

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4250530号
(P4250530)

(45) 発行日 平成21年4月8日(2009.4.8)

(24) 登録日 平成21年1月23日(2009.1.23)

(51) Int. Cl.	F I	
GO 1 B 11/24 (2006.01)	GO 1 B 11/24	D
GO 1 B 9/02 (2006.01)	GO 1 B 9/02	
GO 1 J 3/45 (2006.01)	GO 1 J 3/45	
GO 1 J 9/02 (2006.01)	GO 1 J 9/02	
GO 1 J 9/04 (2006.01)	GO 1 J 9/04	

請求項の数 45 (全 42 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2003-551476 (P2003-551476)
 (86) (22) 出願日 平成14年12月4日(2002.12.4)
 (65) 公表番号 特表2005-512075 (P2005-512075A)
 (43) 公表日 平成17年4月28日(2005.4.28)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2002/038660
 (87) 国際公開番号 W02003/050470
 (87) 国際公開日 平成15年6月19日(2003.6.19)
 審査請求日 平成17年9月28日(2005.9.28)
 (31) 優先権主張番号 60/339, 214
 (32) 優先日 平成13年12月10日(2001.12.10)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)
 (31) 優先権主張番号 10/304, 209
 (32) 優先日 平成14年11月26日(2002.11.26)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(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)
 (74) 代理人 100068755
 弁理士 恩田 博宣
 (74) 代理人 100105957
 弁理士 恩田 誠
 (72) 発明者 デック、レスリー エル.
 アメリカ合衆国 06457 コネチカッ
 ト州 ミドルタウン バレー ドライブ
 48

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 位相シフト干渉分析の方法及びシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

干渉分析方法であって、

異なる一部分の光学波面を合成することにより光学干渉画像を形成することであって、各一部分の光学波面は、複数の表面のうちの対応する一つから反射されたものである、前記光学干渉画像を形成すること、

異なる光路分離を有する複数の表面の対が干渉信号に異なる影響を生じさせる光学波面の特性の変化に応じて、前記光学干渉画像の異なる位置における干渉信号を記録すること

、
 少なくとも一つの位置の干渉信号を変換して、複数の表面の各対に対応するスペクトル座標においてピークを有するスペクトルを生成すること、

前記複数の表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標を認識することを備え、

前記スペクトルは、前記干渉信号を光路長 (OPL) 領域に変換することにより生成される、干渉分析方法。

【請求項 2】

各位置について、前記表面の選択された対に対応するピークの前記スペクトル座標における前記干渉信号のスペクトル位相を抽出することを更に備える、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記干渉信号は、前記光学波面の前記光周波数を変化させることに応じて前記光学干渉画

像の異なる位置に記録される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記干渉信号は、前記光学波面の伝播方向を変化させることに応じて前記光学干渉画像の異なる位置に記録される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記光学波面の伝播方向を変化させることは、前記光学波面を生成するために使用される照射源点の位置を変化させることを備える、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

前記光学波面の伝播方向を変化させることは、前記光学波面を生成するために使用される環状光源の直径を変化させることを備える、請求項 4 に記載の方法。

10

【請求項 7】

付加の一部分の前記光学波面に応じて生成される基準キャビティからの基準位相をモニタすることを更に備える、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

前記スペクトルは、前記干渉信号を前記モニタされた基準位相に基づき光路長領域 (O P L) に変換することにより生成される、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 9】

前記スペクトル S は $S(D) = |OPLT(D)|^2$ に対応し、ここで、 D は光路差に対する変数、 $OPLT(D)$ は、

【数 1】

20

$$OPLT(D) = \sum_{j=0}^{N-1} I_j W_j \exp\left(-i\phi_{M_j} \frac{D}{D_M}\right) \Delta\phi_{M_j},$$

として表わされる O P L 変換であり、ここで、前記光学波面特性の変化に対して N 個の漸増分があり、 j は前記 N 個の漸増分に対する指数、 I_j は漸増分 j における干渉信号、 W_j は前記漸増分 j における重み付け関数に対する値であり、 D_M は前記基準キャビティの光路長に対応し、 ϕ_{M_j} は漸増分 j における前記モニタされた基準位相であり、 $\Delta\phi_{M_j}$ は漸増分 j に対応する前記モニタされた基準位相における漸増分である、請求項 8 に記載の方法。

30

【請求項 10】

前記対応するピークの O P D 座標からの前記表面の選択された対の間での光路差を決定することを更に備える、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 11】

各位置について、前記表面の選択された対に対応する前記ピークのスペクトル座標における干渉信号のスペクトル位相を抽出することを更に備え、抽出された位相 $\phi(D)$ は、 $\phi(D) = \arg [OPLT(D)]$ から計算され、ここで、 D はピークのスペクトル座標である、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 12】

各位置について前記干渉信号の前記スペクトル位相を抽出することは、残りの位置の各々について前記干渉信号を変換して、前記表面の選択された対に対応するピークを有する対応するスペクトルを生成することを備える、請求項 2 に記載の方法。

40

【請求項 13】

各位置について前記干渉信号の前記スペクトル位相を抽出することは、前記表面の選択された対に対応する前記ピークのスペクトル座標に関して残りの位置の各々について前記干渉信号を変換することを備える、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 14】

前記光学干渉画像の複数の位置についての前記抽出された位相の変化に基づき、前記表面の選択された対の間での光路差の変化を決定することを更に備える、請求項 2 に記載の方法。

50

【請求項 15】

前記決定された変化に基づき前記表面の選択された対の一つの表面プロファイルを計算することを更に備える、請求項 14 に記載の方法。

【請求項 16】

前記決定された変化に基づき前記表面の選択された対の間の光学的厚さプロファイルを計算することを更に備える、請求項 14 に記載の方法。

【請求項 17】

前記決定された変化に基づき前記表面の選択された対の間の物理的厚さプロファイルを計算することを更に備える、請求項 14 に記載の方法。

【請求項 18】

前記決定された変化に基づき前記表面の選択された対の間の均一性プロファイルを計算することを更に備える、請求項 14 に記載の方法。

10

【請求項 19】

前記複数の表面は、少なくとも一つの基準表面及び試験物体の少なくとも一つの表面を備える、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 20】

前記干渉信号を記録することは、前記波面の特性を前記変化させる間、及び、前記強度変化に対する干渉信号を補償する間の前記光学的波面の強度変化をモニタすることを備える、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 21】

前記スペクトル中の前記ピークの少なくともいくつかの振幅に基づき、前記表面の選択された対の少なくとも一つに対する表面反射率についての情報を計算することを更に備える、請求項 1 に記載の方法。

20

【請求項 22】

前記表面の選択された対は約 70% を超える反射率を有する高精細キャビティの表面である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 23】

前記複数の位置の各々におけるスペクトルに基づき、前記表面の選択された対の間に欠陥が存在するかどうかを決定することを更に備える、請求項 13 に記載の方法。

【請求項 24】

前記欠陥の前記存在は、前記複数の位置の少なくとも一つのスペクトルにおける付加のピークに対応する、請求項 23 に記載の方法。

30

【請求項 25】

前記表面の選択された対は光学部品の前面及び背面であり、前記欠陥は前記光学部品内の気泡を備える、請求項 23 に記載の方法。

【請求項 26】

前記表面の選択された対は光学部品の前面及び背面であり、前記欠陥は前記光学部品内の不純物を備える、請求項 23 に記載の方法。

【請求項 27】

前記複数の表面の第 2 の選択された対に対応するピークのスペクトル座標を認識することを更に備える、請求項 1 に記載の方法。

40

【請求項 28】

各位置について、前記第 1 の表面の選択された対に対応するピークの座標及び前記第 2 の表面の選択された対に対応するピークの座標における干渉信号のスペクトル位相を抽出することを更に備える、請求項 27 に記載の方法。

【請求項 29】

前記選択された表面は第 1 の基準表面、光学部品の第 1 の表面、及び第 2 の基準表面を含み、前記波面位置の一つは、前記光学部品の少なくとも一つの内部表面からの反射を介して前記第 2 の基準表面に指向される、請求項 28 に記載の方法。

【請求項 30】

50

前記抽出された位相に基づき、前記光学部品の前記第 1 の表面に対して前記光学部品の前記内部表面の角度配向を決定することを更に備える、請求項 29 に記載の方法。

【請求項 31】

前記少なくとも一つの内部表面は内部角を形成する 2 つの内部表面を含み、方法は前記抽出された位相に基づき前記内部角を決定することを更に備える、請求項 29 に記載の方法。

【請求項 32】

前記光学部品はプリズムである、請求項 29 に記載の方法。

【請求項 33】

前記光学部品は公称直角を規定する 2 つの内部表面を有する直角プリズムであり、前記少なくとも一つの内部表面は前記公称直角を規定する前記 2 つの内部表面を含み、前記光学部品の第 1 の表面は前記直角プリズムの前面である、請求項 32 に記載の方法。

10

【請求項 34】

前記光学部品は公称直角を規定する 2 つの表面を有する直角プリズムであり、前記少なくとも一つの内部表面は前記公称直角を規定する前記 2 つの表面を接続する斜辺表面であり、前記光学部品の第 1 の表面は前記公称直角を規定する前記 2 つの表面の一つである、請求項 32 に記載の方法。

【請求項 35】

前記選択された表面は光学部品の複数の表面を備える、請求項 28 に記載の方法。

【請求項 36】

前記光学部品はプリズムである、請求項 35 に記載の方法。

20

【請求項 37】

前記選択された表面は光学組立体の複数の表面を含み、前記複数の表面の一つは前記光学組立体の 2 つの部品間の界面である、請求項 27 に記載の方法。

【請求項 38】

前記選択された表面は光学部品の表面を含み、前記選択された表面の一つから反射された一部分の前記光学波面は、前記光学部品の内部表面からの反射を介して前記表面に指向される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 39】

前記選択された表面は光学組立体の表面を含み、前記選択された表面の一つから反射された一部分の前記光学波面は、前記光学組立体の 2 つの部品間の界面からの反射を介して前記表面に指向される、請求項 1 に記載の方法。

30

【請求項 40】

光学部品中の欠陥の存在を決定するための方法であって、

光学部品の少なくとも一つの表面を含む複数の表面からそれぞれ反射される異なる一部分の光学波面を合成することにより光学干渉画像を形成すること、

異なる光路分離を有する前記複数の表面の対が前記干渉信号に異なる影響を生じさせる前記光学波面の特性の変化に応じて、前記光学干渉画像の異なる位置における干渉信号を記録すること、

少なくとも一つの位置についての干渉信号を変換し、前記複数の表面の各対に対応してスペクトル座標においてピークを有するスペクトルを生成することであって、前記スペクトルは、前記干渉信号を光路長 (OPL) 領域に変換することにより生成される、前記生成すること、

40

前記スペクトルに基づき前記光学部品に欠陥が存在するかどうかを決定することを備え、前記欠陥が、少なくとも一つの位置について、前記スペクトルにおける異常なピークに対応する、方法。

【請求項 41】

前記欠陥は前記光学部品内の気泡を含む、請求項 40 に記載の方法。

【請求項 42】

前記欠陥は前記光学部品内の不純物を含む、請求項 40 に記載の方法。

50

【請求項 4 3】

前記欠陥は前記光学部品の 2 つの下位部品間の不完全な結合の領域を含む、請求項 4 0 に記載の方法。

【請求項 4 4】

光学組立体の組み立て方法であって、

光学組立体を構成するために第 1 の光学部品を第 2 の光学部品に装着すること、

請求項 1 に記載の方法を使用して前記光学組立体を干渉分析的に特性付けること、

前記干渉分析的な特性付けに基づき前記第 2 の光学部品に対して前記第 1 の光学部品を再設定することを備える、方法。

【請求項 4 5】

システムであって、

前記光源であって、該光源から導出される光学波面の特性を変化させるように構成された変調部品を含む前記光源と、

動作中、異なる一部分の光学波面を複数の表面からそれぞれ反射するように向け、続いて前記異なる一部分の光学波面を再合成して光学干渉画像を形成する干渉計と、

前記変調部品による前記光学波面の特性の変化に応じて、前記光学干渉画像の異なる位置における干渉信号を記録するために配置された複数の基本光検出器であって、前記波面特性の変化は、異なる光路分離を有する前記複数の表面の対が前記干渉信号に異なる影響を生じさせる、前記複数の基本光検出器と、

前記光源及び前記光検出器に接続され、動作中に、少なくとも一つの位置について前記干渉信号を変換し、前記複数の表面の各対に対応するスペクトル座標においてピークを有するスペクトルを生成し、かつ、前記複数の表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標を認識する制御装置であって、前記干渉信号を光路長 (OPL) 領域に変換して前記スペクトルを生成する前記制御装置とを備えるシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は干渉分析に関し、更に詳細には、位相シフト干渉分析に関する。

【背景技術】

【0002】

本出願は、2000年8月8日出願の「Fourier Transform Phase Shifting Interferometry」と題された米国仮出願第60/223,803号の優先権を主張する2001年7月31日出願の「Frequency Transform Phase Shifting Interferometry」と題された米国出願第09/919,511号明細書の一部継続出願である。

【0003】

本出願は、本願明細書に援用する2001年12月10日出願の「Frequency Transform Phase Shifting Interferometry」と題された米国仮出願第60/339,214号の優先権も主張する。

【0004】

干渉分析の光学的技術は、リソグラフィ用フォトマスクに使用されるガラス基板などの精密光学部品の光学的な厚さ、平坦度、及び他の幾何学的形状、ならびに屈折率の特性を測定するために広範に使用されている。

【0005】

例えば、測定表面の表面プロファイルを測定するために、干渉計を使用して、測定表面から反射された測定波面を基準表面から反射された基準波面と合成して光学干渉パターンを形成することが可能である。光学干渉パターンの強度プロファイルの空間的变化は、合成された測定波面と基準波面との間の位相差に対応し、その位相差は基準表面に対する測定表面のプロファイルの変化により引き起こされる。位相シフト干渉分析 (PSI) は、位相差及び対応する測定表面のプロファイルを正確に決定するために使用可能である。

10

20

30

40

50

【 0 0 0 6 】

P S Iを使用すれば、基準波面と測定波面との間の複数の位相シフトの各々について光学干渉パターンが記録され、光学干渉の少なくとも1サイクル全体（例えば、強め合い干渉から、弱め合い干渉に、そして、強め合い干渉に戻る）にわたる一連の光学干渉パターンが生成される。光学干渉パターンは、パターンの各空間的位置についての一連の強度値を形成し、各一連の強度値は、位相シフトに対して正弦的な依存を有し、位相のずれは、その空間的位置についての合成された測定波面と基準波面との間の位相差に等しい。当技術分野で公知の数値技術を使用すると、各空間的位置についての位相のずれは、強度値の正弦的依存から抽出され、基準表面に対する測定表面のプロファイルが提供される。このような数値技術は一般に位相シフトアルゴリズムと呼ばれる。

10

【 0 0 0 7 】

P S Iにおける位相シフトは、基準表面から干渉計への光路長に対する測定表面から干渉計への光路長を変化させることにより、生成可能である。例えば、基準表面は測定表面に対して移動可能である。代わりに、位相シフトは、測定波面及び基準波面の波長を変化させることにより、一定の非ゼロ光路差に対して導入可能である。後者の適用例は、波長調整 P S Iとして知られ、例えばジー・イー・ソマーグレン（G・E・Sommargren）の米国特許第4,594,003号明細書に説明されている。

【 発明の開示 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 8 】

本発明は、P S Iデータが表面の複数の対により規定される干渉分析用のキャビティ内の表面の特定の対に各々が対応するスペクトル的に分離されたピークを生成する領域に変換される方法及びシステムを特徴とする。各ピークは、キャビティ内の表面の対応する対についての光路長及び表面反射率の情報を提供する。その結果、そのようなキャビティからの干渉分析のデータにより、複数の表面についての同時の情報が提供される。例えば、いずれの特定の表面についての情報も包括的に決定可能である。更に、本発明の実施形態は、情報が単一の測定から導出されるため、異なるプロファイルを有する表面間の3次元的關係の特徴が記憶される。更に、表面の単一の対により形成されるキャビティについてさえ、本発明の実施形態は、干渉が特定の周波数で発生することを必要としない。特に、情報は、隣接するデータ点間のプリセット位相間隔に対する必要性なしに決定可能であり、位相間隔は関心の対象となる特定のキャビティの長さに関連する。

20

30

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 9 】

スペクトル的に分離されたピークを生成するために、干渉信号は、異なる周波数の異なる光路長のキャビティからのものを変調するいずれかの方法を使用して位相シフト可能である。例えば、波長調整された P S I データは、このような結果を作り出す。なぜなら、光周波数の変化は光路長（O P L）に比例する干渉位相の対応する変化を誘導するからである。同様に、例えば、干渉信号は、キャビティを照らす光ビームの傾斜角を変化させることにより位相シフト可能である。

【 0 0 1 0 】

位相シフトが実質的に時間において線形である実施形態において、変換は、干渉信号を、時間領域から周波数領域に変換する周波数変換（例えば、フーリエ変換）であってもよい。このような場合、変換領域における各周波数は特定の O P L に対応する。他の実施形態において、干渉信号は O P L 領域に変換される。このような変換は位相シフト成分（例えば、波長調整された光源の調整特性）を較正すること、及び、位相シフトにおけるいかなる非線形性についても周波数変換を補償することにより達成可能である。代わりに、位相シフトは、例えば（後に O P L 変換と呼ぶ）干渉信号の O P L 領域への直接変換を可能にするための基準キャビティを使用して、リアルタイムにモニタ可能である。

40

【 0 0 1 1 】

単一及び複数の表面プロファイルを決定することに加えて、光学的な厚さ、物理的な厚

50

さ、及び均一性（すなわち、屈折率の変化）を決定するために、複数の表面对についての情報を使用する本発明の実施形態が開示される。更に、本技術は曲面、精密キャビティ、プリズム、くさび、及び多部品光学組立体、ならびに、内角、界面、及びこのような構造中の欠陥などの複合光学部品を測定するために使用可能である。

【 0 0 1 2 】

全体として、一つの態様において、本発明は、i) 複数の表面から反射される光学波面の異なる部分を合成することにより光学干渉画像を形成すること、ii) 異なる光路分離を有する複数の表面の対が干渉信号に異なる影響を生じさせる光学波面の特性の変化に応じて、光学干渉画像の異なる位置における干渉信号を記録すること、iii) 少なくとも一つの位置の干渉信号を変換して、複数の表面の各対に対応するスペクトル座標においてピークを有するスペクトルを生成すること、及びiv) 複数の表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標を認識することを含む干渉分析の方法を特徴とする。

10

【 0 0 1 3 】

方法の実施形態は以下の特徴のいずれかを含み得る。

複数の表面は、少なくとも一つの基準表面及び試験物体の少なくとも一つの表面を含み得る。同じく、例えば、選択された表面は光学部品又は光学組立体の複数の表面を含み得る。更に、ある実施形態において、選択された表面の一つから反射された波面の一部は光学部品の内部表面からの反射を介してその表面に指向される。同様に、他の実施形態において、選択された表面の一つから反射された波面の一部は、光学組立体の2つの部品間の界面からの反射を介してその表面に指向される。

20

【 0 0 1 4 】

方法は、各位置について、表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標における干渉信号のスペクトル位相を抽出することを更に含み得る。ある実施形態において、各位置についての干渉信号のスペクトル位相を抽出することは、表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標に関して、残りの位置の各々についての干渉信号を変換することを含む。他の実施形態において、各位置についての干渉信号のスペクトル位相を抽出することは、残りの位置の各々についての干渉信号を変換し、表面の選択された対に対応するピークを有する対応スペクトルを生成することを含む。

【 0 0 1 5 】

方法は、光学干渉画像の複数の位置についての抽出位相における変化に基づいて、表面の選択された対の間の光路距離の変化を決定することを更に含み得る。更に、方法は、決定された変化に基づき、選択された対の表面の一つの表面プロファイルを計算すること、決定された変化に基づき、選択された対の表面の間の光学的厚さプロファイルを計算すること、決定された変化に基づき、選択された対の表面の間の物理的厚さプロファイルを計算すること、及び/又は決定された変化に基づき、選択された対の表面の間の均一性プロファイルを計算することを更に含み得る。

30

【 0 0 1 6 】

干渉信号は、光学波面の光周波数を変化させることに応じて、光学干渉画像の異なる位置において記録可能である。

代わりに、干渉信号は、光学波面の伝播方向（例えば、傾斜角）を変化させることに応じて、光学干渉画像の異なる位置において記録可能である。例えば、光学波面の伝播方向の変化は、光学波面を生成するために使用される発光源点の位置を変化させることを含み得る。更に、光学波面の伝播の変化は、光学波面を生成するために使用される環状光源の直径を変化させることを含み得る。

40

【 0 0 1 7 】

スペクトルは、時間領域から周波数領域に干渉信号を変換することにより生成可能である。代わりに、スペクトルは干渉信号を光路差（OPD）領域に変換することにより生成可能である。

【 0 0 1 8 】

方法は、光学波面の付加の部分に応じて生成される基準キャビティからの基準位相をモ

50

ニタすることを更に含み得る。例えば、スペクトルはモニタされた基準位相に基づき、干渉信号を光路差領域（OPD）に変換することにより生成可能である。そのような実施形態において、スペクトルSは $S(D) = |OPLT(D)|^2$ に対応可能であり、ここで、Dは光路差に対する変数、OPLT(D)は以下のように表し得るOPD変換である。

【0019】

【数1】

$$OPLT(D) = \sum_{j=0}^{N-1} I_j W_j \exp\left(-i\varphi_{M_j} \frac{D}{D_M}\right) \Delta\varphi_{M_j},$$

10

ここで、光学波面特性の変化に対してN個の漸増分があり、jはN個の漸増分に対する指数、 I_j は漸増分jにおける干渉信号、 W_j は漸増分jにおける重み付け関数に対する値であり、 D_M は基準キャビティの光路長に対応し、 φ_{M_j} は漸増分jにおけるモニタされた基準位相であり、 $\Delta\varphi_{M_j}$ は漸増分jに対応するモニタされた基準位相における漸増分である。ある実施形態において、重み付け関数は使用されず、例えば、 $W_j = 1$ である。方法は、対応するピークのOPD座標からの表面の選択された対の間での光路差を決定することを更に含み得る。このOPDの決定は一つ又は複数の位置に対して行い得る。方法は、各位置について、表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標における干渉信号のスペクトル位相を抽出することも含み得て、抽出された位相は、 $(D) = \arg[OPLT(D)]$ から計算可能であり、ここで、Dはピークのスペクトル座標である。

20

【0020】

干渉信号を記録することは、波面の特性の変化及び強度変化についての干渉信号の補償の間に、光学波面の強度変化をモニタすることを更に含み得る。

方法は、スペクトルのピークの少なくともいくつかの振幅に基づいて、表面の選択された対の少なくとも一つの表面反射率についての情報を計算することを更に含み得る。

【0021】

表面の選択された対は精密キャビティの表面であってよい。例えば、精密キャビティの表面は約70%を超える反射率を有し得る。

30

方法は、複数の位置の各々におけるスペクトルに基づき、選択された表面の対の間に欠陥が存在するかどうかを決定することを更に含み得る。欠陥の存在は、複数の位置の少なくとも一つにおけるスペクトルの更に多くのピークに対応可能である。例えば、表面の選択された対は、光学部品の前面及び背面であってよく、欠陥は光学部品内の気泡又は光学部品内の不純物であってよい。

【0022】

方法は、複数の表面の第2の選択された対に対応するピークのスペクトル座標を認識することを更に含み得る。更に、方法は、各位置について、第1の選択された表面の対に対応するピークの座標及び第2の選択された表面の対に対応するピークの座標における干渉信号のスペクトル位相を抽出することを更に含み得る。例えば、選択された表面は光学部品（例えば、プリズム）の複数の表面を含み得る。同様に、例えば、選択された表面は光学組立体の複数の表面を含み得て、複数の表面の一つは光学組立体の2つの部品の間の界面である。

40

【0023】

さらなる実施形態において、表面の選択された対は第1の基準表面、光学部品の第1の表面、及び、第2の基準表面を含み得て、波面部分の一つは光学部品の少なくとも一つの内部表面からの反射を介して第2の基準表面に指向される。このような場合、方法は、抽出された位相に基づき、光学部品の第1の表面に対して、光学部品の内部表面の角配向を決定することを更に含み得る。同様に、方法は、抽出された位相に基づき、光学部品の内部角を決定することを更に含み得て、少なくとも一つの内部表面は内部角を規定する2つ

50

の内部表面を含む。例えば、光学部品はプリズム（例えば、直角プリズム）であってもよい。ある実施形態において、直角プリズムは公称の直角を規定する2つの内部表面を有し、少なくとも一つの内部表面は公称の直角を規定する2つの内部表面を含み、光学部品の第1の表面は直角プリズムの前面である。他の実施形態において、直角プリズムは公称の直角を規定する2つの表面を有し、少なくとも一つの内部表面は公称の直角を規定する2つの表面を接続する斜辺表面であり、光学部品の第1の表面は公称の直角を規定する2つの表面の一つである。

【0024】

他の態様において、本発明は、光学組立体を構成するために第1の光学部品を第2の光学部品に装着すること、上記した干渉分析の方法を使用して光学組立体を干渉分析的に特性付けること、及び、干渉分析的な特性付けに基づき、第2の光学部品に対して第1の光学部品を据えることを含む光学組立体を構成する方法を特徴とする。

10

【0025】

全体として、他の態様において、本発明は、光学部品における欠陥の存在を決定するための方法の特徴とする。方法は、i) 複数の表面が光学部品の少なくとも一つの表面を含み、複数の表面から反射される光学波面の異なる部分を合成することにより光学干渉画像を形成すること、ii) 異なる光路分離を有する複数の表面の対が干渉信号に異なる影響を生じさせる光学波面の特性の変化に応じて、光学干渉画像の異なる位置における干渉信号を記録すること、iii) 少なくとも一つの位置の干渉信号を変換して、複数の表面の各対に対応してスペクトル座標においてピークを有するスペクトルを生成すること、及びiv) スペクトルに基づき光学部品に欠陥が存在するかどうかを決定することであって、欠陥が、少なくとも一つの位置について、スペクトルにおける異常なピークに対応することを含む。例えば、欠陥は光学部品内の気泡、光学部品内の不純物、及び/又は、光学部品の2つの下部部品間の不完全な結合の領域を含み得る。

20

【0026】

全体として、他の態様において、本発明は、i) その光源から導出される光学波面の特性を変化させるように構成された変調部品を含む光源、ii) 動作中、光学波面の異なる部分を複数の表面に指向し、光学干渉画像を形成するために異なる部分を再編成する干渉計、iii) 変調部品による光学波面特性の変化に応じて、光学干渉画像の異なる位置における干渉信号を記録するための複数の基本光検出器であって、波面特性の変化により異なる光路分離を有する複数の表面の対が干渉信号に異なる影響を生じさせる検出器、及びiv) 光源及び光検出器に接続され、動作中に、少なくとも一つの位置の干渉信号を変換し、複数の表面の各対に対応してスペクトル座標においてピークを有するスペクトルを生成し、かつ、複数の表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標を認識する電子制御装置を含むシステムを特徴とする。

30

【0027】

本システムの実施形態は、以下の特徴のいずれかを含み得る。

干渉計は少なくとも一つの基準表面を含み得て、複数の表面は少なくとも一つの基準表面及び試験物体（例えば、光学部品又は組立体）の少なくとも一つの表面を含む。

【0028】

電子制御装置は、異なる位置の各々についての表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標における干渉信号のスペクトル位相を抽出可能である。例えば、制御装置は、残りの位置の各々についての干渉信号を変換し、表面の選択された対に対応するピークを有する対応スペクトルを生成することにより、各位置についての干渉信号のスペクトル位相を抽出可能である。代わりに、例えば、制御装置は、表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標に関して残りの位置の各々についての干渉信号を変換することにより、各位置についての干渉信号のスペクトル位相を抽出可能である。同様に、制御装置は、光学干渉画像の複数の位置についての抽出位相の変化に基づき、表面の選択された対間の光路距離の変化を更に決定可能である。

40

【0029】

50

光源は周波数調整可能な光源であってよく、変調部品は光源の出力周波数を変化させるドライバであってよく、変調部品により変化された波面の特性は波面の周波数であってよい。

【 0 0 3 0 】

代わりに、変調部品は複数の表面に入射する波面の傾斜角を変化させるように構成可能であり、変調部品により変化された波面の特性は傾斜角であってよい。例えば、変調部品は、光源の発光源点の位置を変化させることにより傾斜角を変化させるように構成可能である。更に、光源は環状出力を生成するように構成可能であり、変調部品は環状出力の直径を変化させるように構成可能である。

【 0 0 3 1 】

制御装置は、干渉信号を時間領域から周波数領域に変換することによりスペクトルを生成可能である。代わりに、制御装置は干渉信号を光路差 (O P D) 領域に変換することによりスペクトルを生成する。

【 0 0 3 2 】

干渉計は基準キャビティ、及び、光学波面の付加の部分に応じて生成される基準キャビティからの基準位相をモニタするための検出器を含み得る。このような実施形態において、制御装置は、モニタされた基準位相に基づき、干渉信号を光路差領域 (O P D) に変換することによりスペクトルを生成可能である。例えば、スペクトル S は $S (D) = | O P L T (D) | ^ 2$ に対応可能であり、ここで、 D は光路差に対する変数、 $O P L T (D)$ は以下のように表し得る O P D 変換である。

【 0 0 3 3 】

【 数 2 】

$$OPLT(D) = \sum_{j=0}^{N-1} I_j W_j \exp \left(-i \varphi_{M_j} \frac{D}{D_M} \right) \Delta \varphi_{M_j},$$

ここで、光学波面特性の変化に対して N 個の漸増分があり、 j は N 個の漸増分に対する指数、 I_j は漸増分 j における干渉信号、 W_j は漸増分 j における重み付け関数に対する値であり、 D_M は基準キャビティの光路長に対応し、 φ_{M_j} は漸増分 j におけるモニタされた基準位相であり、 $\Delta \varphi_{M_j}$ は漸増分 j に対応するモニタされた基準位相における漸増分である。ある実施形態において、重み付け関数は使用されず、例えば、 $W_j = 1$ であることに注意されたい。制御装置は、対応するピークの O P D 座標からの表面の選択された対の間での光路差を更に決定可能である。この O P D の決定は一つ又は複数の位置に対して行い得る。制御装置は、各位置について、表面の選択された対に対応するピークのスペクトル座標における干渉信号のスペクトル位相も抽出可能であり、抽出された位相 $\varphi_{M_j} (D) = \arg [O P L T (D)]$ から計算可能であり、ここで、 D はピークのスペクトル座標である。

【 0 0 3 4 】

制御装置は、波面特性の変化中、光学波面の強度変化をモニタ可能であり、強度変化についての干渉信号を補償する。

制御装置は、スペクトルのピークの少なくともいくつかの振幅に基づいて、表面の選択された対の少なくとも一つの表面反射率についての情報を計算可能である。

【 0 0 3 5 】

制御装置は、複数の位置の各々におけるスペクトルに基づき、選択された表面の対の間に欠陥が存在するかどうかを決定可能である。欠陥の存在は複数の位置の少なくとも一つにおけるスペクトルの更に多くのピークに対応可能である。

【 0 0 3 6 】

制御装置は、更に、複数の表面の第 2 の選択された対に対応するピークのスペクトル座標を認識可能である。更に、各位置について、制御装置は、第 1 の選択された表面の対に

10

20

30

40

50

対応するピークの座標及び第2の選択された表面の対に対応するピークの座標における干渉信号のスペクトル位相を抽出可能である。

【0037】

このような実施形態において、干渉計は第1の基準表面及び第2の基準表面を含み得て、複数の表面は第1及び第2の基準表面ならびに光学部品の第1の表面を含み、干渉計は、波面部分の一つを、光学部品の少なくとも一つの内部表面からの反射を介して第2の基準表面に向けるように構成される。更に、制御装置は、抽出された位相に基づき、光学部品の第1の表面に対して、光学部品の内部表面の角配向を決定可能である。同様に、制御装置は、抽出された位相に基づき、光学部品の内部角を更に決定可能であり、少なくとも一つの内部表面は内部角を規定する2つの内部表面を含む。

10

【0038】

全体として、他の態様において、本発明は、光学部品における欠陥の存在を決定するためのシステムを特徴とする。システムは、i) その光源から導出される光学波面の特性を変化させるように構成された変調部品を含む光源、ii) 動作中、光学波面の異なる部分を複数の表面に指向し、光学干渉画像を形成するために異なる部分を再編成する干渉計、iii) 変調部品による光学波面特性の変化に応じて、光学干渉画像の異なる位置における干渉信号を記録するために配置される複数の基本光検出器であって、波面特性の変化により異なる光路分離を有する複数の表面の対が干渉信号に異なる影響を生じさせる検出器、及び、iv) 光源及び光検出器に接続され、動作中に、少なくとも一つの位置の干渉信号を変換し、複数の表面の各対に対応してスペクトル座標においてピークを有するスペクトルを生成し、かつ、スペクトルに基づき、光学部品に欠陥が存在するかどうかを決定する電子制御装置であって、欠陥が少なくとも一つの位置についてのスペクトルにおける異常なピークに対応する制御装置を含む。例えば、光源は周波数調整可能な光源であってよく、変調部品は光源の出力周波数を変化させるドライバであってよく、変調部品により変換された波面の特性は波面の周波数であってよい。

20

【0039】

本発明の実施形態は以下の長所のいずれかを含み得る。

位相シフト干渉分析は、線形又は非線形位相シフト漸増分を使用して行い得る。本発明のある実施形態は、キャビティ表面についての表面反射率を測定可能であり、及び/又は、精密キャビティを特性付け可能である。本発明のある実施形態は、光学部品内又は光学部品上の欠陥を三次元で位置検出可能である。本発明のいくつかのシステム及び方法は内部角の測定も行い得て、複数の基本光学組立体を特性付け可能である。複数の基本光学組立体の特性付けは、例えば、部品間の界面の完全性の評価、部品の整列、部品内の欠陥の検出を含み得て、組立体の展開及び使用の前後に行う測定を比較することにより組立体(組立体の部分)の磨耗を較正/評価可能である。

30

【0040】

他に定義されない限り、本明細書中に使用される全ての技術及び科学用語は、本発明の当業者により一般に理解されるものと同じ意味を有する。本明細書で触れた全ての出版物、特許出願、特許、及び他の参照はそれらの全体が本願明細書に援用する。反駁のある場合、定義を含めて、本明細書が支配する。

40

【0041】

本発明の一つ又は複数の実施形態の詳細は添付の図面及び以下の説明に述べる。本発明の他の特徴、目的、及び長所は説明及び図面、ならびに特許請求の範囲から明らかになるう。

【0042】

様々な図面中の同じ参照記号は同じ構成を示す。

【発明を実施するための最良の形態】

【0043】

本発明は、位相シフトを作り出すために、例えば不等光路干渉計(例えば、フィゾー干渉計)における光周波数変調を使用して、位相シフト干渉分析(PSI)を行う方法及び

50

システムを特徴とする。P S Iデータは、表面の複数の対により規定される干渉分析用キャビティ内の表面の異なる対に各々が対応する、スペクトル的に分離されたピーク（例えば、周波数ピーク）を生成するために変換（例えば、周波数変換）される。干渉分析技術の実施形態は、以下、周波数変換位相シフト干渉分析（以下、「FTPSI」と呼び得る。そのような実施形態FTPSIには、使用される変換の特定のタイプに関係なく言及する。例えば、変換は後に説明するOPL変換であってもよい。

【0044】

2表面キャビティにおいて、光周波数の変化は光路長（OPL）に比例する干渉位相において対応する変化を誘導する。同様に、2個を超える表面を有するキャビティにおいて、複数の反射性表面は、光周波数における同じ変化に対して、異なる位相シフトを有する干渉パターンを引き起こす。異なる位相シフトの各々は、キャビティ内の各表面对（すなわち、基本となる2表面キャビティ）間の光路差に対応する。その結果、このようなキャビティからの波長調整された干渉分析用データは、スペクトル的に分離された周波数ピークを生成するために（例えば、フーリエ変換を使用することにより）周波数領域に変換可能である。各そのようなピークはキャビティ内の表面の特定の対に対応し、表面の対についての光路長情報を提供する。更に、本発明の実施形態は、干渉計内の表面の各対についての干渉位相シフト周波数が互いに区別されるように構成可能である。

【0045】

各キャビティのピーク周波数は、キャビティの公称光学的厚さ及び公称光周波数調整速度から決定可能である。代わりに、各キャビティのピーク周波数は、周波数変換された干渉分析用データから取得可能である。各キャビティの干渉分析用位相は、ほぼピーク周波数において、評価される干渉データの離散フーリエ変換から決定可能である。各キャビティにわたる干渉分析の位相分布（又は、位相マップ）は、各キャビティの例えば光学的厚さの変化を決定するために使用可能である。更に、ある実施形態において、位相マップは屈折率の変化（すなわち、屈折率の横方向変化）、及びキャビティ内の透明な測定物体の物理的厚さの変化を決定するために使用可能である。

【0046】

更に、周波数変換されたデータの高分解能周波数スペクトルを最初に獲得することにより、各キャビティのピーク周波数に対応して正確な値を決定可能である。ピーク周波数のこのような正確な値は、各キャビティの絶対光学的厚さの測定を可能にする。ある実施形態において、このことは、キャビティ内の測定物体の絶対物理的厚さ及び絶対屈折率の決定を可能にする。

【0047】

そのような干渉分析システム100の概略図を図1に示す。システム100は、透明な測定物体101（例えば、光学的平面）の前面102及び背面103からの反射間の光学干渉を測定するように構成される。測定される光学干渉は、基準物体110の及び基準物体120のそれぞれの表面111、121からの付加の反射を含む。例えば、基準物体110及び120は明確な特性の表面を有する基準平面とすることが可能である。より一般的には、表面111と121により規定される基準表面は、明確な特性のものである必要がない。表面102は、表面121から間隙125だけ離間され、表面103は表面111から別の間隙115だけ離間される。システム100は、基準物体110、120に対する物体101の位置決めをするためのマウント、及びコンピュータ190を含む。システム100は、調整可能な光源140（例えば、レーザダイオード）、光源140に接続されて、光源140の出力の光周波数を調整するドライバ145、ビームスプリッタ150、コリメート光学機器130、画像形成光学機器160、CCDカメラ170、及び、カメラ170により検出される画像を記憶するためのフレーム・グラバ180を更に含む。ある実施形態において、単一のデバイスは、制御及び測定の機能の双方を行い得る（例えば、フレーム・グラバ180はコンピュータ190に組み込み可能である）。ドライバ145は、 λ_0 の公称光周波数についての周波数範囲に基づいて光源140の光周波数を調整する。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 8 】

動作中、制御装置 1 9 0 は、ドライバ 1 4 5 に光源 1 4 0 から照射される光の光周波数を制御させ、指定された光周波数の各々について、CCDカメラ 1 7 0 により検出される光学干渉の画像をフレーム・グラバ 1 8 0 に記憶させる。フレーム・グラバ 1 8 0 は画像の各々を制御装置 1 9 0 に送り、制御装置 1 9 0 は P S I アルゴリズムを使用してそれら进行分析する。ある実施形態において、ドライバ 1 4 5 は、一連の干渉画像が記録されるに従って光源 1 4 0 の光周波数を線形的に変調する。代わりに、他の実施形態において、ドライバは光周波数を離散ステップで、又は、他の機能に従って変調可能である。

【 0 0 4 9 】

動作中、光源 1 4 0 は、光周波数 を有する光をビームスプリッタ 1 5 0 に指向し、ビームスプリッタ 1 5 0 は、この光をコリメートレンズ 1 3 0 に指向して、光を平面場にコリメートする。図 5 を参照して以下に更に説明するが、任意に、第 2 のビームスプリッタ（図示しない）は光の一部を光周波数モニタに指向する。表面 1 2 1 は、光の第 1 の部分を反射して第 1 の基準波面 1 0 5 a を形成し、物体 1 0 1 の表面 1 0 2、1 0 3 は光の付加の部分を反射して波面 1 0 5 b、1 0 5 c をそれぞれ形成する。表面 1 1 1 も光の一部を反射して第 2 の基準波面 1 0 5 d を形成する。続いて、レンズ 1 3 0、1 6 0 は、波面 1 0 5 a、1 0 5 b、1 0 5 c、1 0 5 d を CCD カメラ 1 7 0 上に画像形成し、そこで、それらは光学干渉パターンを形成する。光学干渉パターンは、キャビティ 1 0 9 内の高次反射によるものも含む。高次反射は、例えば表面 1 2 1 から反射する光と、表面 1 0 2 で先ず反射し、続いて、表面 1 2 1 で、続いて、再び表面 1 0 2 で反射する光との間の干渉を含む。

【 0 0 5 0 】

分析において、基本的な 2 表面干渉計のキャビティ、例えば、表面 1 2 1 及び表面 1 0 2 により形成されるキャビティにおける光周波数調整で生成される光学干渉パターンを最初に考えた。各表面は物理的な間隙 L だけ離間され、屈折率 n の媒体を含む。例えば、間隙は約 1 の屈折率を有する空気で満たされる。屈折率と間隙の厚さとの積 n L は、光学的厚さと呼ぶ（空気については、これが物理的厚さ L とほぼ等しい）。表面 1 0 2 から反射された波数 k の光線と、表面 1 0 3 から p 回反射した光線との間の総位相差 は以下により得られる。

【 0 0 5 1 】

【 数 3 】

$$\varphi(x, y) = 2pk_nL(x, y) + \Phi = 2pnL(x, y)\frac{2\pi\nu}{c} + \Phi, \quad (1)$$

ここで、 ν は光の光周波数、c は光速、 Φ は全体的に一定の位相である。間隙 L 及び位相に依存する x 及び y は、位相の空間変化を示すものとして式 1 に明確に示される。ある実施形態において、屈折率 n も x 及び y 依存性を有し得る。この位相変化プロファイル、即ち位相マップの抽出は、P S I において典型的に関心の対象となる情報である。この明確な x 及び y 依存性は、明瞭さの目的で以降の式では省略される。

【 0 0 5 2 】

光源の光周波数 を調整することにより、光周波数調整速度 $\dot{\nu}$ 及びキャビティ光路差 $2pnL$ に依存する干渉法位相変化 $\dot{\varphi}$ が以下のように生成される。

【 0 0 5 3 】

10

20

30

40

【数4】

$$\dot{\phi} = \frac{4\pi}{c} \frac{pnLv}{c} [1 + \eta], \quad (2)$$

ここで、ドットは時間に関する微分を表す。項

【0054】

【数5】

$$\eta = \frac{v}{n} \frac{\partial n}{\partial v}$$

10

は屈折率色分散（波長に伴う屈折率の変化）による。屈折率色分散を考慮することにより、特に絶対的測定値についての測定精度が向上され得る。したがって、キャビティ干渉は、以下により得られる周波数 f_c で変化する。

【0055】

【数6】

$$f_c = \frac{2pnLv}{c} [1 + \eta]. \quad (3)$$

20

したがって、基本となるキャビティにおいて、複数の反射事象により、第1次（すなわち、 $p = 1$ ）周波数の高調波である周波数で干渉が生成される。

【0056】

ある実施形態において、光学的厚さ nL 及び光周波数調整速度 \dot{L} に対する公称値が分かれば、周波数 f_c は式3から決定可能である。加えて、周波数 f_c は、CCDカメラ170により測定される干渉強度のデータを周波数領域に変換することにより（例えば、フーリエ変換を使用して）、認識可能である。この変換により周波数スペクトルが生成され、スペクトル中の対応ピークの周波数が認識される。

30

【0057】

一旦周波数 f_c が決定されれば、実質的に線形な周波数調整にとっては、基本となるキャビティの干渉位相も、干渉の離散フーリエ変換（DFT）の複素振幅から復元可能であり、その複素振幅は、キャビティについての代表的な第1次周波数 f_c において評価される。

【0058】

【数7】

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\text{DFT}(f_c))}{\text{Re}(\text{DFT}(f_c))} \right), \quad (4)$$

40

ここで、

【0059】

【数 8】

$$DFT(f_c) = \sum_{j=0}^{N-1} I_j W_j \exp[i \frac{2\pi j f_c}{f_s}]. \quad (5)$$

である。式 5 において、 I_j は光周波数調整の第 j 番目の光周波数において測定される強度サンプルである。 N は得られた強度サンプルの総数である。 W_j はフーリエウインド W に関連するサンプリング重みであり、 f_s はサンプリング速度である。フーリエウインド W は、 f_c から遠い更に多くの周波数、及び有限の観測間隔の効果からの位相評価への要因を抑制するために通常選択される。フーリエウインドの例はハミング (Hamming) ウインド及びターキー (Tukey) ウインドを含む。Tukey ウインドは、 f_c に近い一つ又は複数の更に多くの周波数ピークを有する実施形態において有利となり得る。その理由は、ウインドの先細り幅は、これらの更に多くの周波数を f_c において効果的に重みをゼロにするように選択可能であるからである。

10

【0060】

各 CCD 画素に対する位相の抽出は、キャビティについての位相分布 (x, y) (すなわち、位相マップ) を与える。光学的厚さ (すなわち、相対的な光学的厚さ) の変化は式 1 から決定可能である。更に、基準表面 121 の表面プロファイルが既に分かっている場合、位相分布は表面 102 の表面プロファイルを決定するために使用可能である。式 4 及び 5 により定義される位相抽出の結果により、位相モジュロ 2 が生成されることが分かる。位相の不確定性は、当業者に一般に公知の従来のも 2 位相不確定性接続技術を使用して、位相マップにおいて説明可能である。

20

【0061】

上記の位相抽出分析により、キャビティについての相対的な情報 (すなわち、画素ごとの変化) がもたらされる。キャビティについての絶対的な情報を決定することも可能である。式 3 によれば、第 1 次ピーク周波数 f_c 、周波数調整速度、及び色分散から絶対的な光学的厚さ nL を決定可能である。しかし、この決定の精度は、 f_c 、 \cdot が決定される精度に依存する。更に、絶対的な光学的厚さ nL の x, y 依存性は、CCD カメラ 170 の各画素に対応する干渉強度のデータから第 1 次周波数 f_c を別個に認識することにより決定可能である。

30

【0062】

ある実施形態において、キャビティの小さな部分 (例えば、一つの CCD 画素に対応する部分) の高分解能周波数スペクトルは、 f_c を正確に決定するために取得可能である。これから、キャビティの絶対的な光学的厚さについての正確な値はキャビティのその部分について決定可能である。同じ測定からのデータを使用して、キャビティ全体の低分解能周波数スペクトルが取得可能である。式 4 及び 5 を使用して、この情報はキャビティの相対位相マップ及び相対的な光学的厚さの変化を決定するために使用可能である。したがって、キャビティ全体の絶対的な光学的厚さは、相対的な光学的厚さの変化を、キャビティの小さな部分について決定された絶対的な光学的厚さと参照することにより、決定可能である。周波数スペクトルの分解能及びスペクトル分解能の限界に影響を及ぼすパラメータを以下に検討する。

40

【0063】

上記の分析では、物体 101 が不透明であり、物体 101 の表面 102 からの反射のみを考慮する必要がある状況が適切に説明されている。しかし、ある実施形態において、物体 101 は透明であり、表面 121、102、及び、103 からの反射を考慮すべきである。以降の分析では、基準平面 110 の表面 111 からの反射は無視される。例えば、基準平面 110 は取り除かれる。今、表面の対 121 と 102、121 と 103、及び、102 と 103 にそれぞれ対応する 3 つの第 1 次基本となる 2 つの表面キャビティがある。表面 121 と表面 102 は、距離 L (すなわち、間隙 125) だけ離間されている。以降

50

、間隙 1 2 5 は空気で満たされ、1 に等しい屈折率を有すると仮定する。物体 1 0 1 は厚さ T 及び屈折率 n を有する。干渉計は、全ての基本キャビティが一意の O P L を有するように構成されていると仮定する。第 1 次周波数は、スペクトル的に分離され、いずれの基本キャビティの干渉分析位相は、式 4 及び 5 により得られる周波数分解及び位相抽出を使用して、抽出可能である。したがって、相対的及び絶対的な光学的厚さのプロファイルは、複数の基本キャビティについて同時に生成可能である。

【 0 0 6 4 】

各キャビティについてのピーク周波数 f_c を正確に決定するためには、関心の対象である各ピークをスペクトル的に分解することが必要である。フーリエ分解のスペクトル分解能限界は観測回数に逆比例し、そのため、最低分解可能干渉周波数は、

【 0 0 6 5 】

【 数 9 】

$$f_{\min} = \frac{1+\mu}{\Delta t} = \frac{(1+\mu)f_s}{N} \quad (6)$$

である。全ての第 1 次周波数は分解される f_{\min} により分離されるべきである。パラメータ μ は、実際の事項として導入される。理論的な分解能限界は $\mu = 0$ の時に出現するが、実際には、最低分解可能周波数は、幾分大きくして潜在的な機器の欠陥及び位相エラー感度を補うようにするべきである。

【 0 0 6 6 】

$f_c = f_{\min}$ と設定すると、式 3 により Δv_{\max} の調整範囲に対する最低分解可能光路差が以下により得られることが示唆される。

【 0 0 6 7 】

【 数 1 0 】

$$\Gamma = \frac{c(1+\mu)}{\Delta v_{\max}} \quad (7)$$

これは、例えば、 $\mu = 0$ であれば、80 ギガヘルツの最大調整範囲に対して 3 . 7 5 ミリメートルという結果になる。第 1 次周波数を分離するために、主要なキャビティ間隙は、式 7 により示される限界より大きくすべきである。更に、絶対的な測定値に対して第 1 次ピーク周波数を正確に決定することを所望するなら、調整範囲は式 7 により必要とされるものより大きくすべきである。

【 0 0 6 8 】

採用される分析方法は次のように要約される。すなわち、干渉計キャビティは、各基本キャビティに対する一意の O P L を生成するように構成され、これにより、式 3 で一意の干渉周波数が保証される。続いて、光周波数を変化しつつ、干渉縞がサンプル採取される。続いて、各画素に記録された干渉縞は、フーリエ変換などの周波数変換、及び、変換されたデータから認識される基本キャビティに対応する第 1 次周波数ピークを使用して、スペクトル的に分解可能である。最後に、関心の対象である各周波数ピークにおける空間的位相分布が、式 4 及び式 5 を使用して抽出される。

【 0 0 6 9 】

ある実施形態において、式 5 を使用した特定の第 1 次周波数における周波数変換は、各基本キャビティの位相マップを (式 4 を使用して) 別個に評価するために、データに適用される。位相マップは、例えばキャビティ表面の一つ以上の表面プロファイル、及び / 又は、基本キャビティの一つ以上の相対的な光学的厚さなどの情報を決定するために、使用可能である。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 0 】

代わりに、又は、加えて、ピーク周波数値自体は、対応するキャビティの絶対光学的厚さを決定するために、使用可能であるが、調整範囲は十分な分解能を提供することを条件とする。各キャビティの光学的厚さ及び光学的厚さの変化についての情報は、各キャビティの完全な絶対光学的厚さプロファイルを決めるために、合成可能である。

【 0 0 7 1 】

光学的厚さも、既知の光周波数変化 の間での位相変化 により決定することができる。光学的厚さは、以下のように式 2 から計算される。

【 0 0 7 2 】

【 数 1 1 】

10

$$nL = \frac{\Delta\phi}{\Delta\nu} \frac{c}{4\pi(1+\eta)}, \quad (8)$$

ここで、 及び が同じ時間間隔 t にわたって測定され、導関数 ・及び ・がそれぞれ微分式

【 0 0 7 3 】

【 数 1 2 】

20

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

及び

【 0 0 7 4 】

【 数 1 3 】

$$\frac{\Delta\nu}{\Delta t}$$

30

により近似可能であると仮定する。

【 0 0 7 5 】

ある実施形態において、FTPSI は不連続表面、例えば階段状の表面の表面プロファイルを決めるために使用可能である。例えば、図 2 に示す物体の側面 4 2 0 を考える。側面 4 2 0 は、高さ h によりずれが設けられた 2 つの平行な表面 4 2 0 a 及び 4 2 0 b を有する。表面 4 2 0 a、4 2 0 b は、基準平坦表面 4 1 0 と実質的に平行である。表面の対 4 1 0 と 4 2 0 a、及び、4 1 0 と 4 2 0 b は間隙 4 3 0 及び 4 4 0 だけそれぞれ離間される。

40

【 0 0 7 6 】

上記したように、側面 4 2 0 の FTPSI 分析により、間隙 4 3 0 及び 4 4 0 に対して異なるピーク周波数がもたらされる。表面 4 2 0 a 及び 4 2 0 b に対する表面プロファイルは、上記したように、各キャビティのスペクトル分析により取得可能である。加えて、表面 4 2 0 a と 4 2 0 b の間の段差の高さは、間隙 4 3 0 及び 4 4 0 の光学的厚さの変化を比較することにより見出し得る。当然、この情報は、3 つ以上の表面を有するキャビティ内の不連続な表面に対して取得可能である。

【 0 0 7 7 】

上記の分析は、図 1 に示す 4 表面キャビティ 1 0 9 などの 4 表面キャビティを扱うために更に拡張可能である。このキャビティは、6 つの第 1 次基本 2 表面キャビティを構成す

50

る。説明を簡単にするために、表面 1 0 2 及び 1 0 3 により限定されるキャビティは、例えば、1 0 2 : 1 0 3 と表す。したがって、6 つの第 1 次基本キャビティはそれぞれ 1 2 1 : 1 0 2、1 2 1 : 1 0 3、1 2 1 : 1 1 1、1 0 2 : 1 0 3、1 0 2 : 1 1 1、及び、1 0 3 : 1 1 1 となる。主要な間隙 1 2 5 及び 1 1 5 の値は、全ての基本キャビティが一意的 O P L、即ち一意の第 1 次周波数を有するように選択されなければならない。間隙 1 2 5 は、長さ L_1 (これは 3 表面キャビティの処理において L として表した) を有し、間隙 1 1 5 は、長さ L_2 を有する。

【 0 0 7 8 】

分解可能な第 1 次周波数ピークにより、ユーザが空間位相の変化及び、式 4 及び 5 に従って各キャビティに対する相対的な光学的厚さを抽出することが可能となる。更に、光周波数調整速度 $\dot{\omega}$ が分かっており、周波数が十分な精度に解明されていることを条件に、各個別のキャビティの絶対的な光学的厚さは、式 3 を使用して決定可能である。

【 0 0 7 9 】

更に、F T P S I 分析により得られた情報を使用して物体 1 0 1 の屈折率の変化、又は均一性を決定することが可能である。屈折率

【 0 0 8 0 】

【 数 1 4 】

\bar{n}

及び板の厚さ

【 0 0 8 1 】

【 数 1 5 】

\bar{T}

に対する公称値が入手可能であると仮定すれば、屈折率の変化は高い精度で取得可能である。式 1 から、各主要キャビティにおいて観測される総位相は、以下に対応する。

【 0 0 8 2 】

【 数 1 6 】

$$\begin{aligned}\varphi_{121:102} &= 2kL_1 \\ \varphi_{102:103} &= 2knT, \\ \varphi_{103:111} &= 2kL_2\end{aligned}\quad (9)$$

ここで、

【 0 0 8 3 】

【 数 1 7 】

$$k = \frac{2\pi\nu}{c}.$$

である。同様の式は、物体 1 0 1 が取り除かれた 1 2 1 : 1 1 1 キャビティの位相変化について見出される。すなわち、

【 0 0 8 4 】

【数 1 8】

$$\varphi_{121111} = 2k(L_1 + T + L_2). \quad (10)$$

物体 1 0 1 の屈折率 n について解くと、

【0 0 8 5】

【数 1 9】

10

$$n = \frac{\varphi_{102103}}{\varphi_{121111} - \varphi_{103111} - \varphi_{121102}}. \quad (11)$$

が得られる。これらの位相が、D F T から得られる 2 モジユロ位相ではなく、総位相を表すため、いずれのキャビティについても、

【0 0 8 6】

【数 2 0】

20

$$\varphi = 2k\bar{n}\bar{L} + \phi, \quad (12)$$

と書くことが可能であり、ここで、

【0 0 8 7】

【数 2 1】

30

$$\bar{n}$$

及び

【0 0 8 8】

【数 2 2】

$$\bar{L}$$

は屈折率及び間隙の公称値であり、 ϕ は総位相からの局所位相偏差である。式 1 1 において個別の位相に対して式 1 2 を置き換えると、以下ようになる。

【0 0 8 9】

【数 2 3】

40

$$n = \frac{2k\bar{n}\bar{T} + \phi_{102103}}{2k\bar{T} + \phi_{121111} - \phi_{103111} - \phi_{121102}}. \quad (13)$$

【0 0 9 0】

【数 2 4】

$$2k\bar{T} \gg \phi_{121:111} - \phi_{103:111} - \phi_{121:102}$$

かつ、第 1 次より高い

【 0 0 9 1】

【数 2 5】

$$\frac{1}{2k\bar{T}}$$

10

の項を無視する場合について、物体 1 0 1 の屈折率変化

【 0 0 9 2】

【数 2 6】

$$\Delta n = n - \bar{n}$$

は以下により与えられる。

20

【 0 0 9 3】

【数 2 7】

$$\Delta n = \frac{\phi_{102:103} - \bar{n}(\phi_{121:111} - \phi_{103:111} - \phi_{121:102})}{2k\bar{T}} \quad (14)$$

$\phi_{121:111}$ が空のキャビティの位相マップであることに留意して、 \bar{n} は自身の個々のモジュロ 2 位相マップから決定される。物体 1 0 1 の物理的厚さ

【 0 0 9 4】

30

【数 2 8】

$$T - \bar{T}$$

の変化の決定は同様に行われるか、又は、例えば、式 1 4 及び物体 1 0 1 の光学的厚さの変化の測定から直接決定可能である。

【 0 0 9 5】

主要キャビティ 1 2 1 : 1 0 2、1 0 2 : 1 0 3、及び、1 0 3 : 1 1 1 の位相マップは、単一の測定において同時に得られる。その結果、空間位相の変化の相対的配向は記憶される。したがって、上記した F T P S I 分析を使用して、物体の均一性（均一性ウエッジとも呼ばれる）の線形変化を決定することが可能である。

40

【 0 0 9 6】

測定ごとに同一の条件を維持することは、調整の反復可能性及びキャビティの安定性に厳正な要求を課す。物体 1 0 1 のキャビティ 1 0 9 からの除去又はそれへの挿入は、例えば基準表面 1 2 1 及び 1 1 1 の物理的位置合わせに変化を導入し得る。これは、今度は、物体 1 0 1 の測定での均一性にエラーをもたらし得る。ある実施形態において、キャビティ 1 0 9 は、物体 1 0 1 により提示される口径がキャビティの観測可能な口径より小さくなるように準備される。この場合、キャビティ 1 0 9 の一部は 2 表面キャビティとなる

50

方、物体 1 0 1 を含む部分は 4 表面キャビティとなる。2 表面キャビティに対応する部分は、物体 1 0 1 が除去された測定に対する制御/較正として機能することが可能である。なぜなら、これらの領域内の 1 2 1 : 1 1 1 キャビティの光路長のいかなる変化も、平面 1 2 0 及び 1 1 0 の位置合わせの変化に対応するからである。2 回の測定間のシステムの縦揺れ及び片揺れにおけるいかなる変化も分析において補償可能である。

【 0 0 9 7 】

4 表面キャビティの測定から物体 1 0 1 の絶対屈折率及び絶対的な物理的厚さを決定することも可能である。主要キャビティの各々についての位相変化は以下により得られる。

【 0 0 9 8 】

【 数 2 9 】

10

$$\dot{\phi}_{121:102} = \frac{4\pi\nu L_1}{c}, \quad (15a)$$

$$\dot{\phi}_{102:103} = \frac{4\pi\nu nT}{c}, \quad (15b)$$

$$\dot{\phi}_{103:111} = \frac{4\pi\nu L_2}{c}, \quad (15c)$$

$$\dot{\phi}_{121:111} = \frac{4\pi\nu(L_1 + T + L_2)}{c}. \quad (15d)$$

20

(15d)

再び、式 1 5 d は、物体 1 0 1 が除去された 1 2 1 : 1 1 1 キャビティの測定に参照される。屈折率について解くと以下のようなになる。

【 0 0 9 9 】

【 数 3 0 】

30

$$n = \frac{\dot{\phi}_{102:103}}{\dot{\phi}_{121:111} - \dot{\phi}_{103:111} - \dot{\phi}_{121:102}}. \quad (16)$$

ここで、 $\dot{\phi}$ は同一のキャビティ及び調整条件下の各キャビティから観測される位相変化を表す。式 1 5 b 及び式 1 6 を使用すると、物体 1 0 1 の絶対的な物理的厚さは、

【 0 1 0 0 】

【 数 3 1 】

40

$$T = \frac{c(\dot{\phi}_{121:111} - \dot{\phi}_{103:111} - \dot{\phi}_{121:102})}{4\pi\nu} \quad (17)$$

を介して見出し得る。

【 0 1 0 1 】

個々の第 1 次ピークの周波数分解能が十分である実施形態において、均一性及び物理的厚さの絶対測定値は、各個々のキャビティについての式 2 及び 3 にそれぞれ基づき、式 1 6 及び 1 7 から決定可能である。しかし、他の実施形態において、そのような絶対的な特

50

性は、以下の2つの段落で説明する位相抽出技術を使用して決定可能である。

【0102】

式16及び17において、分子及び分母の双方とも速度の係数を有する。典型的に、速度は微分式、例えば $\dot{\phi} = \dot{\phi} / t$ として表し得る。したがって、物体101の絶対屈折率を決定するためには、光周波数が特定の範囲にわたって調整される期間と同じ期間の間に、式16の個々の位相の総変化を計算することのみが必要となる。同様に、物体101の絶対的な物理的厚さを決定するためには、光周波数が特定の範囲にわたって調整される期間と同じ期間の間に、式17の個々の位相の総変化を計算することのみが必要とする。

【0103】

光周波数モニタは光周波数を決定するために使用可能である。位相変化はスライディング・ウィンド位相分析として公知のフーリエ位相抽出技術により決定可能であり、この技術により、位相は、データのウィンド化サブセットのフーリエ分析から抽出され、ウィンドとして決定される位相の展開が、全データセットにわたる時間内にスライドされる。したがって、これは、相対的な光学的厚さの測定に対して使用されるものより大きなデータセットを典型的に必要とする。

【0104】

光周波数モニタの実施は、反復可能な調整特性及び光周波数ランプの実時間制御のためのフィードバック信号に対する次元安定性を含み得る。更に、モニタは、最長の干渉計キャビティに対して十分に精細な分解能を有し、全調整領域にわたって光周波数を追跡すべきである。

【0105】

上記したように、光周波数モニタ（本明細書では波長モニタとも呼ぶ）は、式17における周波数調整を決定するために使用可能である。更に、式3に基づく実施形態において、周波数調整速度の正確な認識は、光周波数モニタを使用して決定可能であり、そのため、基本キャビティの絶対的な光学的厚さは、それに対応する第1次周波数から決定可能である。周波数のモニタリングは、公知のOPLを持つモニタキャビティにより提供可能である。

【0106】

モニタキャビティが D_M により与えられる光学的間隙を有し、調整の間に位相変化 ϕ_M が生じると仮定すれば、式17は以下のように書き替えられる。

【0107】

【数32】

$$T = \frac{D_M (\dot{\phi}_{121111} - \dot{\phi}_{103111} - \dot{\phi}_{121102})}{\dot{\phi}_M}$$

(18)

モニタキャビティは、式5において上記したDFTE評価に対する線形調整の要件を付加的に緩和可能である。これは、モニタ位相変化から直接的に各サンプル間の位相シフト漸増分を計算することにより達成される。例えば、 D_T のOPLを有する試験キャビティ及び D_M の固定OPLを有するモニタキャビティを考える。試験位相を測定するために使用されるDFTEは、

【0108】

10

20

30

40

【数 3 3】

$$DFT(f_c) = \sum_{j=0}^{N-1} I_j W_j \exp(i\Delta\varphi_{Tj}) \quad (19)$$

となり、ここで、 $\Delta\varphi_{Tj}$ は時間サンプル j についての試験キャビティの干渉分析上の全体的な位相シフトである。一定の光学的調整速度 $\dot{\varphi}$ については、

【0 1 0 9】

【数 3 4】

$$\Delta\varphi_{Tj} = \frac{2\pi\nu D_T}{c} \quad (20)$$

不定の $\dot{\varphi}$ については、時間サンプル j についての試験キャビティの干渉分析上の位相シフトを以下の式を介してのモニタから決定可能である。

【0 1 1 0】

【数 3 5】

$$\Delta\varphi_{Tj} = \Delta\varphi_{Mj} \frac{D_T}{D_M} \quad (21)$$

式 19 ~ 21 により、変換された FTPSI データの周波数スペクトルが光路長スペクトルと同等であることが認識される。モニタキャビティ信号の位相を直接測定することにより、FTPSI データを OPL 領域に直接変換することが可能となる。これは、波長調整上、線形性の式 4 及び 5 による要件を更に上げる。OPL 変換 (OPLT) として呼ばれる FTPSI データの OPL への直接変換は、以下のように形式化される。フーリエ変換の積分表現で開始する。

【0 1 1 1】

【数 3 6】

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) W(t) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (22)$$

ここで、 $I(t)$ は強度変化であり、 $W(t)$ はウィンド関数であり、 f は分析されている周波数である。干渉計において、周波数 f は以下の式により与えられる試験キャビティ干渉周波数である。

【0 1 1 2】

【数 3 7】

$$f = \frac{v D_T}{c} \quad (23)$$

ここで、 D_T は試験キャビティのOPLである。既知の固定OPLである D_M を有するモニタキャビティを含むFTPSI装置を考える。モニタにより、両キャビティに共通である

10

【0 1 1 3】

【数 3 8】

$$v = \frac{c f_M}{D_M} \quad (24)$$

式 2 2、2 3、及び、2 4 を結合すると、以下を得る。

【0 1 1 4】

20

【数 3 9】

$$F(D_T) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) W(t) \exp\left(-i 2\pi \frac{D_T}{D_M} f_M t\right) dt. \quad (25)$$

モニタ位相展開 φ_M が、

【0 1 1 5】

【数 4 0】

30

$$\varphi_M = 2\pi f_M t. \quad (26)$$

であり、変数の変更 t φ_M に影響を与えることに注目すると、

【0 1 1 6】

【数 4 1】

$$F(D_T) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\varphi_M) W(\varphi_M) \exp\left(-i \frac{D_T}{D_M} \varphi_M\right) d\varphi_M. \quad (27)$$

40

連続時間から離散時間信号に変換すると、OPLTを得る。

【0 1 1 7】

【数 4 2】

$$\text{OPLT}(D_T) = \sum_{j=0}^{N-1} I_j W_j \exp\left(-i \varphi_{Mj} \frac{D_T}{D_M}\right) \Delta\varphi_{Mj}. \quad (28)$$

50

線形波長調整の場合と同様に、今、OPLスペクトル S は、以下の式を介して試験キャビティ内の単一の画素（校正画素）の強度時間履歴から生成可能である。

【0118】

【数43】

$$S(D_T) = |\text{OPLT}(D_T)|^2. \quad (29)$$

各ピークは特定のキャビティのOPLに対応する。一旦スペクトル中のピークが認識されると、特定のOPLピーク位置における各画素における位相により、対応するキャビティの空間的位相変化が決定される。空間的位相変化は、試験領域内の各画素について、以下の式を使用して式4と同様に計算される。

【0119】

【数44】

$$\phi_T(D_T) = \arg[\text{OPLT}(D_T)] \quad (30)$$

ここで、 $\arg[\text{OPLT}(D_T)]$ は、 D_T におけるOPLピークの複素振幅位相を戻す関数を指す。

【0120】

FTPSIアルゴリズムは、一定のビーム強度を仮定する。ビーム強度が多くの内部及び外部パラメータ、例えばドライブ電流、及びノ又は、温度に応じて変化するために、多くの光源に対しては、これは近似となる。FTPSIの空間的選択性に起因して、これは、変化の周波数内容が関心の対象である干渉周波数から十分に離れている限り、ほとんどのPSIアルゴリズムよりも強度変化に対して低感度であり得る。分析の間にエラーのこの潜在的発生源を排除することも可能である。先ず注意すべきことは、2つの干渉電場振幅 a 及び b に共通の（実部）振幅変化 r が与えられれば、干渉は r^2 に比例するというこ

とである。すなわち、

【0121】

【数45】

$$(ra+rb)(ra+rb)^* = r^2(|a|^2 + |b|^2 + a^*b + ab^*). \quad (31)$$

そのため、この変化を測定可能であれば、これを分割することは簡単である。標準的な光検出器トランスインピーダンス増幅器モデルにより、これをどのようにして行うかの見通しが提供される。標準的なモデルは、生成された光電流 i_o 及び（一定の）漏れ電流 i_L が、固定トランスインピーダンス利得 G により増倍され、観測される電圧を生成することを仮定する。すなわち、

【0122】

【数46】

$$V(t) = Gi_o(t) + Gi_L. \quad (32)$$

10

20

30

40

50

第2項はペDESTALと呼ぶ固定電圧オフセットをもたらす。ここで、デジタル化工程により、ペDESTALに追加可能である付加の固定オフセットが最大でも生成されることが仮定される。

【0123】

ビームが干渉計キャビティに入射する前にビームをサンプリングすることにより、モニタ検出器がビーム強度変化 $V_M(t)$ を測定するものと仮定する。調整された光源を使用して検出器をサンプリングすることで、ペDESTAL O_M が測定される。したがって、キャビティ検出器（すなわち、カメラ170）により測定される干渉信号 $S(t)$ は、以下の式を介してビーム強度変化について訂正することが可能である。

【0124】

【数47】

$$S(t)_{Corrected} = \frac{S(t) - P}{V_M(t) - O_M}, \quad (33)$$

ここで、 P はキャビティ検出器のペDESTALである。この公式では、強度モニタ及びキャビティ検出器の双方のペDESTALが測定され、それらは、調整されたレーザを使用してデータを得ることにより同時に取得可能であることが必要となる。式33では、 $V_M(t)$ の値に依存してキャビティデータが再スケールされることに注意されたい。これは、位相及び周波数（OPL）の情報は、通常はスケールに依存するため、FTPSI分析にとっては問題ではない。しかし、光レベル制御及び画素飽和チェックなどの基本的な機器機能のいくつかはスケールに依存し得る。これらの機能については、式33の適用を進めるべきである。

【0125】

ある実施形態において、強度変化情報は波長モニタから取得可能であり、これは、独立した強度検出器に対する必要性を排除し得る。波長調整における強度変化の時間依存性がキャビティ干渉信号を再現する状況では、波長モニタは、これらの変化がモニタキャビティ干渉の時間依存性から十分に離れている時間依存性と共に発生する限り、強度変化を測定する方法を提供する。固定長干渉キャビティから構成されるモニタを考える。調整中のモニタコントラスト $C(t)$ の時間依存性は、以下の式を介して（例えば、スライディング・ウインド離散フーリエ変換分析により）決定可能である。

【0126】

【数48】

$$C(t) = C(f(t)) = \left| \sum_{j=0}^{N-1} I_j W_j \exp(i2\pi f(t)j/f_s) \right| \quad (34)$$

ここで、 f_s はサンプル周波数であり、 N 個の点がサブアパーチャ・フーリエ・ウインドにおいて使用され、 W_j はウインド係数であり、 $f(t)$ は干渉の時間依存周波数である。基準及び試験の両ビームともに同一に影響を受けると仮定すれば、コントラスト関数 $C(t)$ は強度変化に比例し、この変化について訂正するために使用可能である。このために、強度依存干渉信号を以下の式に定義する。

【0127】

10

20

30

40

【数 4 9】

$$I'_j = I_j / C_j \quad (35)$$

かつ、全ての分析（式 2 9 及び 3 0）における I_j の代わりにこの信号を使用する。

【0 1 2 8】

光周波数モニタは、システム 1 0 0 の光路のいずれの部分に含ませるようにしてもよい（図 1 を参照）。例えば、モニタキャビティは、測定物体 1 0 1 の前、後ろ、又は、周囲に置かれる 2 つの基準表面に対応可能である。特に、例えば、モニタキャビティは、基準平面 1 2 0、1 1 0 により規定されるキャビティ 1 2 1 : 1 1 1 とし得る。代わりに、ビームスプリッタを配置して、光源 1 4 0 からの光の小さな部分を独立したモニタキャビティに直接指向するようにしてもよい。

10

【0 1 2 9】

光周波数モニタの例として、モニタ 5 0 0 を図 3 に示す。モニタ 5 0 0 は、高安定性平面ミラー干渉計（H S P M I）5 0 1 及び直交検出器 5 0 5 を含むホモダイン干渉計である。H S P M I 5 0 1 は、偏光ビームスプリッタ 5 2 0、反射器 5 1 5、5 4 0、4 分の 1 波長板 5 1 4、5 1 6、コーナーキューブ後方反射器 5 2 1、及び、ルーフプリズム（又は、スプリット後方反射器）5 2 2 を含む。直交検出器 5 0 5 は、4 つの検出器 5 9 0、5 9 1、5 9 2、5 9 3、ビームスプリッタ 5 7 0、偏光ビームスプリッタ 5 6 0、5 8 0、及び 4 分の 1 波長板 5 5 0 を含む。組立体全体は低膨張板、例えば、ゼロデュア（Z e r o d u r）又はインバー（I n v a r）から形成されたものに理想的に搭載される。必要であれば、板は、抵抗加熱素子を使用して熱的に制御可能である。

20

【0 1 3 0】

光源 1 4 0 からの偏光された入力ビームは、反射器 5 1 1 を介して H S P M I 5 0 1 に指向される。ルーフプリズム 5 2 2 は、頁面の下方に配置され、干渉計への入力ビームがルーフプリズム 5 2 2 を通過する。ある実施形態において、入力ビームは 4 5 ° で線形的に偏光されるか、又は、円偏光され得る。ビームスプリッタ 5 2 0 は、入力ビームを直交偏光された基準及び測定ビームに分割する。基準ビームは、ルーフプリズム 5 2 2 に指向される前にミラー 5 1 5 とキューブコーナー後方反射器 5 2 1 の間で 2 回指向される。同様に、測定ビームは、ミラー 5 4 0 とキューブコーナー後方反射器 5 2 1 の間で 2 回指向される。それぞれミラー 5 1 5、5 4 0 への第 2 の通過に続いて、キューブコーナー後方反射器 5 2 1 は、ルーフプリズム 5 2 2 の平面への基準及び測定ビームを下げ、これにより、ビームはミラー 5 1 5、5 4 0 へ 2 回の追加の通過を行う。その後、ビームは出力ビームに再合成され、これは直交検出器 5 0 5 に指向される。

30

【0 1 3 1】

直交検出器 5 0 5 のビーム分割面は、H S P M I 5 0 1 から照射される 2 つの偏光に対して 4 5 ° に配向される。これにより偏光が混合され、モニタの O P L 及び光周波数調整速度に比例する干渉信号を含むビームが生成される。直交検出器 5 0 5 は、各々の干渉位相が 9 0 度だけずらされた干渉ビームの 4 つのレプリカを生成する。調整の間、各レプリカの強度 D_x （ここで、 x は検出器を指す）をモニタすることにより、モニタキャビティの位相は、以下のように決定可能である。

40

【0 1 3 2】

【数 5 0】

$$\phi = \arctan \left[\frac{D_{590} - D_{592}}{D_{593} - D_{591}} \right], \quad (36)$$

50

これから各時間サンプルにおける干渉分析上の位相全体を決定可能である。

【 0 1 3 3 】

他の実施形態において、光周波数モニタは上記したホモダイン干渉計に限定されない。一般に、光周波数及び光周波数調整速度を F T P S I 測定工程中に必要な精度に決定可能であるいずれのモニタも、許容可能である。例えば、ヘテロダイン干渉計はこの機能を実行可能である。

【 0 1 3 4 】

全ての実施形態において、関心の対象である第 1 次周波数が、複数の干渉キャビティにより発生される周波数を含めて（式 3 において、 $p > 1$ ）、干渉計により発生された他の全ての干渉周波数から独立していることは重要である。これは、干渉計の特定の幾何学的形状により達成される。以下は、第 2 次に対する全ての周波数（式 3 において、 $p = 2$ ）についての十分な独立を確実にする干渉計の幾何学的形状を特定するための手順を概説する。4 表面干渉計が例として使用されるが、手順はいずれの数の表面を有する干渉計にも適用可能である。

【 0 1 3 5 】

システム 1 0 0 の 4 表面キャビティを考える。4 つの表面は、1 4 個の位相幾何学的に区別されるビーム経路から 6 つの第 1 次周波数と 2 7 の第 2 次周波数とを生成する。2 7 の第 2 次周波数うちの 6 つは、第 1 次周波数と同一であり、分離不可能であるが、これらは位相評価に対する直流シフト全体のみに影響を与える。第 1 次周波数は、全てが独立ではなく、そのため、6 つの全てを測定する必要はないが、一般に、全ての 6 つの周波数は、近隣の第 2 次周波数及び互いの干渉を最小化するために設けられる。主要な間隙に関しては、6 つの第 1 次キャビティ及び 2 1 の異なる第 2 次キャビティに対する効果的な O P L は、図 4 に示す表の第 2 欄から得られる。同表から得られる間隙は、干渉周波数を得るために式 3 と共に使用可能である。

【 0 1 3 6 】

式 7 に定義するように、最低分解可能 O P L である Γ に関して主要 O P L を表記することは便利である。速度 q を以下のように定義する。

【 0 1 3 7 】

【数 5 1】

$$q = \frac{nT}{\Gamma}, \quad (37)$$

また、物体 1 0 1 の光学的厚さ nT に対するそれぞれ主要の間隙 1 2 5、1 1 5 の長さ L_1 、 L_2 の比は、以下のように表記可能である。

【 0 1 3 8 】

【数 5 2】

$$r = \frac{L_1}{nT} = \frac{L_1}{\Gamma q} \quad (38a)$$

$$s = \frac{L_2}{nT} = \frac{L_2}{\Gamma q} \quad (38b)$$

式 3、6、及び、7 を使用して、 f_{min} に関して干渉周波数 f_c を正規化可能であり、これらの正規化された周波数を r 及び q の関数として表記可能である。3 表面キャビティについての正規化された独立第 1 次及び第 2 次周波数は、図 4 の表の第 3 欄にリスト化されている。全てのこれらの周波数は q と対応し、そのため、調整範囲はこの依存性を打ち消

10

20

30

40

50

すように調整される。すなわち、

【 0 1 3 9 】

【 数 5 3 】

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_{\max}}{q}, \quad (39)$$

n T が最小の光学的間隙であると仮定した場合、第 1 次周波数からの第 2 次の分離を最大化するものより大きな r 及び s の値をサーチすることで、r = 3、s = 9 が一つのそのような組合せであることが明らかとなる。一般に、完全な分析は、光学的キャビティの幾何学的形状が、いずれの 2 つの主要な間隙の光路長の比が固有の 3 の累乗である幾何学的形状であることを示す。異なる主要な間隙が最小であると仮定される場合、同様の分析となる。

10

【 0 1 4 0 】

ここで、調整範囲 及び間隙 L_1 及び L_2 が固定され、取得すべきサンプル数 N を決定することのみが残っている。これは、より低い周波数に対してエイリアシングされた後の最大の第 2 次周波数 (すなわち、 $(4L_1 + 4nT + 4L_2)$ の OPL に対応する $(4r + 4 + 4s)q$) が少なくともスペクトル分解能限界の 2 倍だけ最大の第 1 次周波数より大きくなるように、選択される。この制約は、4 表面キャビティについて以下の式を予測する。

20

【 0 1 4 1 】

【 数 5 4 】

$$N = (1 + \mu)(6r + 8 + 6s), \quad (40)$$

この式は、例えば $\mu = 0$ であれば、80 のサンプルに対して数値を求める。

30

【 0 1 4 2 】

式 39 及び 40 は、r = 3 及び s = 9 の時、両者で最適なキャビティの幾何学的形状及び第 1 次周波数を定義する。図 5 はこの構成に対して予測された干渉スペクトル 310 を示す。第 1 次と第 2 次のピーク間の優れた分離を強調するために、第 2 次キャビティ周波数 320 のスペクトルも示す。

【 0 1 4 3 】

一般に、最適な第 1 次周波数の分離をもたらすような、4 表面キャビティの非常に多くの可能な配置構成がある。これらは、比 r 及び s がそれぞれ 3^x 及び 3^y であり、x 及び y が整数であり、かつ、 $x \geq y \geq 0$ であるキャビティに対応する。他の可能な構成としては、r 及び s がともに 1 より大きな定数によりスケール化される。

40

【 0 1 4 4 】

本発明は、最適な構成を有するキャビティ表面の構成に限定されない。ある実施形態において、基本キャビティのいくつか (例えば、関心の対象であるキャビティ) は、最適に構成される。他の基本キャビティは非最適に構成される。例えば、他の基本キャビティは、関心の対象であるキャビティの OPL とは実質的に異なる非最適 OPL を有するように配置可能である。

【 0 1 4 5 】

上記の説明において、FTPSI は 2 表面、3 表面、及び 4 表面のキャビティを参照して説明した。しかし、本発明はそのようには限定されない。この分析は、いくつかの表面数を持つキャビティにも拡張可能である。任意の表面数を持つキャビティも各表面对に対

50

応する基本 2 表面キャビティの組合せに単純化可能である。関心の対象である 2 表面キャビティに対応する位相シフトの周波数が分解され、かつ、他の周波数から十分に独立される限り、分析はそのキャビティについての有用な情報を生成する。

【 0 1 4 6 】

位相シフト干渉分析システム用の光源は、ガス、固体、調整可能な色素、又は、半導体のレーザとし得る。光源は調整可能な狭帯域スペクトルフィルタを備える白色光源ともし得る。更に、ある実施形態において、光源は、複数の公称光周波数で動作して、抽出された位相プロファイルにおける位相サイクルの不確定性を解消することが可能である。例えば、光源は HeNe、アルゴン、又は、半導体のレーザの複数の輝線間で、又は、市販の調整可能な電気通信用レーザの異なる ITU グリッド周波数間で調整可能に動作する。同様に、ある実施形態において、光源は光ファイバにより干渉計に接続可能である。光源の光周波数調整は、光源に対して内部又は外部で行うことが可能である。例えば、レーザ光源のキャビティ長は、レーザ出力の光周波数を調整するために熱的に、又は、圧電 - 機械的に調節可能である。同様に、レーザ光源の利得媒体への注入電流は、レーザ出力の光周波数を調整するために変調可能である。代わりに、例えば、光源の光周波数出力は、音響光学的、電子光学的、又は、光機械的な変調により外部で調整可能である。

10

【 0 1 4 7 】

ある実施形態において、PSI システムのための光源は、偏光された光源（例えば、線形的に偏光された光）とし得る。例えば、システム 100 は、光源からの光を偏光させるために偏光素子を含み得る。上記した測定技術の各々は、光の偏光状態に応じて行い得る。例えば、屈折率測定技術は、複数の異なる既知の偏光状態（少なくとも 2 つの偏光状態、例えば、直交偏光状態）に対して行い得る。偏光機能としての物体 101 の屈折率、光学的厚さ、又は、相対的な光学的厚さの変化は、物体 101 の光学異方性に関連付けられ得る。したがって、ある実施形態において、FTPSI 技術は、試験物体又はキャビティの光学異方性（例えば、複屈折や二色性など）を特徴付けるために使用可能である。

20

【 0 1 4 8 】

ある実施形態において、光の絶対波長を知ることは重要である。例えば、相対的な測定において、プロファイルにおけるエラーは波長におけるエラーに直接比例する。電気通信用レーザ（例えば、1550 nm のダイオードレーザ）を使用する時、レーザモジュールは、レーザを ITU（国際電気通信連合）グリッド内の特定の波長にロックする「モードロッカ」と呼ばれるデバイスを含む。典型的な絶対精度は、一般的に十分に正確な $\pm 1 \text{ GHz}$ （5 ppm の精度）である。

30

【 0 1 4 9 】

波長調整により絶対長さを測定する能力は、絶対波長を測定するために使用可能である。これは以下の例の方法により説明される。第一に、2 表面キャビティの絶対長さを測定し、続いて、干渉の位相の変化を追跡しつつ（例えば、干渉縞を計数する）、キャビティ長を変更する。一旦キャビティの絶対長さが分かれば、キャビティの絶対長さを再び測定する。キャビティ長が変更された時間の間の波長は、以下の式により与えられる。

【 0 1 5 0 】

【 数 5 5 】

$$\lambda = 4\pi \frac{\Delta L}{\Delta \phi}.$$

40

更に、図 1 の位相シフトシステム 100 はフィゾー干渉計を含むが、他の実施形態は、トワイマン - グリーン、マッハ - ツェンダ、マイケルソン、ファブリ - ペロ、及び、かすめ入射又は不平衡ミラウなどの様々なタイプの干渉計を採用可能である。同様に、干渉計は大口径、顕微鏡、又は、光ファイバセンサの各干渉計とし得る。

50

【 0 1 5 1 】

一般に、測定物体は多くの形態を取り得る。例えば、測定物体は光学的平面、フォトマスク、平面パネルディスプレイ、又は、（赤外発光を含み得る）シリコンウェハとし得る。更に、測定物体は浸炭光学的、又は、空間光学組立体とし得る。測定物体は、球面又は非球面のドーム、コンタクトレンズ、メニスカスレンズ、又は、眼鏡レンズともし得、又は、これらを含み得る。典型的に、測定物体は光源の波長で透明又は部分的に透明である。より一般的に、測定物体は、その物体の表面及び／又は大きさの特徴に関する光学的情報を提供するいずれの構造、例えば微細加工されたシリコンである。光学的情報は、測定物体の選択された表面の表面形状に、又は、測定物体の全て又は選択された部分の屈折率均一性を含む光学的プロファイルに関連し得る。様々な測定物体の例は以下に詳細に検討する。

10

【 0 1 5 2 】

更に、上記した分析で使用される周波数変換はフーリエ変換であるが、本発明はそれに限定されない。実施形態は、同様に、ヒルベルト変換などの他のタイプの周波数変換も実施可能である。

【 0 1 5 3 】

上記の例は光周波数調整による干渉信号の位相シフトを説明しているが、本発明の実施形態はそれに限定されない。一般に、干渉信号は、異なる周波数における異なる光路長のキャビティからのものを調節するいずれかの方法を使用して位相シフトし得る。例えば、干渉信号は、キャビティを照射する光ビームの傾斜角を変化させることにより位相シフトし得る。そのような位相シフト方法を利用する実施形態は、2001年5月3日出願の「Apparatus and Method for Reducing the Effects of Coherent Artifacts」と題された当出願人と共有される米国特許出願第09/848,055号に説明されるものを含み、これは全体を本願明細書に援用する。このような実施形態の例を説明する。

20

【 0 1 5 4 】

図6を参照すると、フィゾー形状を持つ干渉計600のOPLは、発光源点の原点の位置dに依存する。干渉計6100は、キャビティ長L及びコリメータ焦点長さfを有する。照射ビームの傾斜角 α は、小さな α に対しては

30

【 0 1 5 5 】

【 数 5 6 】

$$\alpha = d/2f$$

により近似可能である

【 0 1 5 6 】

【 数 5 7 】

$$\tan(\alpha) = d/2f$$

40

により得られる。基準表面610と試験表面620から反射される光の間の位相差 $\Delta\phi$ は、フィゾーキャビティ内のOPLならびに光の波長の関数である。OPLはキャビティを含む2つの表面間の距離Lならびに傾斜角 α から決定される。以下が適用される。

【 0 1 5 7 】

【数 5 8】

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot OPD = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2L \cos(\alpha) \quad (41)$$

位相差 は変調可能であり、そのため、照射源点の位置を、及び、照射ビームの傾斜角を変更することにより結果として得られるいかなる干渉信号も位相シフト可能である。例えば、図 1 の実施形態を参照すると、傾斜角は、光軸に垂直な方向に沿って光源 1 4 0 の位置を解読することにより変化可能であり、これは、レンズ 1 3 0 から発出されるコリメートされたビームの伝播方向を変化させる。トランスデューサ又はモータは、光軸に対して光源のこの横方向位置を調整するために使用可能であり、それにより、傾斜角が変化する。トランスデューサ又はモータは、光源自体の位置、又は、ビームを再指向するために使用される後続の光学機器又は複数の光学機器（例えば、ウエッジの対）の位置を調整するために使用可能である。

10

【 0 1 5 8 】

第 0 9 / 8 4 8 , 0 5 5 号出願に開示されているように、細い環状の空間的に拡張された光源は、空間的平均化によりコヒーレントなアーチファクトの影響を最小に抑えるために使用可能である。空間的平均化効果による空間的分解能において同時発生する小さな損失が許容可能である場合に、このタイプの光源も F T P S I と共に有利に使用可能である。環状形の光源の直径の制御により、発光ビームの傾斜角を変化可能である。例えば、環状形光源は図 1 の実施形態において光源 1 4 0 と代替可能であり、同様に、レンズ 1 3 0 の後方焦点面に配置可能である。

20

【 0 1 5 9 】

環状形光源の実施形態は、アキシコン又は回折性の均等物を通過する収束ビームを含み得る。アキシコン又は回折性の均等物の位置を軸に関してずらせることにより、環の直径が変更される。他の実施形態はファイバ束を含む。図 7 を参照すると、マルチモード光ファイバ束 7 0 0 は、このような光源に対して使用可能である。ファイバ束 7 0 0 は、環状入射口側 7 1 1 と環状射出口側 7 1 2 とを有する。レーザ光源 7 0 2 は、レンズ系 7 0 4 を介してファイバの入射口ファセット上に結像される。レンズ系 7 0 4 は、入射角及び開口数をマルチモードファイバ 7 0 0 に適合させて環状発光体 7 0 6 を生成するように制御して、その環状発光体 7 0 6 は、光学部品 7 0 8 により更に制御されてコリメートされた環 7 1 0 が提供される。例えば、レーザがマルチモードファイバ 7 0 0 に入射する条件を変化させることにより、環 7 0 6 の直径を選択的に変化させることが可能となる。

30

【 0 1 6 0 】

上記したように、F T P S I は光学部品の表面プロファイル、物理的及び光学的ウエッジ、ならびに、相対的均一性などの特徴を測定するために使用可能である。これまで、本説明は上記の測定がどのように行われるかを説明するために試験物体として平行板の例を使用した。一般に、F T P S I は、単純及び複合光学部品を測定及び特性付けるために使用可能である。以下の説明は、F T P S I の機能のいくつかを示す例である。

【 0 1 6 1 】

F T P S I は精密キャビティを特性付けるために使用可能である。基本キャビティを構成する表面の反射率が高い（例えば、少なくとも約 1 0 %、約 2 0 %、約 3 0 %、約 4 0 %、約 5 0 %、約 6 0 %、約 7 0 %、約 8 0 %、約 9 0 %、約 9 5 %、及び、約 9 9 % 程に高い）時に、より高い次数の複数の干渉事象に移転される光学的パワーが増加し、第 1 次周波数の高調波におけるより強い干渉が生成される。生成された歪んだ干渉縞パターンにより、従来の P S I アルゴリズムは混乱する。F T P S I はこれらの高調波を分離し、それにより、第 1 次周波数は独立して分析可能であり、表面の実質的に歪みのないプロファイルが作り出される。図 8 は、図 9 に干渉パターンが示された高精細キャビティから得られた周波数スペクトルを示す。

40

【 0 1 6 2 】

50

高精細キャビティの分析において、キャビティの幾何学的形状を設定することは、エイリアシングされた周波数が第1次高調波をまたぐことを保証する上で重要である。高精細キャビティが、高調波周波数ピークのいずれかを分析すること、又は、いくつかの異なる高調波の分析からの結果の組合せ（例えば、線形的組合せ）により特性付けることが可能であることにも注目する。

【0163】

F T P S I は、曲面（例えば、球面又は放物面）のプロファイルの決定及び特性付けをするためにも使用可能である。一般に、干渉計が、表面に局所的かつ近似的に平行である表面に対する測定を提供可能であれば、いかなる表面形状もプロファイル決定可能である。言い換えれば、測定波面の局所波ベクトルは、測定曲面に近似的に垂直であるべきである。

10

【0164】

一般に、基準表面はいかなる形状又は曲率を有し得る。測定表面の形状に定格上追従する基準表面を使用することは有利になり得る。なぜなら、これが、測定を行うために必要とされるシステムのダイナミックレンジを低減し得るからである。

【0165】

F T P S I は、基本キャビティを形成する表面の反射率についての情報も提供する。F T P S I 周波数スペクトルにおける第1次ピークの振幅は、対応する基本キャビティを形成する表面の反射率の目安を提供する。例えば、3表面キャビティ（すなわち、3つの基本キャビティを形成する3つの表面）を考える。ここで、これらの表面に S_1 、 S_2 、及び S_3 と記号を付す。各表面からの第1次反射の電場振幅は、それぞれ a_1 、 a_2 、及び a_3 である。カメラにて検出される干渉信号は、これら3つの場振幅の重ね合わせの強度に比例する。第1次に対して、強度は、

20

【0166】

【数59】

$$I(t) = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + 2a_1a_2 \cos(\omega_{12}t + \phi_{12}) + 2a_1a_3 \cos(\omega_{13}t + \phi_{13}) + 2a_2a_3 \cos(\omega_{23}t + \phi_{23})$$

(42)

30

となり、ここで、 ω_{mm} 及び ϕ_{mm} は、表面 S_m 及び S_n により形成される基本キャビティからの交流の周波数及び位相をそれぞれ指す。このような信号の周波数スペクトルは、 ω_{12} 、 ω_{13} 、及び、 ω_{23} にピークを明確に示し、各ピークの強度（振幅）は各場振幅の積に比例する。周波数スペクトル中の主要なピークの相対振幅を比較することにより、ユーザは対応するキャビティ表面の相対反射率についての情報を取得することが可能である。例えば、式42中の ω_{12} 、 ω_{13} 、及び、 ω_{23} におけるピークの相対振幅は、反射率係数 a_1 、 a_2 、及び、 a_3 の相対値を一意に決定する。加えて、場振幅を入力光ビームの強度に正規化すること、又は、較正された基準表面への比較により、各表面の絶対反射率の測定がもたらされる。

【0167】

40

F T P S I において、（調整漸増分及び範囲が適切であると仮定して）キャビティ内の各光学的界面は、変換スペクトルに対する自発表示性ピークをもたらす。この特徴は、光学部品内の光学的欠陥を検出するために使用可能である。図10を参照すると、透明な平行板901がF T P S I を使用して特性付けられる。板901は基準表面910に対して適切に配置されている。平行板表面902、903は、基準表面910と共に、3つの基本キャビティを形成する。

【0168】

F T P S I 特性付けの間、光ビーム920はシステムに導入される。表面902、903、及び基準表面910は、ビーム922、923、及び、921をそれぞれ反射する。C D D カメラ999は、反射されたこれらのビームの重ね合わせを検出し、重ね合わせの

50

強度に比例した干渉信号を発生する。強度信号は上記したように分析される。

【 0 1 6 9 】

2つの欠陥 9 3 0 及び 9 4 0 が平行板 9 0 1 に含まれる。これらの欠陥は、取り囲む材料に対して異なる屈折率を持つ平行板 9 0 1 内の領域であり、入射光を検出器に向けて散乱し戻す。欠陥の例としては、平行板 9 0 1 の材料内の気泡又は不純物を含む。欠陥 9 3 0 及び 9 4 0 は、ビーム 9 2 0 の入射光をいくらか散乱する。欠陥が十分な大きさ及び形状であれば、それぞれ光線 9 3 1 及び 9 4 1 として示す後方散乱成分は、キャビティ内の他の表面により散乱されたものと同様の平面波を形成する。それらが発生するシステムの断面の特定の領域において、欠陥 9 3 0 及び 9 4 0 は、CCDカメラ 9 9 9 にて検出された重ね合わせに対して影響を与え、システムに対して付加の基本 2 表面キャビティを形成する表面のようふるまう。

10

【 0 1 7 0 】

したがって、異常ピークが発生する画素座標は、板 9 0 1 における欠陥の横方向の位置を示す。欠陥及び他の表面により形成される「基本キャビティ」の O P L に比例する周波数は、板における欠陥の深さ方向の位置に関する情報をもたらす。そのため、FTPSI を使用して欠陥が認識されるのみならず、三次元でのそれらの正確な位置も決定可能である。

【 0 1 7 1 】

より小さな欠陥も FTPSI を使用して検出可能である。小さな欠陥により散乱された光は、ほぼ球形の波面を形成し、その一部は検出器の干渉信号に影響する。散乱された波面の発散性のために、欠陥から散乱された光は全ての検出器画素において干渉信号に影響する。その結果、周波数スペクトルへの対応する影響が生じる画素を単に認識により、欠陥の横方向の位置の認識を容易には行うことはできない。しかし、欠陥は、その後の干渉縞へのそれらの影響の FTPSI 分析を介して、例えば、自発表示性環状パターンを中心に認識することにより局所化可能である。

20

【 0 1 7 2 】

図 1 1 を参照すると、様々な光学素子（例えば、プリズム又はキューブ）の内部角の測定も FTPSI を使用して実現可能である。例えば、図 1 1 は直角プリズム 1 0 0 1 の 9 0 ° の角度及びピラミッド型についてのエラーを測定するための可能な幾何学的形状を示す。第 1 次に対して、光線 1 0 1 0 は、キャビティを出る前に 4 つの表面（実際には 2 つの表面を 2 回）に遭遇する。これらの表面は 1 0 1 1、1 0 1 2、1 0 1 1' 及び 1 0 1 2' と番号を付け、「'」はその表面からの 2 回目の反射を示す。表面 1 0 1 1（及び、1 0 1 1'）は基準表面である。1 0 1 1 : 1 0 1 2 キャビティは、1 0 1 2 表面のプロファイル及び配向の目安を提供する。表面 1 0 1 2 の配向方向は、ピラミッド型についてのエラーについての非後方方向（例えば、後方反射器の傾き）に対する基準を提供する。後方方向における 1 0 1 1 : 1 0 1 1' キャビティの傾きは、9 0 ° からの直角の偏差を決定する。カメラへのビームの直接の戻りは、良好なダイナミックレンジを備えるカメラの使用を通常は必要とすることに注意されたい。1 0 1 1 の左の点線は、必要であれば、ビーム止めが直接の戻りを除去するために使用可能である場所を示す。この角度の P S I 測定は、1 0 1 1 表面の除去を必要とし、1 0 1 2 : 1 0 1 2' キャビティを測定する。しかしながら、ここに示す幾何学的形状により、既知の基準に対して 1 0 1 2 表面を同時に定性することを可能にする。一般に、FTPSI は、基準波面からの戻り波面の偏差を測定することにより光学部品の内部角を評価するために使用される。FTPSI により、干渉分析システムが構成される公称角度からの内部角の偏差が決定される。後方反射器の場合については、戻り波面が測定されている光学機器により自然に提供される。非後方反射器については、付加の表面、例えば基準表面又はミラーが、検出器に戻り波面を供給するために、（所定の幾何学的形状を備える）キャビティに含まれるべきである。

30

40

【 0 1 7 3 】

上記した FTPSI 測定は、単純な光学システムを参照する（例えば、単一のプリズムの内部角、又は、単一の光学平面の屈折率均一性）。しかし、FTPSI が単一の測定に

50

おいていくつかの基本キャビティについての情報を提供可能であるので、多数の表面（例えば、少なくとも5つの表面、6つの表面、7つの表面、8つの表面、9つの表面、10の表面）を備える複合光学組立体を特性付けするために、同じくFTPSIを使用可能である。例えば、FTPSIは、複合光学組立体における部品の位置合わせ及び結合を評価するために使用可能である。複合組立体の製造中に、部品間の空間的關係は維持されるべきである。組立工程の様々な段階でこれらの關係を測定することにより、FTPSIは各部品を別個に定性可能であり、部分的に完成された組立体を測定可能であり、かつ、完成組立体を定性可能である。FTPSIは、組立体を維持及び/又は再校正するために完成組立体の展開及び使用の後にも使用可能である。FTPSIは、これらの組立体の光学部品の相対的位置及び表面プロファイル（例えば、平坦度）を同時に測定するために使用される。更に、FTPSIは、光学的に結合される部品間の界面を評価するために使用される。以下の説明は、FTPSIがどのようにしてこの目的のために使用可能であるかの例である。

10

【0174】

図12を参照すると、光学組立体の第1の部品、直角プリズム1201は基準表面1210に対して配置される。光ビーム1220は、基準表面1210を介してプリズム1201内に指向される。基準表面1210は、ビーム1220を検出器1299に反射し戻し、基準ビーム1211を供給する。プリズム表面1203は、ビーム1220をプリズム表面1204に向けて反射する。図面を不要に複雑にするのを回避するために、検出器1299内で光ビームをコリメートするため、及び、キャビティ内へ、かつ、それを指向するための光学部品が図12から省略されていることに注意されたい。一般に、システムは、図12に示すものに加えて、多くの他の部品を含み得ることを理解されたい。

20

【0175】

プリズム表面1202及び1204は共に、ビーム1220の一部を検出器1299に向けて反射し戻す。これらの部分はそれぞれビーム1230及び1240として示す。検出器1299は、ビーム1211、1230及び1240の重ね合わせを検出し、各画素において重ね合わせに比例する干渉信号を発生する。検出器1299と接続されるコンピュータシステムは信号を受信し、分析する。

【0176】

プリズム表面1202、1204及び基準表面1210は、3つの基本キャビティ（表面1202と1204、1202と1210、及び、1204と1210により形成されるキャビティ）を形成する。各キャビティからの干渉信号への影響は、FTPSIを使用して分析される。

30

【0177】

FTPSI周波数変換は、周波数 f_1 、 f_2 及び f_3 におけるピークを含むスペクトルを作り出す。これらのピークは、それぞれ表面1210と1202、（1203を介して）1210と1204、及び（1203を介して）1202と1204により形成される基本キャビティに対する第1次干渉周波数に対応する。周波数は、各基本キャビティに対するOPL及び光周波数調整速度に比例する。位相マップは f_1 、 f_2 、及び f_3 の各々に式4を適用することにより各キャビティについて決定され、これからは、表面1202及び1204についての表面プロファイル、及びプリズムの異なる部分を伝播する光の光路長の変化が計算される。

40

【0178】

第2の基準表面1250、例えば、基準ミラーは、プリズム1201を介して検出器に付加の測定ビームを戻すためにキャビティに任意で含まれる。これにより、ユーザが、例えば上記した方法を使用して、公称値からプリズム角1260のいかなる偏差も測定することが可能となる。

【0179】

ここで図13を参照すると、2部品光学組立体を構成するために、第2の部品、例えば透明な平行板がプリズム1201に追加される。透明平行板1301の第1の表面130

50

2は、プリズム1201の表面1203に結合される。板表面1302と1303についての表面プロファイル、板ウエッジ（すなわち、平行板にわたる厚さの変化）、及び板の屈折率均一性を得るために、結合の前に、透明平行板1301はFTPSIを使用して特性付けられる。

【0180】

光学的界面が界面1310において意図される（例えば、プリズム1201と平行板1301の間に反射性コーティング又は屈折率の不整合がある）場合において、付加表面、平行板表面1303がシステムに追加され、基本2表面キャビティの数は3から5に増加する。

【0181】

このシステムのFTPSI分析は、第1次変換周波数を周波数 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_2' 、及び f_3' に与える。基準表面1210に関するプリズムの位置が以前の測定から不変であるとすれば、これらの周波数は、本来の3つの基本キャビティに加えて、（ピーク f_2' に対応する）表面1210と1204（1302を介して）、及び（ピーク f_3' に対応する）1202と1204（1302を介して）により形成される2つの付加の基本キャビティに対応する。位相は、式4を使用して各周波数ピークから抽出される。 f_2 及び f_2' は、ともに表面1210と1204により形成されるキャビティに対応し、 f_3' 及び f_3 は、表面1202と1204により形成されるキャビティに対応することに注意されたい。そのため、これらの2つのキャビティ間の位相マップのいかなる差も、平行板1301及び/又はプリズムと板の間の位置合わせに帰し得る。板1301が別個のFTPSI測定において既に特性付けられているため、板1301によるこれらの位相マップにおける差は説明可能であり、部品間のいかなる位置ずれからの影響も決定可能である。

【0182】

代わりに、プリズム1201及び平行板1301が光学的に類似した材料（例えば、それらが同じ屈折率を有する）から構成され、部品が光学的に完全に結合される場合、プリズム表面1301からは反射がなく、システムに付加の基本2表面キャビティは追加されないが、その周波数は、平行板の存在により、増加したOPLに対応して変化する。

【0183】

この場合、プリズム1201と平行板1301の間の結合が理想的であると、FTPSI分析は、表面对1210と1202、1210と1204（1302を介して）、及び1202と1204（1302を介して）により形成される基本キャビティにそれぞれ対応する f_1 、 f_2' 、及び f_3' における周波数のみを与える。式4を使用して、各基本キャビティについての位相マップが f_1 、 f_2' 、及び f_3' に対して決定される。互いについての表面1202及び1204の配向が（単一のプリズム測定から）分かっているため、この配向のいかなるずれも表面1203に対する表面1302の非平行の位置合わせに帰することとなる。 f_2 、及び f_3 における異常ピークは、界面1310における非理想的な結合を示す。異常ピークの強度及び位置を分析することにより、ユーザはこの部分が試験の実施を必要とするかどうかを決定することが可能である。これらのピークは界面の小さな領域においてのみ明らかとなり得、これは、（例えば、上記した欠陥分析と同様に）異常ピークが発生する検出器画素座標から決定することが可能であることに注意されたい。同様に、ピーク周波数は、それらが発生する基本キャビティのOPLに比例するため、不完全な結合の深さ座標は認識することが可能である。組立体中に光学的界面が一つのみあるため、この情報は本例においては冗長となり得る一方、光学組立体の複雑さが増大するにつれ、この情報は、欠陥のあるいずれの界面の正確な位置も三次元で直接かつ的確に示すため、非常に有用となり得る。

【0184】

図14を参照すると、この方法は、プリズム1201及び平行板1301を含めて、拡張された複合光学組立体1401に適用される。拡張された複合光学組立体1401は、部品ごとに組み立てられる。新しい各部品が接続された後、FTPSI分析が組立体に対して行われる。上記のように、新しい各光学的界面は反射ビームを重ね合わせに影響し、

10

20

30

40

50

システム内の基本 2 表面キャビティの数を増やす。各キャビティについての周波数及び位相は複合組立体中の各界面の完全性についての情報を与える。

【0185】

一つの部品がその前の部品に（理想的に）光学的に結合される場合において、その表面により形成される基本キャビティからの周波数は、周波数スペクトルから消える。観測されるいずれの周波数ピークも不完全な結合を示し、それは、他の部品が組立体に追加される前に再設定可能である。

【0186】

一般に、この方法はいかなる複合光学組立体にも適用可能である。光学部品が光学組立体に含まれる前及び後の双方で FTPSI を使用して光学部品を特性付けることにより、組立体が製造されつつある際の部品表面の光学的表面完全性（例えば、位置、平坦度、反射率）の間で行われる比較が可能となる。周波数スペクトルにおけるピークを記録するための全てのキャビティについて、光周波数調整範囲は、組立体における最短基本キャビティを分解するために十分大きくすべきであり、調整における光周波数漸増分は 2 位相シフトを超えずに最大キャビティを収容するために十分小さくすべきである。理想的には、各基本キャビティについての第 1 次周波数ピークからの位相を高い精度で得るために、各基本キャビティが異なる OPL を有するべきである。加えて、全ての既に述べた測定（例えば、表面反射率、精密キャビティ、屈折率均一性、欠陥分析）は、複合光学組立体に適用可能である。

【0187】

上記した実施形態のいずれにおいても、測定物体についての所望の情報を抽出するために、システムの他の部品を制御かつ位相シフト画像を分析するため、コンピュータはハードウェア、ソフトウェア、又は、双方の組合せを含み得る。上記した分析は標準的なプログラミング技術を使用してコンピュータプログラム内で実施可能である。そのようなプログラムは、各々がプロセッサ、（メモリ及び/又は記憶素子を含む）データ記憶システム、少なくとも一つの入力デバイス、ディスプレイ又はプリンタなどの少なくとも一つの出力デバイスを含むプログラマブルコンピュータ上で実行するように設計される。プログラムコードは、本明細書に説明される機能を実行し、一つ又は複数の出力デバイスに適用される情報（例えば、選択された表面のトポグラフィ）を生成するために入力データ（例えば、CCDカメラからの位相シフト画像）に適用される。各コンピュータプログラムは高レベルの手続き型もしくはオブジェクト指向のプログラミング言語、又は、アセンブリもしくは機械言語で実施可能である。そのようなコンピュータプログラムの各々は、コンピュータにより読み出された際に、コンピュータ内のプロセッサに本明細書に説明した分析を行わせ得るコンピュータ読み出し可能な記憶媒体（例えば、CD ROM 又は磁気ディスク）上に記憶可能である。

【0188】

本発明の実施形態を説明したが、様々な改良が、本発明の精神及び範囲から逸脱することなく行い得ることが理解されよう。

【図面の簡単な説明】

【0189】

【図 1】複数の表面对を持つキャビティを有する干渉計装置の概略図。

【図 2】不連続な表面を含む干渉計キャビティの概略図。

【図 3】図 1 の干渉計装置を用いた使用のための波長モニタの概略図。

【図 4】4 表面キャビティにより生成される第 1 次及び第 2 次周波数を示す表。

【図 5】4 表面キャビティにより生成される第 1 次及び第 2 次周波数の相対振幅を示すグラフ。

【図 6】ソースディスクのエッジ上の光源点からの発光を使用して軸上試験点により生成される干渉縞間の光路長（OPL）の差を見積もるための模式図。

【図 7】発光角を調整することによる位相シフトのための発光システムの実施形態の模式的斜視図。

10

20

30

40

50

- 【図8】精密キャビティからの干渉スペクトルのプロット図。
- 【図9】精密干渉縞の例を示す図。
- 【図10】欠陥のある光学部品を含むキャビティの実施形態を示す図。
- 【図11】直角プリズムを含むキャビティの実施形態を示す図。
- 【図12】プリズムを含むキャビティの他の実施形態を示す図。
- 【図13】2つの結合された光学部品を含むキャビティの実施形態を示す図。
- 【図14】複合光学部品を含むキャビティの実施形態を示す図。

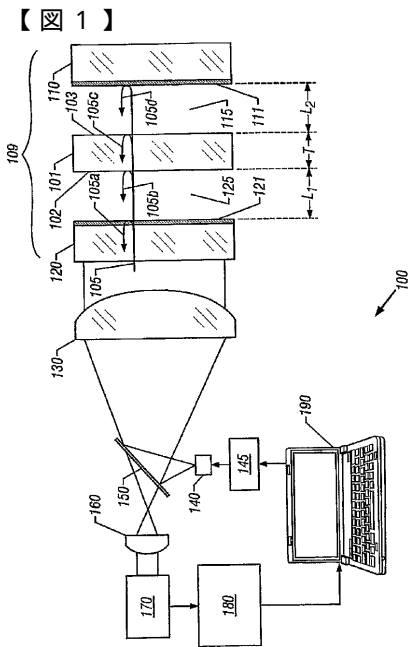


FIG. 1

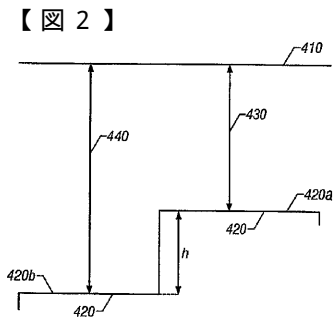
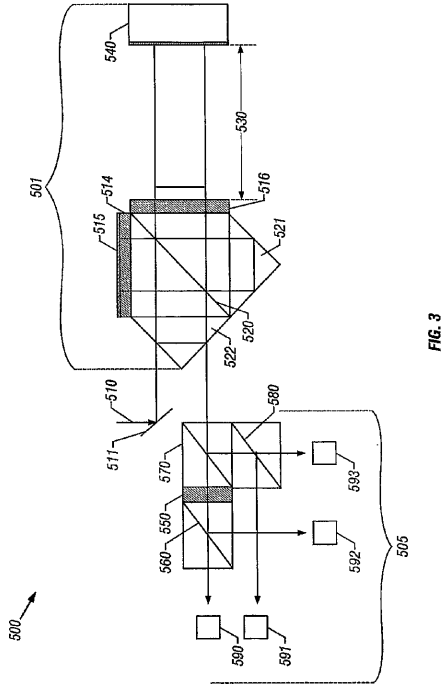


FIG. 2

【 図 3 】

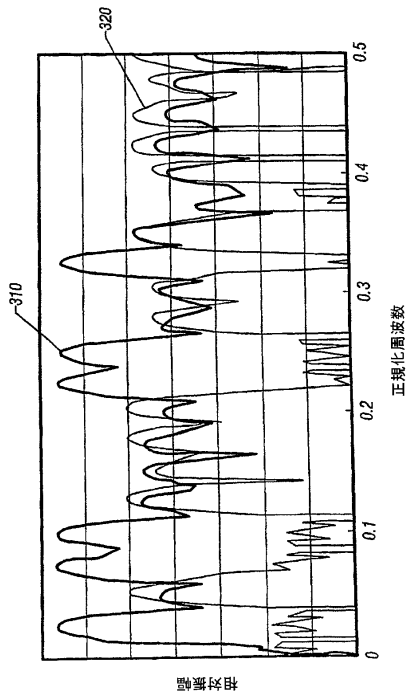


【 図 4 】

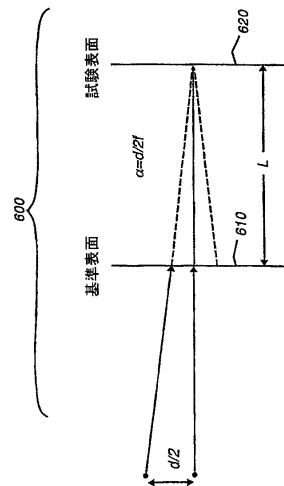
Order	OPD	fc/f_{min}
1st	$2nT$	$2q$
	$2L_1$	$2rq$
	$2L_2$	$2sq$
	$2L_1+2nT$	$(2+2r)q$
	$2nT+2L_2$	$(2+2s)q$
	$2L_1+2nT+2L_2$	$(2+2r+2s)q$
2nd	$4L_1$	$4rq$
	$4nT$	$4q$
	$4L_2$	$4sq$
	$4L_1+2nT$	$(4r+2)q$
	$4L_1+2nT+2L_2$	$(4r+2+2s)q$
	$4L_1+4nT$	$(4r+4)q$
	$4L_1+4nT+2L_2$	$4r+4+2s)q$
	$2L_1+4nT$	$(2r+4)q$
	$2L_1+4nT+2L_2$	$(2r+4+2s)q$
	$2L_1+2nT+4L_2$	$2r+2+4s)q$
	$2L_1+4nT+4L_2$	$(2r+4+4s)q$
	$4nT+2L_2$	$(4+2s)q$
	$2nT+4L_2$	$(2+4s)q$
	$4nT+4L_2$	$(4+4s)q$
	$2L_1+2nT$	$2r-2)q$
	$2L_1+2L_2$	$(2r+2s)q$
	$2L_1-2nT-2L_2$	$2r-2s)q$
	$2L_1-2L_2$	$2r-2s)q$
	$2L_1+2nT-2L_2$	$2r-2s)q$
	$2nT-2L_2$	$2-2s)q$
$4L_1+4nT-4L_2$	$(4r+4+4s)q$	

4表面キャビティについての第1次及び一意第2次周波数に対するOPD及び正規化周波数

【 図 5 】



【 図 6 】



【 図 7 】

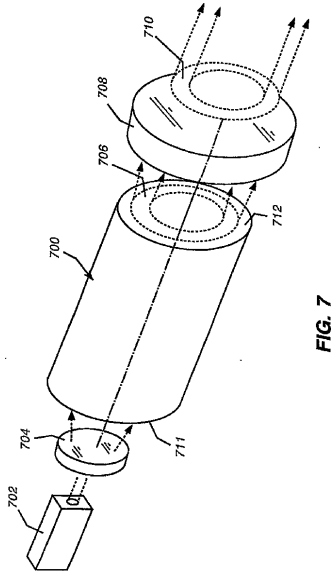
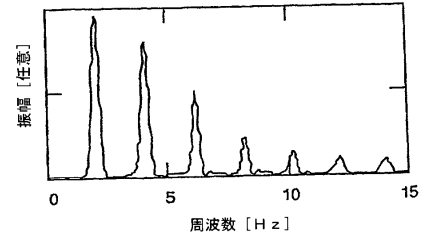


FIG. 7

【 図 8 】



【 図 9 】

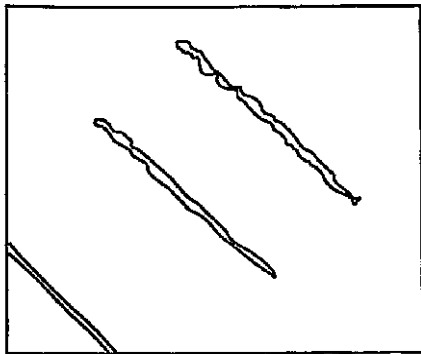


FIG. 9

【 図 10 】

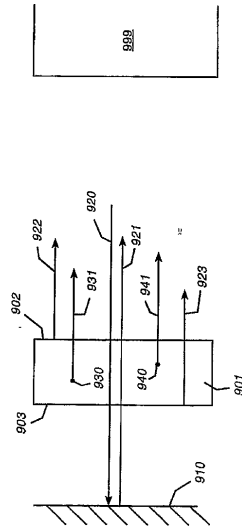


FIG. 10

【 図 11 】

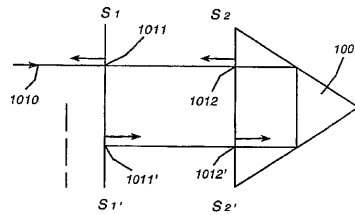


FIG. 11

【 1 2 】

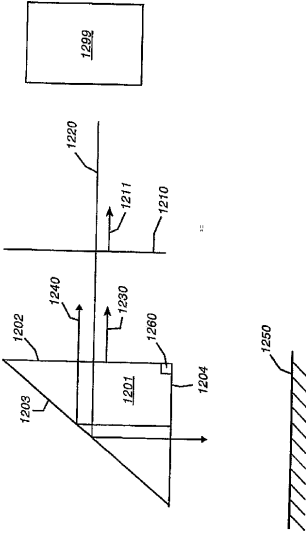


FIG. 12

【 1 3 】

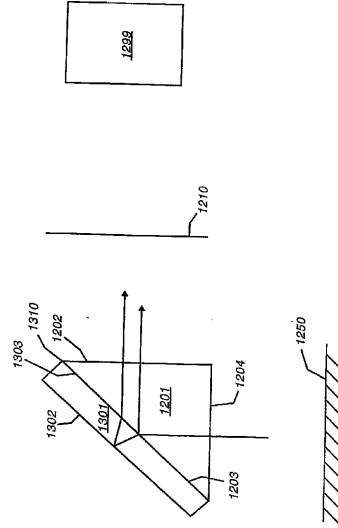


FIG. 13

【 1 4 】

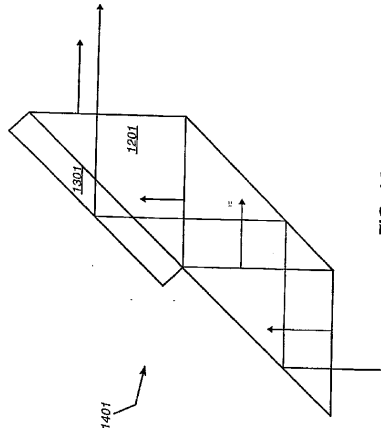


FIG. 14

フロントページの続き

(51)Int.Cl.		F I	
<i>G 0 1 M 11/00 (2006.01)</i>		G 0 1 M 11/00	T
<i>G 0 1 N 21/19 (2006.01)</i>		G 0 1 N 21/19	
<i>G 0 1 N 21/21 (2006.01)</i>		G 0 1 N 21/21	Z
<i>G 0 1 N 21/45 (2006.01)</i>		G 0 1 N 21/45	A
<i>G 0 1 N 21/958 (2006.01)</i>		G 0 1 N 21/958	

審査官 岡田 卓弥

(56)参考文献 特開2001-272214(JP,A)
特開2001-66247(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B 9/00-11/30
G01J 3/00- 3/52
G01J 9/00- 9/04
G01M11/00-11/08
G01N21/17-21/61
G01N21/84-21/958