

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6124641号
(P6124641)

(45) 発行日 平成29年5月10日(2017.5.10)

(24) 登録日 平成29年4月14日(2017.4.14)

(51) Int.Cl.

G O 1 M 11/02 (2006.01)

F I

G O 1 M 11/02

B

請求項の数 11 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2013-63405 (P2013-63405)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成25年3月26日 (2013.3.26)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2014-190705 (P2014-190705A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成26年10月6日 (2014.10.6)	(74) 代理人	100110412
審査請求日	平成28年3月18日 (2016.3.18)		弁理士 藤元 亮輔
		(74) 代理人	100104628
			弁理士 水本 敦也
		(74) 代理人	100121614
			弁理士 平山 倫也
		(72) 発明者	加藤 正磨
			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】 波面収差計測方法、波面収差計測装置および光学素子の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

被検物において透過または反射した計測光の強度分布を、受光センサを用いて計測するステップと、

前記受光センサ上での前記計測光の微分波面である第1の微分波面を算出するステップと、

前記第1の微分波面に対して、前記計測光の前記受光センサへの入射角に応じた補正処理を行うことで第2の微分波面を算出する補正ステップと、

前記第2の微分波面を用いて、前記被検物の波面収差を算出する波面収差算出ステップとを含むことを特徴とする波面収差計測方法。

【請求項 2】

前記被検物に対して基準となる形状を有する基準被検物において透過または反射した基準光の前記受光センサ上での波面である基準波面を取得するステップを有しており、

前記波面収差算出ステップは、前記第2の微分波面を積分して得られる波面と前記基準波面との差を用いて、前記波面収差を算出することを特徴とする請求項1に記載の波面収差計測方法。

【請求項 3】

前記被検物に対して基準となる形状を有する基準被検物において透過または反射した基準光の前記受光センサ上での微分波面である基準微分波面を取得するステップを有しており、

10

20

前記波面収差算出ステップは、前記第 2 の微分波面と前記基準微分波面との差を積分することにより前記波面収差を算出することを特徴とする請求項 1 に記載の波面収差計測方法。

【請求項 4】

被検物において透過または反射した計測光の強度分布を、受光センサを用いて計測するステップと、

前記受光センサ上での前記計測光の微分波面としての計測微分波面を算出するステップと、

前記被検物に対して基準となる形状を有する基準被検物において透過または反射した基準光の前記受光センサ上での微分波面である第 1 の基準微分波面を算出するステップと、

前記第 1 の基準微分波面に対して、前記基準光の前記受光センサへの入射角に応じた補正処理を行うことで第 2 の基準微分波面を算出する補正ステップと、

前記第 2 の基準微分波面と前記計測微分波面とを用いて前記被検物の波面収差を算出する波面収差算出ステップとを有することを特徴とする波面収差計測方法。

【請求項 5】

前記波面収差算出ステップは、前記第 2 の基準微分波面と前記計測微分波面との差を積分することにより前記波面収差を算出することを特徴とする請求項 4 に記載の波面収差計測方法。

【請求項 6】

前記補正ステップは、前記入射角の関数を用いて前記補正処理を行うことを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の波面収差計測方法

【請求項 7】

前記入射角の関数は、前記入射角の方向余弦であることを特徴とする請求項 6 に記載の波面収差計測方法。

【請求項 8】

前記被検物は、非球面を有する光学素子であることを特徴とする請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の波面収差計測方法。

【請求項 9】

光学素子を成形するステップと、

請求項 1 から 8 のいずれか一項に記載の波面収差計測方法を用いて、前記被検物である前記光学素子の波面収差を算出するステップと、

該波面収差を用いて前記光学素子を評価するステップとを有することを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項 10】

被検物において透過または反射した計測光の強度分布を、受光センサを用いて計測する計測手段と、

前記受光センサ上での前記計測光の微分波面である第 1 の微分波面を算出する微分波面算出手段と、

前記第 1 の微分波面に対して、前記計測光の前記受光センサへの入射角に応じた補正処理を行うことで第 2 の微分波面を算出する補正手段と、

前記第 2 の微分波面を用いて、前記被検物の波面収差を算出する波面収差算出手段とを有することを特徴とする波面収差計測装置。

【請求項 11】

被検物において透過または反射した計測光の強度分布を、受光センサを用いて計測する計測手段と、

前記受光センサ上での前記計測光の微分波面としての計測微分波面を算出する計測微分波面算出手段と、

前記被検物に対して基準となる形状を有する基準被検物において透過または反射した基準光の前記受光センサ上での微分波面である第 1 の基準微分波面を算出する基準微分波面算出手段と、

10

20

30

40

50

前記第 1 の基準微分波面に対して、前記基準光の前記受光センサへの入射角に応じた補正処理を行うことで第 2 の基準微分波面を算出する補正手段と、

前記第 2 の基準微分波面と前記計測微分波面とを用いて、前記被検物の波面収差を算出する波面収差算出手段とを有することを特徴とする波面収差計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光学素子等の被検物の波面収差を計測する計測技術に関する。

【背景技術】

【0002】

被検物としての光学素子を透過または反射した光の波面（透過波面や反射波面）を計測する方法には、トールボット干渉計やシャックハルトマンセンサを用いた計測方法が知られている。そして、これらの計測方法による計測結果と光学素子の収差の設計値との差分を求めることで、光学素子の収差に対応した波面収差を計測することができる。

【0003】

特許文献 1 には、トールボット干渉計やシャックハルトマンセンサによる波面の計測値と基準波面の値との差分（波面収差）から、被検物の収差を求める方法が開示されている。また、基準波面を求める方法として、形状および屈折率分布が既知である基準被検物を用いて計算した光路長を用いる方法も開示されている。

【0004】

ただし、光路長を用いて求めた基準波面は、波面の形状が平面でない場合には、トールボット干渉計やシャックハルトマンセンサによる波面計測値との乖離が生じる。この乖離は、波面が球面波の場合には数式を用いて簡易に説明できる。例えば、図 10 に示す点光源から平面であるセンサ面までの光路長 Ws は、以下の式（1）で表現できる。 L は点光源からセンサ面までの距離であり、 r はセンサ面の中心からの距離（半径）である。

【0005】

【数 1】

$$Ws = \sqrt{L^2 - r^2} - L \sim \frac{r^2}{2L} - \frac{r^4}{8L^3} + \frac{r^6}{16L^5} \dots (1)$$

【0006】

一方、トールボット干渉計およびシャックハルトマンセンサにより同じ被検物からの光の波面を計測すると、両方において等間隔の縞もしくは輝点が計測される。そして、この計測波面の微分値である微分波面はチルト波面であるため、計測波面 Wm は r の 2 次関数になり、次式（2）で表現できる。

【0007】

【数 2】

$$Wm = \frac{r^2}{2L} \dots (2)$$

【0008】

式（1）により表現される光路長 Ws と式（2）により表現される計測波面 Wm とは L が無限大、すなわち被検物からの光が平行光である場合にのみ一致し、それ以外の場合は互いに異なる値を持つ。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献 1】特開 2010 - 151578 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

20

30

40

50

【 0 0 1 0 】

このような乖離は、計測波面が非球面である場合には数式で表現することが難しいため、簡単に補正することができない。したがって、基準波面を光路長を用いて求める場合に、計測波面と基準波面との正しい差分が得られないことで、波面収差の計測精度が低下するという問題がある。

【 0 0 1 1 】

本発明は、波面収差を高精度に求めることができるようにした波面収差計測方法、波面収差計測装置、さらには光学素子の製造方法を提供する。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 2 】

本発明の一側面としての波面収差計測方法は、被検物において透過または反射した計測光の強度分布を、受光センサを用いて計測するステップと、受光センサ上での計測光の微分波面である第1の微分波面を算出するステップと、第1の微分波面に対して、計測光の受光センサへの入射角に応じた補正処理を行うことで第2の微分波面を算出する補正ステップと、第2の微分波面を用いて、被検物の波面収差を算出する波面収差算出ステップとを有することを特徴とする。

【 0 0 1 3 】

また、本発明の他の一側面としての波面収差計測方法は、被検物において透過または反射した計測光の強度分布を、受光センサを用いて計測するステップと、受光センサ上での計測光の微分波面としての計測微分波面を算出するステップと、被検物に対して基準となる形状を有する基準被検物において透過または反射した基準光の受光センサ上での微分波面である第1の基準微分波面を算出するステップと、第1の基準微分波面に対して、基準光の受光センサへの入射角に応じた補正処理を行うことで第2の基準微分波面を算出する補正ステップと、第2の基準微分波面と計測微分波面とを用いて被検物の波面収差を算出する波面収差算出ステップとを有することを特徴とする。

【 0 0 1 4 】

なお、光学素子を成形するステップと、上記波面収差計測方法を用いて被検物である光学素子の波面収差を算出するステップと、該波面収差を用いて光学素子を評価するステップとを有する光学素子の製造方法も、本発明の他の一側面を構成する。

【 0 0 1 5 】

さらに、本発明の他の一側面としての波面収差計測装置は、被検物において透過または反射した計測光の強度分布を、受光センサを用いて計測する計測手段と、受光センサ上での計測光の微分波面である第1の微分波面を算出する微分波面算出手段と、第1の微分波面に対して、計測光の受光センサへの入射角に応じた補正処理を行うことで第2の微分波面を算出する補正手段と、第2の微分波面を用いて、被検物の波面収差を算出する波面収差算出手段とを有することを特徴とする。

【 0 0 1 6 】

また、本発明の他の一側面としての波面収差計測装置は、被検物において透過または反射した計測光の強度分布を、受光センサを用いて計測する計測手段と、受光センサ上での計測光の微分波面としての計測微分波面を算出する計測微分波面算出手段と、被検物に対して基準となる形状を有する基準被検物において透過または反射した基準光の受光センサ上での微分波面である第1の基準微分波面を算出する基準微分波面算出手段と、第1の基準微分波面に対して、基準光の受光センサへの入射角に応じた補正処理を行うことで第2の基準微分波面を算出する補正手段と、第2の基準微分波面と計測微分波面とを用いて、被検物の波面収差を算出する波面収差算出手段とを有することを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 1 7 】

本発明によれば、計測波面と基準波面から高精度に被検物の波面収差を求めることができる。したがって、その波面収差を用いることで、光学素子を高い精度で製造することができる。

10

20

30

40

50

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 8 】

【図 1】本発明の実施例 1 である波面収差計測装置の構成を示す図。

【図 2】実施例 1 における波面収差の算出手順を示すフローチャート。

【図 3】実施例 1 における計測手法を模式的に示す図。

【図 4】実施例 1 における基準波面の計算を模式的に示す図。

【図 5】本発明の実施例 2 である波面収差計測装置の構成を示す図。

【図 6】シャックハルトマンセンサを示す図。

【図 7】実施例 2 における波面収差の算出手順を示すフローチャート。

【図 8】本発明の実施例 3 における波面収差の算出手順を示すフローチャート。

【図 9】各実施例で得られた波面収差を用いた光学素子の製造工程を示すフローチャート

。

【図 10】光路長を示す図。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 9 】

以下、本発明の実施例について図面を参照しながら説明する。実施例において、「計測波面」とは、被検物において透過または反射した計測光を受光センサである波面センサ（以下、単にセンサともいう）により計測し、該センサから得られた信号を解析し、回復された波面（計測光の波面）を意味する。「被検物」は、非球面または球面を被検面として有する光学素子（レンズ等）である。一方、「基準被検物」とは、設計上の被検物と形状が同一で（つまりは被検物に対して基準となる形状を有し）、かつ該形状が既知である被検物をいう。また、「基準波面」は、基準被検物が既知の位置に配置された際に該基準被検物において透過または反射した基準光について計測または計算される光路長分布を意味する。また、計測波面と基準波面との差分を、波面収差という。

【実施例 1】

【 0 0 2 0 】

図 1 には、本発明の実施例 1 である波面収差計測装置の構成を示している。該計測装置は、光源 100 からの光を被検物 130 に照射し、該被検物 130 を透過した光の波面である透過波面（以下、被検物 130 の透過波面ともいう）を、波面センサを含む検出器 160 により計測する。そして、計測装置は、コンピュータである演算部 180 において、検出器 160 からの信号を用いて被検物の波面収差を演算により求める。本実施例では、透過波面を計測する計測系（計測手段）としてツールボット（T a l b o t）干渉計を用いる。演算部 180 は、微分波面算出手段、補正手段および波面収差算出手段として機能する。

【 0 0 2 1 】

レーザ光源（例えば、He - Ne レーザ）100 から光軸に沿って射出されたレーザ光 101 は、ピンホール 110 を通過する際に回折する。ピンホール 110 で回折したレーザ光（参照光）102 は、コリメータレンズ 120 により収束光 103 に変換されて被検物 130 を透過する。被検物 130 を透過したレーザ光は、2 次元回折格子である直交回折格子 150 を通過し、検出器 160 により撮像（計測）される。ピンホール 110 の直径は、回折した参照光 102 を理想球面波と見なせる程度に小さく、物体側の開口数 N A O とレーザ光源 100 の波長とを用いて、以下の式（3）を満たすように設計されている。

【 0 0 2 2 】

【数 3】

$$\phi \approx \frac{\lambda}{NAO} \dots (3)$$

【 0 0 2 3 】

が 600 nm であり、N A O が 0 . 3 程度である場合は、ピンホール 110 の直径

10

20

30

40

50

は2 μm程度でよい。ピンホールの代わりにファイバー射出端を用いてもよい。
被検物130の像側NAが小さい場合、回折格子150と検出器160間の距離Z（以下、Talbot距離という）が、以下の式（4）で示されるTalbot条件を満たすと、検出器160上に回折格子150の偽解像が干渉縞として得られる。

【0024】

【数4】

$$\frac{Z_0 Z}{Z_0 - Z} = \frac{mp^2}{\lambda} \dots (4)$$

【0025】

ただし、mは0を除く整数であり、pは回折格子150のピッチである。Z₀は回折格子150と該回折格子150に入射する光の集光位置との間の距離である。回折格子150の格子ピッチpは、被検物130の収差の大きさに応じて決められる。

【0026】

被検物130は、平行偏心機構140上に配置され、該平行偏心機構140によって光軸方向および該光軸方向に対して直交する方向に移動可能である。また、コリメータレンズ120、回折格子150および検出器160（平行偏心機構140）は、除振台170上に光軸方向に延びるように設置された不図示のレール上を相対移動可能である。

【0027】

被検物130の透過波面の計測において、演算部180は被検物130の屈折力（パワー）に応じて、被検物130、回折格子150および検出器160の最適な配置を計算する。被検物130、回折格子150および検出器160は、その計算された配置に対応する位置に移動される。このとき、被検物130は平行偏心機構140上にて移動され、回折格子150および検出器160は上述したレール上にて移動される。ここにいう最適な配置とは、被検物130を透過した光（光束）が検出器160に収まり、かつ該光束のNAが小さくなる配置である。

【0028】

図1では、被検物130が凹レンズの場合を示しているが、被検物130が凸レンズである場合には、被検物130の位置をコリメータレンズ120の集光点よりも検出器側に移動させて、発散光が被検物130に入射するように配置する。演算部180による被検物130、回折格子150および検出器160（以下、これらをまとめて素子という）の最適配置の決定と各素子の最適配置への移動とを、配置調整ともいう。

【0029】

図2には、検出器160により撮像された画像を用いて、被検物130の波面収差を算出する処理（波面収差計測方法）の手順を示している。この算出処理は、図1に示した演算器（コンピュータ）180が、コンピュータプログラムに従って行う。

【0030】

演算器180は、ステップS11～S16において計測波面を算出し、ステップS17、S18において基準波面を算出する。これら計測波面と基準波面の算出の順序は、いずれが先であってもよい。

【0031】

まず基準波面の算出について説明する。本実施例では、基準波面を光線追跡によって算出する。最初に、基準被検物の形状と配置を設定し、演算器180に対して、図1に示した計測装置での各素子（ただし、被検物130は基準被検物とする）の配置と同じ配置を入力する。演算器180は、ステップS17において、図1に示したPH110から検出器160の波面センサの受光面（以下、センサ面という）までの基準光（光線）の複数の光路に対する光線追跡を行い、それぞれの光路での光路長を計算する。次に、ステップS18において、演算器180は、センサ面上にて得られた光路長の分布（マップ）を基準波面とする。

【0032】

10

20

30

40

50

一方、計測波面の算出は以下のように行う。ステップ S 1 1 において、計測装置にて各素子の配置調整が完了した状態で、レーザ光源 1 0 0 からのレーザ光 1 0 1 を、P H 1 1 0 および C L 1 2 0 を介して、収束光 1 0 3 として被検物 1 3 0 に入射させる。そして、演算器 1 8 0 は、ステップ S 1 1 において、被検物 1 3 0 からの計測光により検出器 1 6 0 のセンサ面上に形成された干渉縞（つまりはセンサ面上での計測光の強度分布）の画像を検出器 1 6 0 から取得する。さらに、演算器 1 8 0 は、ステップ S 1 2 において、取得した干渉縞を解析し、微分波面としてのシア波面（第 1 の微分波面、計測微分波面）を算出する。

【 0 0 3 3 】

シア波面の算出は、F F T（高速フーリエ変換）法によって行う。F F T 法による波面回復は、収差が干渉縞のキャリア縞を乱す性質を利用して、キャリア縞と収差とを分離する方法である。具体的には、干渉縞に 2 次元 F F T を行い、周波数マップに変換する。次に、周波数マップにおけるキャリア周波数の近傍部分のみを切り出して、キャリア周波数が原点になるように座標変換をした上で、i F F T（逆高速フーリエ変換）を行う。これにより、複素振幅マップの位相項が求められる。その結果得られた位相マップが、シア波面となる。

【 0 0 3 4 】

続いて、演算器 1 8 0 は、ステップ S 1 3 において、次式（ 5 ）を用いてシア波面から検出器 1 6 0 に入射する計測光（光線）の入射角 を算出する。

【 0 0 3 5 】

【 数 5 】

$$\tan \theta = \frac{\Delta W_x}{s} \cos \phi + \frac{\Delta W_y}{s} \sin \phi$$

$$\begin{cases} \phi = \arctan(y/x) \\ \Delta W_x = W(x-s, y) - W(x, y) \\ \Delta W_y = W(x, y-s) - W(x, y) \end{cases} \dots (5)$$

【 0 0 3 6 】

ただし、 x 、 y は検出器 1 6 0 上の座標を示し、 W は波面を示す。また、 W_x 、 W_y は X シア波面および Y シア波面を示し、 s はシア量を示す。以下、シア波面から入射角を算出するための数式について説明する。図 3 には、発散波に対する T a l b o t 干渉計を模式的に示している。無収差の発散波系において、センサ面上で得られる干渉縞の周期 p は、回折格子の格子周期 p を用いて、以下の式（ 6 ）により表される。

【 0 0 3 7 】

【 数 6 】

$$p' = \frac{L}{L - Lt} p \dots (6)$$

【 0 0 3 8 】

ただし、 L は点光源からセンサ面までの距離を示し、 $L t$ は回折格子からセンサ面までの距離を示す。このとき、干渉縞の周波数 F と、シア量 s と、 \tan はそれぞれ、次式（ 7 ）により表される。ただし、 D はセンサ面のサイズである。

【 0 0 3 9 】

10

20

30

40

【数 7】

$$\begin{cases} F = \frac{D}{p'} \\ s = \frac{\lambda}{p} Lt \\ \tan \theta = \frac{r}{L} \end{cases} \dots (7)$$

【 0 0 4 0 】

シア量より小さい領域において波面が一定であると見なすと、シア波面 W は微分波面の式 (8) を用いて表現できる。 10

【 0 0 4 1 】

【数 8】

$$\Delta W_r = s \frac{\partial W}{\partial r}, \Delta W_x = s \frac{\partial W}{\partial x}, \Delta W_y = s \frac{\partial W}{\partial y} \dots (8)$$

【 0 0 4 2 】

ただし、 W_r は r 方向のシア波面を示し、 r 微分波面 (W / r) と x 微分波面 (W / x) と y 微分波面 (W / y) との間には以下の式 (9) で示す関係がある。 20

【 0 0 4 3 】

【数 9】

$$\frac{\partial W}{\partial r} = \frac{\partial W}{\partial x} \cos \varphi + \frac{\partial W}{\partial y} \sin \varphi \dots (9)$$

【 0 0 4 4 】

センサ面上において光軸からの半径が r の位置の周辺の微小領域においては、干渉縞の周波数は一定であると見なせる。このため、 W_r は次式 (10) で表現できる。

【 0 0 4 5 】

【数 10】

$$\Delta W_r = \left(\frac{D}{p} - F \right) \frac{r}{D} \lambda = \frac{\lambda}{p} Lt \frac{r}{L} = s \tan \theta \dots (10)$$

【 0 0 4 6 】

以上の式 (8) ~ (10) を用いると、式 (5) を導くことができる。

【 0 0 4 7 】

以下のステップ S 14, S 15 は補正ステップに相当する。上述したように検出器 160 (センサ面) に入射する光線の入射角 θ を求めた演算器 180 は、ステップ S 14 において、該入射角 θ を用いてシア波面に対する補正量 C を計算する。補正量 C は、計測波面の微分波面 (シア波面) と基準波面の微分波面との比で定義する。補正量 C は、以下のように算出する。まず、計測波面と基準波面のそれぞれに対する微分波面と入射角との関係を求める。 40

【 0 0 4 8 】

計測波面の微分波面と光線の入射角の関係は、式 (8), (10) から、式 (11) のようになる。なお、ここでは、計測波面の微分波面を、 W / r に添え字 M を付して表す。

【 0 0 4 9 】

【数 11】

$$\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_M = \tan \theta \dots (11)$$

【 0 0 5 0 】

一方、基準波面の微分波面と光線の入射角との関係は、以下のようにして求めることができる。ここでは、基準波面の微分波面を、 W/r に添え字 S を付して表す。図 4 には、基準波面の微分波面を求める方法を模式的に示している。

【 0 0 5 1 】

図 4 中の P 、 Q は、センサ面上においてきわめて近接した 2 点であり、それぞれの位置に光線 1 および光線 2 として示した光線が入射する。光線 1 および光線 2 と光軸とのなす角度はそれぞれ、 θ および $\theta + \Delta\theta$ であるとする。 R は、点 P を通る等位相面と光線 2 との交点である。このとき、基準波面の微分波面は以下の式 (12) により表される。

【 0 0 5 2 】

【数 1 2】

$$\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_S = \lim_{PQ \rightarrow 0} \frac{RQ}{PQ} \dots (12)$$

【 0 0 5 3 】

ただし、 PQ および RQ は、線分 PQ および線分 RQ の長さを表す。 $\angle RPQ$ を $\theta + \delta\theta$ と置くと、 $\angle QRP$ は、

$$\frac{\pi}{2} + \Delta\theta - \delta\theta$$

となる。ここで、正弦定理から以下の式 (13) に示す関係を導くことができ、基準波面の微分波面は、式 (12)、(13) を用いて式 (14) として得られる。

【 0 0 5 4 】

【数 1 3】

$$\frac{RQ}{\sin(\theta + \delta\theta)} = \frac{PQ}{\sin(\frac{\pi}{2} + \Delta\theta - \delta\theta)} \dots (13)$$

【 0 0 5 5 】

【数 1 4】

$$\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_S = \lim_{PQ \rightarrow 0} \frac{RQ}{PQ} = \lim_{\substack{\Delta\theta \rightarrow 0 \\ \delta\theta \rightarrow 0}} \frac{\sin(\theta + \delta\theta)}{\sin(\frac{\pi}{2} + \Delta\theta - \delta\theta)} = \sin\theta \dots (14)$$

【 0 0 5 6 】

そして、補正量 C は、計測波面の微分波面と基準波面の微分波面とを用いて、以下の式 (15) に示すようにそれらの比として求められる。この場合、補正量 C は入射角 θ の方向余弦となる。このように補正量 C を入射角 θ に応じて異ならせるのは、基準被検物と被検物 130 との差が大きい場合には、基準波面から算出した光線の入射角と、被検物を計測した際の光線の入射角とに差が生じるため、補正量に誤差が生じるからである。

【 0 0 5 7 】

【数 1 5】

$$C = \frac{\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_S}{\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_M} = \cos\theta \dots (15)$$

【 0 0 5 8 】

続いて、ステップ S15 では、演算器 180 は、計測されたシア波面 (第 1 の微分波面) に対して、計測光のセンサ面への入射角 θ に応じた補正処理を行うことにより、該補正処理後のシア波面である補正シア波面 (第 2 の微分波面) を算出する。具体的には、計測されたシア波面に対して補正量 C を乗じることで補正シア波面を算出する。本実施例では

、入射角 θ を式 (5) によって表現したため、補正シア波面は以下の式 (1 6) により表現される。

【 0 0 5 9 】

【 数 1 6 】

$$\left\{ \begin{array}{l} C\Delta W_x = \cos\theta \Delta W_x = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\theta}} \Delta W_x = \frac{\Delta W_x}{\sqrt{1+\left(\frac{\Delta W_x}{s}\cos\phi + \frac{\Delta W_y}{s}\sin\phi\right)^2}} \\ C\Delta W_y = \cos\theta \Delta W_y = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\theta}} \Delta W_y = \frac{\Delta W_y}{\sqrt{1+\left(\frac{\Delta W_x}{s}\cos\phi + \frac{\Delta W_y}{s}\sin\phi\right)^2}} \end{array} \right. \quad \dots (16)$$

【 0 0 6 0 】

入射角 θ が小さい場合には、補正シア波面を以下の式 (1 7) を用いて表現してもよい。

【 0 0 6 1 】

【 数 1 7 】

$$\left\{ \begin{array}{l} C\Delta W_x \sim \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta W_x}{s} \cos\phi + \frac{\Delta W_y}{s} \sin\phi \right)^2 \right) \Delta W_x \\ C\Delta W_y \sim \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta W_x}{s} \cos\phi + \frac{\Delta W_y}{s} \sin\phi \right)^2 \right) \Delta W_y \end{array} \right. \quad \dots (17)$$

【 0 0 6 2 】

補正量 C は、 \cos 、 \tan またはシア波面の計測値を用いて表現することができる。これらの \cos 、 \tan およびシア波面はいずれも入射角 θ の関数である。このため、ステップ S 1 4 において入射角に応じて補正量 C を算出する際の「入射角」には、 θ 、 $\cos\theta$ 、 $\tan\theta$ およびシア波面の計測値といった入射角の関数も含む。

【 0 0 6 3 】

以下のステップ S 1 6、S 1 9 は、波面収差算出ステップに相当する。ステップ S 1 6 では、演算器 1 8 0 は、補正シア波面に対する積分処理を行うことで計測波面を算出する。ここにいる積分処理は、一般に知られている経路積分を用いてもよいし、予め求められた関数群を用意して、その差分関数によるフィッティングにより行ってもよい。例えば、波面収差を Zernike 多項式の係数で求める場合には、この多項式をシア量だけ横ずらしして互いに差し引いた差分の Zernike 関数を用いて補正シア波面をフィッティングすればよい。また、本ステップでは、一般に知られている他の積分処理を行うことも可能である。

【 0 0 6 4 】

最後に、ステップ S 1 9 では、演算器 1 8 0 は、ステップ S 1 6 で求めた計測波面とステップ S 1 8 で求めた基準波面との差分としての波面収差を計算する。そして、演算器 1 8 0 は、計算した波面収差を出力して、本処理を完了する。以上説明した処理により、被検物 1 3 0 の波面収差を高精度に求めることができる。

【 0 0 6 5 】

なお、本実施例では、基準波面を演算器 1 8 0 が光線追跡により求める方法を説明したが、低コヒーレンス干渉計を用いて、光路長を直接計測することで基準波面を求めてもよい。

【 0 0 6 6 】

また、本実施例では、計測系としてトールボット干渉計を用いることにより、大きな収差を有する透過波面の計測が可能となっている。トールボット干渉計はラテラルシアリング干渉計の一種であり、透過波面が横ずらし (シア) された自身の透過波面との差分を干

10

20

30

40

50

渉縞として計測する。このためシアリング干渉計は、透過波面の傾きに相当する量を求める計測系と言える。透過波面の横ずらし量は、シア量と呼びシア量を小さくすることで、透過波面の大きな収差に対しても、干渉縞が密にならない程度の小さい収差（シア波面）として計測が可能になる。

【 0 0 6 7 】

シアリング干渉計では、一般に、シア量が小さすぎるとシア波面がノイズに埋もれて精度が落ちるため、シア量は瞳の直径に対して 3 ～ 5 % 程度がよいとされる。しかし、本実施例では大きな収差の透過波面を小さいシア波面で計測するために、シア量を 1 . 5 % 以下、好ましくは 0 . 3 ～ 0 . 9 % 程度まで小さくするとよい。シア量 $shear$ は、回折格子 1 5 0 と検出器 1 6 0 との間の距離 Z_t と、検出器 1 6 0 上の干渉縞データの直径 D_i を用いて以下の式で定義される。

【 0 0 6 8 】

【 数 1 8 】

$$shear = \frac{\lambda Z_t}{p D_i} \quad \dots (18)$$

【 0 0 6 9 】

式 (1 8) は、式 (4) と、回折格子 1 5 0 上の光束の直径 D_0 とを用いて、以下のようにも表現できる。

【 0 0 7 0 】

【 数 1 9 】

$$shear = \frac{2mp}{D_0} \quad \dots (19)$$

【 0 0 7 1 】

上記数式からシア量と回折格子 1 5 0 の格子ピッチは比例することがわかる。回折格子のピッチは、式 (4) から分かるように、回折格子 1 5 0 と検出器 1 6 0 間の距離 Z_t にも影響を与えるため、素子間の干渉を考えて決定する必要がある。例えば、 $m = 0 . 5$ のときに、 D_0 が 1 0 ～ 2 0 mm 程度であるとする、格子ピッチは 4 0 ～ 1 8 0 μm 程度が望ましい。

【 実施例 2 】

【 0 0 7 2 】

図 5 には、本発明の実施例 2 である波面収差計測装置の構成を示している。実施例 1 の計測装置と共通する構成要素は、図 5 において実施例 1 (図 1) と同符号を付している。本実施例では、波面を計測する検出器 2 2 0 がシャックハルトマンセンサであり、被検物 2 0 0 の面形状を計測する際の波面収差計測方法について説明する。

【 0 0 7 3 】

被検物 2 0 0 の被検面が凹面である場合には、コリメータレンズ 1 2 0 の集光点の後方に被検物 2 0 0 を配置し、発散波を被検面に入射させる。そして、被検面にて反射した反射波（計測光）をハーフミラー 2 1 0 により、検出器 2 2 0 の方向に反射させる。検出器 2 2 0 として用いられるシャックハルトマンセンサは、図 6 に示すように、レンズアレイと CCD とにより構成されている。

【 0 0 7 4 】

図 7 には、検出器 2 2 0 により撮像された画像を用いて、被検物 2 0 0 の波面収差を算出する処理（波面収差計測方法）の手順を示している。この算出処理は、図 5 に示した演算器（コンピュータ）1 8 0 が、コンピュータプログラムに従って行う。なお、図 7 のフローチャートは、実施例 1 (図 2) のフローチャートにおけるステップ S 1 1 ～ S 1 3 を、ステップ S 2 1 ～ S 2 3 に変更したものであるため、ここではステップ S 2 1 ～ S 2 3 を中心に説明する。

【 0 0 7 5 】

10

20

30

40

50

ステップS 2 1では、演算器1 8 0は、シャックハルトマンセンサ2 2 0を用いて、被検物2 0 0（被検面）からの反射波により形成される光学像（つまりは計測光の強度分布）の画像を取得する。シャックハルトマンセンサ2 2 0では、レンズアレイの個々のレンズセルによって集光スポット像がCCDの受光面（センサ面）上に形成される。このため、取得される画像は、レンズアレイにおけるレンズセルの数だけ集光スポットが集合した画像となる。次に、ステップS 2 2では、演算器1 8 0は、それぞれの集光スポットの重心位置（以下、スポット重心位置という）を求める。

【0 0 7 6】

続いて、ステップS 2 3では、演算器1 8 0は、求めたスポット重心位置から、センサ面への光線（計測光）の入射角と微分波面とを求める。シャックハルトマンセンサ2 2 0のレンズアレイの焦点距離を f とし、スポット重心位置と平行光をシャックハルトマンセンサ2 2 0に入射させたときのスポット重心位置との距離を l_s とする。このとき、入射角および微分波面（ W/x および W/y ）は次式（2 0）により表される。ただし、 x および y はそれぞれ、入射角の x 成分および y 成分である。

【0 0 7 7】

【数 2 0】

$$\left\{ \begin{array}{l} \tan \theta = \frac{l_s}{f} \\ \frac{\partial W}{\partial x} = \theta_x \\ \frac{\partial W}{\partial y} = \theta_y \end{array} \right. \dots (20)$$

【0 0 7 8】

以下、実施例1にて説明したステップS 1 4以降の処理を行って、最終的に被検物2 0 0の波面収差を高精度に求める。

【実施例3】

【0 0 7 9】

次に、本発明の実施例3について説明する。基準波面と計測波面との差異が小さい場合には、実施例1にて説明した補正量 C を、計測により得られた微分波面を用いて計算するのではなく、完全に演算のみにより得ることも可能である。図8のフローチャートには、このような場合における波面収差の算出処理（波面収差計測方法）の手順を示している。この算出処理も、図1（または図5）に示した演算器（コンピュータ）1 8 0が、コンピュータプログラムに従って行う。演算器1 8 0は、計測微分波面算出手段、基準微分波面算出手段、補正手段および波面収差算出手段として機能する。なお、図8のフローチャートのステップS 1 1、S 1 2は、実施例1（図2）のフローチャートにおけるステップS 1 1、S 1 2と同じであるため、その説明は省略する。

【0 0 8 0】

まず基準被検物の形状と配置を設定し、演算器1 8 0に対して、図1に示した計測装置での各素子（ただし、被検物1 3 0は基準被検物とする）の配置と同じ配置を入力する。演算器1 8 0は、ステップS 3 1において、図1に示したPH 1 1 0から検出器1 6 0のセンサ面に到達する基準光における複数の光線に対する光線追跡を行い、各光線の光線追跡情報から検出器1 6 0への入射角を求める。そして、ステップS 3 2では、演算器1 8 0は、実施例1のステップS 1 4と同様にして入射角から補正量 C を算出する。このステップS 3 2と後述するステップS 3 5が、補正ステップに相当する。

【0 0 8 1】

一方、ステップS 3 3では、演算器1 8 0は、ステップS 3 1と同様の光線追跡を行って、光路長の分布、すなわち基準波面を計算する。そして、ステップS 3 4では、演算器1 8 0は、基準波面の微分値としての基準微分波面（第1の基準微分波面）を計算する。

基準波面の微分値は、ステップS 3 1で求めた入射角を用いて計算してもよいし、ステップS 3 2で分布を求めた複数の光路長のうち隣り合う光路長の差分を用いて計算してもよい。

【0082】

次に、ステップS 3 5では、演算器180は、ステップS 3 4で求めた第1の基準微分波面に対して、計測光のセンサ面への入射角に応じた補正処理を行うことにより、該補正処理後の基準微分波面である補正基準微分波面（第2の基準微分波面）を算出する。具体的には、第1の基準微分波面に対して補正量Cを乗じることによって補正基準微分波面を算出する。

【0083】

そして、ステップS 3 6では、演算器180は、ステップS 1 2で求めたシア波面とステップS 3 5で求めた補正基準微分波面との差分としての微分波面差分値を計算する。続いて、ステップS 3 7では、演算器180は、実施例1のステップS 1 6と同様にして、微分波面差分値に対する積分処理を行うことで計測波面を算出する。この後、演算器180は、実施例1で説明したステップS 1 9にて、ステップS 3 7で求めた計測波面とステップS 1 8で求めた基準波面との差分としての波面収差を計算し、これを出力して、本処理を完了する。

【0084】

なお、本実施例と実施例1または実施例2とを組み合わせた手順を用いて波面収差を算出してもよい。具体的には、実施例3にて説明したように基準波面から入射角を算出し、その入射角に応じて、実施例1、2にて説明したように計測された微分波面に対する補正処理を行ってもよい。また、実施例1、2にて説明したように、計測された微分波面から入射角を算出し、その入射角を用いて実施例3にて説明したように基準微分波面に対する補正処理を行ってもよい。

【実施例4】

【0085】

実施例1～3にて説明した計測装置（計測方法）によって計測された結果を、レンズ等の光学素子の製造方法にフィードバックすることも可能である。図9には、モールド成形法を用いた光学素子の製造方法の例を示している。

【0086】

図9において、ステップS 3 0 0は光学素子を設計するステップであり、設計者が光学設計ソフト等を用いて光学素子を設計する。

【0087】

ステップS 3 1 0は、ステップS 3 0 0で設計された光学素子に基づいて、光学素子を硝材や樹脂材料を用いてモールド成形するための金型を設計・加工するステップである。

【0088】

ステップS 3 2 0は、ステップS 3 1 0で加工された金型を用いて、光学素子をモールド成形するステップである。

【0089】

ステップS 3 3 0は、ステップS 3 2 0で成形された光学素子の形状を計測し、その精度を評価するステップである。ステップS 3 3 0にて評価された形状が、要求する精度を満足しなかった場合、ステップS 3 4 0にて金型の補正量が算出され、ステップS 3 1 0で再度金型を加工する。

【0090】

ステップS 3 5 0は、ステップS 3 3 0で所望の形状精度を満足していた光学素子の光学性能を評価するステップである。このステップでは、実施例1～3のいずれかで説明した計測装置を用いて光学素子（被検物）の波面収差（さらには光学面の面形状）を計測したり、他の光学特性を計測したりする。このステップにて評価された光学性能が、要求する仕様に達しなかった場合は、ステップS 3 6 0にて光学面の補正量が算出され、その結果を用いてステップS 3 0 0で再度、光学素子が設計される。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 1 】

ステップ S 3 7 0 は、ステップ S 3 5 0 で所望の光学性能を実現できた光学素子の製造条件で、光学素子を量産するステップである。

【 0 0 9 2 】

実施例 1 ～ 3 にて説明した計測方法によって光学素子の波面収差を高精度に計測することができるので、良好な光学性能を有する光学素子を量産することが可能になる。

【 0 0 9 3 】

以上説明した各実施例は代表的な例にすぎず、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。

【 産業上の利用可能性 】

10

【 0 0 9 4 】

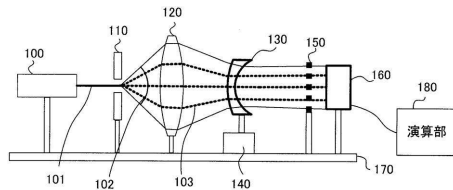
光学素子等の被検物の波面収差を高精度に計測可能な計測技術を提供することができる。

【 符号の説明 】

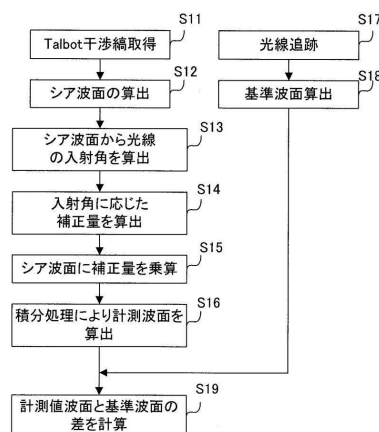
【 0 0 9 5 】

- 1 3 0 , 2 0 0 被検物
- 1 6 0 , 2 2 0 検出器
- 1 8 0 演算部

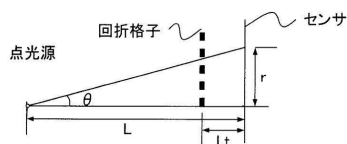
【 図 1 】



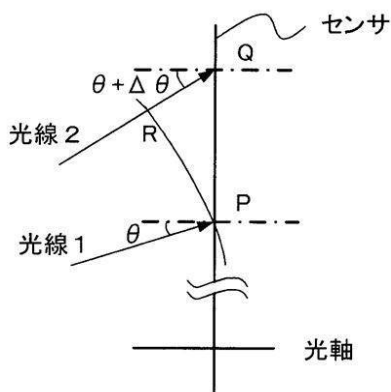
【 図 2 】



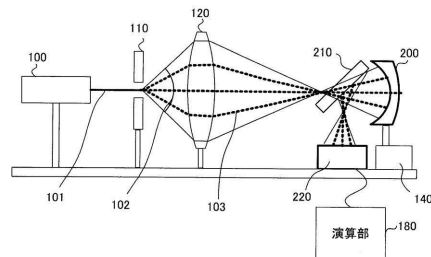
【 図 3 】



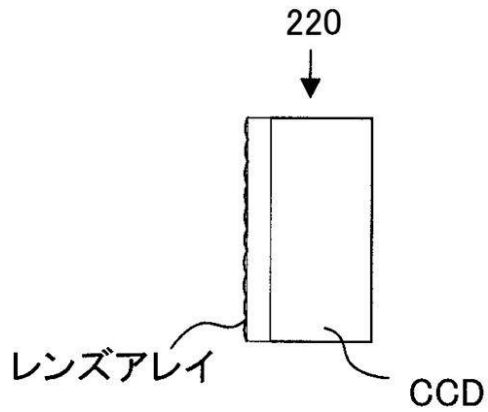
【 図 4 】



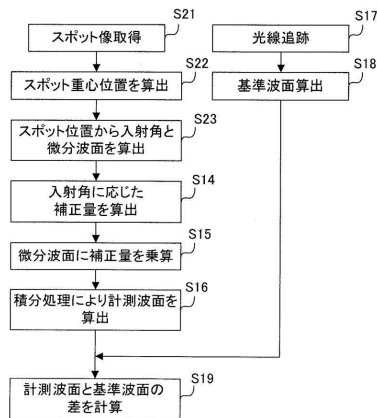
【 図 5 】



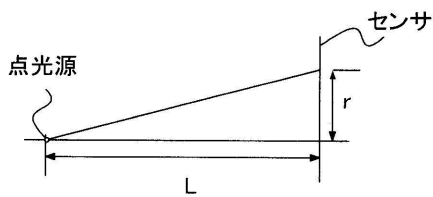
【図 6】



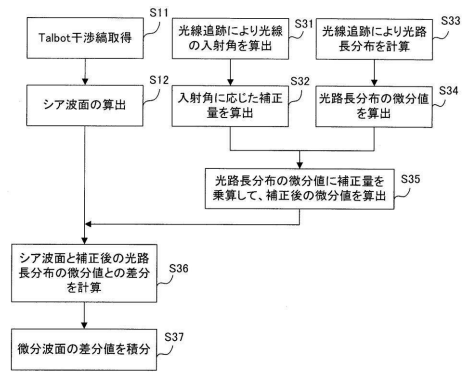
【図 7】



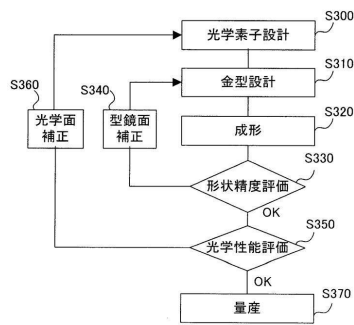
【図 10】



【図 8】



【図 9】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平3 - 269309 (JP, A)
特表2012 - 511728 (JP, A)
特開2008 - 244494 (JP, A)
特開平4 - 155225 (JP, A)
特開2012 - 117999 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01M 11/00 - G01M 11/08