

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-112768

(P2010-112768A)

(43) 公開日 平成22年5月20日(2010.5.20)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>GO1B 9/02 (2006.01)</b>	GO1B 9/02	2F064
<b>GO1B 11/00 (2006.01)</b>	GO1B 11/00	2F065

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2008-283731 (P2008-283731)	(71) 出願人	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
(22) 出願日	平成20年11月4日(2008.11.4)	(74) 代理人	100076428 弁理士 大塚 康德
		(74) 代理人	100112508 弁理士 高柳 司郎
		(74) 代理人	100115071 弁理士 大塚 康弘
		(74) 代理人	100116894 弁理士 木村 秀二
		(74) 代理人	100130409 弁理士 下山 治
		(74) 代理人	100134175 弁理士 永川 行光

最終頁に続く

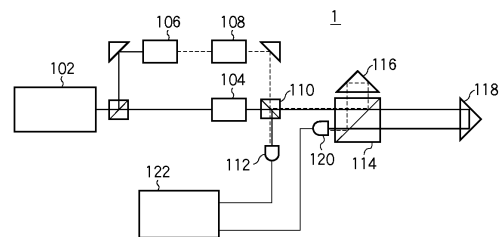
(54) 【発明の名称】 計測装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】参照面と被検面との間の光路の幾何学的な距離を高精度に計測することができる計測装置を提供する。

【解決手段】基準面に固定された参照面116と、被検物体に配置された被検面118との間の距離を計測する計測装置であって、複数の光周波数成分のそれぞれが均等な光周波数差となる光束を生成する光周波数コム生成ユニット104と、複数の光周波数成分のそれぞれについて、参照面で反射された光束と被検面で反射された光束との干渉信号を検出して、参照面と被検面との間の光路長に相当する位相を検出する検出ユニット112、120と、検出ユニットで検出された位相に基づいて、参照面と被検面との間の幾何学的な距離を算出する算出ユニット122とを有し、算出ユニットは複数の光周波数成分のそれぞれについて、検出ユニットで検出された位相を光路長に変換し、光路長に対して関数をフィッティングさせることによって、幾何学的な距離を算出する。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

基準面に固定された参照面と、被検物体に配置された被検面との間の距離を計測する計測装置であって、

複数の光周波数成分を有し、前記複数の光周波数成分のそれぞれが均等な光周波数差となる光束を生成する光周波数コム生成ユニットと、

前記複数の光周波数成分のそれぞれについて、前記参照面で反射された光束と前記被検面で反射された光束との干渉信号を検出して、前記参照面と前記被検面との間の光路長に相当する位相を検出する検出ユニットと、

前記検出ユニットで検出された位相に基づいて、前記参照面と前記被検面との間の幾何学的な距離を算出する算出ユニットと、

を有し、

前記算出ユニットは、前記複数の光周波数成分のそれぞれについて、前記検出ユニットで検出された位相を光路長に変換し、前記光路長に対して関数をフィッティングさせることによって、前記幾何学的な距離を算出し、

前記関数は、前記幾何学的な距離と、前記参照面と前記被検面との間の媒質の屈折率によって変化する光路長の変化分との和で表され、

前記光路長の変化分は、前記参照面と前記被検面との間の既知の分散特性を有する媒質の屈折率に前記幾何学的な距離を乗算して得られることを特徴とする計測装置。

## 【請求項 2】

前記光周波数コム生成ユニットは、前記計測装置の周期誤差が許容値内である光周波数の範囲内において、それぞれの光周波数成分で前記幾何学的な距離を伝播した際に発生する位相差が 2 の範囲内に複数、且つ、均等な間隔で存在するように、前記複数の光周波数成分を設定することを特徴とする請求項 1 に記載の計測装置。

## 【請求項 3】

前記光周波数コム生成ユニットは、中心光周波数、及び、光周波数差が互いに異なる光束を生成する第 1 のユニットと第 2 のユニットとを含む一組以上のユニットで構成され、

前記検出ユニットは、前記第 1 のユニットで生成された光束を前記被検面に入射させて前記被検面で反射された光束と、前記第 2 のユニットで生成された光束を前記参照面に入射させて前記参照面で反射された光束との干渉信号を検出することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の計測装置。

## 【請求項 4】

前記算出ユニットは、

前記検出ユニットで検出された前記複数の光周波数成分での位相間の変化量を算出し、

光速を前記光周波数差で除算して得られる合成波長、前記位相間の変化量に光速を乗算して得られる距離、及び、前記合成波長以下の精度で予め計測された前記参照面と前記被検面との間の距離に基づいて、前記複数の光周波数成分のそれぞれについて前記検出ユニットで検出される干渉信号の干渉次数を決定し、

前記干渉次数を用いて前記幾何学的な距離を算出することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のうちいずれか 1 項に記載の計測装置。

## 【請求項 5】

前記光周波数コム生成ユニットは、中心光周波数、及び、光周波数差が互いに異なる光束を生成する第 1 のユニットと第 2 のユニットとを含む複数組のユニットで構成され、

前記複数組のユニットの全てにおいて、前記複数組のユニットのそれぞれで生成される光束の光周波数差は等しく、且つ、前記複数組のユニットのそれぞれで生成される光束の中心光周波数は異なることを特徴とする請求項 1 に記載の計測装置。

## 【請求項 6】

前記光周波数コム生成ユニットは、3 つ以上の異なる光周波数差を有する光束を生成することを特徴とする請求項 1 に記載の計測装置。

## 【請求項 7】

10

20

30

40

50

前記算出ユニットは、

前記検出ユニットで検出された前記複数の光周波数成分での位相間の変化量を算出し、光速を前記光周波数差で除算して得られる第1の合成波長、前記第1の合成波長を合成して得られる第2の合成波長と、前記位相間の変化量に光速を乗算して得られる距離、及び、前記第2の合成波長以下の精度で予め計測された前記参照面と前記被検面との間の距離に基づいて、前記複数の光周波数成分のそれぞれについて前記検出ユニットで検出される干渉信号の干渉次数を決定し、

前記干渉次数を用いて前記幾何学的な距離を算出することを特徴とする請求項1乃至3のうちいずれか1項に記載の計測装置。

【請求項8】

10

前記既知の分散特性は、前記参照面と前記被検面との間の媒質の密度に依存する成分と光周波数成分に依存する成分との積と、前記参照面と前記被検面との間の媒質の真空中の屈折率との和で近似されることを特徴とする請求項1に記載の計測装置。

【請求項9】

前記既知の分散特性は、前記参照面と前記被検面との間の媒質の密度に依存する成分と光周波数成分に依存する成分との積と、前記参照面と前記被検面との間の媒質の湿度に依存する成分と光周波数成分に依存する成分との積と、前記参照面と前記被検面との間の媒質の真空中の屈折率との和で近似されることを特徴とする請求項1に記載の計測装置。

【請求項10】

前記算出ユニットは、前記複数の光周波数成分のそれぞれの光路長を、前記幾何学的な距離で除算することによって、前記参照面と前記被検面との間の媒質の屈折率を更に算出することを特徴とする請求項1に記載の計測装置。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、計測装置に関する。

【背景技術】

【0002】

参照面と被検面との間の光路の幾何学的な距離（即ち、参照面と被検面との間が真空であると仮定したときの距離）を計測する際に、光波干渉計測装置（以下、「計測装置」と称する）が従来から使用されている。

30

【0003】

図10を参照して、屈折率の揺らぎ補正機能を有する従来 of 計測装置1000について説明する。光源1010からの光束（高精度に波長が安定化された光束）は、波長変換ユニット1020に入射する。波長変換ユニット1020では、入射光束の光周波数成分（基本波成分）に加えて、その2倍の光周波数成分（2倍波成分）を発生する。波長変換ユニット1020を射出した光束は、基本成分が色分けミラーを透過し、2倍波成分が色分けミラーで反射される。

【0004】

色分けミラーを透過した光束（基本波成分）は、周波数シフトユニット1030に入射する。周波数シフトユニット1030は、入射光束と異なる偏光を有し、且つ、光周波数が微量シフトした光束を生成して入射光束と同軸上に射出する。周波数シフトユニット1030を射出した光束は、ミラーで折り返されて無偏光ビームスプリッタ1050に入射する。

40

【0005】

一方、色分けミラーで反射された光束（2倍波成分）は、周波数シフトユニット1040に入射する。周波数シフトユニット1040は、周波数シフトユニット1030と同様に、入射光束と直交する偏光を有し、且つ、光周波数が微量シフトした光束を生成して入射光束と同軸上に射出する。周波数シフトユニット1040を射出した光束は、無偏光ビームスプリッタ1050に入射する。

50

## 【 0 0 0 6 】

ここで、波長変換ユニット 1 0 2 0 から射出される光周波数成分を光源周波数成分、周波数シフトユニット 1 0 3 0 及び 1 0 4 0 で生成される光周波数成分を周波数シフト成分と称する。

## 【 0 0 0 7 】

無偏光ビームスプリッタ 1 0 5 0 を透過した基本波成分、及び、無偏光ビームスプリッタ 1 0 5 0 で反射された 2 倍波成分は、色分けミラーと、偏光子と、ディテクタとを含む参照信号検出ユニット 1 0 6 0 に入射する。参照信号検出ユニット 1 0 6 0 では、基本波成分と 2 倍波成分のそれぞれについて、光源周波数成分と周波数シフト成分との干渉信号（参照信号）をヘテロダイン検出する。

10

## 【 0 0 0 8 】

無偏光ビームスプリッタ 1 0 5 0 で反射された基本波成分、及び、無偏光ビームスプリッタ 1 0 5 0 を透過した 2 倍波成分は、偏光ビームスプリッタ 1 0 7 0 に入射する。偏光ビームスプリッタ 1 0 7 0 は、反射面に平行な偏光成分の光束を透過し、反射面に垂直な偏光成分の光束を反射する。

## 【 0 0 0 9 】

光源周波数成分については、基本波成分、及び、2 倍波成分とも偏光ビームスプリッタ 1 0 7 0 の反射面に対して平行な偏光成分となるように調整されるため、偏光ビームスプリッタ 1 0 7 0 を透過して被検面 1 0 9 0 に入射する。また、周波数シフト成分については、基本波成分、及び、2 倍波成分とも偏光ビームスプリッタ 1 0 7 0 の反射面に対して垂直な偏光成分となるように調整されるため、偏光ビームスプリッタ 1 0 7 0 で反射されて参照面 1 0 8 0 に入射する。

20

## 【 0 0 1 0 】

参照面 1 0 8 0 及び被検面 1 0 9 0 は、複数の反射面からなる、所謂、コーナキューブを構成しているため、参照面 1 0 8 0 及び被検面 1 0 9 0 で反射された光束は、入射位置とずれた位置から入射角度と同一角度で射出される。被検面 1 0 9 0 からの光束は、偏光ビームスプリッタ 1 0 7 0 を透過して被検信号検出ユニット 1 1 0 0 に入射する。また、参照面 1 0 8 0 からの光束は、偏光ビームスプリッタ 1 0 7 0 で反射されて被検信号検出ユニット 1 1 0 0 に入射する。

## 【 0 0 1 1 】

被検信号検出ユニット 1 1 0 0 は、色分けミラーと、偏光子と、ディテクタとを含み、被検面 1 0 9 0 で反射された光源周波成分と参照面 1 0 8 0 で反射された周波数シフト成分との干渉信号（被検信号）をヘテロダイン検出する。

30

## 【 0 0 1 2 】

参照信号検出ユニット 1 0 6 0 で検出される参照信号に対する被検信号検出ユニット 1 1 0 0 で検出される被検信号の位相差は、参照面 1 0 8 0 と被検面 1 0 9 0 との間の光路長差に応じて変化する。従って、算出ユニット 1 1 1 0 では、基本波成分と 2 倍波成分のそれぞれの光路長差を算出することができる。

## 【 0 0 1 3 】

基本波成分と 2 倍波成分のそれぞれの光路長差  $OP(f_1)$  及び  $OP(f_2)$  は、参照面で反射した光束と被検面で反射した光束の光路の幾何学的な距離を  $D$ 、基本波成分の周波数を  $f_1$ 、2 倍波成分の光周波数を  $f_2$  とすると、以下の数式 1 及び数式 2 で表される。

40

## 【 0 0 1 4 】

$$OP(f_1) = [1 + N t p \cdot B(f_1)] D \quad \dots \text{(数式 1)}$$

$$OP(f_2) = [1 + N t p \cdot B(f_2)] D \quad \dots \text{(数式 2)}$$

数式 1 及び数式 2 において、 $N t p$  は参照面と被検面との間の非同一光路における媒質の密度に依存する成分であり、 $B(f_1)$  及び  $B(f_2)$  は波長のみ依存する関数である。

## 【 0 0 1 5 】

50

数式 1 及び数式 2 から、幾何学的な距離 D は、以下の数式 3 で表される。

【 0 0 1 6 】

$$D = OP(f_1) - A(OP(f_2) - OP(f_1)) \dots (\text{数式 3})$$

数式 3 において、 $A = B(f_1) / (B(f_2) - B(f_1))$  であり、A 係数と呼ばれる。

【 0 0 1 7 】

このような 2 つの波長での光路長差 ( データ ) から幾何学的な距離を算出する技術に関しては、特許文献 1 に開示されている。特許文献 1 では、基本波成分と 2 倍波成分の光路長差から幾何学的な距離 D を算出することで、媒質の屈折率の変動に依存せずに安定した計測を実現している。

【特許文献 1】特開平 1 1 - 4 4 5 0 4 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 8 】

しかしながら、従来技術では、幾何学的な距離 D の計測精度が A 係数に依存するため、計測精度の高精度化が困難であるという問題がある。例えば、A 係数を小さくすることで計測精度の高精度化を図ることができるが、A 係数を小さくするためには波長差を拡大しなければならず、偏光子の精度保証が困難になるため、光路長の周期誤差が発生してしまう。また、一般的な波長帯域において、A 係数は最小でも数十程度であるため、光路長の計測精度に比較して劣化が避けられない。

【 0 0 1 9 】

更に、実際に計測される光路長は波長の整数倍の不確定性を有し、幾何学的な距離 D の絶対値を決定するためには予めサブ  $\mu m$  程度の波長以下の精度で距離 D を計測する必要があるため、現実的には、絶対値の決定は不可能であるという問題もある。

【 0 0 2 0 】

そこで、本発明は、このような従来技術の課題に鑑みてなされ、参照面と被検面との間の光路の幾何学的な距離を高精度に計測することができる計測装置を提供することを例示的目的とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 2 1 】

上記目的を達成するために、本発明の一側面としての計測装置は、基準面に固定された参照面と、被検物体に配置された被検面との間の距離を計測する計測装置であって、複数の光周波数成分を有し、前記複数の光周波数成分のそれぞれが均等な光周波数差となる光束を生成する光周波数コム生成ユニットと、前記複数の光周波数成分のそれぞれについて、前記参照面で反射された光束と前記被検面で反射された光束との干渉信号を検出して、前記参照面と前記被検面との間の光路長に相当する位相を検出する検出ユニットと、前記検出ユニットで検出された位相に基づいて、前記参照面と前記被検面との間の幾何学的な距離を算出する算出ユニットと、を有し、前記算出ユニットは、前記複数の光周波数成分のそれぞれについて、前記検出ユニットで検出された位相を光路長に変換し、前記光路長に対して関数をフィッティングさせることによって、前記幾何学的な距離を算出し、前記関数は、前記幾何学的な距離と、前記参照面と前記被検面との間の媒質の屈折率によって変化する光路長の変化分との和で表され、前記光路長の変化分は、前記参照面と前記被検面との間の既知の分散特性を有する媒質の屈折率に前記幾何学的な距離を乗算して得られることを特徴とする。

【 0 0 2 2 】

本発明の更なる目的又はその他の側面は、以下、添付図面を参照して説明される好ましい実施形態によって明らかにされるであろう。

【発明の効果】

【 0 0 2 3 】

本発明によれば、例えば、参照面と被検面との間の光路の幾何学的な距離を高精度に計

10

20

30

40

50

測する計測装置を提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0024】

以下、添付図面を参照して、本発明の好適な実施の形態について説明する。なお、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の実施形態>

図1は、第1の実施形態における計測装置1の構成を示す図である。計測装置1は、基準面に固定された参照面と、被検物体に配置された被検面との間の距離を計測する光波干渉計測装置である。計測装置1は、図1に示すように、光源102と、光周波数コム生成ユニット(第1のユニット)104と、周波数シフタ106と、光周波数コム生成ユニット(第2のユニット)108とを有する。更に、計測装置1は、無偏光ビームスプリッタ110と、参照信号検出ユニット112と、偏光ビームスプリッタ114と、被検信号検出ユニット120と、算出ユニット122とを有する。ここでは、計測装置1は、一組の光周波数コム生成ユニットを有するが、一組以上の光周波数コム生成ユニットを有していてもよい。

10

【0025】

光周波数 $f_1$ の連続波光源である光源102を射出した光束(高精度に波長が安定化された光束)は2つの光束に分岐され、一方の光束は光周波数コム生成ユニット104に入射する。

【0026】

光周波数コム生成ユニット104は、電気光学変調素子と、共振器とを含む。光周波数コム生成ユニット104は、図示しない発振器からの駆動周波数に応じて電気光学変調素子を駆動して光周波数 $f_1$ を中心として周波数間隔(周波数差) $f_m$ の櫛歯状の光周波数スペクトルを有する光周波数コムを生成する。本実施形態では、光周波数コム生成ユニット104を射出した光束を光周波数コムOC1と称する。

20

【0027】

光源102から射出して分岐された他方の光束は、音響光学素子を含む周波数シフタ106によって、光周波数が $f_1 + f$ に変換されて光周波数コム生成ユニット108に入射する。

【0028】

光周波数コム生成ユニット108は、図示しない発振器からの駆動周波数に応じて電気光学変調素子を駆動して光周波数 $f_1 + f$ を中心として周波数間隔 $f_m + f_m$ の櫛歯状の光周波数スペクトルを有する光周波数コムを生成する。本実施形態では、光周波数コム生成ユニット108を射出した光束を光周波数コムOC2と称する。なお、光周波数コムOC1と光周波数コムOC2とは、互いに直交する偏光を有する。

30

【0029】

光周波数コム生成ユニット104及び108のそれぞれでは、中心光周波数、及び、光周波数差が互いに異なる光周波数コムOC1及びOC2が生成される。

【0030】

本実施形態では、連続波光源である光源102からの光束を位相変調して光周波数コムを生成しているが、レーザー共振器から直接光周波数コムを生成することも可能である。この場合、一般に光周波数間隔が狭くなるが、必要に応じてエタロン等を用いて周波数フィルタを行えばよい。

40

【0031】

光周波数コムOC1及びOC2は、無偏光ビームスプリッタ110に入射し、同軸上に重ね合わされて2つに分岐される。無偏光ビームスプリッタ110で分岐された一方は、偏光子と、ディテクタとを含む参照信号検出ユニット112に入射する。参照信号検出ユニット112では、ディテクタに至るまでの光周波数コムOC1と光周波数コムOC2との光路長差に応じて変化する干渉信号(参照信号)を検出する。

【0032】

50

無偏光ビームスプリッタ 110 で分岐された他方の光束は、偏光ビームスプリッタ 114 に入射する。偏光ビームスプリッタ 114 は、反射面に平行な偏光成分の光束を透過し、反射面に垂直な偏光成分の光束を反射する。

【0033】

光周波数コム OC1 は、偏光ビームスプリッタ 114 の反射面に対して平行な偏光成分となるように調整されているため、偏光ビームスプリッタ 114 を透過して被検面 118 に入射する。また、光周波数コム OC2 は、偏光ビームスプリッタ 114 の反射面に対して垂直な偏光となるように調整されているため、偏光ビームスプリッタ 114 で反射されて参照面 116 に入射する。

【0034】

参照面 116 及び被検面 118 は、複数の反射面からなる、所謂、コーナキューブを構成しているため、参照面 116 及び被検面 118 で反射された光束は、入射位置とずれた位置から入射角度と同一角度で射出される。被検面 118 からの光束は、偏光ビームスプリッタ 114 を透過して被検信号検出ユニット 120 に入射する。また、参照面 116 からの光束は、偏光ビームスプリッタ 114 で反射されて被検信号検出ユニット 120 に入射する。

【0035】

被検信号検出ユニット 120 は、参照信号検出ユニット 112 と同様に、偏光子と、ディテクタとを含み、被検面 118 で反射された光周波数コム OC1 と参照面 116 で反射された光周波数コム OC2 との干渉信号（被検信号）を検出する。

【0036】

このように、参照信号検出ユニット 112 及び被検信号検出ユニット 120 は、参照面 116 で反射された光束と被検面 118 で反射された光束との干渉信号を検出して、参照面 116 と被検面 118 との間の距離に相当する位相を検出する。

【0037】

算出ユニット 122 は、参照面 116 と被検面 118 との間の距離に相当する位相に基づいて、後述するように、参照面 116 と被検面 118 との間の幾何学的な距離（参照面 116 と被検面 118 との間が真空であると仮定したときの距離）を算出する。例えば、算出ユニット 122 は、複数の光周波数成分のそれぞれについて、参照信号検出ユニット 112 及び被検信号検出ユニット 120 で検出された位相を参照面 116 と被検面 118 との間が真空であると仮定して光路長に変換する。そして、算出ユニット 122 は、変換した光路長に対して関数をフィッティングさせることによって、参照面 116 と被検面 118 との間の幾何学的な距離を算出する。ここで、光路長に対してフィッティングさせる関数は、参照面と被検面との間の幾何学的な距離と、参照面と被検面との間の媒質の屈折率によって変化する光路長の変化分との和で表される。なお、光路長の変化分は、参照面と被検面との間の既知の分散特性を有する媒質の屈折率に幾何学的な距離を乗算することで得ることができる。また、算出ユニット 122 は、後述するように、参照面 116 と被検面 118 との間の媒質の屈折率を算出することもできる。

【0038】

以下、算出ユニット 122 による参照面 116 と被検面 118 との間の幾何学的な距離の算出処理について具体的に説明する。

【0039】

参照信号検出ユニット 112 で検出される参照信号  $I_{ref}$  は以下の数式 4 で表され、被検信号検出ユニット 120 で検出される被検信号  $I_{test}$  は以下の数式 5 で表される。

【0040】

10

20

30

40

【数 1】

$$I_{\text{ref}} = \sum_{p=-n}^n a_{1p} a_{2p} \cos \left[ 2\pi(\Delta f + p \cdot \Delta f_m)t - 2\pi(f + p \cdot f_m) \frac{L_1 n_1}{c} \right] \cdot \dots \text{(数式4)}$$

【0041】

【数 2】

$$I_{\text{test}} = \sum_{p=-n}^n a_{1p} a_{2p} \cos \left[ 2\pi(\Delta f + p \cdot \Delta f_m) \left( t - \frac{L_2 n_2}{c} \right) - 2\pi(f + p \cdot f_m) \frac{L_1 n_1 + D \cdot n}{c} \right] \cdot \dots \text{(数式5)}$$

【0042】

数式 4 及び数式 5 において、 $a_{1p}$  は光周波数コム OC 1 の  $p$  番目の周波数成分振幅であり、 $a_{2p}$  は光周波数コム OC 2 の  $p$  番目の周波数成分振幅である。また、 $L_1 n_1$  は光周波数コム生成ユニットから参照信号検出ユニット 112 までの光路長差、 $L_2 n_2$  は参照信号検出ユニット 112 から被検信号検出ユニット 120 までの光周波数コム OC 1 の光路の光路長である。また、 $D \cdot n$  は偏光ビームスプリッタ 114 以降の光周波数コム OC 1 と光周波数コム OC 2 との光路長差である。

【0043】

$p$  番目の干渉信号の周波数成分を  $f + p \cdot f_m$  とすると、かかる干渉成分は光周波数コム OC 1 の  $p$  番目の光周波数  $f + p \cdot f_m$  と光周波数コム OC 2 の  $p$  番目の光周波数成分  $f + p \cdot (f_m + f_m)$  との干渉信号となる。

【0044】

図 2 は、参照信号検出ユニット 112 で検出される参照信号、及び、被検信号検出ユニット 120 で検出される被検信号の時間変化を示す図である。干渉信号は光周波数コム OC 1 と光周波数コム OC 2 との周波数間隔  $f_m$  の周波数で繰り返されるパルス信号となり、参照面 116 と被検面 118 との光路長差に応じて参照信号と被検信号には遅延時間が発生する。

【0045】

図 2 における干渉信号のフーリエ変換を図 3 に示す。周波数（搬送周波数） $f$  を中心に周波数間隔  $f_m$  で信号成分が検出されるため、これらの成分の位相を算出することでそれぞれに対応する光周波数成分のヘテロダイン検出が実現する。

【0046】

光周波数  $f_p$  に対する光路長（計測結果） $OP(f_p)$  は、参照面 116 で反射された光束と被検面 118 で反射された光束の光路の幾何学的な距離を  $D$  とすると、以下の数式 6 で表される。

【0047】

$$OP(f_p) = [1 + N t_p \cdot B(f_p)] D \cdot \dots \text{(数式 6)}$$

数式 6 において、 $N t_p$  は参照面と被検面との間の非同一光路における媒質の密度に依存する成分であり、 $B(f)$  は波長のみ依存する関数である。なお、数式 6 に示すように、参照面と被検面との間の媒質の既知の分散特性は、媒質の密度に依存する成分と光周波数成分に依存する成分との積と、媒質の真空中の屈折率との和で近似される。

【0048】

関数  $B(f)$  は、参照面と被検面との間の非同一光路における媒質が湿度 0 の空気である場合、Edlen の式を用いて以下の数式 7 で表される。

【0049】

$$B(f) = 0.0472326 / (173.3 - (10 \wedge (6) f / c) \wedge 2) \quad 50$$



・・・(数式7)

なお、参照面と被検面との間の媒質が上述した条件と異なる場合には、適切な関数を設定すればよい。

【0050】

計測装置1で実際に計測される光路長差は波長ごとに波長の整数倍の不確定性を有するため、必要に応じて光路長の絶対値の補正を行う。例えば、幾何学的な距離Dが $D = D' \pm D$ として精度Dで既知であるとする。また、隣接する2つの光周波数の計測結果に対する位相差(即ち、位相間の変化量)をとする。この場合、光周波数 $f_m$ における光波干渉次数 $n_1$ 、光周波数 $f_p$ における光波干渉次数 $n_2$ 、光周波数 $f_p$ における検出位相 $\phi_{meas}(f_p)$ 及び光周波数 $f_p$ における光路長 $OP_{meas}(f_p)$ は、以下の数式8乃至数式11で表される。

10

【0051】

【数3】

$$n_1 = \text{round} \left[ \left( D' - \frac{\Delta \phi}{2\pi} \frac{c}{f_m} \right) / \frac{c}{f_m} \right] \dots (\text{数式8})$$

【0052】

【数4】

$$n_2 = \text{round} \left[ \left( \frac{\Delta \phi}{2\pi} \frac{c}{f_m} - \frac{\phi(f_p)}{2\pi} \frac{c}{f_p} \right) / \frac{c}{f_p} \right] \dots (\text{数式9})$$

20

【0053】

【数5】

$$\phi_{meas}(f_p) = \phi(f_p) + 2\pi \left[ n_1 \frac{f_p}{f_m} + n_2 \right] \dots (\text{数式10})$$

【0054】

【数6】

$$OP_{meas}(f_p) = \frac{\phi_{meas}(f_p)}{2\pi} \frac{c}{f_p} \dots (\text{数式11})$$

30

【0055】

数式8及び数式9において、 $\text{round}()$ は()内の引数を整数値へ丸める演算であり、 $c$ は光速である。また、数式10において、 $\phi(f_p)$ は光周波数 $f_p$ の被検信号の参照信号に対する位相差である。

【0056】

40

図4は、干渉次数の計算結果を示す図である。図4において、破線は計測位相を表し、光周波数に対し $\pm$ で畳まれているが、数式8乃至数式10を適用することで実線に示すように干渉次数補正後の位相(干渉次数補正位相)が得られる。

【0057】

数式8からわかるように、干渉次数を正確に算出するためには、 $D'$ の計測精度Dが光周波数間隔から算出される合成波長 $c/f_m$ より高精度である(合成波長以下の精度である)必要があるが、 $f_m$ を数GHzにすることで数mm程度とすることが可能である。

【0058】

複数の波長に対する光路長の計測結果から媒質密度の変化を補正するために、光路長の計測結果に対してフィッティングを行うことで幾何学的な距離Dを算出する。フィッティ

50

ング残差の平方和  $J$  は計測される光路長を  $OP_{meas}(f_p)$  として以下の数式 12 で表されるため、数式 12 を最小化する  $D$  及び  $N_{tp} \cdot D$  は正規方程式を解くことで決定することができる。

【 0 0 5 9 】

【 数 7 】

$$J = \sum_{i=1}^n \left\{ OP_{meas}(f_i) - (D + N_{tp} \cdot D \cdot B(f_i)) \right\}^2 \dots \text{(数式12)}$$

10

【 0 0 6 0 】

計測される光路長に対してフィッティングを行った結果を図 5 に示す。図 5 を参照するに、 $D$  で示した離散的な光路長の計測結果に対して、一点鎖線で示した数式 6 を最適化近似することで  $D$  及び  $N_{tp} \cdot D$  を得ることができる。また、参照面と被検面との間の媒質の屈折率が必要な場合には、光周波数ごとの光路長の計測結果を参照面と被検面との間の幾何学的な距離で除算することで屈折率を算出することができる。

【 0 0 6 1 】

一般に、光波干渉計測装置においては、計測波長及びその高調波成分の周期で光路長の計測結果に周期誤差が発生し、かかる誤差要因は偏光子の製造誤差などによる迷光であることが知られている。迷光による周期誤差は計測光と迷光との位相差に起因するため、均

20

【 0 0 6 2 】

距離  $L$  を伝播する光周波数  $f$  の光束の位相は  $2\pi \cdot L \cdot f / c$  で表される。また、周波数間隔が均等である光周波数コムでは、それぞれの光周波数で計測される位相の間隔は均等である。更に、計測に用いる光周波数の帯域を  $c / L$  より十分に大きくすることで位相差は  $2\pi$  以上発生することになる。従って、 $2\pi$  の位相の範囲内に複数の計測結果が存在するように光周波数間隔  $f_m$  を選択（設定）することで周期誤差の補正が実現する。なお、光周波数の帯域が非常に広い場合には、周波数帯に応じて周期誤差の影響度が変化するため、周期誤差の影響が同等とみなせる範囲内（即ち、許容値内）において、上述した条件

30

【 0 0 6 3 】

このように、本実施形態の計測装置 1 では、複数の波長での同時計測による単純な平均化効果に加えて、計測に用いる光周波数が等間隔であるため偏光子の製造誤差等に起因する周期誤差もキャンセルされる。従って、計測装置 1 は、高精度に幾何学的な距離  $D$  を計測（算出）することができる。

【 0 0 6 4 】

また、計測装置 1 においては、予め数  $mm$  程度の粗い精度で幾何学的な距離  $D$  がわかれば、波長の整数倍の不確定性を排除して幾何学的な距離  $D$  の絶対値を高精度に計測（決定）することが可能である。

40

< 第 2 の実施形態 >

図 6 は、第 2 の実施形態における計測装置 1 A の構成を示す図である。計測装置 1 A は、基準面に固定された参照面と、被検物体に配置された被検面との間の距離を計測する光波干渉計測装置である。計測装置 1 A は、中心光周波数、及び、光周波数差が互いに異なる光束を生成する 2 つのユニットを含む複数組の光周波数コム生成ユニットを有する。

【 0 0 6 5 】

計測装置 1 A は、図 6 に示すように、光源 102 と、光周波数コム生成ユニット 104 と、周波数シフタ 106 と、光周波数コム生成ユニット 108 とを有する。また、計測装置 1 A は、無偏光ビームスプリッタ 110 と、参照信号検出ユニット 112 と、偏光ビームスプリッタ 114 と、被検信号検出ユニット 120 と、算出ユニット 122 とを有する

50

。更に、計測装置 1 A は、光源 1 3 2 と、光周波数コム生成ユニット 1 3 4 と、周波数シフタ 1 3 6 と、光周波数コム生成ユニット 1 3 8 とを有する。

【 0 0 6 6 】

光周波数  $f_1$  の連続波光源である光源 1 0 2 を射出した光束（高精度に波長が安定化された光束）は 2 つの光束に分岐され、一方の光束は光周波数コム生成ユニット 1 0 4 に入射する。

【 0 0 6 7 】

光周波数コム生成ユニット 1 0 4 は、光周波数  $f_1$  を中心として周波数間隔  $f_{m1}$  の櫛歯状の光周波数スペクトルを有する光周波数コムを生成する。本実施形態では、光周波数コム生成ユニット 1 0 4 を射出した光束を光周波数コム OC 1 と称する。

10

【 0 0 6 8 】

光源 1 0 2 から射出して分岐された他方の光束は、周波数シフタ 1 0 6 によって、光周波数が  $f_1 + f_1$  に変換されて光周波数コム生成ユニット 1 0 8 に入射する。

【 0 0 6 9 】

光周波数コム生成ユニット 1 0 8 は、光周波数  $f_1 + f_1$  を中心として周波数間隔  $f_{m1} + f_m$  の櫛歯状の光周波数スペクトルを有する光周波数コムを生成する。本実施形態では、光周波数コム生成ユニット 1 0 8 を射出した光束を光周波数コム OC 2 と称する。なお、光周波数コム OC 1 と光周波数コム OC 2 とは、互いに直交する偏光を有する。

【 0 0 7 0 】

また、周波数  $f_1$  と異なる周波数  $f_2$  の連続波光源である光源 1 3 2 を射出した光束は 2 つの光束に分岐され、一方の光束は光周波数コム生成ユニット 1 3 4 に入射する。

20

【 0 0 7 1 】

光周波数コム生成ユニット 1 3 4 は、光周波数  $f_2$  を中心として周波数間隔  $f_{m2}$  の櫛歯状の光周波数スペクトルを有する光周波数コムを生成する。本実施形態では、光周波数コム生成ユニット 1 3 4 を射出した光束を光周波数コム OC 3 と称する。なお、光周波数コム OC 3 は、光周波数コム OC 1 と同じ偏光を有する。

【 0 0 7 2 】

光源 1 3 2 から射出して分岐された他方の光束は、周波数シフタ 1 3 6 によって、光周波数が  $f_2 + f_2$  に変換されて光周波数コム生成ユニット 1 3 8 に入射する。

【 0 0 7 3 】

光周波数コム生成ユニット 1 3 8 は、光周波数  $f_2 + f_2$  を中心として周波数間隔  $f_{m2} + f_m$  の櫛歯状の光周波数スペクトルを有する光周波数コムを生成する。本実施形態では、光周波数コム生成ユニット 1 3 8 を射出した光束を光周波数コム OC 4 と称する。なお、光周波数コム OC 4 は、光周波数コム OC 2 と同じ偏光を有する。

30

【 0 0 7 4 】

光周波数コム OC 1 乃至 OC 4 は、無偏光ビームスプリッタ 1 1 0 に入射し、同軸上に重ね合わされて 2 つに分岐される。無偏光ビームスプリッタ 1 1 0 で分岐された一方は、参照信号検出ユニット 1 1 2 に入射する。参照信号検出ユニット 1 1 2 では、光源 1 0 2 及び 1 3 2 からディテクタに至るまでの光周波数コム OC 1 と光周波数コム OC 2 及び光周波数コム OC 3 と光周波数コム OC 4 との光路長差に応じて変化する干渉信号（参照信号）を検出する。なお、光源 1 0 2 からの光束と光源 1 3 2 からの光束との光周波数差を参照信号検出ユニット 1 1 2 におけるディテクタの帯域より十分に大きくすることで、光源 1 0 2 と光源 1 3 2 との間の干渉信号は無視することができる。

40

【 0 0 7 5 】

無偏光ビームスプリッタ 1 1 0 で分岐された他方の光束は、偏光ビームスプリッタ 1 1 4 に入射する。偏光ビームスプリッタ 1 1 4 は、反射面に平行な偏光成分の光束を透過し、反射面に垂直な偏光成分の光束を反射する。

【 0 0 7 6 】

光周波数コム OC 1 及び OC 3 は、偏光ビームスプリッタ 1 1 4 の反射面に対して平行な偏光成分となるように調整されているため、偏光ビームスプリッタ 1 1 4 を透過して被

50

検面 118 に入射する。また、光周波数コム OC2 及び OC4 は、偏光ビームスプリッタ 114 の反射面に対して垂直な偏光となるように調整されているため、偏光ビームスプリッタ 114 で反射されて参照面 116 に入射する。

【0077】

参照面 116 及び被検面 118 は、複数の反射面からなる、所謂、コーナキューブを構成しているため、参照面 116 及び被検面 118 で反射された光束は、入射位置とずれた位置から入射角度と同一角度で射出される。被検面 118 からの光束は、偏光ビームスプリッタ 114 を透過して被検信号検出ユニット 120 に入射する。また、参照面 116 からの光束は、偏光ビームスプリッタ 114 で反射されて被検信号検出ユニット 120 に入射する。

10

【0078】

被検信号検出ユニット 120 は、参照面 116 と被検面 118 との間の光路長差で変化する光周波数コム OC1 と光周波数コム OC2 との干渉信号と、光周波数コム OC3 と光周波数コム OC4 との干渉信号とを同時に検出する。なお、被検信号検出ユニット 120 で検出される干渉信号を被検信号と称する。

【0079】

このように、参照信号検出ユニット 112 及び被検信号検出ユニット 120 は、参照面 116 で反射された光束と被検面 118 で反射された光束との干渉信号を検出して、参照面 116 と被検面 118 との間の距離に相当する位相を検出する。

【0080】

算出ユニット 122 は、参照面 116 と被検面 118 との間の距離に相当する位相に基づいて、後述するように、参照面 116 と被検面 118 との間の幾何学的な距離を算出する。

20

【0081】

以下、算出ユニット 122 による参照面 116 と被検面 118 との間の幾何学的な距離の算出処理について具体的に説明する。

【0082】

参照信号検出ユニット 112 で検出される参照信号  $I_{ref}$  は以下の数式 13 で表され、被検信号検出ユニット 120 で検出される被検信号  $I_{test}$  は以下の数式 14 で表される。

30

【0083】

【数 8】

$$I_{ref} = \sum_{p=-n}^n a_{1p} a_{2p} \cos \left[ 2\pi (\Delta f_{1+p} \cdot \Delta f_m) t - 2\pi (f_{1+p} \cdot f_{m1}) \frac{L_1 n_1}{c} \right] + \sum_{q=-n}^n a_{3p} a_{4p} \cos \left[ 2\pi (\Delta f_{2+q} \cdot \Delta f_m) t - 2\pi (f_{2+q} \cdot f_{m2}) \frac{L_1 n_1}{c} \right] \dots \text{(数式13)}$$

40

【0084】

【数 9】

$$I_{\text{test}} = \sum_{p=-n}^n a_{1p} a_{2p} \cos \left[ 2\pi (\Delta f_1 + p \cdot \Delta f_m) \left( t - \frac{L_2 n_2}{c} \right) - 2\pi (f_1 + p \cdot f_{m1}) \frac{L_1 n_1 + D \cdot n}{c} \right] \\ + \sum_{q=-n}^n a_{3p} a_{4p} \cos \left[ 2\pi (\Delta f_2 + q \cdot \Delta f_m) \left( t - \frac{L_2 n_2}{c} \right) - 2\pi (f_2 + q \cdot f_{m1}) \frac{L_1 n_1 + D \cdot n}{c} \right]$$

・・・(数式14)

10

【0085】

数式13及び数式14を参照するに、第1の実施形態における数式4及び数式5のそれぞれに対して、光源132による干渉信号が異なる中心周波数で加算されている。

【0086】

p番目の干渉信号の周波数成分を  $f_1 + p \cdot f_m$  とすると、かかる干渉成分は光周波数コムOC1のp番目の光周波数  $f_1 + p \cdot f_{m1}$  と光周波数コムOC2のp番目の光周波数成分  $f_1 + f_1 + p \cdot (f_{m1} + f_m)$  との干渉信号となる。同様に、q番目の干渉信号の周波数成分を  $f_2 + q \cdot f_m$  とすると、かかる干渉成分は光周波数コムOC3のq番目の光周波数  $f_2 + q \cdot f_{m2}$  と光周波数コムOC4のq番目の光周波数成分  $f_2 + f_2 + q \cdot (f_{m2} + f_m)$  との干渉信号となる。従って、干渉信号のそれぞれの周波数成分は異なる光周波数によるヘテロダイン信号となるため、光周波数コムOC1及び光周波数OC3のそれぞれの光周波数における光路長の計測が実現する。

20

【0087】

図7は、参照信号検出ユニット112で検出される参照信号、及び、被検信号検出ユニット120で検出される被検信号の時間変化を示す図である。光周波数コムOC1と光周波数コムOC2との光周波数間隔の差と光周波数コムOC3と光周波数コムOC4との光周波数間隔の差とを同じにすることで、それぞれの周期が等しいパルス信号を得ることができる。

30

【0088】

図7における干渉信号のフーリエ変換を図8に示す。光周波数コムOC1と光周波数コムOC2との干渉信号は、周波数(搬送周波数)  $f_1$  を中心として周波数間隔  $f_m$  の信号を有する。光周波数コムOC3と光周波数コムOC4との干渉信号は、周波数(搬送周波数)  $f_2$  を中心として周波数間隔  $f_m$  の信号を有する。ここで、それぞれの信号が重ならないようにするために、搬送周波数差  $|f_2 - f_1|$  は、それぞれの干渉信号の帯域より十分広くすることが必要である。

【0089】

光周波数  $f$  に対する光路長(計測結果)  $OP(f)$  は、参照面116で反射された光束と被検面118で反射された光束の光路の幾何学的な距離を  $D$  とし、媒質密度に加えて湿度の影響を考慮すると、以下の数式15で表される。

40

【0090】

$$OP(f) = [1 + N_{tp} \cdot B(f) + N_f \cdot C(f)] D \quad \dots \text{(数式15)}$$

数式15において、 $N_{tp}$  は参照面と被検面との間の非同一光路における媒質の密度に依存する成分であり、 $B(f)$  は波長のみ依存する関数である。また、 $N_f$  は湿度に依存する成分であり、 $C(f)$  は波長のみ依存する関数である。なお、数式15に示すように、参照面と被検面との間の媒質の既知の分散特性は、媒質の密度に依存する成分と光周波数成分に依存する成分との積と、媒質の湿度に依存する成分と光周波数成分に依存する成分との積と、媒質の真空中の屈折率との和で近似される。

【0091】

50

関数  $B(f)$  及び  $C(f)$  のそれぞれは、参照面と被検面との間の非同一光路における媒質が空気である場合、E d l e n の式を用いて以下の数式 16 及び数式 17 で表される。

【0092】

$$B(f) = 0.0472326 / (173.3 - (10^{(6)} f / c)^2) \quad \dots \text{(数式 16)}$$

$$C(f) = (3.7345 - (10^{(-6)} f / c)^2) \quad \dots \text{(数式 17)}$$

なお、参照面と被検面との間の媒質が上述した条件と異なる場合には、適切な関数を設定すればよい。

【0093】

計測装置 1A で実際に計測される光路長差は波長ごとに波長の整数倍の不確定性を有するため、必要に応じて光路長の絶対値の補正を行う。まず、光周波数  $\text{COMC}1$  と光周波数  $\text{COMC}2$  との合成波長（第 1 の合成波長）に対する干渉次数、及び、光周波数  $\text{COMC}3$  と光周波数  $\text{COMC}4$  との合成波長（第 2 の合成波長）に対する干渉次数を決定する。光周波数  $\text{COMC}1$  と光周波数  $\text{COMC}2$  との干渉信号の隣接する 2 つの周波数成分の位相差（即ち、位相間の変化量）を 1、光周波数  $\text{COMC}3$  と光周波数  $\text{COMC}4$  との干渉信号の隣接する 2 つの周波数成分の位相差（即ち、位相間の変化量）を 2 とする。この場合、光周波数  $\text{COMC}1$  と光周波数  $\text{COMC}2$  との干渉次数  $n1$ 、及び、光周波数  $\text{COMC}3$  と光周波数  $\text{COMC}4$  との干渉次数  $n2$  は、以下の数式 18 を満たす最小の整数組として決定される。

【0094】

$$f_{m2} \cdot n1 = (2 \cdot f_{m1} - 1 \cdot f_{m2}) + f_{m1} \cdot n2 \quad \dots \text{(数式 18)}$$

例えば、 $f_{m'} = f_{m1} \cdot f_{m2} / (f_{m1} - f_{m2})$  とする。この場合、 $f_{m'}$  に対する干渉次数  $n3$ 、 $n4$  及び  $n5$  は、以下の数式 19 乃至数式 21 で表される。また、周波数  $f_p$  及び  $f_q$  のそれぞれにおける検出位相  $\phi_{\text{meas}}(f_p)$  及び  $\phi_{\text{meas}}(f_q)$ 、周波数  $f_p$  及び  $f_q$  のそれぞれにおける光路長  $OP_{\text{meas}}(f_p)$  及び  $OP_{\text{meas}}(f_q)$  は、以下の数式 22 乃至数式 25 で表される。なお、幾何学的な距離  $D$  が  $D = D' \pm D$  として精度  $D$  で既知であるとする。

【0095】

【数 10】

$$n3 = \text{round} \left[ \left( \left[ D' - \frac{\Delta \phi_1}{2\pi} + n1 \right] \frac{c}{f_{m1}} \right) / \frac{c}{f_{m'}} \right] \quad \dots \text{(数式 19)}$$

【0096】

【数 11】

$$n4 = \text{round} \left[ \left( \left[ \frac{\Delta \phi_1}{2\pi} \frac{c}{f_{m1}} - \frac{\phi(f_p)}{2\pi} \frac{c}{f_p} \right] / \frac{c}{f_p} \right) \right] \quad \dots \text{(数式 20)}$$

【0097】

【数 12】

$$n5 = \text{round} \left[ \left( \left[ \frac{\Delta \phi_2}{2\pi} \frac{c}{f_{m2}} - \frac{\phi(f_q)}{2\pi} \frac{c}{f_q} \right] / \frac{c}{f_q} \right) \right] \quad \dots \text{(数式 21)}$$

【0098】

10

20

30

40

【数 1 3】

$$\phi_{\text{meas}}(f_p) = \phi(f_p) + 2\pi \left[ n_3 \frac{f_p}{f'_m} + n_1 \frac{f_p}{f_{m1}} + n_4 \right] \dots \text{(数式22)}$$

【0 0 9 9】

【数 1 4】

$$\phi_{\text{meas}}(f_q) = \phi(f_q) + 2\pi \left[ n_3 \frac{f_q}{f'_m} + n_2 \frac{f_q}{f_{m2}} + n_5 \right] \dots \text{(数式23)}$$

10

【0 1 0 0】

【数 1 5】

$$OP_{\text{meas}}(f_p) = \frac{\phi_{\text{meas}}(f_p)}{2\pi} \frac{c}{f_p} \dots \text{(数式24)}$$

【0 1 0 1】

【数 1 6】

$$OP_{\text{meas}}(f_q) = \frac{\phi_{\text{meas}}(f_q)}{2\pi} \frac{c}{f_q} \dots \text{(数式25)}$$

20

【0 1 0 2】

数式 1 9 乃至数式 2 5 において、 $f_p$  は光周波数コム OC 1 と光周波数コム OC 2 との干渉信号の  $p$  番目の周波数成分であり、 $f_q$  は光周波数コム OC 3 と光周波数コム OC 4 との干渉信号の  $q$  番目の周波数成分である。

【0 1 0 3】

数式 1 9 を参照するに、干渉次数を正確に算出するために必要な  $D'$  の計測精度  $D$  は、光周波数コム OC 1 と光周波数コム OC 3 のそれぞれの合成波長（第 1 の合成波長）の更に合成波長（第 2 の合成波長）の  $c/f'_m$  以下（第 2 の合成波長以下の精度）となる。従って、 $f_{m1}$  及び  $f_{m2}$  を適切に選択することで数  $m$  から数十  $m$  に設定が可能であるため、実質的に、予め距離  $D$  を計測する必要がなくなる。

30

【0 1 0 4】

複数の波長に対する光路長の計測結果から媒質密度の変化を補正するために、光路長の計測結果に対してフィッティングを行うことで幾何学的な距離  $D$  を算出する。フィッティング残差の平方和  $J$  は計測される光路長を  $OP_{\text{meas}}(f_p)$  として以下の数式 2 6 で表されるため、数式 2 6 を最小化する  $D$ 、 $N_{tp} \cdot D$  及び  $N_f \cdot D$  は正規方程式を解くことで決定することができる。

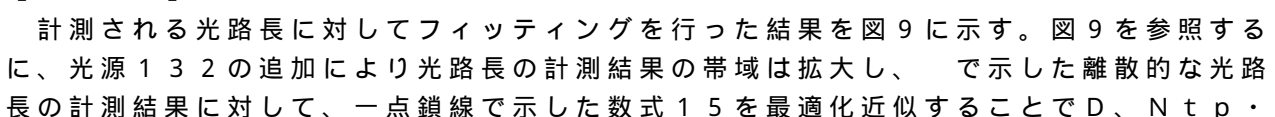
【0 1 0 5】

【数 1 7】

$$J = \sum_{i=1}^n \left\{ OP_{\text{meas}}(f_i) - (D + N_{tp} \cdot D \cdot B(f_i) + N_f \cdot D \cdot C(f_i)) \right\}^2 \dots \text{(数式26)}$$

40

【0 1 0 6】

計測される光路長に対してフィッティングを行った結果を図 9 に示す。図 9 を参照するに、光源 1 3 2 の追加により光路長の計測結果の帯域は拡大し、で示した離散的な光路長の計測結果に対して、一点鎖線で示した数式 1 5 を最適化近似することで  $D$ 、 $N_{tp} \cdot$

50

D及びN f・Dを得ることができる。

【0107】

このように、本実施形態の計測装置1Aでは、光源132を追加して計測周波数及び屈折率分散を増加させて計測精度を向上させていることに加え、湿度に対する変動も考慮している。従って、計測装置1Aは、湿度が大きく変化する環境であっても、高精度に幾何学的な距離Dを計測(算出)することができる。また、計測装置1Aは、fm1とfm2を適切に選択することで、予め距離Dを計測することなく、波長の整数倍の不確定性を排除して幾何学的な距離Dの絶対値を高精度に計測(決定)することができる。

【0108】

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ないことはいうまでもなく、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。

10

【図面の簡単な説明】

【0109】

【図1】本発明の一側面としての計測装置の構成を示す図である。

【図2】図1に示す計測装置において、参照信号検出ユニットで検出される参照信号、及び、被検信号検出ユニットで検出される被検信号の時間変化を示す図である。

【図3】図2における干渉信号のフーリエ変換を示す図である。

【図4】干渉次数の計算結果を示す図である。

【図5】計測される光路長に対してフィッティングを行った結果を示す図である。

20

【図6】本発明の一側面としての計測装置の構成を示す図である。

【図7】図6に示す計測装置において、参照信号検出ユニットで検出される参照信号、及び、被検信号検出ユニットで検出される被検信号の時間変化を示す図である。

【図8】図7における干渉信号のフーリエ変換を示す図である。

【図9】計測される光路長に対してフィッティングを行った結果を示す図である。

【図10】従来の計測装置(光波干渉計測装置)の構成を示す図である。

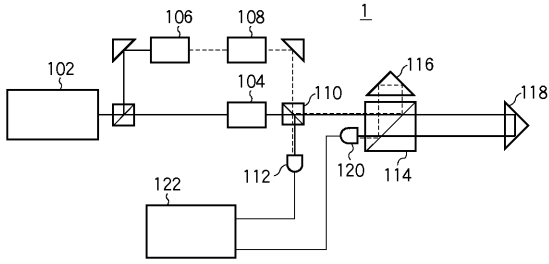
【符号の説明】

【0110】

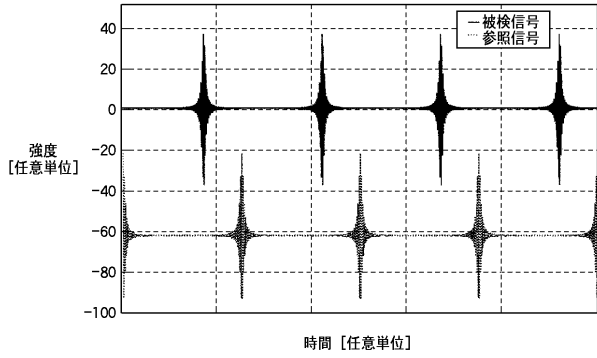
1	計測装置	
102	光源	30
104	光周波数コム生成ユニット	
106	周波数シフタ	
108	光周波数コム生成ユニット	
110	無偏光ビームスプリッタ	
112	参照信号検出ユニット	
114	偏光ビームスプリッタ	
116	参照面	
118	被検面	
120	被検信号検出ユニット	
122	算出ユニット	40
1A	計測装置	
132	光源	
134	光周波数コム生成ユニット	
136	周波数シフタ	
138	光周波数コム生成ユニット	



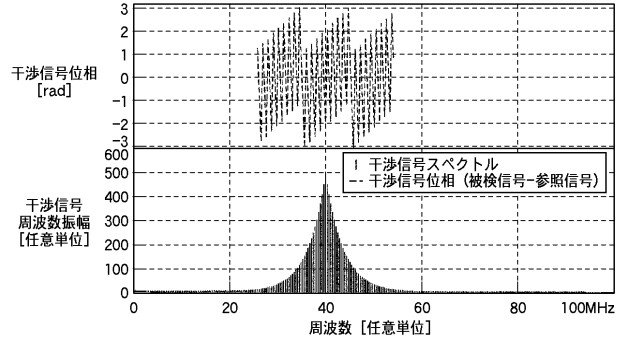
【 図 1 】



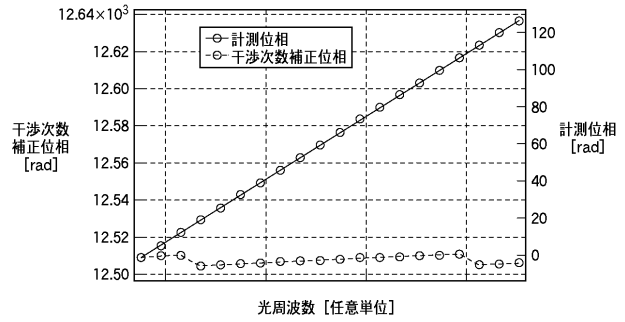
【 図 2 】



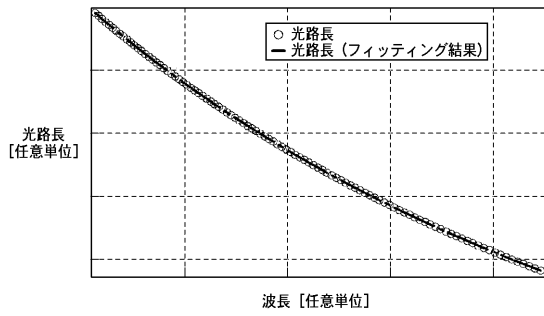
【 図 3 】



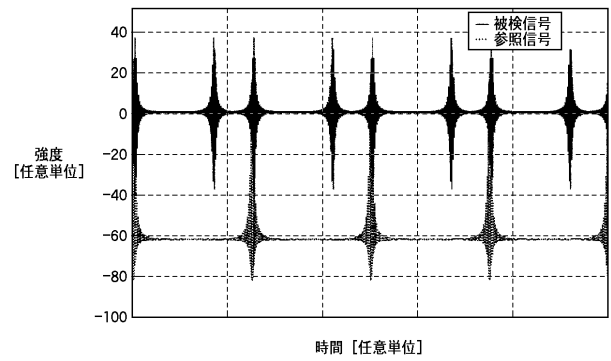
【 図 4 】



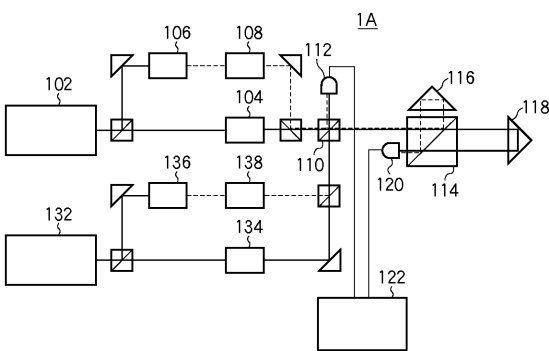
【 図 5 】



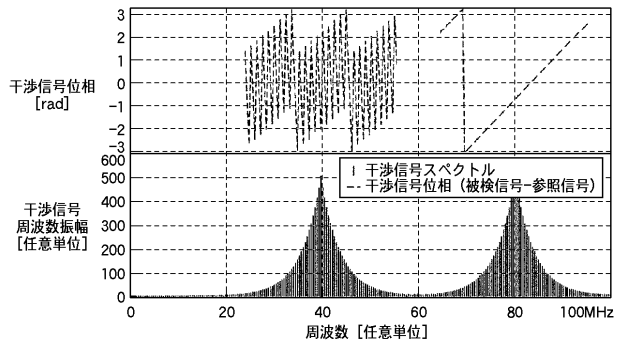
【 図 7 】



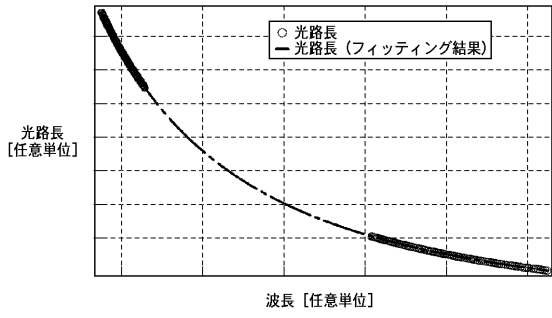
【 図 6 】



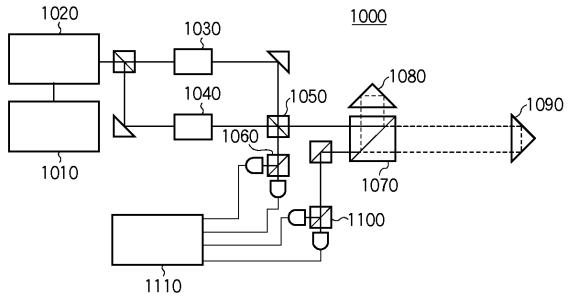
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】



---

フロントページの続き

(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

Fターム(参考) 2F064 AA01 BB05 CC04 EE01 FF01 FF06 FF07 GG12 GG22 GG23  
GG33 GG42 GG55 GG68 GG70  
2F065 AA02 AA06 BB15 BB25 DD03 FF52 GG04 GG23 GG24 LL12  
LL16 LL22 LL33 LL37 LL46 LL53 LL57 NN06 QQ17