における真の温度が  $T_2$  の時に補正前の測定温度として  $T_2'$  と計算されたとすると、同様に次式が成り立つ。

【 0 0 8 9 】

$$\frac{h \omega_r}{2\pi kT_2'} = \frac{h \omega_1}{2\pi kT_2'} - \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0 + \omega_1}{\omega_0 - \omega_1}\right)^4\right) + \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0 + \omega_r}{\omega_0 - \omega_r}\right)^4\right) \quad (21)$$

【 0 0 9 0 】

式(20)の両辺から式(21)の両辺を差し引くと、式(22)が得られる。

【 0 0 9 1 】

$$\frac{h \omega_r}{2\pi k} \left(\frac{1}{T_1'} - \frac{1}{T_2'}\right) = \frac{h \omega_1}{2\pi k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (22)$$

【 0 0 9 2 】

この式(22)から2点での温度校正時に用いる式(7)が導かれる。

【 0 0 9 3 】

$$\omega_1 = \omega_r \times \frac{T_2' - T_1'}{T_1' \times T_2'} \times \frac{T_2 \times T_1}{T_2 - T_1} \quad (23)$$

【 0 0 9 4 】

- $\omega_1$  : センサ部3の真のラマンシフト周波数(rad/s)
- $\omega_r$  : 温度基準部9に用いる光ファイバの真のラマンシフト周波数(rad/s)
- $T_1, T_2$  : 基準温度計11で測定した基準温度(K)
- $T_1', T_2'$  : 基準温度が  $T_1, T_2$  の時の補正前の装置で計算した温度(K)

【 0 0 9 5 】

図2は、演算制御部7と温度補正部12の具体例を示すブロック図である。

【 0 0 9 6 】

まず、演算制御部7は、式(4)で表される温度演算を行う温度演算部7aを中心に、プランク定数  $h$  およびボルツマン定数  $k$  を格納する定数格納部7b、装置内部の基準温度部9に用いる光ファイバのラマンシフト周波数  $\omega_r$  を格納する内部基準温度部ラマンシフト周波数格納部7c、装置内部の基準温度部9の温度測定値  $T_0$  を格納する内部基準温度格納部7d、装置内部の基準温度部9における光強度比  $G_0(T_0)$  を演算する内部基準温度部光強度比演算部7e、温度センサとして用いる光ファイバ3の光強度比  $I_{as}/I_{st}$  を演算するセンサ光強度比演算部7fなどで構成されている。

【 0 0 9 7 】

そして、温度補正部12は、式(5)および式(19)で表される温度補正演算を行う温度補正演算部12aを中心に、演算制御部7の温度演算部7aで演算された温度  $T$  を格納する演算温度格納部12b、装置内部の基準温度部9に用いる光ファイバのラマンシフト周波数  $\omega_r$  を格納する内部基準温度部ラマンシフト周波数格納部12c、温度センサとして用いる光ファイバ3の任意の位置の近傍に設けられた基準温度計11で測定した基準

10

20

30

40

50

温度  $T_1$ ,  $T_2$  を格納するセンサ基準温度格納部 1 2 d、基準温度が  $T_1$ ,  $T_2$  の時の補正前の測定温度  $T_1'$ ,  $T_2'$  を格納するセンサ基準温度部演算温度格納部 1 2 e、温度センサとして用いる光ファイバ 3 のラマンシフト周波数  $\nu_1$  を演算するセンサラマンシフト周波数演算部 1 2 f など構成されている。

【 0 0 9 8 】

図 3 は、本発明の補正式による温度補正の効果例を示す説明図である。この例で使用した補正式のパラメータは、以下のとおりである。

補正前の温度計算に用いたラマンシフト周波数  $\nu_1$ :  $72.4 \times 10^{12}$  (rad/s)

基準温度  $T_1, T_2$ : 295.85(K) (22.7( )), 521.25(K) (248.1( ))

温度補正前の温度計算値  $T_1', T_2'$ : 298.15(K) (25.0( )), 540.25 ( 267.1( ))

10

【 0 0 9 9 】

補正前の温度測定誤差は、実際の温度 1 0 0 で約 6 、 2 5 0 で約 1 9 と、大きくなっている。これは、装置と温度センサとして用いる光ファイバ 3 の接続損失による誤差および装置内部の温度基準部 9 に用いている光ファイバのラマンシフト周波数と温度センサとして用いる光ファイバ 3 のラマンシフト周波数との差によるものと考えられる。これに対し、本発明による補正式を用いた補正後の温度測定誤差は、実際の温度 1 0 0 で - 0 . 1 以下になって 2 5 0 ではほぼ 0 と小さくなり、大幅に改善されている。

【 0 1 0 0 】

なお、上記実施例では、温度センサとして用いる光ファイバ 3 の任意の位置の近傍に基準温度計 1 1 を配置し、その温度測定データをオフラインで取得して演算制御部 7 の計算パラメータとして使用する方法を示したが、装置本体と温度センサとして用いる光ファイバ 3 との接続損失が変動してしまうような場合には、図 4 に実線で示すように、基準温度計 1 1 のデータをリアルタイムに取り込み、温度補正式のパラメータをリアルタイムに変化させるようにしてもよい。

20

【 符号の説明 】

【 0 1 0 1 】

- 1 光源
- 2 光分波器
- 3 光ファイバ
- 4 st , 4 as O / E 変換器
- 6 st , 6 as A / D 変換器
- 7 演算制御部
  - 7 a 温度演算部
  - 7 b 定数格納部
  - 7 c 内部基準温度部ラマンシフト周波数格納部
  - 7 d 内部基準温度格納部
  - 7 e 内部基準温度部光強度比演算部
  - 7 f センサ光強度比演算部
- 8 パルス発生部
- 9 温度基準部
- 1 0 温度計
- 1 1 基準温度計
- 1 2 温度補正部
  - 1 2 a 温度補正演算部
  - 1 2 b 演算温度格納部
  - 1 2 c 内部基準温度部ラマンシフト周波数格納部
  - 1 2 d センサ基準温度格納部
  - 1 2 e センサ基準温度部演算温度格納部
  - 1 2 f センサラマンシフト周波数演算部

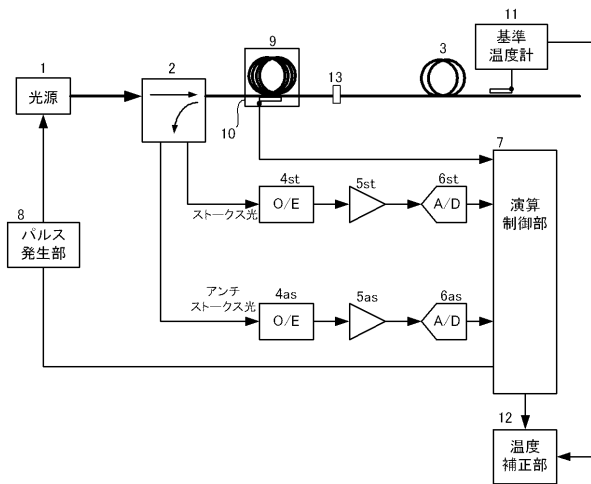
30

40

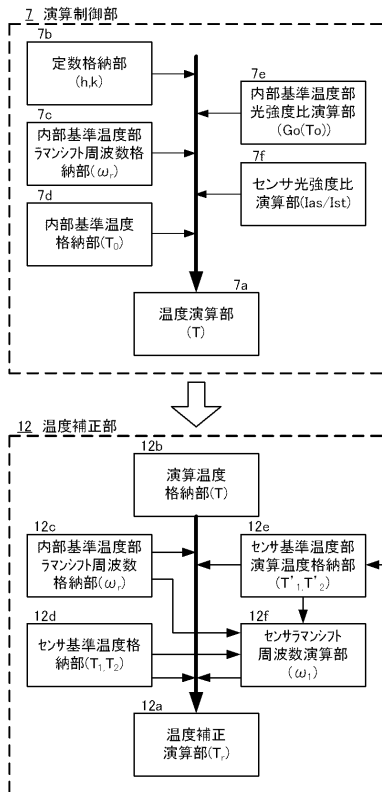
50

1 3 コネクタ接続部

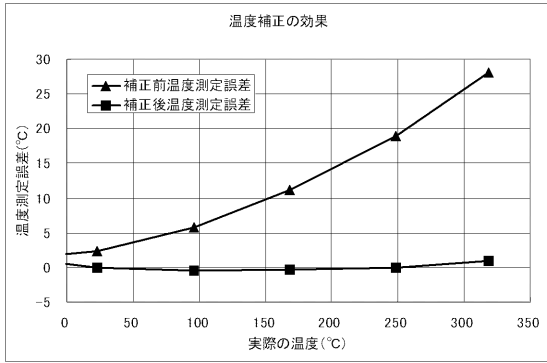
【図1】



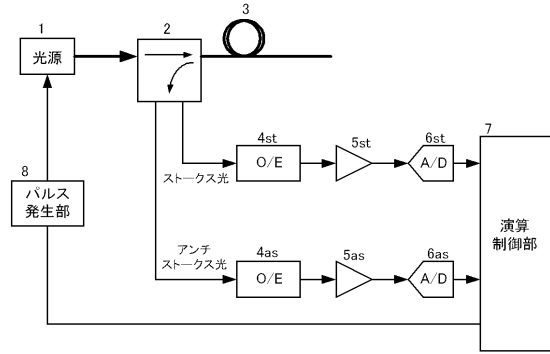
【図2】



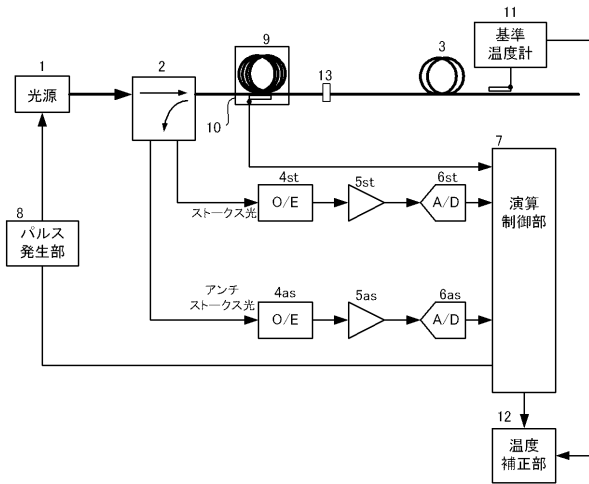
【図3】



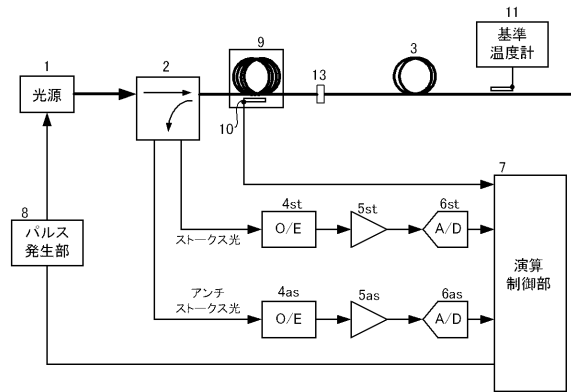
【図5】



【図4】



【図6】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2006-071532(JP,A)  
特開2006-023260(JP,A)  
特開2010-223831(JP,A)  
特開平07-218353(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
G01K 11/12  
G01K 15/00