

(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.

G01B 9/02 (2006.01)
G01B 11/00 (2006.01)

F 1

G01B 9/02
G01B 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
 ャノン株式会社内
 (72) 発明者 藏本 福之
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ャノン株式会社内

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₁、前記第2基準波長を₂、前記第3基準波長を₃、₁。
₂ / | ₁ - ₂ | で表される合成波長を_{1 2}、₂ · ₃ / | ₂ - ₃ | で表さ
 れる合成波長を_{2 3}として、

前記波長基準素子により波長を第1基準波長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₁から第2基準波長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₂における前記干渉信号の位相と、の変化から合成波長_{1 2}の干渉次数を求め、

合成波長_{1 2}、該求められた合成波長_{1 2}の干渉次数及び合成波長_{2 3}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。

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

10

20

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

【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 $\phi_3(t_1)$ 、 $\phi_a(t_1) - \phi_3(t_1)$ 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。

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

30

【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。

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₂から第1基準波長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₁における前記干渉信号の位相と、の変化から合成波長_{1,2}の干渉次数を求め、
_{1,3} / | _{1,-3} | で表される合成波長を_{1,3}として、合成波長_{1,2}、該求められた合成波長_{1,2}の干渉次数、及び、合成波長_{1,3}から求まる合成波長_{1,3}の干渉次数を用いて第3基準波長₃の干渉次数を求める特徴とする請求項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、

20

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₁、前記第2基準波長を₂、前記第3基準波長を₃、
₂ / | _{1,-2} | で表される合成波長を_{1,2}、_{2,-3} / | _{1,-2,-3} | で表される合成波長を_{2,3}として、前記波長基準素子により波長を第1基準波長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₁から第2基準波長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₂における前記干渉信号の位相と、の変化から合成波長_{1,2}の干渉次数を求めるステップと、

30

合成波長_{1,2}、該求められた合成波長_{1,2}の干渉次数及び合成波長_{2,3}から求まる合成波長_{2,3}の干渉次数を用いて第3基準波長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。

【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】

【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て精度を改善する方法が用いられる。これらの方では、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。

40

【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FMヘテロダイン法が開示されている。特許文献2には、FM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

涉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て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、温度変調による波長走査によって大きな波長走査量は可能だが、追隨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。

10

【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。

20

【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₁、前記第2基準波長を₂、前記第3基準波長を₃、₁・₂/|₁-₂|で表される合成波長を₁₂、₂・₃/|₂-₃|で表される合成波長を₂₃として、前記波長基準素子により波長を第1基準波長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₁から第2基準波長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₂における前記干渉信号の位相と、の変化から合成波長₁₂の干渉次数を求め、合成波長₁₂、該求められた合成波長₁₂の干渉次数及び合成波長₂₃から求まる合成波長₂₃の干渉次数を用いて第3基準波長₃の干渉次数を求める、該求められた第3基準波長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。

30

【0008】

40

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。

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_{1,2}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₁と第2基準波長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₁および第2基準波長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₃、合成波長_{1,2}、_{1,3}、波長走査の際の位相変化量の整数成分、および、合成波長_{1,2}、_{1,3}の干渉次数から逐次的に第3基準波長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_{1,2}（第1合成波長）は、₁・₂/|₁-₂|で表され、合成波長_{1,3}（第2合成波長）は、₁・₃/|₁-₃|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により、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1.5μm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。1.5μm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エタロン4の透過スペクトルが第3基準波長₃に一致するようにファブリペロエタロン4の光路長の制御を行う。ここでファブリペロエタロン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₁又は第2基準波長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₁としては、ファブリペロエタロン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₁に相当するファブリペロエタロン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₂に安定化される。第2基準波長₂から第1基準波長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₁、第2基準波長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₁と第2基準波長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₁で安定化される第1期間(0~t₁)および第2基準波長₂で安定化される第2期間(t₁~t₂)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N₃およびM₂₃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】

【数1】

$$\sqrt{2} \frac{d\phi}{2\pi} \frac{\Lambda_{23}}{\lambda_3} + \frac{2D}{\lambda_3} \frac{d\Lambda_{23}}{\Lambda_{13}} + \frac{2D}{\lambda_3} \frac{d\lambda_3}{\lambda_3} < \frac{1}{2} \quad \dots \quad (1)$$

【0023】

【数2】

$$\sqrt{2} \frac{d\phi}{2\pi} \frac{\Lambda}{\Lambda_{23}} + \frac{2D}{\Lambda_{23}} \frac{d\Lambda}{\Lambda} + \frac{2D}{\Lambda_{23}} \frac{d\Lambda_{23}}{\Lambda_{23}} < \frac{1}{2} \quad \dots \quad (2)$$

【0024】

式(1)においてDが1.5m、第3基準波長 λ_3 が1.5μmの場合にはD/ λ_3 は10⁶となる。一方、d₂₃/d₂₃、およびd₃/d₃は、ファブリペローエタロンとガスセルに対して波長安定化を図ることで10⁻⁷を実現することが可能である。このため、不等式(1)における制約条件は左辺第1項となる。d₂/2が10⁻⁴[wave]程度であるとすると、d₂₃が1.5mmとなるように第2基準波長 λ_2 を選択することにより、式(1)を満たすことが可能となる。

【0025】

以上の条件下では、式(2)において必要なd₂の最大値は1.5m程度となり、第2基準波長 λ_2 と第1基準波長 λ_1 の波長差(波長走査量)に換算すると、波長走査量は1.5pmと非常に小さい値になる。半導体DFBレーザで大きな波長走査を実現するには温度変調が必要であり、波長走査に時間がかかるという問題があるが、上述のように波長走査量を小さくすれば、電流変調で高速な走査が実現可能である。また、波長固定レーザ2とは異なる別の波長固定レーザを追加すれば、さらに波長可変レーザの波長走査量を小さくすることができる。

【0026】

ビームスプリッタ5で分割された他方の光束は、ビームスプリッタ18によって更に分割される。ビームスプリッタ18で分割された一方の光束(第1光束)は、偏光ビームスプリッタ19まで伝播する。分割された他方の光束(第2光束)は、波長シフタ11に入射する。波長シフタ11は、波長可変レーザ1と波長固定レーザ2のそれぞれから出力される光束について、音響光学素子(不図示)を用いて入射波長に対して一定量の周波数シフトd₁を印加する。また波長シフタ11は、波長板(不図示)を用いて偏光を90度回転させ、入射偏光と直交する偏光を射出する。波長シフタ11から射出された光束は、偏光ビームスプリッタ19まで伝播する。第1光束と第2光束は、偏光ビームスプリッタ19により再び共通光路となつた後、ビームスプリッタ21によって2つに分岐される。

【0027】

ビームスプリッタ21で分岐された光束の一方は、分光素子17に入射する。分光素子17は、同軸で入射した波長可変レーザ1と波長固定レーザ2の光束を分離する。分光素子17としては、アレイ導波路型の回折格子が用いられる。ただしこれに限定されるものではなく、プリズムやバルク型の回折格子を用いることができ、要求される波長分解能とコストから選択すればよい。分光素子17を介して得られた第1基準波長 λ_1 の第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が位相検出器10bにより検出される。また、第3基準波長 λ_3 の第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が位相検出器10aにより検出される。第1光束と第2光束の干渉信号は、位相検出器10a、10bの内部において、偏光子で第1光束と第2光束との共通偏光成分を抽出することで得られる。以下、分光素子17を介して位相検出器10a、10bで検出される干渉信号を基準信号と称す。

【0028】

ビームスプリッタ21で分岐された他方の光束は、距離計測干渉計100に入射する。距離計測干渉計100内の偏光ビームスプリッタ20は、第1光束を透過し、第2光束を反射するように構成される。偏光ビームスプリッタ20で反射した第2光束は、参照面6で反射され、偏光ビームスプリッタ20で反射した後、分光素子16に入射する。また、偏光ビームスプリッタ20を透過した第1光束は、被検面7で反射され、偏光ビームス

10

20

30

40

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考光束、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 の参考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 の参考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 で反射した参考光束と被検面 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、被検光束と参考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 $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 、気圧敏感度は $0.3 \text{ ppm}/\text{hPa}$ であり、比較的安価な温度計や気圧計でも 0.1 ppm 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（被検光と参考光の光路差）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。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の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の温度 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 $2n(\lambda)D$ とする。ここで、 $n(\lambda)$ は被検光束の屈折率、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 】

$$\begin{cases} I_{ref} = I_0 \cos\left(2\pi\left(d\lambda t + \frac{L_1}{\lambda_1}\right)\right) \\ I_{test} = I_0 \cos\left(2\pi\left(d\lambda t + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{2n(\lambda_1)D}{\lambda_1}\right)\right) \end{cases} \quad \dots \quad (3)$$

【 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 】

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

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】

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

【0045】

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。

【0046】

10

【数7】

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

【0047】

また、ステップS101で計測される位相₃(t₀)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₃である。

【0048】

【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

【0049】

ステップS102、S202にて、ステップS101、201で求めた位相計測結果の履歴をそれぞれ残しておく。

【0050】

ステップS103にて、波長制御ループでのステップS402、S404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S104へ進み、完了している場合にはステップS110へ進む。

30

【0051】

まず、ステップS103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S104では、ステップS102の位相接続された計測結果から、前回計測時の干渉次数N₃(i)と位相計測結果₃(i)、および、今回の位相計測結果₃(i+1)を用いて、干渉次数N₃を式(9)にて算出する。

【0052】

【数9】

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

【0053】

そしてステップS105において、第3基準波長₃の相対的な位相変化と、ステップS301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N₃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

【0054】

次に、ステップS103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S110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、波長走査の際ににおける第3基準波長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₁₂、₁₃の干渉次数が補正される。時刻t₁での波長可変レーザ1の位相は、式(10)より求めら

50

れる。

【0055】

【数10】

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

【0056】

さらに、このときの位相の整数成分は、式(4)を用いて式(11)で表される。

10

【0057】

【数11】

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

【0058】

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(12)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。

【0059】

【数12】

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

20

【0060】

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 $\Delta D(t_0 \sim t_1)$ は式(13)によって算出される。

【0061】

【数13】

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

30

【0062】

ステップS202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 のまで、絶対距離 $D(t_1)$ のときの位相 $\phi_a(t_1)$ へ式(14)により補正する。

【0063】

【数14】

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

【0064】

ステップS111では、絶対距離 D の計測時刻 t_1 における干渉次数 $M_{1,2}(t_1)$ を算出する。

40

【0065】

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 $M_{1,2}$ について説明する。図5は、本実施形態における干渉次数 $M_{1,2}$ の概念図である。被検面が変動しない場合、干渉次数 $M_{1,2}$ 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 $M_{1,2}$ 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 $M_{1,2}(t_1)$ は式(15)で表される補正式で算出される。

50

【0066】

【数15】

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

【0067】

式(10)、式(14)より、干渉次数 $M_{12}(t_1)$ は式(16)で表される。ここで λ_1, λ_2 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。

【0068】

【数16】

10

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

【0069】

ステップS112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(17)により算出する。

20

【0070】

【数17】

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

【0071】

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_2 および合成波長 λ_{23} との関係は、それぞれ式(18)、(19)で表される。

30

【0072】

【数18】

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

【0073】

【数19】

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

【0074】

式(17)、(18)、(19)において、それぞれの波長および合成波長は $\lambda_3 < < \lambda_{23} < < \lambda_{12}$ の関係を有するため、干渉次数 $N_3(t_1)$ 、 $M_{23}(t_1)$ は式(20)で表される。また、ステップS112で求められた干渉次数 N_3 は、ステップS104に送信され、ステップS104に記録されている干渉次数 N_3 が更新される。

40

【0075】

【数20】

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

50

【0076】

次に、ステップ105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Edlenによる式(21)で計算される。

【0077】

【数21】

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

... (21)

10

【0078】

ここで、被検光束の環境が乾燥空気で無い場合には、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(21)の代わりに湿度補正項を含むEdlen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。

【0079】

20

最後に、絶対距離D(t₁)の算出を行う。ステップS105における絶対距離D(t₁)は、式(22)により算出される。ここで、第1基準波長λ₁、第2基準波長λ₂、および、第3基準波長λ₃の位相をそれぞれφ_a(t₁)、φ_a'(t₁)、φ₃(t₁)とする。また、第3基準波長λ₃、第1合成波長λ₁₂、第2合成波長λ₁₃に対するそれぞれの大気屈折率n_g(λ₁、λ₂)、n_g(λ₁、λ₃)とする。

【0080】

【数22】

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

30

【0081】

また本実施形態では、図3に示される時刻t₀～t₁の間(波長走査λ₁～λ₂)の位相計測結果から時刻t₁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～t'1の間(波長走査λ₂～λ₁)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。

【0082】

40

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。

〔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600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30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31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30は周波数安定化光源であり、波長可変レーザ31の波長基準素子として機能する。

【0083】

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、それに追随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₁と第2基準波長₂との間で自由に安定化可能であり、これらの波長の間(₁ ~ 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1/4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。 10

【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。 20

【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鏡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關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。 30

【0096】

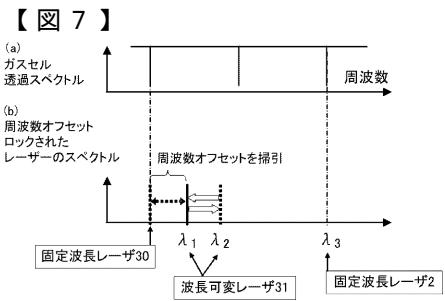
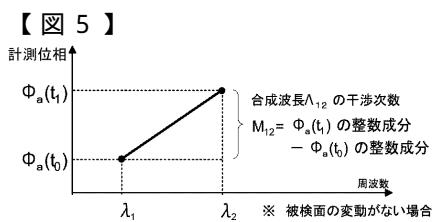
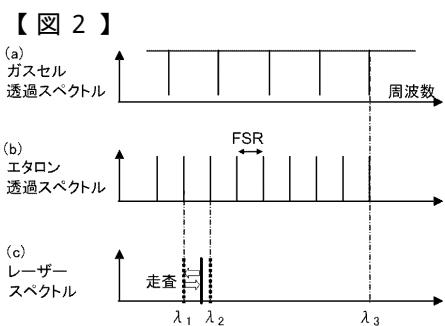
以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限 40
定されず、その要旨の範囲内で種々の変形および変更が可能である。

【符号の説明】

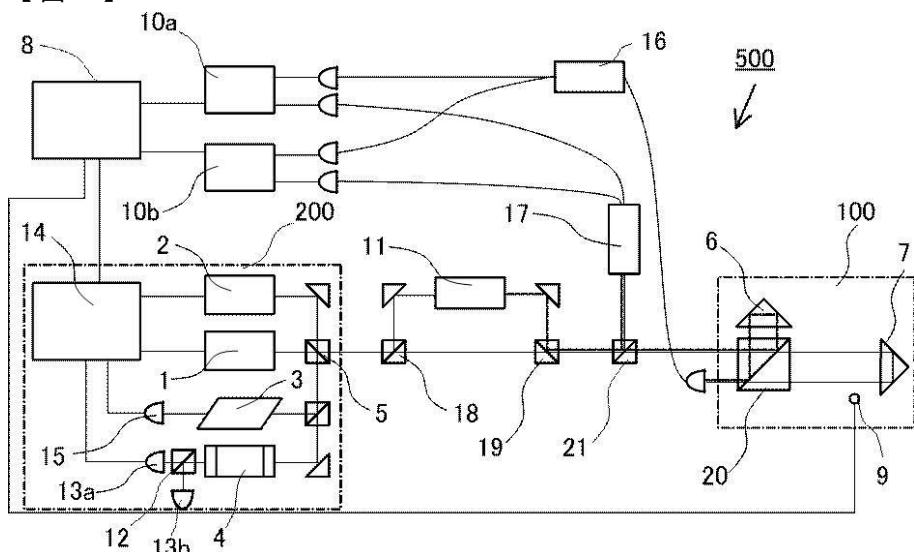
【0097】

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

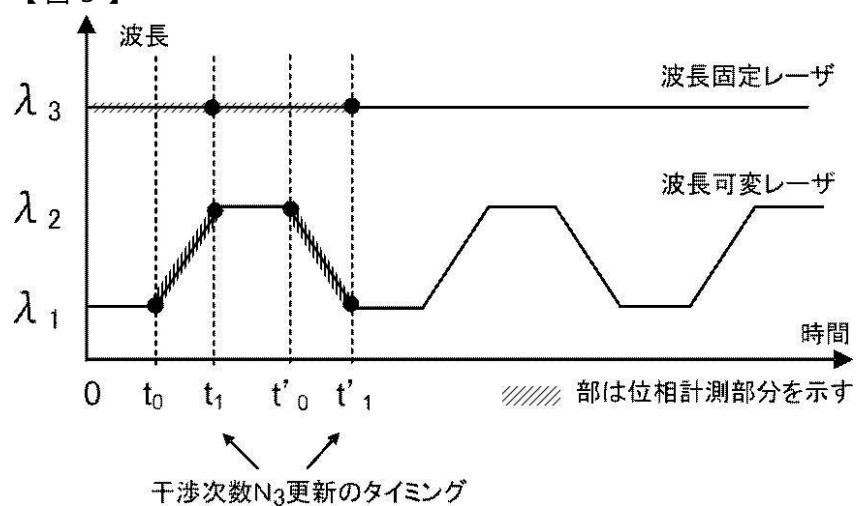
20 : 偏光ビームスプリッタ
500 : 光波干渉計測装置



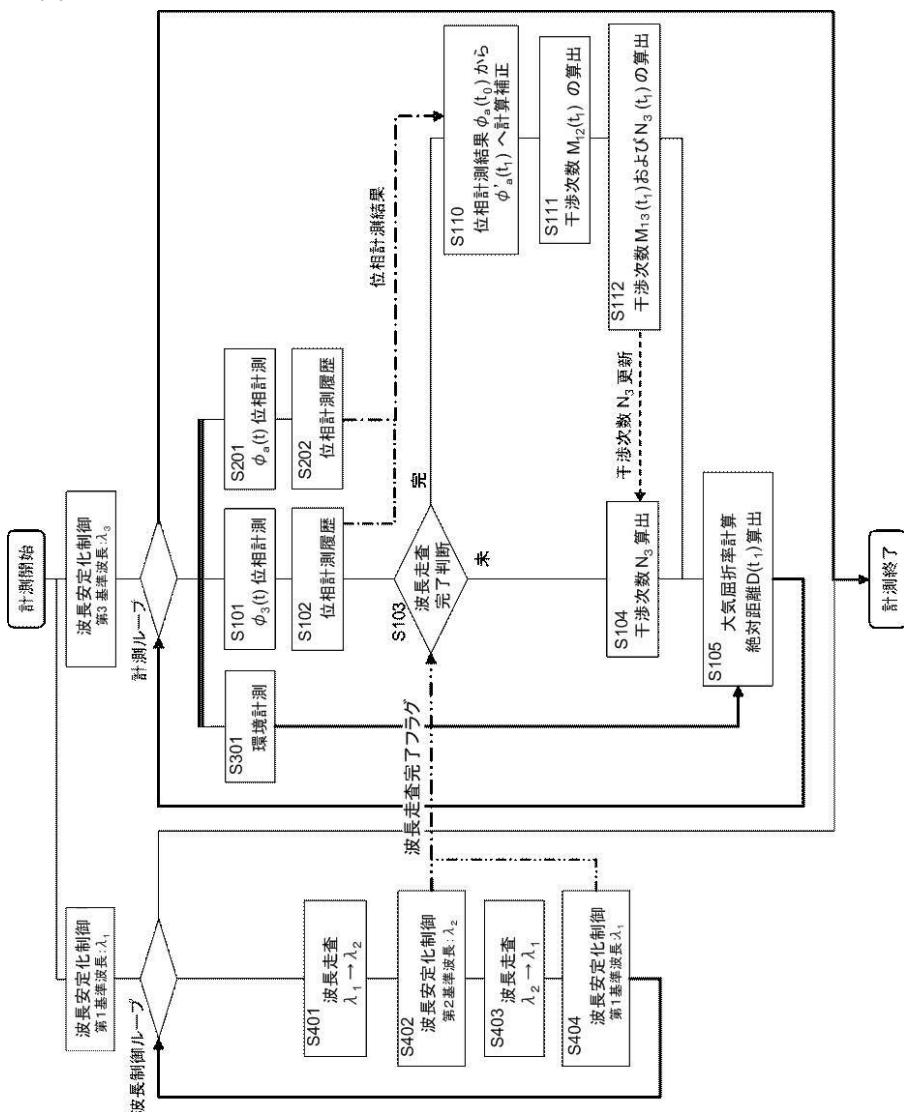
【図1】



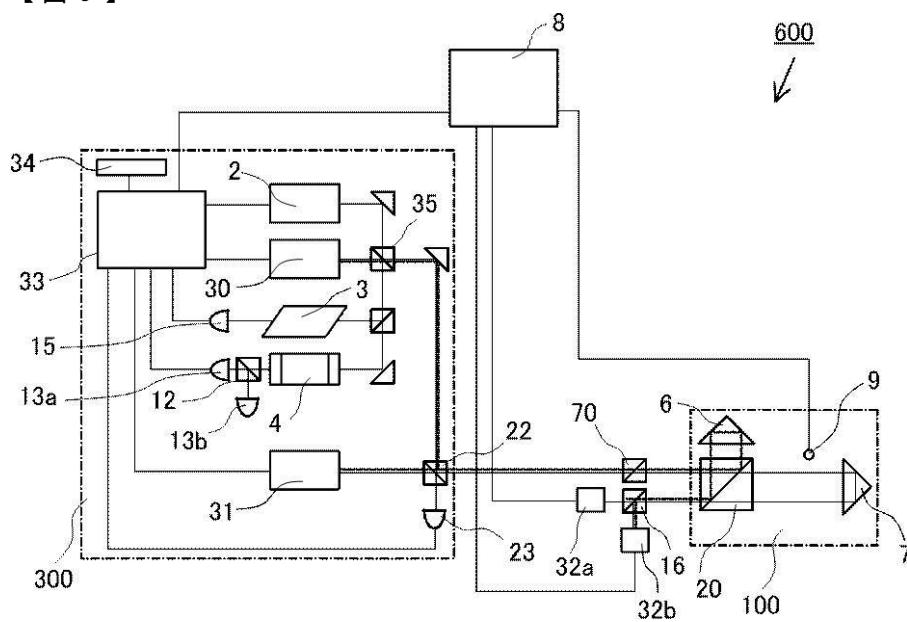
【図3】



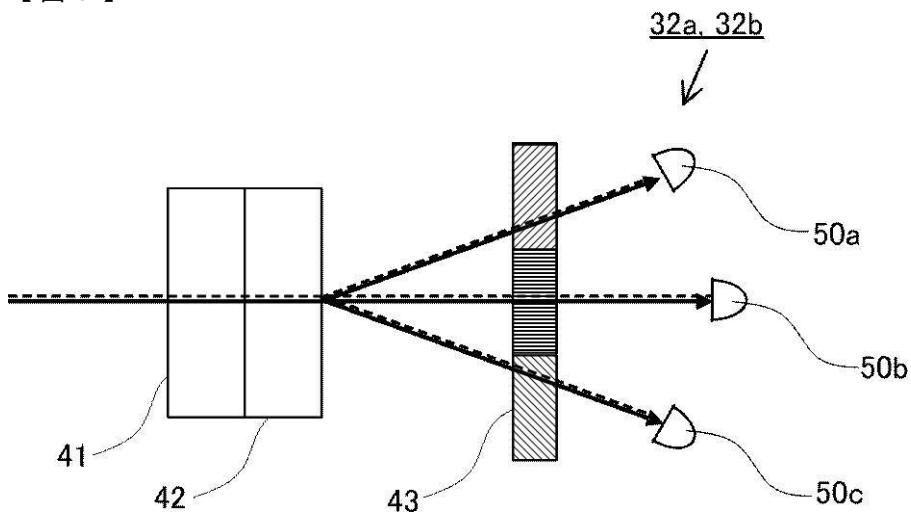
【図4】



【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