

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4509389号  
(P4509389)

(45) 発行日 平成22年7月21日(2010.7.21)

(24) 登録日 平成22年5月14日(2010.5.14)

(51) Int. Cl.		F I	
<b>GO 1 B</b>	<b>9/02</b>	<b>(2006.01)</b>	GO 1 B 9/02
<b>GO 1 B</b>	<b>11/00</b>	<b>(2006.01)</b>	GO 1 B 11/00 G
<b>HO 1 L</b>	<b>21/027</b>	<b>(2006.01)</b>	HO 1 L 21/30 5 1 6 B

請求項の数 21 (全 84 頁)

(21) 出願番号	特願2000-605158 (P2000-605158)	(73) 特許権者	598176743 ザイゴ コーポレーション ZYGO CORPORATION アメリカ合衆国 コネチカット州 064 55ミドルフィールド ローレル ブルッ ク ロード (番地なし)
(86) (22) 出願日	平成12年3月15日 (2000.3.15)	(74) 代理人	100068755 弁理士 恩田 博宣
(65) 公表番号	特表2002-539443 (P2002-539443A)	(74) 代理人	100105957 弁理士 恩田 誠
(43) 公表日	平成14年11月19日 (2002.11.19)	(72) 発明者	ヒル、ヘンリー エイ。 アメリカ合衆国 85716 アリゾナ州 ツーソン サウス アヴェニダ デ パ ルマス 340
(86) 国際出願番号	PCT/US2000/007061		
(87) 国際公開番号	W02000/055573		
(87) 国際公開日	平成12年9月21日 (2000.9.21)		
審査請求日	平成19年3月14日 (2007.3.14)		
(31) 優先権主張番号	09/268, 619		
(32) 優先日	平成11年3月15日 (1999.3.15)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 距離測定及び分散干渉における循環エラーを特徴付けて修正するためのシステム及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

干渉計システムであって、

干渉計であって、動作中に参照ビームを参照路に沿って方向付け、かつ測定ビームを、被測定体と接触する測定路に沿って方向付け、かつ、参照ビームと測定ビームを組み合わせて、被測定体までの相対光路長の変化を示す重ね合せ戻りビームを生成し、かつ、動作中に参照ビームおよび測定ビームの少なくとも一方の位相シフトを生じる可変位相シフタを含む干渉計と、

動作中に重ね合せ戻りビームの偏光を合成して合成ビームを生成し、かつ合成ビームの時変強度を測定する検出システムと、

位相シフタおよび検出システムに連結されたアナライザであって、動作中に、位相シフタにより生じた位相シフトの値を制御し、合成ビームの時変強度に相当する位相を測定し、かつ、干渉計システムにおける周期誤差のスペクトル表示を、位相シフトの複数の値の各々に関して合成ビームの位相に基づいて決定するアナライザとを含む干渉計システム。

【請求項2】

スペクトル表示がフーリエサインおよびコサイン級数である請求項1に記載の干渉計システム。

【請求項3】

位相シフタが、参照ビームおよび測定ビームの一方において位相シフトを生じ、参照ビームおよび測定ビームの他方においては位相シフトを生じない請求項1に記載の干渉計シ

10

20

ステム。

【請求項 4】

位相シフトが参照ビームおよび測定ビームにおいて位相シフトを生じさせる請求項 1 に記載の干渉計システム。

【請求項 5】

動作中に、アナライザが、被測定体の複数の位置の各々に関して、位相シフトの複数の値ごとに、合成ビームの測定された位相に基づいてスペクトル表示を求める請求項 1 に記載の干渉計システム。

【請求項 6】

アナライザが記憶装置を含み、かつ、動作中に、スペクトル表示を前記記憶装置に保存する請求項 1 に記載の干渉計システム。

10

【請求項 7】

干渉計が、参照ビームと測定ビームを組み合わせる重ね合せ戻りビームを生成するビームスピリッタを含み、測定路が、被測定体とビームスピリッタの間で位相シフトと接触する請求項 1 に記載の干渉計システム。

【請求項 8】

干渉計が、参照ビームを参照路に沿って方向付け、かつ測定ビームを測定路に沿って方向付ける偏光ビームスピリッタを含み、測定路が、偏光ビームスピリッタと被測定体との間で位相シフトと接触する請求項 1 に記載の干渉計システム。

【請求項 9】

干渉計が、参照路からの参照ビームおよび測定路からの測定ビームを受ける偏光ビームスピリッタを含み、測定路が、被測定体と偏光ビームスピリッタとの間で位相シフトと接触する請求項 1 に記載の干渉計システム。

20

【請求項 10】

位相シフトが電気光学変調器である請求項 1 に記載の干渉計システム。

【請求項 11】

位相シフトが、光学遅延ラインと、遅延ライン長さを調節するための変換器とを含み、アナライザが前記変換器を制御する請求項 1 に記載の干渉計システム。

【請求項 12】

位相シフトが、1 対のプリズムと、プリズムの相対位置を変えるための変換器とを含み、アナライザが前記変換器を制御する請求項 1 に記載の干渉計システム。

30

【請求項 13】

位相シフトが、光路を画定するガスセルと、前記セル内のガス圧を変えるためのガス管理システムとを含み、アナライザがガス管理システムを制御する請求項 1 に記載の干渉計システム。

【請求項 14】

動作中に、干渉計が、第 2 の参照ビームを第 2 の参照路に沿って方向づけ、第 2 の測定ビームを、被測定体に接触する第 2 の測定路に沿って方向付け、かつ、第 2 参照ビームと第 2 測定ビームを組み合わせる重ね合せ戻りビームを生成し、動作中に、検出システムが、前記第 2 の 1 対の重ね合せ戻りビームの偏光を合成して第 2 の合成ビームを生成し、かつ第 2 合成ビームの時変強度を測定し、動作中に、アナライザが、第 2 合成ビームの時変強度に対応する位相を測定し、かつ、スペクトル表示を、位相シフトの複数の値の各々に関して、合成ビームの各々の測定された位相に基づいて求める請求項 1 に記載の干渉計システム。

40

【請求項 15】

動作中に、アナライザが、位相シフトの初期値をもたらし、被測定体の複数の位置の各々に関する合成ビームの各々の時変強度に対応する位相と、位相シフトの初期値とを測定し、次いで、初期値をもたらずステップおよび位相を測定するステップを、位相シフトのさらなる値に関して繰り返す請求項 14 に記載の干渉計システム。

【請求項 16】

50

位相シフトが、最初に述べた参照ビームおよび測定ビームの一方において位相シフトをもたらし、最初に述べた参照ビームおよび測定ビームの他方においては位相シフトをもたらさない請求項 1 4 に記載の干渉計システム。

【請求項 1 7】

ウェハ上に集積回路を製造する際に用いるリソグラフィシステムであって、  
ウェハを支持するステージと、  
空間的にパターン化された放射線をウェハ上に画像化するための照明システムと、  
画像化された放射線に対するステージの位置を調節するための位置決めシステムと、  
ステージの位置を測定するための、請求項 1 に記載の干渉計システムとを含むリソグラフィシステム。

10

【請求項 1 8】

ウェハ上に集積回路を製造する際に用いるリソグラフィシステムであって、  
ウェハを支持するステージと、  
放射線源を含む照明システム、マスク、位置決めシステム、レンズ組立体、および請求項 1 に記載の干渉計システムとを含み、  
動作中に、光源が放射線を、マスクを通して方向付けて空間的にパターン化された放射線を生成し、位置決めシステムが光源からの放射線に対するマスクの位置を調節し、レンズ組立体が、空間的にパターン化された放射線をウェハ上に画像化し、かつ、干渉計システムが、光源からの放射線に対するマスクの位置を測定するリソグラフィシステム。

20

【請求項 1 9】

集積回路を製造するためのリソグラフィシステムであって、互いに対して移動可能である第 1 および第 2 の構成部品と、請求項 1 に記載の干渉計システムとを含み、第 1 構成部品が被測定体を含み、干渉計システムが、第 1 構成部品の第 2 構成部品に対する位置を測定するリソグラフィシステム。

【請求項 2 0】

集積回路を製造するためのリソグラフィシステムであって、互いに対して移動可能である第 1 および第 2 の構成部品と、請求項 1 に記載の干渉計システムとを含み、第 1 構成部品が、測定路に接触した被測定体を含み、第 2 構成部品が参照路に接触し、干渉計システムが第 1 構成部品と第 2 構成部品の相対位置を測定するリソグラフィシステム。

【請求項 2 1】

リソグラフィマスクを製造する際に用いるビームライティングシステムであって、  
基板をパターン化するためのライトビームをもたらす光源と、  
基板を支持するステージと、  
ライトビームを基板に配光するためのビーム方向付け組立体と、  
ステージとビーム方向付け組立体とを互いに対して位置決めするための位置決めシステムと、  
ビーム方向付け組立体に対するステージの位置を測定するための請求項 1 に記載の干渉計システムとを含むビームライティングシステム。

30

【発明の詳細な説明】

(発明の背景)

本発明は、リソグラフ・スキャナまたはステッパ・システムにおけるマスクステージやウェハステージなどの測定物体の変位を測定する変位測定及び分散干渉計などの干渉計に関する。

40

【0001】

変位測定干渉計は、光学緩衝信号に基づいて、基準物体に対する測定物体の位置の変動を監視する。干渉計は、測定物体から反射される測定ビームを、基準物体から反射される基準にビームで重複、干渉することで光学干渉信号を発する。

【0002】

多数の用途において、測定と基準ビームは直交偏光と種々の周波数を有する。種々の周波数は、たとえば、レーザ・ゼーマン分光、音響光学変調により発生されるか、または複屈

50

折素子などを用いたレーザに内在的である。直交偏光により、偏光ビームスプリッタが測定及び基準ビームをそれぞれ測定及び基準物体に導き、反射された測定及び基準ビームを結合し、重複出射測定及び基準ビームを形成できる。重複出射ビームは出力ビームを形成し、その後偏光子を通過する。偏光子は、混合ビームを形成するため、出射測定及び基準ビームを混合する。混合ビームの出射測定及び基準ビームの成分は、混合ビームの強度が出射口の相対位相とともに変動するよう、互いに干渉する。検出器が、混合ビームの時間依存強度を測定し、該強度に比例した電気干渉信号を発する。測定及び基準ビームは異なる周波数であるため、電気干渉信号は、出射測定及び基準ビームの周波数間の際に等しい周波数を有する「ヘテロダイン」信号を含む。たとえば測定物体を含むステージを並進することで、測定及び基準路の長さが互いに対して変動する場合、測定された周波数は  $2 \nu p / \lambda$  に等しいドップラーシフトを含み、ここで  $\nu$  は測定及び基準物体の相対速度、 $\lambda$  は測定及び基準ビームの波長、 $p$  は基準及び測定物体への通過数である。測定物体の相対位置の変化は、測定された干渉信号の位相の変化に対応し、 $2 \pi \Delta L / (\lambda n p)$  の距離変化  $L$  に実質的に等しく、ここで  $n$  は光線ビームが移動する媒体、たとえば空気または真空の屈折率で、 $L$  は往復距離変化、たとえば、測定物体を含むステージまでの距離とステージからの距離の変化を表わす。

10

## 【0003】

残念ながらこの等式は常に正確であるわけではない。多数の干渉計は、測定された干渉信号の位相に影響し、光路長  $p n L$  の変動に正弦曲線的に依存する「周期的誤差」として知られる物を含む。特に、1次周期的誤差は  $(2 \pi p n L) / \lambda$  への正弦曲線的依存を有し、2次周期的誤差は  $2 (2 \pi p n L) / \lambda$  への正弦曲線的依存を有する。それより高次の周期的誤差も存在する。

20

## 【0004】

周期的誤差は、基準ビームを公称的に形成する入力ビームの一部が測定路にそって伝播し、及び/または測定ビームを公称的に形成する入力ビームの一部が基準路にそって伝播する「ビーム混合」によって生じる。かかるビーム混合は、入力ビームの偏光における楕円率と、干渉計コンポーネントの不完全性、たとえば、基準及び測定の各路にそって、直交偏光された入力ビームを導くために用いられる偏光ビームスプリッタにおける不完全性によって生じる。ビーム混合とその結果生じる周期的誤差により、測定された干渉信号の位相の変化と、基準及び測定路間の相対光路長  $p n L$  との間には厳密な直線関係はない。

30

ビーム混合により生じた周期的誤差は、補正されないと、干渉計によって測定される距離の変化の精度を制限する。周期的誤差は、干渉系内で多数の望ましくない反射を発する伝送表面の不完全さによっても発生される。周期的誤差の理論上の原因に関する一般的な参考文献については、たとえば、C. W. ウーと R. D. デスラット (C.W. Wu and R.D. Deslattes) の「ヘテロダイン干渉法における定期的非線形性の分析モデル (Analytical modelling of the periodic nonlinearity in heterodyne interferometry)」Applied Optics, 37, 6696-6700, 1998を参照する。

## 【0005】

分散測定用途で、光路長測定は多数の波長、たとえば  $532 \text{ nm}$  と  $1064 \text{ nm}$  で行い、距離測定干渉計の測定路の気体の分散を測定するために用いられる。分散測定は、距離測定干渉計によって測定された光路長を物理的長さに変換するために用いられる。測定物体までの物理的距離が不変であっても、測定アーム内の気体の乱流によって、測定された光路長の変動が生じることがあるため、かかる変換が重要となる。不純物分散測定に加え、物理的密度への光路長の変換は、気体の屈折率の固有値が分かっている必要はない。因子  $n$  が固有値に適しており、分散干渉法に使用される波長で、気体の逆分散能である。因子  $n$  は個別に、または文献値に基づいて測定できる。干渉計の周期的誤差は、分散測定と因子  $n$  の測定にも寄与する。

40

## 【0006】

(発明の概要)

本発明は、周期的誤差を特定化し、補正する干渉法システムを特徴とする。いくつ課の実

50

施例において、本システムは、干渉計と、干渉計の基準ビームと測定ビームの間の可変で制御された位相シフトを発生する位相シフトコンポーネントと、位相シフトコンポーネントを制御し、干渉計によって測定された位相を記録する分析器とを含む。測定された位相と、位相シフトコンポーネントによって発生される位相シフトへのその依存性に基づいて、分析器は、干渉法システムの周期的誤差を特定化する係数を推定する。別の実施例で、システムは、測定物体の多数の位置の各々で、測定物体までの光路の分散値を測定するよう構成されている干渉計と、多数の測定された分散値に基づいて分散測定の周期的誤差を特定化する係数を推定する分析器とを含む。さらなる実施例においては、位相シフト及び分散測定実施例の特徴が組み合わされる。

**【 0 0 0 7 】**

一般的に、1側面において、本発明は、干渉計と、検出システムと、分析器とを含む干渉法システムを特徴とする。操作中、干渉計は基準ビームを基準路にそって、測定ビームを測定路にそって導き、測定物体に接触し、基準ビームと測定ビームを組み合わせ、重複出射ビームを生成する。重複出射ビームは、測定物体までの相対光路長の変化を表す。干渉計は、基準ビームと測定ビームの一方または両方の位相シフトを発生する可変位相シフトも含む。操作中、検出システムは、重複出射ビームの偏光を混合して混合ビームを生成し、混合ビームの経時変動強度を測定する。分析器は位相シフトと検出システムに連結される。操作中、分析器は、位相シフトによって生成される位相シフト値を制御し、混合ビームの経時変動強度に対応する位相を測定し、位相シフトの多数の値の各々に関して、混合ビームの位相に基づいて、干渉法システムの周期的誤差の分光表象、たとえばフーリエ正弦または余弦級数を決定する。

**【 0 0 0 8 】**

干渉法システムは以下の特徴のいずれを含んでもよい。

分析器は、測定物体の多数の位置の各々に関し、位相シフトの多数の値のそれぞれに関し、混合ビームの測定された位相に基づいて分光表象を決定する。分析器はメモリを含んでもよく、操作中に、メモリに分光表象を格納できる。

**【 0 0 0 9 】**

干渉計は、基準ビームと測定ビームとを組み合わせ、重複出射ビームを発生するビームスプリッタを含んでもよく、測定路は、測定物体とビームスプリッタとの間の位相シフトに接する。干渉計は、基準ビームを基準路にそって、測定ビームを測定路にそって導く偏光ビームスプリッタを含んでもよく、測定路は、偏光ビームスプリッタと測定物体との間の位相シフトに接する。干渉計は、基準路から基準ビームを、測定路から測定ビームを受光する偏光ビームスプリッタを含んでもよく、測定路は、測定物体と偏光ビームスプリッタとの間の位相シフトに接する。

**【 0 0 1 0 】**

位相シフトは電子光学変調器でもよい。位相シフトは、光学遅延ラインと、遅延ラインの長さを調整する変換器を含んでもよく、分析器が変換器を制御する。位相シフトは、1対のプリズムと、プリズムの相対位置を変動させる変換器とを含んでもよく、分析器が変換器を制御する。位相シフトは、光路を定義する気体セルと、セル内の気体圧を変動させる気体処理システムとを含んでもよく、分析器が気体処理システムを制御する。

**【 0 0 1 1 】**

操作中、干渉計は第2基準ビームを第2基準路にそって、第2測定ビームを第2測定路にそって導き、測定物体に接触し、第2基準ビームと第2測定ビームを組み合わせ、第2対の重複出射ビームを生成する。第2対の重複出射ビームは、測定物体までの相対光路長の変化を表す。操作中、検出システムは、第2対の重複出射ビームの偏光を混合して第2混合ビームを生成し、第2混合ビームの経時変動強度を測定する。分析器は、第2混合ビームの経時変動強度に対応する位相を測定し、位相シフトの多数の値の各々に関して、混合ビームの各々の測定された位相に基づいて、分光表象を決定する。1実施例において、分析器は位相シフトの初期値を提供し、測定物体の多数の位置の各々に関して混合ビームの各々の経時変動強度に対応する位相と、位相シフトの初期値を測定し、次に、位相シフト

10

20

30

40

50

のさらなる値に関して提供及び測定工程を繰り返す。

【0012】

一般的に、別の側面で、本発明は、光源と、干渉計と、検出システムと、分析器とを含む干渉法システムを特徴とする。操作中、光源は異なる周波数の基準ビームと測定ビームとを供給し、基準ビームと測定ビームの周波数を同量変動させる音響光学変調器などの周波数シフトを含む。操作中、干渉計は基準ビームを基準路にそって、測定ビームを測定路にそって導き、測定物体に接触し、基準ビームと測定ビームを組み合わせ、重複出射ビームを生成する。重複出射ビームは、測定物体までの相対光路長の変化を表す。操作中、検出システムは、重複出射ビームの偏光を混合して混合ビームを生成し、混合ビームの経時変動強度を測定する。分析器は周波数シフトと検出システムに連結される。操作中、分析器は、周波数シフトに基準ビームと測定ビームの周波数を変動させ、重複出射ビーム間の対応位相シフトを生成させるようにし、位相シフトの多数の値の各々に関して、混合ビームの測定された位相に基づいて、干渉法システムの周期的誤差の分光表象を決定する。

10

【0013】

干渉法システムは以下の特徴のいずれを含んでもよい。分析器は、測定物体の多数の位置の各々に関し、位相シフトの多数の値のそれぞれに関し、混合ビームの測定された位相に基づいて分光表象を決定する。光源は、周波数シフトによって変動されない周波数を有する第2基準ビームと第2測定ビームを供給できる。操作中、干渉計は第2基準ビームを第2基準路にそって、第2測定ビームを第2測定路にそって導き、測定物体に接触し、第2基準ビームと第2測定ビームを組み合わせ、第2対の重複出射ビームを生成する。第2対の重複出射ビームは、測定物体までの相対光路長の変化を表す。操作中、検出システムは、第2対の重複出射ビームの偏光を混合して第2混合ビームを生成し、第2混合ビームの経時変動強度を測定する。分析器は、次に、第2混合ビームの経時変動強度に対応する位相を測定する。分析器は、周波数シフトに、位相シフトのための初期値を生成し、測定物体の多数の位置の各々に関して混合ビームの各々の経時変動強度に対応する位相と、位相シフトの初期値を測定させるように起因できる。次に、分析器は、位相シフトのさらなる値に関して起因及び測定工程を繰り返し、測定された位相に基づいて分光表象を決定する。

20

【0014】

一般的に、別の側面において、本発明は、分散測定干渉計と、検出システムと、分析器とを含む干渉法システムを特徴とする。操作中、干渉計は第1及び第2対の重複出射ビームを発生し、第1対の重複出射ビームは第1波長を有し、第2対の重複出射ビームは、第1波長とは異なる第2波長を有する。たとえば、波長は少なくとも1nmだけ違っていればよい。第1及び第2対の出射ビームは、測定物体までの相対光路長の変化をそれぞれ表す。操作中、検出システムは、第1対の重複出射ビームの偏光を混合して第1混合ビームを生成し、第2対の重複出射ビームの偏光を混合して第2混合ビームを生成し、混合ビームの各々の経時変動強度を測定する。分析器は検出システムに連結される。操作中、分析器は、混合ビームの各々の経時変動強度に対応する位相を、測定物体の多数の位置の各々で測定する。分析器は、多数の位置の各々に関して分散値を算出し、特定位置の分散値は、該特定位置の測定された位相の関数に等しい。次に分析器は、算出された分散値に基づいて、干渉計による分散測定に対する周期的誤差の寄与の分光表象を決定する。

30

40

【0015】

干渉法システムは以下の特徴のいずれを含んでもよい。分析器はメモリを含んでもよく、操作中に、メモリに分光表象を格納できる。分析器は、測定された位相の少なくとも1つにフーリエ級数を含む関数として、算出された分散値を表し、該フーリエ級数を変換することで分光表象を決定できる。分散値は、測定された位相間の重みを付けた差の関数に等しい。たとえば、第1及び第2波長  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  が式  $\lambda_1 / \lambda_2 = l_1 / l_2$  を満たし、ここで  $l_1$  と  $l_2$  が整数であると、重みを付けた差は  $l_1 \phi_1(\sim) - l_2 \phi_2(\sim)$  に等しく、ここで  $\phi_1(\sim)$  と  $\phi_2(\sim)$  は測定された位相である。かかる場合、 $l_1$  と  $l_2$  はそれぞれ50未満でよい。

50

## 【0016】

干渉計は第1基準ビームと第1測定ビームを組み合わせ、第1対の重複出射ビームを生成し、第1基準ビームと第1測定ビームの少なくとも一方で位相シフトを発生させる可変位相シフトを含む。かかる場合、分析器は位相シフトに連結され、操作中、位相シフトによって発生される位相シフトの値を制御する。あるいは、干渉法システムは、第1基準ビームと第1測定ビームを供給する高原を含んでもよく、光源は、第1基準及び測定ビームの周波数を同量変動させる周波数シフトを含む。かかる場合、干渉計は第1基準ビームと第1測定ビームを組み合わせ、第1対の重複出射ビームを生成する。分析器は周波数シフトに連結され、周波数シフトに、第1基準及び測定ビームの周波数を変動させ、第1対の重複出射ビーム間の対応位相シフトを発生させる。

10

## 【0017】

一般的に、別の側面において、本発明は、分散測定干渉計と、検出システムと、分析器とを含む干渉法システムを特徴とする。干渉計は第1及び第2対の重複出射ビームを発生し、第1対の重複出射ビームは第1波長を有し、第2対の重複出射ビームは、第1波長とは異なる第2波長を有する。第1及び第2対の出射ビームは、測定物体までの相対光路長の変化をそれぞれ表す。検出システムは、第1対の重複出射ビームの偏光を混合して第1混合ビームを生成し、第2対の重複出射ビームの偏光を混合して第2混合ビームを生成し、混合ビームの各々の経時変動強度を測定する。分析器は検出システムに連結される。操作中、分析器は、混合ビームの各々の経時変動強度に対応する位相を、測定物体の多数の位置の各々で測定し、多数の位置の各々に関して分散値を算出し、分散値を選別し、周期的誤差が減少した平均分散値を決定する。特定位置の分散値は、該特定位置の測定された位相の関数に等しい。

20

## 【0018】

いくつかの実施例で、分析器は、混合ビームの1つからの等間隔で測定された位相に対応する分散値を合計することで、分散値を平均化し、該当間隔で測定された位相は、2の倍数である間隔を有する。たとえば、第1および第2波長  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  が式  $\lambda_1 / \lambda_2 = 1 / 1_2$  を満たし、ここで  $1_1$  と  $1_2$  が整数であり、分散値が  $1_1 \cdot (\sim) - 1_2 \cdot 2$  ( $\sim$ ) に等しく、ここで  $1_1$  ( $\sim$ ) と  $1_2$  ( $\sim$ ) は測定された位相であると、分析器は、 $2 \cdot 1_2$  間隔の  $1_1$  ( $\sim$ ) の等間隔値に対応する分散値を合計することで、分散値を平均化する。

30

## 【0019】

関連する1側面で、本発明は、ウェハ上に集積回路を製造する際に使用するリソグラフィシステムを特徴とする。リソグラフィシステムは、ウェハを支えるステージと、空間的にパターン化された放射をウェハ上に投影する照明システムと、投影される放射に対してステージを位置決めする位置決めシステムと、ステージの位置を測定する前述の干渉法システムのいずれかを含む。

## 【0020】

別の関連する側面において、本発明は、ウェハ上に集積回路を製造する際に使用するリソグラフィシステムを特徴とする。リソグラフィシステムは、ウェハを支えるステージと、放射源を含む照明システムと、マスクと、位置決めシステムと、レンズアセンブリと、前述の干渉法システムのいずれかを含む。操作中、放射源はマスクを通して放射を導き、空間的にパターン化された放射を発生し、位置決めシステムは、放射源からの放射に対してマスクの位置を調整し、レンズアセンブリは、空間的にパターン化された放射をウェハ上に投影し、干渉法システムは、放射源からの放射に対するマスクの位置を測定する。

40

## 【0021】

別の関連する側面において、本発明は、第1及び第2コンポーネントを含む集積回路を製造する際に使用するリソグラフィシステムと前述の干渉法システムのいずれかを特徴とする。第1及び第2コンポーネントは互いに対して移動可能で、第1コンポーネントは測定物体を含む。操作中、干渉法システムは、第2コンポーネントに対する第1コンポーネントの位置を測定する。

50

## 【0022】

別の関連する側面において、本発明は、第1及び第2コンポーネントを含む集積回路を製造する際に使用するリソグラフィシステムと前述の干渉法システムのいずれかを特徴とする。第1コンポーネントは、測定路によって接触される測定物体を含み、第2コンポーネントは基準路によって接触される。干渉法システムは第1および第2コンポーネントの相対位置を測定する。

## 【0023】

別の関連する側面において、本発明は、リソグラフィマスクを製造する際に使用するビーム書き込みシステムを特徴とする。ビーム書き込みシステムは、基板に模様をつける書き込みビームを供給する光源と、基板を支えるステージと、書き込みビームを基板に供給するビーム指向アセンブリと、ステージとビーム指向アセンブリをたがいに対して位置決めする位置決めシステムと、ビーム指向アセンブリに対するステージの位置を測定する前述の干渉法システムのいずれかとを含む。

10

## 【0024】

一般的に、別の側面で、本発明は、干渉計における周期的誤差を特定化する方法を特徴とする。該方法は、基準ビームを基準路にそって、測定ビームを測定路にそって導き、測定物体に接触する工程と、基準ビームと測定ビームを組み合わせ、測定物体までの相対光路長の変化を表わす重複出射ビームを生成する工程と、測定物体の多数の位置のそれぞれに関して、少なくとも3個の位相シフトを、基準ビームと測定ビームの少なくとも一方に導入する工程と、基準ビームと測定ビームの偏光を混合し、混合ビームを生成する工程と、測定物体の多数の位置の各々に関して位相シフトの各々に関して、混合ビームの経時変動強度に対応する位相を測定する工程と、測定された位相に基づいて干渉計の周期的誤差の分光表象を決定する工程とを含む。

20

## 【0025】

本方法は以下の特徴を含んでもよい。導入工程は、測定物体の多数の位置の各々に関して、基準及び測定ビームの少なくとも一方に、少なくとも5個の位相シフトを導入する工程を含んでもよい。位相シフトは、基準ビームと測定ビームの一方に導入し、基準ビームと測定ビームの他方には導入しなくてもよい。

## 【0026】

位相シフトは基準ビームと測定ビームの両方に導入してもよい。本方法は、以下のさらなる工程を含んでもよい。第2基準ビームと第2測定ビームを組み合わせ、測定物体までの対応相対光路長の変化を表わす第2重複出射ビームを生成する工程と、測定物体の多数の位置のそれぞれに関して、第2基準ビームと測定ビームの偏光を混合し、第2混合ビームを生成する工程と、測定物体の多数の位置の各々に関して、第2混合ビームの経時変動強度に対応する位相を測定する工程と、測定された位相に基づいて第1及び第2混合ビームに関して分光表象を決定する工程。

30

## 【0027】

関連する側面において、本発明は、前述の方法を用いて干渉計の周期的誤差の分光表象を決定する工程と、干渉計を用いて光路長を測定する工程と、分光表象を用いて、周期的誤差だけ、測定された光路長を修正する工程とを含む干渉法を特徴とする。

40

## 【0028】

一般的に、別の側面において、本発明は、分散測定干渉計の周期的誤差を特定化する方法を特徴とする。本方法は、測定物体の多数の位置の各々に関して、干渉計によって測定された測定物体までの光路長における分散値を提供する工程と、分散値に基づいて、干渉計の分散測定に寄与する周期的誤差の分光表象を決定する工程とを含む。決定工程は、測定物体の位置に基づいたフーリエ級数を含む関数として分散値を表す工程と、分光表象を決定するためにフーリエ級数を変換する工程とを含む。

## 【0029】

関連する側面において、本発明は、前述の方法を用いて、干渉計での分散測定に寄与する周期的誤差の分光表象を決定する工程と、干渉計を用いて光路長を測定する工程と、分光

50



表象を用いて、測定された光路長を修正する工程とを含む干渉法を特徴とする。

【0030】

さらなる側面において、本発明は、ウェハ上に集積回路を製造する際に使用するリソグラフィ法を特徴とする。リソグラフィ法は、可動ステージ上でウェハを支える工程と、空間的にパターン化された放射をウェハ上に投影する工程と、前述の干渉法のいずれかを用いて、ステージの位置を測定する工程とを含む。

【0031】

別の関連する側面において、本発明は、集積回路の製造で使用するリソグラフィ法を特徴とする。リソグラフィ法は、マスクを介して入力放射を導き、空間的にパターン化された放射を発する工程と、入力放射に対してマスクを位置決めする工程と、前述の干渉法のいずれかを用いて、入力放射に対するマスクの位置を測定する工程と、空間的にパターン化された放射をウェハ上に投影する工程とを含む。マスクを支えるステージか、入力放射を提供する照明システムのいずれかが測定物体を含む。

10

【0032】

別の関連する側面において、本発明は、空間的にパターン化された放射にウェハをさらすため、リソグラフィシステムの第1コンポーネントをリソグラフィシステムの第2コンポーネントに対して位置決めする工程と、前述の干渉法のいずれかを用いて、第2コンポーネントに対する第1コンポーネントの位置を測定する工程と、第1コンポーネントが測定物体を含むこととを含む、ウェハ上に集積回路を製造するためのリソグラフィ法を特徴とする。

20

【0033】

別の関連する側面において、本発明は、リソグラフィーマスクを製造する際に使用するビーム書き込み法を特徴とする。ビーム書き込み法は、基板に模様をつけるため、基板に書き込みビームを導く工程と、書き込みビームに対して基板を位置決めする工程と、前述の干渉法のいずれかを用いて書き込みビームに対する基板の位置を測定する工程とを含む。

【0034】

本発明の実施例は多くの利点を含む。たとえば、実施例は、1次、2次およびそれより高次の周期的誤差の完全且つ正確な特定化を提供でき、干渉法測定の精度を上げるために利用できる。さらに、ビーム混合と、干渉計内の多数の反射と、その他の源によって生じる周期的誤差を特定化できる。周期的誤差を特定化することで、本発明の実施例は、測定物体が高速で走査されるまたはステップされる場合に、オンライン用途中に必要であるように、干渉計によって測定される位相の高速修正を可能にできる。さらに、本発明の2チャンネル分散測定の実施例は、干渉計の定期的なオンライン操作が生じる際に、進行中の周期的誤差の特定化を可能にする。周期的誤差の特定化は、光学距離測定、分散測定、逆分散能などの干渉計の測定アームの気体の固有光学特性の測定に適用できる。さらに、干渉法システムは、リソグラフィおよびマスク書き込み用途に使用できる。

30

【0035】

他の特徴と利点は、以下の詳細な説明と特許請求の範囲から明白である。

(詳細な説明)

本発明は、循環エラーを特徴づける干渉計システムを特徴とする。多くの実施形態の場合、上記システムは、基準ビームと測定ビームとの間に可変制御位相を導入するための移相構成部材を含む。導入位相の関数として、干渉計の距離測定値を解析することにより、干渉計システムの分析装置は、干渉計の循環エラーを特徴づけることができる。循環エラーの特徴づけが行われると、分析装置は、循環エラーによる影響を除去するために、距離測定値を直接修正することができる。別な方法としては、またはその外の方法としては、移相構成部材の設置する他に、干渉計システムは、測定対象物の複数の位置において、測定アーム内でガスの分散測定を行うことができ、分析装置は、分散測定値に基づいてシステムの循環エラーを測定することができる。

40

【0036】

最初に、干渉計システムについて概略説明する。その後で、特定の実施形態について詳細

50

に説明する。

図10は、干渉計システム1000の全体の略図である。干渉計1002は、測定対象物1006に対して、一本またはそれ以上の測定ビーム1004を照射する。距離測定を行う場合には、矢印1010で示すように、測定対象物が並進し、干渉計システムが、測定対象物までの光路長 $p n L$ の変化を測定する。この場合、 $L$ は往復の距離であり、 $n$ は屈折率であり、 $p$ はパスの数である。分散干渉計使用法の場合には、干渉計は、測定対象物1006に向かう経路内のガス1012の屈折率 $n$ の変化をさらに特徴づけるために、異なる波長を持つ複数の測定ビームを使用する。上記のように特徴づけることにより、システムは光路長の変化 $p n L$ を物理的経路の長さの変化 $L$ に変換する。別な方法としては、ある他の用途の場合には、測定対象物1006の位置を固定して、干渉計は分散干渉計で使用される複数の波長で、ガス1012の往復分散度を測定する。

10

【0037】

干渉計1002は、その位相 $(\sim)$ が検出装置1016により測定される混合ビーム1014を生成するために、測定ビームを基準ビームと混合する。循環エラーのような非線形影響がない場合には、測定位相 $(\sim)$ は理想的な位相に等しい。すなわち、 $= n p k L$ である。この式の場合、 $k$ は測定ビームの波長に対応する波数 $2 /$ である(基準ビームおよび測定ビームは、通常、ヘテロダイン混合周波数を生成するために、相互に周波数がずれている)。しかし、大部分の干渉計は、混合、多重反射、不完全な光学系、アナログ信号取扱いおよび処理の際の非直線性、および関連デジタル信号処理の際の偽信号により、測定位相 $(\sim)$ に対して循環エラーの影響を含む。循環エラーの影響を

20

【0038】

【数1】

$$\tilde{\varphi} = \varphi + \sum_{r=1} A_r \cos r\varphi + \sum_{r=1} B_r \sin r\varphi \quad (1)$$

(文章中の $\varphi(\sim)$ は、式中では $\tilde{\varphi}$ と表す。以下同じ。)

ここで、 $A_r$  および  $B_r$  は、次数 $r$ の対応する循環エラーに対する係数である。

【0039】

式(1)のフーリエ正弦および余弦級数は、循環エラーの非直線性のスペクトル表現の一例である。他の実施形態の場合には、他のスペクトル表現を使用することができる。例えば、循環エラーの非直線性は、一連のチェビシェフ多項関数、または完全な一組を形成する他の数組の直交関数として表すことができる。しかし、残りの用途の場合には、フーリエ正弦および余弦級数は、循環エラーの非直線性のスペクトル表現として使用される。

30

【0040】

循環エラー係数を特徴づけるために、干渉計システム1000は、混合ビーム1014を形成する少し前に、基準ビームおよび測定ビームとの間に、可変制御位相ずれを生成する移相構成部材1020を含む。位相は、任意の光学的遅延の他に、測定対象物1006の位置の変化による基準ビームと測定ビームとの間に発生する。移相構成部材としては、基準ビームおよび/または測定ビームに可変遅延を与える光学電子素子または光学機械的素子を使用することができる。別な方法としては、移相構成部材として、干渉計において、伝播距離に関連する位相ずれの対応する変化を発生するために、基準ビームおよび測定ビームの少なくとも一方の周波数を変化させる光学電子周波数変調器、または音響光学周波数変調器を使用することができる。移相構成部材の特定の実施形態および干渉計での移相構成部材の設置方法については、以下により詳細に説明する。

40

【0041】

一般に、位相ずれは、測定位相 $(\sim)$ に循環エラーによる影響を与え、循環エラー $A_r$  および  $B_r$  は、位相ずれにより異なる。すなわち、 $A_r(\sim)$  および  $B_r(\sim)$  となる。測定位相 $(\sim)$ に対する循環エラーの影響への位相ずれの影響は、また

50

、式(1)の(～)に対するスペクトル表現類似のスペクトル表現、すなわち、下式(2)により表すことができる。

【0042】

【数2】

$$\tilde{\varphi}(\varphi, \phi) = \varphi + \phi + \Theta(\varphi, \phi) \quad (2)$$

但し、

【0043】

【数3】

$$\Theta(\varphi, \phi) = \sum_{q=0, r=1} \cos q\phi (a_{qr} \cos r\varphi + b_{qr} \sin r\varphi) + \sum_{q=0, r=1} \sin q\phi (a'_{qr} \cos r\varphi + b'_{qr} \sin r\varphi) \quad (3)$$

10

それ故、測定位相(～)(, )に対する循環エラーの影響(, )は、係数 $a_{qr}$ 、 $b_{qr}$ 、 $a'_{qr}$ および $b'_{qr}$ で完全に特徴づけられた。また、式(2)中、位相ずれは、位相に直接加わり、ほとんどの実施形態の場合にもこのことが起こる。しかし、以下に詳細に説明するいくつかの実施形態の場合には、位相ずれは、直接位相に加算されない。位相ずれが位相に加算されるか、されないかは、干渉計1002内に移相構成部材が設置されているか、いないかにより決まる。

【0044】

20

分析装置1022は、必要な位相ずれを示す移相構成部材に信号1024を送ることで、移相構成部材1020を制御し、測定位相(～)(, )を示す検出装置1016から信号1026を受信する。分析装置1022は、位相ずれの異なる値に対する測定位相(～)(, )の値、( = npkLの値を変化させる)測定対象物1006の異なる位置に対する測定位相(～)(, )の値を記録する。分析装置1022は、以下にさらに詳細に説明するように、循環エラー係数、 $a_{qr}$ 、 $b_{qr}$ 、 $a'_{qr}$ および $b'_{qr}$ の中の少なくともあるものの値を決定するために、記録した値を使用する。

【0045】

記録値により、すべての循環エラー係数を正確に決定することができるかどうかは、干渉計システム内の移相構成部材1020の位置により異なる。より詳細に説明すると、(, )の残りに部分の大きさに対する係数 $a_{0r}$ および $b_{0r}$ の大きさは、干渉計システム内の移相構成部材1020の位置により異なる。しかし、測定位相(～)(, )に対する係数 $a_{0r}$ および $b_{0r}$ の影響は、位相ずれとは無関係であり、そのため、測定位相(～)(, )の値を解析しても決定することはできない。いずれにせよ、分析装置1022は、原則的に、位相ずれの関数としての測定位相(～)(, )の記録値に基づいて、すべての残りの循環エラー係数を決定する。その結果、移相構成部材1020を干渉計の特定の面からの多重反射のような、部分的には特定の物理的現象による循環エラーを特徴づけるために、ある実施形態に設置することができる。

30

【0046】

分析装置1022が、係数、 $a_{qr}$ 、 $b_{qr}$ 、 $a'_{qr}$ および $b'_{qr}$ を決定した後で、上記分析装置は、循環エラーの影響に対する測定位相(～)(, )を迅速に修正し、それにより光路長 $p_n L$ の値をもっと正確に決定するために、上記値を使用することができる。例えば、測定位相(～)(, )に対する循環エラーの影響(, )は、通常、 $= npkL$ に対して小さいので、分析装置1022は、図4に示すように、の値が、必要な精度レベルに収束するまで、下記反復を一考することにより、測定位相(～)を $= npkL$ に変換することができる。

40

【0047】

【数4】

$$\begin{aligned}\varphi^{(0)} &= \tilde{\varphi} \\ \varphi^{(j+1)} &= \tilde{\varphi} - \phi - \Theta(\varphi^{(j)}, \phi)\end{aligned}\quad (4)$$

$j$  は、反復の全回数による反復の順序を示す上付き文字である。反復手順中、分析装置は、決定した循環エラー係数、および  $(\varphi^{(j)}, \phi)$  に対する式内の任意の位相ずれ  $\varphi^{(j)}$  の値を使用する。分析装置が、 $\varphi^{(j)} = n p k L$  の値を決定すると、係数  $a_{0r}$  および  $b_{0r}$  が表す循環エラーの影響を除く、循環エラーに対して修正した光路長は、 $n p L = \varphi^{(j)} / k$  により容易に決定される。

【0048】

上記例により示すように、分析装置が循環エラーの影響の正確な値を決定した後で、ある循環誤り訂正を持つ測定対象物までの、光路長の値を決定するために、位相  $(\sim)$  の一つの値をだけを必要とする。より詳細に説明すると、分析装置は、ある循環誤り訂正を持つ光路長の値を決定するために、分析装置は、位相ずれ  $\varphi^{(j)}$  の複数の値に対応する  $(\sim)$  の複数の値を測定する必要はない。このような特徴は、測定対象物が迅速に走査されるか、またはステップされ、測定対象物の各位置での、位相  $(\sim)$  の複数の測定を行うのに十分な時間がないような用途の場合に重要な機能である。例えば、リソグラフィの場合には、メートル/分程度の速度で、測定ステージが走査され、干渉計システムは、ナノメートル程度の精度で上記ステージの位置をモニタしなければならない。

【0049】

しかし、循環エラー係数  $a_{qr}$ 、 $b_{qr}$ 、 $a'_{qr}$  および  $b'_{qr}$  の値を決定するために、分析装置 1022 は、 $(\varphi^{(j)}, \phi)$  の複数の値に対応する測定対象物の複数の各位置において、位相ずれ  $\varphi^{(j)}$  の複数の値の測定位相  $(\sim)$   $(\varphi^{(j)}, \phi)$  の値を記録する。その後で、分析装置 1022 は、循環エラー係数に対して下式となるフーリエ逆式 (2) に対して、記録した値を使用する。

【0050】

【数5】

$$\begin{aligned}a_{qr} &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} [(\tilde{\varphi}(\varphi, \phi) - \phi) - (\tilde{\varphi}(\varphi, \phi_0) - \phi_0)] \cos(r\varphi) \cos(q\phi) d\varphi d\phi \\ a'_{qr} &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} [(\tilde{\varphi}(\varphi, \phi) - \phi) - (\tilde{\varphi}(\varphi, \phi_0) - \phi_0)] \sin(r\varphi) \cos(q\phi) d\varphi d\phi \\ b_{qr} &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} [(\tilde{\varphi}(\varphi, \phi) - \phi) - (\tilde{\varphi}(\varphi, \phi_0) - \phi_0)] \cos(r\varphi) \sin(q\phi) d\varphi d\phi \\ b'_{qr} &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} [(\tilde{\varphi}(\varphi, \phi) - \phi) - (\tilde{\varphi}(\varphi, \phi_0) - \phi_0)] \sin(r\varphi) \sin(q\phi) d\varphi d\phi\end{aligned}\quad (5)$$

$q = 1$  の場合には、 $r = 1$  となり、この場合には、位相ずれ  $\varphi^{(j)}$  は、例えば、 $\varphi^{(j)} = 0$  のような、分析装置が選択した基準位相ずれである。

【0051】

図 (5) の二次元積分は、二次元高速フーリエ変換 (FFT) アルゴリズムとして実行することができる。

式 (5) を積分するために、分析装置は、両方とも既知である位相ずれ  $\varphi^{(j)}$  および  $\phi$  によりインデックスされている  $(\sim)$  の測定値からの、複数の被積分関数の角カッコ内の項、および近似的にしか分かっていなくて、測定対象物の位置に対応する理想的な位相を決定する。より詳細に説明すると、理想的な位相  $\varphi^{(j)}$  の近似値  $(\sim)$  だけが分かっている。すなわち、 $(\sim)$   $(\sim)$  であり、これは循環エラーの影響を無視する。理想的な位相  $\varphi^{(j)}$  についての不確かを解決するために、分析装置は、下記の二つの技術の中の一方を実行する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 5 2 】

第1の技術の場合、分析装置1022は、位相ずれの複数の値に対する(～)(, )の測定値に基づいて、測定対象物の各位置の理想的な位相の値を直接決定する。特に、また式(2)に基づいて、分析装置1022は、式(6)の下記の積分のより、位相を決定するために、(～)(, )の測定値を合計する。

## 【 0 0 5 3 】

## 【数6】

$$\varphi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\tilde{\varphi}(\varphi, \phi) - \phi) d\phi \quad (6)$$

10

その後で、に対する正確な値を使用して、分析装置1022は、式(5)により周期的係数の値を推定する。

## 【 0 0 5 4 】

第2の技術の場合には、分析装置1022は、式(5)のの初期値に対する近似値(～)を使用して反復して循環エラー係数を推定する。特に、分析装置1022は、の代わりに式(5)の(-)を使用して、式(5)により循環エラー係数の一次の値を決定する。その後で、分析装置1022は、循環エラー係数の一次の値に基づいて、式(4)の反復により、に対する一次の値を決定する。その後で、分析装置1022は、の代わりに式(5)に対する一次の値を使用して、式(5)により循環エラー係数の二次の値を決定する。分析装置1022は、循環エラー係数が収束するまで、上記手順を反復する。

20

## 【 0 0 5 5 】

すでに説明したように、循環エラーの影響を迅速に修正しなければならない場合には、上記のように、循環エラー係数を最初に決定すると特に有利である。決定した循環エラー係数を使用して、分析装置は、一つの測定値だけに基づいて、循環エラーの影響に対して、各光路長の測定値を修正することができる。しかし、循環エラー係数自身の決定は、長い時間が掛かる場合がある。何故なら、分析装置は、複数の測定を行わなければならないし、特に測定対象物の複数の各位置において位相ずれが変化する複数の測定を行わなければならないからである。その結果、循環エラー係数を決定する際に、測定対象物の走査速度またはステップ速度を十分遅くして、測定対象物の各位置において、複数の測定を行うことができるようにしなければならない。

30

## 【 0 0 5 6 】

この制約を克服するために、干渉計1002は、移相構成部材1020により影響を受けないもう一つ混合ビーム1054を生成するために、測定ビームが測定対象物から反射する第2の組の基準ビームおよび測定ビームを混合することができる。もう一つ検出装置1056は、混合ビーム1054の位相'(～)を測定し、分析装置1022に、上記位相を示す信号1064を送る。別な方法としては、混合ビーム1054が形成された後で、移相構成部材1020が、第1の組の基準ビームおよび測定ビームとの間に、位相ずれだけを導入する場合には、干渉計は、両方の混合ビーム1014および1054を生成する第1の組の基準ビームと測定ビームだけを含むことができる。混合ビーム1014および検出装置1016は、干渉計システム1000に対して第1のチャンネルを形成し、混合ビーム1054および検出装置1056は、干渉計システム1000に対して、第2のチャンネルを形成する。

40

## 【 0 0 5 7 】

循環エラーの影響を含んでいる場合には、'(～)は式(7)で表される。

## 【 0 0 5 8 】

## 【数7】

$$\tilde{\varphi}' = \varphi + \sum_{r=1} A_r' \cos r\varphi + \sum_{r=1} B_r' \sin r\varphi \quad (7)$$

ここで、 $A_r'$  および  $B_r'$  は、通常、対応する循環エラー係数、 $A_r$  および  $B_r$  の値とは異なるが、多くの場合類似している値を持つ循環エラー係数である。さらに、ここではそれを無視するが、式(7)の位相に含まれる光路長  $n p L$  は、式(1)内の対応する項からのズレを含むことができる。

【0059】

動作中、分析装置1022は、オーダーペアとして、測定位相  $\varphi(\sim)$  および  $\varphi'(\sim)$  の値を同時に記録する。 $\varphi(\sim)$  の値は、移相構成部材により導入された位相ずれ、および測定対象物1006の位置に依存し、一方、 $\varphi'(\sim)$  の値は、測定対象物1006の位置だけに依存する。この特性により、分析装置1022は、測定位相  $\varphi(\sim)$  の値と同時に測定した  $\varphi'(\sim)$  の値により、測定位相  $\varphi(\sim)$  の値を測定対象物(およびそれにより  $\varphi'(\sim)$  の値)にインデックスする。そうすることにより、分析装置1022は、柔軟な方法で、循環エラーを特徴づけるためのデータを収集する。より詳細に説明すると、位相ずれの複数の値のところの測定位相  $\varphi(\sim)$  ( $\varphi'$ ,  $\varphi$ ) の値、および測定対象物の位置の一つの値は測定する必要はない。何故なら、測定対象物は特定の位置に留まっているからである。代わりに、分析装置1022は、測定対象物の複数の走査の間に、複数の位相ずれのところ記録した測定位相  $\varphi(\sim)$  ( $\varphi'$ ,  $\varphi$ ) の値を、各部材が、グループ内の一つ置き部材のそれと等しい  $\varphi'(\sim)$  の対応する値を持つグループに分類することができる。

【0060】

例えば、分析装置1022は、例えば、干渉計システム1000が、測定対象物1006の走査のような、通常の状態での動作している場合に、オーダーペア [ $\varphi(\sim)$ ,  $\varphi'(\sim)$ ] として、位相  $\varphi(\sim)$  および  $\varphi'(\sim)$  の値を記録する。この時間の間、およびオーダーペアの記録の他に、分析装置1022は、循環エラー係数の推測または前の較正に基づいて、 $\varphi(\sim)$  および  $\varphi'$  / または  $\varphi'(\sim)$  への循環エラーの影響を修正することができる。測定対象物の各走査の後で、分析装置1022は、移相構成部材1020に、必要な一組の値にまたがる位相ずれのところ、データが収集されるまで、ある増分で位相ずれの値を変更させる。

【0061】

この時点で、分析装置1022は、測定位相に対する循環エラーの影響を修正するために使用する循環エラー係数の値を決定および/または更新するために十分なデータを持つ。分析装置1022は、順番に配列されたペア「 $\varphi(\sim)$ ,  $\varphi'(\sim)$ 」を、 $\varphi'(\sim)$  入力と同じ複数のグループに分類する。測定位相  $\varphi'(\sim)$  は循環エラーの影響を含んでいるが、 $\varphi'(\sim)$  の各値は、(新しい一組の測定値を入手するために使用する時間の間、循環エラー係数、 $a_{qr}$ 、 $b_{qr}$ 、 $a'_{qr}$  および  $b'_{qr}$  が有意に変化しない少なくとも通常の下で)、測定対象物の一意の位置に対応する。それ故、上記分類により、位相に対する未知の値があるにもかかわらず、位相ずれの異なる値および同じ値を持つ  $\varphi(\sim)$  ( $\varphi'$ ,  $\varphi$ ) の複数のグループができる。分析装置1022は、式(6)による積分を行って、各グループに対する位相の値を決定し、その後で、式(5)およびすべてのグループ内のデータに基づいて、周期的係数、 $a_{qr}$ 、 $b_{qr}$ 、 $a'_{qr}$  および  $b'_{qr}$  に対する値を決定する。別な方法としては、分析装置1022は、上記の反復技術を使用して、循環エラー係数を決定することができる。そうしたい場合には、分析装置1022は、また、 $\varphi'(\sim)$  ( $\varphi$ ) の測定値、および第1のチャンネルからの解析を使用することにより決定した位相の修正値に対する式(7)により、第2のチャンネルに対応する循環エラー係数  $A_r'$  および  $B_r'$  を決定することができる。

【0062】

上記の2チャンネル・システムを使用することにより、干渉計システムは、測定対象物の位

置の変化を測定するために、連続的に動作することとができ、同時に、システムの時間および/または他のパラメータの関数として、システム内で循環エラーを完全に特徴づけるのに十分な、データを記録することができる。記録データの解析は、測定対象物の走査またはステップングを中断しないで行うことができる。より詳細に説明すると、システムは、システムが稼動している一日中、循環エラー多重時間を特徴づけることができる。その結果、例えば、環境要因による循環エラー係数の変化、光学系を劣化させ、光学系の干渉計の整合に影響を与える干渉計システムの一部として動作するリソグラフィ・ステージ・ミラーの傾斜および/またはヨウの変化を、毎日の動作中頻繁に、または必要に応じて、モニタすることができる。

#### 【 0 0 6 3 】

以下に示すように、分析装置 1 0 2 2 による解析は種々の方法で変更することができる。例えば、二つのチャンネルにより測定した位相の間の差を含む、観察可能事項のような、式 ( 5 ) で使用する観察可能事項とは異なる測定した観察可能事項を、干渉計システム 1 0 0 0 の測定に基づいて、循環エラー係数を分離するために使用することができる。

#### 【 0 0 6 4 】

測定対象物に対する迅速な走査またはステップングが重要でない用途の場合には、干渉計システム 1 0 0 0 は、循環エラー係数を実際に特徴づけしないで、循環エラー係数に対する測定位相 ( ~ ) ( , ) を単に修正するだけで動作することができることに注目することが重要である。このような用途の場合、チャンネルは一本で済み、分析装置 1 0 2 2 は、走査中、測定対象物の各位置に対する位相ずれ の複数の値のところ、測定位相 ( ~ ) ( , ) に対する値を記録する。各位置において、分析装置 1 0 2 2 は、理想的な位相 を決定し、それにより、式 ( 6 ) により ( ~ ) ( , ) について積分することにより、光路長  $n p L = \quad / k$  を決定する。

#### 【 0 0 6 5 】

以下にさらに詳細に説明する他の実施形態の場合には、移相構成部材は、基準ビームと測定ビームとの間にはなく、基準ビームおよび測定ビームの両方に位相ずれ を与える。このような実施形態は、例えば、干渉計内で多重反射により生じた循環エラーを特徴づける際に役に立つ場合がある。分析装置 1 0 2 2 が行った解析は、式 ( 2 ) - ( 5 ) の項から位相ずれ を足したり、引いたりしないという点を除けば、上記の解析と類似している。

#### 【 0 0 6 6 】

他の一組の実施形態の場合には、移相構成部材は使用されない。代わりに、システムは、それぞれ、波長  $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  を持つ、二組の基準ビームおよび測定ビームを使用することにより、二つの波長  $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  で、測定対象物までの光路長  $p n ( ) L$  を測定する分散干渉計を含む。波長、  $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  は、関係、  $\lambda_1 / \lambda_2 = 1 / l_2$  を満足する。この場合、  $l_1$  および  $l_2$  は整数である。一組の検出装置が、二組の基準ビームおよび測定ビームからの混合ビームの輝度を測定し、一台の分析装置が、混合ビームの輝度に対応する位相  $\phi_1 ( \sim )$  および  $\phi_2 ( \sim )$  を測定する。分析装置は、測定対象物の複数の各位置で、位相  $\phi_1 ( \sim )$  および  $\phi_2 ( \sim )$  を記録し、複数の各位置に対する分散パラメータ  $\Delta = ( l_1 \phi_1 ( \sim ) / p ) - ( l_2 \phi_2 ( \sim ) / p )$  を計算する。

#### 【 0 0 6 7 】

各測定位相  $\phi_1 ( \sim )$  および  $\phi_2 ( \sim )$  内に循環エラーが存在しない場合には、分散パラメータ  $\Delta$  は、測定アーム内の分散  $n ( \lambda_1 ) - n ( \lambda_2 )$  に正比例する。しかし、光路長の測定値に対応する各位相  $\phi_1 ( \sim )$  および  $\phi_2 ( \sim )$  は、循環エラーを含む。循環エラーは、式 ( 1 ) に示すように表示することができる。さらに、分散パラメータ  $\Delta$  は、また、位相  $\phi_1 ( \sim )$  および  $\phi_2 ( \sim )$  内に循環エラーからの影響を含む。実際、以下にさらに詳細に説明するように、  $\phi_1 ( \sim )$  および  $\phi_2 ( \sim )$  の分散効果に対する修正への循環エラーの影響は、位相  $\phi_1 ( \sim )$  および  $\phi_2 ( \sim )$  のどちらかへの循環エラーの影響と比較すると、約係数  $\Delta$  だけ大きい。  $\Delta = ( n ( \lambda_1 ) - 1$

10

20

30

40

50

) / (  $n(\theta_1) - n(\theta_2)$  ) に等しい往復分散度である係数  $K$  は、通常、1より大きく1と2の間の大きさである。それ故、分散修正  $K$  は、測定位相  $\theta_1(\sim)$  および  $\theta_2(\sim)$  と比較すると、循環エラーに対する感度は高い。

【0068】

分散パラメータ  $\sigma$  に影響を与える循環エラー係数を特徴づけるために、分析装置は、測定対象物の位置を変えることにより、測定位相  $\theta_1(\sim)$  および  $\theta_2(\sim)$  の一方または両方の関数として分散パラメータを測定する。その後で、分析装置は、循環エラー係数の影響を除去する為に、分散パラメータ  $\sigma$  を濾過し、またはフーリエは、式(2)および(5)に示す方法と類似の方法で、分散パラメータ  $\sigma$  に影響を与える循環エラー係数の値を決定するために、分散パラメータ  $\sigma$  を解析する。理論式は、測定位相  $\theta_1(\sim)$  および  $\theta_2(\sim)$  に対応する理想的な位相  $\theta_1$  および  $\theta_2$  の一方または両方のフーリエ級数の展開を含む。フーリエ解析の際に、分析装置は、理想的な位相  $\theta_1$  および  $\theta_2$  の代わりに、測定位相  $\theta_1(\sim)$  および  $\theta_2(\sim)$  を代入する。この代入は、効果的に使用される。何故なら、各理想的な位相  $\theta_1(\sim)$  および  $\theta_2(\sim)$  に関する測定位相  $\theta_1(\sim)$  および  $\theta_2(\sim)$  に対する循環エラーの影響は、分散パラメータ  $\sigma$  に関連する分散パラメータに対する循環エラーの影響と比較すると遥かに小さいからである。その結果、循環エラー係数の値は、各理想的位相  $\theta_1$  および  $\theta_2$  に関連する測定位相  $\theta_1(\sim)$  および  $\theta_2(\sim)$  の循環エラーの影響とほぼ同じ相対的精度で決定される。

【0069】

他の実施形態の場合には、分散干渉計システムは、また、循環エラーに対して決定した値の精度をさらに改善する為に上記移相構成部材を含むことができる。このようなシステムの場合には、分析装置は、位相ずれ  $\Delta\theta$  の関数として光学的距離の測定値を記録し、システムの循環エラーを特徴づけるために、測定対象物の複数の位置の関数として、分散測定値を記録する。上記の2チャンネル・システムの場合のように、この分散測定実施形態を使用すれば、測定対象物が走査され、ステップされる通常の距離測定動作中に、背景に循環エラーを特徴づけることができる。

【0070】

通常、本発明の干渉計システムの上記実施形態の場合には、分析装置は、適当な解析ステップを実行する為に、一つまたはそれ以上のコンピュータ・プロセッサを含む。本発明の数値ステップおよび記号ステップは、例えば、当業者にとって周知の方法により、デジタル信号プロセッサ(DSP)により実行したデジタル・プログラムに変換することができる。上記デジタル・プログラムは、ハードディスクのような、コンピュータが読むことができる媒体上に記憶することができ、分析装置のコンピュータ・プロセッサにより実行することができる。別な方法としては、適当な解析ステップを、上記ステップを実行する分析装置の専用電子回路に物理的に組み込まれているデジタル・プログラムに変換することができる。所与の数値解析手順または記号解析手順に基づいて、このような専用電子回路を形成する方法も、当業者にとっては周知のものである。

【0071】

特定の実施形態について、以下に詳細に説明する。これら実施形態は細かい点では異なっているが、開示の実施形態は、多くの共通な素子を共有していて、最終使用目的のタイプ、および循環エラーが測定され、測定循環エラーが循環エラーによる非直線性の影響を修正するために使用されるかどうか、または循環エラーが光路長に関して濾過されるかどうかにより、当然いくつかのグループに分類される。理解していただければと思うが、各グループ内の開示の実施形態は、また、その干渉計光路の実行方法および/またはある種の情報信号の電子的な処理方法の詳細な点で異なる。いくつかのグループの実施形態の中の第1のグループは、一つの波長で動作する距離測定干渉計を備える。

【0072】

いくつかのグループの実施形態の中の第2のグループは、干渉計の測定目的のために第1の波長で動作し、第1および第2の波長の一方または両方で干渉計の循環エラーを測定す

10

20

30

40

50



るために、所与の波長間隔で走査することができる第2の波長で動作する干渉計を備える。

【0073】

いくつかのグループの実施形態の中の第3のグループは、距離測定干渉計内のガスの影響が、分散干渉計をベースとする手順により修正される距離測定干渉計の分散関連信号の循環エラーを測定し、修正するための装置および方法の両方を備える。

【0074】

いくつかのグループの中の第4のグループの実施形態は、距離測定干渉計の測定光路上のガスの影響を決定するために、分散干渉計を使用する距離測定干渉計の分散関連信号および距離測定関連信号の両方の循環エラーを測定し、修正する為の装置および方法の両方、および分散関連信号の循環エラーを濾過するための方法および装置を備える。

10

【0075】

いくつかのグループの中の第5のグループの実施形態は、分散関連信号および屈折関連信号の両方、またはガスの固有の光学的特性を測定するために使用した屈折関連信号の循環エラーを測定し、修正する為の装置および方法を備える。いくつかのグループの中の第5のグループの実施形態は、分散関連信号および屈折関連信号の両方、またはガスの固有の光学的特性を測定するために使用した屈折関連信号の循環エラーを濾過する為の装置および方法を備える。

【0076】

図1aは、本発明の第1の実施形態の好適な装置および方法の略図である。第1の実施形態は、実施形態の第1のグループに含まれる。図1aの干渉計は、偏光ヘテロダイン単光路干渉計である。上記実施形態は、ヘテロダイン・システムであるが、本発明は、基準ビームおよび測定ビームが同じ周波数を持つホモダイン・システムで使用できるように容易に適合させることができる。上記装置は、広い範囲の放射源に使用することができるが、以下の説明は、光学的測定システムについての例示としてのものに過ぎない。

20

【0077】

図1aについて説明すると、ソース1から照射された光ビーム7は、変調器3を通過して光ビーム9になる。変調器3は、ドライバ5により励起される。好適には、ソース1は、好適には、偏光され、波長 $\lambda_1$ を持つ、レーザまたはコヒーレント照射の類似のソースであることが好ましい。変調器3は、例えば、音響光学装置、または音響光学装置と、ビーム7の偏光成分を選択的に変調するための、追加の光学系との組合わせであってもよい。変調器3は、好適には、ビーム7の一つの直線的に偏光した成分の発振周波数を、直交している直線的に偏光した成分に対して $f_1$ だけずらすものであることが好ましい。xおよびyで示すこれら成分の偏光方向は、図1aの面に、それぞれ平行であり、直交している。発振周波数 $f_1$ は、ドライバ5により決まる。

30

【0078】

レーザのような光源1としては、種々の周波数変調器の中の任意のもの、および/またはレーザを使用することができる。例えば、レーザとしては、例えば、当業者にとって周知の従来種々の技術の中の任意の技術で安定化されたHeNeレーザのようなガス・レーザを使用することができる。例えば、(1980年)の、Applied Optics 19号、3173~3177ページ掲載の、T. Baer他の「0.633 $\mu$ mのHe-Ne縦方向ゼーマン・レーザの周波数安定」；1975年6月10日付けの、Burgwald他の米国特許第3,889,207号；1972年5月9日付けの、Sandstrom他の米国特許第3,662,279号を参照されたい。別な方法としては、レーザとして、当業者にとって周知の従来種々の技術の中の任意の技術により、周波数の安定化が行われたダイオード・レーザを使用することができる。例えば、(1980年)の、Electronic Letters 16号、179~181ページ掲載の、T. OkoshiおよびK. Kikuchiの「ヘテロダイン・タイプの光学的通信システム用の半導体レーザの周波数安定」、および(1983年)IEEE J. Quantum Electronics、QE-19、1514~1519ページ掲載の、S. Yamagu

40

50

chiおよびM. Suzukiの「クリプトンのオプトガルバニック効果の使用によるAlGaAs半導体の周波数および電力の同時安定化」を参照されたい。

【0079】

下記の技術により、二つの光学的周波数を発生することができる。(1)1969年7月29日付けの、Bagley他の米国特許第3,458,259号;(1968年8月の)Ned, T. Natuurk 34号、225~232ページ掲載の、G. Bouwhuisの「Interferometrie Mit Gaslasers」;1972年4月18日付けの、Bagley他の米国特許第3,656,853号;および(1984年)Precision Engineering 6(2)号87~94ページ掲載の、H. Matsumotoの「安定化レーザを使用する最近の干渉計測定」;(2)一組の音響光学ブラッグ・セルの使用。例えば、(1979年)Applied Optics 18(2)号219~224ページ掲載の、Y. OhtsukaおよびK. Itohの「低周波領域内での僅かな変位を測定するための二周波レーザ干渉計」;(1983年)Applied Optics 22(14)号、2141~2151ページ掲載の、N. Massie他の「64チャンネル・ヘテロダイン干渉計を使用する測定レーザ流れフィールド」;(1984年)Optics and Laser Technology、16号、25~29ページ掲載の、Y. OhtsukaおよびM. Tsubokawaの「僅かな変位を測定するための、動的二周波干渉計」;H. Matsumoto、同上;1996年1月16日付けのP. Dirksen他の米国特許第5,485,272号;(1996年)Opt Eng., 35(4)号、920~925ページ掲載の、N. A. RizaおよびM. M. K. Howladerの「同調可能な低周波信号を発生/制御するための音響光学的システム」;(3)一つの音響光学ブラッグ・セルの使用。例えば、1987年8月4日付けの、G. E. Sommargrenの、共同所有の米国特許第4,684,828号;1987年8月18日付けの、G. E. Sommargrenの、共同所有の米国特許第4,687,958号;P. Dirken、同上;(4)ランダムに偏光したHeNeレーザの二つの縦モードの使用。例えば、(1978年)Applied Optics 17(18)号、2924~2929ページ掲載の、J. B. FergusonおよびR. H. Morrisの「6328オングストロームのHeNeレーザの単一モード崩壊」;(5)レーザ内部での複屈折素子等の使用。例えば、(1965年)Applied Optics 4(1)号、142~143ページ掲載の、V. EvtuhovおよびA. E. Siegmanの「レーザ空洞内での、軸方向に均一なエネルギー密度を入手するための、「ツイストモード」技術;またはHenry A. Hill他の「1998年4月17日付けの、U. S. S. N. 09/061,928「二つの平行でない伝播光学ビーム成分を二つの直交偏光ビーム成分に変換するための装置」に記載されているシステムの使用。上記文献は、引用によって本明細書の記載に援用する。

【0080】

ビーム9の光源用に使用する特定のデバイスが、ビーム9の直径および開度を決定する。ダイオード・レーザのようなある種の光源の場合には、ビーム9の直径を適当な大きさにし、その後の素子に対する開度を適当なものにするために、例えば、従来の顕微鏡の対物レンズのような従来のビーム形成光学系を使用しなければならない場合が出てくる。光源がHeNeレーザである場合には、例えば、ビーム形成光学系を必要としない場合がある。

【0081】

図1aに示すように、干渉計69は、基準逆反射体91、対物逆反射体92、1/4波位相遅延プレート77および78、および偏光ビーム・スプリッター71を備える。この構成は偏光マイケルソン干渉計と呼ばれるもので、当業者にとっては周知のものである。対物逆反射体92の位置は、並進装置67により制御される。

【0082】

干渉計69にビーム9が入射すると、図1aに示すように、ビーム33および34に分割される。ビーム33および34は、それぞれ、波長 $\lambda_1$ のところに、測定路98内のガ

10

20

30

40

50

スを通る光路長、および基準路を通る光路長についての情報を含む。ビーム 33 および 34 は、干渉計 69 からでて、図 1 a に略図で示す検出装置システム 89 に入る。検出装置システム 89 においては、ビーム 33 の第 1 の部分は、非偏光ビーム・スプリッタ 63 A により反射され、ミラー 63 B により反射され、ビーム・スプリッタ 63 C に入射する。非偏光ビーム・スプリッタ 63 A により反射された、ビーム 33 の第 1 の部分の一部は、偏光ビーム・スプリッタ 63 C により反射され、ビーム 41 の第 1 の成分になる。ビーム 34 の第 1 の部分は、非偏光ビーム・スプリッタ 63 A により反射され、偏光ビーム・スプリッタ 63 C に入射する。非偏光ビーム・スプリッタ 63 A により反射されたビーム 34 の第 1 の部分は、偏光ビーム・スプリッタ 63 C により送られ、ビーム 41 の第 2 の成分になる。ビーム 33 の第 2 の部分は、非偏光ビーム・スプリッタ 63 A により送られ、可変位相シフタ 81 により送られ、ミラー 63 D により反射され、偏光ビーム・スプリッタ 63 E に入射する。非偏光ビーム・スプリッタ 63 A により送られたビーム 33 の第 2 の部分は、偏光ビーム・スプリッタ 63 E により反射され、ビーム 43 の第 1 の成分になる。ビーム 34 の第 2 の部分は、非偏光ビーム・スプリッタ 63 A により送られ、光ビーム・スプリッタ 63 E に入射する。非偏光ビーム・スプリッタ 63 A により送られたビーム 34 の第 2 の部分は、偏光ビーム・スプリッタ 63 E により送られ、ビーム 43 の第 2 の成分になる。

10

## 【0083】

干渉計 69 は、それぞれ、ビーム 41 の第 1 および第 2 の成分の間、およびビーム 43 の第 1 および第 2 の成分の間に、位相ずれ  $\varphi_1$  および  $\varphi_2$  を導入する。位相ずれ  $\varphi_1$  および  $\varphi_2$  の大きさは、下式による測定路 98 の往復の物理的長さ  $L_i$  に関連する。

20

## 【0084】

## 【数 8】

$$\varphi_i = L_i p k_1 n_i, \quad i = 1 \text{ and } 2, \quad (8)$$

ここで、 $p$  は各基準脚部および測定脚部を通過する経路の数であり、 $n_i$  は位相ずれ  $\varphi_i$  を導入する光路および波数、 $k_1 = 2\pi / \lambda_1$  に対応する、測定路 98 内のガスの屈折率である。図 1 a の干渉計は、最も簡単な方法で、第 1 の実施形態の装置の機能を説明するために、 $p = 1$  の場合のものである。当業者にとっては、 $p = 1$  の場合に一般化するのとは簡単な手順である。

30

## 【0085】

$L_i$ 、 $i = 1$  および  $2$  に対する公称値は、測定路  $i$  の物理的長さと、関連基準逆経路との間の違いの二倍に対応する。長さ  $L_1$  および  $L_2$  は、高い精度に等しく、位相ずれ  $\varphi_1$  および  $\varphi_2$  に関連するビームは、同じビーム 33 から入手される。ガス内のタービュランス、ガス内の局地化密度勾配の他の原因のようなより高次の影響を除けば、屈折率  $n_1$  および  $n_2$  は、高い精度に等しく、位相ずれ  $\varphi_1$  および  $\varphi_2$  に関連するビームは、同じビーム 33 から入手される。

## 【0086】

図 1 a の可変移相器 81 は、非偏光ビーム・スプリッタ 63 A により送られたビーム 33 の第 2 の部分に、位相ずれ  $\varphi_1$  を導入し、位相ずれ  $\varphi_1$  の大きさは、信号 30 により調整および制御することができる。

40

## 【0087】

図 1 b - 図 1 e は、可変移相器 81 の一連の実施形態を示す。図 1 b - 図 1 e に示していない可変移相器 81 の第 1 の実施形態は、位相ずれが、各経路の経路内に、上記組の位相シフト・プレートとは異なる位相シフト・プレートを順次挿入することにより、位相ずれが変化する非複屈折または複屈折タイプの光学的厚さの、一組の移相器プレートを備える。

## 【0088】

図 1 b の可変移相器 81 の第 2 の実施形態は、電気光学変調器 72 を備え、位相ずれは、

50

例えば、コンピュータ 29 からの信号 30 により制御することができる。

【0089】

図 1 c の可変移相器 81 の第 3 の実施形態は、二つのほぼ同じプリズム 74 A および 74 B を備え、これらプリズムは、これらプリズムを通るビームの伝播の方向が、変化しないような方向に向けて配置されている。上記一組のプリズムによる位相ずれは、例えば、コンピュータ 29 からの信号 30 により制御される並進装置 67 B の重畳の程度を変化させることにより変化する。

【0090】

図 1 d の可変移相器 81 の第 4 の実施形態は、予め定めたガスにより充填されている真円のシリンダ 91 により分離されているウィンドウ 90 A および 90 B より形成されているセルを備える。第 4 の実施形態による位相ずれは、セル内の予め定めたガスの密度を変化することにより変化する。図 1 d は、ウィンドウ 90 A および 90 B およびシリンダ 91 からなるセル内の上記予め定めたガスの密度を変化させる為のガス処理システムを図示していない。

10

【0091】

図 1 e の可変移相器 81 の第 5 の実施形態は、二つのミラー 65 A および 65 B および逆反射体 93 を備える。第 5 の実施形態による位相ずれは、例えば、コンピュータ 30 からの信号 30 により制御される並進装置 67 C により、逆反射体 93 および上記一組のミラー 65 A および 65 B の分離を変化させることにより変化する。

【0092】

20

図 1 a の次のステップにおいては、位相ずれを起しているビーム 41 および 43 は、それぞれ、偏光子 79 A および 79 B を通り、光電検出器 85 および 87 に、それぞれ衝突し、好適には、光電検出により、それぞれ、電氣的干渉信号、ヘテロダイン信号  $s_1$  および  $s_2$  を発生する。偏光子 79 A および 79 B は、それぞれ、ビーム 41 の偏光成分 および ビーム 43 の、偏光成分を混合する方向を向いている。信号  $s_1$  および  $s_2$  は、下式により表される形を持つ。

【0093】

【数 9】

$$s_i = A_i(t) \cos[\alpha_i(t)] \quad , \quad i=1 \text{ and } 2 \quad . \quad (9)$$

30

信号  $s_i$  は、複素数  $s^{(i)}$  の実部、 $s^{(i)}, R$  である。この場合、 $s_i$  は、因果関係のある、安定している、すなわち、絶対に合計することができる実数のシーケンスを含む。それ故、 $s_i$  のフーリエ変換、 $S_i, R(j)$  は、 $S_i(j)$  を完全に定義する。A. V. Q p p e n h e i m および R. W. S c h a f e r の、(1989年プレントイス・ホール社発行の) 離散時間信号処理の第 10 章「離散ヒルベルト変換」参照)。この場合、下式のようなになる。

【0094】

【数 10】

$$S_i(j\omega) = S_{i,R}(j\omega) + iS_{i,I}(j\omega) \quad , \quad i=1 \text{ and } 2 \quad , \quad (10)$$

40

ここで、 $S_{i,I}(j)$  は、 $S_i(j)$  の虚数成分であり、 $\omega$  は、角周波数であり、 $j$  は、虚数、 $(-1)^{1/2}$  である。 $s^{(i)}$  の虚数成分  $s^{(i)}, I$  は、 $S_{i,I}(j)$  の逆フーリエ変換から入手される。下式参照。

【0095】

【数 11】

$$\hat{s}_{i,I} = A_i(t) \sin[\alpha_i(t)] \quad , \quad i=1 \text{ and } 2 \quad . \quad (11)$$

50

位相  $\alpha_i(t)$  は、下式により、 $s_i^R$  および  $s_i^I$  から入手することができる。

【0096】

【数12】

$$\alpha_i(t) = \arctan\left(\frac{s_{i,I}}{s_{i,R}}\right), \quad i=1 \text{ and } 2. \quad (12)$$

時間依存引数、 $\alpha_i(t)$  は、下式により、他の数量で表示できる。

【0097】

【数13】

$$\begin{aligned} \alpha_1(t) &= 2\pi f_1 t + \varphi_1 + \zeta_1 + \Lambda_1, \\ \alpha_2(t) &= 2\pi f_1 t + \varphi_2 + \zeta_2 + \Lambda_2 + \phi, \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 $\alpha_1$  および  $\alpha_2$  は、特定の循環エラー項を含む非直線性エラーを含み、 $\alpha_1$  は、非直線性  $\alpha_2$  を実質的に変えない、移相器 81 による位相ずれであり、位相ずれ、 $\alpha_1$  および  $\alpha_2$  は、それぞれ、測定路 98 または基準路の光路と関係ない、または関連しない、非直線性エラーと関係ない、または関連しない位相  $\alpha_1$  および  $\alpha_2$  への、すべての影響を含む。ヘテロダイン信号  $s_1$  および  $s_2$  は、それぞれ、好適には、デジタル・フォーマットであることが好ましいが、デジタル・フォーマットまたはアナログ・フォーマットで、電子信号 23 および 25 として解析するために、電子プロセッサ 27 に送られる。

【0098】

図 1 f について説明すると、電子プロセッサ 27 は、さらに、それぞれ、好適には、デジタル・プロセスが好ましいが、デジタル・ヒルベルト変換位相検出装置 [R. E. Best の、1993 年マグロウヒル社 (ニューヨーク) 発行の「位相ロック・ループ：理論、設計および用途、第 2 版の、4.1.1 節参照」等、およびドライバ 5 の位相のような、時間をベースとする位相検出を使用するデジタルまたはアナログ信号処理により、下式で示す測定位相  $\alpha_1(\sim)$  および  $\alpha_2(\sim)$  を決定するために、電子プロセッサ 1274 A プリズム 1274 B を備える。

【0099】

【数14】

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_1 &= \varphi_1 + \zeta_1 + \Lambda_1(\varphi_1), \\ \tilde{\varphi}_2 &= \varphi_2 + \zeta_2 + \Lambda_2(\varphi_2, \phi) + \phi, \end{aligned} \quad (14)$$

ドライバ 5 の位相は、好適には、デジタル・フォーマットであることが好ましいが、デジタル・フォーマットまたはアナログ・フォーマットで、電気信号、基準信号 21 により電子プロセッサ 27 に送られる。基準信号、基準信号への別の基準信号 21 も、別のヘテロダイン基準信号を発生するために、非偏光ビーム・スプリッタによりビーム 9 の一部を分割し、分割するビーム 9 の部分を混合し、混合部分を検出することにより、光学的ピックアップ手段および検出装置 (図示せず) により発生することができる。

【0100】

図 1 f について説明すると、次に、測定位相  $\alpha_1(\sim)$  および  $\alpha_2(\sim)$  は、位相  $\alpha_i$  を生成するために、電子プロセッサ 1277 で一方から他方が減算される。このプロセスは、好適には、デジタル・プロセスであることが好ましい。正式には、下式のようになる。

【0101】

【数15】

10

20

30

40

$$\Phi = (\tilde{\varphi}_2 - \tilde{\varphi}_1) \quad , \quad (15)$$

【 0 1 0 2 】

【 数 1 6 】

$$\Phi = pk_1(n_2L_2 - n_1L_1) + (\zeta_2 - \zeta_1) + [\Lambda_2(\varphi_2, \phi) - \Lambda_1(\varphi_1)] + \phi \quad . \quad (16)$$

測定路内のガスの屈折率に対するタービュランスの影響が、 内で、および逆反射体 9 2 の並進によるドップラー・シフトの影響により、ほぼ打ち消されることに留意されたい。 10  
測定路内のゲートの屈折率に対するタービュランスの影響は、 内で打ち消される。何故なら、ビーム 4 1 および 4 3 の測定ビーム成分は、同じビーム 3 3 からのものだからである。

【 0 1 0 3 】

通常、非直線性  $i$  は、周期的非直線性は、  $i$  および非周期的非直線性  $i$  により表すことができる。

【 0 1 0 4 】

【 数 1 7 】

$$\Lambda_i = \psi_i + \eta_i \quad , \quad i=1 \text{ and } 2 \quad . \quad (17) \quad 20$$

用途の残りに対しては、非周期的非直線性は無視される。

【 0 1 0 5 】

$1$  および  $2$  による周期的非直線性  $i$  のスペクトル表現は、異なるグループの直交多項式および関数に基づいて行うことができる。二つの例は、フーリエ正弦および余弦関数を含む級数であり、チェビシェフ多項式関数の級数である。本発明の精神および範囲から逸脱することなしに、  $i$  のフーリエ正弦および余弦級数のスペクトル表現を以降の実施形態で使用することができ、第 1 の実施形態においては、下式のように表示することができる。

【 0 1 0 6 】

【 数 1 8 】

$$\begin{aligned} \psi_1(\varphi_1) &= C_{1,0}(\varphi_1) + \psi_{1,1}(\varphi_1) \quad , \\ \psi_2(\varphi_2, \phi) &= C_{2,0}(\varphi_2) + \sum_{q=1} C_{2q}(\varphi_2) \cos q\phi + \sum_{q=1} S_{2q}(\varphi_2) \sin q\phi \quad , \end{aligned} \quad (18)$$

【 0 1 0 7 】

【 数 1 9 】

$$\begin{aligned} \psi_{i,1}(\varphi_i) &= \sum_{q=1} C_{iq}(\varphi_i) \\ &= \sum_{r=1} \left( \sum_{q=1} a_{iqr} \right) \cos r\varphi_i + \sum_{r=1} \left( \sum_{q=1} b_{iqr} \right) \sin r\varphi_i \quad , \quad i=1 \text{ and } 2 \quad , \end{aligned} \quad (19)$$

【 0 1 0 8 】

【 数 2 0 】

10

20

30

40

$$C_{iq}(\varphi_i) = \left( \sum_{r=1} a_{iqr} \cos r\varphi_i + \sum_{r=1} b_{iqr} \sin r\varphi_i \right), \quad \begin{cases} q=0,1,2,\dots, \\ i=1 \text{ and } 2, \end{cases} \quad (20)$$

【 0 1 0 9 】

【 数 2 1 】

$$S_{iq}(\varphi_i) = \left( \sum_{r=1} a'_{iqr} \cos r\varphi_i + \sum_{r=1} b'_{iqr} \sin r\varphi_i \right), \quad \begin{cases} q=0,1,2,\dots, \\ i=1 \text{ and } 2. \end{cases} \quad (21)$$

10

$C_{2,1}(\varphi_2) = C_{2,0}(\varphi_2, 0) - C_{2,0}(\varphi_2)$  のようになることに注目することは興味のあることである。

【 0 1 1 0 】

$C_{iq}$  および  $S_{iq}$  は、余弦級数の項および正弦級数の項により、式 (20) および (21) で表すことができる。この場合、上記級数項の引数は、 $i$  の高調波である。ある種の構成の干渉計、特に多重パス干渉計の場合には、光源、干渉計および検出装置を備えるシステムは、低調波  $i$  である周期的非直線性を発生することができる。あるシステム内に低調波の循環エラーが存在する場合には、低調波  $i$  である余弦級数の項および正弦級数の項を含むように、式 (20) および (21) を増大することができる。余弦級数の項および正弦級数の項で、係数を決定するための手順の以降の説明は、本発明の精神および範囲から逸脱することなしに、式 (18)、(19)、(20) および (21) による級数表現で行う。

20

【 0 1 1 1 】

光源、干渉計、検出装置およびデジタル信号処理を備えるシステムは、 $i$  の低調波または高調波のどちらでもない、周期的非直線性を発生することができる。低調波でもなく、高調波でもない循環エラーは、例えば、デジタル信号処理のエイリアシングにより発生し、 $i$  の高調波および低調波の別名である周波数を持つ。あるシステム内に、低調波でもなく、高調波でもない循環エラーが存在する場合には、 $i$  の高調波および/または低調波の適当な別名である引数を含む余弦級数の項および正弦級数の項を含むように、式 (20) および (21) を増大することができる。余弦級数の項および正弦級数の項で、係数を決定するための手順の以降の説明は、本発明の精神および範囲から逸脱することなしに、式 (18)、(19)、(20) および (21) による級数表現で行う。

30

【 0 1 1 2 】

式 (20) および (21) によるスペクトル表現は、通常、ヘテロダイン信号の位相が、ほぼ一定の速度で変化する干渉計の場合に使用することができる。式 (20) および (21) によるスペクトル表現の係数は、通常、例えば、ヘテロダイン信号が受ける群遅延の特性の結果としての、位相の変化の速度に依存する。多くの場合、エンベロープ遅延とも呼ばれる群遅延は、周波数の一つのパケットの遅延を示し、特定の周波数の群遅延は、特定の周波数における位相曲線の負の勾配として定義される。(ニューヨーク、ワイリー) 1976年発行の H. J. Blinchikoff および A. I. Zverev の「時間領域および周波数領域内の濾過」2.6節参照。)

40

ヘテロダイン信号の位相が、二つまたはそれ以上の異なるほぼ一定の速度で変化する干渉計に対する循環エラーの影響を説明するために、異なるほぼ一定の各速度に対するスペクトル表現を入手する。ヘテロダイン位相の、一組の二つまたはそれ以上の、異なるほぼ一定の変化速度に対応するスペクトル表現の係数は、別な方法としては、ヘテロダイン信号の位相の変化速度の関数により、効果的に表すことができる。上記関数は、変化速度による簡単な冪級数の第1の数個の項を含んでいなければならない場合があり、または直交関数または多項式を含むことができる。

【 0 1 1 3 】

50

循環エラー項  $C_{1,0}$  および  $C_{2,0}$  は、主として、例えば、測定脚部および/または基準脚部内のビームのスプリアス内部多重反射、および/または必要な特性からの、1/4波位相遅延プレートおよび偏光ビーム・スプリッタのズレのような、干渉計による循環エラーの発生によるものである。 $i = 1$  および  $2$   $q = 1$  に対する残りの周期的項  $C_{iq}$  および  $S_{iq}$  は、通常、干渉計光源内の偏光および周波数混合、干渉計に対する干渉計光源のズレ、偏光の相対的状态に基づいて、基準ビームおよび測定ビームを分離する為に使用する偏光ビーム・スプリッタの必要な特性からのズレ、および干渉計に対するミキサおよび分析装置を含む検出装置ユニットの整合特性からのズレのような、別々に動作する、または同時に動作する多数の異なるソースからの、偏光および周波数混合により実行される。

10

【0114】

循環エラー  $C_{1,0}$  および  $C_{2,0}$  の大きさは、ほぼ同じであるはずであるし、式(19)が定義する循環エラー  $C_{1,1}$  および  $C_{2,1}$  の大きさも、ほぼ同じであるはずである。しかし、循環エラー  $C_{1,0}$  および  $C_{2,0}$  の大きさは、通常、等しくなく、循環エラー  $C_{1,1}$  および  $C_{2,1}$  の大きさも、通常、等しくない。何故なら、ビーム・スプリッタ 63A、63B および 63E の反射および透過特性が、必要な特性からずれているからである。

【0115】

当業者であれば、本発明の精神および範囲から逸脱することなしに、本発明の実施形態の以降の説明の中から、非周期的非直線性  $i$  を省略することができることをすぐに理解することができるだろう。

20

【0116】

次のステップにおいて、 $\phi$  が、 $\phi_0$  の一組の値に対する関数  $\psi_1(\sim)$  および  $\psi_2(\sim)$  として測定されるが、 $\psi_1$  の必要な数の異なる値は、 $\psi_1$  および  $\psi_2$  の複雑さ、および  $\psi_1$  プレート  $\psi_2$  の測定値に対する必要な相対的精度に依存する。可変移相器 81 による  $\psi_1$  の一組の値は、コンピュータ 29 からの電子信号 30 により制御される。 $\psi_2$  の測定値から、下式の数量の測定値が、 $[\psi_1(\sim), \psi_2(\sim) - \psi_1(\sim), \psi_2(\sim), \psi_1(\sim), \psi_2(\sim)]$  から入手される。

【0117】

【数22】

$$\psi_2(\phi_2, \phi) - \psi_2(\phi_2, \phi_0) + (\phi - \phi_0) \tag{22}$$

30

ここで、 $\phi_0$  は、 $\psi_2$  のために使用される初期値である。

【0118】

$\psi_2(\phi_2, \phi) - \psi_2(\phi_2, \phi_0)$  に対する式は、式(18)により、下式のように表すことができる。

【0119】

【数23】

$$\psi_2(\phi_2, \phi) - \psi_2(\phi_2, \phi_0) = \sum_{q=1} C_{2,q}(\phi_2)(\cos q\phi - \cos q\phi_0) + \sum_{q=1} S_{2,q}(\phi_2)(\sin q\phi - \sin q\phi_0) \tag{23}$$

40

$\psi_1(\sim)$  において循環エラーの補償を必要とするが、 $\psi_2(\sim)$  においては循環エラーの補償を必要としない最終用途のための式(20)および(21)に示すフーリエ係数の中のあるものを決定するための手順について説明する。 $\psi_1(\sim)$  および  $\psi_2(\sim)$  の両方において循環エラーの補償を必要とする最終用途のための式(20)および(21)に示すフーリエ係数の中のあるものを決定するための手順について説明する。これら二つの

50



手順は、二つの可能な手順の例であり、二つの手順の特定の説明は、例示としてのものであって、本発明の範囲を制限するものではない。

【0120】

二つの手順の中の第2の手順について最初に説明する。この手順の場合には、 $f_1(\sim)$  および  $f_2(\sim)$  において、循環エラーの部分的修正が行われる。第2の手順の場合には、フーリエ係数、 $a_{2qr}$ 、 $b_{2qr}$ 、 $a'_{2qr}$  および  $b'_{2qr}$ 、 $q_{-1}$  および  $r_{-1}$  を、通常、干渉計で発見される循環エラーの大きさに対する反復手順により、 $q$  および  $r$  の関数として決定することができる。周期的非直線性項、 $f_2 = 1/10$  が、 $\lambda = 633\text{ nm}$  の、単光路干渉計内の  $5\text{ nm}$  の位置のエラーに対応する条件の場合には、 $[f_2(\theta_2, \phi) - f_2(\theta_2, \phi_0)]$  を表すフーリエ係数を、効率的な反復プロセスにより、測定値から入手することができる。周期的非直線性項が、 $f_2 \sim 1$  である場合には、 $[f_2(\theta_2, \phi) - f_2(\theta_2, \phi_0)]$  内のフーリエ係数を、上記フーリエ係数の一連の連立先験式を生成することにより入手することができる。フーリエ係数を決定するための反復手順については、本明細書において説明する。条件、 $f_2 = 1/10$  は、通常、干渉計システムで実現され、上記反復手順はより簡単な手順である。

10

【0121】

上記反復プロセスの第1のステップは、 $f_2(\sim)$  の周期的非直線性は無視することができるかと仮定して、積分の変数として  $f_2(\sim)$  を使用して、 $[f_2(\theta_2, \phi) - f_2(\theta_2, \phi_0)]$  のフーリエ係数を計算することである。上記反復プロセスの第2のステップは、 $[f_2(\theta_2, \phi) - f_2(\theta_2, \phi_0)]$  の上記第1の反復した周期的非直線性に対して修正した第1の反復した  $f_2(\sim)$  を生成し、その後で、積分の変数として上記第1の反復した  $f_2(\sim)$  を使用する  $[f_2(\theta_2, \phi) - f_2(\theta_2, \phi_0)]$  のフーリエ係数に対する第2の反復値を計算するために、反復プロセスの第1のステップで入手した  $[f_2(\theta_2, \phi) - f_2(\theta_2, \phi_0)]$  のフーリエ係数を使用することである。反復プロセスは、 $f_2(\sim)$  の  $[f_2(\theta_2, \phi) - f_2(\theta_2, \phi_0)]$  のフーリエ係数に対する反復値のシーケンスが、必要な相対的精度に収束するまで反復して行われる。 $f_2 = 1/10$  である場合には、反復プロセスのステップの数は、1または2以上である必要はない。

20

【0122】

第1の実施形態により、 $[f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)]$  を決定することができる相対的精度は、ラジアン単位の、循環エラー項、 $C_{2,0}(\theta_2)/2$  の大きさの程度の大きさをもつ。循環エラー項、 $C_{2,0}(\theta_2)$  は、 $f_2$  が既知の、ラジアン単位の絶対精度と組合わせた、 $[f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)]$  を評価するために使用する手順では決定されない。 $[f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)]$  に対する修正後の、 $f_2(\sim)$  内の  $[f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)]$  からの残りの循環エラーは、一連の第2次の影響として入力されると説明することができる。第2次の影響は、二つの第1次の影響の積から入手されるが、上記第1次の影響は、 $[f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)]$ 、 $C_{2,0}(\theta_2)$  であり、 $f_2$  が既知の絶対精度である。

30

40

【0123】

$f_{1,1}(\theta_1)$  により表される循環エラーが、次に、 $[f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)]$  が、第1の実施形態の上記ステップで決定される相対的精度とほぼ同じ相対的精度に対して決定される。 $f_1(\sim)$  の循環エラーを処理する為の、循環エラー評価手順の次のステップは、 $\{ - + [f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)] + \}$  のフーリエ解析の際に、積分の変数として、 $[f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)]$ 、すなわち、 $\{ f_2(\sim) - [f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)] - \}$  に対して修正した  $f_2(\sim) -$  を使用する。

【0124】

値  $\{ - + [f_2(\theta_2, \phi) - C_{2,0}(\theta_2)] + \}$  は、式(16)およ

50

び(18)に基づく下式から明らかなように、ある定数のよい近似  $\psi_{1,1}(\varphi_1)$  (1) に対するものである。

【0125】

【数24】

$$\begin{aligned} \{-\Phi + [\Psi_2(\varphi_2, \phi) - C_{2,0}(\varphi_2)] + \phi\} = \psi_{1,1}(\varphi_1) + (\zeta_1 - \zeta_2) \\ + [C_{1,0}(\varphi_1) - C_{2,0}(\varphi_2)] \end{aligned} \tag{24}$$

ここで、項、 $p_k$  (1) (2) および  $n_i$  項は、上記理由により省略した。オフセット項、(1) (2) は、定数であり、通常、下式により表される。

【0126】

【数25】

$$|C_{1,0}(\varphi_1) - C_{2,0}(\varphi_2)| \leq |C_{1,0}(\varphi_1)|/10 \tag{25}$$

ここで、 $C_{1,0}(\varphi_1)$  (1) は、 $C_{2,0}(\varphi_2)$  (2) にほぼ等しく、ビーム・スプリッタ63Aのビーム分割特性に対する  $C_{1,0}(\varphi_1)$  (1) は、例えば、50/50のように、透過および反射ビームに対する  $C_{1,0}(\varphi_1)$  (1) とほぼ同じである。

【0127】

{ - + [  $\Psi_2(\varphi_2, \phi)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$  ] + } のフーリエ係数 [ (  $q=1$   $a_1, qr$  ) + (  $a_1, 0, r$  -  $a_2, 0, r$  ) ] および  $\cos \varphi_1$  および  $\sin \varphi_1$  の [ (  $q=1$   $b_1, qr$  ) + (  $b_1, 0, r$  -  $b_2, 0, r$  ) ] は、いくつかの手順の中の一つにより、 $r$ の関数として決定することができる。周期的非直線性項が、 $\varphi_1 = 1/10$  および  $\varphi_2 = 1/10$  である場合には、フーリエ係数は、{  $\psi_{1,1}(\varphi_1)$  + (1) (2) + [  $C_{1,0}(\varphi_1)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$  ] } の  $r = 1$  に対する [ (  $q=1$   $a_1, qr$  ) + (  $a_1, 0, r$  -  $a_2, 0, r$  ) ] および [ (  $q=1$   $b_1, qr$  ) + (  $b_1, 0, r$  -  $b_2, 0, r$  ) ]、すなわち、式(24)の右辺は、[  $\Psi_2(\varphi_2, \phi)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$  ] のフーリエ係数の決定のところで説明したのと同じ反復プロセスにより、値 { - + [  $\Psi_2(\varphi_2, \phi)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$  ] + } から入手することができる。

【0128】

第1の実施形態により、{  $\psi_{1,1}(\varphi_1)$  + [  $C_{1,0}(\varphi_1)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$  ] } の循環エラーを決定することができる相対的精度は、ラジアン単位の、循環エラー項、 $C_{2,0}(\varphi_2)/2$ の大きさの程度の大きさをもつ。循環エラー項、 $C_{2,0}(\varphi_2)$  は、 $\Psi_2(\varphi_2, \phi)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$ 、またはが既知の、ラジアン単位の絶対精度と組合わせた、{  $\psi_{1,1}(\varphi_1)$  + [  $C_{1,0}(\varphi_1)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$  ] } を評価するために使用する手順では決定されない。{  $\psi_{1,1}(\varphi_1)$  + [  $C_{1,0}(\varphi_1)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$  ] } に対する修正後の、 $\varphi_1$  ( ~ ) 内の {  $\psi_{1,1}(\varphi_1)$  + [  $C_{1,0}(\varphi_1)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$  ] } からの残りの循環エラーは、一連の第2次の影響として入力されると説明することができる。第2次の影響は、二つの第1次の影響の積から入手されるが、上記第1次の影響は、{  $\psi_{1,1}(\varphi_1)$  + [  $C_{1,0}(\varphi_1)$  -  $C_{2,0}(\varphi_2)$  ] }  $C_{2,0}(\varphi_2)$  であり、が既知の絶対精度である。

【0129】

第1の実施形態の装置および方法を使用すれば、 $C_{2,0}(\varphi_2)$  (2) の大きさにより決定された相対的精度および  $\varphi_1$  ( ~ ) および  $\varphi_2$  ( ~ )

の循環エラーの中のあるものに対して、測定および以降の修正を行うことができる。すでに説明したように、 $C_{2,0}(\omega_2)$  項は、主として、光源および/または干渉計へのビーム経路内で発生する循環エラーのような、干渉計に関連する影響、干渉計に対する干渉計光源のずれ、基準ビームおよび測定ビームを分離する為に使用する偏光ビーム・スプリッタの必要な特性からのずれによるものである。このように発生した循環エラーは、通常、干渉計に対するミキサおよび分析装置を含む、検出装置ユニットの整合特性により修正され、高いレベルの精度まで、すなわち、二次影響まで修正することができる。二次影響は、二つの第1次の影響の積から入手されるが、上記第1次の影響は、 $C_{2,0}(\omega_2)$  のようなある他の循環エラー、および/または  $\phi_2$  が既知の絶対精度である。

【0130】

10

次に説明する手順は、上記二つの手順の中の第1の手順である。第1の手順の場合、 $\phi_1(\sim)$  の循環エラーに対する部分的補償は、 $\phi_2(\sim)$  の循環エラーを部分的に決定しないで行われる。第1の手順の第1のステップは、 $\phi_2$  の関数として  $\phi_2(\sim)$  を測定し、 $\phi_2$  に対する一組の値を測定することである。 $\phi_2$  の異なる値の必要な数は、 $\phi_1$  および  $\phi_2$  の複雑さ、および  $\phi_1$  の決定値に対する必要な相対的精度に依存する。可変移相器 81 により導入された  $\phi_2$  の一組の値は、コンピュータ 29 からの電子信号 30 により制御される。次のステップは、 $\phi_2$  の表現の、それ故、 $\phi_2(\sim)$  の表現の要因としての、 $C_{2,q}(\omega_2)$  および  $S_{2,q}(\omega_2)$ 、 $q = 1$  を含む項を除去するための積分変換による  $\phi_2(\sim)$  の濾過である。

【0131】

20

$\phi_2$  に対する  $\phi_2(\sim)$  の  $\phi_2^{-1}(\sim)$  の積分変換は、下式により表される。

【0132】

【数26】

$$\tilde{\phi}_2^I = \frac{\int \tilde{\phi}_2 d\phi}{\int d\phi} \tag{26}$$

ここで、 $\phi_2$  に対する積分範囲は、モジュロ 2π である。式(18)による  $\phi_2$  に対する級数表現が、 $\phi_2$  の低調波である引数を含む項を含むようにするために増大が行われた用途の場合には、式(26)の  $\phi_2$  に対する積分範囲は、モジュロ 2π から低調波項の積分がゼロであるような範囲に修正される。式(18)による  $\phi_2$  に対する級数表現が、例えば、エイリアシングにより発生した  $\phi_2$  の、非低調波および/または非高調波に対応する引数を含む項を含むようにするために、増大が行われた用途の場合には、類似の手順が使用される。式(26)の積分変換は、例えば、測定路内の空気の乱れによる制限がない、最終用途の要件に十分適合する相対的精度に対する一定である、一定の速度を変化させる  $\phi_2$  のような、 $\phi_2$  に対する停留値を含むように一般化することができる。

30

【0133】

実際には、式(26)の積分フィルタは、通常、デジタル信号プロセッサにより、デジタル・フィルタとして実行される。[例えば、1992年、(ニューヨーク、マクミラン社発行の) J. G. Proakis および D. G. Manolakis の「デジタル信号処理：原理、アルゴリズム、および用途、第2版参照]

40

濾過された  $\phi_2(\sim)$ 、 $\phi_2^{-1}(\sim)$  は、 $\phi_1(\sim)$  および  $\phi_2(\sim)$  の循環エラーの部分的決定のところでも説明した第2の手順の  $\phi_2(\sim)$  に対して入手した反復した値と同じ物である。 $\phi_2^{-1}(\sim)$  の特性についての残りの説明は、反復した  $\phi_2(\sim)$  に対する説明の、対応する部分と同じものである。 $\phi_1(\sim)$  の循環エラーの部分的決定の際の残りのステップは、第2の手順の  $\phi_1(\sim)$  の循環エラーの決定の際の、対応するステップと同じものである。 $\phi_2^{-1}(\sim)$  は、 $\phi_2(\sim)$  の反復した値の代わりに使用される。

【0134】

$\phi_1(\sim)$  の循環エラーの部分的決定のための第1の手順の残りの説明は、第2の手順の

50

$1$  ( ~ ) および  $2$  ( ~ ) の循環エラーの決定に対する説明の、対応する部分と同じものである。

【 0 1 3 5 】

第 1 の実施形態の重要な利点は、最終用途の要件に適合する為に、 $1$  を知っておかなければならない必要な絶対精度について、 $1$  に対する所与の既知の絶対精度が、第 1 の実施形態が、循環エラーに対して修正した位相測定値の二次影響に係数としてエラーを導入することである。

【 0 1 3 6 】

ヘテロダイン信号の発生および電子処理の非直線性も、循環エラーの原因になりうる。ヘテロダイン信号の発生および電子処理中の非直線性による循環エラーの中のあるものは、必要なヘテロダイン信号のヘテロダイン位相の高調波のものと同じヘテロダイン位相を持つので、必要なヘテロダイン信号の測定位相の循環エラーを発生する。ヘテロダイン信号の発生および電子処理中の、非直線性による循環エラーの中のあるものは、他の上記機構により発生した循環エラーのところで説明したように、第 1 の実施形態により測定され、モニタされる。

【 0 1 3 7 】

第 1 の実施形態の重要な利点は、 $1$  に対応する測定路を修正しないで、そのまま、循環エラーの部分的決定を行うことである。第 1 の実施形態のもう一つ利点は、 $1$  ( ~ ) および  $2$  ( ~ ) の循環エラーの部分的決定のために第 2 の手順を使用する場合、距離測定の通常の動作と干渉を起さないで、距離測定干渉計の通常の動作中に循環エラーを測定することができることである。従って、もう一つ利点を、 $1$  に対応する測定路を修正しないで、または距離測定の通常の動作と干渉を起さないで、そのまま、 $1$  ( ~ ) の循環エラーを部分的に測定およびモニタすることであると記載することができる。

【 0 1 3 8 】

第 1 の実施形態のもう一つ利点は、 $1$  ( ~ ) および  $2$  ( ~ ) の循環エラーの部分的決定および / またはモニタ機能が、 $1$  ( ~ ) および  $2$  ( ~ ) の循環エラーが、時間および / または  $1$  または  $2$  のゆっくりと変化する関数である場合でも、例えば、循環エラーが、測定対象物 9 2 の位置に依存する場合でも、動作することである。

【 0 1 3 9 】

当業者であれば、別な方法として、本発明の精神および範囲から逸脱することなしに、ビーム・スプリッタ 6 3 A が透過したビーム 3 3 の第 2 の部分に導入する代わりに、ビーム・スプリッタ 6 3 A により反射したビーム 3 3 の第 1 の部分に位相ずれを導入するように、図 1 a において、可変移相器 8 1 の位置を変更することができることである。実施形態の第 1 のグループの装置および方法を使用すれば、可変移相器 8 1 を別の位置に設置することができるが、 $C_{1,0}(\theta_1)$  により決定した相対的精度に対して、 $1$  ( ~ ) および  $2$  ( ~ ) の  $C_{1,0}(\theta_1)$  および  $C_{1,0}(\theta_1)$  の影響を除いて、循環エラーに対する測定および以降の修正を他の場所で行うことができる。すでに説明したように、循環エラー項、 $C_{1,0}(\theta_1)$  および  $C_{2,0}(\theta_2)$  は、ほぼ同じであるので、第 1 の実施形態の機能は、可変移相器 8 1 の上記二つの位置に対してほぼ同じである。

【 0 1 4 0 】

可変移相器 8 1 の別の位置についての第 1 の実施形態の残りの説明は、第 1 の実施形態の説明の対応する部分と同じである。

当業者であれば、測定値  $1$  は、干渉計の測定路内のガスの影響、特に空気の乱れの影響を受けないことを理解することができるだろう。 $1$  を発生するために使用した二つのビームの経路は、ほぼ同じ大きさである。本発明のこの後者の機能により、測定路内のシステムのガスの流れのパターンによる潜在的に存在するシステムによる誤差を少なくして、循環エラーについての情報を入手することができる。すなわち、測定路内の平均的なガスの流れのパターンが、システムによる誤差を発生しないと仮定する必要がなくなる。また、本発明のこの後者の機能により、 $1$  の多数の独立している測定値の平均値を出さなくても、

10

20

30

40

50

少ない統計的誤差で、循環エラーの中のあるものについての情報を入手することができる。

【0141】

図2aは、本発明の第2の実施形態の好適な装置および方法に従って回路図形式で示されている。この第2の実施形態は第1のグループの実施形態からのものである。図2aに示されている干渉計169は、偏光、ヘテロダイン、単独パス干渉計、光ビーム109および光ビーム109のソースを含んでいる。光ビーム109および光ビームのソース109についての説明は、第1の実施形態の光ビーム9および光ビーム9のソースに対して与えられた説明の対応している部分と同じである。

【0142】

図2aを参照して、ビーム109の第1の部分は、入力ビーム109Aとして偏光ビーム・スプリッタ158Aによって透過され、そしてビーム109の第2の部分は、偏光ビーム・スプリッタ158Aによって、およびミラー158Bによって反射されて、入力ビーム109Bを形成する。入力ビーム109Aおよび109Bは干渉計169に入る。第2の実施形態の再帰反射器191および192および偏光ビーム・スプリッタ171は、それぞれ第1の実施形態の再帰反射器91および92および偏光ビーム・スプリッタ71と同様な動作を実行する。

【0143】

出力測定を形成するための干渉計169を通るビーム109Aおよび基準ビーム133Aおよび134Aの伝播についての説明は、それぞれ、第1の実施形態の出力測定を形成するための干渉計69を通るビーム9および基準ビーム33および34のそれぞれに対して与えられた説明の対応している部分と同じである。

【0144】

出力測定を形成するための干渉計169を通るビーム109Bおよび基準ビーム133Bおよび134Bのそれぞれの伝播についての説明は、可変位相器181を除いて、第1の実施形態の出力測定を形成するための干渉計68を通るビーム9および基準ビーム33および34のそれぞれに与えられた説明の対応している部分と同じである。

【0145】

第2の実施形態の可変位相器181についての説明は、第1の実施形態の可変位相器81に対して与えられた説明の対応している部分と同じである。第2の実施形態においては、可変位相器181は、出力測定ビーム133Bのプロジェクタ (progenitor) において位相ずれを導入する。干渉計169はビーム133Aと134Aとの間に相対的位相ずれ3を導入し、ビーム133Bと134Bとの間に相対的位相ずれ4 + を導入する。

【0146】

図2aに示されているように、次のステップにおいて、ビーム133A、134A、133Bおよび134Bは干渉計169を出て検出器システム189に入る。検出器システム189の中で、ビーム133Aは、ミラー163Aによって反射され、その一部分が偏光ビーム・スプリッタ163Bによって透過されて位相シフトされたビーム141の第1の成分を形成し、ビーム134Aの一部分が偏光ビーム・スプリッタ163Bによって反射されて位相シフトされたビーム141の第2の成分を形成する。さらに、ビーム133Bはミラー163Cによって反射され、その一部分が偏光ビーム・スプリッタ163Dによって透過されて位相シフトされたビーム143の第1の成分を形成し、そしてビーム134Bの一部分が偏光ビーム・スプリッタ163Dによって反射されて位相シフトされたビーム143の第2の成分を形成する。

【0147】

位相シフトされたビーム141および143は、偏光子179Aおよび179Bをそれぞれ通過し、光検出器185および187のそれぞれに当たり、結果として電氣的干渉信号、ヘテロダイン信号s3およびs4をそれぞれ発生する。それらは光電検出されることが好ましい。偏光子179Aおよび179Bは、位相シフトされたビーム141の偏光

10

20

30

40

50

成分および位相シフトされたビーム 1 4 3 の偏光成分をそれぞれ混合するように適応されている。信号  $s_3$  および  $s_4$  は次の形式を有する。

【 0 1 4 8 】

【 数 2 7 】

$$s_i = A_i(t) \cos[\alpha_i(t)] , \quad i = 3 \text{ and } 4 , \quad (27)$$

ここで、時間依存の引数  $\alpha_i(t)$  は、下式によって与えられる。

【 0 1 4 9 】

【 数 2 8 】

$$\alpha_3(t) = 2\pi f_1 t + \varphi_3 + \zeta_3 + \Lambda_3 , \quad (28)$$

$$\alpha_4(t) = 2\pi f_1 t + \varphi_4 + \zeta_4 + \Lambda_4 + \phi ,$$

ここで、位相オフセット  $\zeta_3$  および  $\zeta_4$  は、 $\alpha_3$  および  $\alpha_4$  に対するすべての寄与をそれぞれ含み、それらは測定径路 1 9 8 の光径路または参照径路には関連しておらず、 $\Lambda_3$  および  $\Lambda_4$  によってそれぞれ表される非線形効果を除外し、そして  $\phi$  は位相器 1 8 1 によって発生される位相ずれを表している。式 ( 2 7 ) による  $s_3$  および  $s_4$  の表現についての説明は、第 1 の実施形態の式 ( 9 ) による  $s_1$  および  $s_2$  の対応している表現について与えられた説明と同じである。ヘテロダイン信号  $s_3$  および  $s_4$  は、それぞれ電子信号 1 2 3 および 1 2 5 として解析のために電子プロセッサ 1 2 7 に対して、それぞれデジタルまたはアナログの形式で伝送されるが、好適には、デジタル形式が好ましい。

【 0 1 5 0 】

図 2 b について説明すると、電子プロセッサ 1 2 7 は、電子プロセッサ 2 2 7 4 A、2 2 7 4 B、および 2 2 7 7 を含み、それらは第 1 の実施形態の電子プロセッサ 1 2 7 4 A、1 2 7 4 B および 1 2 7 7 と同様な機能を実行する。位相 [ 式 ( 3 0 ) によって以下に定義される ] に対して電子プロセッサ 1 2 7 によってヘテロダイン信号  $s_3$  および  $s_4$  を処理するステップについての説明は、位相 [ 式 ( 1 5 ) によって定義されている ] に対して電子プロセッサ 2 7 によって第 1 の実施形態について  $s_1$  および  $s_2$  のそれぞれのヘテロダイン信号を処理するステップに対して与えられた説明の対応している部分と同じである。電子プロセッサ 2 2 7 4 A および 2 2 7 4 B は、測定位相を下式によって決定する。

【 0 1 5 1 】

【 数 2 9 】

$$\tilde{\varphi}_3 = \varphi_3 + \zeta_3 + \Lambda_3(\varphi_3) , \quad (29)$$

$$\tilde{\varphi}_4 = \varphi_4 + \zeta_4 + \Lambda_4(\varphi_4, \phi) + \phi .$$

電子プロセッサ 1 2 7 7 は、 $\tilde{\varphi}_3$  ( ~ ) を  $\tilde{\varphi}_4$  ( ~ ) から差し引いて  $\Phi$  を形成する。形式的には、

【 0 1 5 2 】

【 数 3 0 】

$$\Phi = (\tilde{\varphi}_4 - \tilde{\varphi}_3) \quad (30)$$

または

【 0 1 5 3 】

【 数 3 1 】

10

20

30

40

$$\Phi = pk(n_4 L_4 - n_3 L_3) + (\zeta_4 - \zeta_3) + [\Lambda_4(\varphi_4, \phi) - \Lambda_3(\varphi_3)] + \phi \quad (31)$$

である。

【 0 1 5 4 】

再帰反射器 1 9 2 の並進によって作られるドップラー・シフトの効果は において打ち消されることに注意されたい。

非線形性  $i$  は循環非線形性  $i$  および非循環非線形性  $i$  の項で表される。すなわち、

【 0 1 5 5 】

【 数 3 2 】

$$\Lambda_i = \psi_i + \eta_i \quad , \quad i = 3 \text{ and } 4 \quad , \quad (32)$$

ここで、 $i = 3$  および  $4$  に対する  $i$  は、高次の精度では次のように書かれる。

【 0 1 5 6 】

【 数 3 3 】

$$\begin{aligned} \Psi_3(\varphi_3) &= \sum_{q=1} C_{3,q}(\varphi_3) \quad , \\ \Psi_4(\varphi_4, \phi) &= \sum_{q=1} C_{4,q}(\varphi_4) \cos q\phi + \sum_{q=1} S_{4,q}(\varphi_4) \sin q\phi \quad , \end{aligned} \quad (33) \quad 20$$

ここで、

【 0 1 5 7 】

【 数 3 4 】

$$\begin{aligned} \Psi_{i,1}(\varphi_i) &= \sum_{q=1} C_{iq}(\varphi_i) \\ &= \sum_{r=1} \left( \sum_{q=1} a_{iqr} \right) \cos r\varphi_i + \sum_{r=1} \left( \sum_{q=1} b_{iqr} \right) \sin r\varphi_i \quad , \quad i = 3 \text{ and } 4 \quad , \end{aligned} \quad (34) \quad 30$$

【 0 1 5 8 】

【 数 3 5 】

$$C_{iq}(\varphi_i) = \left( \sum_{r=1} a'_{iqr} \cos r\varphi_i + \sum_{r=1} b'_{iqr} \sin r\varphi_i \right) \quad , \quad \begin{cases} q = 1, 2, \dots, \\ i = 3 \text{ and } 4 \quad , \end{cases} \quad (35)$$

【 0 1 5 9 】

【 数 3 6 】

$$S_{iq}(\varphi_i) = \left( \sum_{r=1} a'_{iqr} \cos r\varphi_j + \sum_{r=1} b'_{iqr} \sin r\varphi_i \right) \quad , \quad \begin{cases} q = 1, 2, \dots, \\ i = 3 \text{ and } 4 \quad . \end{cases} \quad (36)$$

$C_{iq}$  および  $S_{iq}$  は、式 (35) および (36) において余弦および正弦級数の項で書かれ、その級数の項の引数は  $i$  の高調波である。干渉計、特に複数パス干渉計のいくつかの構成に対しては、ソースと、干渉計と、検出器とを含んでいるシステムが  $i$  の部分高調波または  $i$  の高調波のエイリアスおよび / または部分高調波を発生することが可能である。部分高調波タイプの循環エラーの部分高調波、高調波のエイリアス、およ

10

20

30

40

50

び/または部分高調波タイプの循環エラーのエイリアスがシステム内に存在する場合、式(35)および(36)は、の部分高調波、高調波のエイリアスおよび/または部分高調波のエイリアス以外に、 $i$ の部分高調波、高調波のエイリアスおよび/または部分高調波のエイリアスである引数を有する余弦および正弦級数の項を含めるように拡張される。余弦および正弦級数における係数を決定する手順のこれ以降の説明は、本発明の精神および適用範囲から逸脱せずに、式(33)、(34)、(35)、および(36)によって与えられる級数表現の項で行われる。

【0160】

第1の実施形態の式(18)、(19)、(20)、および(21)の級数表現の構造と第2の実施形態の式(33)、(34)、(35)、および(36)の級数表現の構造との違いは重要である。構造における違いが重要であるのは、以下に説明するように、第2の実施形態において存在する循環エラーの実質的にすべてが第1の実施形態において存在する状況に対して対照的に測定され、監視され得るからであり、ここで循環エラーの $C_{1,0}$ および $C_{2,0}$ は、ここで説明するように測定および監視することはできない。

10

【0161】

構造における違いが発生するのは、第2の実施形態の中の可変位相器181がビーム・スプリッタ171と再帰反射器192との間にある測定径路198の中にあり、一方、第1の実施形態においては、可変位相器81が干渉計69の外部に置かれているからである。可変位相器181と81の相対的位置の効果の一例として、スプリッタ内部多重反射によって発生される、干渉計169および69の測定径路に沿って通過するスプリッタ・ビーム上の可変位相器のそれぞれの位置の影響を考える。再帰反射器に対して複数の径路を生じている出力測定ビームの成分へ導いているそれぞれのスプリッタ・ビームは、第1の実施形態の可変位相器81を通過する単独パスだけに比較して、第2の実施形態の可変位相器181を通る複数の位相ずれを受ける。

20

【0162】

循環エラー $C_{3,q}$ および $C_{4,q}$ 、 $q=1$ の大きさは、実質的に同じある可能性がある。しかし、循環エラー $C_{3,q}$ および $C_{4,q}$ 、 $q=1$ の大きさは一般には等しくない。というのは、ビーム・スプリッタ158A、158B、163B、163D、および173の反射および透過の性質が所望の性質からずれているからである。

30

【0163】

非循環非線形性 $i$ は、第1の実施形態についての説明において示されているので、第2の実施形態の以降の説明においては省略される。

次のステップにおいて、 $\phi$ が、 $\phi_0$ に対する一組の値に対する関数 $\psi_3(\sim)$ および $\psi_4(\sim)$ として測定され、 $\phi_0$ の必要な異なる値の数は $\psi_3$ および $\psi_4$ の複雑性および $\psi_3$ および $\psi_4$ の測定値に対して必要な精度に依存している。可変位相器181によって導入される一組の $\phi$ の値はコンピュータ129からの電子信号130によって制御される。 $\phi_0$ の測定値から、次の式の量の測定値が、 $[\psi_3(\sim, \phi_0) - \psi_3(\sim, \phi)]$ から得られる。ここで、 $\phi_0$ は $\phi$ に対して使用される初期値である。

40

【0164】

【数37】

$$\psi_4(\phi_4, \phi) - \psi_4(\phi_4, \phi_0) + (\phi - \phi_0) \quad (37)$$

$\psi_4(\phi_4, \phi) - \psi_4(\phi_4, \phi_0)$ に対する式は、式(33)に従って、次のように書くことができる。

【0165】

【数38】



$$\begin{aligned} \psi_4(\varphi_4, \phi) - \psi_4(\varphi_4, \phi_0) &= \sum_{q=1} C_{4,q}(\varphi_4)(\cos q\phi - \cos q\phi_0) \\ &+ \sum_{q=1} S_{4,q}(\varphi_4)(\sin q\phi - \sin q\phi_0) \end{aligned} \quad (38)$$

4 ( ~ ) ではなく、 3 ( ~ ) における循環エラーに対する補正を必要とする最終使用の用途に対して式 ( 3 5 ) および ( 3 6 ) の中にリストされているある種のフーリエ係数を求めるための手順を説明する。 3 ( ~ ) および 4 ( ~ ) の両方における循環エラーに対する補正を必要とする最終使用の用途のために、式 ( 3 5 ) および ( 3 6 ) に

10

【 0 1 6 6 】

2つのうちの第2の手順が先ず最初に説明され、その中では 3 ( ~ ) および 4 ( ~ ) の両方における循環エラーに対する補正が行われる。第2の手順に対して、フーリエ係数  $a_{4,q,r}$ 、 $b_{4,q,r}$ 、 $a'_{4,q,r}$ 、および  $b'_{4,q,r}$ 、 $q = 1$  および  $r = 1$  を、干渉計において普通に見られる循環エラーの大きさに対していくつかの手順のうちの1つによって  $q$  および  $r$  の関数として求めることができる。  $\lambda = 633 \text{ nm}$  の単独パス干渉計における  $5 \text{ nm}$  の位置における誤差に対応している、循環非線形性の項  $\frac{1}{10}$  /  $10$  の条件に対して、 $[C_{4,q}(\varphi_4, \phi) - C_{4,q}(\varphi_4, \phi_0)]$  を表しているフーリエ係数が、効率的な繰返しプロセスによって測定された量から得られる。循環エラー非線形性の項  $\frac{1}{10}$  の状況に対して、 $[C_{4,q}(\varphi_4, \phi) - C_{4,q}(\varphi_4, \phi_0)]$  の中のフーリエ係数がフーリエ係数の一連の同時超越式の発生によって得られる。フーリエ係数を求めるための繰返し手順をここで説明する。第1の実施形態に対して説明された、第2の手順の対応している繰返しプロセスと同じであるその繰返しプロセスは、条件  $\frac{1}{10}$  が干渉計システムにおいて一般的に満足され、その繰返し手順は比較的単純な手順である。

20

【 0 1 6 7 】

循環エラー評価手順における次のステップは  $[C_{4,q}(\varphi_4, \phi) - C_{4,q}(\varphi_4, \phi_0)]$  のフーリエ解析における積分の変数として  $(C_{4,q}(\varphi_4, \phi) - C_{4,q}(\varphi_4, \phi_0))$  を使用して 3 ( ~ ) における循環エラー 3 に対応し、 3 ( ~ ) と  $(C_{4,q}(\varphi_4, \phi) - C_{4,q}(\varphi_4, \phi_0))$  との間の差は、決定することができる定数  $(C_{4,q}(\varphi_4, \phi) - C_{4,q}(\varphi_4, \phi_0))$  より小さい。次の式の  $\cos r \theta$  および  $\sin r \theta$  のフーリエ係数を、それぞれいくつかの定常のうちの1つによって  $r$  の関数として求めることができる。

30

【 0 1 6 8 】

【 数 3 9 】

$$\sum_{q=1} a_{3,q,r} , \sum_{q=1} b_{3,q,r} , \quad r = 1, 2, 3, \dots, \quad (39)$$

40

干渉計システムにおいて一般的に満足される条件である循環エラー非線形性項  $\frac{1}{10}$  /  $10$  の条件に対して、 3 におけるフーリエ係数は、第1の実施形態の第2の手順に対して説明された繰返しプロセスに対応しているのと同じ繰返しプロセスによって測定された量  $[C_{4,q}(\varphi_4, \phi) - C_{4,q}(\varphi_4, \phi_0)]$  から得られる。

【 0 1 6 9 】

説明する次の手順は、2つのうちの第1の手順であり、その中では 3 ( ~ ) における循環エラーに対する補正が信号のフィルタリング・プロセスによって 4 ( ~ ) における循環エラーの効果が消去されて行われる。ただし、 4 ( ~ ) における循環エラーは求められない。第1の手順における第1のステップは 4 ( ~ ) を 4 および一組の

50

の値の関数として測定するステップであり、の異なる値の必要な数は 3 および 4 の複雑性および 3 の測定値に対して必要な相対精度に依存している。可変位相器 181 によって導入される上記一組のの値は、コンピュータ 129 からの電子信号 130 によって制御される。次のステップは 4 の表現、したがって、4 ( ~ ) の表現の中の係数として C 4 , q ( 4 ) および S 4 , 9 ( 4 )、q 1 の項を消去するように積分変換によって 4 ( ~ ) をフィルタするステップである。4 に対する定常値に対する 4 ( ~ ) の積分変換 4 ( ~ ) I は下式によって与えられる。

【 0 1 7 0 】

【数 4 0】

$$\tilde{\varphi}_4^I = \frac{\int \tilde{\varphi}_4 d\phi}{\int d\phi} \quad (40)$$

10

ここで、 についての積分の範囲はモジュロ 2 である。式 ( 3 3 ) によって与えられる 4 に対する級数表現が 4 の部分高調波である引数を有する項を含めるために拡大されている用途に対して、式 ( 4 0 ) の中の についての積分の範囲はモジュロ 2 から部分高調波の項の積分が 0 であるような範囲に修正される。式 ( 3 3 ) によって与えられる 4 に対する級数表現が、例えば、エイリアシングによって発生される 4 の非高調波および / または非部分高調波に対応する引数を有する項を含めるために拡大されている用途に対して同様な手順が使用される。式 ( 4 0 ) の中の積分変換は、例えば、測定径路の中の空気の乱れが制限とならない最終使用の用途の条件を満足するのに十分な相対精度に対する一定のレートで 4 が変化するような 4 に対する非定常値を含めるために一般化することができる。

20

【 0 1 7 1 】

式 ( 4 0 ) の中の積分フィルタは、実際には、デジタル信号プロセッサによるデジタル・フィルタとして一般的に実装される ( 例えば、J . G . P r o a k i s および D . G . M a n o l a k i s、同書参照 )。

【 0 1 7 2 】

フィルタされた 4 ( ~ )、 4 ( ~ ) I は、 3 ( ~ ) および 4 ( ~ ) における循環エラーの決定に対して説明された第 2 の手順における 4 ( ~ ) に対して得られた繰返し値に等価である。 4 ( ~ ) I の性質についての残りの説明は、繰り返された 4 ( ~ ) に対して与えられた説明の対応している部分と同じである。 3 ( ~ ) における循環エラーの決定における残りのステップは、第 2 の手順の 3 ( ~ ) における循環エラーの決定における対応しているステップと同じであり、 4 ( ~ ) I が 4 ( ~ ) の繰り返された値の代わりに使用されている。

30

【 0 1 7 3 】

3 ( ~ ) の部分における循環エラーの決定のための第 1 の手順の残りの説明は、第 2 の手順の 3 ( ~ ) および 4 ( ~ ) の中の部分における循環エラーの決定に対して与えられた説明の対応している部分と同じである。

40

【 0 1 7 4 】

本発明の第 2 の実施形態の残りの説明は、第 1 の実施形態に対して与えられた説明の対応している部分と同じである。

本発明の第 1 の実施形態に関連して本発明の第 2 の実施形態の主な利点は、干渉計システムにおける循環エラーの実質的に完全な決定にあり、本発明の第 1 の実施形態は、循環エラーのサブセットの決定を許している。しかし、本発明の第 2 の実施形態は、測定径路の中の気体によって生じた循環エラーの決定に対して第 1 の実施形態に必要なデータの量に比較して、本発明の第 2 の実施形態は決定された循環エラーに対する統計的精度の与えられたレベルを得るために大幅に多いデータを必要とする可能性がある。

【 0 1 7 5 】

50

本発明の第2の実施形態の変形例に従って、実施形態の第1のグループから装置および方法を説明する。第2の実施形態の変形例が図2cに概略の形式で示されている。この第2の実施形態の変形例と、第2の実施形態との間の違いは可変位相器181の位置にある。第2の実施形態の変形例においては、干渉計169Aは、可変位相器181が干渉計169Aの外部に置かれていることを除いて、第2の実施形態の干渉計169と同じである。

【0176】

測定および基準の出力ビームの測定された相対位相における循環エラーに関する第2の実施形態の変形例の性質は、循環エラーに関する第1の実施形態の性質に形式的に等価である。測定および基準出力のビームの測定された相対位相における循環エラーに関して、第2の実施形態の性質と第2の実施形態の変形例の性質における違いは、第2の実施形態と第2の実施形態の変形例とにおける可変位相器181のそれぞれの位置の結果であり、その位置は1つのケースにおいては干渉計の内部にあり、第2のケースにおいては干渉計の外部にある。

10

【0177】

第2の実施形態の変形例の残りの説明は、本発明の第2の実施形態に対して与えられた説明の対応している部分と同じである。

図3aは、本発明の第3の実施形態の好適な装置および方法に従って概略の形式で示されている。第3の実施形態は実施形態の第1のグループからのものである。図3aの中で示されている干渉計269は差動平面ミラー干渉計、対物ミラー292、光ビーム209、および光ビーム209のソースを含む。光ビーム209および光ビーム209のソースについての説明は、第1の実施形態の光ビーム9および光ビーム9のソースに対して与えられた説明の対応している部分と同じである。

20

【0178】

図3aについて説明すると、ビーム209は干渉計269に入る。ビーム209の第1の部分は図3aの平面において偏光された入力測定ビーム211として偏光ビーム・スプリッタ258Aによって透過される。ビーム209の第2の部分は偏光ビーム・スプリッタ258Aによって反射され、ミラー258Bによって反射されて図3aの平面に対して直交している偏光された入力ビーム212を形成する。ビーム212は図3aの平面において偏光された入力基準ビーム214として半波位相遅延プレート279Aによって透過され、半波位相遅延プレート279Aは半波位相遅延プレート279A

30

測定ビーム211は、偏光ビーム・スプリッタ271の偏光インタフェース273によって透過され、対物ミラー292によって反射されて戻され、ビーム213として偏光ビーム・スプリッタ271に対するその径路を再度たどる。測定ビームは4分の1波位相遅延プレート277を二度通過し、したがって、測定ビーム213は図3aの平面に対して直交して偏光され、4分1波位相遅延プレート277は対物ミラー292と偏光ビーム・スプリッタ271との間に置かれていて、2回の通過が測定ビームの偏光面を90度だけ回転するように適応されている。

【0179】

測定ビーム213は、偏光インタフェース273によって反射され、図3aの平面に対して直角に偏光されたビーム215として再帰反射器291によって逆方向反射される。測定ビーム215は、偏光インタフェース273によって反射され、対物ミラー292によって反射されて戻され、ビーム217として偏光ビーム・スプリッタ271までのその径路を再度たどる。測定ビームは測定ビーム217が図3aの平面において偏光されるように4分1波位相遅延プレート277を二度通過する。測定ビーム217は図3aの平面において偏光されている出口の測定ビーム233として偏光インタフェース273によって透過される。

40

【0180】

基準ビーム214は偏光インタフェース273によって透過され、基準ミラー291によって反射されて戻され、ビーム216として偏光ビーム・スプリッタ271までのその径路を再度たどる。基準ビームは、基準ビーム216が図3aの平面に直交して偏光される

50

ように4分1波位相遅延プレート277を二度通過する。

【0181】

基準ビーム216は偏光インタフェース273によって反射され、図3aの平面に対して直角に偏光されたビーム218として再帰反射器291によって逆方向反射される。基準ビーム218は偏光インタフェース273によって反射され、基準ミラー291によって反射されて戻され、ビーム220として偏光ビーム・スプリッタ271までのその径路を再度たどる。基準ビームは、基準ビーム220が図3aの平面の中で偏光されるように4分1波位相遅延プレート277を二度通過する。基準ビーム220は図3aの平面において偏光された出口の基準ビーム234として偏光インタフェース273によって透過される。

10

【0182】

出口の基準ビーム234は位相シフトされた出力ビーム241の1つの成分として偏光ビーム・スプリッタ263Aによって透過される。出口の測定ビーム233は、半波位相遅延プレート279Bによって透過され、ミラー263Bによって反射され、位相シフトされた出力ビーム241の第2の成分として偏光ビーム・スプリッタ263Aによって反射される。半波位相遅延プレート279Bは、出口の測定ビーム233の偏光面を90度だけ回転させるように適応されている。

【0183】

図3aに示されている次のステップにおいては、位相シフトされた出力ビーム241が偏光子279Cを通過し、光検出器285に当たり、結果として電氣的干渉信号、ヘテロダイン信号 $s_5$ を生じる。 $s_5$ は光電検出によることが好ましい。偏光子279Cは位相シフトされた出力ビーム241の偏光成分を混合するように適応されている。信号 $s_5$ の形式は下式で与えられる。

20

【0184】

【数41】

$$s_5 = A_5(t) \cos[\alpha_5(t)] , \quad (41)$$

ここで、時間依存の引数 $\alpha_5(t)$ は下式によって与えられる。

【0185】

30

【数42】

$$\alpha_5(t) = 2\pi f_1 t + \varphi_5 + \zeta_5 + \Lambda_5(\varphi_5, \phi) \quad (42)$$

そして $\alpha_5$ は並進トランスジューサ267Bによる再帰反射器291の並進によって測定ビームおよび基準ビームの両方の中に導入される位相ずれである。式(41)による $s_5$ の表現についての説明は、式(9)による第1の実施形態の $s_1$ および $s_2$ の対応している表現について与えられた説明と同じである。ヘテロダイン信号 $s_5$ は、電子信号223として解析のために、デジタルまたはアナログの形式のいずれかで電子プロセッサ227に伝送されるが、デジタル形式であることが好ましい。

40

【0186】

$\alpha_5$ は、第1および第2の実施形態の測定位相 $\alpha_2(\sim)$ および $\alpha_4(\sim)$ にそれぞれ対照的に $\alpha_5(\alpha_5, \phi)$ の中以外には $\alpha_5$ に対する式(42)の中に直接には現れないことに注意されたい。 $\alpha_5$ が式(42)の中に直接には現れない理由は、再帰反射器291の並進が測定ビームおよび基準ビームの両方の中に同時に位相ずれ $\alpha_5$ を導入するからである。しかし、 $\alpha_5$ は、例えば、スプリアス・ビームが対物ミラー292に対する複数のパスを生じることから発生する循環エラーを表す項を通じて $\alpha_5(\alpha_5, \phi)$ の中に現れる。スプリアス・ビームは、例えば、スプリアス反射および/または所望の特性からの4分1波位相遅延プレートのずれによって発生される。

【0187】

50

図3bを参照すると、電子プロセッサ227は電子プロセッサ2274を備える。電子プロセッサ2274は、第1実施形態の電子プロセッサ1274Aと同様の機能を実行する。位相 $\varphi_5$ ( $\sim$ )で電子プロセッサ227がヘテロダイン信号 $s_5$ を処理するステップの説明は、電子プロセッサ227が第1実施形態のヘテロダイン信号 $s_1$ を処理するステップで与えられた説明の対応する部分と同じである。測定された位相 $\varphi_5$ ( $\sim$ )は、下式により他の量で表現される。

【0188】

【数43】

$$\tilde{\varphi}_5 = \varphi_5 + \zeta_5 + \Lambda(\varphi_5, \phi) \quad (43) \quad 10$$

ここで、位相オフセット $\zeta_5$ は、測定路298または基準路の光路に関係しない、またはそれに伴わず、非線形効果に関係しない、またはそれに伴わない $\varphi_5$ ( $\sim$ )の全ての寄与(Contributions)を含み、 $\Lambda$ は非線形効果を含む。

【0189】

非線形性 $\Lambda$ は循環非線形性 $\Psi$ および非循環非線形性 $\eta$ に関して表現される。つまり、下式の通りである。

【0190】

【数44】

$$\Lambda_5 = \Psi_5 + \eta_5 \quad (44) \quad 20$$

循環非線形性 $\Psi$ は、高次の精度まで下式のように記述することができる。

【0191】

【数45】

$$\Psi_5(\varphi_5, \phi) = C_{5,0}(\varphi_5) + \sum_{q=1} C_{5,q}(\varphi_5) \cos q\phi + \sum_{q=1} S_{5,q}(\varphi_5) \sin q\phi \quad (45)$$

および

【0192】

【数46】

$$C_{5,q}(\varphi_5) = \left( \sum_{r=1} a_{5,qr} \cos r\varphi_5 + \sum_{r=1} b_{5,qr} \sin r\varphi_5 \right), \quad q = 0, 1, 2, \dots, \quad (46)$$

【0193】

【数47】

$$S_{5,q}(\varphi_5) = \left( \sum_{r=1} a'_{5,qr} \cos r\varphi_5 + \sum_{r=1} b'_{5,qr} \sin r\varphi_5 \right), \quad q = 0, 1, 2, \dots \quad (47) \quad 40$$

$C_{5,q}$  および  $S_{5,q}$  は、式(46)および式(47)で $\varphi_5$ の高調波の余弦および正弦級数の項に関して記述される。干渉計の幾つかの構成、特に多重路干渉計では、システムがソース、干渉計、および検出器を備えて、 $\varphi_5$ の低調波である循環非線形性を生成することが可能である。システムに低調波循環エラーが存在する場合は、 $\varphi_5$ の低周波、さらに低周波である引数を有する余弦および正弦級数の項を含むよう、式(46)および式(47)を補う。余弦および正弦級数の係数を決定する手順に関する以下の説明は、本発明の精神および範囲から逸脱することなく、式(45)、式(46)および式(47)によって与えられる級数表現に関するものである。

【0194】

ソース、干渉計、検出器、およびデジタル信号処理を備えるシステムが、 $i$  の低周波でも高周波でもない循環非線形性を生成することが可能である。非低周波、非高周波循環エラーは、例えばデジタル信号処理でのエイリアシングによって生成され、 $i$  の高周波および低周波のエイリアスである周波数を有する。システムに非低周波、非高周波循環エラーが存在する場合は、 $i$  の高周波および/または低周波の適切なエイリアスである引数を有する余弦および正弦級数の項を含むよう、式(46)および式(47)を補う。余弦および正弦級数の係数を決定する手順に関する以下の説明は、本発明の精神および範囲から逸脱することなく、式(45)、式(46)および式(47)によって与えられる級数表現に関するものである。

【0195】

循環エラー項  $C_{5,q}$  および  $S_{5,q}$ 、 $q=1$  は、主として、干渉計 269 およびオブジェクト・ミラー 292 による循環エラーの生成、例えば測定および/または基準脚部におけるビームの疑似内部複数反射および/または所望の特性からの 4 分の 1 波長位相遅れプレートおよび分極ビーム・スプリッタの逸脱の結果である。残りの循環項  $C_{5,0}$  は、概して独立して、または組み合わせて作動する幾つかの異なるソースからの分極および周波数の混合、例えば干渉計ソースの分極および周波数の混合、干渉計に対する干渉計ソースの位置ずれ、分極の相対的状态に基づいた基準ビームと測定ビームとの分離に使用する分極ビーム・スプリッタの所望の特性からの逸脱、および干渉計に対する、ミキサおよび分析装置を含む検出器ユニットの位置合わせ特性などから影響を受ける。

【0196】

非循環非線形性  $i$  は、第 1 の実施形態の説明で指示するように、第 3 の実施形態に関する以下の説明では削除される。

次のステップでは、 $\phi_5(\sim)$  を、 $\phi_5$  の値のセットの関数として測定し、 $\phi_5$  について必要とされる異なる値の数は、 $\phi_5$  の複雑度および  $\phi_5$  の測定値に必要とされる精度に依存する。並進変換器 267B による逆反射器 291 の並進によって導入される  $\phi_5$  の値のセットは、コンピュータ 229 からの電子信号 230 によって制御される。 $\phi_5(\sim)$  の測定値から、

【0197】

【数 48】

$$\tilde{\phi}_5(\phi_5, \phi) - \tilde{\phi}_5(\phi_5, \phi_0) \quad (48)$$

の量の測定値が獲得され、ここで  $\phi_0$  は  $\phi_5$  に使用する初期値である。

【0198】

$\phi_5(\sim)(\phi_5, \phi) - \phi_5(\sim)(\phi_5, \phi_0)$  の式は、式(45)によると、下式のように記述することができる。

【0199】

【数 49】

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_5(\phi_5, \phi) - \tilde{\phi}_5(\phi_5, \phi_0) = & \sum_{q=1} C_{5,q}(\phi_5)(\cos q\phi - \cos q\phi_0) \\ & + \sum_{q=1} S_{5,q}(\phi_5)(\sin q\phi - \sin q\phi_0) \quad (49) \end{aligned}$$

フーリエ係数  $C_{5,q}(\phi_5)$  および  $S_{5,q}(\phi_5)$ 、 $q=1$  は、次のステップで、 $\phi_5$  の値のセットに関する  $\phi_5(\sim)(\phi_5, \phi) - \phi_5(\sim)(\phi_5, \phi_0)$  のフーリエ分析によって獲得される。

【0200】

フーリエ係数  $a_{5,q,r}$ 、 $b_{5,q,r}$ 、 $a'_{5,q,r}$ 、および  $b'_{5,q,r}$ 、 $q=1$  およ

10

20

30

40

50

び  $r_{10}$  は、干渉計で通常見られる循環エラーの大きさに関する反復手順によって、 $q$  および  $r$  の関数として決定することができる。循環非線形性項  $C_{5,10}$  の条件では、フーリエ係数  $a_{5,qr}$ 、 $b_{5,qr}$ 、 $a'_{5,qr}$ 、および  $b'_{5,qr}$ 、 $q_{10}$  はフーリエ係数  $C_{5,q}(\omega)$  および  $S_{5,q}(\omega)$ 、 $q_{10}$  から獲得することができ、フーリエ係数は最後のステップで効率的な反復プロセスにより獲得される。循環非線形性項  $C_{5,10}$  は、 $\lambda = 633 \text{ nm}$  の単光路干渉計における  $5 \text{ nm}$  の測定対象位置のエラーに対応する。循環非線形項  $C_{5,10}$  の状況では、フーリエ係数  $a_{5,qr}$ 、 $b_{5,qr}$ 、 $a'_{5,qr}$ 、および  $b'_{5,qr}$ 、 $q_{10}$  は、フーリエ係数の同時超越式の級数を生成することにより、フーリエ係数  $C_{5,q}(\omega)$  および  $S_{5,q}(\omega)$ 、 $q_{10}$  から獲得することができる。フーリエ係数  $a_{5,qr}$ 、 $b_{5,qr}$ 、 $a'_{5,qr}$ 、および  $b'_{5,qr}$ 、 $q_{10}$  および  $r_{10}$  を決定する反復手順の説明は、第1の実施形態の第2手順に関して説明した反復プロセスの記述の対応する部分と同じであり、 $C_{5,10}$  の条件は、一般に干渉計システムで適合する。

10

【0201】

循環エラー  $[C_{5,0}(\omega) - C_{5,0}(\omega)]$  を第3の実施形態で決定することができる相対精度は、 $C_{5,0}(\omega) / 2$  の桁の大きさを有し、循環エラー項  $C_{5,0}(\omega)$  はラジアンで表現され、 $\theta$  が分かっているラジアンで表現される絶対精度と組み合わせられる。循環エラー項  $C_{5,0}(\omega)$  の大きさは、循環エラー  $[C_{5,0}(\omega) - C_{5,0}(\omega)]$  を決定できる相対精度を生じる。というのは、 $C_{5,0}(\omega)$  は第3の実施形態では決定されないからである。 $[C_{5,0}(\omega) - C_{5,0}(\omega)]$  を補正した後の  $C_{5,0}(\omega)$  の  $[C_{5,0}(\omega) - C_{5,0}(\omega)]$  からの残留循環エラーは、 $[C_{5,0}(\omega) - C_{5,0}(\omega)]$ 、 $C_{5,0}(\omega)$  などの第1オーダー効果と  $\theta$  が分かっている絶対精度との積を含む第2オーダー効果として入力するものと記述することができる。

20

【0202】

第3の実施形態の装置および方法により、第3の実施形態では決定されない  $C_{5,0}(\omega)$  を除く  $C_{5,0}(\omega)$  の循環エラーを測定し、その後  $[C_{5,0}(\omega) - C_{5,0}(\omega)]$  および  $C_{5,0}(\omega)$  の大きさによって決定される相対精度、および  $\theta$  が分かっている絶対精度まで補正することができる。前述したように、 $C_{5,0}(\omega)$  項は、一般に、独立して、または組み合わせて作動する幾つかの異なるソースからの分極および周波数の混合、例えば、干渉計ソースの分極および周波数の混合、干渉計に対する干渉計ソースの位置ずれ、分極の相対的状态に基づいた基準ビームと測定ビームとの分離に使用する分極ビーム・スプリッタの所望の特性からの逸脱、および干渉計に対する、ミキサおよび分析装置を含む検出器ユニットの位置合わせ特性などから影響を受ける。したがって、第3の実施形態は、主として干渉計 269 およびオブジェクト・ミラー 292 によって生成された循環エラーの結果、例えば測定および/または基準脚部におけるビームの疑似内部複数反射および/または所望の特性からの4分の1波長位相遅れプレートおよび分極ビーム・スプリッタの逸脱の結果である循環エラーを測定し、補償することができる。

30

40

【0203】

第3の実施形態に関する残りの説明は、本発明の第1の実施形態に関して与えられた説明の対応する部分と同じである。

当業者には、本発明の範囲および精神から逸脱することなく、逆反射器 291 の並進によって導入された位相シフト  $\theta$  は、追加の移相器によって導入することができ、これは第1の実施形態の移相器 81 と同じタイプの位相器であり、逆反射器 291 とビーム・スプリッタ 271 位置との間に配置され、対応する測定および基準ビーム、例えばビーム 215 および 218 を遮断することが明白である。

【0204】

位相シフト  $\theta$  が、 $\omega$  を法とした変調振幅で、ヘテロダイン信号のヘテロダイン周波数と比

50

較すると大きい周波数で変調され、検出されたヘテロダイン位相が低域フィルタによってフィルタリングされて循環エラー  $[ \frac{1}{5} ( \frac{1}{5} , ) - C_{5,0} ( \frac{1}{5} ) ]$  を効果的にフィルタリングした第3の実施形態の変形を説明する。式(45)によって与えられた  $\frac{1}{5}$  の級数表現を、 $\frac{1}{5}$  の低周波である引数を有する項を含むよう補うアプリケーションでは、 $\frac{1}{5}$  の変調振幅を、 $\frac{1}{5}$  の法から振幅に変更し、したがって低域フィルタリングによる低周波項の積分はゼロである。

【0205】

第1の好ましい実施形態の説明によると、図1aから図1fに示す干渉計の構成は、当技術分野で分極マイケルソン干渉計として知られている。第3の実施形態の説明によると、図3aおよび図3bに示す干渉計の構成は、当技術分野で微分平面鏡干渉計として知られている。マイケルソン干渉計の他の形態、および他の干渉計の形態、例えば高安定性平面鏡干渉計、または角度補償干渉計、またはC. Zanonによる「Differential interferometer arrangements for distance and angle measurements: Principles, advantages and applications」(VDI Berichte Nr. 749, 93-106 (1989))と題された論文で記載されているような同様の装置を、集積回路のリソグラフィ製造で通常遭遇するステージで作業している場合のように、本発明の精神または範囲から逸脱することなく、本発明の装置に組み込むことができ、上記の論文は参照により本明細書に組み込まれる。

【0206】

第1の実施形態の装置および方法、および第3の実施形態の装置および方法を、結合装置および方法の干渉計システムの循環エラーをほぼ完全に決定する結合装置および方法に結合できることが、当業者には明白である。第1の実施形態の説明によると、第1の実施形態の装置および方法により、主にソースおよび/または干渉計へのビーム移送で発生した循環エラー、干渉計に対するソースの位置ずれ、および基準ビームと測定ビームとの分離に使用する分極ビーム・スプリッタの所望特性からの逸脱を測定し、その後補正することができ、発生した循環エラーは、一般に、ミキサおよび分析装置を含む検出器ユニットの干渉計に対する位置合わせ特性によって変更される。第3の実施形態の説明によると、第3の実施形態の装置および方法により、主として、干渉計269およびオブジェクト・ミラー292による循環エラーの生成、例えば測定および/または基準脚部におけるビームの疑似内部複数反射および/または所望の特性からの4分の1波長位相遅れプレートおよび分極ビーム・スプリッタの逸脱の結果である循環エラーを測定し、その後補正することができる。

【0207】

第1の実施形態または第3の実施形態に対する第1および第3の実施形態の結合装置および方法の主な利点は、第2の実施形態の主な利点と同じである。つまり干渉計システムの循環エラーをほぼ完全に決定し、第1の実施形態および第3の実施形態は、ほぼ相互に排他的な循環エラーのサブセットを決定することができる。

【0208】

図4は、本発明の第4の実施形態の好ましい装置および方法により概略図で示す。第4の実施形態は、第1グループの実施形態からのものである。第4の実施形態の装置は、測定および基準ビームを方向転換させて、測定オブジェクト・ミラー334の角度方位の望ましくない変化の結果を最小に抑える動的ビーム操作アセンブリを有する干渉計310を備える。

【0209】

図4で示すように、干渉計310の分極ビーム・スプリッタ312は、レーザ源(図示せず)から入力ビーム314を受け、入力ビーム314を基準ビーム316(点線)と測定ビーム318(実線)に分離し、これは相互に対して直角に直線分極される。分極ビーム・スプリッタ312は、分極インタフェース362を含み、分極インタフェース362を通過して伝達されるビームを反射するため、図4の面および後方反射表面364に直交する



極性を有するビームを反射する。

【0210】

入力ビーム314の説明は、第1の実施形態の光線9に関して与えられた対応する説明と同じである。

分極ビーム・スプリッタ312は、測定ビーム318をビーム操作アセンブリ320に配向し、これはビーム操作鏡322および1対の圧電変換器324および326を含む。変換器は、撓みによってビーム操作鏡322と結合され、サーボ・コントローラ330からの信号328に対してビーム操作鏡を配向する。ビーム操作アセンブリは、ビーム操作鏡322の方位および/または位置の変化を測定するキャパシタンス・ゲージを含むことができる。キャパシタンス・ゲージは、圧電変換器324および326の特性の測定および/または監視にも使用することができる。

10

【0211】

ビーム操作アセンブリ320は、基準逆反射器332を通して測定ビームを配向し、基準逆反射器332は、逆反射器332の中心を通過するビームが逆反射しないよう先端が切り取られ、ほぼ直角の入射角でステージ・ミラー334、つまり測定対象に接触する。次に、ステージ・ミラー334は、測定ビームを反射して、ビーム操作アセンブリ320および分極ビーム・スプリッタ312への経路を再トレースさせる。測定ビームは、4分の1波長プレート336を二重に通過し、これはビーム操作アセンブリ320と分極ビーム・スプリッタ312の間に配置され、測定ビームの直線極性を90°回転する。

【0212】

20

分極ビーム・スプリッタ312は、基準ビーム316をビーム操作アセンブリ320に配向し、これは基準ビームを基準逆反射器332に配向する。次に、基準逆反射器は、反射ビームを反射してビーム操作アセンブリ320および分極ビーム・スプリッタ312に戻す。基準ビームは、4分の1波長プレート336も二重に通過し、これは基準ビームの直線極性を90°回転する。

【0213】

分極ビーム・スプリッタ312は、極性が回転した基準ビームと測定ビームとを再結合して、重複した射出基準および測定ビームを形成し、これは合わせて出力ビーム340を形成する。ビーム・スプリッタ342は、出力ビーム340の一部を検出器システム344に送り、これは射出基準ビームと測定ビームとの伝搬方向の差を測定する。検出器システムは、このような伝搬方向の差を示すエラー信号350をサーボ・コントローラ330に送信し、これはエラー信号に応答して、信号328をビーム操作アセンブリ320に送信する。ビーム操作アセンブリ320は、信号328に応答して、好ましくは基準逆反射器332の交点を中心としてビーム操作ミラー322の方位を変更し、基準逆反射器332の交点を中心としてビーム操作ミラー322の方位を変更して、基準ビームが経験した横方向のずれ効果を大幅に減少させる。

30

【0214】

あるいは、入力ビーム314の方向が一定である場合、検出器システム344は、検出器システムの基準位置からの射出測定ビームの位置の差を測定し、位置の差を示すエラー信号350を生成することができる。射出測定ビームの位置の差は、出力ビーム340の射出測定ビーム成分の伝搬方向の差の結果である。例えば、基準位置は、ステージ・ミラー334から逆反射する、つまり直角の入射角でステージ・ミラーに接触する測定ビームに対応する検出器システムの射出測定ビームの位置でよく、ステージ・ミラー334は名目ゼロの方位である。他の実施形態では、検出器システムは、射出基準および測定ビームの方向および位置を決定する複数の検出器を含むことができ、このような情報に基づきエラー信号を生成することができる。

40

【0215】

ステージ・ミラー334の角度方位が変化すると、測定ビームの方向、およびその結果の射出測定ビームの方向が変化する。これにより、検出器システム344はエラー信号350を生成する。サーボ・コントローラ330はエラー信号に応答し、エラー信号を最小に

50

するよう、例えば測定ビームを直角の入射角でステージ・ミラーに配向することにより、ビーム操作アセンブリ 3 2 0 を方向転換して、ビーム操作ミラー 3 2 2 の方位を変更する。その結果、射出基準および測定ビームは、相互にほぼ平行を維持し、射出測定ビームの位置は、ステージ・ミラーの角度方位の範囲にわたってほぼ一定のままである。さらに、ビーム操作アセンブリ 1 5 2 0 は、さらに、基準および測定ビームの両方を 2 回方向転換し、測定ビームが直角の入射角でステージ・ミラーに配向されるので、測定および基準ビームの経路がほぼ同じ中心軌跡を有し、第 1 桁まで、ビーム操作ミラー 3 2 2 の反射表面に垂直な方向でのビーム操作ミラー 3 2 2 が並進する場合、ステージ・ミラーおよびビーム操作アセンブリに角度方位の変化があっても、基準および測定ビームの光路長には第 1 桁までの変化がない。

10

【 0 2 1 6 】

出力ビーム 3 4 0 の残りは、ビーム・スプリッタ 3 4 2 の後、偏波器 3 4 5 を通過し、これは射出基準ビームと測定ビームの極性を混合して混合ビーム 3 4 6 を形成する。信号処理システム 3 4 8 は、好ましくは光電測光によって混合ビームの強度を測定し、電気干渉信号または電気ヘテロダイン信号  $s_7$  を生成し、電気ヘテロダイン信号  $s_7$  の移動 7 を抽出する。

【 0 2 1 7 】

信号  $s_7$  は下式の形態を有する。

【 0 2 1 8 】

【 数 5 0 】

20

$$s_7 = A_7(t) \cos[\alpha_7(t)] , \quad (50)$$

時間に依存する引数  $\alpha_7(t)$  は下式によって与えられる。

【 0 2 1 9 】

【 数 5 1 】

$$\alpha_7(t) = 2\pi f_1 t + \varphi_7 + \zeta_7 + \Lambda_7(\varphi_7, \phi) \quad (51)$$

は圧電変換器 3 2 4 および 3 2 6 によるビーム操作ミラー 3 2 2 の並進によって測定および基準ビームの両方に導入される位相ずれである。式 ( 5 0 ) による  $s_7$  の表現に関する説明は、式 ( 9 ) によって第 1 の実施形態の  $s_1$  および  $s_2$  の対応する表現に与えられた説明と同じである。

30

【 0 2 2 0 】

は、第 1 および第 2 の実施形態それぞれの測定位相  $\alpha_2(\sim)$  および  $\alpha_4(\sim)$  とは異なり、 $\alpha_7(\sim)$  によるものを除き、 $\alpha_7$  に関する式 ( 5 1 ) では直接現れないことに留意されたい。 $\alpha_7$  が式 ( 5 1 ) で直接現れない理由は、ビーム操作ミラー 3 2 2 の並進が、測定ビームと基準ビームの両方に同時に位相ずれを導入するからである。しかし、 $\alpha_7$  は、例えばステージ・ミラー 3 3 4 を多重通過する疑似ビームなどから生じる循環エラーを表す項を通して、 $\alpha_7(\sim)$  には現れ、疑似ビームは、例えば疑似反射および/または所望の特性からの 4 分の 1 波長位相遅延プレートの逸脱によって生成される。

40

【 0 2 2 1 】

図 4 を参照すると、信号プロセッサ 3 4 8 は、第 1 の実施形態の電子プロセッサ 1 2 7 4 A と同様の機能を果たす電子プロセッサを備える。位相  $\alpha_7(\sim)$  について信号プロセッサ 3 4 8 がヘテロダイン信号  $s_7$  を処理するステップについての説明は、電子プロセッサ 2 7 が第 1 の実施形態のヘテロダイン信号  $s_7$  を処理するステップについて与えられた説明の対応する部分と同じである。測定された位相  $\alpha_7(\sim)$  は、下式により他の量の項で表現される。

【 0 2 2 2 】

50

【数 5 2】

$$\tilde{\varphi}_7 = \varphi_7 + \zeta_7 + \Lambda(\varphi_7, \phi) \quad (52)$$

ここで、位相ずれ  $\zeta_7$  は、測定または基準路の光路に関連する、またはこれに伴う  $\varphi_7$  ( $\sim$ ) への全ての寄与を含み、非線形効果を含まず、 $\Lambda$  は非線形効果を含む。

【0 2 2 3】

非線形性  $\Lambda$  は、下式のように、循環非線形性  $\Psi_7$  および非循環非線形性  $S_7$  の項で表現される。

【0 2 2 4】

【数 5 3】

$$\Lambda_7 = \Psi_7 + \eta_7 \quad (53)$$

循環非線形性  $\Psi_7$  は、高次の精度まで下式のように記述することができる。

【0 2 2 5】

【数 5 4】

$$\Psi_7(\varphi_7, \phi) = C_{7,0}(\varphi_7) + \sum_{q=1} C_{7,q}(\varphi_7) \cos q\phi + \sum_{q=1} S_{7,q}(\varphi_7) \sin q\phi \quad (54)$$

および

【0 2 2 6】

【数 5 5】

$$C_{7,q}(\varphi_7) = \left( \sum_{r=1} a_{7,qr} \cos r\varphi_7 + \sum_{r=1} b_{7,qr} \sin r\varphi_7 \right), \quad q = 0, 1, 2, \dots, \quad (55)$$

【0 2 2 7】

【数 5 6】

$$S_{7,q}(\varphi_7) = \left( \sum_{r=1} a'_{7,qr} \cos r\varphi_7 + \sum_{r=1} b'_{7,qr} \sin r\varphi_7 \right), \quad q = 0, 1, 2, \dots \quad (56)$$

係数  $C_{7,q}$  および  $S_{7,q}$  は、式 (55) および式 (56) では、 $\varphi_7$  の高調波の余弦および正弦級数の項に関して記述される。干渉計の構成によっては、特に複数路干渉計では、ソース、干渉計、および検出器を備えるシステムが、 $\varphi_7$  の低周波である循環非線形性を生成することが可能である。システムに低周波循環エラーが存在する場合は、 $\varphi_7$  の低周波、さらに低周波である引数を有する余弦および正弦級数の項を含むよう、式 (55) および式 (56) を補う。余弦および正弦級数の係数を決定する手順に関する以下の説明は、本発明の精神および範囲から逸脱することなく、式 (54)、式 (55) および式 (56) によって与えられる級数表現に関するものである。

【0 2 2 8】

ソース、干渉計、検出器、およびデジタル信号処理を備えるシステムが、 $i$  の低調波でも高周波でもない循環非線形性を生成することが可能である。非低周波、非高周波循環エラーは、例えばデジタル信号処理でのエイリアシングによって生成され、 $i$  の高周波および低周波のエイリアスである周波数を有する。システムに非低周波、非高周波循環エラーが存在する場合は、 $i$  の高周波および/または低周波の適切なエイリアスである引数を有する余弦および正弦級数の項を含むよう、式 (55) および式 (56) を補う。余弦および正弦級数の係数を決定する手順に関する以下の説明は、本発明の精神および範囲から逸脱することなく、式 (54)、式 (55) および式 (56) によって与え

10

20

30

40

50

られる級数表現に関するものである。

【0229】

循環エラー項  $C_{7, q}$  および  $S_{7, q}$ 、 $q = 1$  は、主として、干渉計 310 およびオブジェクト・ミラー 334 による循環エラーの生成、例えば測定および/または基準脚部におけるビームの疑似内部複数反射および/または所望の特性からの 4 分の 1 波長位相遅れプレートおよび分極ビーム・スプリッタの逸脱の結果である。残りの循環項  $C_{7, 0}$  は、概して独立して、または組み合わせて作動する幾つかの異なるソースからの分極および周波数の混合、例えば干渉計ソースの分極および周波数の混合、干渉計に対する干渉計ソースの位置ずれ、分極の相対的状态に基づいた基準ビームと測定ビームとの分離に使用する分極ビーム・スプリッタの所望の特性からの逸脱、および干渉計に対する、ミキサおよび分析装置を含む検出器ユニットの位置合わせ特性などから影響を受ける。

10

【0230】

フーリエ係数  $a_{7, q, r}$ 、 $b_{7, q, r}$ 、 $a'_{7, q, r}$ 、および  $b'_{7, q, r}$ 、 $q = 1$  および  $r = 1$  を評価する処理に関する説明は、第 3 の実施形態について説明した反復プロセスの説明の対応する部分と同じである。[  $C_{7, 0}(\lambda_7)$  ] および  $C_{7, 0}(\lambda_7)$  の特性に関する説明は、第 3 の実施形態の [  $C_{5, 0}(\lambda_5)$  ] および  $C_{5, 0}(\lambda_5)$  それぞれの特性に関する説明について与えられた対応する部分と同じである。

【0231】

第 4 の実施形態の残りの説明は、第 3 の実施形態について与えられた説明の対応する部分と同じである。

20

第 4 の実施形態の説明によると、図 4 に示す干渉計の構成は、動的ビーム操作アセンブリを有する干渉計である。1998 年 9 月 18 日に出願され「Interferometer Having A Dynamic Beam Steering Assembly」と題した Henry A. Hill および Peter de Groot による共通所有の米国特許出願第 09/157,131 号に記載されたような動的ビーム操作アセンブリを有する他の形態を、集積回路のリソグラフィ製造で通常遭遇するステージで作業している場合のように、本発明の精神または範囲から逸脱することなく、本発明の装置に組み込むことができ、上記の米国特許出願は、参照により全体として本明細書に組み込まれる。

30

【0232】

図 5 a は、第 2 グループの実施形態から、本発明の第 5 の実施形態の好ましい装置および方法を概略形態で示す。図 5 a に示された干渉計は、複光路差動平面鏡干渉計である。第 5 の実施形態の好ましい装置および方法によると、ソース 401 および 402 の説明は、ソース 402 の波長の制御に関するもの以外、第 1 の実施形態のソース 1 について与えられた説明の対応する部分と同じである。ソース 401 および 402 は、それぞれ波長  $\lambda_9$  および  $\lambda_{10}$  のビーム 407 および 408 をそれぞれ生成する。ソース 402 からのビームの波長  $\lambda_{10}$  は、コンピュータおよび制御装置 429 からのエラー信号 444 によって制御される。

【0233】

図 5 a で示すように、ビーム 407 の第 1 部分は非分極ビーム・スプリッタ 451 A によって反射し、その一部は非分極ビーム・スプリッタ 651 B で反射してビーム 440 の第 1 成分を形成する。次のステップで、ビーム 408 の第 1 部分は、非分極ビーム・スプリッタ 451 C で反射し、ミラー 451 D で反射して、その一部は非分極ビーム・スプリッタ 651 B によって伝達され、ビーム 440 の第 2 成分を形成する。ビーム 440 は比率  $(\lambda_9 / \lambda_{10})$  を監視するよう構成された周知のタイプの波長モニタ 484 に衝突する。比率の測定値は、電子信号 420 としてコンピュータおよび制御装置 429 に伝送される。波長モニタ 484 は、例えば測定脚部に真空がある、またはない干渉計および/または - BaBO3 などの非線形要素を備え、第 2 高周波生成 SHG までにビームの周波数を 2 倍にする。

40

50

## 【0234】

コンピュータおよび制御装置429は、信号420から受信した波長比率( $\lambda_9 / \lambda_1$ )と、コンピュータおよび制御装置429によって特定された比率との差に関連するエラー信号444を生成する。エラー信号444は、例えばレーザの波長などを、圧電変換器でレーザ・キャビティの長さを制御するか、ダイオード・レーザの入射電流を制御することによりダイオード・レーザを制御することにより制御することができる。

## 【0235】

引き続き図5aでは、ビーム407の第2部分が非分極ビーム・スプリッタ451Aによって伝送され、変調器403を通過してビーム409を形成し、その説明は、ビーム7からのビーム9の生成に関して第1の実施形態で与えられた対応する部分と同じである。ビーム409の周波数ずれ成分は、周波数 $f_1$ だけ周波数はずれ、これはドライバ405の周波数である。次のステップでは、ビーム408の第2部分が非分極ビーム・スプリッタ451Cによって伝送され、変調器404を通過して光線410になる。変調器404は、変調器403および電子ドライバ405の励起と同様、電子ドライバ405によって励起される。ビーム410の周波数ずれ成分は、周波数 $f_1$ だけ周波数はずれる。

10

## 【0236】

引き続き図5aでは、ビーム409の第1部分が分極ビーム・スプリッタ453Aによって伝送され、その一部は非分極ビーム・スプリッタ453Bによって伝送されて、ビーム415の第1成分を形成する。ビーム410の第1部分は、分極ビーム・スプリッタ453Eによって伝送され、鏡453Gで反射し、その一部は非分極ビーム・スプリッタ453Bで反射して、ビーム415の第2成分を形成する。ビーム415の第1および第2成分の波長は、それぞれ $\lambda_9$ および $\lambda_{10}$ であり、成分は両方とも図5aの面で分極される。

20

## 【0237】

次のステップでは、ビーム409の第2部分が分極ビーム・スプリッタ453Aで反射し、鏡453Dで反射して、半波位相遅れプレート479Aを通過してビーム412を形成する。偏波器479Aは、偏波器479Aを通過するビームの極性を $90^\circ$ 回転するよう配向される。ビーム412は、図5aの面に分極される。ビーム412の周波数は $[(c / \lambda_9) + f_1]$ であり、ここで $c$ は真空中の光の速度である。

30

## 【0238】

ビーム410の第2部分は、分極ビーム・スプリッタ453Eで反射し、鏡453Fで反射して、半波位相遅れプレート479Bを通過し、ビーム414を形成する。偏波器479Bは、偏波器479Bを通過するビームの極性を $90^\circ$ 回転するよう配向される。ビーム414は図5aの面に分極される。ビーム414の周波数は $[(c / \lambda_{10}) + f_1]$ である。

40

## 【0239】

ビーム415は、差動平面鏡干渉計469に入射し、測定路498を二重に通過する。図5aで示すように、ビーム412および414は、差動平面鏡干渉計469に入射し、個々の基準路を二重に通過する。ビーム415、412および414は、それぞれビーム431、432および434として差動平面鏡干渉計469を出る。

40

## 【0240】

差動平面鏡干渉計469および外部の鏡491および492は、ビーム415とビーム412の $\lambda_9$ 波長成分間に位相ずれ $\phi_9$ 、およびビーム415とビーム414の $\lambda_{10}$ 波長成分間に位相ずれ $\phi_{10}$ を導入する光学的手段を備える。位相ずれ $\phi_9$ および $\phi_{10}$ の大きさは、下式による測定路498の往復物理長 $L_9$ および $L_{10}$ に関連する。

## 【0241】

## 【数57】

$$\phi_i = L_i p k_i n_i, \quad i = 9 \text{ and } 10, \quad (57)$$

ここで $p$ は基準および測定脚部それぞれを通る経路の数であり、 $n_i$ は波数 $k_i = 2\pi / \lambda_i$

50

$l_i$  に対応する測定路 498 にある気体の屈折率である。 $L_i$  の名目値は、外部鏡 491 と 492 の反射面間の物理長の差の 2 倍に相当する。外部鏡 492 の位置は、並進器 467 によって制御される。図 5 a に示す干渉計は、本発明の第 5 の好ましい実施形態による装置の機能を最も単純な方法で示すよう、 $p = 2$  用である。当業者には、 $p = 2$  の場合への一般化は明白な手順である。

【0242】

図 5 a で示すような次のステップでは、ビーム 431 の第 1 部分が非分極ビーム・スプリッター 461 A で反射し、非分極ビーム・スプリッター 461 B で反射して第 1 出力ビーム 441 の測定ビーム成分を形成する。ビーム 432 の第 1 部分は、鏡 461 C および 461 D で反射し、その一部は非分極ビーム・スプリッター 461 B で反射して第 1 出力ビーム 441 の基準ビーム成分を形成する。ビーム 431 の第 2 部分は、非分極ビーム・スプリッター 461 A によって伝送され、鏡 461 E で反射し、その一部は非分極ビーム・スプリッター 461 F で反射して第 2 出力ビーム 442 の測定ビーム成分を形成する。ビーム 434 は鏡 461 G および 461 H で反射し、その一部が非分極ビーム・スプリッター 461 E によって伝送されて、第 2 出力ビーム 442 の基準ビーム成分を形成する。出力ビーム 441 および 442 は混合ビームであり、それぞれ検出器 485 および 486 に衝突して、好ましくは光電検出により電気干渉信号を生成する。

【0243】

電気干渉信号は、ヘテロダイン信号  $s_9$ 、 $s_{10}$ 、および 2 つの他のヘテロダイン信号を備える。ヘテロダイン信号  $s_9$  および  $s_{10}$  はそれぞれ、周波数  $f_1$  に等しいヘテロダイン周波数を有する。2 つの他のヘテロダイン信号のヘテロダイン周波数は  $|f \pm f_1|$  であり、

【0244】

【数 58】

$$\Delta f = c \left( \frac{1}{\lambda_{10}} - \frac{1}{\lambda_9} \right) = \left( \frac{c}{\lambda_9} \right) \left( \frac{\lambda_9}{\lambda_{10}} - 1 \right) \quad (58)$$

ここで  $c$  は真空中の光の速度である。第 5 の実施形態の装置および方法は、下式のように操作される。

【0245】

【数 59】

$$|\Delta f| \gg f_1 \quad (59)$$

式 (59) が有効な状態で、他の 2 つのヘテロダイン信号は、追加情報のために処理できるものの、ヘテロダイン信号  $s_9$  および  $s_{10}$  から容易に分離され、電子的フィルタリングによって検出器 485 および 486 および / または電子プロセッサ 427 内で消去される。

【0246】

検出器 485 および 486 内で生成されるヘテロダイン信号  $s_9$  および  $s_{10}$  はそれぞれ、下式の形態を有する。

【0247】

【数 60】

$$s_i = A_i(t) \cos[\alpha_i(t)] \quad , \quad i = 9 \text{ and } 10 \quad (60)$$

時間に依存する引数  $\alpha_i(t)$  は下式によって与えられる。

【0248】

【数 61】

10

20

30

40

50

$$\alpha_9(t) = 2\pi f_1 t + \varphi_9 + \zeta_9 + \Lambda_9, \quad (61)$$

$$\alpha_{10}(t) = 2\pi f_1 t + \varphi_{10} + \zeta_{10} + \Lambda_{10},$$

ここで、位相ずれ  $\varphi_9$  および  $\varphi_{10}$  は、測定路 4 9 8 または基準路の光路に関係しない、またはそれを伴わず、非線形エラーに関係しない、またはそれを伴わない  $\varphi_9$  および  $\varphi_{10}$  の全ての寄与を含み、 $\zeta_9$  および  $\zeta_{10}$  は循環エラー効果を含む非線形効果を備える。式 (60) による  $s_9$  および  $s_{10}$  の表現についての説明は、式 (9) による第 1 の実施形態の  $s_1$  および  $s_2$  の対応する表現について与えられた説明と同じである。ヘテロダイン信号  $s_9$  および  $s_{10}$  は、それぞれ電子信号 4 2 3 および 4 2 4 を分析するためにデジタルまたはアナログ・フォーマット、好ましくはデジタル・フォーマットで、電子プロセッサ 4 2 7 に送信される。

【0249】

次に図 5 b を参照すると、電子プロセッサ 4 2 7 は電子プロセッサ 4 2 7 4 A、4 2 7 4 B および 4 2 7 7 を備え、これは第 1 の実施形態の電子プロセッサ 1 2 7 4 A、1 2 7 4 B および 1 2 7 7 と同様の機能を果たす。位相  $\varphi$  については後に式 (63) で定義する] について電子プロセッサ 4 2 7 によるヘテロダイン信号  $s_9$  および  $s_{10}$  の処理のステップに関する説明は、対応する位相について電子プロセッサ 2 7 による第 1 の実施形態によるヘテロダイン信号  $s_1$  および  $s_2$  の処理のステップについて与えられた説明の対応する部分と同じである。電子プロセッサ 4 2 7 4 A および 4 2 7 4 B は、測定された位相  $\varphi_9$  ( ~ ) および  $\varphi_{10}$  ( ~ ) を、信号 4 2 1 によって伝送されるドライバ 4 0 5 の位相を使用し、下式で決定する。

【0250】

【数62】

$$\tilde{\varphi}_9 = \varphi_9 + \zeta_9 + \Lambda_9(\varphi_9), \quad (62)$$

$$\tilde{\varphi}_{10} = \varphi_{10} + \zeta_{10} + \Lambda_{10}(\varphi_{10}),$$

電子プロセッサ 4 2 7 7 は、 $\varphi_{10}$  ( ~ ) から  $\varphi_9$  ( ~ ) を引いて  $\Phi$  を形成する。つまり、下式の通りである。

【0251】

【数63】

$$\Phi = (\tilde{\varphi}_{10} - \tilde{\varphi}_9). \quad (63)$$

位相  $\Phi$  は、下式のように他の量に関して表現することができる。

【0252】

【数64】

$$\begin{aligned} \Phi = & pk_9(n_{10}L_{10} - n_9L_9) + pn_{10}L_{10}(2\pi\Delta f/c) \\ & + (\zeta_{10} - \zeta_9) + [\psi_{10}(\varphi_{10}) - \psi_9(\varphi_9)], \end{aligned} \quad (64)$$

ここで非線形性項  $\psi_9$  および  $\psi_{10}$  は、第 1 の実施形態に関して与えられた説明のように、削除されている。測定路の気体の屈折率に対する乱れの効果は、 $\psi_9$ 、さらに並進器 4 6 7 により並進ミラー 4 9 2 によって生成されるドップラー 偏移の効果も取り消す。測定路の気体の屈折率に対する乱れの効果が  $\psi_9$  を取り消すのは、ヘテロダイン信号  $s_9$  および  $s_{10}$  を生成するために使用するビームであるビーム 4 4 1 および 4 4 2 の測定ビーム成分それぞれが、ほぼ測定路 4 9 8 と同一の広がりを持つビーム 4 1 5 の様々な周波数成分から得られるからである。また、 $L_9$  および  $L_{10}$  は、高レベルの精度まで等しくすることができる。

10

20

30

40

50

【 0 2 5 3 】

循環非線形性  $\psi_9$  および  $\psi_{10}$  は、高次の精度まで下式のように記述することができる。

【 0 2 5 4 】

【 数 6 5 】

$$\psi_9 = \sum_{r=1} a_{9,r} \cos r\varphi_9 + \sum_{r=1} b_{9,r} \sin r\varphi_9 \quad (65)$$

$$\psi_{10} = \sum_{r=1} a_{10,r} \cos r\varphi_{10} + \sum_{r=1} b_{10,r} \sin r\varphi_{10} \quad 10$$

循環非線形性  $\psi_9$  および  $\psi_{10}$  は、式 (65) で、それぞれ  $\psi_9$  および  $\psi_{10}$  の高調波の余弦および正弦級数の項に関して記述される。干渉計の構成によっては、特に複数路干渉計では、ソース、干渉計、および検出器を備えるシステムが、 $\psi_9$  および/または  $\psi_{10}$  の低周波である循環非線形性を生成することが可能である。システムに低周波循環エラーが存在する場合は、 $\psi_9$  および/または  $\psi_{10}$  の低周波である引数を有する余弦および正弦級数の項を含むよう、式 (65) を補う。余弦および正弦級数の係数を決定する手順に関する以下の説明は、本発明の精神および範囲から逸脱することなく、式 (65) によって与えられる級数表現に関するものである。

【 0 2 5 5 】

20

ソース、干渉計、検出器、およびデジタル信号処理を備えるシステムが、 $\psi_i$  の低調波でも高調波でもない循環非線形性を生成することが可能である。非低周波、非高周波循環エラーは、例えばデジタル信号処理でのエイリアシングによって生成され、 $\psi_i$  の高周波および低周波のエイリアスである周波数を有する。システムに非低周波、非高周波循環エラーが存在する場合は、 $\psi_i$  の高周波および/または低周波の適切なエイリアスである引数を有する余弦および正弦級数の項を含むよう、式 (65) を補う。余弦および正弦級数の係数を決定する手順に関する以下の説明は、本発明の精神および範囲から逸脱することなく、式 (65) によって与えられる級数表現に関するものである。

【 0 2 5 6 】

式 (65) からの循環非線形性  $\psi_{10}$  の式は、下式の形態で記述することができる。 30

【 0 2 5 7 】

【 数 6 6 】

$$\psi_{10} = \sum_{r=1} a_{10,r} \cos r \left[ \varphi_9 + p n_{10} (2\pi \Delta f / c) L_{10} \right] + \sum_{r=1} b_{10,r} \sin r \left[ \varphi_9 + p n_{10} (2\pi \Delta f / c) L_{10} \right] \quad (66)$$

良好な近似に留意すると、下式のようになる。

【 0 2 5 8 】

40

【 数 6 7 】

$$\varphi_{10} = \varphi_9 + p n_{10} (2\pi \Delta f / c) L_{10} \quad (67)$$

$p k 9$  ( $L 10 n 10 - L 9 n 9$ ) の項は式 (67) では削除され、この項は  $f = 500 \text{ MHz}$ 、 $L 10 = 1 \text{ m}$ 、および室温および大気圧の空気で構成された気体の場合は  $10^{-4}$  のオーダーである。式 (66) の項は、三角法恒等式を使用して展開し、下式により再構成することができる。

【 0 2 5 9 】

【 数 6 8 】

50



$$\begin{aligned} \Psi_{10} = & \sum_{r=1} \cos r \varphi_9 \left\{ \begin{array}{l} a_{10,r} \cos r [pn_{10}(2\pi\Delta f/c)L_{10}] \\ + b_{10,r} \sin r [pn_{10}(2\pi\Delta f/c)L_{10}] \end{array} \right\} \\ & + \sum_{r=1} \sin r \varphi_9 \left\{ \begin{array}{l} -a_{10,r} \sin r [pn_{10}(2\pi\Delta f/c)L_{10}] \\ + b_{10,r} \cos r [pn_{10}(2\pi\Delta f/c)L_{10}] \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (68)$$

次のステップでは、 $\Psi_{10}$  は関数  $\Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f)$  として、 $\Delta f$  [式(58)で定義]の値のセットのために測定され、 $\Psi_{10}$  の様々な値の必要数は、 $\varphi_{10}$  の複雑さおよび  $\Delta f$  の測定値に必要な精度に依存する。 $\Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f) - \Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f_0)$  の測定値から、

【0260】

【数69】

$$\Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f) - \Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f_0) \quad (69)$$

の量の測定値が生成され、ここで  $\Delta f_0$  は  $\Delta f$  の初期値である。

【0261】

式(69)の循環エラー  $\Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f) - \Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f_0)$  の差は、式(68)を使用し、他の量に関して下式のように記述される。

【0262】

【数70】

$$\begin{aligned} & \Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f) - \Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f_0) \\ = & \sum_{r=1} \cos r \varphi_9 \left\{ \begin{array}{l} a_{10,r} \{ \cos r [n_{10}(2\pi\Delta f/c)L_{10}] - \cos r [n_{10}(2\pi\Delta f_0/c)L_{10}] \} \\ b_{10,r} \{ \sin r [n_{10}(2\pi\Delta f/c)L_{10}] - \sin r [n_{10}(2\pi\Delta f_0/c)L_{10}] \} \end{array} \right\} \\ & + \sum_{r=1} \sin r \varphi_9 \left\{ \begin{array}{l} -a_{10,r} \{ \sin r [n_{10}(2\pi\Delta f/c)L_{10}] - \sin r [n_{10}(2\pi\Delta f_0/c)L_{10}] \} \\ b_{10,r} \{ \cos r [n_{10}(2\pi\Delta f/c)L_{10}] - \cos r [n_{10}(2\pi\Delta f_0/c)L_{10}] \} \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (70)$$

フーリエ係数  $a_{9,r}$ 、 $b_{9,r}$ 、 $a_{10,r}$  および  $b_{10,r}$  は、反復手順のシーケンスを含む手順によって決定することができる。

【0263】

手順の第1ステップは、 $\Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f) - \Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f_0)$  の解析から  $a_{10,r}$  および  $b_{10,r}$ 、 $r=1$  の第1解を獲得することである。解析は、 $\Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f) - \Psi_{10}(\varphi_{10}, \Delta f_0)$  のフーリエ解析を含み、ここで、 $\varphi_9(\sim)$  を積分の変数として使用し、 $\Delta f$  の関数として式(70)の  $\cos r \varphi_9$  および  $\sin r \varphi_9$  の係数の値を生成する。式(70)の  $\cos r \varphi_9$  および  $\sin r \varphi_9$  の係数値は、 $a_{10,r}$  および  $b_{10,r}$ 、 $r=1$  の連立方程式のセットを生成し、連立方程式のセットは、 $a_{10,r}$  および  $b_{10,r}$ 、 $r=1$  の第1解について解かれる。 $a_{10,r}$  および  $b_{10,r}$ 、 $r=1$  の第1解を決定する上の絶対精度は、ラジアンで表現される循環エラー項  $|a_{9,r}|/2$  とラジアンで表現される循環エラー項  $|b_{10,r}|$  の積の大きさの桁を有する。循環エラー項  $|a_{9,r}|$  および  $|b_{10,r}|$  の結合効果は、 $\Delta f_0$  を決定する上の絶対精度の第2オーダー効果として入る。

【0264】

手順の第2ステップは、 $a_{9,r}$  および  $b_{9,r}$ 、 $r=1$  の第1反復解を生成するこ

とである。第2ステップは、 $a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  の第1解に基づき  $[-pn_{10}L_{10}(2f/c)]$  のフーリエ解析から  $_{10}$  を引くことであり、ここで  $_{10}(\sim)$  は、 $a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  の第1解に基づいて  $_{10}$  に関して補正され、反復フーリエ解析の積分変数として使用される。反復フーリエ解析の説明は、第1の実施形態の反復手順に関する説明の対応する部分と同じである。

【0265】

$a_9, r$  および  $b_9, r$  の第1解の反復解を決定する上での絶対精度は、ラジアンで表現される循環エラー項  $|_9|$  とラジアンで表現される循環エラー項  $|_{10}|$  を  $a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  の第1解によって決定する上での絶対精度との積の大きさの桁を有する。循環エラー項  $|_9|$  および  $|_{10}|$  の結合効果は、 $_9$  を決定する上での絶対精度の第2オーダー効果として、ラジアンで表現される  $|_9|$  の第2桁およびラジアンで表現される  $|_{10}|$  の第1桁を入力する。

10

【0266】

手順の第3ステップは、 $_{10}(_{10}, f) - _{10}(_{10}, f_0)$  の解析から  $a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  の第2解を獲得することである。第3ステップは、第1ステップのフーリエ解析で使用した積分の変数を第3ステップでは、 $_9$  の第1反復解に基づき  $_9$  に関して補正した  $_9(\sim)$  と置換すること以外は、第1ステップと同じである。 $a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  の第2解を決定する上での絶対精度は、ラジアンで表現される循環エラー項  $|_{10}|$  と、 $a_9, r$  および  $b_9, r, r_1$  の第1反復解によって、ラジアンで表現される循環エラー項  $|_9|$  を決定する上での絶対精度との積の大きさの桁を有する。循環エラー項  $|_9|$  および  $|_{10}|$  の結合効果は、 $_9$  を決定する上での絶対精度の第4オーダー効果として、ラジアンで表現される  $|_9|$  の第2桁およびラジアンで表現される  $|_{10}|$  の第2桁を入力する。

20

【0267】

手順の第4ステップは、 $a_9, r$  および  $b_9, r, r_1$  の第2反復解を獲得することである。第4ステップは、 $a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  の第2解に基づき  $[-pn_{10}L_{10}(2f/c)]$  のフーリエ解析から  $_{10}$  を引くことであり、ここで  $_{10}(\sim)$  は、 $a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  の第2解に基づいて  $_{10}$  に関して補正され、反復フーリエ解析の積分変数として使用される。第4ステップは、それぞれのフーリエ解析に使用する積分の変数を除き、第2ステップと同じである。 $a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  の第2反復解を決定する上での絶対精度は、ラジアンで表現される循環エラー項  $|_9|$  と、 $a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  の第2反復解によって、ラジアンで表現される循環エラー項  $|_{10}|$  を決定する上での絶対精度との積の大きさの桁数を有する。循環エラー項  $|_9|$  および  $|_{10}|$  の結合効果は、 $_9$  を決定する上での絶対精度の第4オーダー効果として、ラジアンで表現される  $|_9|$  の第3桁およびラジアンで表現される  $|_{10}|$  の第2桁を入力する。

30

【0268】

記載されたような反復手順のシーケンスにおける反復プロセスは、フーリエ係数  $a_9, r, b_9, r, a_{10}, r$  および  $b_{10}, r, r_1$  が最終用途に必要な精度まで決定されるまで続ける。反復プロセスの反復手順は、数サイクルで  $|_9| 1/3$  および  $|_{10}| 1/3$  の所望の精度まで収束しなければならない。

40

【0269】

本発明の第5の実施形態に関する残りの説明は、第1および第2の実施形態について与えられた説明の対応する部分と同じである。

2本のビームがあり、一方は非分極ビーム・スプリッタ461Bから、一方は非分極ビーム・スプリッタ461Fからのものであり、これは例えば統計エラーを改良するため、または第1の実施形態の方法で、第2の実施形態にも使用することができる。

【0270】

第2の実施形態で開示されたような本発明の範囲および精神から逸脱することなく、音響光学変調器403以外の手段を使用して、 $f_0$  および  $f_0 + f_1$  によってシフトし

50

たビーム成分周波数のセットを生成できることが、当業者には明白である。例えば、ダイオード・レーザなどの第2レーザ源を、周波数ずれビーム成分の源として使用することができる。ダイオード・レーザの場合、周波数ずれ  $f_0$  の変化は、ダイオード・レーザの入射電流および/または温度を変化させることによって実行できる。

【0271】

第1、第2、第3および第5の実施形態の特定の特徴は、本発明の範囲および精神から逸脱することなく、循環エラーの効果を決定する装置とともに使用できることが、当業者には明白である。

【0272】

図6aおよび図6bは、本発明の第6の実施形態を概略形態で示す。第6の実施形態は、第3グループの実施形態からのものである。第1グループの実施形態は、距離測定干渉計の測定路における気体の効果を測定し、補正するのに使用するような、光分散に関連する信号の循環エラーを測定し、補正する装置および方法の両方を備える。しかし、第3グループの実施形態では、距離測定干渉計の測定路の光路長の変化を決定するために使用する位相に対応する測定位相は、循環エラーについては補正されない。測定路にある気体の効果の補正（光分散関連の信号から生じる補正）における循環エラーの効果は、測定位相の循環エラーの効果より、1.5桁以上大きい。

【0273】

第6の実施形態は、測定路における気体の分散および/または気体による測定路の光路長の変化を測定し、監視する装置および方法を備える。気体の屈折率および/または測定路の物理長が変化することがある。また、使用した光源によって生成される光線の波長の比率は、特定の相対精度で、桁が小さい非ゼロ整数で構成された既知の比率値と一致する。

【0274】

第6の実施形態は、部分的に、第5の実施形態の装置および方法の延長と見なすこともでき、第5の実施形態に使用した波長の比率は1桁であり、第6の実施形態で使用した波長の比率は2桁である。

【0275】

図6aを参照すると、第6の実施形態の好ましい装置および方法によると、光線509および光線510の光源に関する説明は、第1の実施形態の光線9および光線9の光源について与えられた説明の対応する部分と同じである。光源501の波長は  $\lambda_{11}$  である。次のステップでは、光源502から放出された光線508が変調器504を通過し、光線510になる。変調器504は、電子ドライバ505による変調器503の励起と同様、電子ドライバ506によって励起される。光源502は、光源501と同様、レーザまたは同様の偏極コヒーレント光の光源であるが、異なる波長  $\lambda_{12}$  であることが好ましい。

【0276】

波長の比率 ( $\lambda_{11} / \lambda_{12}$ ) は、既知の近似比率値  $l_{11} / l_{12}$  を有する。つまり下式の通りである。

【0277】

【数71】

$$(\lambda_{11}/\lambda_{12}) \cong (l_{11}/l_{12}) \quad , \quad (71)$$

ここで、 $l_{11}$  および  $l_{12}$  は、低い桁のゼロでない整数値を含む。ビーム509および510のx偏光成分は、それぞれビーム509および510のy偏光成分に対してそれぞれ  $f_1$  および  $f_2$  の量だけずれた振動周波数を有する。振動周波数  $f_2$  は、電子ドライバ506によって決定される。また、ビーム509および510のx成分の周波数ずれ方向は同じである。

【0278】

ビーム507および508は、代替的に、1つのレーザ光源を光周波数倍増手段と組み合わせて周波数を倍増させることにより、2つ以上の波長を宝珠する1つのレーザ光源、レ

10

20

30

40

50

ーザ・キャビティ内部に非線形エレメントを有するレーザ光源、例えば和周波発生または差周波発生と組み合わせた波長の異なる2つのレーザ光源、または2つ以上の波長の光線を生成することができる任意の同等の光源構成で提供できることが、当業者には理解される。周波数 $f_1$  および $f_2$  の一方または両方は、ゼーマン分裂、レーザ・キャビティ内部の複屈折エレメント、またはレーザ光源自体の同様の現象特性の結果であることも、当業者には理解される。大きく分離された2つの波長を有する1つのレーザによるビームの生成、および各ビームで、1対の直交偏光成分は、各対の一方の成分が、対応する対の第2成分に対して周波数がずれていることが、1998年3月にP. Zorabedianに対して発行された「Dual Harmonic - Wavelength Split - Frequency Laser」と題した米国特許第5,732,095号に記載されている。

10

【0279】

ビーム509および/またはビーム510のx偏光成分とy偏光成分は両方とも、本発明の範囲および精神から逸脱することなく、周波数をずらすことができ、 $f_1$  はこの場合もビーム509のxおよびy偏光成分の周波数の差であり、 $f_2$  はビーム510のxおよびy偏光成分の周波数の差であることが、当業者にはさらに理解される。干渉計とレーザ光源との隔離の改善は、概ね、ビームのxおよびy偏光成分の周波数ずれによって可能であり、隔離の改善程度は、周波数ずれの生成に使用する手段に依存する。

【0280】

次のステップでは、ビーム598が鏡553Aで反射し、その一部が二色性非分極ビーム・スプリッタ553Bで反射してビーム513の成分、つまり $1_1$ 成分になる。ビーム510の一部は、二色性非分極ビーム・スプリッタ553Bによって伝達され、ビーム513の第2成分、つまり $1_2$ 成分になり、ここで $1_2$ 成分は $1_1$ 成分と平行で、同一の広がりを有することが好ましい。さらなるステップでは、ビーム513が、ビーム513の $1_1$ 成分のx偏光成分とy偏光成分の間に位相ずれ $1_1$ 、およびビーム513の $1_2$ 成分のx偏光成分とy偏光成分の間に位相ずれ $1_2$ を導入する光学的手段で構成された干渉計569へと伝搬する。位相ずれ $1_1$ および $1_2$ の大きさは、下式により、測定路598の往復物理長Lに関連する。

20

【0281】

【数72】

30

$$\varphi_i = Lpk_i n_i, \quad i = 11 \text{ and } 12, \quad (72)$$

ここでpは多重通過干渉計のそれぞれの基準および測定脚部を通過する数であり、 $n_i$ は、波数 $k_i = (2\pi/\lambda_i)$ に対応する測定路598における気体の屈折率である。

【0282】

図6aで示すように、干渉計569は基準逆反射器591、並進器567によって制御された位置を有する対象逆反射器592、4分の1波長位相遅れプレート577および578、および分極ビーム・スプリッタ573で構成される。この構成は、当技術分野では分極マイケルソン干渉計として知られ、 $p = 1$ を有する単純な例示として示される。

40

【0283】

式(72)は、1つの波長を有するビームの経路、および第2波長を有するビームの経路がほぼ同一の広がりを有するケースに有効であり、これは第6の実施形態の本発明の機能を最も単純な方法で例示するために選択されたケースである。当業者には、2つの異なる波長を有するビームの個々の経路が実質的に同一の広がりを有さないケースへの一般化は、単純な手順である。

【0284】

干渉計569を通過した後、測定路を通過するビーム513の部分は、位相シフトビーム533になり、逆反射体591を含む参照路を通過するビーム513の部分は、位相シフ

50

トビーム534になる。位相シフトビーム533と534は、それぞれ図6aの平面と直交して、おおよその平面で偏光する。在来の二色性ビームスプリッター561は、波長 $\lambda_{11}$ と $\lambda_{12}$ に該当するビーム533の部分をそれぞれビーム535と537に分離し、波長 $\lambda_{11}$ と $\lambda_{12}$ に該当するビーム534のその部分をそれぞれビーム536と538に分離する。ビーム535と536は、検出器システム589へ入り、ビーム537と538は、検出器システム590に入る。

【0285】

図6aに示すように、検出器システム589において、ビーム535は、まず、ミラー563Aで反射した後、偏光ビームスプリッター563Bで反射してビーム541の一分成分を形成する。ビーム536は、偏光ビームスプリッター563Bを透過してビーム541の第二成分になる。検出器システム590において、ビーム537は、まず、ミラー564Aで反射し、次いで偏光ビームスプリッター564Bで反射してビーム542の一分成分を形成する。ビーム538は、偏光ビームスプリッター564Bを透過してビーム542の第二成分になる。ビーム541と542は、それぞれ偏光子579と580を通過し、光検出器、それぞれ585と586に衝突し、好ましくは光電子検出により二つの電気干渉信号を生成する。二つの電気干渉信号は、二つのヘテロダイン信号、それぞれ $s_{11}$ と $s_{12}$ を含む。偏光子579と580は、それぞれビーム541と542のxとy偏光成分を混合するように向けるのが好ましい。ヘテロダイン信号 $s_{11}$ と $s_{12}$ は、それぞれ波長 $\lambda_{11}$ と $\lambda_{12}$ に該当する。

【0286】

信号 $s_i$  ( $i = 11$ と $12$ )は、以下の式をもつ。

【0287】

【数73】

$$s_i = A_i(t) \cos[\alpha_i(t)] \quad , \quad i = 11 \text{ and } 12 \quad . \quad (73)$$

時間従属性独立変数 $\alpha_i(t)$ は、以下により与えられる。

【0288】

【数74】

$$\alpha_{11}(t) = 2\pi f_1 t + \phi_{11} + \zeta_{11} + \Lambda_{11} \quad , \quad (74)$$

$$\alpha_{12}(t) = 2\pi f_2 t + \phi_{12} + \zeta_{12} + \Lambda_{12} \quad ,$$

ここで、位相オフセット $\phi_i$ は、測定路798または参照路と関連または付随しなく、非線形エラーと関連または付随しない独立変数 $\phi_i$ に対して全ての寄与率を含み、 $\zeta_i$ は、サイクリックエラー項などの非線形エラーを含む。方程式(73)による $s_{11}$ と $s_{12}$ の表示に関する説明は、方程式(9)による実施例1の $s_1$ と $s_2$ の表示に記載された説明の該部分と同じである。ヘテロダイン信号 $s_{11}$ と $s_{12}$ は、それぞれ電子信号523と524として解析のため、電子プロセッサ527にデジタルまたはアナログ形式のいずれかで、好ましくはデジタル形式で伝送される。

【0289】

次に、図6bを参照して説明すると、電子プロセッサ527は、

【0290】

【数75】

$$\tilde{\phi}_i = \phi_i + \zeta_i + \Lambda_i \quad , \quad i = 11 \text{ and } 12 \quad , \quad (75)$$

デジタルまたはアナログ信号処理のいずれかにより、好ましくはデジタル式処理により、デジタル式Hilbert変換位相検出器(R.E.Best, 同上)などの時間軸位相検出を用いて、それぞれ測定位相 $\phi_{11}(\sim)$ と $\phi_{12}(\sim)$ を測定する電子プロセッサ5274Aと5274Bおよび電子ドライバーそれぞれ505と506の位相を含む。

## 【 0 2 9 1 】

電子ドライバー 5 0 5 と 5 0 6 の位相は、電気信号、参照信号それぞれ 5 2 1 と 5 2 2 により、デジタルまたはアナログ形式のいずれかで、好ましくはデジタル形式で電子プロセッサ 5 2 7 に伝送される。また、参照信号、参照信号に代わる信号 5 2 1 と 5 2 2 は、光ピックアップ手段および検出器（図には示されず）により、ビームスプリッター、好ましくは非偏光ビームスプリッターでビーム 5 0 9 と 5 1 0 の部分を分離し、分離されたビーム 5 0 9 と 5 1 0 のそれぞれの部分を混合し、次に、混合部分を検出して択一的ヘテロダイン参照信号を生成することにより生成してもよい。

## 【 0 2 9 2 】

再び図 6 b を参照して説明すると、位相  $\phi_{11}(\sim)$  と位相  $\phi_{12}(\sim)$  は、次に、電子プロセッサ 5 2 7 5 A と 5 2 7 5 B で、好ましくはデジタル式処理により、それぞれ  $l_{11}/p$  と  $l_{12}/p$  と掛けて、それぞれ位相  $(l_{11}/p)\phi_{11}(\sim)$  と  $(l_{12}/p)\phi_{12}(\sim)$  を生成する。位相  $(l_{11}/p)\phi_{11}(\sim)$  と  $(l_{12}/p)\phi_{12}(\sim)$  を、次に、電子プロセッサ 5 2 7 6 で共に加え、次いで、電子プロセッサ 5 2 7 7 で、好ましくは、デジタル式処理により一方を他方から引き算し、それぞれ位相  $\Theta$  と  $\Phi$  を作成する。式的には、以下の式で示される。

## 【 0 2 9 3 】

## 【 数 7 6 】

$$\Theta = \left( \frac{l_{12}}{p} \tilde{\phi}_{12} + \frac{l_{11}}{p} \tilde{\phi}_{11} \right) , \quad (76) \quad 20$$

## 【 0 2 9 4 】

## 【 数 7 7 】

$$\Phi = \left( \frac{l_{12}}{p} \tilde{\phi}_{12} - \frac{l_{11}}{p} \tilde{\phi}_{11} \right) . \quad (77)$$

方程式 ( 7 5 ) で与えられた定義を用いて、位相  $\Theta$  と  $\Phi$  は、以下の式で書くこともできる。

## 【 0 2 9 5 】

## 【 数 7 8 】

$$\Theta = \left\{ L \left[ \chi(n_{12} + n_{11}) + K(n_{12} - n_{11}) \right] + \left( \frac{1}{p} \right) (l_{12}\zeta_{12} + l_{11}\zeta_{11}) + \left( \frac{1}{p} \right) [l_{12}\Lambda_{12}(\phi_{12}) + l_{11}\Lambda_{11}(\phi_{11})] \right\} , \quad (78)$$

## 【 0 2 9 6 】

## 【 数 7 9 】

$$\Phi = \left\{ L \left[ \chi(n_{12} - n_{11}) + K(n_{12} + n_{11}) \right] + \left( \frac{1}{p} \right) (l_{12}\zeta_{12} - l_{11}\zeta_{11}) + \left( \frac{1}{p} \right) [l_{12}\Lambda_{12}(\phi_{12}) - l_{11}\Lambda_{11}(\phi_{11})] \right\} , \quad (79)$$

ここで

## 【 0 2 9 7 】

10

20

30

40

50

【数 8 0】

$$\chi = (l_{12}k_{12} + l_{11}k_{11})/2 \quad , \quad (80)$$

【 0 2 9 8】

【数 8 1】

$$K = (l_{12}k_{12} - l_{11}k_{11})/2 \quad . \quad (81)$$

位相  $\phi_{11}$  ( ~ )、  $\chi$  と  $K$  は、デジタルまたはアナログ形式のいずれかで、好ましくはデジタル形式で信号 5 2 5 としてコンピューター 5 2 9 に伝送される。 10

【 0 2 9 9】

非サイクリック、非線形性  $\psi$  は、次の実施例 6 の説明で省略される。その省略の基準は、実施例 1 の説明の後半部分の該当する非サイクリック非線形性の省略で記された基準と同じである。

【 0 3 0 0】

ガスの分散 ( $n_{12} - n_{11}$ ) は、式を用いて  $\chi$  と  $K$  から測定することができる。

【 0 3 0 1】

【数 8 2】

$$(n_{12} - n_{11}) = \frac{1}{\chi L [1 - (K/\chi)^2]} \{ [\Phi - \vartheta(K/\chi)] + Q_\psi + Q \} \quad , \quad (82) \quad 20$$

ここで

【 0 3 0 2】

【数 8 3】

$$Q_\psi = \xi_\psi(K/\chi) - Z_\psi \quad , \quad (83)$$

【 0 3 0 3】

【数 8 4】

$$\xi_\psi = \left( \frac{l_{12}}{p} \psi_{12} + \frac{l_{11}}{p} \psi_{11} \right) \quad , \quad (84) \quad 30$$

【 0 3 0 4】

【数 8 5】

$$Z_\psi = \left( \frac{l_{12}}{p} \psi_{12} - \frac{l_{11}}{p} \psi_{11} \right) \quad , \quad (85) \quad 40$$

【 0 3 0 5】

【数 8 6】

$$Q = \xi(K/\chi) - Z \quad , \quad (86)$$

【 0 3 0 6】

【数 8 7】

$$\xi = \left( \frac{l_{12}}{p} \zeta_{12} + \frac{l_{11}}{p} \zeta_{11} \right) , \quad (87)$$

【 0 3 0 7 】

【 数 8 8 】

$$Z = \left( \frac{l_{12}}{p} \zeta_{12} - \frac{l_{11}}{p} \zeta_{11} \right) . \quad (88)$$

10

距離測定干渉計使用法に関連するそれらの適用には、ヘテロダイン位相  $\psi_{11}$  ( ~ ) および位相  $\psi$  を用い、以下の式を用いて距離測定干渉計の測定路内におけるガスの屈折率の作用に従属しない量として距離  $L$  を測定してもよい。

【 0 3 0 8 】

【 数 8 9 】

$$L = \frac{1}{(\chi - K)} \left\{ \begin{array}{l} \frac{l_{11}}{p} (\tilde{\varphi}_{11} - \zeta_{11} - \psi_{11}) \\ - \frac{\Gamma}{[1 + (K/\chi)]} [\Phi - (K/\chi)\vartheta + Q_\psi + Q] \end{array} \right\} \quad (89)$$

20

ここで、 $\Gamma$  ( ガスの相互分散力 ) は、以下のように定義される。

【 0 3 0 9 】

【 数 9 0 】

$$\Gamma = \frac{(n_{11} - 1)}{(n_{12} - n_{11})} . \quad (90)$$

(  $K / X$  ) = 0 が、厳密に調波的に関連する波長  $\lambda_{11}$  と  $\lambda_{12}$  に相当するのは、方程式 ( 8 1 ) により与えられた  $K$  の定義から明らかである。  $| K / X | > 0$  および (  $K / X$  ) の値が、最終用途の必要条件を満たす方程式 ( 8 2 ) および / または ( 8 9 ) の使用において、特定の精度まで、明らかでなければならぬ適用については、(  $K / X$  ) は、波長モニター ( 図に示されず ) で測定される。その波長モニターは、真空または真空でないセルおよび / または S H G による光ビームの周波数倍化を装備した干渉計を含むことができる。  $X$  の値が方程式 ( 8 2 ) および / または ( 8 9 ) の使用において、別の特定の精度まで明らかでなければならぬ適用については、 $X$  は、波長モニターにより測定される。さらに、 $X$  および (  $K / X$  ) の値が、両方必要な場合、両方とも同じ装置から得ることができる。

30

【 0 3 1 0 】

相互分散力  $\Gamma$  値は、測定路におけるガスの既知構成成分の既知屈折性から特定の相対精度まで得ることができる。ガス組成が必要な精度まで明らかでなく、および / またはガス構成成分の屈折性が該当する必要な精度まで明らかでない適用では、 $\Gamma$  は、1997年10月2日差出しの表題が「ガスの固有光学特性を測定する装置と方法」の同者所有の係属中の米国出願第08/942,848号、1998年10月21日差出しの表題が「ガスの固有光学特性を測定する干渉計による方法と装置」の米国出願および1998年2月23日差出しの表題が「ガスの固有光学特性を測定する装置と方法」の米国暫定出願第60/075,595号 ( 三つの出願はすべて、Henry A. Hill によるもので、前述の出願は、本明細書において参照により全体を盛り込んである。 ) に記載のような装置により測定することができる。

40

50



## 【 0 3 1 1 】

分散 ( $n_{12} - n_{11}$ ) を測定できる相対精度は、サイクリックエラーの作用により部分的に制限される。方程式 ( 8 2 ) に従って、その作用の大きさは、以下の程度である。

## 【 0 3 1 2 】

## 【 数 9 1 】

$$\left[ \left( \frac{l_i}{p} \right) |\psi_i| \right] / L \chi (n_{12} - n_{11}) \quad , \quad i = 11 \text{ and } 12 \quad . \quad (91)$$

例えば、 $\lambda_{11} = 0.633 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_{11} = 2 \lambda_{12}$ 、 $p = 1$ 、 $L = 0.5 \text{ m}$ 、ガスが 25、  
圧力が 1 気圧の空気からなる適用を考察する。その条件例では、方程式 ( 9 1 ) で表示されるように、その相対精度までの  $\lambda_{11}$  の寄与率の大きさは、以下の通りである。

## 【 0 3 1 3 】

## 【 数 9 2 】

$$\approx 0.019 |\psi_{11}| \quad , \quad (92)$$

$\lambda_{11}$  はラジアンで表され、 $|\psi_{11}|$  は、 $\lambda_{11}$  の絶対値を示す。本例について続けると、  
 $|\psi_{11}| = 0.1$  ラジアン の比サイクリックエラー ( 5 nm の距離測定でのサイクリックエラーに対する本例で該当する位相のサイクリックエラー ) については、その比サイク  
エラーは、分散 ( $n_{12} - n_{11}$ ) を測定できる相対精度を 0.2 % まで制限する。 $\lambda_{11}$   
ビームの光源が  $\lambda_{11} = 1.06 \mu\text{m}$  の Nb Y A G レーザーなら、分散 ( $n_{12} - n_{11}$ ) を測定できる相対精度に関する該当制限値は、0.6 % である。

## 【 0 3 1 4 】

分散 ( $n_{12} - n_{11}$ ) を測定できる相対精度に及ぼすサイクリックエラーの制限は、分散干渉計使用法を用いる距離測定干渉計の測定路内のガスの屈折性作用の補正に及ぼすサイクリックエラーの作用の制限に直接伝達することができる。方程式 ( 8 9 ) を調べると、Q から入る  $i$  のサイクリックエラー寄与率の大きさは、 $\lambda_{11}(\sim)$  から入るサイクリック誤差寄与率  $|\psi_{11}|$  の大きさに比例して  $|\psi_i|$  であることが明らかである。 $\lambda_{11} = 2 \lambda_{12}$  で  $\lambda_{11} = 0.633 \mu\text{m}$  および同様に  $\lambda_{11} = 2 \lambda_{12}$  で  $\lambda_{11} = 1.06 \mu\text{m}$  の二つの場合については、 $\lambda_{11}$  の値は、それぞれ 24 と 75 である。このように、測定路内のガスの屈折性について、方程式 ( 8 9 ) の補正項に対するサイクリックエラー寄与率の作用は、補正項から生じるサイクリックエラー寄与率の作用が  $\lambda_{11}(\sim)$  から直接生じるサイクリックエラー寄与率の作用程度以下であれば、1.5 程度以上減らなければならない。

## 【 0 3 1 5 】

方程式 ( 8 5 ) で与えられたサイクリックエラー項 Z は、以下のように表示することができる。

## 【 0 3 1 6 】

## 【 数 9 3 】

$$\left( \frac{1}{p} \right) [l_{12} C_{12}(\varphi_{12}) - l_{11} C_{11}(\varphi_{11})] \quad (93)$$

ここで

## 【 0 3 1 7 】

## 【 数 9 4 】

$$\psi_{11}(\varphi_{11}) = C_{11}(\varphi_{11}) \quad , \quad (94)$$

$$\psi_{12}(\varphi_{12}) = C_{12}(\varphi_{12}) \quad ,$$

10

20

30

40

50

および

【 0 3 1 8 】

【 数 9 5 】

$$C_i(\varphi_i) = \left( \sum_{r=1} a_{ir} \cos r\varphi_i + \sum_{r=1} b_{ir} \sin r\varphi_i \right), \quad i=11 \text{ and } 12 \quad (95)$$

$C_i$  は、方程式 (95) では  $\varphi_i$  の調波である級数項の独立変数をもつコサインとサイン級数項で記される。干渉計、特に、多重パス干渉計の構成によっては、光源、干渉計および検出器を含むシステムは、 $\varphi_i$  の低調波であるサイクリック非線形性の生成が可能である。低調波サイクリックエラーがシステムに存在するならば、方程式 (95) は、低調波  $\varphi_i$  の独立変数をもつコサインとサイン級数項を含むように補われる。コサインおよびサイン級数の係数を測定する手順に関する次の説明は、本発明の精神および範囲から逸脱することがなければ、方程式 (94) と (95) により与えられた級数表示の項になる。

【 0 3 1 9 】

光源、干渉計、検出器およびデジタル信号処理を含むシステムは、 $\varphi_i$  の低調波でも調波でもないサイクリック非線形性の生成が可能である。非低調波、非調波サイクリックエラーは、例えば、デジタル信号処理でエイリアシングにより生成され、 $\varphi_i$  の調波と低調波のエイリアスである周波数をもつ。非低調波、非調波サイクリックエラーがシステムに存在するならば、方程式 (95) は、 $\varphi_i$  の調波および / または低調波の適当なエイリアスである独立変数をもつコサインとサイン級数項を含むように補われる。コサインとサイン級数の係数を測定する手順に関する次の説明は、本発明の精神および範囲を逸脱しなければ、方程式 (94) および (95) により与えられた級数表示項になる。

【 0 3 2 0 】

次の段階において、 $\varphi_{11}$  は、 $\varphi_{11}(\sim)$  と  $\varphi_{12}(\sim)$  の特定範囲の値にかけて  $\varphi_{11}(\sim)$  と  $\varphi_{12}(\sim)$  の関数として測定される。 $\varphi_{11}$  の測定値は、方程式 (79) に従って、以下のよう記すことができる。

【 0 3 2 1 】

【 数 9 6 】

$$\Phi = L\chi(n_{12} - n_{11}) + LK(n_{12} + n_{11}) + Z_\psi + Z \quad (96)$$

$\varphi_{11}$  から  $\varphi_{12}$  程度の  $L$  の変化では、条件  $K/X = [(n_{12} - n_{11}) / (n_{12} + n_{11})]$  に対して、 $Z$  項は、典型的には、 $\varphi_{11}$  を数桁変化させる点で主要項であり、他の項、 $K$ 、 $X$  および  $Z$  は一定で、 $2.5 \times 10^{-5}$  および圧力が 1 気圧の空気、 $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$  と  $n_{11} = 1.5$  では  $[(n_{12} - n_{11}) / (n_{12} + n_{11})] = 1 / (2 \times 10^5)$  であることが方程式 (96) からわかる。結論として、 $\varphi_{11}$  の測定値は、 $Z$  を測定する効果的な手順で直接使用することができる。

【 0 3 2 2 】

実施例 6 の波長比  $\lambda_{11} / \lambda_{12}$  は、方程式 (71) によるように、特定の相対精度で、ゼロでない低桁数の整数の比、 $l_{11} / l_{12}$  として表示することができる。従って、 $\lambda_{11} / \lambda_{12}$  の比は、同じ特定の相対精度で以下のように表示することができる。

【 0 3 2 3 】

【 数 9 7 】

$$\frac{\varphi_{11}}{\varphi_{12}} = \frac{l_{12}}{l_{11}} \quad (97)$$

$Z$  の二つのパラメータ表示 (二つのパラメータは方程式 (85)、(94) と (95) に従って  $\varphi_{11}$  と  $\varphi_{12}$ ) は、方程式 (97) を用いることにより一つのパラメータ表示に減らして、 $Z$  の二つのパラメータ表示の  $\varphi_{11}$  か  $\varphi_{12}$  のいずれかを除去することができる。 $\varphi_{11}$  の除去を除去パラメータとして選び、 $Z$  の測定項で実質的に同じ最終結

10

20

30

40

50

果を得ることができたであろうが、次の実施例 6 は、 $l_{12}$  の除去項において説明することになる。 $Z$  に対して得られる一つのパラメータ表示は、以下のようなになる。

【 0 3 2 4 】

【 数 9 8 】

$$Z_{\psi} = \left( \frac{l_{12}}{p} \right) \left[ \sum_{r=1} a_{12,r} \cos r \left( \frac{l_{11}}{l_{12}} \right) \varphi_{11} + \sum_{r=1} b_{12,r} \sin r \left( \frac{l_{11}}{l_{12}} \right) \varphi_{11} \right] - \left( \frac{l_{11}}{p} \right) \left[ \sum_{r=1} a_{11,r} \cos r \varphi_{11} + \sum_{r=1} b_{11,r} \sin r \varphi_{11} \right] \quad (98)$$

10

比 ( $l_{11} / l_{12}$ ) がゼロでない低桁数の整数の比からなる場合、 $Z$  の一つのパラメータ表示の項は、 $\varphi_{11}$  の調波である独立変数をもつコサインとサイン級数として (その比 ( $l_{11} / l_{12}$ ) は、例えば、2、3、 $\dots$  などの整数)、または  $\varphi_{11}$  の低調波を含む独立変数をもつコサインとサイン級数として書き直すことができる (その比 ( $l_{11} / l_{12}$ ) は、例えば、3/2、4/3 などの非整数)。書き直されたときの  $Z$  の一つのパラメータ表示は、 $Z$  の縮約表示として参照符が付けられることになる。

【 0 3 2 5 】

$Z$  の縮約表示のフーリエ係数を評価する手順は、実施例 5 の  $a_{10,r}$  と  $b_{10,r}$ 、 $r=1$  の第一解を得るのに用いられる手順の第一段階に記載したようなフーリエ解析の積分の変数として  $\varphi_{11}(\sim)$  を用いる。実施例 6 によりサイクリックエラー項  $Z$  を測定できる相対精度は、 $\varphi_{11}(\sim)$  のラジアンで表示した、1/2 サイクリックエラー程度の大きさか、あるいは、もっと大きければ、波長比 ( $l_{11} / l_{12}$ ) が  $l_{11} / l_{12}$  の比で表される特定の相対精度の作用をもつことになる。従って、後補正のサイクリックエラーの残差寄与率は、二次作用として、 $\varphi_{11}$  のサイクリックエラーの一次作用およびフーリエ分析における積分の変数として使用される  $\varphi_{11}(\sim)$  および  $\varphi_{12}(\sim)$  に依存する  $\varphi_{11}(\sim)$  または  $\varphi_{12}(\sim)$  のいずれかの一次作用か波長 ( $l_{11} / l_{12}$ ) の比率が  $l_{11} / l_{12}$  の比率として表示される特定の相対精度のいずれかに入ることになる。

20

【 0 3 2 6 】

実施例 6 に関する残りの説明は、本発明の実施例 1 と 5 に記載された説明の該当部分と同じである。

30

本発明の実施例 6 の変形 1 を説明する。この実施例の変形 1 は、第三群の実施例に由来する。実施例 6 の変形 1 に関する説明は、サイクリックエラーの処理に関する以外は、実施例 6 の説明と同じである。実施例 6 の変形 1 において、方程式 (96) により与えられた位相  $\varphi_{11}$  は、インターバル  $2\pi l_{12}$  にわたる  $\varphi_{11}(\sim)$  に関する積分変換かその倍数、またはインターバル  $2\pi l_{11}$  にわたる  $\varphi_{12}(\sim)$  に関する積分変換か、その倍数のいずれかにより過される。積分変換に関する説明は、本発明の実施例 1 の第一手順に用いる積分変換に記載された説明と類似している。

【 0 3 2 7 】

積分変換アルゴリズムの設計は、 $Z$  の縮約表示の特性に基づく。サイクリックエラーの作用の低下または除去での積分変換の有効性は、 $\varphi_{11}(\sim)$  と  $\varphi_{12}(\sim)$  のサイクリックエラーの大きさに依存することになる。積分変換による後ろ過に対するサイクリックエラーの残余寄与率は、二次作用として、 $\varphi_{11}$  のサイクリックエラーの一次作用および積分変換の実行に用いる  $\varphi_{11}(\sim)$  と  $\varphi_{12}(\sim)$  に依存する  $\varphi_{11}(\sim)$  か  $\varphi_{12}(\sim)$  のサイクリックエラーの一次作用か、または波長 ( $l_{11} / l_{12}$ ) の比が  $l_{11} / l_{12}$  の比として表示される特定相対精度の作用に入ることになる。最適な積分変換については、残余二次作用は、その一方が積分変換に使用される  $\varphi_{11}(\sim)$  か  $\varphi_{12}(\sim)$  のラジアンで表示されるサイクリックエラーの大きさの 1/2 か、または波長比 ( $l_{11} / l_{12}$ ) が  $l_{11} / l_{12}$  の比として表示される特定の相対精度の作用のいずれかを掛けた  $Z$  の大きさ程度になる。

40

50

## 【0328】

実施例6の変形1は、最初は、フィルターの積分変換手順で用いられる位相スペース  $2\pi l_{12}$ 、 $2\pi l_{11}$ か、その倍数に該当する多少の移動が存在する場合およびミラー592が、フィルターの積分変換手順で用いられる位相スペース  $2\pi l_{12}$ 、 $2\pi l_{11}$ か、その倍数に該当する距離にかけて移動するとき、サイクリックエラーがその期間間で有意に変化しない場合以外に、有効になるため、ミラー592のどんな移動も制限もしない。実施例6の変形1によるサイクリックエラーの過剰除去は、固定期間にかけて積分が行われる、過剰方法に基づく先行技術で遭遇した問題点を効果的に排除する。

## 【0329】

本発明の実施例6の他の変形群を説明する。この実施例6の他の変形群は、本発明の実施例6の装置と方法および実施例1、2、3と5の少なくとも一つの装置と方法を含む。実施例6の他の変形群は、第4群の実施例に由来し、第4群実施例の実施例は、距離測定干渉計の測定路の光路長変化を測定するのに用いる測定位相および距離測定干渉計の測定路内のガスの作用に対して光路長変化を補正するのに用いる付随の光学分散関連信号の両方でサイクリックエラーを測定し、補正する装置と方法を含む。

10

## 【0330】

実施例6の他の変形群由来の実施例6の変形2は、本発明の実施例6の装置と方法および実施例1の装置と方法を含む。実施例6の変形2については、実施例6の  $l_{11}(\sim)$ と  $l_{12}(\sim)$ に該当する位相に存在し、光源および/または干渉計へのビーム輸送、干渉計に関する光源の調整不良および参照および測定ビームを分離するのに用いられる偏光ビームスプリッターの所望の特性からの離脱で発生するサイクリックエラー(そのようにして発生したサイクリックエラーは、一般的に、干渉計に関して、ミキサーおよび分析装置を含む検出器ユニットの調節特性により修正される)を高水準の精度まで補正、すなわち、サイクリックエラーを組み合わせた二次作用に補正および/または  $l_{11}(\sim)$ が公知の絶対精度まで補正することができる。実施例6の変形2の  $l_{11}(\sim)$ は、実施例6の  $l_{11}(\sim)$ に該当)に該当するサイクリックエラーの寄与率は、従って、実施例6の該当  $l_{11}(\sim)$ に対してよりも高い精度レベルまで補正される。つまり、サイクリックエラーを組み合わせた三次作用まで補正および/または  $l_{11}(\sim)$ が公知の絶対精度まで補正される。

20

## 【0331】

実施例6の変形2に関する残りの説明は、実施例1と6に記載された説明の該当部分と同じである。

30

実施例6の変形2の利点は、実施例6の  $l_{11}(\sim)$ および  $l_{12}(\sim)$ に該当する実施例6の変形2の位相のサイクリックエラーが、主として、光源および/または干渉計へのビーム輸送、干渉計に関して光源の調整不良および参照と測定ビームを分離するのに用いる偏光ビームスプリッターの所望特性からの離脱で発生する場合に得られる。

## 【0332】

実施例6の他の変形群由来の実施例6の変形3は、本発明の実施例6の装置と方法および実施例3の装置と方法を含む。実施例6の変形3については、実施例6の  $l_{11}(\sim)$ と  $l_{12}(\sim)$ に該当する位相に存在し、例えば、測定および/または参照レグ内のビームのスプリアス内部多重屈折および/または位相遅延板と偏光ビームスプリッターの所望の特性からの離脱など、干渉計および対物ミラーによって発生するサイクリックエラーは、高レベルの精度まで補正することができる。つまり、サイクリックエラーの積の二次作用および/または  $l_{11}(\sim)$ が公知の絶対精度まで補正することができる。実施例6の変形3の  $l_{11}(\sim)$ は、実施例6の  $l_{11}(\sim)$ に該当)に該当するサイクリックエラーの寄与率は、従って、実施例6におけるよりも高い精度レベルまで補正される。つまり、サイクリックエラーの積の三次作用および/または  $l_{11}(\sim)$ が公知の絶対精度まで補正される。

40

## 【0333】

実施例6の変形3に関する残りの説明は、実施例3と6に記載された説明の該当部分と同じである。

実施例6の変形3の利点は、実施例6の  $l_{11}(\sim)$ と  $l_{12}(\sim)$ に該当する実施例6の変

50

形 3 の位相のサイクリックエラーが、主として、測定および / または参照レッグ内のビームのスプリアス内部多重屈折および / または位相遅延板と偏光ビームスプリッターの所望の特性からの離脱など、干渉計および対物ミラーによって発生する場合に得られる。

【 0 3 3 4 】

実施例 6 の他の変形群由来の実施例 6 の変形 4 は、本発明の実施例 6 の装置と方法および実施例 2 の装置と方法を含む。実施例 6 の変形 4 については、実施例 6 の  $_{11}(\sim)$  と  $_{12}(\sim)$  に該当する実施例 6 の変形 4 の位相に存在する実質的に全てのサイクリックエラーは、高レベルの精度まで補正することができる。その精度は、一般的に、サイクリックエラーの積の少なくとも二次作用および / または  $_{11}$  が公知の絶対精度である。実施例 6 の変形 4 の  $_{12}$  (  $_{11}$  は、実施例 6 の  $_{11}$  に該当 ) に該当するサイクリックエラーの寄与率は、従って、実施例 6 で該当の  $_{12}$  に対してよりも高い精度レベルまで補正される。その精度は、一般的に、サイクリックエラーの積の少なくとも三次作用および / または  $_{12}$  が公知の絶対精度である。

10

【 0 3 3 5 】

実施例 6 の変形 4 に関する残りの説明は、実施例 2 と 6 で記載された説明の該当部分と同じである。

実施例 6 の変形 2 と 3 に関して実施例 6 の変形 4 の主要な利点は、実施例 6 の  $_{11}(\sim)$  と  $_{12}(\sim)$  に該当するサイクリックエラーの実質的に完全な測定にある。サイクリックエラーは、存在する光源および検出器を含む干渉計システムから発生し、実施例 6 の変形 2 と 3 は、サイクリックエラーの部分集合の測定を可能にする。

20

【 0 3 3 6 】

実施例 6 の他の変形群由来の実施例 6 の変形 5 は、本発明の実施例 6 の装置と方法および実施例 5 の装置と方法を含む。実施例 6 の変形 5 において、実施例 5 の装置と方法は、特定のビームおよび / またはビーム成分だけに有効である。それらのビームおよび / またはビーム成分は、二つの異なる波長  $_{11}$  または  $_{12}$  の一つをもつ。

【 0 3 3 7 】

考察するため、波長  $_{11}$  のビームおよび / またはビーム成分を特定のビームおよび / またはビーム成分にする。実施例 6 の変形 5 の第一段階において、特に、実施例 6 の  $_{11}(\sim)$  に該当する位相の特定のビームおよび / またはビーム成分に存在するサイクリックエラーは、実施例 5 の手順を適用することにより測定する。実施例 6 の変形 5 の第二段階において、他の特定ビームおよび / またはビーム成分に存在するサイクリックエラー ( それらのビームおよび / またはビーム成分の波長は  $_{12}$  ) は、サイクリックエラー作用に対して補正されるフーリエ解析  $_{11}(\sim)$  の積分の変数に用いる実施例 6 の  $_{12}(\sim)$  に該当する位相のフーリエ解析で測定する。次に、サイクリックエラー作用について補正された  $_{11}(\sim)$  か  $_{12}(\sim)$  のいずれかを用いて、実施例 6 の変形 5 の  $_{11}$  (  $_{12}$  は、実施例 6 の  $_{11}$  に該当 ) のサイクリックエラー作用を測定する。

30

【 0 3 3 8 】

実施例 6 の変形 5 については、実施例 6 の  $_{11}(\sim)$  と  $_{12}(\sim)$  に該当する位相に存在する実質的に全てのサイクリックエラーは、高レベルの精度まで補正することができる。補正レベルは、実施例 5 で得られたレベルの精度と同じである。従って、実施例 6 の変形 5 の  $_{12}$  に該当するサイクリックエラーの寄与率は、実施例 6 における該当の  $_{11}$  に対するよりも高い精度レベルまで補正される。

40

【 0 3 3 9 】

実施例 6 の変形 5 に関する残りの説明は、実施例 5 と 6 に記載された説明の該当部分と同じである。

実施例 6 の変形 2 と 3 に関して実施例 6 の変形 5 の主要な利点は、実施例 6 の変形 2 と 3 に関して実施例 6 の変形 4 で記載された利点と実質的に同じである。

【 0 3 4 0 】

図 7 は、第四群の実施例由来の本発明の好適実施例 7 を図式で示す。第四群の実施例の実施例は、距離測定干渉計の測定路の光路長変化の測定に用いられる測定位相および距離測

50

定干渉計の測定路内のガス作用について光路長変化を補正するのに用いる付随の光分散関連信号の両方においてサイクリックエラーを測定および補正する装置と方法を含む。

【0341】

実施例7の距離測定干渉計使用法は、測定路内のガスの分散および/またはガスによる測定路の光路長変化を測定およびモニターする装置と方法を含む。この場合、ガスの屈折率および/または測定路の物理的長さは、おそらく変化していて、採用光源により生成された光ビームの波長比は、ゼロ以外の低桁数の整数および/または非整数の比からなる公知の比率値に合致される。

【0342】

実施例7の多くの構成要素は、実施例6の構成要素のような機能を実行する。実施例6の構成要素のような機能を実行する実施例7の構成要素番号は、実施例6の構成要素の番号に100加えた番号と等しい。光源601と602に関する説明は、光源602の波長の制御に関する以外は、実施例6の光源501と502に記載された説明の該当部分と同じである。光源601と602は、それぞれ波長が $\lambda_{13}$ と $\lambda_{14}$ のビーム、それぞれ607と608を生成する。光源602由来のビームの波長 $\lambda_{14}$ は、コンピューターと制御器629由来の制御偏差信号644により制御される。

【0343】

図7に示されるように、ビーム607の第一部分は、非偏光ビームスプリッター651Aで反射し、その一部分は、二色性ビームスプリッター651Bで反射してビーム640の第一成分を形成する。次の段階において、ビーム608の第一部分は、非偏光ビームスプリッター651Cで反射し、ミラー651Dで反射し、次に、その一部分が、二色性ビームスプリッター651Bを透過してビーム640の第二成分を形成する。ビーム640は、比 $(\lambda_{13}/\lambda_{14})$ をモニターするように形成された周知型の波長モニター684に衝突する。比 $(\lambda_{13}/\lambda_{14})$ の測定値は、電子信号620としてコンピューターと制御器629に伝送される。波長モニター684は、例えば、測定レグ内が真空または真空でない干渉計および/または、第二調波生成、SHGによりビームの周波数を倍化するためのBaBO<sub>3</sub>のような非線形構成要素を含むこともできる。

【0344】

コンピューターと制御器629は、波長比 $(\lambda_{13}/\lambda_{14})$ の測定値(信号620から受信したときの比)およびコンピューターと制御器629により明示された比間の差に関連する制御偏差信号644を生成する。光源602の波長は、制御偏差信号644により制御される。制御偏差信号644は、例えば、圧電性変換器を装備したレーザー腔の長さを制御することにより、レーザーの波長を制御するか、またはダイオードレーザーの注入電流を制御することによりダイオードレーザーの波長を制御することができる。

【0345】

図7を続けると、ビーム607の第二部分は、非偏光ビームスプリッター651Aを透過し、ビーム507から得られるビーム513の $\lambda_{11}$ 成分に関して実施例6に記載された該当部分と説明が同じ段階により、ビーム613の $\lambda_{13}$ 成分を形成する。ビーム608の第二部分は、非偏光ビームスプリッター651Cを透過し、ビーム508から得られるビーム513の $\lambda_{12}$ 成分に関して実施例6に記載された該当部分と説明が同じ段階によりビーム613の $\lambda_{14}$ 成分を形成する。

【0346】

干渉計669を通過するビーム613の伝達および信号、それぞれ623と624として伝送される電気干渉信号、それぞれヘテロサイン信号 $s_{13}$ と $s_{14}$ の生成に関する説明は、干渉計569を通るビーム513の伝達および信号、それぞれ523と524として伝送される電気干渉信号、それぞれ $s_{11}$ と $s_{12}$ の生成に関して実施例6に記載された説明の該当部分と同じである。

【0347】

ヘテロサイン信号 $s_{13}$ と $s_{14}$ およびそれぞれの位相 $\phi_{13}(\sim)$ と $\phi_{14}(\sim)$ の特性に関する説明は、実施例6のヘテロサイン信号 $s_{11}$ と $s_{12}$ およびそれぞれの位相 $\phi_{11}(\sim)$ と

10

20

30

40

50

$\phi_{12}$  ( ~ ) の特性で記載された説明の該当部分と同じである。さらに、実施例 7 について、方程式 ( 7 1 ) ~ ( 9 0 ) に該当する方程式は、下付き文字 1 1 を全て下付き文字 1 3 と交換することにより、下付き文字 1 2 を下付き文字 1 4 と交換することにより、方程式 ( 7 1 ) ~ ( 9 0 ) から得られる。

【 0 3 4 8 】

手順は、 $\phi_{13}$  ( ~ )、 $\phi_{14}$  ( ~ ) および  $\phi_{14}$  のサイクリックエラーの測定について記載する。本発明の精神および範囲から逸脱しなければ、記載の手順を変更して用いることができるのは、当業者にとって明らかであろう。

【 0 3 4 9 】

手順の第一段階において、 $\phi_{14}$  を  $\phi_{14}$  ( ~ ) の所定の範囲について、および  $\phi_{13} / \phi_{14}$  の一組の値について、関数  $\phi_{13}$  ( ~ ) と  $\phi_{14}$  ( ~ ) として測定する。異なる値の  $\phi_{13} / \phi_{14}$  の必要数は、 $\phi_{13}$  と  $\phi_{14}$  の複雑さおよび  $\phi_{13}$  と  $\phi_{14}$  の測定値に必要な精度に依存する。 $\phi_{13} / \phi_{14}$  の値の変化は、制御偏差信号 6 4 4 を通して  $\phi_{14}$  を変化させることにより、コンピュータと制御器 6 2 9 により行われる。 $\phi_{14}$  の測定値から、以下の量の測定値が得られる。

【 0 3 5 0 】

【 数 9 9 】

$$\psi_{14}[\phi_{14} + n_{14}(2\pi\Delta v_{14}/c)L] - \psi_{14}(\phi_{14}) \quad (99)$$

ここで、 $\phi_{14}$  は、以下のように定義される。

【 0 3 5 1 】

【 数 1 0 0 】

$$\Delta v_{14} \equiv c \left( \frac{1}{\lambda_{14}} - \frac{1}{\lambda_{14,0}} \right) \quad (100)$$

および  $\phi_{14,0}$  は、 $\phi_{14}$  の初期値である。

【 0 3 5 2 】

方程式 ( 9 9 ) により与えられた  $\{\psi_{14}[\phi_{14} + n_{14}(2\pi\Delta v_{14}/c)L] - \psi_{14}(\phi_{14})\}$  の数式は、以下のように書くことができる。

【 0 3 5 3 】

【 数 1 0 1 】

$$\begin{aligned} & \{\psi_{14}[\phi_{14} + n_{14}(2\pi\Delta v_{14}/c)L] - \psi_{14}(\phi_{14})\} \\ &= \sum_{r=1} a_{14,r} \{\cos r[\phi_{14} + n_{14}(2\pi\Delta v_{14}/c)L] - \cos r(\phi_{14})\} \\ &+ \sum_{r=1} b_{14,r} \{\sin r[\phi_{14} + n_{14}(2\pi\Delta v_{14}/c)L] - \sin r(\phi_{14})\} \end{aligned} \quad (101)$$

フーリエ係数  $a_{14,r}$  と  $b_{14,r}$  は、実施例 1 に記載の同じ種類の反復手順により測定することができる。その解析結果は、 $\phi_{14}$  ( ~ ) の所定範囲についての  $\phi_{14}$  の測定である。

【 0 3 5 4 】

次の段階において、フーリエ係数  $a_{13,r}$  と  $b_{13,r}$  は、積分の変数として  $(n_{13} / n_{14}) (\phi_{14} ( ~ ) - \phi_{14})$  を用いて、 $\phi_{14}$  ( ~ ) の所定の範囲に該当する  $\phi_{13}$  ( ~ ) の所定の範囲についてのフーリエ解析により測定される。この段階の結果は、フーリエ解析で用いられる  $\phi_{13}$  ( ~ ) の範囲についての  $\phi_{13}$  の測定である。

【 0 3 5 5 】

次の段階において、最初の二つの段階で得られた  $\phi_{13}$  と  $\phi_{14}$  を用いて、 $\phi_{14}$  ( ~ ) の所定の範囲について  $Q$  を計算する。 $\phi_{13}$ 、 $\phi_{14}$  および  $Q$  の測定に関して、分散  $(n_{14} - n$

10

20

30

40

50

13) および測定路内のガスの作用について補正される路長変化を計算することができ、これらは、 $l_{14}$  ( ~ ) の所定の範囲にかけてサイクリックエラーについて補正される。

【 0 3 5 6 】

本手順は、最終用途の適用に必要な場合、 $l_{14}$  ( ~ ) の他の範囲値について繰り返す。実施例 7 の  $l_{13}$  と  $l_{14}$  の値が実施例 6 と比較してゼロ以外の整数と非整数値の両方を含むことに注目する ( $l_{11}$  と  $l_{12}$  は、ゼロ以外の整数値を含む)。

【 0 3 5 7 】

実施例 7 に関する残りの説明は、実施例 5 と 6 に記載された説明の該当部分と同じである。

実施例 7 の利点は、距離測定干渉計の測定路内のガスの屈折性作用についての補償が行われているのと同じ時間にサイクリックエラーの作用をオンラインで測定およびモニターする能力である。

【 0 3 5 8 】

実施例 7 のさらに別の利点は、採用波長が調波的に関連するか、非調波的に関連してもよいことである。

実施例 7 のさらに別の利点は、サイクリックエラーの測定値が測定路内に存在するガスの乱れ作用に対して感度が低いことである。すなわち、サイクリックエラーが測定される統計学的精度は、測定路内のガスの乱れ作用に僅かしか依存しない。

【 0 3 5 9 】

実施例 7 のさらに別の利点は、サイクリックエラー作用の補正に関して、実施例 7 の有効性を実質的に変えることなく、測定路の物理的長さを変更すると、サイクリックエラーが変化できることである。サイクリックエラー作用の補正について実施例 7 の有効性を実質的に変えない測定路長に関するサイクリックエラーの対数導関数の値は、サイクリックエラーの補正で要求される精度にある程度依存することになる。

【 0 3 6 0 】

図 8 a と 8 b は、第四群の実施例由来の本発明の好適実施例 8 を図式で示す。第四群の実施例の実施例は、距離測定干渉計の測定路の光路長の変化を測定するのに用いる測定位相および距離測定干渉計の測定路内のガス作用について光路長の変化を補正するのに用いる付随の光学分散関連信号の両方におけるサイクリックエラー作用を測定および補正する装置と方法を含む。

【 0 3 6 1 】

実施例 8 の距離測定干渉計使用法は、測定路内のガスの分散および / またはガスによる測定路の光路長の変化を測定およびモニターする装置と方法を含む ( ガスの屈折率および測定路の物理的長さはおそらく変化していて、採用光源によって生成された光ビームの波長比は、ゼロ以外の低桁数の整数と非整数からなる公知の比率値の特定相対精度に合致される ) 。

【 0 3 6 2 】

実施例 8 の多くの構成要素は、実施例 7 の構成要素のような機能を実行し、別に明示しない限り、実施例 7 の構成要素のような機能を実行する実施例 8 の構成要素番号は、実施例 7 の構成要素番号に 1 0 0 を加えた番号と等しい。光源 7 0 1 と 7 0 2 B に関する説明は、実施例 7 の光源、それぞれ 6 0 1 と 6 0 2 に記載された説明の該当部分と同じである。光源 7 0 2 A に関する説明は、光源 7 0 2 A の波長が固定される以外は、実施例 7 の光源 6 0 2 に記載された説明の該当部分と同じである。光源 7 0 1、7 0 2 A と 7 0 2 B は、波長がそれぞれ  $\lambda_{15}$ 、 $\lambda_{16A}$  と  $\lambda_{16B}$  のビーム、それぞれ 7 0 7、7 0 8 A と 7 0 8 B を生成する。ビーム 7 0 7、7 0 8 A と 7 0 8 B は、図 8 の平面で偏光する。

【 0 3 6 3 】

光源 7 0 2 B 由来のビームの波長  $\lambda_{16B}$  は、コンピューターと制御器 7 2 9 由来の制御偏差信号 7 4 4 により制御される。実施例 8 について、本発明を簡単な方法で明示するため、 $(\lambda_{16A} - \lambda_{16B}) > 0$  および  $|\lambda_{16A} - \lambda_{16B}| < \lambda_{16B}$  である。実施例 8 は、本発明の範囲および精神から逸脱しなければ、 $(\lambda_{16A} - \lambda_{16B})$  に対して、および / または  $|\lambda_{16A} - \lambda_{16B}|$

10

20

30

40

50



$A - {}_{16B} | ( / ) {}_{16A}$ に対して負の値が有効なように形成してもよい。実施例8の装置の構成について(条件式  $| {}_{16A} - {}_{16B} | {}_{16B}$ を適用できない)、光源および干渉計システムの全般的な効率を改善するため、実施例8に記載した特定の非偏光ビームスプリッターを二色性ビームスプリッターに変えることが望ましいかもしれない。

【0364】

図8に示すように、ビーム708Aの第一部分は、非偏光ビームスプリッター751Aで反射し、次いでその一部分が、非偏光ビームスプリッター751Bで反射してビーム740の第一成分を形成する。次の段階において、ビーム708Bの第一部分は、非偏光ビームスプリッター751Cで反射し、ミラー751Dで反射し、次いでその一部分が非偏光ビームスプリッター751Bを透過してビーム740の第二成分を形成する。ビーム740は、比  $( {}_{16A} / {}_{16B} )$  をモニターするように形成された周知型の波長モニター784に衝突する。比  $( {}_{16A} / {}_{16B} )$  の測定値は、電子信号720としてコンピューターと制御器729に伝送される。波長モニター784は、例えば、真空の測定レグ内が真空、または真空でない干渉計および/または第二調波生成、SHGによりビームの周波数を倍化するための  $-BaBO_3$  などの非線形構成要素を含むことができる。

10

【0365】

コンピューターと制御器729は、波長比  $( {}_{16A} / {}_{16B} )$  の測定値(信号720により受信された比)およびコンピューターと制御器729により明記された比間の差に関する制御偏差信号744を生成する。光源702Bの波長は、制御偏差信号744により制御される。制御偏差信号744は、例えば、圧電性変換器でレーザー腔の長さを制御することによりレーザーの波長を制御するか、ダイオードレーザーの注入電流を制御することによりダイオードレーザーの波長を制御することができる。

20

【0366】

図8を続けると、ビーム708Aの第二部分は、非偏光ビームスプリッター751Aを透過し、変調器704Aに入り、次いで、二つの同じ広がりをもつ周波数成分からなるビーム710Aとして変調器704Aを出て行く。ビーム710Aはミラー753Aで反射し、その一部分が非偏光ビームスプリッター753Bで反射し、次にその一部分が二色性ビームスプリッター753Dを透過してビーム713の  ${}_{16A}$ 成分と周波数シフト  ${}_{16A}$ を形成する。ビーム708Bの第二部分は、非偏光ビームスプリッター751Cを透過し、変調器704Bに入り、次に二つの同じ広がりをもつ周波数成分からなるビーム710Bとして変調器704Bを出て行く。ビーム710Bの一部分は、非偏光ビームスプリッター753Bを透過する。次いで、その一部分が二色性ビームスプリッター753Dを透過してビーム713の  ${}_{16B}$ 成分と周波数シフト  ${}_{16B}$ 成分を形成する。ビーム707は、二つの同じ広がりをもつ周波数成分からなるビーム709として変調器703に入り、次いで出て行く。ビーム709は、ミラー753Cで反射し、次に、その一部分が二色性ビームスプリッター753Dで反射して、ビーム713の  ${}_{15}$ 成分と周波数シフト  ${}_{15}$ 成分を形成する。

30

【0367】

変調器703、704Aと704Bおよび付随のドライバー705、706Aと706Bに関する説明は、実施例7のドライバー603と604および付随のドライバー605と606に記載された説明のの該当部分と同じである。変調器703、704Aと704Bにより導入された周波数シフトは、それぞれ  $f_{1}$ 、 $f_{2A}$ と $f_{2B}$ である。ビーム713の非周波数シフト成分は、図8の平面で偏光し、ビーム713の周波数シフト成分は、図8の平面と垂直に偏光する。

40

【0368】

干渉計769を通るビーム713の伝達ならびに、信号723として伝送されるヘテロダイン信号  $s_{15}$  および信号724として伝送されるヘテロダイン信号  $s_{16A}$  と  $s_{16B}$  を含む電気干渉信号の生成に関する説明は、干渉計669を通過するビーム613の伝達およびそれぞれ信号523と524として伝送される電気干渉信号  $s_{13}$  と  $s_{14}$  の生成に関して、実施例7に記載された説明の該当部分と同じである。

50

## 【0369】

ヘテロダイン信号  $s_{15}$ 、 $s_{16A}$ と $s_{16B}$ およびそれぞれの位相  $\phi_{15}(\sim)$ 、 $\phi_{16A}(\sim)$ と $\phi_{16B}(\sim)$ の特性に関する説明は、実施例7のヘテロダイン信号  $s_{13}$ と $s_{14}$ およびそれぞれの位相  $\phi_{13}(\sim)$ と $\phi_{14}(\sim)$ の特性で載された説明の該当部分と同じであり、実施例5のヘテロダイン信号  $s_9$ と $s_{10}$ およびそれぞれの位相  $\phi_9(\sim)$ と $\phi_{10}(\sim)$ の特性に記載された説明の該当部分と同じである。

## 【0370】

光源702Aと702B、干渉計769、検出器システム789と790、電子プロセッサ727およびコンピューターと制御器729から構成されるシステムは、図5aに示す実施例5の該当システムと機能的に同等である。さらに、光源701と702B、干渉計769、検出器システム789と790、電子プロセッサ727およびコンピューターと制御器729から構成されるシステムは、図7に示す実施例7の該当システムと機能的に同等である。従って、各測定位相  $\phi_{15}(\sim)$ 、 $\phi_{16A}(\sim)$ と $\phi_{16B}(\sim)$ に存在するサイクリックエラーは、実施例5と7に記載の手順により測定することができる。

## 【0371】

実施例8に関する残りの説明は、実施例5と7に記載された説明の該当部分と同じである。

実施例8の利点は、以下のさらに別の利点をもつ実施例7に列挙されたものと同じである。実施例8に関して、距離測定機能およびガス内の乱れ作用など、測定路内のガスを補償する分散性システムは、可変波長  $\lambda_{16B}$ と固定波長  $\lambda_{15}$ か  $\lambda_{16A}$ のどちらか一方の波長に基づくサイクリックエラー補償手順と同時に、およびそれと無関係に、二つの固定波長  $\lambda_{15}$ と  $\lambda_{16A}$ で実行することができる。

## 【0372】

本発明の実施例6、7と8の装置と方法の距離測定と分散干渉計使用法は、1998年5月13日差出しの表題が「光路における屈折率作用を測定および補償する電子周波数プロセッシングを用いる干渉計使用装置と方法」の同者所有の米国特許出願通し番号第09/078,254号と1998年2月23日差出しの表題が「空気の屈折率と光路長作用を測定する干渉計と方法」の米国暫定特許出願第60/075,586号(両出願とも Peter de Groot、Henry A. HillおよびFrank C. Demarestによる)に記載の二つの種類の距離測定・分散干渉計使用装置および方法に関する。同者所有の米国暫定特許出願第60/075,586号、同上、米国特許出願通し番号第09/078,254号、同上、1998年5月13日差出しの表題が「光路における屈折率作用を測定および補償する多重パス干渉計使用法を用いる装置と方法」の米国特許出願第09/078,163号(Henry Allen Hill、Peter J. de GrootおよびFranklin C. Demarestによる)および1998年2月2日差出しの表題が「干渉計使用法を用いる空気の屈折率および光路作用を測定する装置と方法」の米国暫定特許出願第60/075,566号(Henry A. Hill、Peter de GrootおよびFranklin C. Demarestによる)に記載のような他の型の距離測定・分散干渉計および方法は、本発明の精神または範囲から逸脱しなければ、本発明の装置と方法に組み入れても良い。前述の出願は、参照文献によりその全体を本明細書に盛り込んである。

## 【0373】

図9は、第四群実施例由来の本発明の好適実施例9を図式で示す。実施例9の多くの構成要素は、実施例8の構成要素のような機能を実行し、別に明記しなければ、実施例8の構成要素のような機能を実行する実施例9の構成要素番号は、該当実施例8の構成要素番号に100を加えた番号と等しい。実施例9と8間の主要な差は、例えば、実施例9の光源システムにおいて、および検出器システムにおいて、SHGにより特定ビームおよび/またはビーム成分の周波数を倍化するため、例えば、 $\text{BaBO}_3$ の非線形構成要素を用いることである。

10

20

30

40

50

## 【0374】

図9aに示すように、実施例9では、光源802Aと802Bおよび該当のビーム808Aと808Bに関する説明は、実施例8の光源702Aと702Bおよび該当ビーム708Aと708Bに記載された説明の該当部分と同じである。非偏光ビームスプリッター851Eを透過したビーム808Aの一部分とビーム808Bの一部分由来の実施例8におけるビーム840の生成に関する説明は、ビーム708Aと708B由来の実施例8におけるビーム740の生成に記載された説明部分と同じである。非偏光ビームスプリッター851Eを透過したビーム808Aの一部分とビーム808Bの一部分由来の実施例9におけるビーム813の $_{18A}$ 成分、周波数シフト $_{18A}$ 成分、 $_{18B}$ 成分と周波数シフト $_{18B}$ 成分に関する説明は、ビーム708Aとビーム708B由来の実施例8におけるビーム713の $_{16A}$ 成分、周波数シフト $_{16A}$ 成分、 $_{16B}$ 成分と周波数シフト $_{16B}$ 成分の生成に記載された説明の部分と同じである。ドライバー806Aと806Bの周波数は、それぞれ $f_2$ と $f_3$ なので、ビーム813の周波数シフト $_{18A}$ 成分と周波数シフト $_{18B}$ 成分の周波数シフトは、それぞれ $f_2$ と $f_3$ である。

10

## 【0375】

ビーム807は、ビーム808Aの第二部分から生成され(図9aを参照)、ビーム808Aの第二部分は、非偏光ビームスプリッター851Eで反射し、ミラー851Fで反射し、次いで、非線形構成要素893を透過する。ビーム807は、二つの周波数成分からなり、一つの成分の波長は $_{18A}$ で、他方の周波数倍化成分の波長は $_{18A}/2$ である。周波数倍化成分は、非線形構成要素893のSHGにより生成される。ビーム807由来の

20

## 【0376】

ビーム809は、空間的に同じ広がりをもつ三つの周波数成分からなり、その成分は、 $_{18A}$ 成分、 $_{18A}/2$ 成分と周波数シフト $_{18A}/2$ 成分である。周波数シフト $_{18A}/2$ 成分の周波数シフトは、 $f_1$ である。ビーム809の $_{18A}/2$ 成分と周波数シフト $_{18A}/2$ 成分は、それぞれ、図9aの平面と直交して偏光および図9aの平面で偏光する。ビーム809の周波数シフト $_{18A}/2$ 成分は、光学フィルター879Aを透過し、ミラー853Cで反射し、偏光子879Bを透過し、半波長板879Cを透過し、次に、その一部分が二色性ビームスプリッター853Dで反射して、ビーム813の周波数シフト $_{18A}/2$ 成分を形成する。半波長位相遅延板879Cは、入射周波数シフト $_{18A}/2$ 成分の偏光を $45^\circ$ 回転させるように向けられる。偏光子879Bは、ビーム809の周波数シフト $_{18A}/2$ 成分を透過し、ビーム809の $_{18A}/2$ 成分を遮断するように向けられる。光学フィルター879Aは、ビーム809の $_{18A}$ 成分を遮断する。

30

## 【0377】

変調器803およびドライバー805に関する説明は、実施例8のドライバー703とドライバー705に記載された説明の該当部分と同じである。変調器803により導入された周波数シフトは、 $f_1$ である。

## 【0378】

図9aに示すビームスプリッター873は、ビーム813の二つの群の周波数成分の偏光ビームスプリッターインターフェースを含む。二つの群の周波数成分の第一群は、 $_{18A}$ 成分、周波数シフト $_{18A}$ 成分、 $_{18B}$ 成分と周波数シフト $_{18B}$ 成分を含む。二つの群の周波数成分の第二群は、周波数シフト $_{18A}/2$ 成分を含む。さらに、位相遅延板877と878は、ビーム813の第一と第二群の周波数成分に対する四分の一波長位相遅延板である。

40

## 【0379】

ビーム813は、干渉計869に入り(図9aを参照)、次いで、空間的に離れた射出ビーム833と834として出て行く。ビーム813の $_{18A}$ 成分と周波数シフト $_{18A}$ 成分は、それぞれ測定および参照ビームで、それぞれビーム833と834の成分として干渉

50

計 8 6 9 を出て行く。ビーム 8 1 3 の  $_{18B}$ 成分と周波数シフト  $_{18B}$ 成分は、それぞれ測定および参照ビームであり、次いで、それぞれビーム 8 3 3 と 8 3 4 の他の成分として干渉計 8 6 9 を出て行く。ビーム 8 1 3 の周波数シフト  $_{18A}/2$ 成分の第一部分は、偏光ビームスプリッター 8 7 3 を透過し、次いで、射出ビーム 8 3 3 の他の特定成分として干渉計 8 6 9 を出て行く。ビーム 8 1 3 の周波数シフト  $_{18A}/2$ 成分の第二部分は、偏光ビームスプリッター 8 7 3 で反射し、次いで、ビーム 8 3 4 の他の特定成分として干渉計 8 6 9 を出て行く。

【 0 3 8 0 】

射出ビーム 8 3 3 と 8 3 4 は、 $_{18A}$ と  $_{18B}$ で、それぞれ、ガス 8 9 8 を通過する経路を含む測定路の光路長について、および参照路を通る光路長についての情報を含む。ビーム 8 3 3 と 8 3 4 の各第一部分は、それぞれビーム 8 3 5 と 8 3 6 として、非偏光ビームスプリッター 8 6 1 で反射する。電気干渉信号、ヘテロダイン信号  $s_{18A}$  と  $s_{18B}$  を生成する検出器 8 8 9 を通過するビーム 8 3 5 と 8 3 6 の伝達に関する説明は、光学フィルター 8 7 9 D 以外は、それぞれヘテロダイン信号  $s_{16A}$  と  $s_{16B}$  を生成する検出器 7 8 9 を通過するビーム 7 3 5 と 7 3 6 の伝達に関する実施例 8 に記載された説明の該当部分と同じである。光学フィルター 8 7 9 D は、ビーム 8 4 1 の第一群の周波数成分を透過し、ビーム 8 4 1 の第二群の周波数成分を遮断する。

【 0 3 8 1 】

ビーム 8 3 3 の第二部分は、非偏光ビームスプリッター 8 6 1 を透過し、非線形構成要素 8 9 4 M に入り、次いで、五つの同じ広がりをもつ成分、 $_{18A}$ 成分、 $_{18B}$ 成分、第二  $_{18A}/2$ 成分、第二  $_{18B}/2$ 成分と周波数シフト  $_{18A}/2$ からなるビーム 8 3 7 として非線形構成要素 8 9 4 M を出て行く。第二  $_{18A}/2$ 成分と第二  $_{18B}/2$ 成分は、それぞれ  $_{18A}$ 成分と  $_{18B}$ 成分から非線形構成要素 8 9 4 M で S H G により生成される。ビーム 8 3 7 は、光学フィルターと偏光子 8 8 2 M に入射し、その一部分が透過し、検出器 8 8 6 M に入射する。

【 0 3 8 2 】

ビーム 8 3 4 の第二部分は、非偏光ビームスプリッター 8 6 1 を透過し、非線形構成要素 8 9 4 R に入り、次いで、五つの空間的に同じ広がりをもつ成分、周波数シフト  $_{18A}$ 成分、周波数シフト  $_{18B}$ 成分、周波数倍化、周波数シフト  $_{18A}$ 成分、周波数倍化、周波数シフト  $_{18B}$ 成分と周波数シフト  $_{18A}/2$ からなるビーム 8 3 8 として非線形構成要素 8 9 4 R を出て行く。周波数倍化、周波数シフト  $_{18A}$ 成分と周波数倍化、周波数シフト  $_{18B}$ 成分は、それぞれ、周波数シフト  $_{18A}$ 成分と周波数シフト  $_{18B}$ 成分から非線形構成要素 8 9 4 R で S H G により生成される。ビーム 8 3 8 は、光学フィルターと偏光子 8 8 2 R に入射し、その一部分が透過し、検出器 8 8 6 R に入射する。

【 0 3 8 3 】

光学フィルタおよび偏光器 8 8 2 M が、ビーム 8 3 7 の第 2  $_{18A}/2$ 成分、第 2  $_{18B}/2$ 成分、および、周波数シフトした  $_{18A}/2$ 成分を伝達し、光学フィルタおよび偏光器 8 8 2 R が、ビーム 8 3 8 の、周波数倍化しかつ周波数シフトした  $_{18B}$ 成分、周波数倍化しかつ周波数シフトされた  $_{18B}$ 成分、および、周波数シフトした  $_{18A}/2$ 成分を伝達する。さらに、光学フィルタおよび偏光器 8 8 2 M ならびに光学フィルタおよび偏光器 8 8 2 R は、それぞれ、ビーム 8 3 7 および 8 3 8 の偏光成分を合成する。光学フィルタおよび偏光器 8 8 2 M は、さらに、 $_{18A}$ 成分および  $_{18B}$ 成分を遮断し、光学フィルタおよび偏光器 8 8 2 R は、さらに、周波数シフトされた  $_{18A}$ 成分および周波数シフトされた  $_{18B}$ 成分を遮断する。

【 0 3 8 4 】

干渉計 8 6 9 は、位相シフト  $_{18A}$ を、ビーム 8 4 1 の  $_{18A}$ 成分と周波数シフトされた  $_{18A}$ 成分との間に挿入し、かつ、位相シフト  $_{18B}$ を、ビーム 8 4 1 の  $_{18B}$ 成分と、周波数シフトされた  $_{18B}$ 成分との間に挿入する。

【 0 3 8 5 】

信号 8 2 4 M は、ヘテロダイン周波数  $f_1$  および  $[ 2 [ ( 1 / _{18B} ) - ( 1 / _{18A} ) ] \cdot$

10

20

30

40

50

$c - f_1]$ を有する2つのヘテロダイン信号を含む。信号824Rは、ヘテロダイン周波数  $(2f_2 - f_1)$ および  $[2[(1/\lambda_{18B}) - (1/\lambda_{18A})] \cdot c + 2(f_3 - f_1)]$ を有する2つのヘテロダイン信号を含む。周波数  $[2[(1/\lambda_{18B}) - (1/\lambda_{18A})] \cdot c - f_1]$ および  $[2[(1/\lambda_{18B}) - (1/\lambda_{18A})] \cdot c + 2(f_3 - f_1)]$ を有するヘテロダイン信号は、電子プロセッサ827において電子フィルタリングにより拒絶されるため、第9の実施形態の以下の記載には含まれない。

【0386】

干渉計869は、さらに、ビーム837および838の所定のビーム成分の間にそれぞれ位相シフト  $\phi_{18M}$ および  $\phi_{18R}$ を挿入する。所定のビーム成分は、それぞれ、ヘテロダイン周波数  $f_1$ および  $(2f_2 - f_1)$ を有するヘテロダイン信号  $s_{18M}$ および  $s_{18R}$ を形成する。位相シフト  $\phi_{18M}$ および  $\phi_{18R}$ の大きさは、以下の式によりそれぞれの光路の光路長に関連する。

【0387】

【数102】

$$\phi_{18M} = L_M p \left[ k_{18A/2, f_1} n(k_{18A/2, f_1}) - 2k_{18A} n(k_{18A}) \right], \quad (102)$$

$$\phi_{18R} = L_R p \left[ k_{18A/2, f_1} n(k_{18A/2, f_1}) - 2k_{18A, f_2} n(k_{18A, f_2}) \right],$$

ここで、

【0388】

【数103】

$$k_{18A} = (2\pi/\lambda_{18A}) ,$$

$$k_{18A/2, f_1} = 2\pi \left[ (2/\lambda_{18A}) + (f_1/c) \right] , \quad (103)$$

$$k_{18A, f_2} = 2\pi \left[ (1/\lambda_{18A}) + (f_2/c) \right] ,$$

長さ  $L_M$ および  $L_R$ は、測定区間および参照区間に関してそれぞれの光源からそれぞれの検出器までの等価な物理的経路長を示す。

【0389】

それぞれの位相  $\phi_{18A}$ ,  $\phi_{18B}$ ,  $\phi_{18M}$ および  $\phi_{18R}$ ならびにそれぞれの測定された位相  $\phi_{18A}(\sim)$ ,  $\phi_{18B}(\sim)$ ,  $\phi_{18M}(\sim)$ および  $\phi_{18R}(\sim)$ に関するヘテロダイン信号  $s_{18A}$ ,  $s_{18B}$ ,  $s_{18M}$ および  $s_{18R}$ の特性に関する説明は、第1のおよびそれに続いて記載した実施形態の、ヘテロダイン信号  $s_i$ およびそれぞれの位相  $\phi_i$ ならびにそれぞれの測定された位相  $\phi_i(\sim)$ の特性に関する記載の対応する部分と同一である。

【0390】

図9bに示すように、測定された位相  $\phi_{18A}(\sim)$ および  $\phi_{18B}(\sim)$ は、それぞれ、位相検出器8274Aおよび8274Bにより、それぞれヘテロダイン信号  $s_{18A}$ および  $s_{18B}$ から発生される。位相検出についての説明は、第1実施形態の電子プロセッサ27における位相検出に関する記載の対応する部分と同一である。

【0391】

第9実施形態の光源802Aおよび802B、干渉計869、検出器システム889ならびに電子プロセッサ827のプロセッサ8274Aおよび8274Bから構成されたシステムは、測定された位相  $\phi_{18A}(\sim)$ および  $\phi_{18B}(\sim)$ のそれぞれに関するヘテロダイン信号  $s_{18A}$ および  $s_{18B}$ の発生および処理に関して、第8実施形態の光源702Aおよび702B、干渉計769、検出器システム789、ならびに電子プロセッサ727の対応する位相検出器から構成されたシステムの、測定された位相  $\phi_{16A}(\sim)$ および  $\phi_{16B}(\sim)$ のそれぞれに関するヘテロダイン信号  $s_{16A}$ および  $s_{16B}$ の発生および処理と同等の機能を有することが明らかである。さらに、第9実施形態の光源802Aおよび802B、干

10

20

30

40

50

渉計 8 6 9、検出器システム 8 8 9 ならびに電子プロセッサ 8 2 7 のプロセッサ 8 2 7 4 A および 8 2 7 4 B から構成されたシステムは、測定された位相  $\phi_{18A}(\sim)$  および  $\phi_{18B}(\sim)$  のそれぞれに関するためのヘテロダイン信号  $s_{18A}$  および  $s_{18B}$  の発生および処理に関して、第 7 実施形態の光源 6 0 1 および 6 0 2、干渉計 6 6 9、検出器システム 6 8 9、ならびに電子プロセッサ 6 2 7 の対応する位相検出器から構成されたシステムの、測定されたそれぞれの位相  $\phi_{13}(\sim)$  および  $\phi_{14}(\sim)$  のためのヘテロダイン信号  $s_{13}$  および  $s_{13}$  の発生および処理と同等の機能を有することが明らかである。したがって、測定された位相  $\phi_{18A}(\sim)$  および  $\phi_{18B}(\sim)$  の各々に生じた周期誤差を、第 7 および第 8 実施形態に記載した手順を用いて求めることができる。

【 0 3 9 2 】

図 9 b に見られるように、測定された位相  $\phi_{18M}(\sim)$  および  $\phi_{18R}(\sim)$  は、それぞれ位相検出器 8 2 7 4 C および 8 2 7 4 D により、それぞれヘテロダイン信号  $s_{18M}$  および  $s_{18R}$  から発生される。位相検出についての記載は、第 1 実施形態の電子プロセッサ 2 7 における位相検出に関する記載の対応する部分と同一である。

【 0 3 9 3 】

次の段階において、電子プロセッサ 8 2 7 7 により、位相  $\phi_{18M}(\sim)$  を、測定された位相  $\phi_{18M}(\sim)$  と  $\phi_{18R}(\sim)$  との差として得る。すなわち、

【 0 3 9 4 】

【数 1 0 4 】

$$\Phi = \tilde{\phi}_{18M} - \tilde{\phi}_{18R} \quad (104)$$

以下の式より、位相  $\Phi$  は他の量に関する示され得る。

【 0 3 9 5 】

【数 1 0 5 】

$$\Phi = Lp2k_{18A} \left[ n(k_{18A/2}) - n(k_{18A}) \right] + Z_{\psi} + Z \quad (105)$$

ここで、

【 0 3 9 6 】

【数 1 0 6 】

$$Z_{\psi} = \psi_{18M} - \psi_{18R} \quad (106)$$

$$Z = L_R p 2 \left[ (2\pi f_2 / c) n(k_{18A, f_2}) \right] + \zeta_{18M} - \zeta_{18R}$$

位相ずれ  $\phi_{18M}$  および  $\phi_{18R}$  は、測定路および参照路に関係のない  $s_{18M}$  および  $s_{18R}$  のそれぞれの独立変数  $\phi_{18M}$  および  $\phi_{18R}$  への全ての影響を含み、 $\phi_{18M}$  および  $\phi_{18R}$  は、それぞれ、 $\phi_{18M}(\sim)$  および  $\phi_{18R}(\sim)$  における全ての周期誤差を含む。非周期非線形性値  $\phi_{18M}$  および  $\phi_{18R}$  は、第 1 実施形態において説明した理由により省略されている。

【 0 3 9 7 】

周期誤差を示す記号  $Z$  は、以下の式によりかなりの近似値にて示し得る。

【 0 3 9 8 】

【数 1 0 7 】

10

20

30

40

$$\begin{aligned}
Z_{\psi} = & \sum_{r=1} a_{18M,r} \cos r \left\{ Lp \left[ k_{18A/2, f_1} n(k_{18A/2, f_1}) \right] \right\} \\
& - \sum_{r=1} a'_{18M,r} \cos r \left\{ Lp \left[ 2k_{18A} n(k_{18A}) \right] \right\} \\
& + \sum_{r=1} b_{18M,r} \sin r \left\{ Lp \left[ k_{18A/2, f_1} n(k_{18A/2, f_1}) \right] \right\} \\
& - \sum_{r=1} b'_{18M,r} \sin r \left\{ Lp \left[ 2k_{18A} n(k_{18A}) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{107}$$

10

Z に関する式(107)を、以下の式に書き換えることができる。

【0399】

【数108】

$$\begin{aligned}
Z_{\psi} = & \sum_{r=1} \bar{a}_{18M,r} \cos r \left\{ Lp \left[ 2k_{18A} n(k_{18A}) \right] \right\} \\
& + \sum_{r=1} \bar{b}_{18M,r} \sin r \left\{ Lp \left[ 2k_{18A} n(k_{18A}) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{108}$$

20

ここで、

【0400】

【数109】

$$\begin{aligned}
\bar{a}_{18M,r} &= a_{18M,r} \cos r \phi - a'_{18M,r} + b_{18M,r} \sin r \phi, \\
\bar{b}_{18M,r} &= b_{18M,r} \cos r \phi - b'_{18M,r} + a_{18M,r} \sin r \phi,
\end{aligned} \tag{109}$$

および

【0401】

【数110】

$$\phi = Lp \left\{ (2\pi f_1 / c) n(k_{18A/2, f_1}) + k_{18A/2, f_1} \left[ n(k_{18A/2, f_1}) - n(k_{18A}) \right] \right\} \tag{110}$$

30

である。

【0402】

に関する有効波長は、25 でかつ1気圧の空気から構成されたガスに関して、およそ、 $(k_{18A}) / [n(k_{18A/2, f_1}) - n(k_{18A})]$ 、または  $10^5 / k_{18A}$  である。したがって、低減された係数の組  $a(-)_{18M,r}$  および  $b(-)_{18M,r}$  のみがLの関数である。低減された係数の組  $a(-)_{18M,r}$  および  $b(-)_{18M,r}$  は、積分の変数としての  $k_{18A}$  を用いるのフーリエ解析により求められる。 $k_{18A} / k_{18A}$  における積分の範囲は、 $10^5 / k_{18A}$  および  $k_{18A}$  である。位相  $\phi$  は、 $k_{18A}(\sim)$  から、第9実施形態の初期段階として記載された周期誤差の補償により得られる位相である。

40

【0403】

における周期誤差は、第6実施形態に関して記載した積分変換を用いてフィルタリングすることにより低減または排除され得る。

光路長における、周期誤差が補償された分散および変化は、それぞれ、第9実施形態において式(82)、(83)、(86)および(89)を用いて計算される。ここで、第6実施形態の  $k_{11}(\sim)$ 、 $Z$ 、 $Z$ 、 $k_{11}$  および  $k_{18A}$  の代わりに、第9実施形態の  $k_{18A}(\sim)$ 、 $Z$ 、 $Z$ 、 $k_{18A}$  および  $k_{18A}$  を用い、 $\phi = 0$ 、 $(\phi / k_{18A}) = 0$ 、 $\phi = 2k_{18A}$

50

$1_{11} = 2$ 、 $1_{12} = 1$ である。周期誤差の影響に関して補正される分散値の計算は、式(105)を用いて行うこともできる。

【0404】

第9実施形態について記載すべき他の部分は、第8実施形態に関して記載された対応する部分と同一である。

第9実施形態の利点は、第8実施形態に関して記載された利点と同一である。

【0405】

当業者には、を求めるための情報に関する信号を発生させるのに用いるビームとして、本発明の精神および範囲から逸脱せずにパルスビームを用い得ることが明らかであろう。パルスビームは、Lが変化するときの変化測度が遅いため、利用可能である。パルスビームを用いる利点は、SHGを用いるビームの第二次高調波の発生効率を高めることと、パルスモードの動作が、パルス発生中のビームパワー密度を、平均パワー密度が等しくなるように増大させることと、SHG効率が、非線形素子におけるビームの瞬間出力密度の二乗に比例することである。

【0406】

本発明の第10実施形態(図示せず)を、本発明の実施形態の第3群より記載する。第10実施形態は、第9実施形態が第6実施形態に相応しているのと同様に第9実施形態に相応している。

【0407】

幾つかの用途に関しては、測定路におけるガスの屈折率の、ガスの乱流などを原因とする変化による影響のみが距離測定干渉計において補償される必要がある。補償が必要な変化、例えばガス乱流タイプの $1_{8M}$ において他に変化が生じない状況においては、第9実施形態の変型例を有益に用いることができ、この場合、 $1_{8R}$ は測定されない。第9実施形態の類似の変型例を、類似の状況下で有効に用いることができる

第6実施形態の記載は、ガスの分散の測定の周期誤差による影響に対する感度が、ガスの屈折性の測定の周期誤差による影響に対する感度よりも増大したことと、ガスの屈折性の測定の周期誤差による影響に対する感度が、ガスの屈折率の測定の周期誤差の影響に対する感度よりも増大したことに注目した。したがって、ガスの固有の光学特性、例えばガスの反分散力を測定することにより、周期誤差による影響に対する感度が、ガスの屈折性の測定値の周期誤差による影響に対する感度よりも増大されたことと、周期誤差による影響に対する感度が、ガスの屈折率の測定値の周期誤差の影響に対する感度に関して増大されたことが示される。

【0408】

当業者には、ガスの固有の光学特性、例えばを測定するための装置および方法に、周期誤差の影響を補償する本発明の実施形態を、本発明の精神および範囲から逸脱せずに有益に組み込むことができることが明らかであろう。ガスの固有の光学特性を測定するための装置および方法の例は、米国特許出願第08/942,848号と、1998年10月21日に出願された「ガスの固有の光学特性を測定するための干渉計による測定方法および装置」と題された米国特許出願と、米国特許仮出願第60/075,595号(同書)に記載されている。

【0409】

先に記載した干渉計システムは、周期誤差を特徴づけ、この特徴づけられた周期誤差を用いて、距離測定値、分散測定値および固有の光学特性値を周期的非線形性に関して補正する。したがって、このような干渉計システムにより、非常に正確な測定値が得られる。このようなシステムは、コンピュータチップなどの大規模な集積回路を製造する際にリソグラフィを用いることにおいて特に有用であろう。リソグラフィは、半導体製造産業の技術の中核である。線幅を100nm未満に引き下げる重ね合わせ度(overlay)の改良は最も困難な5つの課題の1つである(設計規定)。例えば、Semiconductor Industry Roadmapの82頁を参照されたい。

10

20

30

40

50



## 【 0 4 1 0 】

重ね合わせ度は、ウェハおよびレチクル（またはマスク）ステージの位置決めを用いる距離測定干渉計の精度および正確性の性能に直接依存する。リソグラフィツールは毎年50～100万ドル相当の製品を製造することができるため、高性能に改良された距離測定干渉計による経済的価値はかなり高い。リソグラフィツールによる生産量が1%増加すれば、集積回路製造業者に約100万ドル/年の経済的利益がもたらされ、リソグラフィツールベンダーにもほぼ同等の利益がもたらされることになる。

## 【 0 4 1 1 】

リソグラフィツールの機能は、空間的にパターン化された放射線を、フォトレジストコーティングされたウェハ上に向けさせることである。このプロセスは、放射線を受けべきウェハの位置を決定すること（アライメント）と、放射線を前記位置にてフォトレジストに照射すること（露光）とを含む。

## 【 0 4 1 2 】

ウェハを適切に位置決めするために、ウェハは、ウェハ上に、専用のセンサにより測定可能なアライメントマーカを含む。測定されたアライメントマーカの位置により、ウェハのツール内での位置が画定される。この情報が、ウェハ表面の所望のパターン化の詳細と共に、ウェハのアライメントを、空間的にパターン化された放射線に対してガイドする。このような情報に基づいて、フォトレジストコーティングされたウェハを支持する移動可能なステージが、ウェハを、放射線がウェハの適切な位置を露光するように移動させる。

## 【 0 4 1 3 】

露光中、放射線源は、パターン化されたレチクルを照射し、これにより放射線が拡散されて、空間的にパターン化された放射線が生成される。レチクルをマスクと称することもあり、これらの用語を互換性を有するものとして以下の記載において用いる。縮小型リソグラフィにおいては、縮小レンズが、拡散した放射線を集光して、縮小されたレチクルパターンの像を形成する。あるいは、近接プリンティングの場合には、拡散放射線はウェハに接触する前に短い距離（典型的には数ミクロン）を伝搬してレチクルパターンの1：1の画像を形成する。放射線は、レジストにおいて、放射パターンをレジスト内で潜像に変換するフォトケミカルプロセスを開始する。

## 【 0 4 1 4 】

干渉計システムは、ウェハとレチクルの位置を制御してレチクルの像をウェハ上に位置合わせする位置決め機構の重要な構成部品である。このような干渉計システムが、先に記載した位相測定部を含むならば、周期誤差が距離測定に及ぼす影響が最小化されるため、干渉計システムにより測定される距離の正確性が増大する。

## 【 0 4 1 5 】

概して、リソグラフィシステムは露光システムとも称され、典型的に、照明システムとウェハ位置決めシステムとを含む。照明システムは、紫外線、可視光線、x線、電子放射線またはイオン放射線などの放射線をもたらすための放射線源と、パターンを放射線に与え、それにより空間的にパターン化された放射線を発生させるレチクルすなわちマスクとを含む。また、縮小リソグラフィにおいては、照明システムは、空間的にパターン化された放射線をウェハ上に画像化するためのレンズ組立体を含み得る。画像化された放射線は、ウェハ上にコーティングされたレジストを露光する。照明システムは、また、マスクを支持するためのマスクステージと、マスクステージの、マスクを通して向けられる放射線に対する位置を調節するための位置決めシステムとを含む。ウェハ位置決めシステムは、ウェハを支持するためのウェハステージと、ウェハステージの、画像化された放射線に対する位置を調節するための位置決めシステムとを含む。集積回路の製造は、複数の露光ステップを含み得る。リソグラフィに関する一般的な参考文献としては、例えば、J．R．シート（Sheats）およびB．W．スミス（Smith）による「マイクロリソグラフィ：サイエンス・アンド・テクノロジー」（*Microolithography：Science and Technology*）（マーセル・デッカー（Marcel Dekker）社、ニューヨーク、1998年）を参照されたい。この文献の内容を援用して本

10

20

30

40

50

文の記載の一部とする。

【0416】

上記の干渉計システムを用いて、ウェハステージおよびマスクステージの各々の、露光システムのその他の構成部品、例えば、レンズ組立体、放射線源、または支持構造体に対する位置を正確に測定することができる。このような場合、干渉計システムを静止構造体に取り付け、被測定体を、移動可能な要素、例えばマスクおよびウェハステージの一方に取り付けることができる。あるいは、この状態を逆にして、干渉計システムを移動可能な物体に取り付け、被測定体を静止物体に取り付けることもできる。

【0417】

さらに一般的には、このような干渉計システムを用いて、露光システムの構成部品のいずれか1つの、露光システムの構成部品の他のいずれかに対する位置を測定することができる。ここで、干渉計システムが、構成部品の1つに取り付けられまたは支持され、被測定体が、その他の構成部品に取り付けられまたは支持される。

10

【0418】

干渉計システム1126を用いリソグラフィスキャナ1100の例を図11aに示す。干渉計システムは、露光システム内でのウェハ（図示せず）の位置を正確に測定するために用いられる。ここで、ステージ1112が、ウェハを露光ステーションに対して位置決めしかつ支持するために用いられる。スキャナ1100はフレーム1102を含み、フレーム1102は、他の支持構造体を有し、これらの支持構造体に種々の構成部品が支持されている。露光ベース1104の上部にレンズハウジング1106が取り付けられており、レンズハウジング1106の頂部に、レチクルすなわちマスクを支持するためのレチクルステージすなわちマスクステージ1116が載置されている。マスクの露光ステーションに対する位置を決めるための位置決めシステムが、要素1117により概略的に示されている。位置決めシステム1117は、例えば、圧電変換器要素および対応する制御電子素子を含むことができる。記載されたこの実施形態には含まれていないが、先に記載した1以上の干渉計システムを、マスクステージの位置を正確に測定するためだけでなく、リソグラフィ構造体を製造する工程において位置が正確に監視されなければならない他の移動可能な要素の位置を測定するためにも用いることができる（前述の「マイクロリソグラフィ：サイエンス・アンド・テクノロジー」（シートおよびスミス）を参照のこと）。

20

【0419】

露光ベース1104の下に支持ベース1113が吊下げて取り付けられており、ウェハステージ1122を支持している。ステージ1122は、干渉計システム1126によりステージに向けられた測定ビーム1154を反射するための平面鏡1128を含む。ステージ1122の干渉計システム1126に対する位置を決めるための位置決めシステムが、要素1119により概略的に示されている。位置決めシステム1119は、例えば、圧電変換器要素および対応する制御電子素子を含むことができる。測定ビームは、露光ベース1104に取り付けられた干渉計システムへ反射される。干渉計システムは、先に記載した実施形態のいずれであってもよい。

30

【0420】

動作中、放射線ビーム、例えばUVレーザー（図示せず）からの紫外線（UV）ビームが、ビーム形成光学素子1112を通り、ミラー1114にて屈折した後下方に進む。その後、放射線ビームは、マスクステージ1116に支持されたマスク（図示せず）を通る。マスク（図示せず）は、レンズハウジング1106内に収容されたレンズ組立体1108を介して、ウェハステージ1122上のウェハに画像化される。ベース1104、および、ベース1104に支持された種々の構成部品は、周囲の振動から、ばね1120により示された制振システムにより隔離される。

40

【0421】

リソグラフィックスキャナの他の実施形態において、上記の干渉計システムの1つ以上を用いて、例えばウェハおよびレチクル（すなわちマスク）ステージに関連する複数の軸および角度に沿った距離を測定することができる。また、UVレーザービーム以外に、X線ビ

50

ーム、電子ビーム、イオンビームおよび可視光線を含む他のビームを用いてウェハを露光することもできる。

【0422】

幾つかの実施形態において、リソグラフィックスキヤナは、当分野においてカラムレファレンス(column reference)として知られているものを含むことができる。このような実施形態において、干渉計システム1126は、参照ビーム(図示せず)を、輻射ビームを方向付ける構造体、例えばレンズハウジング1106に取り付けられた参照ミラー(図示せず)と接触した外部参照路に沿って向けさせる。参照ミラーは、参照ビームを干渉計システムへ反射させる。干渉計システム1126が発生した干渉信号は、ステージ1122から反射された測定ビーム1154と、レンズハウジング1106に取り付けられた参照ミラーからの参照ビームとが組合されたときに、輻射ビームに対するステージの位置の変化を表示する。さらに、他の実施形態において、干渉計システム1126を、レチクル(マスク)ステージ1116、または、スキヤナシステムの他の移動可能な構成部品の位置の変化測定するために配置することができる。最後に、本発明の干渉計システムを、スキヤナの他にまたはスキヤナでなくステッパーを含むリソグラフィシステムにおいても同様に用いることができる。

10

【0423】

当分野で知られているように、リソグラフィは、半導体装置の製造方法における重要な部分である。例えば、米国特許第5,483,343号に、かかる製造方法のステップの概略が記載されている。これらのステップを、図11bおよび11cを参照しつつ以下に説明する。図11bは、半導体チップ(例えばICまたはLSI)、液晶パネルまたはCCDなどの半導体装置を製造する手順を示すフローチャートである。ステップ1151は、半導体装置の回路を設計するための設計プロセスである。ステップ1152は、回路パターン設計に基づいてマスクを製造するプロセスである。ステップ1153は、シリコンなどの材料を用いてウェハを製造するプロセスである。

20

【0424】

ステップ1154は、前処理と呼ばれるウェハプロセスであり、このプロセスにて、準備されたマスクおよびウェハを用いてリソグラフィによりウェハ上に回路を形成する。十分な空間解像度でマスク上のパターンに相当する回路をウェハ上に形成するために、リソグラフィツールをウェハに対して干渉計測定により位置決めすることが必要である。本願に記載した干渉計による測定方法およびシステムは、ウェハプロセスにおいて用いるリソグラフィの効率を高めるために特に有用である。

30

【0425】

ステップ1155は、プロセス後ステップと称される組立ステップであり、ここで、ステップ1154により処理されたウェハが半導体チップに形成される。このステップは、組立(ダイシングおよび接着)ならびにパッケージング(チップシーリング)を含む。ステップ1156は、ステップ1155により製造された半導体装置の動作可能性検査、耐久性検査などを行う検査ステップである。これらのプロセスにより、半導体装置が完成して出荷される(ステップ1157)。

【0426】

図11cは、ウェハプロセスの詳細を示すフローチャートである。ステップ1161は、ウェハの表面を酸化するための酸化プロセスである。ステップ1162は、絶縁フィルムをウェハ表面に形成するためのCVD(化学蒸着)プロセスである。ステップ1163は、ウェハ上に蒸着により電極を形成する電極形成プロセスである。ステップ1164は、イオンをウェハに注入するイオン注入プロセスである。ステップ1165は、レジスト(感光材料)をウェハに塗布するレジストプロセスである。ステップ1166は、上記の露光装置を用いてマスクの回路パターンを露光(すなわちリソグラフィ)によりウェハ上にプリントするための露光プロセスである。ここでもまた、先に述べたように、本願の干渉計システムおよび干渉計による測定方法が、かかるリソグラフィステップの正確性および分解能を増大させる。

40

50

## 【0427】

ステップ1167は、露光したウェハを現像するための現像プロセスである。ステップ1168は、現像したレジスト像以外の部分を除去するためのエッチングプロセスである。ステップ1169は、エッチング処理後にウェハ上に残っているレジスト材料を剥離するためのレジスト分離プロセスである。これらのプロセスを繰り返すことにより、回路パターンがウェハ上に形成および積層される。

## 【0428】

上記干渉計システムは、物体の相対位置を正確に測定することを必要とする他の用途にも用いることができる。例えば、レーザビーム、X線ビーム、イオンビームまたは電子ビームなどのライトビームが、基板上にパターンを、基板またはビームが移動しているときに付与する場合に、干渉計システムを用いて基板とライトビームとの相対移動を測定することができる。

10

## 【0429】

例として、ビームライティングシステム1200の概略を図12に示す。光源1210がライトビーム1212を発生し、ビーム集束組立体1214が、輻射ビームを、移動可能なステージ1218に支持された基板1216へ向けさせる。ステージの相対位置を測定するために、干渉計システム1220は、参照ビーム1222を、ビーム集束組立体1214に取り付けられたミラー1224に向けさせ、測定ビーム1226を、ステージ1218に取り付けられたミラー1228に向けさせる。参照ビームが、ビーム集束組立体に取り付けられたミラーに接触しているため、ビームライティングシステムは、コラムレファレンスを用いるシステムの例である。干渉計システム1220は、上記干渉計システムのいずれであってもよい。干渉計システムにより測定される位置の変化は、基板1216上のライトビーム1212の相対位置の変化に対応する。干渉計システム1220は、基板1216上でのライトビーム1212の相対位置を示す測定信号1232をコントローラ1230に送る。コントローラ1230は、出力信号1234を、ステージ1218を支持しかつ位置付けるベース1236に送る。さらに、コントローラ1230は、ライトビームが、基板の選択された位置のみにて光物理学的および光化学的变化を生じさせるのに十分な強度で基板に接触するように、ライトビーム1212の強度を変化させ、またはライトビーム1212を遮断するための信号1238を光源1210に送る。

20

## 【0430】

さらに、幾つかの実施形態においては、コントローラ1230は、ビーム集束組立体1214に、基板の所定の領域にライトビームを、例えば信号1244を用いて走査させる。これにより、コントローラ1230は、システムの他の構成部品に基板をパターン化させる。パターン化は、典型的には、コントローラに記憶された電子設計パターンに基づいて行われる。用途に応じて、基板上にコーティングされたレジストをライトビームがパターン化する場合と、ライトビームが基板を直接に、エッチングなどによりパターン化する場合がある。

30

## 【0431】

かかるシステムの重要な用途は、先に記載したリソグラフィによる方法において用いるマスクおよびレチクルの製造である。例えば、リソグラフィマスクを製造するために、クロムコーティングしたガラス基板を電子ビームを用いてパターン化することができる。ライトビームが電子ビームである場合、ビームライティングが電子ビームを真空中に閉じ込める。ライトビームが、例えば電子ビームまたはイオンビームである場合、ビーム集束組立体は、真空下で荷電粒子を集束しかつ基板上へ向けさせるための4極レンズなどの電界発生器を含む。他に、ライトビームが、X線、紫外線、または可視光線などの輻射ビームである場合には、ビーム集束組立体は、輻射線を集束しかつ基板へ向けさせるための対応する光学素子を含む。

40

## 【0432】

本発明の他の態様、利点および修正は特許請求の範囲内にある。

## 【図面の簡単な説明】

50

- 【図 1 a】 移相器により循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムの略図である。
- 【図 1 b】 本明細書に記載するシステムと一緒に使用するのに適している移相器の略図である。
- 【図 1 c】 本明細書に記載するシステムと一緒に使用するのに適している移相器の略図である。
- 【図 1 d】 本明細書に記載するシステムと一緒に使用するのに適している移相器の略図である。
- 【図 1 e】 本明細書に記載するシステムと一緒に使用するのに適している移相器の略図である。
- 【図 1 f】 図 1 a のシステムと一緒に使用するための電子回路の略図である。
- 【図 2 a】 移相器により循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムの他の実施形態の略図である。
- 【図 2 b】 図 2 a および図 2 c のシステムと一緒に使用するための電子回路の略図である。
- 【図 2 c】 移相器により循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムの他の実施形態の略図である。
- 【図 3 a】 移相器により循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムの他の実施形態の略図である。
- 【図 3 b】 図 3 a のシステムと一緒に使用するための電子回路の略図である。
- 【図 4】 移相器により循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムの他の実施形態の略図である。
- 【図 5 a】 基準ビームと測定ビームとの間の可変制御位相ずれを生成するための周波数変調器により循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムの略図である。
- 【図 5 b】 図 5 a のシステムと一緒に使用するための電子回路の略図である。
- 【図 6 a】 分散測定値を解析することにより循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムのある実施形態の略図である。
- 【図 6 b】 図 6 a のシステムと一緒に使用するための電子回路の略図である。
- 【図 7】 周波数変調器を使用し、分散測定値を解析することにより循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムのある実施形態の略図である。
- 【図 8】 周波数変調器を使用し、分散測定値を解析することにより循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムの他の実施形態の略図である。
- 【図 9 a】 周波数変調器を使用し、分散測定値を解析することにより循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システムの他の実施形態の略図である。
- 【図 9 b】 図 9 a のシステムと一緒に使用するための電子回路の略図である。
- 【図 10】 移相器または周波数変調器のような移相構成部材を使用して、循環エラーを特徴づけ、修正する干渉計システム全体の略図である。
- 【図 11 a】 本明細書に記載し、集積回路を作るのに使用する干渉計システムを含むリソグラフィ・システムの略図である。
- 【図 11 b】 集積回路を製造するためのステップを示すフローチャートである。
- 【図 11 c】 集積回路を製造するためのステップを示すフローチャートである。
- 【図 12】 本明細書に記載する干渉計システムを含むビーム書込みシステムの略図である。

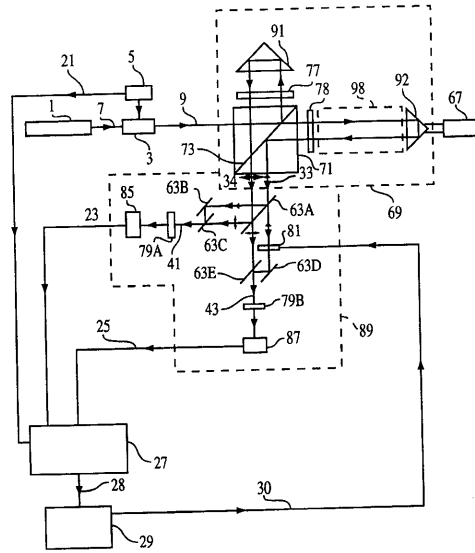
10

20

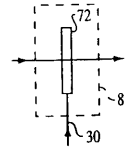
30

40

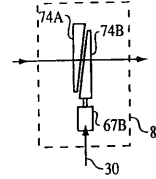
【図1 a】



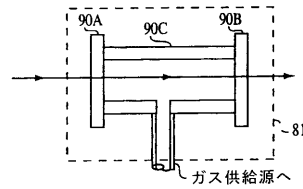
【図1 b】



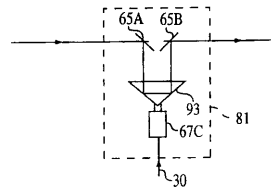
【図1 c】



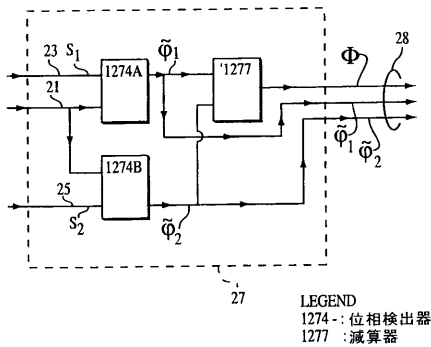
【図1 d】



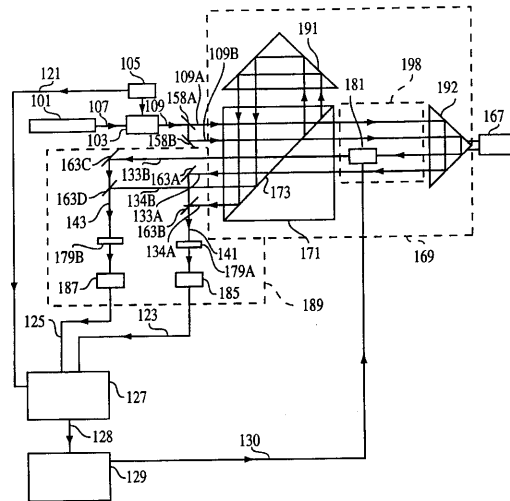
【図1 e】



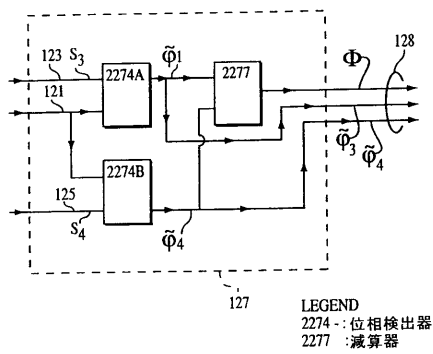
【図1 f】



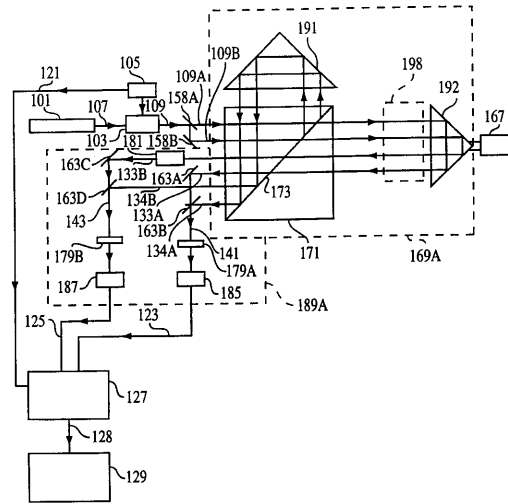
【図2 a】



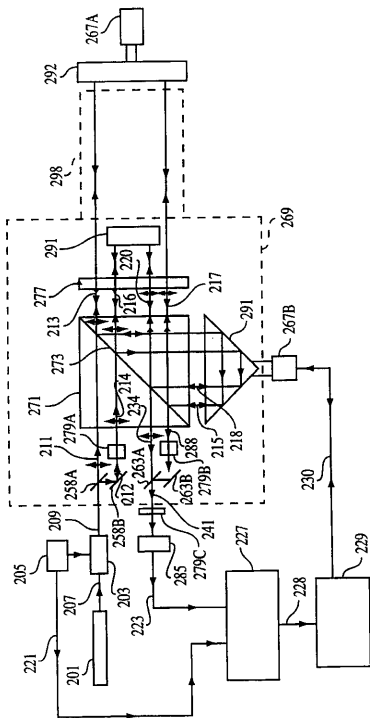
【図 2 b】



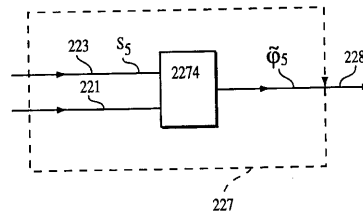
【図 2 c】



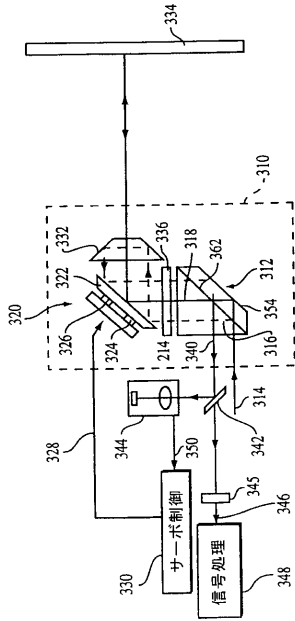
【図 3 a】



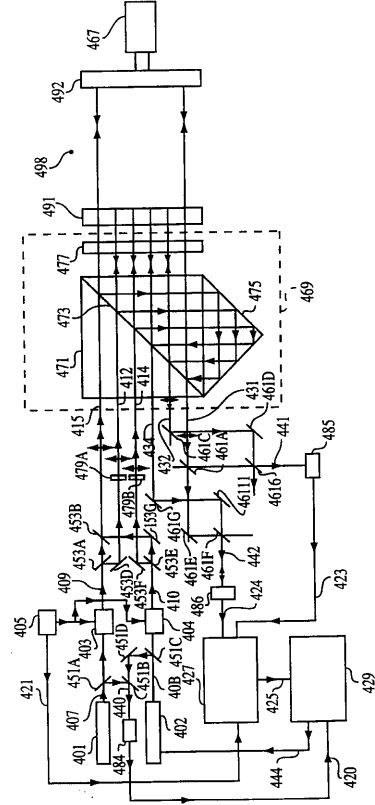
【図 3 b】



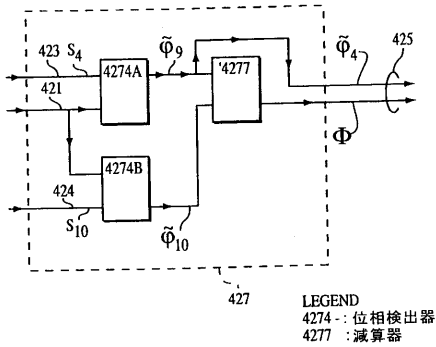
【図4】



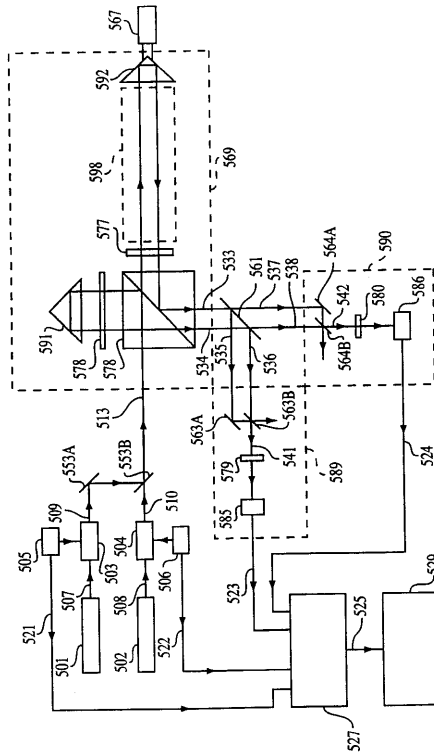
【図5a】



【図5b】

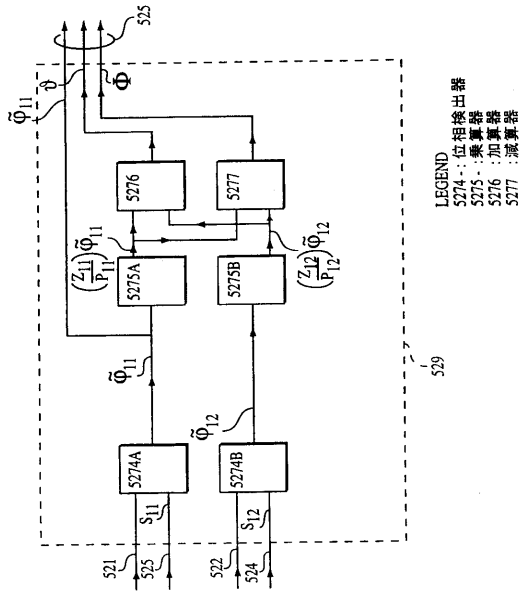


【図6a】

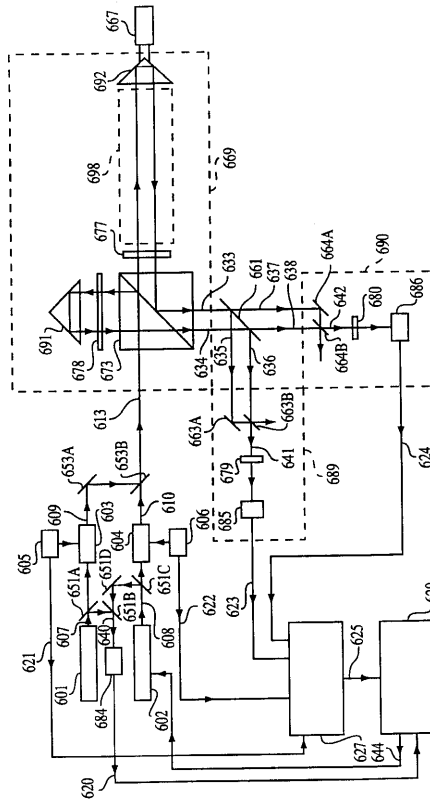




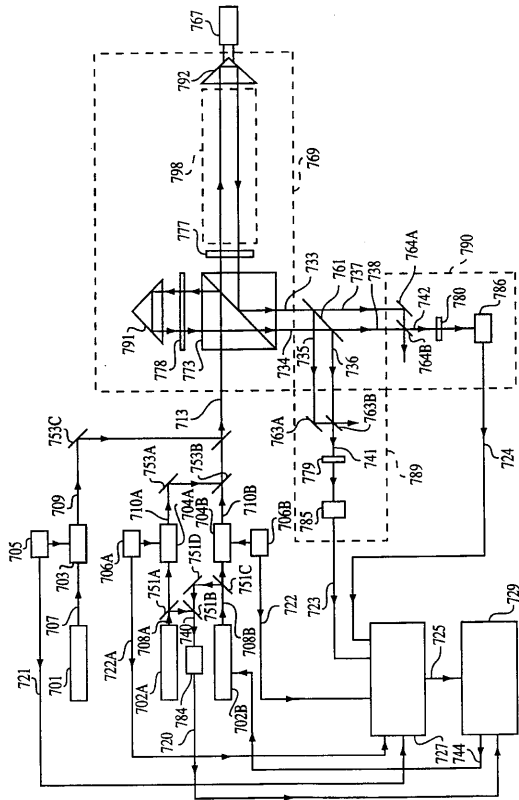
【 図 6 b 】



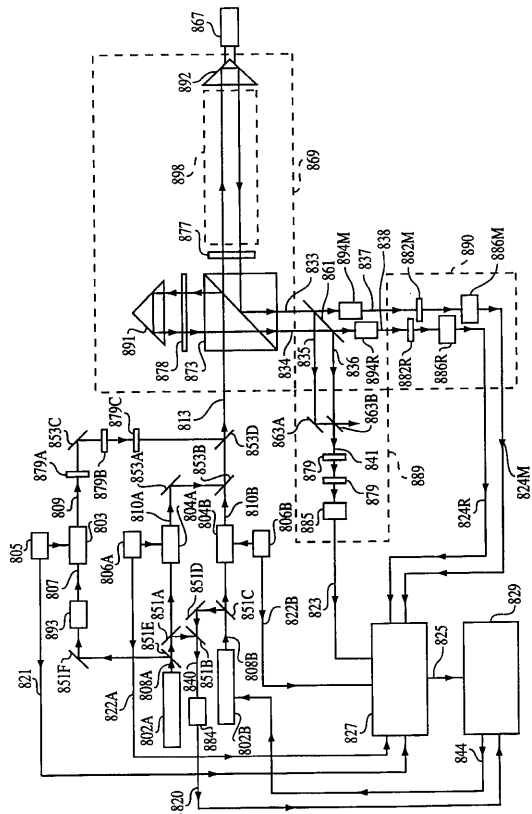
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 a 】







---

フロントページの続き

審査官 後藤 昌夫

(56)参考文献 独国特許出願公開第04031291 (DE, A1)

特開平10-160408 (JP, A)

特開平10-090176 (JP, A)

Mitsuru TANAKA et al., Linear interpolation of periodic error in a heterodyne laser in terferometer at subnanometer levels, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989年 4月, Volume 38, Issue 2, pages 552-554

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 9/00-11/30