

【公報種別】特許法第17条の2の規定による補正の掲載

【部門区分】第6部門第1区分

【発行日】平成23年11月10日(2011.11.10)

【公開番号】特開2011-106975(P2011-106975A)

【公開日】平成23年6月2日(2011.6.2)

【年通号数】公開・登録公報2011-022

【出願番号】特願2009-262468(P2009-262468)

【国際特許分類】

G 01 M 11/02 (2006.01)

G 01 M 11/00 (2006.01)

【F I】

G 01 M 11/02 B

G 01 M 11/00 L

【手続補正書】

【提出日】平成23年9月28日(2011.9.28)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0021

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0021】

が600nmであり、NAが0.3程度である場合は、ピンホール20の直径は2μm程度でよい。

ピンホール20を通過したレーザ光は、第1のコリメータレンズ30および第2のコリメータレンズ31を通過することで収束光となる。被検物40を照明する光を生成する光学系をここでは、照明光学系という。本実施例では、ピンホール20、第1のコリメータレンズ30および第2のコリメータレンズ31によって照明光学系が構成される。

収束光となったレーザ光は、被検物ケース41内の空気又は水の中を通って被検物40に入射し、これを透過する。被検物ケース41内の媒質を通って被検物40に入射するレーザ光を参照光という。参照光21は、照明光学系からの光のうち実際に被検物40を透過する光のみを意味し、被検物ケース41や被検物40の形状によって反射される光等、被検物40を透過しない光は含まない。

被検物ケース41内の空気又は水と被検物40とを透過したレーザ光(透過光)は、概ね平行光となって2次元回折格子である直交回折格子50を通過する。そして、検出器である撮像素子(CCDセンサ又はCMOSセンサであり、以下、CCDという)60により撮像(計測)される。被検物40を透過した透過光のNAが小さい場合、回折格子50とCCD60間の距離Zが以下の式(2)で示されるTalbot条件を満たすと、CCD60上に回折格子50の偽解像が干渉縞として得られる。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0026

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0026】

そして、後述するステップAに従って、被検物ケース41内の媒質が空気である場合の第1の透過波面(第1の波面収差)W<sub>1</sub>を算出する(ステップS30)。ステップAは、次の3つのステップにより構成される。

【手続補正3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0040

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0040】

次に、図1(b)に示すように、被検物ケース41に水(図2には媒質2と記す)を満たした状態で、水中(第2の媒質中)に被検物40を配置する(ステップS40)。続いて、ステップS20と同様にして、被検物40を透過した後の参照光(透過光)が、被検物40に入射する前の参照光に比べてより平行光に近づくように、被検物40に入射する参照光21のNAを変更する(ステップS50)。水の屈折率が空気の屈折率よりも大きいため、第2のコリメータレンズ31と被検物40との間の光軸方向間隔は、被検物40を水に浸した場合の方が空気に浸した場合よりも短くなる。

次に、水に浸した被検物40が理想的な内部屈折率分布を有する場合のシミュレーション波面 $W_{sim}$ を計算する(ステップS31)。そして、被検物40を水に浸した状態(第2媒質中)で透過波面 $W_m$ を計測し(ステップS32)、シミュレーション波面 $W_{sim}$ と透過波面 $W_m$ との差分に相当する第2の透過波面(波面収差) $W_2$ を求める(ステップS33)。式(8)に、第2の透過波面 $W_2$ を示す。

【手続補正4】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0042

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0042】

式(8)中の $N_2$ は水の屈折率であり、 $L_2(x, y)$ は、被検物40内における光線21aの光路の幾何学的長さ(距離)、すなわち光線21aに沿った被検物40の幾何学的厚みである。 $L_2(x, y)$ も、シミュレーション波面 $W_{sim}$ を計算する際に、光線追跡によって計算できる。以上が、本実施例の屈折率分布計測方法における第2の計測ステップであり、その計測結果として第2の透過波面 $W_2$ が得られる。

上述したように、第1および第2の計測ステップのそれぞれにおいて、透過光が平行光に近づくように参照光のNAを設定(変更)している。このため、被検物40における光軸上の中心部から離れた周辺部でのある点(同一点)の座標を(x, y)とするとき、必然的に $L_1(x, y)$ と $L_2(x, y)$ は異なる値をとる。つまり、第1の媒質および点(x, y)を通る光線21aを第1の光線とし、第2の媒質および点(x, y)を通る光線21aを第2の光線とするとき、これら第1および第2の光線の進行方向(光軸に対する傾き)は互いに異なる。さらに言い替えれば、第1および第2の光線の光路は、被検物40内の点(x, y)において互いに交差する。

このように、本実施例では、第1および第2の計測ステップにおいて、参照光のNAを変更して、第1および第2の光線の進行方向を互いに異ならせる。これにより、各計測ステップにおいて、被検物40を透過した後の参照光(透過光)を被検物40に入射する前の参照光に比べて平行光に近づけるようにしている。

なお、本実施例にいう「透過光を平行光に近づける」とは、透過光が平行光であることが望ましいが、平行光でなくてもよいことを意味する。すなわち、わずかに発散又は収束する光であってもよい。この場合、透過光のうち、透過波面計測上の有効光束径(有効径)における光軸側(中心側)の5割以内の光が平行光となることが望ましい。

【手続補正5】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0043

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0043】

次に、以下の式(9)により、式(7)により得られた第1の透過波面 $W_1$ と式(8)により得られた第2の透過波面 $W_2$ から、被検物40の形状誤差成分 $dL(x, y)$ を除去する。これにより、被検物40の内部屈折率分布GIを抽出することができる。

#### 【手続補正6】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0045

【補正方法】変更

【補正の内容】

#### 【0045】

ここで、 $L_{eff}(x, y)$ は、第1および第2の光線に沿った被検物40の幾何学的厚みである $L_1(x, y)$ と $L_2(x, y)$ から得られる実効的な被検物40の厚み(実効的厚み)である。 $L_1(x, y)$ が $L_2(x, y)$ と等しい、すなわち第1および第2の光線の進行方向(傾き)が一致するときは、 $L_{eff}(x, y)$ は $L_1(x, y)$ および $L_2(x, y)$ と等しくなる。

このように、被検物40の実効的厚み $L_{eff}(x, y)$ は、光線追跡で得られた $L_1(x, y)$ と $L_2(x, y)$ を用いて算出できる。

最後に、ステップS30およびステップS60にて得られた第1および第2の透過波面 $W_1$ ,  $W_2$ と、 $L_{eff}(x, y)$ とを用いて、被検物40の内部屈折率分布GIを算出する(ステップS70)。

#### 【手続補正7】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0046

【補正方法】変更

【補正の内容】

#### 【0046】

被検物40からの透過光を平行光に近づけるために行われるステップS20とステップS50は、測定装置における様々な幾何学的誤差によって生じる被検物40の屈折率分布の測定誤差を下げる効果を有する。例えば、CCD60に配置誤差があった場合の屈折率分布測定への影響を以下に述べる。

図4には、CCD60の配置位置が60aから60bにずれた場合の光路長の変化を示している。図4(a)は透過光のNAが大きい場合を、図4(b)は透過光のNAが小さい場合をそれぞれ示している。 $L_{1d}(x, y)$ は、CCD60の配置誤差によって生じる光線21aの光路長の変化量である。このとき、 $L_{1d}(x, y)$ と $L_{1d}(0, 0)$ の差分が屈折率分布に測定誤差として加算される。屈折率分布の測定誤差は、透過光のNAが大きくなるにつれて増加(NAが小さくなるにつれて減少)し、透過光が完全な平行光である場合は0となる。

屈折率分布の測定誤差と透過光のNAとの関係は、CCD60だけではなく、第2のコリメータレンズ31と被検物40との間隔、被検物40の厚み、被検物ケース41の壁の厚みおよび被検物ケース41の壁と被検物40との間隔にも当てはまる。また、被検物40と回折格子50との間隔、Talbot距離および回折格子の周期の誤差にも当てはまる。

図5は、透過光のNAと屈折率分布の測定誤差との関係を、次のようなシミュレーション方法によって求めた結果を示している。

まず、ある屈折率分布(例えば、光軸上の中心から周辺に向かって二次関数的に変化する屈折率分布)を有する被検物を考える。次に、図1のように各光学素子を配置し、第2のコリメータレンズ31と被検物40との間隔を調整して、被検物40からの透過光のNAをある値(例えば、NA=0)に設定する。

そして、各光学素子に独立に配置誤差を与え、それぞれの屈折率分布を算出する。この屈折率分布は誤差を含んだ値になる。配置誤差が無い理想配置の場合の屈折率分布も別途算出しておき、配置誤差を与えた場合のそれぞれの屈折率分布との差分をとる。

このシミュレーション方法によって、例えば C C D 6 0 に配置誤差を与えた場合の上記  $L_{1_d}(x, y)$  と  $L_{1_d}(0, 0)$  の差分に相当する量としての屈折率分布の誤差を算出することができる。さらに、各光学素子の場合において計算した差分量のルート二乗和をとることで、計測装置の屈折率分布の誤差（縦軸）を算出できる。同様の計算を、他の N A についても行い、横軸を N A とし、縦軸を計測装置の屈折率分布の誤差としてプロットすることで、図 5 のグラフが得られる。

また、図 5 は、被検物 4 0 からの透過光の N A が小さくなるにつれて屈折率分布の測定誤差が減少していくことを示している。N A が 0 . 2 以下になると、N A に対する屈折率分布の誤差の勾配が小さくなり、N A が 0 (平行光) のときに測定誤差が最小値となることがわかる。このため、被検物 4 0 からの透過光をできるだけ平行光に近づけることで、高精度な屈折率分布計測が可能となる。

図 6 は、球面収差が大きい被検物からの透過光を示している。球面収差が大きい場合、図 6 ( a ) に示すように、N A を 0 にすると被検物 4 0 の中心付近を通る光線が互いに交差する場合がある。このとき、C C D 6 0 で受光した光線が被検物 4 0 のどこを通ってきた光線かを判別することができない。このため、被検物 4 0 の球面収差が大きい場合は、図 6 ( b ) に示すように、被検物 4 0 の中心部付近を通った透過光が平行光に近づくように照明光学系の配置を調整すればよい。例えば、前述したように、透過光のうち有効径における光軸側（中心側）の 5 割以内の光が平行光となるように照明光学系の配置を調整すればよい。

ただし、上述した図 5 より、少なくとも N A に対する屈折率分布誤差の勾配が小さくなるように N A を 0 . 2 以下として、屈折率分布を高精度に計測できるようにするのが望ましい。

#### 【手続補正 8】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0 0 5 0

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0 0 5 0】

実施例 1 では、被検物 4 0 を照明する照明光学系のうち被検物 4 0 に最も近い光学素子の位置（該光学素子と被検物 4 0 との間隔）を調整することで参照光の N A を変更する場合について説明した。これに対し、本発明の実施例 2 では、照明光学系のうち被検物 4 0 に最も近い光学素子を交換することによって、参照光の N A を変更する。

図 7 には、本実施例の計測装置の構成を示す。被検物 4 0 は負のパワーをもつレンズ等の光学素子である。また、2 種類の媒質は、水（第 1 の媒質）とオイル（第 2 の媒質）である。

レーザ光源 1 0 から射出されたレーザ光は、ピンホール 2 0 を通ることで理想球面波となる。レーザ光は、第 1 および第 2 のコリメータレンズ 3 0 , 3 1 ( 3 1 ) を介して収束光に変換される。第 2 のコリメータレンズ 3 1 ( 3 1 ) は、本実施例でも被検物 4 0 を照明する照明光学系の被検物 4 0 に最も近い光学素子であり、交換が可能である。収束光は、被検物ケース 4 1 内に配置された被検物 4 0 を通過する。被検物 4 0 を透過した光（透過光）は、実施例 1 と同様に概ね平行光となる。そして、透過光の透過波面が、波面計測センサである Talbot 干渉計（回折格子 5 0 および C C D 6 0 ）により計測される。

まず、図 7 ( a ) に示したように、被検物ケース 4 1 内に水を満たした状態で水中（第 1 の媒質中）に被検物 4 0 を配置する（図 2 のステップ S 1 0 ）。次に、被検物 4 0 からの透過光が平行光に近づくように、適当な F ナンバーおよび口径を有する第 2 のコリメータレンズ 3 1 をセットする（ステップ S 2 0 ）。例えば、被検物 4 0 からの透過光が発散光となっている場合は、F ナンバーが小さく、口径が大きい第 2 のコリメータレンズ 3 1 に交換すればよい。この第 2 のコリメータレンズ 3 1 の選択は、計測装置において透過光の光量分布を観察しながら行えばよい。光量分布の観察の代わりに、予め透過光が平行光に

近づくように光学素子の配置を設計し、その設計値に基づいて第2のコリメータレンズ31を選択してもよい。

そして、被検物ケース41内の媒質が水である場合の第1の透過波面(波面収差)W<sub>1</sub>を、実施例1と同様の手順(ステップA)で求める(ステップS30)。

【手続補正9】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0051

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0051】

次に、図7(b)に示すように、被検物ケース41内にオイルを満たした状態で、オイル中(第2の媒質中)に被検物40を配置する(ステップS40)。オイルの屈折率は、水の屈折率と異なる。そして、被検物40からの透過光が平行光に近づくように、第2のコリメータレンズ31を、適当なFナンバーおよび口径を有する第2のコリメータレンズ31に交換する(ステップS50)。例えば、オイルの屈折率が水の屈折率よりも高い場合には、第2のコリメータレンズ31よりもFナンバーが大きく、口径が小さい第2のコリメータレンズ31を用いればよい。

次に、ステップAにより、被検物ケース41内の媒質がオイルの場合の第2の透過波面(波面収差)W<sub>2</sub>を求める(ステップS60)。

最後に、式(9)を用いて、被検物40の実効的厚みを計算し、さらに被検物40の内部屈折率分布GIを算出する(ステップS70)。

【手続補正10】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0053

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0053】

まず、被検物ケース41内に被検物40を設置する。そして、被検物40からの透過光が平行光に近づくように、適当な屈折率を有する第1の媒質を被検物ケース41内に入れる(図2のステップS10,S20)。例えば、被検物ケース41内に第1の媒質を入れたときの透過光が発散光であった場合には、より高い屈折率を有する第1の媒質に入れ替える。また、被検物ケース41内に第1の媒質を入れたときの透過光が収束光であった場合は、より低い屈折率を有する第1の媒質に入れ替えればよい。この媒質の入れ替えは、計測装置において透過光の光量分布を観察しながら行えばよい。光量分布の観察の代わりに、予め透過光が平行光に近づくように光学素子の配置を設計し、その設計値に基づいて第1の媒質を選択してもよい。

図8(a)は、被検物40からの透過光が平行光に近づくように選択された第1の媒質がエタノールである場合を示している。そして、被検物ケース41内の媒質がエタノールの場合の第1の透過波面(波面収差)W<sub>1</sub>を、実施例1と同様の手順(ステップA)で求める(ステップS30)。

【手続補正11】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0054

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0054】

次に、被検物ケース41内に被検物40を配置し、透過光が平行光に近づくように、適当な屈折率を有する第2の媒質を被検物ケース41内に入れる(ステップS40,S50)。第2の媒質の屈折率は、第1の媒質の屈折率と異なる。しかし、第2のコリメータレンズ31と被検物40との光軸方向の間隔を変えない場合は、必然的に第1の媒質と第2

の媒質の屈折率は近い値をとる。第1および第2の媒質は、同じ材料の温度を調整することで屈折率を変えたものでもよい。

図8(b)は、第2の媒質が水の場合を示している。そして、ステップAに従って、被検物ケース41内の媒質が水の場合の第2の透過波面(波面収差)W<sub>2</sub>を求める(ステップS60)。

最後に、式(9)を用いて、被検物40の実効的厚みを計算し、さらにその内部屈折率分布G1を算出する(ステップS70)。

【手続補正12】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0056

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0056】

ステップS230は、ステップS220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S230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S240にて金型の補正量が算出され、ステップS210で再度金型を加工する。