

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7199835号
(P7199835)

(45)発行日 令和5年1月6日(2023.1.6)

(24)登録日 令和4年12月23日(2022.12.23)

(51)国際特許分類

G 0 1 M	11/02 (2006.01)	F I	G 0 1 M	11/02
G 0 2 B	5/20 (2006.01)		G 0 2 B	5/20
G 0 2 B	5/22 (2006.01)		G 0 2 B	5/22
G 0 2 B	5/26 (2006.01)		G 0 2 B	5/26

請求項の数 17 (全13頁)

(21)出願番号	特願2018-101008(P2018-101008)
(22)出願日	平成30年5月25日(2018.5.25)
(65)公開番号	特開2019-203863(P2019-203863)
	A)
(43)公開日	令和1年11月28日(2019.11.28)
審査請求日	令和3年5月18日(2021.5.18)

(73)特許権者	000001007 キヤノン株式会社 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(74)代理人	100126240 弁理士 阿部 琢磨
(74)代理人	100124442 弁理士 黒岩 創吾
(72)発明者	杉本 智洋 東京都大田区下丸子3丁目30番2号キ ヤノン株式会社内
	審査官 小野寺 麻美子

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 波面センサ、波面計測装置、光学素子の製造方法、光学系の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

被検光を複数の光に分割する分割面を含む分割素子と、
前記複数の光を受光する受光部を含む撮像素子と、
前記撮像素子で受光した前記複数の光の強度分布に基づいて前記被検光の波面を算出する演算手段とを有し、
前記分割素子と前記撮像素子とが直接又は平板ガラスを介して接しており、
前記演算手段は、

前記分割面と前記受光部との間に配置される一つ以上の層の夫々の厚み及び屈折率を各々 T_k 及び N_k とするとき、該一つ以上の層の夫々の T_k / N_k に基づいて前記波面を算出し、

前記波面の算出において、前記分割素子と前記撮像素子の相対位置のずれを、回転軸の周りに回転させる演算により補正することを特徴とする波面センサ。

【請求項2】

前記分割素子と前記受光部とが直接接しており、前記演算手段は前記分割素子の T_k / N_k に基づいて前記波面を算出することを特徴とする請求項1に記載の波面センサ。

【請求項3】

前記分割素子と前記受光部とが前記平板ガラスを介して接しており、前記演算手段は前記分割素子及び前記平板ガラスの T_k / N_k に基づいて前記波面を算出することを特徴とする請求項1に記載の波面センサ。

【請求項 4】

前記分割面と前記受光部とが前記平板ガラスを介して接しており、前記演算手段は前記平板ガラスの T_k / N_k に基づいて前記波面を算出することを特徴とする請求項 1 に記載の波面センサ。

【請求項 5】

前記分割素子と前記受光部の光入射側に配置された光透過部材とが直接接しており、前記演算手段は前記分割素子及び前記光透過部材の T_k / N_k に基づいて前記波面を算出することを特徴とする請求項 1 に記載の波面センサ。

【請求項 6】

前記分割素子と前記受光部の光入射側に配置された光透過部材とが前記平板ガラスを介して接しており、前記演算手段は前記分割素子、前記平板ガラス、及び前記光透過部材の T_k / N_k に基づいて前記波面を算出することを特徴とする請求項 1 に記載の波面センサ。

10

【請求項 7】

前記分割面と前記受光部の光入射側に配置された光透過部材とが前記平板ガラスを介して接しており、前記演算手段は前記平板ガラス及び前記光透過部材の T_k / N_k に基づいて前記波面を算出することを特徴とする請求項 1 に記載の波面センサ。

【請求項 8】

前記光透過部材は、カバーガラス、ローパスフィルタ、赤外カットフィルタの少なくとも一つにより構成されていることを特徴とする請求項 5 から 7 のいずれか一項に記載の波面センサ。

20

【請求項 9】

前記平板ガラスの光入射側の面と光出射側の面とがなす角度は 0.005 度以下であることを特徴とする請求項 3, 4, 6, 7 のいずれか一項に記載の波面センサ。

【請求項 10】

被検光を複数の光に分割する分割素子と、

前記複数の光を受光する撮像素子と、

前記撮像素子で受光した前記複数の光の強度分布に基づいて前記被検光の波面を算出する演算手段とを有し、

前記撮像素子の受光部又は該受光部の光入射側に配置された光透過部材は、前記分割素子に直接又は平板ガラスを介して接しており、

30

前記演算手段は、前記分割素子の厚み及び屈折率を各々 T_m 及び N_m 、前記平板ガラスの厚み及び屈折率を各々 T_p 及び N_p 、前記光透過部材の厚み及び屈折率を各々 T_c 及び N_c とするとき、

前記分割素子と前記受光部とが直接接している場合は T_m / N_m に基づいて前記波面を算出し、

前記分割素子と前記光透過部材とが直接接している場合は T_m / N_m 及び T_c / N_c に基づいて前記波面を算出し、

前記分割素子と前記受光部とが前記平板ガラスを介して接している場合は T_p / N_p に基づいて前記波面を算出し、

前記分割素子と前記光透過部材とが前記平板ガラスを介して接している場合は T_p / N_p 及び T_c / N_c に基づいて前記波面を算出し、

40

前記波面の算出において、前記分割素子と前記撮像素子の相対位置のずれを、回転軸の周りに回転させる演算により補正することを特徴とする波面センサ。

【請求項 11】

前記演算手段は、前記分割素子と前記受光部とが前記平板ガラスを介して接している場合は T_m / N_m 及び T_p / N_p に基づいて前記波面を算出することを特徴とする請求項 1 0 に記載の波面センサ。

【請求項 12】

前記演算手段は、前記分割素子と前記光透過部材とが前記平板ガラスを介して接している場合は T_m / N_m 、 T_p / N_p 、及び T_c / N_c に基づいて前記波面を算出することを

50

特徴とする請求項 1 0 に記載の波面センサ。

【請求項 1 3】

前記回転軸は、前記撮像素子の光入射側の面に垂直であることを特徴とする請求項 1 から 1 2 のいずれか一項に記載の波面センサ。

【請求項 1 4】

前記回転軸は、前記撮像素子の光入射側の面に平行であることを特徴とする請求項 1 から 1 2 のいずれか一項に記載の波面センサ。

【請求項 1 5】

光源からの光を被検物に入射させる投光系と、

前記被検物から出射した被検光を受光して該被検光の波面を算出する請求項 1 から 1 4 のいずれか一項に記載の波面センサを有することを特徴とする波面計測装置。 10

【請求項 1 6】

光学系を組み立てるステップと、

請求項 1 5 に記載の波面計測装置を用いて前記光学系の波面収差を計測することにより、前記光学系の光学性能を評価するステップを含むことを特徴とする光学系の製造方法。 20

【請求項 1 7】

光学素子を加工するステップと、

請求項 1 5 に記載の波面計測装置を用いて前記光学素子の波面収差を計測することにより、前記光学素子の光学性能を評価するステップを含むことを特徴とする光学素子の製造方法。 20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、光学素子や光学系の波面を計測する波面センサに関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

光学素子や光学系の透過光または反射光の波面計測に、シャック・ハルトマンセンサやタルボ干渉計といった波面センサが用いられている。波面センサは、光束を複数の光に分割する光束分割素子（2次元マイクロレンズアレイや2次元回折格子）と、その複数の光を受光する撮像素子（CMOSやCCD）を備えている。波面センサの計測精度は、光束分割素子と撮像素子の相対位置精度に依存する。 30

【0 0 0 3】

特許文献 1 に開示された波面センサは、光束分割素子と撮像素子の相対位置を精度よく調整する機構を設けている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0 0 0 4】

【文献】特表 2 0 1 2 - 5 3 3 7 5 8 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0 0 0 5】

特許文献 1 に開示された波面センサでは、光束分割素子と撮像素子の相対位置を精密調整することを前提としている。そのため、その精密調整機構及び精密調整工程の分だけ波面センサのコストが高くなる。 40

【0 0 0 6】

本発明は、光束分割素子と撮像素子の相対位置を精密調整する機構及び工程を省いた低コストの波面センサを提供することを例示的な目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0 0 0 7】

本発明の一実施形態としての波面センサは、検光を複数の光に分割する分割面を含む分 50

割素子と、前記複数の光を受光する受光部を含む撮像素子と、前記撮像素子で受光した前記複数の光の強度分布に基づいて前記被検光の波面を算出する演算手段とを有し、前記分割素子と前記撮像素子とが直接又は平板ガラスを介して接しており、前記演算手段は、前記分割面と前記受光部との間に配置される一つ以上の層の夫々の厚み及び屈折率を各々 T_k 及び N_k とするとき、該一つ以上の層の夫々の T_k / N_k に基づいて前記波面を算出し、前記波面の算出において、前記分割素子と前記撮像素子の相対位置のずれを、回転軸の周りに回転させる演算により補正することを特徴とする。

【0008】

本発明の他の実施形態としての波面計測装置は、光源と、前記光源からの光を被検光学系に入射させる投光系と、上記の波面センサを有することを特徴とする。

10

【0009】

本発明の他の実施形態としての光学系の製造方法は、光学系を組み立てるステップと、上記の波面計測装置を用いて前記光学系の波面収差を計測することにより、前記光学系の光学性能を評価するステップを含むことを特徴とする。

【0010】

本発明の他の実施形態としての光学素子の製造方法は、光学素子を加工するステップと、上記の波面計測装置を用いて前記光学素子の波面収差を計測することにより、前記光学素子の光学性能を評価するステップを含むことを特徴とする。

【発明の効果】

【0011】

本発明によれば、光束分割素子と撮像素子の相対位置を精密調整する機構及び工程を省いた低コストの波面センサが得られる。

20

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】実施例1の波面センサの概略構成を示す図。

【図2】実施例2の波面センサの概略構成を示す図。

【図3】撮像素子のカバーガラスが歪んでいる場合の波面センサの概略構成を示す図。

【図4】実施例3の波面計測装置の概略構成を示す図。

【図5】光学系の製造方法の製造工程を示す図。

【図6】光学素子の製造方法の製造工程を示す図。

30

【発明を実施するための形態】

【0013】

以下、図面を参照しつつ、本発明の実施例について説明する。

【実施例1】

【0014】

図1は、本発明における実施例1の波面センサ100の概略構成を示している。波面センサ100は、光束分割素子(マイクロレンズアレイ)10、基準平板ガラス20、撮像素子(例えばCMOSやCCD)30、演算手段(コンピュータ)80で構成される。撮像素子30の面30a(本実施例では受光部)に対して、水平方向にx軸とy軸が、垂直方向にz軸が定義されている。x軸とy軸の方向は、撮像素子30の画素の2次元配列方向と一致している。撮像素子30の面30aは、z=0の位置にある。

40

【0015】

光束分割素子10の光入射側の面(第1面)10aはレンズ構造(光束を分割する機能)を有し、光出射側の面(第2面)10bは平面である。基準平板ガラス20の光入射側の面(第1面)20a、光出射側の面(第2面)20bは、ともに平面であり、第1面20aと第2面20bとは平行になっている(第1面20aと第2面20bのなす角度が0.005度以下である)。光束分割素子10の第2面10bと基準平板ガラス20の第1面20aとが接しており、また、基準平板ガラス20の第2面20bと撮像素子30の面30aとが接している。

【0016】

50

波面センサ 100 に平行光が入射したとき、光束分割素子 10 の各レンズの集光点がほぼ撮像素子 30 の面 30a 上に形成されるように、光束分割素子 10 の厚み T_m 及び屈折率 N_m 、基準平板ガラス 20 の厚み T_p 及び屈折率 N_p を選択する。例えば、数式 1 を満たすように選択する。

【0017】

【数 1】

$$f = \frac{T_m}{N_m} + \frac{T_p}{N_p}$$

10

・・・数式 1

【0018】

ここで f は光束分割素子 10 の各レンズの焦点距離である。

【0019】

波面センサ 100 は、光束分割素子 10 と撮像素子 30 の相対位置を精密調整する機構を備えていない。さらに、波面センサ 100 を組み立てるときは、精密調整工程を省略し、光束分割素子 10、基準平板ガラス 20、撮像素子 30 が接するように不図示の治具で固定するか、または、接着剤等で固定するだけである。接着剤を使用する場合、接着剤は、各素子が接する面 (10b と 20a、20b と 30a) に塗布するのではなく、側面 (光が透過しない面) に塗布する。接着剤を使用する代わりに、オプティカルコンタクトで結合させてもよい。

20

【0020】

本実施例では、光束分割素子 10 と撮像素子 30 が基準平板ガラス 20 に接することで、光束分割素子 10 と撮像素子 30 の z 方向の相対位置が高精度に位置決めされている。つまり、光束分割素子 10 の第 1 面 10a と撮像素子 30 の面 30a の距離が一定である。したがって、従来実施していた z 方向の相対位置の精密調整は省くことができる。一方、光束分割素子 10 のマイクロレンズの配列方向と撮像素子 30 の画素の配列方向 ($= x$ 方向、 y 方向) は、精密調整を省略した影響で一致していない。つまり、光束分割素子 10 のマイクロレンズの配列方向は、撮像素子 30 の画素の配列方向に対して、 z 軸 (撮像素子 30 の面 30a に直交する軸) 周りに回転している。この z 軸 (特定の軸) 周りの回転による相対位置誤差は、後述する演算処理で補正する。

30

【0021】

波面センサ 100 に、ある波面 $W(x, y)$ を有する被検光 90 が入射すると、図 1 のように、撮像素子 30 の面 30a 上に、波面形状に応じた集光スポットが形成される。そして、撮像素子 30 で集光スポットの強度分布 (複数の光の強度分布) が受光される。撮像素子 30 で受光された強度分布のデータは、コンピュータ 80 に送られ、各集光スポットの重心座標が計算される。光束分割素子 10 の i 行 j 列に位置するマイクロレンズの座標を ($X_{ij}, Y_{ij}, T_m + T_p$)、そのレンズによって形成される集光スポットの重心座標を ($X_{ij} + x_{ij}, Y_{ij} + y_{ij}, 0$) とすると、数式 2 の関係式が成り立つ。ただし、 x_{ij} 、 y_{ij} は、各マイクロレンズに入射する x 方向、 y 方向それぞれの入射角である。

40

【0022】

【数 2】

50

$$\frac{d}{dx} W(X_{ij}, Y_{ij}) = \tan \varphi_{xij}$$

$$\frac{d}{dy} W(X_{ij}, Y_{ij}) = \tan \varphi_{yij}$$

$$\delta X_{ij} = T_m \frac{\sin \varphi_{xij}}{\sqrt{N_m^2 - \sin^2 \varphi_{xij}}} + T_p \frac{\sin \varphi_{xij}}{\sqrt{N_p^2 - \sin^2 \varphi_{xij}}}$$

$$\delta Y_{ij} = T_m \frac{\sin \varphi_{yij}}{\sqrt{N_m^2 - \sin^2 \varphi_{yij}}} + T_p \frac{\sin \varphi_{yij}}{\sqrt{N_p^2 - \sin^2 \varphi_{yij}}}$$

10

. . . 数式 2

【0 0 2 3】

各マイクロレンズに入射する光の角度が小さければ、数式 2 は、数式 1 を用いて数式 3 のように近似的に変形できる。

【0 0 2 4】

【数 3】

$$\frac{d}{dx} W(X_{ij}, Y_{ij}) = \frac{\delta X_{ij}}{f}$$

$$\frac{d}{dy} W(X_{ij}, Y_{ij}) = \frac{\delta Y_{ij}}{f}$$

20

. . . 数式 3

【0 0 2 5】

光束分割素子 10 のマイクロレンズの配列方向と撮像素子 30 の画素の配列方向とがほぼ一致していると仮定する（つまり、従来通り精密調整した場合）。このとき、光束分割素子 10 のマイクロレンズの座標 X_{ij} , Y_{ij} は、数式 4 のように、x 方向と y 方向それぞれに光束分割素子 30 のマイクロレンズの周期（例えば $= 150 \mu m$ ）で配列された値になる。

$$X_{ij} = j + a$$

$$Y_{ij} = i + b$$

. . . 数式 4

30

【0 0 2 6】

ここで、a は x 座標のオフセット定数、b は y 座標のオフセット定数である。一方、本実施例では、光束分割素子 10 のマイクロレンズの配列方向が、撮像素子 30 の画素の配列方向に対して z 軸（特定の軸）周りに回転しているので、数式 5 のように補正をする必要がある。

40

【0 0 2 7】

【数 4】

$$\begin{pmatrix} X_{ij} \\ Y_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Lambda j + a \\ \Lambda i + b \end{pmatrix}$$

. . . 数式 5

【0 0 2 8】

ここで、 θ_z は z 軸周りの回転による相対位置誤差である。 θ_z の量は、あらかじめ、

50

波面センサ 100 に平行光を入射させたときに撮像素子 30 で測定される集光スポットの重心座標配列から計算しておく。この数式 5 を、数式 2 または数式 3 と組み合わせることで、被検光の波面 $W(x, y)$ を算出することができる。精密調整無しでも偶然 z の値が小さいときがある。そのときは、数式 5 の代わりに数式 4 を用いてもよい。

【0029】

以上のように、本実施例では、光束分割素子 10 と撮像素子 30 を基準平板ガラス 20 に接するように配置することで、光束分割素子 10 と撮像素子 30 の z 方向の相対位置を高精度に位置決めしている。そして、 z 軸（特定の軸）周りの回転による相対位置誤差に関しては数式 5 のような演算で補正することで、精密調整機構及び精密調整工程を省き、低コストの波面センサを実現している。また、本実施例には次のような効果もある。

10

【0030】

光束分割素子 10 の有効領域外（周辺部）を保持する従来の固定方法では、光束分割素子 10 の自重変形、応力による変形、熱膨張・熱収縮による変形の影響を受けて、光束分割素子 10 と撮像素子 30 の z 方向の距離に、非線形な分布が発生することができる。ここで、非線形な分布とは、例えば、有効領域の中央に凹または凸をもつ 2 次関数（+ 高次関数）のような分布である。一方、本実施例では、光束分割素子 10 の全有効領域を基準平板ガラス 20 が支えているため、上記のような非線形な分布を抑制することができる。つまり、堅牢な波面センサが実現できる。

【0031】

本実施例では、光束分割素子 10 の屈折率 N_m と基準平板ガラス 20 の屈折率 N_p が異なる（つまり、光束分割素子 10 と基準平板ガラス 20 の材質が異なる）前提で説明したが、両者の屈折率（材質）は同じでもよい。その場合、数式 2、数式 3 において、 T_m に $T_m + T_p$ を、 T_m に 0 を代入した式になる。もし、厚み $T_m + T_p$ を有する光束分割素子 10 を製造できるのであれば、基準平板ガラス 20 は無くてもよい。その場合、光束分割素子 10 と撮像素子 30 が直接接していることになる。一般的に、フォトリソグラフィで製作したマイクロレンズアレイは厚みが 1 mm 程度である。光束分割素子 10 の厚みを増やして基準平板ガラス 20 を除くためには、例えば、マイクロレンズの焦点距離 $f \sim 5$ mm、マイクロレンズアレイの屈折率 $N_m \sim 1.5$ のとき、厚み ~ 7.5 mm（従来の 7、8 倍）程度のマイクロレンズアレイを準備する必要がある。

20

【0032】

本実施例では、光束分割素子 10 の第 1 面 10a はレンズ構造、第 2 面 10b は平面としたが、第 1 面 10a が平面で、第 2 面 10b がレンズ構造（もしくは、第 1 面 10a、第 2 面 10b ともにレンズ構造）でもよい。その場合、数式 1 の代わりに、 $f = T_p / N_p$ を満たす基準平板ガラス 20 を準備する必要がある。そして、数式 2、数式 3 は、 T_m に 0 を代入した式になる。

30

【0033】

本実施例では、数式 5 のように、光束分割素子 10 のマイクロレンズの座標を z 回転させる演算をしているが、その代わりに、各集光スポットの重心座標のずれ量 X_{ij} 、 X_{ij} を $-z$ 回転させてもよい。

【0034】

本実施例では、波面センサとして、光束分割素子 10 にマイクロレンズアレイを用いたシャック・ハルトマンセンサを採用したが、代わりにピンホールアレイを用いたハルトマンセンサや、回折格子を用いたタルボ干渉計にしてもよい。波面回復の方法は、本実施例のように各集光スポットの重心座標を計算する方法でもよいし、フーリエ変換法でもよい。

40

【実施例 2】

【0035】

図 2 は、本発明における実施例 2 の波面センサ 200 の概略構成を示している。実施例 1 と同様の構成については、同一の符号を付して説明する。波面センサ 200 は、光束分割素子 10、基準平板ガラス 20、カバーガラス 35 を有する撮像素子 30、コンピュータ 80 で構成される。本実施例では、カバーガラス 35 も含めて撮像素子 30 と定義し、

50

撮像素子 3 0 の面 3 0 a はカバーガラス（光透過部材）3 5 の面を意味する。カバーガラス 3 5 と撮像素子 3 0 の受光部 3 0 b の間には空気の層があるとする。

【 0 0 3 6 】

本実施例では、実施例 1 の構成（図 1）に加えてカバーガラス 3 5（厚み T_c 、屈折率 N_c ）と空気（厚み T_a 、屈折率 1）の層があるため、実施例 1 の数式 1、数式 2 のそれに相当するものは、数式 6、数式 7 になる。本実施例の構成においては、数式 5 と数式 7（または数式 6 の f を数式 3 に代入した式）を組み合わせることで被検光の波面を算出することができる。

【 0 0 3 7 】

【 数 5 】

$$f = \frac{T_m}{N_m} + \frac{T_p}{N_p} + \frac{T_c}{N_c} + T_a$$

10

・・・数式 6

【 0 0 3 8 】

【 数 6 】

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} W(X_{ij}, Y_{ij}) &= \tan \varphi_{xij} \\ \frac{d}{dy} W(X_{ij}, Y_{ij}) &= \tan \varphi_{yij} \\ \delta X_{ij} &= T_m \frac{\sin \varphi_{xij}}{\sqrt{N_m^2 - \sin^2 \varphi_{xij}}} + T_p \frac{\sin \varphi_{xij}}{\sqrt{N_p^2 - \sin^2 \varphi_{xij}}} + T_c \frac{\sin \varphi_{xij}}{\sqrt{N_c^2 - \sin^2 \varphi_{xij}}} + T_a \tan \varphi_{xij} \\ \delta Y_{ij} &= T_m \frac{\sin \varphi_{yij}}{\sqrt{N_m^2 - \sin^2 \varphi_{yij}}} + T_p \frac{\sin \varphi_{yij}}{\sqrt{N_p^2 - \sin^2 \varphi_{yij}}} + T_c \frac{\sin \varphi_{yij}}{\sqrt{N_c^2 - \sin^2 \varphi_{yij}}} + T_a \tan \varphi_{yij} \end{aligned}$$

20

・・・数式 7

30

【 0 0 3 9 】

本実施例では、撮像素子 3 0 の受光部 3 0 b の前方（+z 軸方向）にカバーガラス 3 5 があるとしたが、カバーガラスの代わりにローパスフィルタや赤外カットフィルタ、もしくは、それら複数の組合せがあってもよい。光束分割素子 1 0 の光束分割面 1 0 a（レンズや回折格子の構造がある面）から、撮像素子 3 0 の受光部 3 0 b にいたるまでに、厚み T_k 、屈折率 N_k （ $k = 1, 2, \dots, M$ ）の層があるとき、数式 6、数式 7 は数式 8、数式 9 のように一般化される。

【 0 0 4 0 】

【 数 7 】

$$f = \sum_{k=1}^M \frac{T_k}{N_k}$$

40

・・・数式 8

【 0 0 4 1 】

【 数 8 】

50

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dx} W(X_{ij}, Y_{ij}) &= \tan \varphi_{xij} \\
 \frac{d}{dy} W(X_{ij}, Y_{ij}) &= \tan \varphi_{yij} \\
 \delta X_{ij} &= \sum_{k=1}^M T_k \frac{\sin \varphi_{xij}}{\sqrt{N_k^2 - \sin^2 \varphi_{xij}}} \\
 \delta Y_{ij} &= \sum_{k=1}^M T_k \frac{\sin \varphi_{yij}}{\sqrt{N_k^2 - \sin^2 \varphi_{yij}}}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

・・・数式 9

【0042】

上記の説明では、撮像素子 30 内において、受光部 30b に対してカバーガラス 35 が平行かつ歪無く取り付けられていると仮定した。しかし、使用する撮像素子によっては、図 3 の波面センサ 201 のようにカバーガラス 35 の取り付け精度が悪い場合もありうる。その場合、光束分割素子 10 と基準平板ガラス 20 が撮像素子 30 の受光部 30b に対して傾いた状態になる（x 軸周り及び y 軸周りの回転による相対位置誤差が生じる）。光束分割素子 10 の面積が、例えば、15 × 15 mm、基準平板ガラス 20 の厚みが、例えば 5 mm 程度であれば、光束分割素子 10 と基準平板ガラス 20 のセットで構成される部分は、ほぼ歪み無しで配置できる。光束分割素子 10 を大面積にする場合は、面積に応じて基準平板ガラス 20 の厚みも大きくすれば歪を抑制できる。

【0043】

図 3 の構成の場合、光束分割素子 10 の厚み T_m 、基準平板ガラス 20 の厚み T_p 、カバーガラス 35 の厚み T_c は、図 2 と同様に、場所によらず一定とみなせる（カバーガラス 35 も、形状が変わるだけで厚みはほぼ一定）。一方、空気の層の厚み（カバーガラス 35 と受光面 30b の間の空気層だけでなく、基準平板ガラス 20 の第 2 面 20b と撮像素子 30 の面 30a の間の空気層も加算した厚み）は、分布をもつ ($T_{a ij} = T_a (X_{ij}, Y_{ij})$)。この厚み分布 $T_{a ij}$ を無視すると、波面算出誤差が発生する。従来では、この分布を取り除くために光束分割素子 10 を精密調整していたが、本実施例では、精密調整の代わりに空気層の厚みの補正計算（x 軸および y 軸を特定の軸とした軸周りの回転による補正演算）をすることで、従来の精密調整機構及び工程を省略する。

【0044】

本実施例の構成では、光束分割素子 10 と基準平板ガラス 20 のセットが歪み無く傾いているだけとみなせるので、空気の層の厚み分布 $T_{a ij}$ は、数式 10 のように、線形に変化する分布と近似できる。

$$T_{a ij} = T_a + A X_{ij} + B Y_{ij} \tag{10}$$

【0045】

ここで、A、B は比例定数、 T_a は空気層の厚み分布の平均値である。数式 10 の第 2 項および第 3 項は、x y 平面内において、y 軸から $\arctan(B/A)$ 回転した軸（撮像素子 30 の面 30a に平行な軸）に関して、 $\arctan((A^2 + B^2))$ 回転する補正を加えていることを意味する。この数式 10 の $T_{a ij}$ を、数式 7 の T_a に代入して波面を算出すれば、図 3 の構成の波面センサにおける波面が得られる。

【実施例 3】

【0046】

図 4 は、実施例 1 の波面センサ 100 を用いた波面計測装置 1 の概略構成を示している。波面計測装置 1 は、光源 50、投光系 60、波面センサ 100 で構成されており、被検

10

20

30

40

50

物 7 0 の波面を計測する。本実施例では、被検物 7 0 は複数の光学素子を組み合わせた光学系または単一の光学素子である。

【 0 0 4 7 】

光源 5 0 から射出した発散光は、投光系 6 0 で収束し、被検物 7 0 に入射する。被検物 7 0 を透過した光は、波面センサ 1 0 0 に入射し、被検物 7 0 の波面収差 9 0 が計測される。この波面収差の計測結果を、光学系や光学素子の製造方法にフィードバックすることができる。光源 5 0 としては、例えば、レーザダイオードや L E D が用いられる。投光系 6 0 は、例えば、単レンズ、複数レンズ、C G H (C o m p u t e r - G e n e r a t e d H o l o g r a p h y) により構成される。本実施例によれば、光束分割素子と撮像素子の相対位置を精密調整する機構及び工程を省いた波面センサを利用することにより、低コストの波面計測装置を実現することができる。

10

【 0 0 4 8 】

図 5 は、光学系の製造方法を示している。まず、複数の光学素子を用いて光学系を組み立て、各光学素子の位置を調整する (S 1 1)。組立調整された光学系は、その光学性能が評価され (S 1 2)、精度不足である場合は再度組立調整を行う。この光学性能評価に、実施例 1 や実施例 2 の波面センサを備えた波面計測装置 1 を利用することができる。

【 0 0 4 9 】

図 6 は、モールド加工を利用した光学素子の製造方法を示している。光学素子は、光学素子の設計工程 (S 2 1)、金型の設計工程 (S 2 2)、及び、設計された金型を用いた光学素子のモールド工程 (S 2 3) を経て製造される。モールドされた光学素子は、その形状精度が評価され (S 2 4)、精度不足である場合は金型を補正して (S 2 5) 再度モールドを行う。形状精度が良好であれば、光学素子の光学性能が評価される (S 2 6)。光学性能が低い場合は、光学面を補正した光学素子を設計し直す (S 2 7)。光学性能が良好である場合は、モールドされる光学素子の量産工程 (S 2 8) に進む。この光学性能の評価に波面計測装置 1 を利用することができる。上記光学素子の製造方法は、モールドに限られず、研削、研磨による光学素子の製造にも同様に適用することができる。

20

【 0 0 5 0 】

以上、説明した各実施例は代表的な例に過ぎず、本発明の実施に際しては、各実施例に対して種々の変形や変更が可能である。

【 符号の説明 】

30

【 0 0 5 1 】

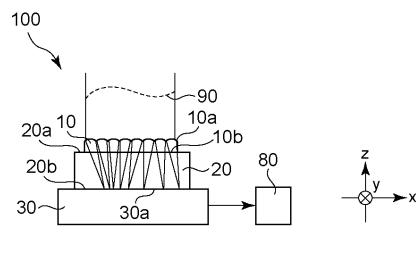
- 1 0 光束分割素子
- 2 0 基準平板ガラス
- 3 0 撮像素子
- 8 0 演算手段

40

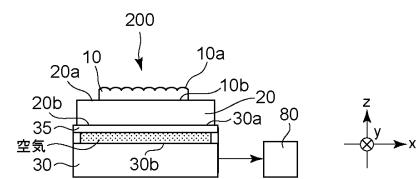
50

【図面】

【図 1】



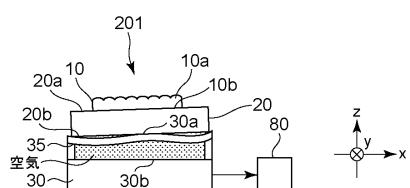
【図 2】



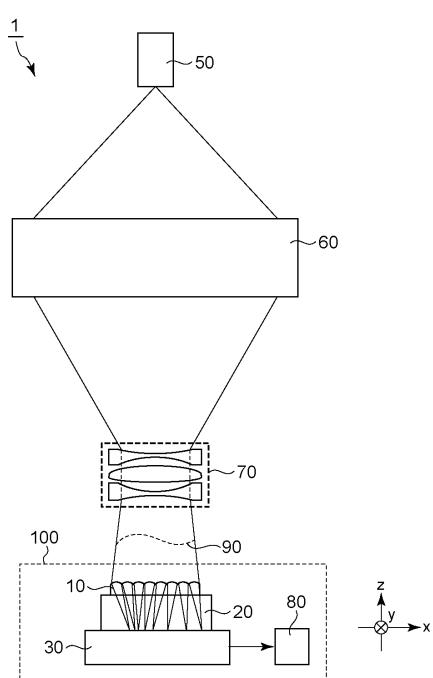
10

20

【図 3】



【図 4】

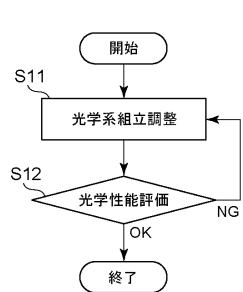


30

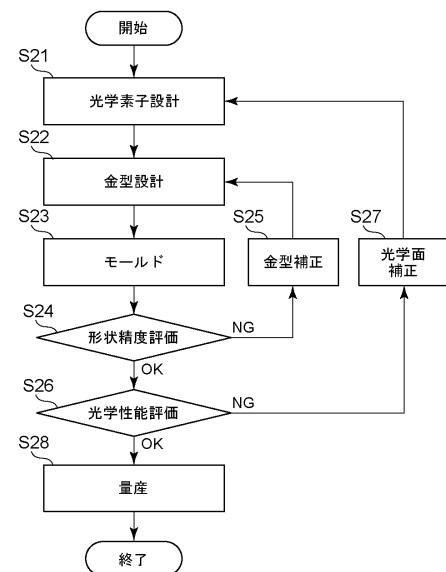
40

50

【図 5】



【図 6】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第2010/058193 (WO, A2)
米国特許第05936720 (US, A)
特開2011-117897 (JP, A)
特開2011-196732 (JP, A)
特開2002-270491 (JP, A)
特開2006-030016 (JP, A)
特開2015-055544 (JP, A)
PFUND,J. et al. , Misalignment effects of the Shack-Hartmann sensor , APPLIED OPTICS , 1998年01月01日 , Vol. 37, No. 1 , pp.22-27

(58)調査した分野 (Int.Cl. , DB名)

G 01 M	11/00	-	G 01 M	11/08
G 01 N	21/00	-	G 01 N	21/01
G 01 N	21/17	-	G 01 N	21/61
G 01 N	33/00	-	G 01 N	33/46
G 02 B	5/20	-	G 02 B	5/28
H 04 N	5/30	-	H 04 N	5/378