

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6105731号
(P6105731)

(45) 発行日 平成29年3月29日 (2017. 3. 29)

(24) 登録日 平成29年3月10日 (2017. 3. 10)

(51) Int. Cl.		F I	
GO 1 M	11/00	(2006. 01)	GO 1 M 11/00 M
GO 1 B	9/02	(2006. 01)	GO 1 M 11/00 L
GO 1 B	11/24	(2006. 01)	GO 1 B 9/02
GO 2 B	5/18	(2006. 01)	GO 1 B 11/24 D
			GO 2 B 5/18

請求項の数 6 (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2015-532335 (P2015-532335)
 (86) (22) 出願日 平成25年9月27日 (2013. 9. 27)
 (65) 公表番号 特表2015-535930 (P2015-535930A)
 (43) 公表日 平成27年12月17日 (2015. 12. 17)
 (86) 国際出願番号 PCT/EP2013/002904
 (87) 国際公開番号 W02014/048574
 (87) 国際公開日 平成26年4月3日 (2014. 4. 3)
 審査請求日 平成27年3月24日 (2015. 3. 24)
 (31) 優先権主張番号 102012217800.7
 (32) 優先日 平成24年9月28日 (2012. 9. 28)
 (33) 優先権主張国 ドイツ (DE)
 (31) 優先権主張番号 61/707,014
 (32) 優先日 平成24年9月28日 (2012. 9. 28)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 503263355
 カール・ツァイス・エスエムティー・ゲー
 エムペーハー
 ドイツ連邦共和国、73447 オーバー
 コッヘン、ルドルフ・エーバー・シュトラ
 ーセ 2
 (74) 代理人 100147485
 弁理士 杉村 憲司
 (74) 代理人 100147692
 弁理士 下地 健一
 (74) 代理人 100161148
 弁理士 福尾 誠
 (72) 発明者 ヨッヘン ヘッツラー
 ドイツ国 73434 アーレン シュテ
 ッケンヴェーク 12

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 回折光学素子及び測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光学素子の光学面の実際形状の、意図した形状からの偏差を測定する方法であって、
 入力波を発生するステップと、

前記入力波のビーム経路中に回折光学素子を配置し、前記入力波を、前記回折光学素子
 との相互作用によって、少なくとも3つの別個の出力波に変換するステップであって、前
 記出力波のうち1つは測定波であり、前記光学面の前記意図した形状に適合し、非球形波
 面を有し、前記出力波のうち少なくとも他の2つは較正波であるステップと、

前記少なくとも2つの較正波の各々を用いて、前記回折光学素子の較正補正值を決定す
 るステップと、

前記光学面を、前記適合した測定波のビーム経路中に配置し、前記測定波の波面を、前
 記光学面との相互作用後に測定するステップであって、前記適合した測定波の波面を、前
 記較正補正值を決定するステップ中と同様に前記入力波に対して配向された前記回折素子
 を用いて測定するステップと、

前記決定した較正補正值を用いて、前記測定した波面を補正するステップと
 を含むことを特徴とする方法。

【請求項 2】

前記回折光学素子が、複合符号化位相格子を具備していることを特徴とする請求項 1 に記
 載の方法。

【請求項 3】

前記少なくとも3つの出力波の各々を、前記回折光学素子において、1次の回折次数で発生することを特徴とする請求項1または2に記載の方法。

【請求項4】

前記出力波の各々が、当該出力波の異なる伝搬方向を強度で重み付け平均して出る伝搬方向である平均伝搬方向を有し、前記出力波の前記平均伝搬方向は、前記少なくとも2つの校正波が、前記測定波の前記平均伝搬方向によって規定される軸線に対して互いに非対称に配置されるように、互いに対して配向されていることを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載の方法。

【請求項5】

前記校正波のうち少なくとも1つが球面波であることを特徴とする請求項1～4のいずれかに記載の方法。

【請求項6】

光学素子を製造する方法であって、

500mmより大きい直径dを有する光学面を有する前記光学素子を製造するステップと

、
1つの回折光学素子のみを用いた請求項1に記載の方法によって、前記光学面の意図した形状に対する当該光学面の実際形状を、前記意図した形状からの前記実際形状の偏差が0.05nmの精度で測定されるような精度で測定するステップであって、前記偏差は、 $d/100 \sim d/5$ の振動波長を有する振動に由来し、前記意図した形状は自由形状面であり、回転対称な非球面の各々から5 μm より大きい偏差を有するステップと、

前記干渉計測の結果に基づいて、前記光学面を機械的に処理することによって、前記光学面を前記意図した形状に適合させるステップとを含むことを特徴とする方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本願は、独出願第102012217800.7号、2012年9月28日出願、及び米国特許仮出願第61/707014号、2012年9月28日出願に基づいて優先権を主張する。この独出願及びこの米国特許仮出願の全開示を、参照する形で本明細書に含める。

【背景技術】

【0002】

発明の背景

本発明は、光学素子の光学面の実際形状の、意図した形状からの偏差を測定する方法、こうした方法を実行するための回折光学素子、光学素子を製造する方法、並びにこうした光学素子に関するものである。

【0003】

意図した形状からの実際形状の偏差を測定する装置は、米国特許出願公開第2010/0177321号明細書(特許文献1)に記載されている。この装置は、測定波を発生させるための干渉計を具え、この測定波の波面は、回折格子によって光学面の意図した非球面形状に適合する。この非球面測定波の波面は、この光学面での反射後に干渉計測法によって評価され、このプロセスにおいて、光学面の実際形状の、意図した形状からの偏差が測定される。

【0004】

この場合、上記回折格子は、例えばコンピュータ発生ホログラム(CGH: computer-generated hologram)とすることができ、このCGHは、例えばレイ・トレーシング(光線追跡)法のような適切な計算法によってシミュレート(模擬計算)した干渉計の設計を利用して発生され、このプロセスでは、回折格子が干渉計装置のビーム経路中で所望の機能を有するように、回折格子の位相関数を計算する。従って、計算した回折格子の位相関数から、その回折格子を製造することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 0 5 】

形状測定の精度はC G Hの精度に依存する。ここで、決め手となるものは、できる限り正確な製造ではなく、むしろ、C G Hにおいてあり得るすべての誤差の、できる限り正確な測定である。既知の誤差は、検査対象の形状を測定する際に、計算によって除去することができる。従って、C G Hが基準を形成する。回転対称な非球面の場合、回転対称でないすべての誤差は完全に較正することができるが、自由形状の表面の場合、即ち、回転対称でない非球面の場合、すべてのC G H誤差が形状測定に影響を与える。その結果、C G Hの測定の精度についての要求の急激な増加がある。このプロセスでは、C G Hの回折構造の歪み、即ち、回折構造の意図した位置に対する横方向位置、及びC G Hのプロファイルの形状を、非常に正確に知ることが重要である。しかし、従来技術において既知の測定機器を用いて測定することができるこれらのパラメータの測定精度は、絶えず増加する要求を満たすものではない。

10

【 0 0 0 6 】

光学面を高精度で測定するための他の既知の装置は、直列に配置された2つのC G Hを使用し、その結果、測定配置に必要な労力が増加する。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 7 】

【 特許文献 1 】 米国特許出願公開第 2 0 1 0 / 0 1 7 7 3 2 1 号明細書

【 非特許文献 】

20

【 0 0 0 8 】

【 非特許文献 1 】 Donald C. O' Shea et al., " Diffractive optics: design, fabrication, and test " 2004, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 29 ~ 35ページ

【 非特許文献 2 】 H. Kleemann et al., " Combination of blazed and laterally blazed structures ", Diffractive Optics and Micro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America), paper DTuC7, 2004

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 9 】

30

基になる目的

本発明の目的は、上述した問題を解決することであり、特に、あらゆる形状の光学面、特に、回転対称でない非球面の光学面を、改善された精度で測定するための方法及び回折光学素子を提供することにある。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 0 】

本発明による解決策

一例として、本発明によれば、上述した目的は、基板、及びこの基板の上に配置された回折構造パターンを有する回折光学素子によって達成される。この回折構造パターンは、この構造上に放射される平面波または球面波の入力波を、少なくとも4つの別個の出力波に変換し、これらの出力波のうち少なくとも1つは非球面波であり、これらの出力波のうち少なくとも他の1つは球面波であり、これらの出力波のうち少なくとも他の2つのそれぞれは、平面波または球面波である。

40

【 0 0 1 1 】

このように、本発明によれば、上述した出力波が、単一の回折光学素子、即ち単一の基板上に配置された回折構造パターンのみを用いて発生する。従って、この回折光学素子は、いくつかの変形例により構成することができる。第1変形例によれば、回折光学素子上に放射される波が平面波であり、出力波は、少なくとも1つの非球面波及び少なくとも3つの球面波を含む。第2変形例によれば、回折光学素子上に放射される波が球面波であり、出力波は、少なくとも1つの非球面波及び少なくとも3つの球面波を含む。第3変形例

50

によれば、回折光学素子上に放射される波が平面波であり、出力波は、少なくとも1つの球面波及び少なくとも2つの平面波を含む。第4変形例によれば、回折光学素子上に放射される波が球面波であり、出力波は、少なくとも1つの球面波及び少なくとも2つの平面波を含む。1つの好適例によれば、第1及び第2変形例の場合、上記球面波の強度が、30%未満だけ、特に10%未満だけ、互いに異なる。

【0012】

上記平面波または球面波の入力波は、まとめて球面波と称することもでき、この場合、平面波は、無限大の半径を有する球面波の特殊な場合と見なす。上記非球面出力波は、測定される光学面に適合した測定波とすることができ、この測定波は、表面を干渉計測手段によって測定する際に、この表面上に放射される。他の出力波は較正波と称することもできる。

10

【0013】

上記回折光学素子は、特に、コンピュータで発生したホログラム(CGH)として具体化することができる。なお、上記回折構造パターンは、位相格子または回折格子と称することもできるが、これは、規則的な光子を必ずしも意味するものではないことを理解すべきであり、特に、屈曲を有することができる線構造を意味し、これらの屈曲は、原則的に、形状の点で互いに偏差があり、かつ相互間で可変の距離を有することができる。以上に説明したように、この回折構造パターンは、回折光学素子の基板上に配置され、即ち、1つの基板上のみに配置されている。従って、この回折構造パターンは、異なる基板上に配置された複数の副パターンで構成されない。

20

【0014】

上述したように別個の出力波を発生する回折構造パターンは、複合符号化位相格子とすることができる。本願における意味では、球面波は球形波面を有する波動であり、即ち、波面が少なくとも球面部分によって形成される波動である。

【0015】

本願における意味では、非球面波は、その波面があらゆる理想球面から、特に当該波面に最も良く合う球面から少なくとも10%の偏差を有する波動であり、ここには、上記回折構造パターン上に放射される入力波の波長である。換言すれば、非球面波が有する少なくとも1点、あらゆる理想球面から少なくとも10%だけの偏差を有する。波長が500nmであれば、本願における意味での非球面波は、あらゆる理想球面から少なくとも500nmの偏差を有する。本願における意味では、非球面波は、回転対称な波面を有する波動、即ち従来の意味での非球面波、及び回転対称でない波面を有する波動、即ち、その波面がいわゆる自由形状の面を有する波動を、共に含む。

30

【0016】

1つの好適例によれば、上記非球面波が自由形状面の形態の波面を有し、この波面は、あらゆる理想球面から少なくとも1mmの偏差を有する。

【0017】

ここで、「別個の出力波」とは、これらの出力波が異なる伝搬方向を有し、従って、互いに独立して検出することができ、あるいは、互いに独立して反射させて回折光学素子に戻すことができ、このため、これらの出力波を干渉計測システムにおいて別個に測定することができることを意味するものと理解すべきである。

40

【0018】

形状の干渉計測用に従来採用されているCGHに比べれば、本発明による回折光学素子は、本発明によれば、少なくとも3つの追加的な平面または球面出力波が、非球面出力波に加えて発生する点で異なる。上述した従来のCGHでは、1つ以上の非球面波に加えて、2つだけの平面波または球面波が、異なる回折次数で発生する。

【0019】

直列に配置された2つのCGHを用いる場合、球面及び非球面によって形成され、従って、同様に非球形である波動が、通常、2番目のCGH上に放射される。平面波または球面波がこのCGH上に放射されるものとするれば、このプロセスでは、単一の平面波または

50

球面波でない波動が発生する。

【0020】

平面または球面出力波を、本発明による回折光学素子上に放射する際に、上記非球面出力波に加えて、上述した種類の少なくとも3つの追加的な出力波を発生することは、この回折光学素子を、製造誤差について、これらの追加的な出力波を用いて測定することを可能にする。従って、この回折光学素子を用いたその後の光学面の測定中に、この製造誤差の影響を計算によって測定値から除外することも可能である。その結果、形状、特に非球面の光学面の形状を測定する測定精度を向上させることができる。

【0021】

本発明による1つの好適例によれば、上記構造パターンは、少なくとも2つの追加的な出力波が平面波であり、これらの出力波の伝搬方向が、入力波の入射方向に対して互いに対称であるように構成されている。1つの変形例によれば、2つの平面出力波が、直線格子において、例えば+1次及び-1次の回折のように、同じ次数で正及び負の回折次数である。

10

【0022】

本発明による他の好適例によれば、上記構造パターンは、上記別個の出力波が、第1波動対を形成する2つの平面出力波に加えて、2つの追加的な平面波を第2波動対の形で有するように構成され、これらの追加的な平面波の伝搬方向は、上記入射方向に対して互いに互いに対称であり、第1波動対の伝搬方向が張る平面が、第2波動対の伝搬方向が張る平面と一致しないように構成されている。特に、第1波動対の伝搬方向が張る平面が、第2波動対の伝搬方向が張る平面にほぼ直交する。これに関連して、「ほぼ直交する」とは、少なくとも80°、特に少なくとも85°、少なくとも89°または約90°の角度を意味する。

20

【0023】

本発明による他の好適例によれば、上記回折構造パターンの点*i*毎に、角度 θ_i が、第1差分ベクトルと第2差分ベクトルとの間の角度によって定義され、第1差分ベクトルは、点*i*から出る非球面波の波動ベクトル $k_i(A)$ と、点*i*に当たる入力波の波動ベクトル $k_i(in)$ との差分によって定義され、第2差分ベクトルは、点*i*から出る少なくとも1つの球面波の波動ベクトル $k_i(S)$ と、点*i*に当たる入力波の波動ベクトル $k_i(in)$ との差分によって定義される。さらに、上記回折構造パターンは、角度 θ_i の絶対値を、当該回折構造パターンのすべての点*i*にわたって平均して、当該回折構造パターンに平行な平面上に射影した値が、5°より大きく、特に10°より大きいように構成されている。上記波動ベクトルは、「*k*ベクトル」とも称され、波動の波面に直交するベクトルである。換言すれば、角度 θ_i が5°より大きく、ここに θ_i は次式のように定義される：

30

【数1】

$$\omega = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \angle_{xy} [(k_i(A) - k_i(in)), (k_i(S) - k_i(in))] \right|$$

【0024】

ここに、*N*は、上記平均値を求める点*i*の数を表す。また、他の言葉で表現すれば、角度 ω は、角度 θ_i^{xy} の、上記回折光学素子の空間座標*i*全体にわたる平均値によって定義され、即ち、

40

【数2】

$$\omega = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\alpha_i^{xy}|$$

であり、ここに、 α_i^{xy} は、*x y*平面上に射影した、差分ベクトル $[k_i(A) - k_i(in)]$ と差分ベクトル $[k_i(S) - k_i(in)]$ との間の角度である。

【0025】

50

ここで、上記平均値は、上記構造パターンによってカバーされる領域、即ち、上記回折光学素子の光学の実効領域全体にわたって求められる。入力波の伝搬方向をz方向と称し、従って、x y 平面は入力波の伝搬方向に直交する平面である。

【0026】

本発明による他の実施形態によれば、上記非球面波を発生するための構造パターンの回折効率が、上記少なくとも1つの球面波を発生するための構造パターンの回折効率よりも少なくとも50%大きい。その結果、上記非球面波の強度は、上記少なくとも1つの球面波の強度よりも少なくとも50%大きくなる。1つの変形例によれば、上記少なくとも1つの非球面波を発生するための回折効率が、上記少なくとも1つの球面波を発生するための回折効率よりも、少なくとも70%、特に少なくとも100%大きい。このことは、例えば金属化された較正ミラーを用いることによって補償することができる。1つの好適例によれば、上記少なくとも4つの出力波の回折効率の合計が30%より大きい。

10

【0027】

本発明の他の好適例によれば、上記構造パターンは、上記非球面出力波の放射電力が、上記球面または平面出力波のそれぞれの放射電力よりも大きくなるように構成されている。換言すれば、上記構造パターン中で、非球形波面を有する出力波を、球面または平面の波面を有する残り3つの出力波よりも強く重み付けする。1つの好適例によれば、非球形波面を有する出力波の放射電力は、入力波の放射電力の少なくとも30%、特に約40%であるのに対し、球面または平面の波面を有する残り3つの出力波の各々は、入力波の放射電力の15%~25%、特に約20%である。

20

【0028】

本発明による他の好適例によれば、上記構造パターンは、当該構造パターン上に放射される入力波が少なくとも5つの出力波に変換され、これらの出力波のうち4つが球面波として具現されるように構成されている。上記少なくとも5つの出力波のうち他の1つは、非球面波、特に自由形状波である。

【0029】

本発明による他の好適例によれば、上記出力波のそれぞれが、互いに対して配向された平均伝搬方向を有し、ここで、4つの球面出力波の平均伝搬方向どうしが、これらの出力波を(2つずつ)対にした各対において、上記非球面出力波の平均伝搬方向によって規定される軸線に対して互いに対称に配置されない。これに関連して、「対称でない」とは、対称配置に比べて少なくとも1°、特に5°の偏差が存在することを意味するものと理解すべきである。上記平均伝搬方向は、各出力波の異なる伝搬方向を強度で重み付け平均して出る伝搬方向である。1つの変形例によれば、この条件が、上記回折光学素子上のすべての点の少なくとも90%に当てはまる。

30

【0030】

本発明による他の好適例によれば、上記回折構造パターンが多レベルの位相格子を具備している。当業者が良く知っているように、多レベル位相格子とは、最高レベルと最低レベルとの間に少なくとも1つの中間レベルを有する位相格子を意味するものと理解すべきである。従って、こうした位相格子は少なくとも3つのレベルを有する。異なる好適例によれば、4つ以上のレベルを設けることができる。いわゆるブレード位相格子は、その外形が傾斜面によって表現されるくらい多数のレベルを有する。多レベル位相格子の使用は、複合符号化によって生じる回折効率の損失を部分的に補償するか、さらには過度に補償することを可能にする。本願における意味では、多レベル位相格子はこうしたブレード位相格子も意味するものと理解すべきである。当業者は、多レベル位相格子についての背景情報を、Donald C. O'Shea他によるハンドブック“*Diffractive optics: design, fabrication, and test*”2004, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (非特許文献1)の29~35ページより得ることができる。本願における意味での多レベル位相格子は、特に、例えばH. Kleemann et al., “Combination of blazed and laterally blazed structures”, *Diffractive Optics and Micro-Optics*, OSA Technical Digest (Optical Society of America), paper DTuC7, 2004 (非特許文献2)に記載されている

40

50

ような横方向ブレード位相格子も意味するものと理解すべきである。

【0031】

本発明によれば、基板、及びこの基板上に配置された回折格子を具えた回折光学素子がさらに提供される。この回折格子は、互いに距離をおいて配置された格子線を有し、この回折格子の平均周期距離は、隣り合う格子線間の中心間距離の各々を、回折格子全体にわたって平均した値によって決まる。これらの格子線は波状の形状を有し、格子線の波状の平均周期は、回折格子の平均周期距離の3倍～20倍の領域内にあり、格子線の長手方向を横切る向きの格子線の変動は、回折格子の平均周期距離の0.1倍～3倍の領域内に入る幅を有する。

【0032】

上記回折格子の平均周期距離は、格子線を横切る向きに測る。波状の格子線とは、これらの格子線が上向き及び下向きに偏位し、即ち、格子線の長手方向を横切る向きに、それぞれの直線に対して偏位することを意味するものと理解すべきである。ここで、波状の周期は、偏位毎に変動し得る。ここで、格子線の長手方向を横切る向きの格子線の変動の幅は、それぞれの格子線の想定される直線形状からの、即ち、それぞれの格子線に最も良く合う直線からの偏位の幅を意味するものと理解すべきである。特に、この変動の幅は、格子線の形状を定める波の振幅の2倍である。

【0033】

本発明による他の好適例によれば、上記回折格子が、上記基板の少なくとも20%をカバーする。基板が平板状に設計されている場合、基板の上側及び下側のそれぞれの20%が、この回折格子によってカバーされる。

【0034】

本発明による他の実施形態によれば、上記回折格子の格子線の少なくとも90%、特に少なくとも95%または少なくとも99%が、連続線として具体化され、これらの連続線は、回折格子のエッジ領域間に中断なしに延び、即ち、これらの線は、回折格子によってカバーされる基板の領域内では終端しない。

【0035】

本発明による他の好適例によれば、上記回折格子は、当該回折格子における1mmのエッジ長を有する正方形の測定領域内で、50μmのエッジ長を有するあらゆる正方形部分領域にわたって平均した上記格子線のストライプ密度が、20線対/mm未満の幅に及ぶ変動を有するように構成されている。正方形の部分領域内のストライプ密度を測定する方法の一例によれば、最初に、上記格子線の幅と、一辺が隣の格子線に隣接する中間的空間の幅との合計を、各格子線に沿って1μm毎に測定する。これにより測定された値の逆数を求め、従って、ストライプ密度は、関係する測定点毎に確立される。ストライプ密度の値を、関係する部分領域内のすべての測定点にわたって平均する。このことは、上記正方形の測定領域内のすべての部分領域について発生し、即ち、 $20 \times 20 = 400$ 個の部分領域について発生し、このため、平均ストライプ密度は部分領域毎に測定される。一例として、平均したストライプ密度は約200線/mmであり、このストライプ密度は、190～210線/mmの幅内で変動する。

【0036】

他の好適例によれば、上記構造パターンは、上記少なくとも4つの別個の出力波に加えて、リトロウ(Littrow)反射の参照波も、当該構造パターン上に放射される入力波からの参照波として発生するように構成され、この参照波は、干渉計測中に参照波として用いることができる。

【0037】

上述した好適例及び変形例において説明した特徴は、個別に、あるいは組み合わせて、波状の格子線を有する回折光学素子に移行することができる。

【0038】

さらに、本発明によれば、基板、及びこの基板上に配置された回折構造パターンを有する回折光学素子が提供される。この回折構造パターンは、当該構造パターン上に放射され

10

20

30

40

50

る平面波または球面波の入力波を、各々が球形波面を有する少なくとも3つの別個の出力波に変換するように構成されている。

【0039】

上述した好適例及び変形例において説明した特徴は、個別に、あるいは組み合わせて、波状の格子線を有する回折光学素子に移行することができる。特に、この回折光学素子は、上述した少なくとも4つの出力波を発生する回折光学素子の好適例からの特徴を含むことができる。

【0040】

本発明によれば、光学素子の光学面の実際形状の、意図した形状からの偏差を測定する他の方法が提供される。この方法は、次のステップ、即ち：入力波を発生するステップと、この入力波のビーム経路中に回折光学素子を配置するステップと、この回折光学素子との相互作用によって、上記入力波を少なくとも3つの別個の出力波に変換するステップとを含み、これらの出力波のうち1つは測定波であり、上記光学面の意図した形状に適合し、非球形波面を有し、これらの出力波のうち少なくとも他の2つは較正波である。この方法は、これら少なくとも2つの較正波の各々を用いて、上記回折光学素子の較正補正值を決定するステップと、上記適合した測定波のビーム経路中に上記光学面を配置するステップと、上記光学面との相互作用後に、上記適合した測定波の波面を測定するステップとをさらに含み、上記適合した測定波の波面は、上記回折光学素子を、上記入力波に対して、上記較正補正值の決定中と同様に配向させて測定する。さらに、上記方法によれば、決定した較正補正值を用いて、測定した波面を補正する。

【0041】

換言すれば、上記方法によれば、上記回折光学素子は、入力波の伝搬方向に対して所定の向きに配置されて、較正補正值を決定し、この較正補正值は、上記少なくとも2つの較正波の各々を分析することによって決まる。上記適合した測定波の波面を測定する際に、この向きは不変である。また、換言すれば、上記測定波を発生して分析する際、及び上記較正波を発生して分析する際に、入力波は、上記回折光学素子の局所座標系内で同じ入射方向を有する。特に、上記出力波は、上記入力波と上記回折光学素子との相互作用によって同時に発生する。

【0042】

上述したように、「別個の出力波」とは、これらの出力波が異なる伝搬方向を有し、従って、互いに独立して検出することができ、あるいは、互いに独立して反射させて上記回折光学素子に戻すことができることを意味するものと理解すべきである。

【0043】

上記回折光学素子を、入力波に対して、上記較正補正值を決定する期間中と同様に配向させて、上記適合した測定波の波面を測定することは、上記回折光学素子の、製造誤差についての特に精密な較正を可能にする、というのは、決定した較正補正值を、上記適合した測定波の波面の測定値に直接適用することができるからである。配向が不変のままであるので、決定した較正補正值は、上記測定波の発生に関係する上記回折光学素子の製造誤差を正確に反映する。換言すれば、測定された較正補正值と、上記測定波を発生する上記回折光学素子上の構造の現実の偏差との間の偏差に起因して、上記波面の補正に誤差は導入されず、この偏差は、上記回折光学素子の異なる配向に起因する。

【0044】

好適例によれば、上記回折光学素子を、入力波に対して、上記較正補正值を決定する期間中と同じ位置に配置して、上記適合した測定波の波面を測定する。このことは、上記適合した測定波の波面を測定する際に、上記回折光学素子の配向及び位置が共に不変のままであることを意味する。

【0045】

上記少なくとも2つの較正波は、第1較正波及び第2較正波を含む。上記回折光学素子の較正補正值は、これらの第1較正波及び第2較正波を用いて決定される。

【0046】

10

20

30

40

50

他の好適例によれば、上記較正補正值を決定するステップが、上記較正波のうち第1のものから第1較正補正值を決定し、上記較正波のうち第2のものから第2較正補正值を決定し、これらの第1較正補正值及び第2較正補正值は、上記回折光学素子を、入力波に対して配向させて決定され、即ち、上記回折光学素子の配向は、上記第1較正補正值の決定と上記第2較正補正值の決定との間で不変である。

【0047】

他の実施形態によれば、上記回折光学素子が複合符号化位相格子を具えている。こうした複合符号化位相格子は、少なくとも3つの位相関数 $f_1 \sim f_3$ で構成され、これにより、個別の位相関数 $f_1 \sim f_3$ 毎に、それぞれの回折波が発生し、これらの回折波が上述した出力波を形成する。位相関数 $f_1 \sim f_3$ 毎に発生したこれらの回折波の各々が、位相格子 f_0 において1次の回折次数で発生する。本願による複合符号化位相格子の特性は、後の好適な実施形態の詳細な説明において詳細に説明する。複合符号化位相格子の使用は、上記出力波が異なる強度を有するように上記回折光学素子を構成することを可能にする。このことは、この複合符号化位相格子内の個別の位相関数 $f_1 \sim f_3$ に異なる重みを割り当てることによって行うことができる。

10

【0048】

好適例によれば、上記少なくとも3つの出力波の各々が、上記回折光学素子において同じ回折次数で発生する。特に、上記少なくとも3つの出力波の各々が、上記回折光学素子において、1次の回折次数で、特に+1次の回折次数で発生する。本願で説明する複合符号化格子の場合、+1次の回折次数の波動のみが上記出力波を形成する。上記出力波を1次の回折次数で発生する際には、平面または球面形状のような単純な幾何学的形状を有する較正波を発生することができる。こうした単純な幾何学的形状により、適切な較正物体を高精度で製造することができるので、正確な較正を達成することができる。

20

【0049】

他の好適例によれば、上記出力波のそれぞれが、互いに対して配向された平均伝搬方向を有し、上記少なくとも2つの較正波の伝搬方向が、上記測定波の平均伝搬方向によって規定される軸線に対して、互いに非対称に配置され、即ち、互いに対称に配置されない。こうした非対称な配置により、上記測定波の位置における干渉光またはスプリアス光の発生を回避することができる。

【0050】

他の好適例によれば、上記較正波の少なくとも1つが球面波である。本発明の他の好適例によれば、少なくとも2つ、あるいは少なくとも3つの較正波が球面波である。

30

【0051】

本発明の好適例によれば、上記入力波が平面波または球面波であり、上記入力波が、上記回折光学素子との相互作用によって少なくとも4つの別個の出力波に変換され、上記出力波のうち少なくとも他の1つは、球形波面を有する較正波であり、上記出力波のうち少なくとも他の2つは、各々が平面または球面の波面を有する較正波である。上記回折光学素子の較正補正值は、上記3つの較正波を用いて決定される。

【0052】

上述した本発明による好適例のいずれかにおいて、上記方法に関して以上及び以下に述べる特徴は、上述した本発明による好適例のいずれにおいても、本発明による回折光学素子に移行することができ、特に、入力波を少なくとも4つの別個の出力波に変換するように構成された回折光学素子に移行することができ、その逆も成り立つ。特に、本発明による回折光学素子は、上記4つの出力波を発生するように構成することができ、このことは、上記回折光学素子を、他の出力波を用いて較正補正值を決定する期間中と同様に入力波に対して配向させて、光学面と相互作用した後の上記非球面波の波面を測定することができるように行う。他の好適例によれば、上記回折光学素子が、上記4つの出力波を同時に発生するように構成され、特に、上記出力波の各々を1次の回折次数で発生するように構成されている。

40

【0053】

50

さらに、本発明によれば、光学素子の光学面の実際形状の、意図した形状からの偏差を測定する方法が提供される。1つの好適例では、本発明による方法が、次のステップ、即ち：平面または球面の入力波を発生するステップと、この入力波のビーム経路中に回折光学素子を配置するステップと、この回折光学素子との相互作用によって、この入力波を少なくとも4つの別個の出力波に変換するステップとを含み、これらの出力波のうち少なくとも1つは測定波であり、上記光学素子の光学面の意図した形状に適合し、非球形波面を有し、上記出力波のうち少なくとも他の1つは、球形波面を有する較正波であり、上記出力波のうち少なくとも他の2つは較正波であり、各々が平面または球面の波面を有する。さらに、本発明による方法によれば、上記較正波を用いて、上記回折光学素子の較正補正值を決定し、上記適合した測定波のビーム経路中で上記光学面を測定し、上記適合した測定波の波面を、上記光学面との相互作用後に測定する。さらに、上記較正補正值を用いて、測定した波面を補正する。このように、補正した波面を用いて、光学素子の実際形状の、意図した形状からの偏差を測定することができる。

10

【0054】

本発明による方法において用いる上記回折光学素子は、特に、上述した好適例の1つにより具体化することができる。本発明による1つの好適例によれば、上記較正補正值を決定するために、1つ以上の較正物体を上記較正波のビーム経路中に配置し、この較正物体との相互作用後に、上記較正波の干渉計測による評価を行う。

【0055】

さらに、本発明によれば、光学素子を製造する方法が提供される。1つの好適例では、この方法は、500mmより大きい直径を有する光学面を有する光学素子を製造するステップを含む。さらに、1つの回折光学素子のみを用いた干渉計測によって、この光学面の意図した形状に対する実際形状を、意図した形状からの実際形状の偏差が0.05nmの精度で測定されるような精度で測定し、これらの偏差は、 $d/100 \sim d/5$ の振動波長を有する振動に由来し、意図した形状は自由形状面であり、回転対称な非球面の各々から5 μ mより大きい偏差を有する。さらに、上記光学面は、上記干渉計測の結果に基づく当該光学面の機械的处理によって、意図した形状に適合させる。この場合、上記光学面を意図した形状に適合させることは、この干渉計測の測定精度の範囲内で行う。

20

【0056】

光学面の実際形状干渉計測は、特に、本発明による好適例の1つにおいて上述した測定方法を実行することによって行うことができる。上記製造方法において用いられる上記回折光学素子は、特に、上述した好適例の1つにおいて具体化することができる。

30

【0057】

さらに、本発明によれば、500mmより大きい直径dを有する光学面が提供される、ここで、この光学面の実際形状は、意図した形状からの偏差が0.05nm以下、特に0.02nm以下であるように、意図した形状に適合し、この偏差は、 $d/100 \sim d/5$ の振動波長を有する振動に由来する。ここで、上記意図した形状は自由面であり、回転対称な非球面の各々から5 μ mより大きい、特に10 μ mより大きい偏差を有する。

【0058】

一例として、上記光学素子はEUVミラーとして具体化することができる。特に、意図した形状に最も良く合う回転対称の非球面からの、意図した形状の偏差は、5 μ mより大きく、特に10 μ mより大きい。好適例によれば、上記光学面が1000mmより大きい直径を有することができ、すべての振動が1mm~50mmの振動波長に関係することができる。

40

【0059】

本発明による他の好適例によれば、上記意図した形状が、あらゆる球面から少なくとも1mmの偏差を有する。その結果、上記光学面は、大型または強度のある自由面になる。

【0060】

他の好適例によれば、上記意図した形状からの実際形状の偏差が、上記光学面上のあらゆる点における、意図した形状からの実際形状の偏差の最大振幅によって定義される。

50

【0061】

本発明による好適例の、上述した特徴及び他の特徴は共に、特許請求の範囲及び図面の説明において説明する。これら個別の特徴は、単独でも組合せでも、本発明の実施形態として実現することができる。さらに、これらの特徴は、独立して保護可能である有利な好適例を記述することができ、適切であれば、本願の係属中または係属後のみに、それらの保護を特許請求する。

【0062】

以下の本発明による好適な実施形態の詳細な説明では、本発明の上記及び他の有利な特徴を、添付した概略的な図面を参照しながら説明する。

【図面の簡単な説明】

10

【0063】

【図1】回折光学素子を有する干渉計測システムの断面図である。

【図2】第1実施形態において、回折光学素子で入力波を回折させることによって発生する出力波を、図1による断面図中に示す図である。

【図3】図2の出力波を方位空間内に示す図である。

【図4】図2による出力波のうち2つの、波動ベクトルどうしの角度関係を示す図である。

【図5】図2による、回折光学素子の回折構造パターンの組成を示す図である。

【図6】球形波面を有する出力波のうち1つを用いた、回折光学素子の較正を示す図である。

20

【図7】平面出力波を用いた、回折光学素子の他の較正を示す図である。

【図8】回折光学素子の他の実施形態で入力波を回折させることによって発生する出力波を、図1による断面図中に示す図である。

【図9】図8の出力波を方位空間内に示す図である。

【図10】図8による、回折光学素子の回折構造パターンの組成を示す図である。

【図11】図1による干渉計測システムにおいて、図9による回折光学素子を用いた際の回折効率及びコントラストを示す図である。

【図12】図8による回折光学素子の位相格子の一部分のサイズ比を、回折光学素子全体に対して示す図である。

【図13】図8の位相格子の格子線の波状形状を示す図である。

30

【図14】図13の位相格子の格子線のうち1つを示す図である。

【図15】回折光学素子の他の実施形態において、回折を用いて発生した出力波を方位空間内に示す図である。

【図16】回折光学素子の他の実施形態において、回折を用いて発生した出力波を方位空間内に示す図である。

【図17】本発明による他の実施形態において、多レベル位相格子として具体化した回折光学素子の回折構造パターンを示す図である。

【図18】本発明により製造した光学素子の上面図である。

【図19】図18の光学素子の断面図である。

【発明を実施するための形態】

40

【0064】

本発明による好適な実施形態の詳細な説明

以下に説明する好適な実施形態では、機能的または構造的に互いに類似した要素には、できる限り同一または同様の符号を与える。従って、特定の好適な実施形態の個別要素の特徴を理解するためには、他の好適な実施形態、あるいは本発明の概要を参照すべきである。

【0065】

説明を促進するために、図面中にはデカルト x y z 座標系を示し、この座標系は、図面中に示す構成要素のそれぞれの位置関係を明らかにする。図1では、 x 方向は、図面の平面に対して垂直に、図面に入るように延び、 y 方向は上向きに延び、そして z 方向は右に

50

向かって延びる。

【0066】

図1は、本発明による一実施形態における干渉計測システムを示す。干渉計測システム10は、光学素子14の形態の試験物体の光学面12の実際形状の、意図した形状からの偏差を測定するのに適している。例として、光学素子14は、光学レンズ素子またはミラーの形態で具体化することができる。図示する場合には、光学素子14がEUVリソグラフィ用の凹面鏡であり、即ち、マイクロリソグラフィ投影露光装置において、EUV波長範囲内の露光波長で設計されている。EUV波長範囲は、100nm未満の波長に及び、特に、約13.5nm及び/または約6.8nmの波長に関する。光学素子14は、図面中には図示しないホルダを用いて、計測システム10内に組み立てられる。発明の概要においてより詳細に説明したように、光学面12の意図した非球面の形状は、回転対称の非球面、あるいは自由面の形状を有することができる。

10

【0067】

干渉計測システム10は、干渉計16を具え、干渉計16は、光源18、ビームスプリッタ34、及び干渉計カメラ45を具えている。光源18は、照射20を発生し、この目的で、ヘリウムネオンレーザーのようなレーザー21を具えて、レーザービーム22を発生する。照射20は、干渉計測を実行するのに十分なコヒーレント光を発生する。ヘリウムネオンレーザーの場合、照射20の波長は約633nmである。しかし、照射20の波長は、電磁放射の可視及非可視の波長範囲内で異なる波長を有することもできる。

【0068】

20

レーザービーム22は、フォーカスレンズ素子24によって、コヒーレント光の発散ビームが開口から出るように、絞り26上に焦点を結ぶ。発散ビーム28の波面はほぼ球面である。発散ビーム28は、レンズ素子群30によってコリメート(視準合わせ)され、その結果、本実施形態の場合、ほぼ平面の波面によって照射20が発生する。照射20は、干渉計16の光軸に沿って伝搬して、ビームスプリッタ34を通過する。

【0069】

その直後に、照射20は、フィゾー(Fizeau)領域38を有するフィゾー素子36上に入射する。照射20の一部は、フィゾー領域38で反射して反射波40になる。フィゾー素子36を通過した照射20の光は、平面の波面44を有する入力波42として、光軸32に沿って伝搬して、回折光学素子50に入射する。計測システム10の他の実施形態では、入力波42の波面を球面にすることもできる。

30

【0070】

照射20の波長に関連して、回折光学素子50は、透過基板52、及び基板52上に配置された、コンピュータ発生ホログラム(CHG)の形態の回折構造パターン54を具えている。

【0071】

第1実施形態では、図2に示すように、構造パターン54は、入力波42が、構造パターン54における回折によって、非球面出力波56、球面出力波58、及び平面出力波60に変換されるように構成されている。以下で明らかにするように、この球面出力波及び平面出力波60は、較正波として機能する。

40

【0072】

出力波56は、図1にもプロットし、光学素子14の光学面12の実際形状を測定するための測定波として機能する。この目的のために、出力波56は、光学面12の意図した形状に適合する波面を有する。従って、出力波56は適合測定波とも称する。上述したように、出力波56は非球面であり、従って、回転対称の非球形波面、あるいは自由形状面の形態の波面を有する。明細書の概要部分で既に説明したように、本願における意味での自由形状面は回転対称でない。

【0073】

図4に、入力波42の波動ベクトル $k_i(in)$ 、球面出力波58の波動ベクトル $k_i(S)$ 、

50

及び非球面出力波 5 6 の波動ベクトル $k_i(A)$ を、回折構造パターン 5 4 上の空間座標 $i(x, y)$ において、2 つの断面図で示し、その 1 つの (a) では yz 断面内に示し、(b) では xy 断面内に示す。ここで、回折構造パターン 5 4 は xy 平面内に配置されている。差分ベクトル $[k_i(A) - k_i(in)]$ と差分ベクトル $[k_i(S) - k_i(in)]$ との間の角度を、角度 θ_i と称する。(a) にプロットした角度 θ_i^{xz} は、 θ_i の xz 平面上への射影であり、(b) にプロットした角度 θ_i^{xy} は、 θ_i の xy 平面上への射影である。

【0074】

角度 θ_i^{xy} 、即ち xy 平面上に射影した角度 θ_i の絶対値の、回折構造パターン 5 4 の空間座標 $i(x, y)$ 全体にわたる平均値を、角度 θ と称する。一実施形態によれば、角度 θ が 5° より大きい。従って、次式が適用される：

【数 3】

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \angle_{xy} [(k_i(A) - k_i(in)), (k_i(S) - k_i(in))] \right| > 5^\circ$$

【0075】

ここで、 N は、平均値を求める点 i の数を表す。他の実施形態によれば、 θ が 10° より大きいか、 15° より大きい。

【0076】

図 5 に示すように、図 2 による構造パターン 5 4 は、複合符号化位相格子 f_G を具え、複合符号化位相格子 f_G は、種々の位相関数 f_1 から f_4 を含んで、種々の位相関数 $f_1 \sim f_4$ の個別のもの毎に、それぞれの回折波が発生する。図 5 に示す例示は、関数 $f_1 \sim f_4$ の輪郭線を示す。これらの位相関数の輪郭線が、それぞれの回折格子の格子線に相当する。図 5 に示す f_G の例示は、図 2 による構造パターン 5 4 を大きく拡大した部分を示す。換言すれば、複合符号化位相格子 f_G は、位相関数 $f_1 \sim f_4$ によって規定される回折格子の各々によって、1 次の回折次数の互いに独立した対応する回折波が発生する効果を、入力波 4 2 に対して有する。この複合符号化位相格子 f_G は、個別の位相関数 $f_1 \sim f_4$ が一点に重なったいくつかの CGH であるものと想像することができる。こうした関数の重ね合わせは、演算 $S = W_1 \times \exp(i \times f_1) + W_2 \times \exp(i \times f_2) + W_3 \times \exp(i \times f_3) + W_4 \times \exp(i \times f_4)$ に相当する。個別の寄与分の強さは、重み $W_1 \sim W_4$ によって設定される。 i は虚数単位である。本発明による一実施形態によれば、バイナリ位相格子、即ち $f_G = 0$ または π を用いて、複合符号化位相格子 f_G を実現する。

【0077】

上記バイナリ位相格子には、次式が当てはまる： $\text{Re}\{S\} > 0$ ならば $f_G = \pi$ であり、さもなければ $f_G = 0$ である。本発明の他の実施形態によれば、連続位相格子を用いて、複合符号化位相格子 f_G を実現する。この場合、次式が当てはまる：

【数 4】

$$f_G = \exp(i \angle \{S\})$$

個別の位相関数 f_1 、 f_2 、 f_3 及び f_4 の回折効率は異なる大きさを有し；本実施形態では、位相関数 f_1 及び f_2 の各々が、35% の重み W_1 または W_2 付きで含まれ、位相関数 f_3 及び f_4 の各々が、15% の重み W_3 または W_4 付きで含まれる。

【0078】

図 5 による位相格子 f_G の位相関数 f_1 は、非球面出力波 5 6 を発生する。位相格子 f_G の位相関数 f_2 は、球面出力波 5 8 を発生する。位相関数 f_1 及び f_2 に対応する格子周期は、図 2 による回折構造パターン 5 4 全体にわたって空間的に変化する。

【0079】

位相格子 f_G の他の位相関数 f_3 及び f_4 は、位相波 (P) を発生するための直線格子であり、それぞれ +1 次及び -1 次の回折次数である。従って、位相関数 f_3 は、入力波 4

10

20

30

40

50

2 に対して + / - y 方向に偏向された平面出力波を発生するための y 直線格子として構成される。図 2 にプロットした平面出力波 60_y^{+1} 及び 60_y^{-1} は、+ 1 次及び - 1 次の回折次数の y 直線格子によって発生した波動である。位相関数 f_4 によって形成される x 直線格子によって発生する平面出力波 60_x^{+1} 及び 60_x^{-1} は、図 2 において選択した断面に起因して図 2 では見ることができないが、その代わりに図 3 に示す。

【 0 0 8 0 】

図 3 に、上記出力波を、図 2 による回折構造パターン 5 4 の中心によって生成される有向空間内に示す。有向空間内の x 及び y 座標は、伝搬方向のベクトルの x 及び y 座標であり、1 に正規化されている。次式が当てはまる： $-1 < x < 1$ 、 $-1 < y < 1$ 、かつ $x^2 + y^2 < 1$ 。

10

【 0 0 8 1 】

出力波 60_y^{+1} 及び 60_y^{-1} は、非球面出力波 5 6 に対して + y 及び - y 方向にオフセットし、出力波 60_x^{+1} 及び 60_x^{-1} は、非球面出力波 5 6 に対して - y 方向及び + x または - x 方向にオフセットしている。出力波 60_x^{+1} 及び 60_x^{-1} は同様な平面波であり、+ 1 次及び - 1 次の回折次数の x 直線格子として構成された位相関数 f_4 によって発生する。球面出力波 5 8 の伝搬方向は、非球面出力波 5 6 の伝搬方向に比べて、+ x 及び + y 方向に傾斜している。

【 0 0 8 2 】

図 1 に示すように、非球面出力波 5 6 のビーム経路中に配置された光学素子 1 4 を測定する前に、計測システム 1 0 を最初に較正モードで動作させる。このモードでは、最初に

20

、光学素子 1 4 の代わりに較正球面 6 2 を、回折光学素子 5 0 に対して出力波側に配置し、正確には、図 6 に示すように球面出力波 5 8 のビーム経路中に配置する。

【 0 0 8 3 】

球面出力波 5 8 は較正球面 6 2 に入射し、較正球面 6 2 の形状は事前に明確に決定されている。この明確な決定は、例えば、当業者に知られているシアリング（せん断）技術を用いるか、同様の既知の三点試験を用いて行うことができる。

【 0 0 8 4 】

較正球面 6 2 における反射後に、球面出力波 5 8 は回折光学素子 5 0 を通過し、干渉計カメラ 4 5 のレンズ系 4 6 によって、干渉計カメラ 4 5 のカメラチップ 4 8 の検出領域 4 7 上に指向される。参照波 4 0 との重ね合わせによって、干渉パターンが検出領域 4 7 上に発生し、この干渉パターンから、球面出力波 5 8 の、意図した理想的な球面波の形の波面からの偏差が、評価装置 4 9 を用いて測定される。従って、出力波 5 8 の実際波面は、較正球面 6 2 を用いて明確に測定される。球面出力波 5 8 の、意図した波面からの偏差は、較正偏差 K 1 として記憶される。

30

【 0 0 8 5 】

その直後に、上記較正球面を、回折光学素子 5 0 の出力波側ビーム経路から再び除去して、その代わりに、図 7 に示すように、平面鏡 6 4 を、平面出力波 60_y^{+1} 、 60_y^{-1} 、 60_x^{+1} 、及び 60_x^{-1} のそれぞれのビーム経路中に順次配置し、出力波 60_y^{+1} については図 7 の (a) に、出力波 60_y^{-1} については (b) に示す。各場合において、平面鏡 6 4 は、適切な出力波 60_y^{+1} 、 60_y^{-1} 、 60_x^{+1} または 60_x^{-1} が当該平面鏡上で反射して、入力波

40

4 2 のビーム経路中の回折光学素子 5 0 を通過した後に、計測システム 1 0 の干渉計 1 6 に戻り、カメラチップ 4 8 の検出領域 4 7 上で参照波 4 0 と干渉するように配置されている。

【 0 0 8 6 】

カメラチップ 4 8 は、2 つの出力波 60_y^{+1} 及び 60_y^{-1} 毎に、それぞれの干渉パターンを記録する。以上に説明したように、2 つの出力波 60_y^{+1} 及び 60_y^{-1} は、位相関数 f_3 によって形成される y 直線格子における + 1 次及び - 1 次の回折によって発生する。2 つの出力波 60_y^{+1} と 60_y^{-1} を評価装置 4 9 内で互いに組み合わせて、その結果、位相関数 f_3 の歪みの x 座標が、回折光学素子 5 0 上の回折構造パターン 5 4 の領域全体にわたって確立される。一実施形態によれば、この場合に、これら 2 つの干渉パターンの差を求め

50

る。

【 0 0 8 7 】

2つの出力波 60_x^{+1} 及び 60_x^{-1} についても、同じ評価が生じる。その結果、回折構造パターン54の領域全体にわたる位相関数 f_4 の歪みの y 座標が、回折光学素子50上に確立される。その直後に、こうして得られた歪みの座標から、回折構造パターン54全体の歪みの x 座標及び y 座標を推定する。この歪みベクトル場を、追加的な較正偏差 K_2 として記憶して、球面出力波58及び非球面出力波56を補正するために役立てる。

【 0 0 8 8 】

さらに、出力波 60_y^{+1} と 60_y^{-1} 、及び出力波 60_x^{+1} と 60_x^{-1} 、及び球面出力波58の干渉パターンを、例えば合計することによって互いに組み合わせることができ、従って、この組合せを用いて回折光学素子50の、回折構造パターン54を有する基板表面の形状または外形の偏差を確立することができるようにする。このように確立した形状及び外形の偏差は、追加的な較正偏差 K_2 として記憶することもできる。

【 0 0 8 9 】

最後に、光学素子14の光学面12を、計測システム10を用いて測定する。この目的のために、光学素子14の形態の試験物体を、図1に示すように、非球面出力波56のビーム経路中に配置して、非球面出力波56が、オートコリメート（自動視準化）状態で光学面12上に入射して、この光学面上で反射するようにする。直後に、この反射波は、回折光学素子50を通して、戻り測定波66として干渉計16に戻る。戻り測定波66は、検出面47上で参照波40と干渉し、これによりインターフェログラムが発生する。このインターフェログラムを、評価装置49を用いて評価し、この評価を用いて、光学面12の実際形状の、意図した形状からの偏差を確立する。この評価中には、以前に確立したすべての較正偏差を考慮に入れる。

【 0 0 9 0 】

較正偏差 K_1 及び K_2 を用いて、上記方法は、基板50の基板誤差、及び回折構造パターン54の歪みの結果としての誤差を除外することを可能にする。さらに、較正偏差 K_3 を用いて、上記方法は、回折構造パターン54の形状または外形の歪みの誤差を低減することを可能にする。

【 0 0 9 1 】

図8～12に、図1の計測システム10内で使用される回折光学素子50の他の実施形態を示す。図8に示すように、回折光学素子50の回折構造パターン54は、構造パターン54における回折によって、入力波42が、非球面出力波56に加えて、さらに3つの球面出力波70、72及び74に変換されるように構成され、これらの出力波も、図2の回折構造パターンによって発生する。

【 0 0 9 2 】

図9に、出力波56、70、72及び74を有向空間内に示す。こうした照射から、球面出力波70、72及び74が非球面出力波56の周りに配置されるものと推論することができる。ここでは、球面出力波70、72及び74が三角形を形成する。非球面出力波56の方向ベクトルが、この三角形内に存在することが有利である。

【 0 0 9 3 】

図10に、図8による構造パターン54の複合符号化位相格子 f_G の組成を示す。図5のように、位相格子 f_G の図10に表示する部分は、対応する構造パターン54を大きく拡大した部分である。図示するものはすべて、 $50\ \mu\text{m}$ のエッジ長を有する正方形部分である。図12に示すように、一実施形態による回折光学素子50は、 $500\ \text{mm}$ のエッジ長を有する正方形基板52上に配置されている。この実施形態では、回折構造パターン54が円形であり、基板52の大半をカバーする。

【 0 0 9 4 】

図10に示すように、図8による構造パターン54の複合符号化位相格子 f_G は、個別の関数 $f_1 \sim f_4$ を含む。入力波42が回折光学素子50上に放射されると、個々の位相関数 $f_1 \sim f_4$ 毎に、適切な回折によって別個の出力波が発生する。

【 0 0 9 5 】

非球面出力波 5 6 の波面は、測定される光学素子 1 4 の光学面 1 2 の意図した形状に適合し、非球面出力波 5 6 は位相関数 f_1 において発生する。非球面出力波 5 6 は測定波として機能する。非球面出力波 7 0 は位相関数 f_2 において発生し、球面出力波 7 2 は位相関数 f_3 において発生し、球面出力波 7 4 は位相関数 f_4 において発生する。40%の重みにより、位相関数 f_1 は残りの位相関数 $f_2 \sim f_4$ の2倍の強さに重み付けされ、 $f_2 \sim f_4$ の各々の重みは20%である。3つの球面出力波 7 0、7 2、及び7 4も較正波と称することができる。

【 0 0 9 6 】

適切な図面では、図 1 1 に、第 1 に、図 8 による回折光学素子 5 0 の、単一回の通過中の回折効率 E を示し、第 2 に、回折光学素子 5 0 を 2 回通過する間の、干渉計測システムのカメラチップ 4 8 によって記録された干渉パターンのコントラスト C を、第 1 に、非球面出力波 5 6 (FF) について、第 2 に、球面出力波 7 0、7 2 及び 7 4 (SP1、SP2 及び SP3) について示す。これらの図では、対応する回折効率またはコントラストを、非球面出力波 5 6 (FF) を発生する位相関数 f_1 の重みに応じてプロットしている。これらの図は、フィゾー素子 3 6 が 0.4% を反射し、非球面領域の光学面 1 2 が 4% を反射し、球面出力波 7 0、7 2 及び 7 4 の各々に適合した較正球面の光学面が 80% を反射する実施形態に関するものである。これらの図より、図 1 0 による f_1 の重み 40% の場合、このことが、単一回の通過において、25% よりわずかに小さい回折効率を生じさせつつ、コントラストは 90% をわずかに超えることが明らかになる。従って、球面出力波 7 0、7 2 及び 7 4 のコントラストは、ほぼ 85% になる。

【 0 0 9 7 】

図 2 による回折光学素子 5 0 を用いた光学素子 1 4 の光学面 1 2 の測定と同様に、図 8 による回折光学素子 5 0 を用いる際に、計測システム 1 0 は最初に較正モードで動作する。この目的のために、球面出力波 7 0、7 2 及び 7 4 に適合した較正球面を、出力波 7 0、7 2 及び 7 4 のそれぞれのビーム経路中に対応する順に配置し、各々の出力波を干渉計測法によって測定する。この干渉計測の結果を、球面出力波 7 0、7 2 及び 7 4 毎の較正測定データとして評価装置 4 9 内に記憶する。

【 0 0 9 8 】

これに続く、非球面出力波 5 6 を用いた、光学素子 1 4 の形態の試験物体の光学面 1 2 の測定では、これにより得られた測定データを、評価装置 4 9 によって、記憶している較正測定データを考慮に入れて評価する。球面出力波 7 0、7 2 及び 7 4 の測定中に得られた較正測定データを考慮に入れているので、光学面 1 2 の測定結果において、回折光学素子 5 0 の製造誤差を補正することができ、その結果、光学面 1 2 の形状を高精度で測定することができる。ここで補正することができる製造誤差は、回折構造パターン 5 4 を有する回折光学素子 5 0 の基板表面の形状または外形の偏差、及び回折構造パターン 5 4 における歪み効果を含む。

【 0 0 9 9 】

従って、回折構造パターン 5 4 の歪み誤差の明示的な測定を省略することができる。3つの球面波を用いた光学面 1 2 の形状測定値を構成する選択肢は、より良好な誤差量を達成することを可能にする。特に、このことは、回折構造パターン 5 4 の形状または外形の偏差が、球面出力波 7 0、7 2 及び 7 4 及び非球面出力波 5 6 において、非常に類似した偏差を生成することに起因する。従って、これらの形状または外形の偏差は、その大部分を補正することができる。

【 0 1 0 0 】

図 8 による実施形態では、回折構造パターン 5 4 によって形成される回折格子は、1mmのエッジ長を有する回折格子の正方形の測定領域内で、50 μm のエッジ長を有する任意の正方形の部分領域にわたって平均した格子線のストライプ密度が、1ミリメートル当たり 20 ライン未満の幅に及ぶ変化を有するように構成されている。

【 0 1 0 1 】

10

20

30

40

50

一例として、以下で図12を参照して説明するように、格子線のストライプ密度の変化を確立することができる。回折構造パターン54は、回折光学素子50の基板52上に配置され、一実施形態によれば、回折構造パターン54が、約500mmの直径を有する円形形状を有して、各々が1mmの辺長を有する個別の正方形領域MFに再分割される。さらに、測定領域MFは、それぞれが50 μ mの辺長を有する個々の正方形部分領域TFに再分割される。

【0102】

正方形部分領域TF内では、各格子線GLに沿った測定点iにおいて、それぞれの周期距離 d_i が確立され、これらの測定点の各々は1 μ mだけ分離されている。周期距離 d_i は、測定点iにおける格子線GLの幅と、一辺が隣の格子線に隣接する、隣の格子線までの空間の幅との合計より生じる。その逆数を求めることによって、測定した周期距離 d_i をストライプ密度値 D_i に変換する。こうして得られたストライプ密度 D_i の値を、関係する部分領域TF内のすべての格子線GLのすべての測定点iにわたって平均する。

10

【0103】

このことは、正方形の測定領域MF内のすべての部分領域TFについて行い、即ち、400個の部分領域について行う。従って、測定領域MF内のすべての部分領域TFについて、平均ストライプ密度 D_M が測定される。上記の仕様によれば、個々の部分領域TFについての、平均ストライプ密度 D_M の変化は、1ミリメートル当たり20ライン未満の幅を有する。その結果、測定領域MF内の種々の部分領域TFについて確立した平均ストライプ密度 D_M は、1ミリメートル当たり20線対未満だけ変化する。一例として、すべての部分領域TFにわたる平均ストライプ密度 D_M が1ミリメートル当たり200ラインであれば、上述した仕様によれば、このストライプ密度は、最大でも1ミリメートル当たり190~210ラインの範囲内で変化する。

20

【0104】

図13及び14に、図8による実施形態における回折構造パターン54の他の特性を示す。ここで、図13は、回折構造パターン54によって形成される回折格子の、50 μ mの辺長を有する正方形部分を示し、図14は、図13からの、格子線GLのうち1本が含まれる部分Aを示す。

【0105】

図13に示す回折格子は、平均周期距離pを有し、平均周期距離pは、隣接する格子線GL間の中心間距離の各々を、回折格子全体にわたって平均することによって定まる。図12を参照して上述したように確立した周期距離 d_i を平均することによって、平均周期距離を測定することもできる。

30

【0106】

格子線GLは波状の形態を有し、より正確には、格子線の波状の平均周期が、回折格子の平均周期距離の3倍~20倍の領域内に入るようにする。さらに、格子線GLは、それらの長手方向を横切る方向に、幅にわたる変化を有し、幅は、回折格子の平均周期距離pの0.1倍~3倍の領域内に入る。

【0107】

図14に示すように、幅は、対応する格子線GLのエッジ境界を直線の境界線76によって近似し、波状のピーク及び波状の谷における当該格子線GLの偏位を、対応する近似境界線76に対して測定することによって測定することもできる。これらの偏位の合計、即ち、波状のピークにおける偏位1と波状の谷における偏位2との合計が、変化の幅になる。しかし、幅は、補助直線78を、一方の側から、この格子線に隣接するまで、この格子線に向かって押すことによって測定することもできる。同様に、格子線GLのエッジ境界と補助直線78との間の最大距離が、幅に相当する。

40

【0108】

図15及び16に、回折ストライプパターン54の他の実施形態によって発生する出力波の描写を、有向空間内に示す。両実施形態では、中央に配置され、測定波として機能する非球面出力波56に加えて、較正波として機能するさらに4つの別個の出力波70、7

50

2、74及び80が、入力波42から、ストライプパターン54における回折によって発生する。ここで、球面出力波70、72、74及び80は、非球面出力波の周りに対称に存在しないように配置され、即ち、有向空間内に図示する平面内で、それぞれの点を非球面出力波56に対して鏡像化することによって規定される、それぞれの反対「空間」が自由なままである。換言すれば、球面出力波70、72、74及び80のそれぞれの平均伝搬方向を2つずつ対にした各々が、非球面出力波56の平均伝搬方向によって規定される軸線に対して対称に配置されない。

【0109】

図15による実施形態では、球面出力波80及び70が、有向空間内に図示する平面内で、非球面出力波56の伝搬方向を横切る向きに配置された対称軸について、球面出力波72及び74と対称に配置される。図16による実施形態では、こうした対称性は失われているが、球面出力波70及び74、並びに72及び76の各々が、有向空間内に図示する平面内で、非球面出力波56を通して延びる直線上に配置されている。

10

【0110】

4つの球面出力波の使用は、3つの球面出力波のみの使用に比べて、光学素子14の光学面12の形状測定値の較正中に、追加的な自由度に起因する格子欠陥に対する感度を最小にする構成を見出すことを可能にする。

【0111】

上述した実施形態の1つにおける回折光学素子50の一変形例によれば、図17に示すように、回折構造パターン54が、図10の位相パターン f_G の例を用いた多レベル位相格子として具体化される。当業者が良く知っているように、多レベル位相格子とは、最高レベルと最低レベルとの間に少なくとも1つの中間レベルを有する位相格子を意味するものと理解すべきである。従って、こうした位相格子は少なくとも3つのレベルを有し、図17に示す実施形態では4つのレベルが設けられている。多レベル位相格子の使用は、複合符号化によって生じる回折効率の損失を部分的に補償するか、さらには過度に補償することを可能にする。

20

【0112】

図18及び19に、本発明により製造される光学素子14の実施形態を、レンズ素子またはミラーの形態で、特にEUV投影露光装置用のミラーの形態で示す。光学素子14は、自由形状面として形成された光学面12を有する。製造中に、光学素子14の光学面12は、最初に、意図した自由形状面の形態の所定形状を、製造精度に応じて近似するように作製する。直後に、近似面12を、本発明による実施形態の1つにおける回折光学素子50を用いた干渉計測システム10を用いて測定し、従って、この表面の、意図した形状からの偏差を高精度で測定する。測定結果に基づいて、表面12が以下に指定する仕様を有するように、この表面の適切な点をさらに処理する。

30

【0113】

光学素子14を上面図で示す図18では、略円形である光学面12の直径 d を識別することができる。図示する実施形態では、直径 d が約600mmである。図19に、光学素子14の軸80に沿った、この光学素子の概略断面図を示す。軸80は、の光学面12の意図した形状84に最も良く合う回転対称の非球面82の回転軸であり、図面中では z 方向に配置されている。既に上述したように、意図した形状84は、自由形状面の形態を有し、従って回転対称ではない。図19に示す光学面12の、意図した形状84からの偏差を大きな倍率で示し、例示目的で概略的に示す。

40

【0114】

本実施形態では、意図した形状84の、最も良く合う回転対称な非球面からの最大偏差が約6 μ mであり、従って5 μ mより大きい。光学面12の実際形状の、意図した形状84からの偏差は、2次元偏差 $D(x, y)$ によって記述され、ここに、 x 及び y は光学面12上の座標を表す。偏差 $D(x, y)$ は、 $d/100$ 、即ち約5mm $\sim d/5$ 、即ち約100mmの振動波長を有する振動に由来し、最大でも0.05nmである。

【0115】

50

偏差 $D(x, y)$ を、フーリエ変換を用いて実空間から周波数空間に変換すれば、関数 $d(v)$ が得られ、ここに v は周波数を表す。従って、上記に指定した振動波長の境界値に相当する周波数間の領域内では、関数 $d(v)$ の振幅は最大でも 0.05 nm である。

【符号の説明】

【0116】

参照符号のリスト

10	干渉計測システム	
12	光学面	
14	光学素子	
16	干渉計	10
18	光源	
20	照明放射	
21	レーザー	
22	レーザービーム	
24	フォーカスレンズ	
26	止め具	
28	発散ビーム	
30	レンズ素子グループ	
32	光軸	
34	ビームスプリッタ	20
36	フィゾー素子	
38	フィゾー領域	
40	参照波	
42	入力波	
44	平面波面	
45	干渉計カメラ	
46	レンズ系	
47	検出領域	
48	カメラチップ	
49	評価装置	30
50	回折光学素子	
52	基板	
54	回折構造パターン	
56	非球面出力波	
58	球面出力波	
60 _x ⁺¹	平面出力波	
60 _x ⁻¹	平面出力波	
60 _y ⁺¹	平面出力波	
60 _y ⁻¹	平面出力波	
62	較正球	40
64	平面鏡	
66	戻り測定波	
70	球面出力波	
72	球面出力波	
74	球面出力波	
76	近似境界直線	
80	回転軸	
82	最も良く合う回転対称非球面	
84	意図した形状	

【 図 1 】

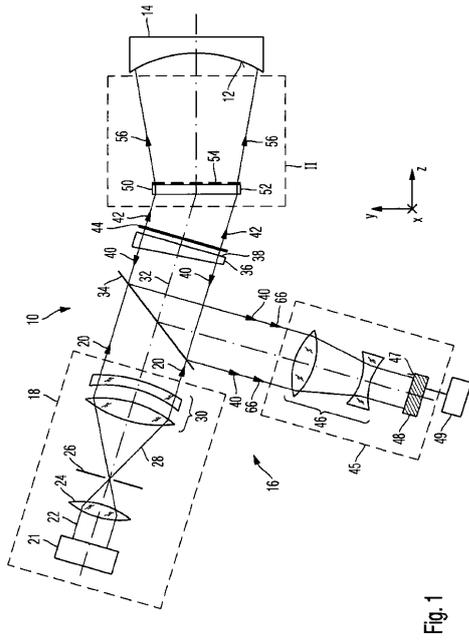


Fig. 1

【 図 2 】

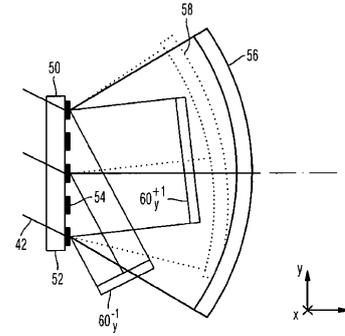


Fig. 2

【 図 3 】

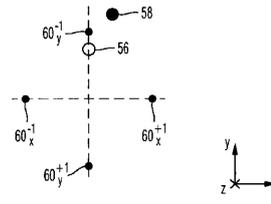
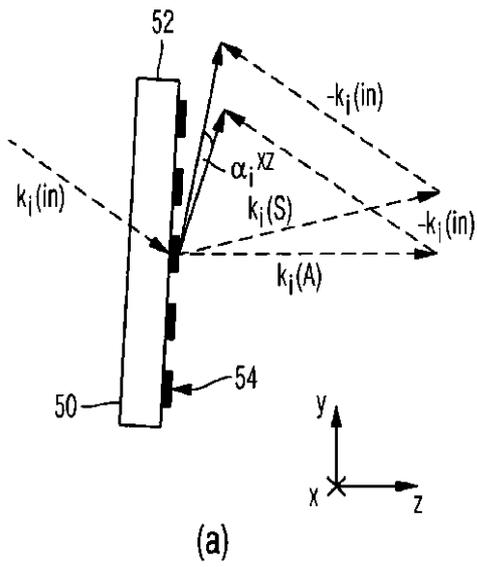


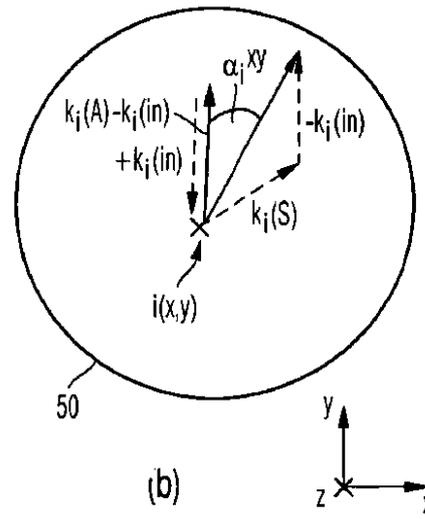
Fig. 3

【 図 4 (a) 】



(a)

【 図 4 (b) 】



(b)

【 図 5 】

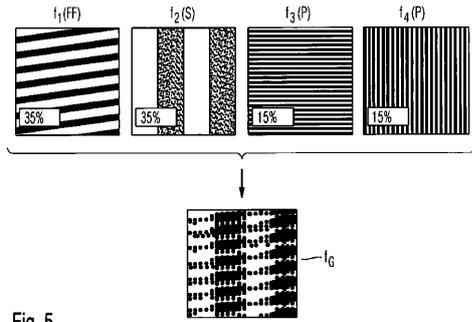


Fig. 5

【 図 6 】

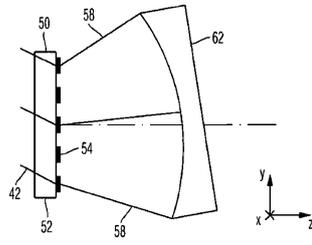


Fig. 6

【 図 7 】

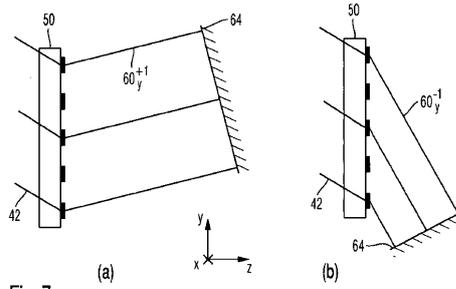


Fig. 7

【 図 8 】

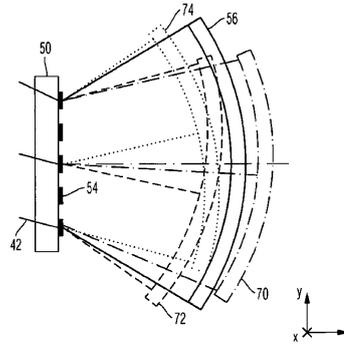


Fig. 8

【 図 9 】

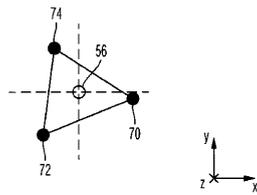


Fig. 9

【 図 1 1 】

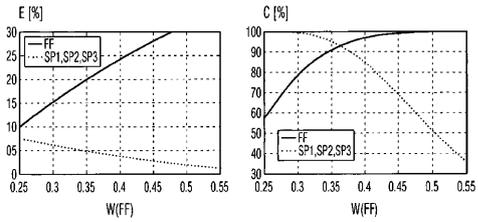


Fig. 11

【 図 1 0 】

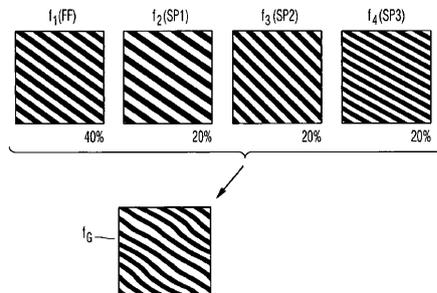


Fig. 10

【 1 2 】

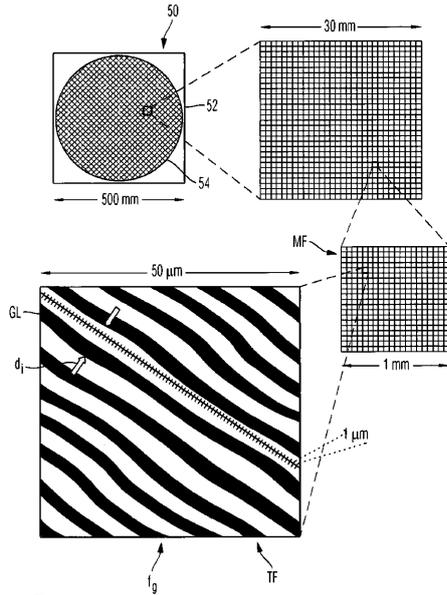


Fig. 12

【 1 3 】

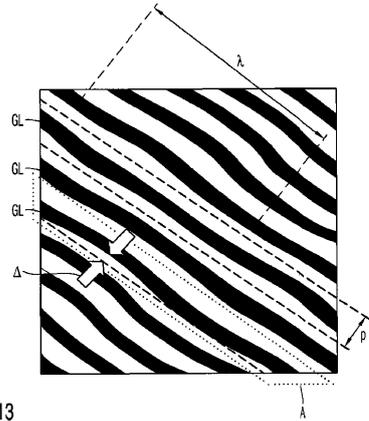


Fig. 13

【 1 4 】

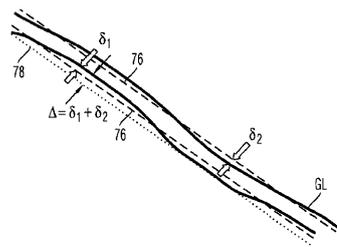


Fig. 14

【 1 5 】

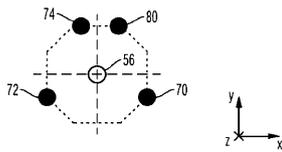


Fig. 15

【 1 8 】

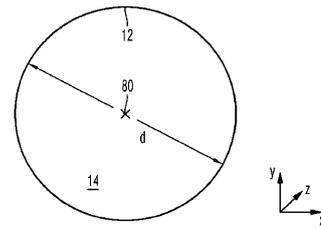


Fig. 18

【 1 6 】

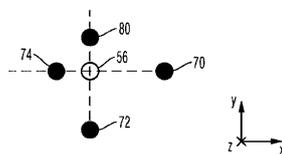


Fig. 16

【 1 9 】

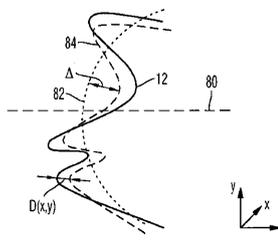


Fig. 19

【 1 7 】

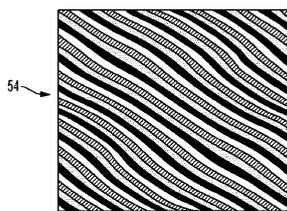


Fig. 17

フロントページの続き

審査官 小野寺 麻美子

(56)参考文献 特表2009-544953(JP,A)
特表2004-534245(JP,A)
特開平09-033228(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 0 1 M	1 1 / 0 0			
G 0 1 B	9 / 0 0	-	G 0 1 B	9 / 1 0
G 0 1 B	1 1 / 2 4			
G 0 2 B	5 / 1 8			