

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6320093号
(P6320093)

(45) 発行日 平成30年5月9日(2018.5.9)

(24) 登録日 平成30年4月13日(2018.4.13)

(51) Int.Cl.

GO 1 M 11/02 (2006.01)

F I

GO 1 M 11/02

B

請求項の数 16 (全 22 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2014-51270 (P2014-51270) (22) 出願日 平成26年3月14日 (2014.3.14) (65) 公開番号 特開2015-175685 (P2015-175685A) (43) 公開日 平成27年10月5日 (2015.10.5) 審査請求日 平成29年3月9日 (2017.3.9)</p>	<p>(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 100110412 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 横尾 雅一</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 屈折率分布計測方法、屈折率分布計測装置、光学素子の製造方法、プログラム、および、記憶媒体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

被検物の透過波面を計測するステップと、
 前記透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の第1の屈折率分布を決定するステップと、

前記第1の屈折率分布に基づいて重み関数を求めるステップと、

前記被検物の第2の屈折率分布に関する情報に基づいて前記透過波面の光の透過方向における第3の屈折率分布を決定するステップと、

前記第1の屈折率分布および前記第3の屈折率分布に基づいて、前記重み関数を用いて、前記被検物の3次元屈折率分布を算出するステップと、を有することを特徴とする屈折率分布計測方法。

10

【請求項 2】

前記重み関数は、前記第1の屈折率分布または該第1の屈折率分布の変化量に依存する関数であることを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率分布計測方法。

【請求項 3】

前記第3の屈折率分布は、前記光の透過方向における積分値がゼロとなる分布であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の屈折率分布計測方法。

【請求項 4】

前記第2の屈折率分布に関する情報は、参照被検物の切断面を透過した光の透過波面に基づく屈折率分布の計測値であることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか1項に記載

20

の屈折率分布計測方法。

【請求項 5】

前記被検物の前記透過波面を計測するステップは、

前記被検物の屈折率よりも小さい第 1 の屈折率を有する第 1 の媒質中で、該被検物に光を入射させて該被検物の第 1 の透過波面を計測するステップと、

前記被検物の屈折率よりも小さく、かつ前記第 1 の屈折率とは異なる第 2 の屈折率を有する第 2 の媒質中で、該被検物に前記光を入射させて該被検物の第 2 の透過波面を計測するステップと、を含み、

前記被検物の第 1 の屈折率分布を決定するステップは、前記第 1 の透過波面および前記第 2 の透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の形状成分を除去するステップを含む、
ことを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の屈折率分布計測方法。

10

【請求項 6】

前記被検物の前記透過波面を計測するステップは、

前記被検物の屈折率とは異なる屈折率を有する媒質中で、該被検物に第 1 の波長の光を入射させて該被検物の第 1 の透過波面を計測するステップと、

前記媒質中で、前記第 1 の波長とは異なる第 2 の波長の光を入射させて前記被検物の第 2 の透過波面を計測するステップと、を含み、

前記被検物の第 1 の屈折率分布を決定するステップは、前記第 1 の透過波面および前記第 2 の透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の形状成分を除去するステップを含む、
ことを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の屈折率分布計測方法。

20

【請求項 7】

前記第 1 の屈折率分布は、前記被検物の動径方向の屈折率分布投影値であることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の屈折率分布計測方法。

【請求項 8】

前記第 2 の屈折率分布に関する情報は、前記被検物の形状に基づく屈折率分布関数であることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の屈折率分布計測方法。

【請求項 9】

被検物の透過波面を計測する計測手段と、

前記被検物の 3 次元屈折率分布を算出する演算手段と、を有し、

前記演算手段は、

前記計測手段による前記透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の第 1 の屈折率分布を決定し、

前記第 1 の屈折率分布に基づいて重み関数を求め、

前記被検物の第 2 の屈折率分布に関する情報に基づいて前記透過波面の光の透過方向における第 3 の屈折率分布を決定し、

前記第 1 の屈折率分布および前記第 3 の屈折率分布に基づいて、前記重み関数を用いて
前記被検物の前記 3 次元屈折率分布を算出する、ことを特徴とする屈折率分布計測装置

30

【請求項 10】

前記計測手段は、シアリング干渉計またはシャックハルトマンセンサを有することを特徴とする請求項 9 に記載の屈折率分布計測装置。

40

【請求項 11】

光学素子をモールド成形するステップと、

請求項 1 乃至 8 のいずれか 1 項に記載の屈折率分布計測方法を用いて前記被検物としての前記光学素子の屈折率分布を計測し、該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 12】

被検物の透過波面を計測するステップと、

前記透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の第 1 の屈折率分布を決定するステップと、

50

前記第 1 の屈折率分布に基づいて重み関数を求めるステップと、
前記被検物の第 2 の屈折率分布に関する情報に基づいて前記透過波面の光の透過方向に
おける第 3 の屈折率分布を決定するステップと、
前記第 1 の屈折率分布および前記第 3 の屈折率分布に基づいて、前記重み関数を用いて
前記被検物の 3 次元屈折率分布を算出するステップと、コンピュータに実行させるよう
に構成されていることを特徴とするプログラム。

【請求項 13】

請求項 12 に記載のプログラムを記憶していることを特徴とする記憶媒体。

【請求項 14】

被検物の透過波面を計測するステップと、 10
前記透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の第 1 の屈折率分布を決定するステッ
と、
前記被検物の第 2 の屈折率分布に関する情報に基づいて前記透過波面の光の透過方向に
おける第 3 の屈折率分布を決定するステップと、
前記第 1 の屈折率分布および前記第 3 の屈折率分布に基づいて、前記被検物の 3 次元屈
折率分布を算出するステップと、を有し、
前記第 3 の屈折率分布は、前記光の透過方向における積分値がゼロとなる分布であるこ
とを特徴とする屈折率分布計測方法。

【請求項 15】

被検物の透過波面を計測するステップと、 20
前記透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の第 1 の屈折率分布を決定するステッ
と、
前記被検物の第 2 の屈折率分布に関する情報に基づいて前記透過波面の光の透過方向に
おける第 3 の屈折率分布を決定するステップと、
前記第 1 の屈折率分布および前記第 3 の屈折率分布に基づいて、前記被検物の 3 次元屈
折率分布を算出するステップと、を有し、
前記第 2 の屈折率分布に関する情報は、参照被検物の切断面を透過した光の透過波面に
基づく屈折率分布の計測値であることを特徴とする屈折率分布計測方法。

【請求項 16】

被検物の透過波面を計測するステップと、 30
前記透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の第 1 の屈折率分布を決定するステッ
と、
前記被検物の第 2 の屈折率分布に関する情報に基づいて前記透過波面の光の透過方向に
おける第 3 の屈折率分布を決定するステップと、
前記第 1 の屈折率分布および前記第 3 の屈折率分布に基づいて、前記被検物の 3 次元屈
折率分布を算出するステップと、を有し、
前記第 2 の屈折率分布に関する情報は、前記被検物の形状に基づく屈折率分布関数であ
ることを特徴とする屈折率分布計測方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】 40

【0001】

本発明は、屈折率分布の計測方法に関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献 1 には、被検物とは屈折率が異なる 2 種類の媒質のそれぞれに被検物を浸漬した状態で透過波面を計測し、被検物の屈折率分布投影値を算出する方法が開示されている。また特許文献 1 には、被検物を傾けて計測した屈折率分布投影値を用いて、3 次元屈折率分布を算出する方法が開示されている。特許文献 1 の計測方法によれば、被検物の屈折率が高い場合でも、その屈折率とほぼ同じ屈折率を有する媒質を用いることなく、被検物の 3 次元屈折率分布を計測することができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2011-247692号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、特許文献1に開示された方法は、光が被検物を透過することが前提であるため、レンズなどの端部を備えた被検物に対しては、計測可能な方位が限定される。限定された方位において得られた透過波面だけでは、被検物の3次元屈折率分布を高精度に計測することができない。

10

【0005】

そこで本発明は、被検物の屈折率が高い場合でも、被検物の3次元屈折率分布を高精度に計測可能な屈折率分布計測方法、屈折率分布計測装置、プログラム、および、記憶媒体を提供する。また本発明は、高屈折率硝材を用いた光学素子を、モールド成形により高精度に量産可能な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】

【0006】

本発明の一側面としての屈折率分布計測方法は、被検物の透過波面を計測するステップと、前記透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の第1の屈折率分布を決定するステップと、前記第1の屈折率分布に基づいて重み関数を求めるステップと、前記被検物の第2の屈折率分布に関する情報に基づいて前記透過波面の光の透過方向における第3の屈折率分布を決定するステップと、前記第1の屈折率分布および前記第3の屈折率分布に基づいて、前記重み関数を用いて、前記被検物の3次元屈折率分布を算出するステップとを有する。

20

【0007】

本発明の他の側面としての屈折率分布計測装置は、被検物の透過波面を計測する計測手段と、前記被検物の3次元屈折率分布を算出する演算手段とを有し、前記演算手段は、前記計測手段による前記透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の第1の屈折率分布を決定し、前記第1の屈折率分布に基づいて重み関数を求め、前記被検物の第2の屈折率分布に関する情報に基づいて前記透過波面の光の透過方向における第3の屈折率分布を決定し、前記第1の屈折率分布および前記第3の屈折率分布に基づいて、前記重み関数を用いて、前記被検物の前記3次元屈折率分布を算出する。

30

【0008】

本発明の他の側面としての光学素子の製造方法は、光学素子をモールド成形するステップと、前記屈折率分布計測方法を用いて前記被検物としての前記光学素子の屈折率分布を計測し、該光学素子を評価するステップとを有する。

【0009】

本発明の他の側面としてのプログラムは、被検物の透過波面を計測するステップと、前記透過波面の計測結果に基づいて前記被検物の第1の屈折率分布を決定するステップと、前記第1の屈折率分布に基づいて重み関数を求めるステップと、前記被検物の第2の屈折率分布に関する情報に基づいて前記透過波面の光の透過方向における第3の屈折率分布を決定するステップと、前記第1の屈折率分布および前記第3の屈折率分布に基づいて、前記重み関数を用いて、前記被検物の3次元屈折率分布を算出するステップと、コンピュータに実行させるように構成されている。

40

【0010】

本発明の他の側面としての記憶媒体は、前記プログラムを記憶している。

【0011】

本発明の他の目的及び特徴は、以下の実施例において説明される。

【発明の効果】

50

【 0 0 1 2 】

本発明によれば、被検物の屈折率が高い場合でも、被検物 3 次元屈折率分布を高精度に計測可能な屈折率分布計測方法、屈折率分布計測装置、プログラム、および、記憶媒体を提供することができる。また本発明によれば、高屈折率硝材を用いた光学素子を、モールド成形により高精度に量産可能な光学素子の製造方法を提供することができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 3 】

【 図 1 】 実施例 1 における屈折率分布計測方法を示すフローチャートである。

【 図 2 】 実施例 1 における屈折率分布計測装置（被検物の動径方向の屈折率分布投影値を計測する装置）の構成図である。

10

【 図 3 】 実施例 1 の屈折率分布計測装置において、被検物に対する光路を示す図である。

【 図 4 】 実施例 1 における屈折率分布計測装置（スライス面の屈折率分布を計測する装置）の構成図である。

【 図 5 】 実施例 1 の屈折率分布計測装置において、被検物に対する光路を示す図である。

【 図 6 】 実施例 2 における屈折率分布計測装置（被検物の動径方向の屈折率分布投影値を計測する装置）の構成図である。

【 図 7 】 実施例 2 におけるシャックハルトマンセンサの概略図である。

【 図 8 】 実施例 2 における屈折率分布計測方法を示すフローチャートである。

【 図 9 】 実施例 3 における屈折率分布計測方法を示すフローチャートである。

【 図 1 0 】 各実施例における光学素子の製造方法を示すフローチャートである。

20

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 4 】

以下、本発明の実施例について、図面を参照しながら詳細に説明する。

【 実施例 1 】

【 0 0 1 5 】

まず、図 1 を参照して、本発明の実施例 1 における屈折率分布（GI）の計測方法（算出方法）について説明する。図 1 は、本実施例における屈折率分布計測方法を示すフローチャートである。図 1 の各ステップは、後述の図 2 に示される演算部 200 の指令に基づいて実行される。

【 0 0 1 6 】

30

図 1 に示される手順は、大きく分けて 3 つの工程に分類することができる。第一の工程は、ステップ S 1 1 ~ S 1 3 であり、被検物を 2 種類の媒質に浸し、それぞれの透過波面計測値から被検物の動径方向の屈折率分布投影値を算出するステップである。第二の工程は、ステップ S 1 4、S 1 5 であり、被検物をスライス形状に加工しスライス面の屈折率分布を算出するステップである。各実施例において、スライス面の屈折率分布を先験情報と呼ぶ。3 つ目の工程はステップ S 1 6 ~ S 1 8 であり、動径方向の屈折率分布投影値とスライス面の屈折率分布とを合成して 3 次元屈折率分布を算出するステップである。以下、各工程について詳述する。

【 0 0 1 7 】

図 2 は、本実施例における屈折率分布計測装置 10 の構成図であり、図 1 中のステップ S 1 1 ~ S 1 3 を実行することにより、動径方向の屈折率分布投影値を算出する。屈折率分布計測装置 10 は、被検物 140 とは異なる屈折率を有する 2 種類の媒質（例えば、水とオイル）の各々に被検物 140 を浸漬した状態で、光源 100 からの光を被検物 140 に入射させ、被検物 140 の透過波面を計測する。そして屈折率分布計測装置 10 は、コンピュータである演算部 200（演算手段）を用いて、被検物 140 の屈折率分布（動径方向の屈折率分布投影値）を算出する。

40

【 0 0 1 8 】

本実施例においては、被検物 140 の透過波面を計測する計測手段として、トールボット（Talbot）干渉計が用いられる。被検物 140 は、レンズなどの光学素子である。液槽 130 には、第 1 の媒質（例えば水）が充填されている。また液槽 131 には、第

50

2の媒質(例えばオイル)が充填されている。液槽130、131は、液槽交換機構150を用いて交換可能に構成されている。第1の媒質(水)または第2の媒質(オイル)の屈折率は、被検物140の屈折率よりも0.01以上小さい。また、第2の媒質(オイル)の屈折率は、第1の媒質(水)の屈折率に対して0.01以上異なる。

【0019】

光源100としては、He-Neレーザなどのレーザ光源が用いられる。光源100から光軸OAに沿って出射したレーザ光101は、ピンホール110(光学部材)を通過する際に回折する。ピンホール110で回折した回折光(参照光102)は、コリメータレンズ120(CL)により収束光103に変わる。ピンホール110およびコリメータレンズ120は、光源100からの光を用いて収束光103を生成可能な光学部材である。収束光103は、液槽130内の水(第1の媒質)および被検物140を透過する。本実施例において、被検物140は軸周りに回転対称なレンズである。ピンホール110の直径は、回折光(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NAOおよび光源100の波長を用いて、以下の式(1)を満たすように設計されている。

10

【0020】

【数1】

$$\phi \approx \frac{\lambda}{NAO} \dots (1)$$

20

【0021】

被検物140および液槽130内の水(第1の媒質)を透過したレーザ光(収束光103)は、2次元回折格子である直交回折格子(回折格子170)を通過し、CCD(検出器180)により撮像(計測)される。検出器180は除振台190の上に設けられている。被検物140の像側NAが小さい場合、回折格子170と検出器180との間の距離Zが以下の式(2)で示されるTalbot条件を満たすと、検出器180上に回折格子170の偽解像(Talbot像)が干渉縞として得られる。

【0022】

【数2】

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

30

【0023】

式(2)において、Zは、回折格子170と検出器180と間の距離であり、Talbot距離と呼ばれる。また、mは0を除く整数であり、dは回折格子170の格子ピッチである。Z₀は、回折格子170から被検物140の像面までの距離である。例えば、被検物140の射出光が平行光である場合、距離Z₀は無窮大になる。回折格子170の格子ピッチdは、被検物140の収差の大きさに応じて決定される。

40

【0024】

被検物140は、平行偏心機構160を用いて、光軸方向および光軸に垂直な方向に相対移動可能である。またコリメータレンズ120、回折格子170、および、検出器180は、光軸に平行に設置されたレール(不図示)上を相対移動可能である。

【0025】

図1のステップS11、S12において、演算部200は、各媒質(第1の媒質、第2の媒質)に被検物140を浸し、計測手段(回折格子170、検出器180)を用いて被検物140の透過波面を計測する。具体的には、計測手段は、まずステップS11において、被検物140の屈折率よりも小さい第1の屈折率を有する第1の媒質中(水の中)で、被検物140に参照光102を入射させて被検物140の透過波面(第1の透過波面)

50

を計測する。透過波面の計測は、検出器 180 による干渉縞の画像の取得、および、演算部 200 による透過波面の画像回復を含む。透過波面の画像回復（波面回復）は、FFT（高速フーリエ変換）法により行われる。FFT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 FFT を行い、周波数マップに変換する。続いて、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、iFFT（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、透過波面となる。

【0026】

続いてステップ S12 において、液槽交換機構 150 を用いて、オイル（第 2 の媒質）に浸された液槽 131 をコリメータレンズ 120 の光路に挿入する。オイル（第 2 の媒質）は、被検物 140 の屈折率よりも小さく、かつ第 1 の屈折率とは異なる第 2 の屈折率を有する。計測手段は、第 2 の媒質中（オイル中）で、被検物 140 に参照光 102 を入射させて被検物 140 の透過波面（第 2 の透過波面）を計測する。

【0027】

ステップ S11、S12 において、更に演算部 200 は、既知の屈折率分布を用いて、各媒質において検出器 180 により得られる透過波面を計算する。このとき、被検物 140 の屈折率分布はわからないため、適当な屈折率分布を仮定するか、または、屈折率分布が無い状態などの理想的な屈折率分布（特定の屈折率分布）を想定して、透過波面のシミュレーション波面 W_{sim} を計算する。このように屈折率分布が既知である被検物を、基準被検物ともいう。なお、既知の屈折率分布は設計値、または、計測値のいずれでもよい。シミュレーション波面 W_{sim} は、基準被検物に対応する透過波面ということもできる。基準被検物内のある点 (x, y) におけるシミュレーション波面 W_{sim} は、以下の式（3）のように表される。

【0028】

【数 3】

$$W_{sim水}(x, y) = OP_{sim水}(x, y) - OP_{sim水}(0, 0)$$

$$W_{simオイル}(x, y) = OP_{simオイル}(x, y) - OP_{simオイル}(0, 0)$$

$$OP_{sim水}(x, y) = L1(x, y) + L2(x, y)N_{水} + L3(x, y)Ng + L4(x, y)N_{水} + L5(x, y)$$

$$OP_{simオイル}(x, y) = L1(x, y) + L2(x, y)N_{オイル} + L3(x, y)Ng + L4(x, y)N_{オイル} + L5(x, y)$$

… (3)

【0029】

図 3 は、第 1 の媒質として水が用いられている場合の説明図である。式（3）において、L1～L5 は、図 3（b）に示される光線（収束光 103）に沿った各構成要素間の幾何学的距離である。光線（収束光 103）は、図 3（a）に示される基準被検物 141 の内部のある点 (x, y) を通る光線を模式的に表している。式（3）において、 $N_{水}$ は水の屈折率、 $N_{オイル}$ はオイルの屈折率、 Ng は被検物 140 の理想的な屈折率（基準被検物 141 の屈折率）である。すなわち基準被検物 141 は、被検物 140 の屈折率分布を既知の値に置き換えたものといえる。なお、ここでは式を簡略化するため、液槽 130 の壁の厚さは無視する。

【0030】

ステップ S11、S12 において、更に演算部 200 は、各媒質における透過波面計測値（第 1 の透過波面、第 2 の透過波面）と、各媒質におけるシミュレーション波面の計算値との差分波面を算出する。透過波面の計測値には、（1）被検物の屈折率分布、（2）被検物形状の影響、（3）被検物形状誤差の影響、および、（4）計測システムによるオフセットが含まれる。シミュレーション波面には、（2）被検物形状の影響、および、（4）計測システムによるオフセットが含まれる。このため演算部 200 は、両者の差分を

10

20

30

40

50

算出することにより、残渣である(1)被検物の屈折率分布、および、(3)被検物形状誤差の影響を波面収差 $W_{水}$ 、 $W_{オイル}$ として算出することができる。

【0031】

以下に数式を用いてさらに詳述する。ステップS11、S12にて計測された透過波面は、式(3)のシミュレーション波面と同様に、以下の式(4)のように表される。

【0032】

【数4】

$$\begin{aligned} W_{m水}(x, y) &= OP_{m水}(x, y) - OP_{m水}(0, 0) \\ W_{mオイル}(x, y) &= OP_{mオイル}(x, y) - OP_{mオイル}(0, 0) \\ OP_{m水}(x, y) &= L1(x, y) + L2(x, y)N_{水} + \{L3(x, y) + dL\}N_{2D}(x, y) + \{L4(x, y) - dL\}N_{水} + L5(x, y) \\ OP_{mオイル}(x, y) &= L1(x, y) + L2(x, y)N_{オイル} + \{L3(x, y) + dL\}N_{2D}(x, y) + \{L4(x, y) - dL\}N_{オイル} + L5(x, y) \\ \dots & \quad (4) \end{aligned}$$

10

【0033】

式(4)において、 $N_{2D}(x, y)$ は、座標 (x, y) における被検物140の光路方向に平均化された屈折率分布投影値(第1の屈折率分布投影値)である。 dL は、座標 (x, y) における被検物140の厚み誤差である。透過波面計測値とシミュレーション波面との差分は、以下の式(5)のように表される。なお、ここでは式を簡略化するため、屈折率 N_g は被検物140の中心屈折率 $N(0, 0)$ と等しいものとする。

20

【0034】

【数5】

$$\begin{aligned} W_{水} &= W_{m水} - W_{sim水} \\ &= L3(x, y)\{N_{2D}(x, y) - N_g\} + dL(x, y)\{N_{2D}(x, y) - N_{水}\} - dL(0, 0)\{N_g - N_{水}\} \\ W_{オイル} &= W_{mオイル} - W_{simオイル} \\ &= L3(x, y)\{N_{2D}(x, y) - N_g\} + dL(x, y)\{N_{2D}(x, y) - N_{オイル}\} - dL(0, 0)\{N_g - N_{オイル}\} \\ \dots & \quad (5) \end{aligned}$$

30

【0035】

続いてステップS13において、演算部200は、ステップS11、S12にて算出された各媒質の差分波面から被検物140の形状成分を除去し、動径方向の屈折率分布投影値(第1の屈折率分布投影値)を算出する。具体的には、以下の式(6)を用いて、波面収差 $W_{水}$ と波面収差 $W_{オイル}$ とから被検物140の形状成分 dL を除去し、被検物140の屈折率分布投影値 $N_{2D}(x, y)$ を算出する。なお、本実施例では以下の式(7)の近似式を用いている。

【0036】

【数6】

$$N_{2D}(x, y) = N_g + \frac{1}{L3(x, y)} \times \frac{(N_g - N_{水})W_{オイル} - (N_g - N_{オイル})W_{水}}{N_{オイル} - N_{水}} \dots (6)$$

40

【0037】

【数7】

$$\{N_{2D}(x, y) - N_g\}dL(x, y) \approx 0 \quad \dots (7)$$

【0038】

以上により、演算部200は、第1の透過波面および第2の透過波面の計測結果に基づ

50

いて、被検物 140 の第 1 の屈折率分布投影値（被検物 140 に対する動径方向の屈折率分布投影値 $N_{2D}(x, y)$ ）が求められる。

【0039】

次に、ステップ S14、S15 について説明する。ステップ S14 において、まず、被検物 142（参照被検物）を用意する。好ましくは、被検物 142 は、被検物 140 と同じ形状かつ同じ屈折率分布を有する。また被検物 142 として、被検物 140 そのものを用いてもよい。続いて、用意した被検物 142 を、第 1 の方向に平行な平面で切断する。好ましくは、第 1 の方向はステップ S11、S12 にて計測された光軸 OA に平行な方向である。また好ましくは、第 1 の方向は、参照光 102 の一部の光が進む方向である。好ましくは、被検物 142 はステップ S11、S12 にて計測された光軸 OA に平行な 2 つの平面で切断される（スライス形状に加工される）。また好ましくは、2 つの平面は互いに略平行である。本実施例では、このような 2 つの平面で切断された被検物 142 を、スライス形状の被検物 142 と呼ぶ。

10

【0040】

次に、図 4 を参照して、屈折率分布計測装置 10 において、図 1 のステップ S15 を実現するための構成について説明する。図 4 は、屈折率分布計測装置 10（スライス面の屈折率分布を計測する装置）の構成図である。図 4 は、フィゾー干渉計を用いて、4 種類の計測波面 W1、W2、W3、W4 を求める状態を示している。

【0041】

まず図 4（a）において、フィゾー干渉計を用いて、参照ガラス TF と参照ミラー RF との差分を計測波面 W1 として取得する。続いて図 4（b）において、スライス形状の被検物 142（参照被検物）の透過波面（第 3 の透過波面）と参照ミラー RF に対する参照ガラス TF の差分を計測波面 W2 として取得する。また図 4（c）において、スライス形状の被検物 142 の表面形状 S1 と参照ガラス TF との差分を計測波面 W3 として取得する。そして図 4（d）において、スライス形状の被検物 142 の裏面形状 S2 と参照ガラス TF との差分を計測波面 W4 として取得する。計測波面 W1、W2、W3、W4 は、それぞれ、以下の式（8）のように表される。

20

【0042】

【数 8】

$$W1 = RF - TF$$

30

$$W2 = RF - TF + N_{\text{スライス}}(y, z)D + (Ng - 1)(S2 - S1)$$

$$W3 = S1 - TF \quad \dots \quad (8)$$

$$W4 = NgS2 - (Ng - 1)S1 - TF$$

【0043】

式（8）において、 $N_{\text{スライス}}(y, z)$ は、スライス形状の被検物 142 のスライス面の屈折率分布（第 2 の屈折率分布投影値）である。z は光軸方向、y は光軸に垂直な方向である。D は、スライス形状の被検物 142 のスライス面側の厚みを示す。式（8）は式を簡略化するため、一定の厚み D および一定値である基準屈折率 Ng を用いている。これらの定数は、厳密には定数ではなく分布を有するが、定数と近似しても $N_{\text{スライス}}(y, z)$ の結果は実質的に変化しない。

40

【0044】

また、式（8）を用いることにより、スライス形状の被検物 142 のスライス面の屈折率分布（第 2 の屈折率分布投影値）は、以下の式（9）のように算出される。

【0045】

【数 9】

$$N_{\text{スライス}}(y, z) = N_g + \frac{N_g(W2 - W1) + (N_g - 1)(W3 - W4)}{N_g D} \dots (9)$$

【0046】

被検物 142 の形状が被検物 140 と大きく異なる場合、スライス面の屈折率分布を (y、z) 面内で拡大や縮小するか、または、切り取ることにより、被検物 140 と同じサイズのデータになるように加工する。

【0047】

以上のように、スライス形状の被検物 142 のスライス面の屈折率分布 $N_{\text{スライス}}(y, z)$ が求められる。すなわち本実施例では、スライス状の被検物 142 に対し第 1 の方向 (例えば光軸方向) とは異なる第 2 の方向から参照光 (第 2 の光) を入射させて被検物 142 の透過波面 (第 3 の透過波面) を計測する。好ましくは、第 2 の方向は、切断された被検物 142 の切断面に垂直な方向、すなわち光軸と垂直な方向である。そして、第 3 の透過波面の計測結果に基づいて、被検物 142 の第 2 の屈折率分布投影値 (屈折率分布 $N_{\text{スライス}}(y, z)$) を算出する。

【0048】

本実施例では、ステップ S15 を実現する計測方法として、図 4 に示されるような 4 回の計測を行う方法について説明したが、これに限定されるものではない。例えば、図 4 において、フィゾー干渉計の光源波長を走査して位相をステップさせる計測する干渉計を用いることもできる。この場合、計測点ごとに波長走査して取得した複数の計測データに対してフーリエ変換を行い周波数ごとに分解すると、各周波数成分が計測波面 W2、W3、W4 を示す。このため、一度の波長走査計測で、式 (8) の計測波面 W2、W3、W4 を取得することが可能である。また、スライス面の形状を十分平坦に加工することにより、計測波面 W3、W4 の計測を省略する (計測しない) ことができる。

【0049】

続いてステップ S16 において、演算部 200 は、ステップ S13 にて算出された屈折率分布投影値に基づいて重み関数を作成する。重み関数は、屈折率分布投影値と真の 3 次元屈折率分布との差の大きい部分の重みを大きくして、ステップ S15 にて算出された情報 (先験情報) のうち重視する部位 (重視する情報) を決定するために求められる。このため重み関数は、関数に限定されるものではなく、重みの分布を表現する物理量 (重みに関する情報) であればよい。例えば、重み関数は、屈折率分布投影値およびその変化量の両方に依存する関数である。これは、屈折率分布投影値の屈折率が高いかまたは屈折率変化が大きい部位においては、3 次元屈折率の変化も大きいため、屈折率投影値と 3 次元屈折率分布との差が大きくなるためである。

【0050】

重み関数 $w(r)$ は、例えば以下の式 (10) のように表される。

【0051】

【数 10】

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ w(r) = \frac{1}{2} \left[\frac{N_{2D}}{\max(N_{2D}) - \min(N_{2D})} + \frac{\frac{\partial N_{2D}}{\partial r}}{\max\left(\frac{\partial N_{2D}}{\partial r}\right) - \min\left(\frac{\partial N_{2D}}{\partial r}\right)} \right] \dots (10) \end{array} \right.$$

【0052】

重み関数は、式(10)に限定されるものではなく、単純に屈折率分布投影値の大きさのみに依存する関数することができる。また重み関数は、屈折率分布投影値の変化量のみに依存する関数であってもよい。なおステップS14、S15は、ステップS11~S13、S16と順番を入れ替えて実施しても問題ない。例えば、ステップS14、S15をステップS11~S13よりも先に実施してもよい。

【0053】

続いてステップS17において、演算部200は、深度方向の屈折率分布を決定する。またステップS18において、演算部200は、3次元屈折率分布を計算する。まず、計算すべき3次元屈折率分布は、以下の式(11)のように表される。

【0054】

【数11】

$$N_{3D}(x, y, \vec{L}(x, y))$$

但し \vec{L} は本文中でベクトルLと説明する ... (11)

【0055】

式(11)中の(x、y、ベクトルL(x、y))において、ベクトルL(x、y)は、図5に示される被検物内のある点(x、y)を通る2媒質の光線の平均の方向を示している。

【0056】

次に、求めるべき3次元屈折率分布 N_{3D} と動径方向の屈折率分布投影値 N_{2D} とを、以下の式(12)の関係で表現する。

【0057】

【数12】

$$N_{2D}(x, y) = \frac{\int N_{3D}(x, y, \vec{L}(x, y)) d\vec{L}}{\int d\vec{L}} \quad \dots (12) \quad 30$$

【0058】

両者が式(12)を満たすことにより、3次元屈折率分布 N_{3D} をステップS11、S12(第一の工程)で計測される光路に沿って平均化すると、動径方向の屈折率分布投影値 N_{2D} を得られるという関係になる。

【0059】

続いて、スライス面の屈折率分布 $N_{\text{スライス}}(y, z)$ は、以下の式(13)のように表すことができる。

【0060】

【数13】

$$N_{\text{スライス}}(x, y, \vec{L}(x, y)) \quad \dots (13)$$

【0061】

ステップS17にて決定される深度方向の屈折率分布は、以下の式(14)のように表される。式(14)は、深度方向が計測時における光の透過方向であることを意味しており、深度方向の積分値が小さいかまたはゼロになるような分布を定義している。

【0062】

10

20

30

40

50

【数 1 4】

$$w(x, y) \left(N_{\text{スライス}}(x, y, \vec{L}(x, y)) - \frac{\int N_{\text{スライス}}(x, y, \vec{L}(x, y)) d\vec{L}}{\int d\vec{L}} \right) \dots (14)$$

【0063】

また、ステップ S 1 8 にて計算される 3 次元屈折率分布は、以下の式 (15) のように表される。

【0064】

10

【数 1 5】

$$N_{3D}(x, y, \vec{L}(x, y)) = N_{2D}(x, y) + w(x, y) \left(N_{\text{スライス}}(x, y, \vec{L}(x, y)) - \frac{\int N_{\text{スライス}}(x, y, \vec{L}(x, y)) d\vec{L}}{\int d\vec{L}} \right) \dots (15)$$

【0065】

ステップ S 1 3 にて算出された動径方向の屈折率分布投影値 (第 1 の屈折率分布投影値) は、被検物 1 4 0 を切断することなく計測することができる。ただし、取得可能な情報は 2 次元の屈折率分布投影値である。一方、スライス面の屈折率分布 (第 2 の屈折率分布投影値) は、被検物 1 4 2 の切断時における応力解放により、屈折率分布が変化する場合があるため、精度の高い屈折率分布とはいえない。そこでステップ S 1 8 において、屈折率分布投影値 (第 1 の屈折率分布投影値) とスライス面の屈折率分布 (第 2 の屈折率分布投影値) とを組み合わせる際に、式 (14) で表される深度方向の屈折率分布を定義する。これにより、高精度な 3 次元屈折率分布を取得することができる。

20

【0066】

屈折率分布は切断時の応力解放により変化することなどのため、スライス面の屈折率分布 $N_{\text{スライス}}$ は、求めるべき 3 次元屈折率分布 N_{3D} に対して異なっている。応力解放による屈折率分布の変化は、被検物 1 4 2 の動径方向に生じる成分の方が多い。そこで、切断時に生じる屈折率分布変化のうち動径方向の成分を (x, y) 、その残差を $(x, y, \text{ベクトル } L)$ とすると、 $N_{\text{スライス}}$ および N_{3D} は、以下の式 (16) のように関係付けられる。

30

【0067】

【数 1 6】

$$N_{\text{スライス}}(x, y, \vec{L}(x, y)) = N_{3D}(x, y, \vec{L}(x, y)) + \Delta(x, y) + \delta(x, y, \vec{L}(x, y)) \dots (16)$$

【0068】

また、式 (16) を用いて式 (15) の右辺を表現すると、以下の式 (17) のように表される。

40

【0069】

【数 1 7】

$$wN_{3D} + (1-w)N_{2D} + w \left(\delta - \frac{\int \delta d\vec{L}}{\int d\vec{L}} \right) \dots (17)$$

【0070】

50

このように、深度方向の屈折率分布を式(14)のように定義することで、屈折率分布変化の動径成分の影響を受けない3次元分布を求めることができる。

【0071】

ステップS16では、屈折率分布投影値と3次元屈折率分布との差が大きい部位において重み関数が大きくなるように重みを設定している。このような部位に関しては、深度方向の屈折率分布をより重視して3次元化することで、屈折率分布投影値と3次元屈折率分布との差を埋めることができる。一方、屈折率分布投影値と3次元屈折率分布との差が小さい部位においては、重み関数が小さくなるように重みを設定している。このような部位に関しては、重みを小さくすることで深度方向の屈折率分布に含まれる誤差の影響を小さくすることができる。これにより、高精度な3次元屈折率分布を求めることができる。式(17)より、残差が十分に小さいと評価される場合、重み関数 w は1でもよいことがわかる。このように、光の透過方向の深度に関する屈折率分布を求めることで、高精度な3次元屈折率分布を求めることが可能である。

10

【0072】

以上説明したように、本実施例の屈折率分布計測方法は、被検物の透過波面を計測するステップ(ステップS11、S12)、および、透過波面の計測結果に基づいて被検物の第1の屈折率分布を決定するステップ(ステップS13)を有する。また本実施例の方法は、被検物の第2の屈折率分布に関する情報に基づいて透過波面の光の透過方向における第3の屈折率分布を決定するステップ(ステップS17)を有する。また本実施例の方法は、第1の屈折率分布および第3の屈折率分布に基づいて被検物の3次元屈折率分布を算出するステップ(ステップS18)を有する。本実施例の屈折率分布計測装置は、被検物の透過波面を計測する計測手段(検出器180)、および、被検物の3次元屈折率分布を算出する演算手段(演算部200)を有する。

20

【0073】

好ましくは、本実施例の屈折率分布計測方法は、第1の屈折率分布に基づいて重み関数を求めるステップ(ステップS16)を更に有し、3次元屈折率分布は重み関数を用いて算出される。より好ましくは、重み関数は、第1の屈折率分布または第1の屈折率分布の変化量に依存する関数である。好ましくは、第3の屈折率分布は、光の透過方向(深度方向)における積分値がゼロとなる分布である。また好ましくは、第2の屈折率分布に関する情報は、参照被検物の切断面を透過した光の透過波面に基づく屈折率分布の計測値である。

30

【0074】

好ましくは、被検物の透過波面を計測するステップは、被検物の屈折率よりも小さい第1の屈折率を有する第1の媒質中(例えば水中)で、被検物に光を入射させて該被検物の第1の透過波面を計測するステップ(ステップS11)を含む。またこのステップは、被検物の屈折率よりも小さく、かつ第1の屈折率とは異なる第2の屈折率を有する第2の媒質中(例えばオイル)で、被検物に前記光を入射させて被検物の第2の透過波面を計測するステップ(ステップS12)を含む。またこのステップは、第1の透過波面および第2の透過波面の計測結果に基づいて被検物の形状成分を除去するステップ(ステップS13)を含む。

40

【0075】

より好ましくは、本実施例では、被検物の屈折率よりも小さい第1の屈折率を有する水中で、被検物に参照光を入射させて被検物の第1の透過波面を計測する。また、被検物の屈折率よりも小さく、かつ水の屈折率とは異なる第2の屈折率を有するオイル中で、被検物に参照光を入射させて被検物の第2の透過波面を計測する。また特定の屈折率分布を有する基準被検物が水中およびオイル中のそれぞれの計測位置に配置しているときの透過波面を計算する。また計測された第1および第2の透過波面と、計算された第1および第2の透過波面の差分をそれぞれ求める。また、第1および第2の透過波面の差分に基づいて、被検物の動径方向の屈折率分布投影値を求める。また、被検物と同じ形状及び屈折率分布を有する参照被検物をスライスし、スライス面に垂直な方向から透過波面を計測するこ

50

とで、スライス面の屈折率分布を求める。また、スライス面の屈折率分布から計測時の光の透過方向の屈折率分布を抽出し、屈折率分布投影値から決定した重み関数と掛け合わせることで深度方向の屈折率分布を求める。また、深度方向の屈折率分布と屈折率分布投影値を足し合わせることで3次元屈折率分布を求める。これにより、被検物の屈折率が高い場合でも、該被検物の正確な3次元屈折率分布を計測することができる。

【0076】

本実施例では、T a l b o t 干渉計を用いた場合について説明したが、ラテラルシアリング干渉計やラジアルシアリング干渉計等、他のシアリング干渉計を用いることもできる。また本実施例では媒質として水、オイルの事例を示したが、本発明はこれらの媒質に特定されることは無く、2つの媒質として空気や多種のオイルを組み合わせてもよい。本実施例のフローまたは数式を見ると明らかであるように、屈折率分布は、回転対称か回転非対称かに依存せず求めることができる。また本実施例は、説明の簡略化のため、被検物形状が回転対称である仮定を用いたが、回転非対称な形状の被検物であっても、適用可能である。

10

【0077】

本実施例によれば、被検物の屈折率が高い場合でも、被検物の3次元屈折率分布を高精度に計測可能な屈折率分布計測方法および屈折率分布計測装置を提供することができる。

【実施例2】

【0078】

次に、本発明の実施例2における屈折率分布計測方法および屈折率分布計測装置について説明する。本実施例では、2種類の光源を用いて屈折率分布を計測する場合について説明する。実施例1では2種類の媒質を用いて2回の透過波面計測を行っているが、本実施例では2種類の光源波長(第1の波長の光、第2の波長の光)を用いて複数(2回)の透過波面計測を行う。

20

【0079】

図6を参照して、本実施例における屈折率分布計測装置の構成について説明する。図6は、屈折率分布計測装置10aの構成図である。本実施例では、第1の光源としてH e - N e レーザ(633nm)を用い、第2の光源としてY A G レーザの2倍高調波(532nm)を用いる。また被検物140の周りの媒質については後述するが、被検物140よりも屈折率が小さく、空気より屈折率が大きい媒質であればよい。水や屈折率が1.5~1.8程度の低屈折率オイルであってもよい。ピンホール110は、第1の光源または第2の光源から出射したレーザー光を用いて、理想球面波を有する光(参照光)を生成する。この光は、図2と同様に、被検物140を通過し、その透過波面が波面計測センサである Shack-Hartmann センサ500(計測手段)により計測される。Shack-Hartmann センサ500は、図7に示されるように、レンズアレイ501およびCCD502を備えて構成されている。

30

【0080】

実施例1と同様に、コリメータレンズ120、液槽130、および、Shack-Hartmann センサ500は、光軸OAに平行に配置されたレール(不図示)上に配置されている。これらの素子をレール上で移動させることにより、被検物140に入射する光束を、発散光束、平行光束、および、収束光束のいずれにも変更することができる。これにより、Shack-Hartmann センサ500に入射する光束のNAを調節することが可能である。

40

【0081】

Shack-Hartmann センサ500は、T a l b o t 干渉計と比べて、入射する光束のNAを厳しく管理する必要がある。しかし、Shack-Hartmann センサ500を用いる場合、回折格子170と検出器180とをT a l b o t 距離に合わせる作業が不要になるため、センサの位置合わせが容易になる。またShack-Hartmann センサ500は、レンズアレイ501に入射した光を、CCD502に集光させる構造を有する。レンズアレイ501に傾いた透過波面が入射すると、集光点の位置がずれる。Shack-Hartmann センサ500は、透過波面の傾きを集光点の位置ずれに換算して計測できるため、大きな収差を有

50

する波面の計測が可能となる。

【0082】

続いて、図8を参照して、本実施例における屈折率分布計測方法について説明する。図8は、屈折率分布計測方法を示すフローチャートである。本実施例の屈折率分布計測方法は、図1のステップS11、S12がステップS21、S22に変更されている点で、実施例1の屈折率分布計測方法とは異なる。またそれに伴い、図1のステップS11、S12の計測に用いられた各媒質について実行されるステップS13～S18は、ステップS21、S22の計測に用いられた各光源について実行されるステップS23～S28に、それぞれ変更されている。ただし、ステップS23～S28は、図1のステップS13～S18と基本的に同様であるため、共通部分の説明については省略する。

10

【0083】

ステップS21において、まず第1の光源を挿入し、被検物140に対するシャックハルトマンセンサ500の位置合わせを行う。そして、第1の光源からの光(第1の波長の光)をピンホール110に入射し、透過波面 W_A の計測を行う。続いてステップS22において、第2の光源とは波長の異なる第2の光源を用い、第2の光源からの光(第2の波長の光)をピンホール110に入射し、透過波面 W_B の計測を行う。すなわち本実施例では、被検物140の屈折率とは異なる屈折率を有する媒質中で、被検物140に第1の波長の光(第1の参照光)を入射させて被検物140の透過波面 W_A (第1の透過波面)を計測する。また、同じ媒質中で、第1の波長とは異なる第2の波長の光(第2の参照光)を入射させて被検物140の透過波面 W_B (第2の透過波面)を計測する。

20

【0084】

その後、実施例1で説明したように、屈折率分布計測装置10aはステップS23～S28(実施例1のステップS13～S18に対応)を実行する。これにより、3次元の屈折率分布を算出することができる。ここで、本実施例のステップS21、S22において、以下の式(18)で表されるように差分波面が得られる。

【0085】

【数18】

$$\begin{aligned} W_A &= L3(x, y) \{ Nave_{HeNe}(x, y) - Ng_{HeNe} \} + dL(x, y) \{ Nave_{HeNe}(x, y) - N_{oilHeNe} \} - dL(0,0) \{ Ng_{HeNe} - N_{oilHeNe} \} \\ W_B &= L3(x, y) \{ Nave_{YAG}(x, y) - Ng_{YAG} \} + dL(x, y) \{ Nave_{YAG}(x, y) - N_{oilYAG} \} - dL(0,0) \{ Ng_{YAG} - N_{oilYAG} \} \\ &\dots \quad (18) \end{aligned}$$

30

【0086】

式(18)において、 $Nave_{HeNe}(x, y)$ 、 $Nave_{YAG}(x, y)$ は、それぞれ、第1の光源(He-Neレーザ)、第2の光源(YAG2倍高調波)における被検物140の内部の位置 (x, y) での屈折率投影値である。 Ng_{HeNe} 、 Ng_{YAG} は、それぞれの光源における被検物140の理想的な屈折率(基準被検物の屈折率)である。 $N_{oilHeNe}$ 、 N_{oilYAG} は、それぞれの光源における媒質の屈折率である。

【0087】

また、第1の光源における屈折率と第2の光源における屈折率は、以下の式(19)で表される関係があるものとする。

40

【0088】

【数19】

$$Nave_{YAG}(x, y) = \frac{Ng_{YAG} - 1}{Ng_{HeNe} - 1} Nave_{HeNe}(x, y) \quad \dots \quad (19)$$

【0089】

ステップS23において、以下の式(20)で表される屈折率分布投影値が求められる

50

。【0090】

【数20】

$$Nave_{HeNe}(x, y) = Ng_{HeNe} + \frac{1}{L3(x, y)} \times \frac{(Ng_{HeNe} - N_{oilHeNe})W_B - (Ng_{YAG} - N_{oilYAG})W_A}{\frac{Ng_{YAG} - 1}{Ng_{HeNe} - 1} (Ng_{HeNe} - N_{oilHeNe}) - (Ng_{YAG} - N_{oilYAG})}$$

… (20)

【0091】

本実施例の計測手段は、透過波面の波面形状の勾配または光線の傾きに相当する量を計測可能であり、大きな収差を有する透過波面においても、勾配または傾きを計測可能な物理量として検出することができるものであればよい。このため、シャックハルトマン法に限定されるものではなく、ハルトマン法やロンキーテストを用いた計測手段を用いてもよい。

10

【0092】

本実施例において、好ましくは、被検物の透過波面を計測するステップは、被検物の屈折率とは異なる屈折率を有する媒質中で、被検物に第1の波長の光を入射させて被検物の第1の透過波面を計測するステップ(ステップS21)を含む。更にこの媒質中で、第1の波長とは異なる第2の波長の光を入射させて被検物の第2の透過波面を計測するステップ(ステップS22)を含む。また、被検物の第1の屈折率分布を決定するステップは、第1の透過波面および第2の透過波面の計測結果に基づいて被検物の形状成分を除去するステップ(ステップS23)を含む。

20

【0093】

本実施例によれば、被検物の屈折率が高い場合でも、被検物の3次元屈折率分布を高精度に計測可能な屈折率分布計測方法および屈折率分布計測装置を提供することができる。

【実施例3】

【0094】

次に、本発明の実施例3における屈折率分布計測方法および屈折率分布計測装置について説明する。本実施例では、被検物140の形状が既知または計測済みであって、先験情報として屈折率分布の予測値を用い、重み関数を用いずに深度方向の屈折率分布を算出する方法について説明する。

30

【0095】

図9を参照して、本実施例における屈折率分布計測方法について説明する。図9は、屈折率分布計測方法を示すフローチャートである。まずステップS31において、計測手段および演算部200は、被検物140の波面収差を計測および取得する。具体的には、計測手段は、実施例1と同様に、被検物140の透過波面を計測する。続いて演算部200は、被検物140と同じ形状かつ既知の屈折率分布を有する基準被検物141が被検物140と同じ配置にある場合の透過波面を計算する。そして、2つの透過波面の差分を被検物140の波面収差とする。本実施例において、被検物140の形状および厚みは、既知または計測済みである。被検物140と基準被検物141の形状または厚みが大きく異なる場合、演算部200は、形状または厚みの違いにより変化する波面を計算により較正する。続いてステップS32において、演算部200は、ステップS31にて得られた波面収差を、被検物140の厚み分布で割る。これにより、2次元の屈折率分布、すなわち屈折率分布投影値を算出することができる。

40

【0096】

ステップS33、S34において、演算部200は、レンズ形状(被検物140の形状情報)から屈折率分布の予測値を計算する。本実施例では、計算された屈折率分布の予測値を先験情報と呼ぶ。ステップS33では、被検物140の形状情報を入力する。続いてステップS34において、演算部200は、入力されたレンズ形状に基づいて屈折率分布

50

の予測値を求める。

【0097】

ここで、レンズ形状の第1面を球面近似した場合の曲率をC1、レンズ形状の第2面を球面近似した場合の曲率をC2、厚み分布をDとする。このとき、屈折率分布の予測値 N_{p3D} は、例えば、以下の式(21)のように表される。

【0098】

【数21】

$$N_{p3D}(r, z) = Ng + a \left(\frac{D_0}{D(r)} - 1 \right) + b(C1 - C2) \left(\frac{D(r_{\max})}{D(r)} - 1 \right) z \quad \dots \quad (21) \quad 10$$

【0099】

式(21)で表される屈折率分布(の予測値)は、回転対称の分布を有すると仮定される。式(21)において、 r は動径方向、 z は光軸方向を示す。 D_0 は被検物140の中心厚、 r_{\max} は被検物端の半径を示す。 a 、 b は定数であり、類似した形状や成形条件のサンプルの屈折率分布の経験値に基づいて決定される。このように、被検物140の厚み分布や曲率に応じた屈折率分布関数を用いて得られた値を、屈折率分布の予測値とする。屈折率分布の予測値は、式(21)に限定されるものではなく、例えば以下の式(22)、(23)のように表すこともできる。

【0100】

【数22】

$$N_{p3D}(r, z) = Ng + \frac{a}{D(r)} + b(C1 - C2)z + c(C1 - C2)z^2 + d(C1 - C2)z^3 \quad \dots \quad (22) \quad 20$$

【0101】

【数23】

$$N_{p3D}(r, z) = Ng + a \exp \left(-\frac{D(r) - D_0}{D_0} \right) - a + b(C1 - C2) \left(\frac{D(r_{\max})}{D(r)} - 1 \right) z \quad \dots \quad (23) \quad 30$$

【0102】

続いてステップS35において、演算部200は、以下の式(24)に従って、深度方向の屈折率分布 N_{p3D} を定義する。ここで、ベクトル L は計測時における光の透過方向を示す。

【0103】

【数24】

$$N_{p3D}(r, \vec{L}(r)) = \frac{\int N_{p3D}(r, \vec{L}(r)) d\vec{L}}{\int d\vec{L}} \quad \dots \quad (24) \quad 40$$

【0104】

続いてステップS36において、以下の式(25)で表されるように、演算部200は屈折率分布投影値 N_{2D} と深度方向の屈折率分布 N_{p3D} とを加算し、3次元屈折率分布を取得する。

【0105】

【数 25】

$$N_{3D}(r) = N_{2D}(r) + N_{p3D}(r, \vec{L}(r)) - \frac{\int N_{p3D}(r, \vec{L}(r)) d\vec{L}}{\int d\vec{L}} \quad \dots \quad (25)$$

【0106】

本実施例において、第2の屈折率分布に関する情報は、被検物の形状（レンズ形状）に基づく屈折率分布関数である。このような第2の屈折率分布に関する情報に基づいて、透過波面の光の透過方向（深度方向）における第3の屈折率分布が決定される。

10

【0107】

本実施例によれば、被検物の屈折率が高い場合でも、被検物の3次元屈折率分布を高精度に計測可能な屈折率分布計測方法および屈折率分布計測装置を提供することができる。

【実施例4】

【0108】

次に、本発明の実施例4について説明する。前述の各実施例（実施例1～3）で説明した屈折率分布計測方法（屈折率分布計測結果）を、レンズなど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。

【0109】

図10を参照して、モールド成形を利用した光学素子の製造方法について説明する。図10は、本実施例における光学素子の製造方法を示すフローチャートである。

20

【0110】

図10において、まずステップS101において、光学素子を設計する。例えば、設計者は、光学設計ソフトなどを用いて光学素子を設計する。そしてステップS102において、ステップS101にて設計された光学素子に基づいて、光学素子をモールド成形するための金型を設計して加工する。続いてステップS103において、ステップS102にて設計され加工された金型を用いて、光学素子をモールド成形する。

【0111】

続いてステップS104において、ステップS103にて成形された光学素子の形状を計測し、その精度（形状精度）を評価する。ステップS104にて評価された形状精度が、要求する精度を満たしていない場合（NG）、ステップS105にて金型の鏡面の補正量を算出する。そしてステップS102において、再度、金型を設計および加工する。一方、ステップS104にて評価された形状精度が、要求する精度を満たしている場合（OK）、ステップS106において、光学素子の光学性能を評価する。

30

【0112】

ステップS106において、前述の各実施例（実施例1～3）で説明した屈折率分布計測方法を用いて光学素子（被検物140）の屈折率分布を計測し、光学素子の光学性能を評価する。ステップS106（光学性能評価の工程）に、各実施例で説明した屈折率分布計測方法を適用することにより、モールド成形で、高屈折率硝材の光学素子の量産が可能となる。ステップS106にて評価された光学性能が、要求する仕様に達していない場合、ステップS107において、光学面の補正量を算出する。そしてステップS101において、ステップS107にて算出された補正量を用いて光学素子を設計する。一方、ステップS106にて評価された光学性能が、所望の光学性能が得られた場合（要求する仕様に達している場合）、ステップS108において、光学素子を量産する。

40

【0113】

本実施例によれば、光学素子の内部の屈折率分布を高精度に計測することができる。このため、高屈折率硝材を用いた光学素子を、モールド成形により高精度に量産可能な光学素子の製造方法を提供することが可能である。

【0114】

（その他の実施形態）

50

本発明は、以下の処理を実行することによっても実現される。すなわち、前述の各実施例の機能を実現するソフトウェア（プログラム）を、ネットワーク又は各種記憶媒体を介して屈折率分布計測装置に供給し、その装置のコンピュータ（又はCPUやMPU等）がプログラムを読み出して実行する処理である。この場合、屈折率分布計測方法の手順が記述されたコンピュータで実行可能なプログラムおよびそのプログラムを記憶した記憶媒体は本発明を構成する。

【0115】

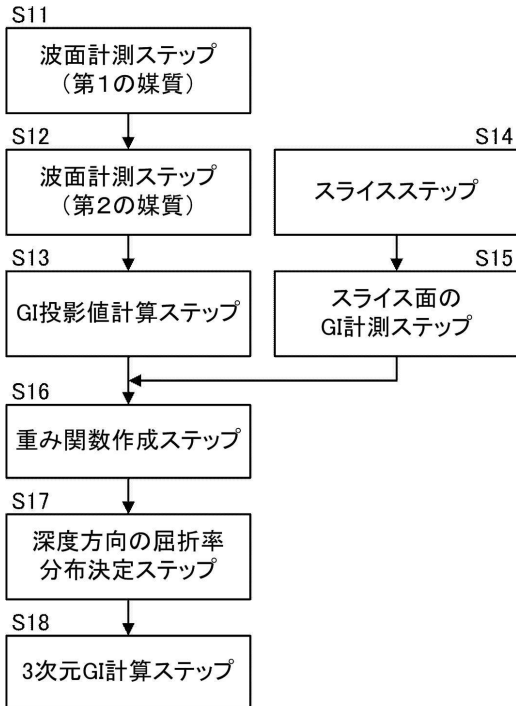
以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されず、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。

【符号の説明】

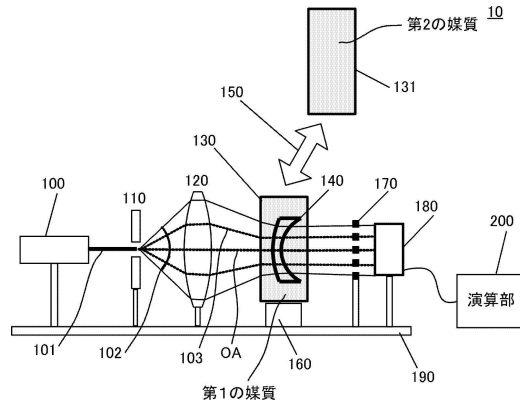
【0116】

- 透過波面計測装置 100
- 検出器 180
- 演算部 200

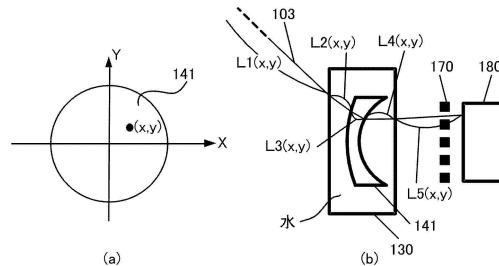
【図1】



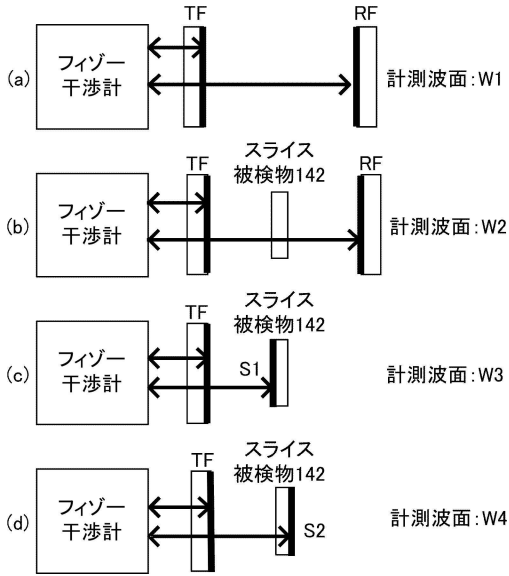
【図2】



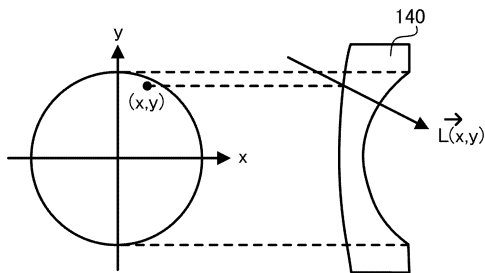
【図3】



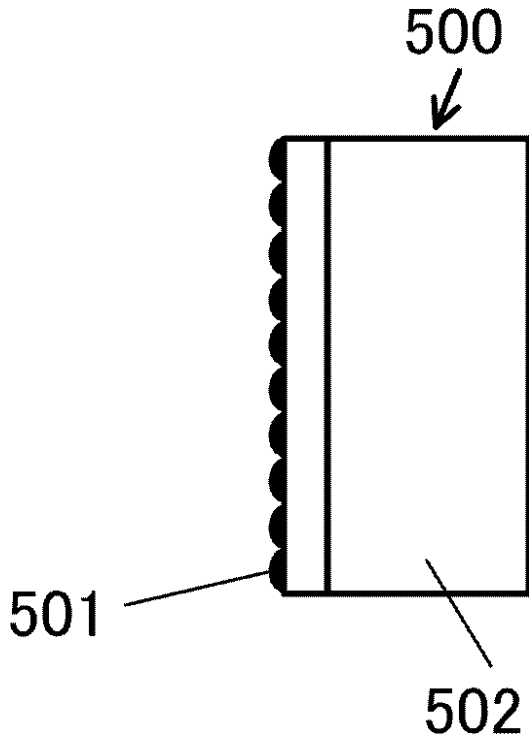
【図4】



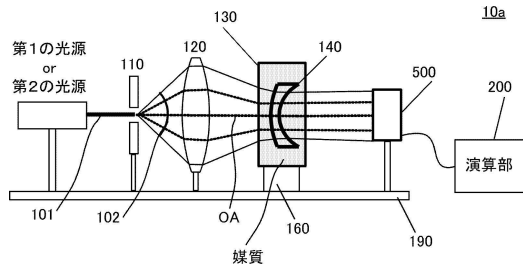
【図5】



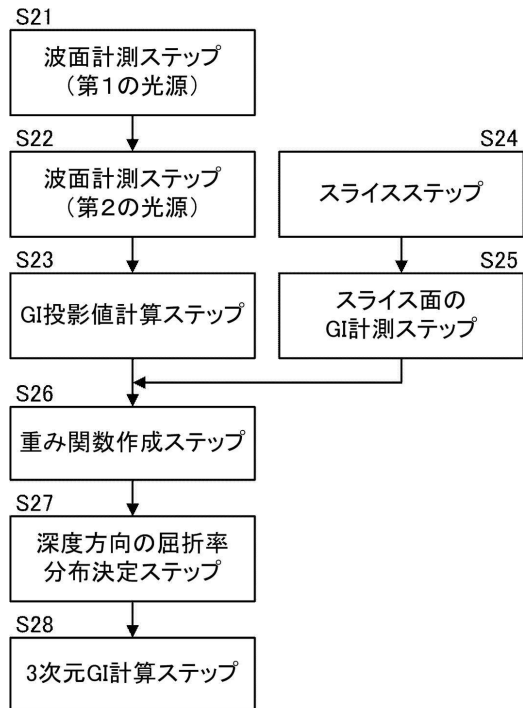
【図7】



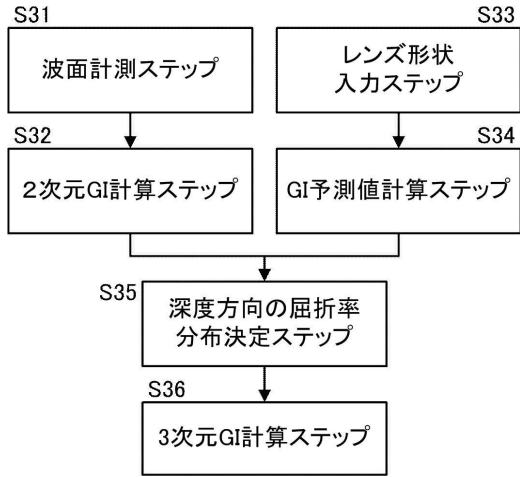
【図6】



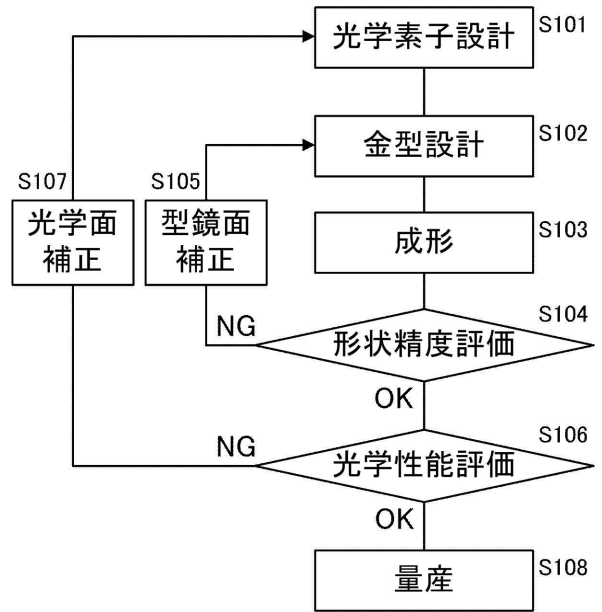
【図8】



【図9】



【図10】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2014-016253(JP,A)
特開2006-200999(JP,A)
特開2011-247692(JP,A)
特開2012-117999(JP,A)
米国特許出願公開第2003/0110809(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01M 11/00 - 11/02
G01N 21/00 - 21/61