

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5550384号
(P5550384)

(45) 発行日 平成26年7月16日 (2014. 7. 16)

(24) 登録日 平成26年5月30日 (2014. 5. 30)

(51) Int. Cl.

F 1

G O 1 B 9/02 (2006. 01)

G O 1 B 9/02

G O 1 B 11/00 (2006. 01)

G O 1 B 11/00

G

請求項の数 9 (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2010-43690 (P2010-43690)
(22) 出願日 平成22年3月1日 (2010. 3. 1)
(65) 公開番号 特開2011-179934 (P2011-179934A)
(43) 公開日 平成23年9月15日 (2011. 9. 15)
審査請求日 平成25年2月21日 (2013. 2. 21)

(73) 特許権者 000001007
キヤノン株式会社
東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(74) 代理人 100110412
弁理士 藤元 亮輔
(74) 代理人 100104628
弁理士 水本 敦也
(72) 発明者 小田 悠介
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
ヤノン株式会社内
(72) 発明者 蔵本 福之
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
ヤノン株式会社内

審査官 目黒 大地

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光波干渉計測装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第1基準波長と第2基準波長との間で周期的に波長走査をして光束を射出する波長可変レーザと、

第3基準波長の光束を射出する波長固定レーザと、

前記波長可変レーザから射出する前記光束の波長を前記第1基準波長および前記第2基準波長に設定可能な波長基準素子と、

前記波長可変レーザおよび前記波長固定レーザから射出した光束を参照光束および被検光束に分割する光束分割素子と、

参照面で反射した参照光束と被検面で反射した被検光束との干渉信号から位相を検出する位相検出部と、

前記第1基準波長を λ_1 、前記第2基準波長を λ_2 、前記第3基準波長を λ_3 、 $\lambda_1 \cdot \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ で表される合成波長を λ_{12} 、 $\lambda_2 \cdot \lambda_3 / |\lambda_2 - \lambda_3|$ で表される合成波長を λ_{23} として、

前記波長基準素子により波長を第1基準波長 λ_1 に設定して前記位相検出部を用いて検出された第1基準波長 λ_1 における前記干渉信号の位相と、前記波長可変レーザの波長を第1基準波長 λ_1 から第2基準波長 λ_2 へ走査して前記波長基準素子により波長を第2基準波長 λ_2 に設定して前記位相検出部を用いて検出された第2基準波長 λ_2 における前記干渉信号の位相と、の変化から合成波長 λ_{12} の干渉次数を求め、

合成波長 λ_{12} 、該求められた合成波長 λ_{12} の干渉次数及び合成波長 λ_{23} から求ま

10

20

る合成波長 λ_{23} の干渉次数を用いて第3基準波長 λ_3 の干渉次数を求め、

該求められた第3基準波長 λ_3 の干渉次数を用いて前記被検面と前記参照面との間の絶対距離を算出する解析装置と、を有することを特徴とする光波干渉計測装置。

【請求項2】

前記解析装置は、前記波長走査の際における前記第3基準波長の位相変化から前記被検面の相対変位を算出し、該被検面の相対変位による影響を受けないように合成波長 λ_{12} および合成波長 λ_{23} の干渉次数を補正することを特徴とする請求項1に記載の光波干渉計測装置。

【請求項3】

前記解析装置は、時刻 $t_0 \sim t_1$ 間における前記第1基準波長 λ_1 から前記第2基準波長 λ_2 への波長走査の際に、前記第3基準波長 λ_3 における前記干渉信号の位相変化から時刻 $t_0 \sim t_1$ 間における前記被検面の相対変位 $D(t_0 \sim t_1)$ を算出し、

以下の式(1)を用いて、時刻 t_0 における前記第1基準波長 λ_1 の前記干渉信号の位相 $\phi_a(t_0)$ を時刻 t_1 における位相 $\phi'_a(t_1)$ に補正し、

時刻 t_1 における前記第2基準波長 λ_2 の前記干渉信号の位相 $\phi_a(t_1)$ 及び以下の式(2)を用いて、合成波長 λ_{12} の干渉次数 $M_{12}(t_1)$ を算出することを特徴とする請求項1に記載の光波干渉計測装置。

$$\phi'_a(t_1) = 2\pi \cdot \text{mod} \left(\frac{\Phi_a(t_0)}{2\pi} + \frac{2n(\lambda_1)}{\lambda_1} \Delta D(t_0 \sim t_1), 1 \right) \quad \dots (1)$$

$$M_{12}(t_1) = \text{round}(\Phi_a(t_1)) - \text{round} \left(\Phi_a(t_0) + \frac{4\pi n}{\lambda_1} \Delta D(t_0 \sim t_1) \right) \quad \dots (2)$$

【請求項4】

前記解析装置は、時刻 t_1 において、前記第3基準波長 λ_3 の前記干渉信号の位相を $\phi_3(t_1)$ 、 $\lambda_1 \cdot \lambda_3 / |\lambda_1 - \lambda_3|$ で表される合成波長を λ_{13} 、前記第3基準波長 λ_3 、合成波長 λ_{12} 、および、合成波長 λ_{13} に対するそれぞれの大気屈折率を $n(\lambda_3)$ 、 $n_g(\lambda_1, \lambda_2)$ 、 $n_g(\lambda_1, \lambda_3)$ 、として、時刻 t_1 における前記参照面と前記被検面の間の絶対距離 $D(t_1)$ を以下の式により算出することを特徴とする請求項3に記載の光波干渉計測装置。

$$D(t_1) = \frac{\lambda_3}{2n(\lambda_3)} \left(\text{round} \left(\left(\text{round} \left(\left(M_{12}(t_1) + \frac{\phi_a(t_1) - \phi'_a(t_1)}{2\pi} \right) \frac{n_g(\lambda_1, \lambda_3) \Lambda_{12}}{n_g(\lambda_1, \lambda_2) \Lambda_{23}} - \frac{\phi_3(t_1) - \phi_a(t_1)}{2\pi} \right) + \frac{\phi_3(t_1) - \phi_a(t_1)}{2\pi} \right) \frac{n(\lambda_3) \Lambda_{23}}{n_g(\lambda_1, \lambda_3) \lambda_3} - \frac{\phi_3(t_1)}{2\pi} \right) + \frac{\phi_3(t_1)}{2\pi} \right)$$

【請求項5】

前記波長可変レーザは、前記第1基準波長で安定化される第1期間および前記第2基準波長で安定化される第2期間を有することを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項に記載の光波干渉計測装置。

【請求項6】

前記波長基準素子はエタロンであることを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項に記載の光波干渉計測装置。

【請求項7】

前記波長基準素子は周波数安定化光源であり、

前記波長可変レーザは、前記周波数安定化光源に周波数オフセットロックされて構成されていることを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項に記載の光波干渉計測装置。

10

20

30

40

50

【請求項 8】

前記解析装置は、前記波長基準素子により波長を第 2 基準波長 λ_2 に設定して前記位相検出部を用いて検出された第 2 基準波長 λ_2 における前記干渉信号の位相と、前記波長可変レーザの波長を第 2 基準波長 λ_2 から第 1 基準波長 λ_1 へ走査して前記波長基準素子により波長を第 1 基準波長 λ_1 に設定して前記位相検出部を用いて検出された第 1 基準波長 λ_1 における前記干渉信号の位相と、の変化から合成波長 λ_{12} の干渉次数を求め、
 $\lambda_1 \cdot \lambda_3 / |\lambda_1 - \lambda_3|$ で表される合成波長を λ_{13} として、合成波長 λ_{12} 、該求められた合成波長 λ_{12} の干渉次数、及び、合成波長 λ_{13} から求まる合成波長 λ_{13} の干渉次数を用いて第 3 基準波長 λ_3 の干渉次数を求めることを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の光波干渉計測装置。

10

【請求項 9】

光波干渉計測装置を用いて被検面を計測する計測方法において、
 前記光波干渉計測装置は、
 第 1 基準波長と第 2 基準波長との間で周期的に波長走査をして光束を射出する波長可変レーザと、
 第 3 基準波長の光束を射出する波長固定レーザと、
 前記波長可変レーザから射出する前記光束の波長を前記第 1 基準波長および前記第 2 基準波長に設定可能な波長基準素子と、
 前記波長可変レーザおよび前記波長固定レーザから射出した光束を参照光束および被検光束に分割する光束分割素子と、
 参照面で反射した参照光束と被検面で反射した被検光束との干渉信号から位相を検出する位相検出部と、を備え、
 前記計測方法は、
 前記第 1 基準波長を λ_1 、前記第 2 基準波長を λ_2 、前記第 3 基準波長を λ_3 、 $\lambda_1 \cdot \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ で表される合成波長を λ_{12} 、 $\lambda_2 \cdot \lambda_3 / |\lambda_2 - \lambda_3|$ で表される合成波長を λ_{23} として、前記波長基準素子により波長を第 1 基準波長 λ_1 に設定して前記位相検出部を用いて検出された第 1 基準波長 λ_1 における前記干渉信号の位相と、前記波長可変レーザの波長を第 1 基準波長 λ_1 から第 2 基準波長 λ_2 へ走査して前記波長基準素子により波長を第 2 基準波長 λ_2 に設定して前記位相検出部を用いて検出された第 2 基準波長 λ_2 における前記干渉信号の位相と、の変化から合成波長 λ_{12} の干渉次数を求めるステップと、
 合成波長 λ_{12} 、該求められた合成波長 λ_{12} の干渉次数及び合成波長 λ_{23} から求まる合成波長 λ_{23} の干渉次数を用いて第 3 基準波長 λ_3 の干渉次数を求めるステップと、
 該求められた第 3 基準波長 λ_3 の干渉次数を用いて前記被検面と前記参照面との間の絶対距離を算出するステップとを有することを特徴とする計測方法。

20

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光波干渉を用いて絶対距離を計測する光波計測装置に関する。

【背景技術】

40

【0002】

従来の絶対距離を計測する光波干渉計測装置として、波長走査型の光波干渉計測装置が知られている。一般に、波長走査による絶対距離計測は精度が低いため、固定波長による相対距離計測を組み合わせる精度を改善する方法が用いられる。これらの方式では、波長走査量の精度、固定波長の精度、相対距離計測時の位相計測精度が主要な精度要因となる。

【0003】

特許文献 1 には、単一の干渉信号強度を計測し、波長走査によって発生する干渉信号の強度変化から絶対距離を算出する F M ヘテロダイン法が開示されている。特許文献 2 には、F M ヘテロダイン法より高精度な絶対距離計測方式として 90 度位相のずれた 2 つの干

50

渉信号強度からリサージュ波形により位相計測を導入した方式が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特許第2725434号

【特許文献2】特許第2810956号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、従来の光波干渉計測装置において、絶対距離計測と相対距離計測とを組み合わせる十分な計測精度を得るには、大きな波長走査量が必要であった。大きな波長走査量を実現し、高速に絶対距離を計測しようとする場合には、以下の問題点がある。安価なDFBレーザを用いる場合、温度変動による波長走査によって大きな波長走査量は可能だが、追従に時間がかかるために高速に波長走査できない。この対策として、グレーティングの傾きを調整することによって高速に波長走査することが可能な外部共振器型LD等があるが、これらは高価である。また、被検面が変動している場合に干渉次数の決定が行えないため、絶対測長を行うには被検面を安定化させる複雑な処理が必要だった。

【0006】

そこで本発明は、簡易な構成で高速に絶対距離計測が可能な光波干渉計測装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の一側面としての光波干渉計測装置は、第1基準波長と第2基準波長との間で周期的に波長走査をして光束を射出する波長可変レーザと、第3基準波長の光束を射出する波長固定レーザと、前記波長可変レーザから射出する前記光束の波長を前記第1基準波長および前記第2基準波長に設定可能な波長基準素子と、前記波長可変レーザおよび前記波長固定レーザから射出した光束を参照光束および被検光束に分割する光束分割素子と、参照面で反射した参照光束と被検面で反射した被検光束との干渉信号から位相を検出する位相検出部と、前記第1基準波長を λ_1 、前記第2基準波長を λ_2 、前記第3基準波長を λ_3 、 $\lambda_1 \cdot \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ で表される合成波長を λ_{12} 、 $\lambda_2 \cdot \lambda_3 / |\lambda_2 - \lambda_3|$ で表される合成波長を λ_{23} として、前記波長基準素子により波長を第1基準波長 λ_1 に設定して前記位相検出部を用いて検出された第1基準波長 λ_1 における前記干渉信号の位相と、前記波長可変レーザの波長を第1基準波長 λ_1 から第2基準波長 λ_2 へ走査して前記波長基準素子により波長を第2基準波長 λ_2 に設定して前記位相検出部を用いて検出された第2基準波長 λ_2 における前記干渉信号の位相と、の変化から合成波長 λ_{12} の干渉次数を求め、合成波長 λ_{12} 、該求められた合成波長 λ_{12} の干渉次数及び合成波長 λ_{23} から求まる合成波長 λ_{23} の干渉次数を用いて第3基準波長 λ_3 の干渉次数を求め、該求められた第3基準波長 λ_3 の干渉次数を用いて前記被検面と前記参照面との間の絶対距離を算出する解析装置と、を有する。

【0008】

本発明の他の目的及び特徴は、以下の実施例において説明される。

【発明の効果】

【0009】

本発明によれば、簡易な構成で高速に絶対距離計測が可能な光波干渉計測装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】第1実施形態における光波干渉計測装置の構成図である。

【図2】第1実施形態における光源の波長の関係を示す図である。

【図3】第1実施形態における光源の波長の時間変化を示す図である。

10

20

30

40

50

【図４】第１、第２実施形態における計測方法のフローチャートである。

【図５】第１、第２実施形態における干渉次数 M_{12} の概念図である。

【図６】第２実施形態における光波干渉計測装置の構成図である。

【図７】第２実施形態における光源の波長の関係を示す図である。

【図８】第２実施形態における位相検出ユニットの構成図である。

【発明を実施するための形態】

【００１１】

以下、本発明の実施例について、図面を参照しながら詳細に説明する。各図において、同一の部材については同一の参照番号を付し、重複する説明は省略する。

〔第１実施形態〕

まず、本発明の第１実施形態における光波干渉計測装置について説明する。図１は、本実施形態における光波干渉計測装置５００の構成図である。光波干渉計測装置５００は、図１に示されるように、周期的に波長が走査される波長可変レーザ１と波長が固定されている波長固定レーザ２とを有する。波長可変レーザ１は、第１基準波長 λ_1 と第２基準波長 λ_2 との間で周期的に波長走査をして光束を射出する。波長固定レーザ２は、第３基準波長 λ_3 の光束を射出する。

【００１２】

また、光波干渉計測装置５００は、波長基準素子としてのガスセル３、波長基準素子としてのファブリペローエタロン４（エタロン）、および、光束分割素子としての偏光ビームスプリッタ２０を有する。波長基準素子は、波長可変レーザ１から射出する光束の波長を第１基準波長 λ_1 および第２基準波長 λ_2 に設定する。光束分割素子は、波長可変レーザ１および波長固定レーザ２から射出した光束を参照光束および被検光束に分割する。

【００１３】

さらに、光波干渉計測装置５００は、参照面６および被検面７と、参照面６と被検面７との光路差（参照光と被検光との光路差）による干渉信号の位相の検出部を有する。参照面６は参照光束を反射し、被検面７は被検光束を反射するように構成されている。また光波干渉計測装置５００は、参照面６と被検面７との間の絶対距離を算出する解析装置８を有する。参照面６と被検面７との間の絶対距離とは、参照面６の位置を基準とした被検面７の絶対位置であり、参照光束と被検光束との間の光路差から得られる。解析装置８は、第３基準波長 λ_3 、合成波長 λ_{12} 、 λ_{13} 、波長走査の際の位相変化量の整数成分、および、合成波長 λ_{12} 、 λ_{13} の干渉次数から逐次的に第３基準波長 λ_3 の干渉次数を決定し、被検面７と参照面６との間の絶対距離を算出する。なお、合成波長 λ_{12} （第１合成波長）は、 $\lambda_1 \cdot \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ で表され、合成波長 λ_{13} （第２合成波長）は、 $\lambda_1 \cdot \lambda_3 / |\lambda_1 - \lambda_3|$ で表される。

【００１４】

光波干渉計測装置５００は、以上の構成により、周期的に波長が走査される波長可変レーザ１と波長固定レーザ２とから生成される２つの合成波長を繋ぎ合わせることで、干渉次数を決定することができる。このため、波長可変レーザ１の波長走査量が大幅に低減される。これにより、レーザの電流変調による波長走査が可能となり、高速な絶対測長が実現される。

【００１５】

以下、本実施形態の光波干渉計測装置５００の構成について詳述する。波長可変レーザ１を射出した光束はビームスプリッタ５で分割される。また、波長可変レーザ１と異なる波長を有する波長固定レーザ２を射出した光束もビームスプリッタ５に入射し、光線軸が波長可変レーザ１と同軸になると同時に光束も分割される。ビームスプリッタ５で分割された光束の一方はファブリペローエタロン４を透過後、分光素子１２で波長可変レーザ１と波長固定レーザ２の光束それぞれに分離される。ファブリペローエタロン４を透過後の光量は、波長可変レーザ１の光束は検出器１３ａ、波長固定レーザ２の光束は検出器１３ｂでそれぞれ検出される。

【００１６】

10

20

30

40

50

さらに波長固定レーザ 2 の射出光束はガスセル 3 にも入射する。ここで、波長可変レーザ 1 と波長固定レーザ 2 はどちらも同様の DFB 半導体レーザを用いる。また、本実施形態では波長可変レーザ 1 と波長固定レーザ 2 は別素子のレーザとしているが、光通信に用いられる多波長光源と同様に複数の半導体レーザを 1 つの素子に集積した構造としても構わない。この場合にはコストおよび寸法の観点で有利である。ガスセル 3 透過後の波長固定レーザ 2 の射出光束は、検出器 15 で透過光量を検出される。本実施形態では、波長可変レーザ 1 の波長として $1.5 \mu\text{m}$ 近傍の波長を使用するものとして、ガスセル 3 として、アセチレンを用いる。 $1.5 \mu\text{m}$ 近傍の波長帯において使用可能なその他の封入ガスは一酸化炭素やシアン化水素等がある。それぞれのガスは波長帯域および中心波長精度が異なるため、必要に応じて選択すればよい。

10

【0017】

図 2 (a) はガスセル 3 の透過スペクトルを、図 2 (b) はファブリペローエタロン 4 の透過スペクトルを示しており、図 2 (c) は波長可変レーザ 1 と波長固定レーザ 2 のスペクトルを示す。

【0018】

波長制御装置 14 (レーザ制御ユニット) では、検出器 15 の信号を用いて波長固定レーザ 2 の波長をガスセル 3 の吸収線である第 3 基準波長 λ_3 に安定化するように制御を行う。波長制御装置 14 は同時に、検出器 13b の信号を用いてファブリペローエタロン 4 の透過スペクトルが第 3 基準波長 λ_3 に一致するようにファブリペローエタロン 4 の光路長の制御を行う。ここでファブリペローエタロン 4 の透過スペクトルは波長の絶対値が保証されていることが必要である。

20

【0019】

次に図 2 を参照して、第 1 基準波長 λ_1 又は第 2 基準波長 λ_2 における波長安定化制御について説明する。図 2 (b) に示されるように、ファブリペローエタロン 4 は均等な周波数間隔 FSR で周期的な透過特性を有し、前述の通り、その真空波長の絶対値は保証されている。第 1 基準波長 λ_1 としては、ファブリペローエタロン 4 の透過スペクトルの 1 つが用いられる。波長の安定化は、検出器 13a の透過強度が一定となるように、波長制御装置 14 が波長可変レーザ 1 の波長を調整することにより行われる。ファブリペローエタロン 4 への入射光量の変動が影響する場合には、入射光量をも検出してその補正を行う。波長を調整する方法としては、注入電流を変調する方法が用いられる。

30

【0020】

波長可変レーザ 1 は、第 1 基準波長 λ_1 に相当するファブリペローエタロン 4 の透過スペクトルに安定化されている。波長可変レーザ 1 の安定化制御が解除された後、電流変調によって第 2 基準波長 λ_2 に波長走査されることにより、波長可変レーザ 1 は第 2 基準波長 λ_2 に安定化される。第 2 基準波長 λ_2 から第 1 基準波長 λ_1 への波長走査も同様である。このように、波長可変レーザ 1 は、少なくとも 2 つの基準波長 (第 1 基準波長 λ_1 、第 2 基準波長 λ_2) のいずれかに安定化される。また、波長可変レーザ 1 は、第 1 基準波長 λ_1 と第 2 基準波長 λ_2 との間を周期的に且つ高速に走査する。図 3 は、本実施形態における波長可変レーザ 1 と波長固定レーザ 2 のそれぞれの波長の時間変化を示している。図 3 に示されるように、波長可変レーザ 1 は、第 1 基準波長 λ_1 で安定化される第 1 期間 (0 t_0) および第 2 基準波長 λ_2 で安定化される第 2 期間 (t_1 t_0') を有する。なお本実施形態では、ガスセル 3 に加えてファブリペローエタロン 4 を用いることにより基準波長の精度を向上させているが、以下のように次数決定のための精度条件を満たせば、ガスセル 3 のみを用いても構わない。

40

【0021】

位相計の計測精度を d とするとき、干渉次数 N_3 および $M_{2,3}$ を誤差なく決定するための条件は式 (1)、式 (2) で表される。

【0022】

50

リッタ20を透過した後、分光素子16に入射する。以下、参照面6で反射した光束を参照光束、被検面7で反射した光束を被検光束と称す。

【0029】

分光素子16に入射した第1基準波長 λ_1 の参照光束と被検光束の干渉信号は、位相検出器10bで検出される。また、第3基準波長 λ_3 の参照光束と被検光束の干渉信号は、位相検出器10aで検出される。このように、位相検出器10a、10b（位相検出部）は、参照面6で反射した参照光束と被検面7で反射した被検光束との干渉信号から位相を検出する。以下、分光素子16を介して位相検出器10a、10bで検出される干渉信号を計測信号と称す。計測信号は、第1光束と第2光束の干渉信号として両光束の周波数差に相当するビート信号である点は基準信号と同一であるが、干渉信号の位相は、被検光束と参照光束の光路長差に応じて、基準信号の位相とは異なる。

10

【0030】

距離計測干渉計100の光束分割素子として偏光成分で分割可能な偏光ビームスプリッタ20を用いることにより、参照面6と被検面7のそれぞれで反射する光束を偏光により分離することが可能となる。このため、直交する2つの偏光間で僅かに周波数シフト差を加えることで被検面7と参照面6との間のヘテロダイン検出が可能となり、高精度な位相計測が実現する。本実施形態では、距離計測干渉計100の光束分割素子として偏光ビームスプリッタ20が用いられているが、これに限定されるものではなく、無偏光ビームスプリッタを用いてもよい。この場合、無偏光ビームスプリッタと参照面6との間に $\lambda/8$ 板を配置し、参照面6での反射光束と被検面7での反射光束が再び重なった後に、偏光ビームスプリッタを介してそれぞれの偏光成分について強度検出する。検出される2つの干渉信号の位相は、それぞれ0°と90°シフトしている。これら2つの干渉信号から位相計測すればよい。この場合、構成は容易になるが、位相計測精度が低下するため、式(1)、(2)に基づき波長走査量の拡大等の対策が必要となる。

20

【0031】

また、被検面7の近傍には、被検面7の近傍における大気屈折率を決定するための環境計測ユニット9が配置される。環境計測ユニット9は、大気温度および気圧の計測センサを備えて構成される。大気屈折率の温度敏感度は1ppm/°C、気圧敏感度は0.3ppm/hPaであり、比較的安価な温度計や気圧計でも0.1ppm程度の屈折率を容易に保証することができる。なお本実施形態では、環境計測ユニット9で計測された大気屈折率から計測波長の補正を行っているが、被検光路の近傍に配置されたエアギャップのエタロン等を用いて大気波長を制御する場合には、屈折率の計測は不要となる。

30

【0032】

解析装置8は、基準信号、計測信号および環境計測ユニット9からの信号が入力され、被検面7と参照面6との間の絶対距離（被検光と参照光の光路差）を算出する。また解析装置8は、波長制御装置14に接続されており、計測フローに応じて波長可変レーザ1の波長制御を行う。なお本実施形態は、1つの光源ユニット200に対して複数の距離計測干渉計100を配置する場合、光源ユニット200とビームスプリッタ18との間で光束を分割することにより容易に対応可能である。

【0033】

次に、図4を参照して、本実施形態における計測方法について説明する。図4は、本実施形態における計測方法のフローチャートである。フローは大きく2つのループに分けられる。1つは波長制御ループであり、他の1つは計測ループである。また、計測ループの中には、ステップS101～S105によって高速に相対測長するフローと、ステップS101～S103、S110～S112、S105によって絶対測長するフローが含まれる。

40

【0034】

図3で示されるように、波長制御ループでは、波長可変レーザ1を第1基準波長 λ_1 と第2基準波長 λ_2 との間で走査し（ステップS401、S403）、その後、いずれか一方の基準波長に安定化制御する（ステップS402、S404）ことが繰り返される。ま

50

たステップ S 4 0 2、S 4 0 4 では、基準波長に制御完了後、波長走査完了フラグを計測ループ側のステップ S 1 0 3 へ送信する。ステップ S 1 0 3 では、波長走査完了フラグを受けて、波長走査が完了したか否かを判断する。

【 0 0 3 5 】

次に、図 4 に示される計測ループについて説明する。まずステップ S 1 0 1、S 2 0 1 において、第 1 基準波長 λ_1 および第 3 基準波長 λ_3 の場合に位相計測を行う。またステップ S 3 0 1 において、環境計測が行われる。このとき、環境計測ユニット 9 から被検光束の大気環境計測結果を解析装置 8 で取り込む。本実施形態では、被検光路の湿度は保証されているものとし、環境計測として大気温度 t と気圧 p を計測する。

10

【 0 0 3 6 】

位相計測とは、計測信号と基準信号の位相差を計測することであり、解析装置 8 において基準信号と計測信号の位相を位相計で計測し、それらの差分を算出することにより得られる。また、計測される位相は位相接続され、時間に対して連続的に変化する。

【 0 0 3 7 】

次に、計測される位相について数式を用いて説明する。まずパラメータを以下のように設定する。波長可変レーザ 1 を射出してから偏光ビームスプリッタ 1 9 までの被検光束と参照光束の光路長差を L_1 、偏光ビームスプリッタ 1 9 から位相検出器 1 0 a 又は位相検出器 1 0 b までの被検光束と参照光束の光路長差を $2n(\quad)D$ とする。ここで、 $n(\quad)$ は被検光束の光路の屈折率、 D は参照面と被検面との間の絶対距離である。以上のパラメータより、基準信号 I_{ref} と計測信号 I_{test} はそれぞれ式 (3) で表される。

20

【 0 0 3 8 】

【数 3】

$$\begin{cases} I_{ref} = I_0 \cos \left(2\pi \left(dvt + \frac{L_1}{\lambda_{11}} \right) \right) \\ I_{test} = I_0 \cos \left(2\pi \left(dvt + \frac{L_1}{\lambda_{11}} + \frac{2n(\lambda_{11})D}{\lambda_{11}} \right) \right) \end{cases} \quad \dots \quad (3)$$

【 0 0 3 9 】

式 (3) より、波長および参照面と被検面の絶対距離が時間的に連続的に変化する場合、時間に依存する位相 $\Phi(t)$ は式 (4) で表される。

30

【 0 0 4 0 】

【数 4】

$$\Phi(t) = 2\pi \cdot \frac{2n(\lambda(t))D(t)}{\lambda(t)} \quad \dots \quad (4)$$

【 0 0 4 1 】

また、ある時刻における位相を $0 \sim 2\pi$ の範囲で表すためには、式 (5) が用いられる。

【 0 0 4 2 】

【数 5】

$$\begin{aligned} \phi(t) &= 2\pi \cdot \text{mod} \left(\frac{\Phi(t)}{2\pi}, 1 \right) \\ &= 2\pi \cdot \text{mod} \left(\frac{2n(\lambda(t))D(t)}{\lambda(t)}, 1 \right) \quad \dots \quad (5) \end{aligned}$$

40

【 0 0 4 3 】

式 (5) より、ステップ S 2 0 1 で計測される波長可変レーザ 1 の位相 $\phi_a(t_0)$ は、式 (6) で表される。図 3 に示されるように、時刻 t_0 のときの波長可変レーザ 1 の波長は第 1 基準波長 λ_1 である。ここで、「 $\text{mod}(u, k)$ 」は第 1 引数 u の第 2 引数 k に対する剰余を表す。

【 0 0 4 4 】

50

【数 6】

$$\begin{aligned}\phi_a(t_0) &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Phi_a(t_0)}{2\pi}, 1\right) \\ &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{2n(\lambda_1)D(t_0)}{\lambda_1}, 1\right) \quad \dots \quad (6)\end{aligned}$$

【 0 0 4 5 】

さらに、このときの位相の整数成分は、式(4)を用いて式(7)で表される。ここで、「round()」は引数を整数に丸める関数を表す。

【 0 0 4 6 】

10

【数 7】

$$\Phi_a(t_0) \text{の整数成分} = \text{round}(\Phi_a(t_0)) \quad \dots \quad (7)$$

【 0 0 4 7 】

また、ステップ S 1 0 1 で計測される位相 $\phi_3(t_0)$ は式(8)で表される。ただし、図3に示されるように、波長固定レーザ2の波長は常に第3基準波長 λ_3 である。

【 0 0 4 8 】

【数 8】

$$\begin{aligned}\phi_3(t_0) &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Phi_3(t_0)}{2\pi}, 1\right) \\ &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{2n(\lambda_3)D(t_0)}{\lambda_3}, 1\right) \quad \dots \quad (8)\end{aligned}$$

20

【 0 0 4 9 】

ステップ S 1 0 2、S 2 0 2 にて、ステップ S 1 0 1、2 0 1 で求めた位相計測結果の履歴をそれぞれ残しておく。

【 0 0 5 0 】

ステップ S 1 0 3 にて、波長制御ループでのステップ S 4 0 2、S 4 0 4 から送信された波長走査完了フラグに基づいて、波長走査が完了したか否かが判断される。波長走査が未完の場合にはステップ S 1 0 4 へ進み、完了している場合にはステップ S 1 1 0 へ進む。

30

【 0 0 5 1 】

まず、ステップ S 1 0 3 にて波長走査が未完であると判断された場合について説明する。この場合、ステップ S 1 0 4 では、ステップ S 1 0 2 の位相接続された計測結果から、前回計測時の干渉次数 $N_3(i)$ と位相計測結果 $\phi_3(i)$ 、および、今回の位相計測結果 $\phi_3(i+1)$ を用いて、干渉次数 N_3 を式(9)にて算出する。

【 0 0 5 2 】

【数 9】

$$N_3(i+1) = N_3(i) + \text{round}(\Phi_3(i+1) - \Phi_3(i)) \quad \dots \quad (9)$$

【 0 0 5 3 】

そしてステップ S 1 0 5 において、第3基準波長 λ_3 の相対的な位相変化と、ステップ S 3 0 1 での環境計測結果から補正した大気波長を用いて、絶対距離 D を算出する。詳細は後述する。次の波長走査完了のフラグが確認されるまで、このように高速な相対測長と干渉次数 N_3 を用いて絶対距離 D を算出する。そして計測ループの最初へ戻る。

40

【 0 0 5 4 】

次に、ステップ S 1 0 3 にて波長走査が完了している場合について説明する。ステップ S 1 1 0 にて、2つの合成波長の位相計測時、および、波長走査時の位相変化量の計測時における被検面位置の変化を、第3基準波長 λ_3 の相対変位の算出結果を用いて補正する。すなわち、波長走査の際における第3基準波長 λ_3 の位相変化から被検面7の相対変位が算出され、被検面7の相対変位による影響を受けないように合成波長 λ_{12} 、 λ_{13} の干渉次数が補正される。時刻 t_1 での波長可変レーザ1の位相は、式(10)より求めら

50

れる。

【 0 0 5 5 】

【 数 1 0 】

$$\begin{aligned}\phi_a(t_1) &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Phi_a(t_1)}{2\pi}, 1\right) \\ &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{2n(\lambda_2)D(t_1)}{\lambda_2}, 1\right) \quad \dots \quad (10)\end{aligned}$$

【 0 0 5 6 】

さらに、このときの位相の整数成分は、式 (4) を用いて式 (1 1) で表される。

10

【 0 0 5 7 】

【 数 1 1 】

$$\Phi_a(t_1) \text{ の整数成分} = \text{round}(\Phi_a(t_1)) \quad \dots \quad (11)$$

【 0 0 5 8 】

一方、時刻 t_1 での波長固定レーザ 2 の位相 $\phi_3(t_1)$ は、式 (1 2) で表される。この位相結果を用いて時刻 t_1 の絶対距離 D が算出される。

【 0 0 5 9 】

【 数 1 2 】

$$\begin{aligned}\phi_3(t_1) &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Phi_3(t_1)}{2\pi}, 1\right) \\ &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{2n(\lambda_3)D(t_1)}{\lambda_3}, 1\right) \quad \dots \quad (12)\end{aligned}$$

20

【 0 0 6 0 】

また式 (4) より、時刻 $t_0 \sim t_1$ 間の連続的な位相変化から相対変位 $D(t_0 \sim t_1)$ は式 (1 3) によって算出される。

【 0 0 6 1 】

【 数 1 3 】

$$\Delta D(t_0 \sim t_1) = \frac{\lambda_3}{4\pi n(\lambda_3)} (\Phi_3(t_1) - \Phi_3(t_0)) \quad \dots \quad (13)$$

30

【 0 0 6 2 】

ステップ S 2 0 2 にて履歴に残された位相 $\phi_a(t_0)$ (計測位相結果) から、第 1 基準波長 λ_1 のままで、絶対距離 $D(t_1)$ のときの位相 $\phi'_a(t_1)$ へ式 (1 4) より補正する。

【 0 0 6 3 】

【 数 1 4 】

$$\phi'_a(t_1) = 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Phi_a(t_0)}{2\pi} + \frac{2n(\lambda_1)}{\lambda_1} \Delta D(t_0 \sim t_1), 1\right) \quad \dots \quad (14)$$

【 0 0 6 4 】

ステップ S 1 1 1 では、絶対距離 D の計測時刻 t_1 における干渉次数 $M_{12}(t_1)$ を算出する。

40

【 0 0 6 5 】

まず図 5 を参照して、波長走査時に被検面が変動しない場合 ($D(t) = \text{一定}$) の干渉次数 M_{12} について説明する。図 5 は、本実施形態における干渉次数 M_{12} の概念図である。被検面が変動しない場合、干渉次数 M_{12} は、時刻 t_1 での位相 $\phi_a(t_1)$ の整数成分から、時刻 t_0 での位相 $\phi_a(t_0)$ の整数成分を引くことにより算出される。しかし被検面が変動している場合には、それぞれの時刻において絶対距離 D が異なるため、干渉次数 M_{12} には被検面の変動による位相変化が含まれてしまう。そこで、絶対距離 $D(t_1)$ で第 1 基準波長 λ_1 と第 2 基準波長 λ_2 との間で波長走査を行った場合、干渉次数 $M_{12}(t_1)$ は式 (1 5) で表される補正式で算出される。

50

【 0 0 6 6 】

【 数 1 5 】

$$M_{12}(t_1) = \text{round}(\Phi_a(t_1)) - \text{round}\left(\Phi_a(t_0) + \frac{4\pi n}{\lambda_1} \Delta D(t_0 \sim t_1)\right) \quad \dots \quad (15)$$

【 0 0 6 7 】

式 (1 0)、式 (1 4) より、干渉次数 $M_{12}(t_1)$ は式 (1 6) で表される。ここで、 λ_{12} は第 1 基準波長 λ_1 と第 2 基準波長 λ_2 の合成波長である。また、 $n_g(\lambda_1, \lambda_2)$ は第 1 基準波長 λ_1 、第 2 基準波長 λ_2 に対する群屈折率を表す。

【 0 0 6 8 】

【 数 1 6 】

10

$$\begin{cases} M_{12}(t_1) = \frac{2n_g(\lambda_1, \lambda_2)D(t_1)}{\Lambda_{12}} - (\phi_a(t_1) - \phi'_a(t_1)) \\ \Lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_2 - \lambda_1|} \end{cases} \quad \dots \quad (16)$$

【 0 0 6 9 】

ステップ S 1 1 2 では、第 3 基準波長 λ_3 による干渉計測の干渉次数 $N_3(t_1)$ を算出する。まず、第 1 の絶対距離 $D(t_1)$ を、合成波長 λ_{12} を用いて式 (1 7) により算出する。

20

【 0 0 7 0 】

【 数 1 7 】

$$D(t_1) = \frac{\Lambda_{12}}{2n_g(\lambda_1, \lambda_2)} \left(M_{12}(t_1) + \frac{\phi_a(t_1) - \phi'_a(t_1)}{2\pi} \right) \quad \dots \quad (17)$$

【 0 0 7 1 】

第 2 基準波長 λ_2 と第 3 基準波長 λ_3 との合成波長を λ_{23} とすると、第 1 の絶対距離 $D(t_1)$ と第 2 基準波長 λ_3 および合成波長 λ_{23} との関係は、それぞれ式 (1 8)、(1 9) で表される。

30

【 0 0 7 2 】

【 数 1 8 】

$$D(t_1) = \frac{\lambda_3}{2n(\lambda_3)} \left(N_3(t_1) + \frac{\phi_3(t_1)}{2\pi} \right) \quad \dots \quad (18)$$

【 0 0 7 3 】

【 数 1 9 】

$$D(t_1) = \frac{\Lambda_{23}}{2n_g(\lambda_1, \lambda_2)} \left(M_{23}(t_1) + \frac{\phi_3(t_1) - \phi_a(t_1)}{2\pi} \right) \quad \dots \quad (19)$$

【 0 0 7 4 】

式 (1 7)、(1 8)、(1 9) において、それぞれの波長および合成波長は $\lambda_3 \ll \lambda_{23} \ll \lambda_{12}$ の関係を有するため、干渉次数 $N_3(t_1)$ 、 $M_{23}(t_1)$ は式 (2 0) で表される。また、ステップ S 1 1 2 で求められた干渉次数 N_3 は、ステップ S 1 0 4 に送信され、ステップ S 1 0 4 に記録されている干渉次数 N_3 が更新される。

40

【 0 0 7 5 】

【 数 2 0 】

$$\begin{cases} N_3(t_1) = \text{round}\left(\left(M_{23}(t_1) + \frac{\phi_3(t_1) - \phi_a(t_1)}{2\pi}\right) \frac{n(\lambda_3)\Lambda_{23}}{n_g(\lambda_2, \lambda_3)\lambda_3} - \frac{\phi_3(t_1)}{2\pi}\right) \\ M_{23}(t_1) = \text{round}\left(\left(M_{12}(t_1) + \frac{\phi_a(t_1) - \phi'_a(t_1)}{2\pi}\right) \frac{n_g(\lambda_2, \lambda_3)\Lambda_{12}}{n_g(\lambda_1, \lambda_2)\Lambda_{23}} - \frac{\phi_3(t_1) - \phi_a(t_1)}{2\pi}\right) \end{cases} \quad \dots \quad (20)$$

50

【 0 0 7 6 】

次に、ステップ 1 0 5 で大気屈折率と絶対距離 D の算出を行う。まず、乾燥空気の大気屈折率 n は、温度 t [] と気圧 p [Pa] から E d l e n による式 (2 1) で計算される。

【 0 0 7 7 】

【 数 2 1 】

$$\begin{cases} n(\lambda) = 1 + \frac{p \cdot 10^{-8}}{96095.43} \left[8342.54 + \frac{2406147}{130 - S(\lambda)} + \frac{15998}{38.9 - S(\lambda)} \right] \left[\frac{1 + 10^{-8}(0.601 - 0.00972t)p}{1 + 0.003661t} \right] \\ S(\lambda) = 1 / (\lambda_3 \cdot 10^6)^2 \end{cases} \quad \dots \quad (21)$$

10

【 0 0 7 8 】

ここで、被検光束の環境が乾燥空気でない場合には、環境計測ユニット 9 には湿度計を追加することが望ましい。この場合、式 (2 1) の代わりに湿度補正項を含む E d l e n の式を用いればよい。本実施形態では、屈折率計測部として環境計測ユニット 9 を用いたが、これに限定されるものではなく、例えば屈折率計測干渉計を用いても構わない。屈折率計測干渉計は、既知の長さの真空光路を有する真空参照光路と、真空参照光路と同一の長さの大気光路を有する大気参照光路の光路差によって生じる干渉信号から屈折率を算出する。

【 0 0 7 9 】

20

最後に、絶対距離 $D(t_1)$ の算出を行う。ステップ S 1 0 5 における絶対距離 $D(t_1)$ は、式 (2 2) により算出される。ここで、第 1 基準波長 λ_1 、第 2 基準波長 λ_2 、および、第 3 基準波長 λ_3 の位相をそれぞれ ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 とする。また、第 3 基準波長 λ_3 、第 1 合成波長 λ_{12} 、第 2 合成波長 λ_{13} に対するそれぞれの大気屈折率 $n(\lambda_3)$ 、 $n_g(\lambda_1, \lambda_2)$ 、 $n_g(\lambda_1, \lambda_3)$ とする。

【 0 0 8 0 】

【 数 2 2 】

$$D(t_1) = \frac{\lambda_3}{2n(\lambda_3)} \left(\text{round} \left(\left(\text{round} \left(\left(M_{12}(t_1) + \frac{\phi_a(t_1) - \phi'_a(t_1)}{2\pi} \right) \frac{n_g(\lambda_1, \lambda_3)\Lambda_{12}}{n_g(\lambda_1, \lambda_2)\Lambda_{23}} - \frac{\phi_3(t_1) - \phi_a(t_1)}{2\pi} \right) + \frac{\phi_3(t_1) - \phi_a(t_1)}{2\pi} \right) \frac{n(\lambda_3)\Lambda_{23}}{n_g(\lambda_1, \lambda_3)\lambda_3} - \frac{\phi_3(t_1)}{2\pi} \right) + \frac{\phi_3(t_1)}{2\pi} \right) \quad \dots \quad (22)$$

30

【 0 0 8 1 】

また本実施形態では、図 3 に示される時刻 $t_0 \sim t_1$ の間 (波長走査 $\lambda_1 \sim \lambda_2$) の位相計測結果から時刻 t_1 での絶対距離を算出するフローについて説明した。ただし本実施形態はこれに限定されるものではなく、時間 $t'_0 \sim t'_1$ の間 (波長走査 $\lambda_2 \sim \lambda_1$) の位相計測結果を用いても時刻 t'_1 の絶対距離を同様に算出することができる。

【 0 0 8 2 】

このように、波長可変レーザの波長を周期的かつ高速に走査することによって、常に絶対測長が可能となる。したがって、本実施形態によれば、波長走査量の低減が可能となり、簡易な構成で高速な絶対距離計測が可能な光波干渉計測装置を提供することができる。

40

【 第 2 実施形態 】

次に、本発明の第 2 実施形態における光波干渉計測装置について説明する。図 6 は、本実施形態における光波干渉計測装置 6 0 0 の構成図である。本実施形態は、第 1 実施形態における波長可変レーザ 1 の代わりに、波長固定レーザ 3 0 に対して周波数オフセットロックされた波長可変レーザ 3 1 が用いられている点と、位相検出方式としてホモダイン方式が用いられている点で、第 1 実施形態とは異なる。波長固定レーザ 3 0 は周波数安定化光源であり、波長可変レーザ 3 1 の波長基準素子として機能する。

【 0 0 8 3 】

50

本実施形態において、波長固定レーザ 30 から射出した光束は、ビームスプリッタ 35 で分割される。また、波長固定レーザ 30 とは異なる波長を有する波長固定レーザ 2 から射出した光束もビームスプリッタ 35 に入射し、その光線軸が波長固定レーザ 30 と同軸になるとともに光束も分割される。ビームスプリッタ 35 で分割された光束の一方は、ファブリペローエタロン 4 を透過後、分光素子 12 で波長固定レーザ 30 及び波長固定レーザ 2 の光束のそれぞれに分離される。ファブリペローエタロン 4 を透過した後の光量は、波長固定レーザ 30 の光束については検出器 13a で検出され、波長固定レーザ 2 の光束については検出器 13b で検出される。

【0084】

ビームスプリッタ 35 で分割された他方の光束は、偏光ビームスプリッタ 22 まで伝播し、波長固定レーザ 30 の光束は偏光ビームスプリッタ 22 を透過して検出器 23 へ入射する。また、波長固定レーザ 2 の光束は偏光ビームスプリッタ 22 で反射した後、距離計測干渉計 100 へ入射する。波長可変レーザ 31 から射出した光束も偏光ビームスプリッタ 22 に入射し、光線軸が波長固定レーザ 30 と同軸になるとともに、光束も分割される。このうち第 1 光束は検出器 23 へ入射し、第 2 光束は距離計測干渉計 100 へ入射する。検出器 23 では、波長可変レーザ 31 と波長固定レーザ 30 の差の周波数に相当するビート信号が検出される。

【0085】

ビート信号の位相は、波長制御装置 33 の内部の位相比較器で、既知の周波数信号を出力する周波数シンセサイザ 34 からの信号の位相と比較される。そして、波長可変レーザ 31 の周波数は、波長固定レーザ 30 の周波数に周波数シンセサイザ 34 の周波数をオフセットした周波数で安定化されている。ここで、周波数シンセサイザ 34 の周波数を掃引すると、それに追従して波長可変レーザ 31 の波長も走査される。波長可変レーザ 31 は、第 1 基準波長 λ_1 と第 2 基準波長 λ_2 との間で自由に安定化可能であり、これらの波長の間 ($\lambda_1 \sim \lambda_2$ 間) を周期的かつ高速に走査する。

【0086】

図 7 は、ガスセル 3 の透過スペクトル、および、波長可変レーザ 31、波長固定レーザ 30、波長固定レーザ 2 のスペクトルを示す図である。波長固定レーザ 2 の射出光束はガスセル 3 に入射し、第 3 基準波長 λ_3 に安定化される。波長固定レーザ 30 の射出光束もガスセル 3 に入射し、第 1 基準波長 λ_1 よりも短い波長に相当する透過スペクトルに安定化される。

【0087】

距離計測干渉計 100 に入射した光束は、位相検出ユニット 32a、32b (位相検出部) に入射し、被検面 7 と参照面 6 の光路差による干渉信号が生成される。位相検出ユニット 32a は、分光素子 16 を介して、第 1 基準波長 λ_1 における参照光路と被検光路の光路差による干渉位相を検出する。一方、位相検出ユニット 32b は、第 2 基準波長 λ_2 における参照光路と被検光路の光路差による干渉位相を検出する。

【0088】

本実施形態においても、距離計測干渉計 100 の光束分離素子として偏光ビームスプリッタ 20 が用いられているため、参照面 6 と被検面 7 のそれぞれで反射する光束を偏光により分離することが可能となる。従って、偏光差を用いた位相差制御によるホモダイン検出が可能であり、高精度な位相計測を実現することができる。

【0089】

図 8 は、位相検出ユニット 32a、32b の構成図である。位相検出ユニット 32a、32b では、被検光束と参照光束の偏光軸角度と 45 度となる進相軸を有する $\lambda/4$ 板 41 により、被検光束と参照光束の偏光を右回り円偏光と左回り円偏光に変換する。偏光変換後の光束は、グレーティングビームスプリッタ 42 により 0 次、 ± 1 次回折光の 3 つの等光量な光束に分割される。分割後の 3 つの光束は、それぞれの光束に対して透過偏光の角度が異なるように配置された偏光子アレイ 43 を透過し、それぞれの偏光方位の干渉信号光量が検出器 50a、50b、50c で検出される。偏光子アレイ 43 のそれぞれの偏

10

20

30

40

50

光子角度を 120 度ピッチとすると、検出器 50a、50b、50c で得られる光量 I_a 、 I_b 、 I_c は式 (23) で表される。

【0090】

【数23】

$$\begin{cases} I_a = I_0 \{1 + V \cos(\phi)\} \\ I_b = I_0 \{1 + V \cos(\phi + 2\pi/3)\} \\ I_c = I_0 \{1 + V \cos(\phi + 4\pi/3)\} \end{cases} \quad \dots \quad (23)$$

【0091】

ここで、 ϕ は被検光束と参照光束の光路長差に伴う干渉信号の位相差である。式 (23) より、位相差 ϕ は式 (24) を用いて算出される。

【0092】

【数24】

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{-\sqrt{3}(I_b - I_c)}{2I_a - I_b - I_c} \right) \quad \dots \quad (24)$$

【0093】

位相検出ユニット 32a、32b は、解析装置 8 に接続されている。解析装置 8 は、光量検出結果から式 (24) を用いて第 1 基準波長 λ_1 における被検光束と参照光束の光路長による位相と、第 3 基準波長 λ_3 における被検光束と参照光束の光路長による位相を検出する。

【0094】

なお本実施形態の位相検出ユニット 32a、32b は、図 8 に示される構成で 3 つの既知の位相差における干渉信号強度の検出を行うが、他の構成で複数の既知位相差における干渉信号強度の検出を行ってもよい。例えば、位相検出ユニットを、複屈折を有するプリズムを用いて被検光束と参照光束間にティルト縞を発生させて空間的に位相差を生成して光量を検出するように構成してもよい。また、既知の位相差の数や既知の位相差の間隔に関しても上述のように限定されるものではなく、必要な精度に応じて適宜選択すればよい。

【0095】

本実施形態のようなホモダイン検出の場合には高周波の信号が存在しないため、実施形態 1 のヘテロダイン検出に比較し安価に検出系を構成することができる。また位相計測精度に関しては、検出器 50a、50b、50c の利得、オフセット、位相の特性を補正することにより、ヘテロダイン同様の 10^{-4} [wave] 程度を実現することが可能である。また本実施形態では、第 1 実施形態と同様に、被検面 7 の近傍には被検面近傍の大気屈折率を決定するための環境計測ユニット 9 が配置される。なお、本実施形態の計測方法は第 1 実施形態と同様であるため省略する。

【0096】

以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されず、その要旨の範囲内で種々の変形および変更が可能である。

【符号の説明】

【0097】

- 1：波長可変レーザ
- 2：波長固定レーザ
- 3：ガスセル
- 4：ファブリペローエタロン
- 6：参照面
- 7：被検面
- 8：解析装置
- 10a、10b：位相検出器

10

20

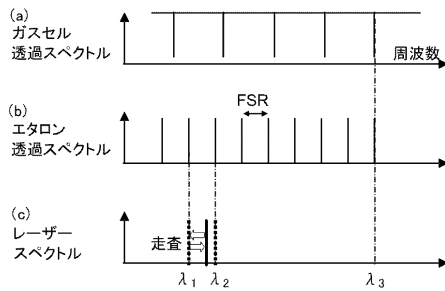
30

40

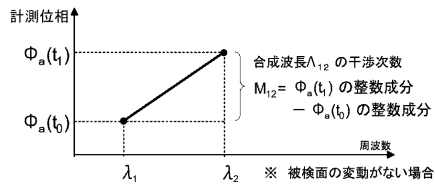
50

20 : 偏光ビームスプリッタ
 500 : 光波干渉計測装置

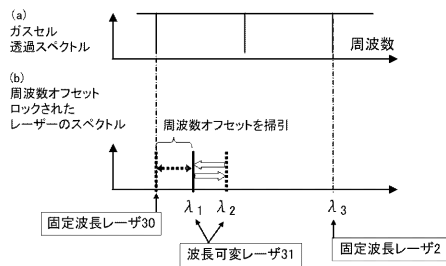
【図2】



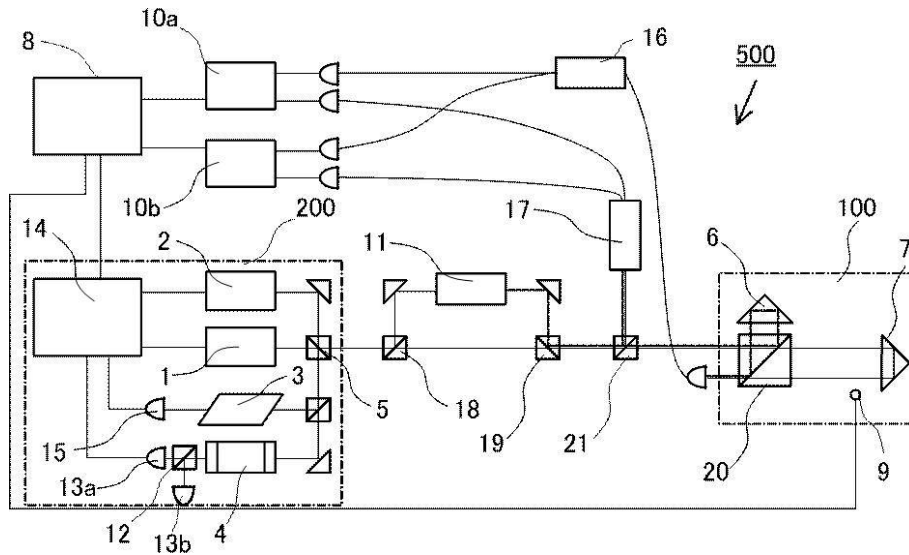
【図5】



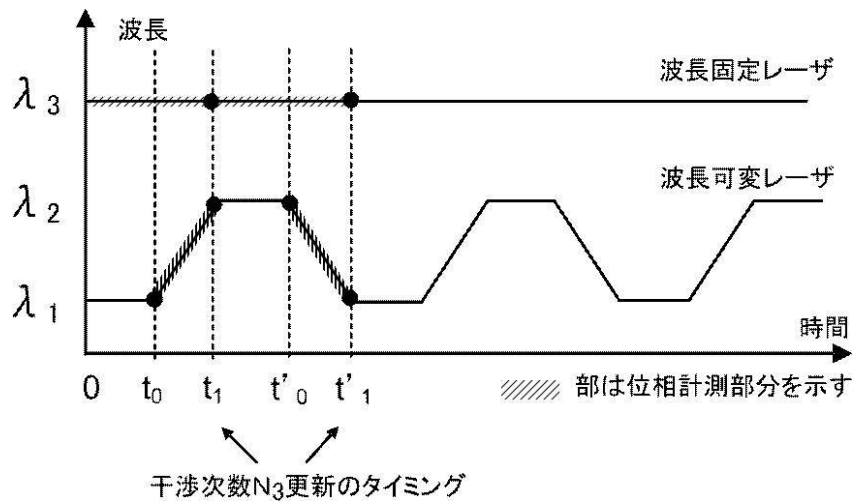
【図7】



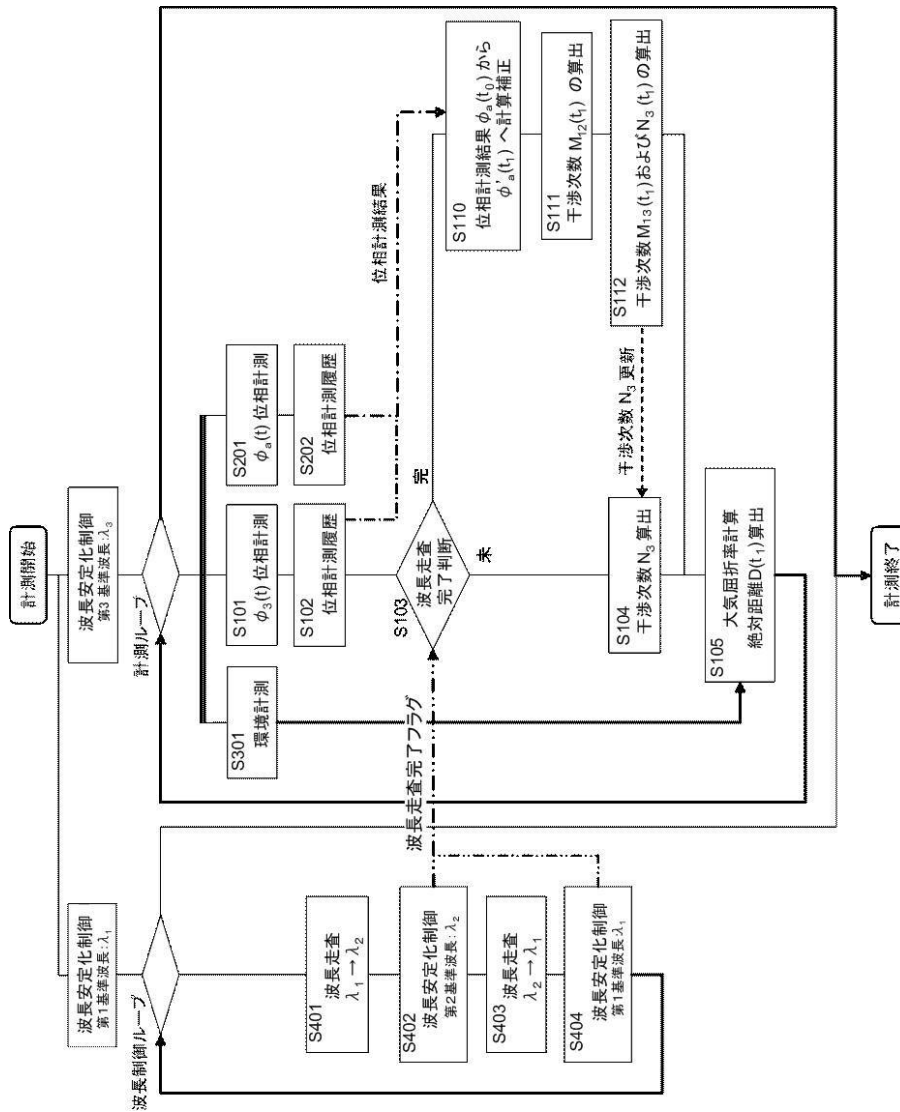
【図1】



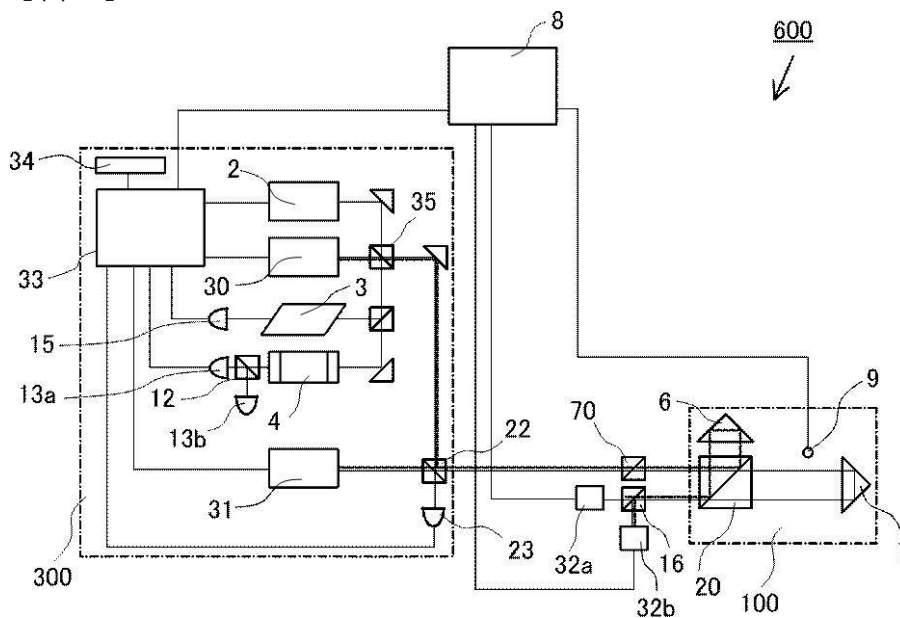
【図3】



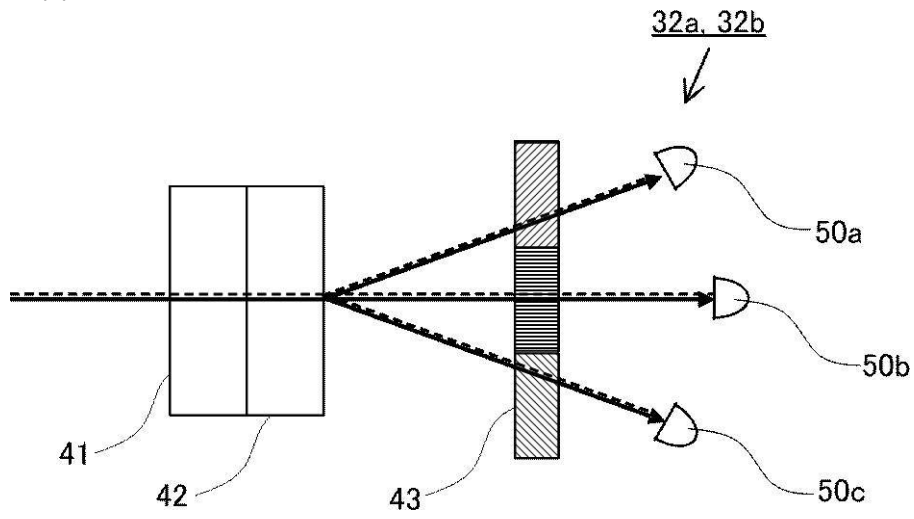
【図4】



【図6】



【図 8】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平03-009202(JP,A)
特開2002-005614(JP,A)
特開平06-117810(JP,A)
特開2009-198477(JP,A)
特開平11-183116(JP,A)
特開平07-120211(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B9/02、11/00-11/30