

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4207389号
(P4207389)

(45) 発行日 平成21年1月14日 (2009. 1. 14)

(24) 登録日 平成20年10月31日 (2008. 10. 31)

(51) Int. Cl.	F I
H O 1 L 21/027 (2006. 01)	H O 1 L 21/30 5 1 5 D
G O 2 B 13/24 (2006. 01)	G O 2 B 13/24
G O 3 F 7/20 (2006. 01)	G O 3 F 7/20 5 0 2

請求項の数 18 (全 33 頁)

(21) 出願番号	特願2000-592870 (P2000-592870)	(73) 特許権者	000004112
(86) (22) 出願日	平成12年1月6日 (2000. 1. 6)		株式会社ニコン
(86) 国際出願番号	PCT/JP2000/000027		東京都千代田区丸の内3丁目2番3号
(87) 国際公開番号	W02000/041226	(74) 代理人	100088155
(87) 国際公開日	平成12年7月13日 (2000. 7. 13)		弁理士 長谷川 芳樹
審査請求日	平成18年3月20日 (2006. 3. 20)	(74) 代理人	100089978
(31) 優先権主張番号	特願平11-1416		弁理士 塩田 辰也
(32) 優先日	平成11年1月6日 (1999. 1. 6)	(74) 代理人	100092657
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		弁理士 寺崎 史朗
		(74) 代理人	100107191
			弁理士 長濱 範明
		(72) 発明者	平岩 弘之
			東京都千代田区丸の内三丁目2番3号富士ビル 株式会社ニコン知的財産部内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 投影光学系、その製造方法、及びそれを用いた投影露光装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

少なくとも2つの石英ガラス光学部材を有する投影光学系において、
前記各光学部材の光軸との交点を中心とする光軸に垂直な面内の複数の箇所の複屈折値を測定し、該複数の複屈折値とその進相軸の向きに基づいて符号付複屈折値の分布を求め、該符号付複屈折値の分布に基づき算出される前記投影光学系全体の符号付複屈折特性値が $-0.5 \sim +0.5 \text{ nm/cm}$ となる配置条件を満たすように前記光学部材が互いに組み合わせられている前記投影光学系。

【請求項 2】

前記光学部材が、前記投影光学系全体の実効光路に基づく前記符号付複屈折値のストレーラ (Strehl) 値が 0.93 以上となる配置条件を更に満たすように互いに組み合わせられている請求項 1 に記載の投影光学系。

【請求項 3】

前記光学部材の光軸に垂直な面内の前記中心周辺の前記符号付複屈折値が $-0.2 \sim +0.2 \text{ nm/cm}$ である請求項 1 に記載の投影光学系。

【請求項 4】

前記光学部材の光軸に垂直な面内の前記符号付複屈折値の分布が前記中心周辺以外に極値を持たない請求項 1 に記載の投影光学系。

【請求項 5】

前記光学部材の光軸に垂直な面内の前記符号付複屈折値の最大値と最小値の差が 2.0

10

20

nm/cm以下である請求項1に記載の投影光学系。

【請求項6】

前記光学部材の光軸に垂直な面内の半径方向に対する前記符号付複屈折値の分布の勾配の最大値が、半径方向の幅10mm当たり0.2nm/cm以下である請求項1に記載の投影光学系。

【請求項7】

前記投影光学系全体の符号付複屈折特性値による前記光学部材の配置条件が下記式に基づいて表現される請求項1に記載の投影光学系。

【数1】

$$-0.5 \leq H \leq +0.5 \text{ nm/cm} \quad (1)$$

10

$$H = \frac{\sum_{j=1}^n G_j}{n} \quad (2)$$

$$G_j = \frac{\sum_{i=1}^m E_{ij}}{D} \quad (3)$$

20

$$D = \sum_{i=1}^m T_i \quad (4)$$

$$E_{ij} = B_{ij} \times T_i \quad (5)$$

30

$$B_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^h A_{ijk}}{h} \quad (6)$$

[式(1)～(6)中、

iは、前記投影光学系を構成する前記光学部材Lの番号(i=1, 2, …, m; 2≤m)を示し、

40

jは、前記光学部材Lにおける光軸に垂直な有効断面上に想定される、前記光軸を中心とし且つ該光軸からの半径が互いに相違する同心円Cの番号(j=1, 2, …, n; 1≤n)を示し、

kは、前記同心円Cの円周上にある測定点の番号(k=1, 2, …, h; 1≤h)を示し、

A_{ijk}は、光学部材L_iにおける同心円C_{ij}の円周上にあるk番目の測定点P_{ijk}における前記符号付複屈折値を示し、

B_{ij}は、光学部材L_iにおける同心円C_{ij}の円周上にある測定点の符号付複屈折値の相加平均である平均符号付複屈折値を示し、

50

T_i は、光学部材 L_i の見かけの厚みを示し、
 E_{ij} は、平均符号付複屈折値 B_{ij} と見かけの厚み T_i との積である平均符号付複屈折量を
 示し、
 D は、前記投影光学系全体の見かけの総光路長を示し、
 G_j は、前記投影光学系全体における平均符号付複屈折量 E_{ij} の総和を総光路長 D で除し
 た符号付複屈折値の平均変化量を示し、
 H は、前記投影光学系全体における符号付複屈折値の平均変化量 G_j の総和を同心円の数
 n で除した前記投影光学系全体の符号付複屈折特性値を示す]

【請求項 8】

前記符号付複屈折値のストレール値による前記光学部材の配置条件が下記式に基づいて
 表現される請求項 1 に記載の投影光学系。

10

【数 2】

$$0.93 \leq S \quad (7)$$

$$S = \prod_{i=1}^m S_i \quad (8)$$

$$S_i = 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma^2}{2} + \frac{|X|^2}{4} \right) \quad (9)$$

20

[式 (7) ~ (9) 中、 λ は光源の波長を示し、
 X は、前記投影光学系全体の光線追跡試験により光学部材 L_i について得られる実効光路
 に基づく前記符号付複屈折値の有効半径方向に対する分布から決定される前記符号付複屈
 折値の平均値を示し、
 σ は、前記投影光学系全体の光線追跡試験により光学部材 L_i について得られる実効光路
 に基づいた前記符号付複屈折値の有効半径方向に対する分布から決定される前記符号付複
 屈折値の標準偏差を示し、
 S_i は、前記光学部材 L_i の実効光路に基づいた前記符号付複屈折値のストレール (Strehl
 l) 強度を示し、
 S は、前記光学部材 L_i を全て組み合わせた場合における投影光学系全体の実効光路に基
 づいた前記符号付複屈折値のストレール値を示す]

30

【請求項 9】

露光光源と、パターン原像の形成されたレチクルと、前記露光光源から出力される光を
 前記レチクルに照射する照射光学系と、前記レチクルから出力されるパターン像を感光基
 板上に投影する投影光学系と、前記レチクルと前記感光基板の位置合わせを行うアライメ
 ント系と、を有する投影露光装置であって、
 前記投影光学系として請求項 1 に記載の投影光学系を備える投影露光装置。

40

【請求項 10】

前記露光光源が 250 nm 以下の波長の光を露光光として出射する請求項 9 に記載の投
 影露光装置。

【請求項 11】

少なくとも 2 つの石英ガラス光学部材を有する投影光学系の製造方法であって、
 前記各光学部材の光軸との交点を中心とする光軸に垂直な面内の複数の箇所の複屈折値を
 測定し、該複数の複屈折値とその進相軸の向きに基づいて該光軸に垂直な面内の符号付複
 屈折値の分布を求める工程と、
 前記各光学部材の符号付複屈折値の分布に基づき前記投影光学系全体の符号付複屈折特性

50

値を算出する工程と、
前記投影光学系全体の符号付複屈折特性値が $-0.5 \sim +0.5 \text{ nm/cm}$ となる配置条件を満たすように前記光学部材を互いに組み合わせる工程と、
を有する前記投影光学系の製造方法。

【請求項 1 2】

前記投影光学系の製造方法において、光線追跡試験により前記各光学部材の実効光路に基づいた前記符号付複屈折値の分布を測定する工程と、
前記各光学部材の実効光路に基づいた前記符号付複屈折値の分布から前記投影光学系全体の实効光路に基づいた前記符号付複屈折値のストレール (Strehl) 値を算出する工程と、
該ストレール値が 0.93 以上となる配置条件を満たすように前記光学部材を互いに組み合わせる工程と、
を更に有する請求項 1 1 に記載の投影光学系の製造方法。

10

【請求項 1 3】

前記光学部材として、前記光軸に垂直な面内の前記中心周辺の前記符号付複屈折値が $-0.2 \sim +0.2 \text{ nm/cm}$ である光学部材を使用する請求項 1 1 に記載の投影光学系の製造方法。

【請求項 1 4】

前記光学部材として、前記光軸に垂直な面内の前記符号付複屈折値の分布が前記中心周辺以外に極値を持たない光学部材を使用する請求項 1 1 に記載の投影光学系の製造方法。

【請求項 1 5】

20

前記光学部材として、前記光軸に垂直な面内の前記符号付複屈折値の最大値と最小値の差が 2.0 nm/cm 以下である光学部材を使用する請求項 1 1 に記載の投影光学系の製造方法。

【請求項 1 6】

前記光学部材として、前記光軸に垂直な面内の半径方向に対する前記符号付複屈折値の分布の勾配の最大値が、半径方向の幅 10 mm 当たり 0.2 nm/cm 以下である光学部材を使用する請求項 1 1 に記載の投影光学系の製造方法。

【請求項 1 7】

前記投影光学系全体の符号付複屈折特性値による前記光学部材の配置条件を下記式に基づいて導く請求項 1 1 に記載の投影光学系の製造方法。

30

【数 3】

$$-0.5 \leq H \leq +0.5 \text{ nm/cm} \quad (1)$$

$$H = \frac{\sum_{j=1}^n G_j}{n} \quad (2)$$

10

$$G_j = \frac{\sum_{i=1}^m E_{ij}}{D} \quad (3)$$

$$D = \sum_{i=1}^m T_i \quad (4)$$

20

$$E_{ij} = B_{ij} \times T_i \quad (5)$$

$$B_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^h A_{ijk}}{h} \quad (6)$$

[式 (1) ~ (6) 中、

30

i は、前記投影光学系を構成する前記光学部材 L の番号 ($i = 1, 2, \dots, m; 2 \leq m$) を示し、

j は、前記光学部材 L における光軸に垂直な有効断面上に想定される、前記光軸を中心とし且つ該光軸からの半径が互いに相違する同心円 C の番号 ($j = 1, 2, \dots, n; 1 \leq n$) を示し、

k は、前記同心円 C の円周上にある測定点の番号 ($k = 1, 2, \dots, h; 1 \leq h$) を示し、

A_{ijk} は、光学部材 L i における同心円 C_{ij} の円周上にある k 番目の測定点 P_{ijk} における前記符号付複屈折値を示し、

B_{ij} は、光学部材 L i における同心円 C_{ij} の円周上にある測定点の符号付複屈折値の相加平均である平均符号付複屈折値を示し、

40

T_i は、光学部材 L i の見かけの厚みを示し、

E_{ij} は、平均符号付複屈折値 B_{ij} と見かけの厚み T_i との積である平均符号付複屈折量を示し、

D は、前記投影光学系全体の見かけの総光路長を示し、

G_j は、前記投影光学系全体における平均符号付複屈折量 E_{ij} の総和を総光路長 D で除した符号付複屈折値の平均変化量を示し、

H は、前記投影光学系全体における符号付複屈折値の平均変化量 G_j の総和を同心円の数 n で除した前記投影光学系全体の符号付複屈折特性値を示す]

【請求項 18】

50

前記符号付複屈折値のストレール値による前記光学部材の配置条件を下記式に基づいて導く請求項 1 1 に記載の投影光学系の製造方法。

【数 4】

$$0.93 \leq S \quad (7)$$

$$S = \prod_{i=1}^m S_i \quad (8)$$

$$S_i = 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma^2}{2} + \frac{|X|^2}{4} \right) \quad (9)$$

10

[式 (7) ~ (9) 中、 λ は光源の波長を示し、

X は、前記投影光学系全体の光線追跡試験により光学部材 L_i について得られる実効光路に基づく前記符号付複屈折値の有効半径方向に対する分布から決定される前記符号付複屈折値の平均値を示し、

σ は、前記投影光学系全体の光線追跡試験により光学部材 L_i について得られる実効光路に基づいた前記符号付複屈折値の有効半径方向に対する分布から決定される前記符号付複屈折値の標準偏差を示し、

20

S_i は、前記光学部材 L_i の実効光路に基づいた前記符号付複屈折値のストレール (Strehl) 強度を示し、

S は、前記光学部材 L_i を全て組み合わせた場合における投影光学系全体の実効光路に基づいた前記符号付複屈折値のストレール値を示す]

【発明の詳細な説明】

【0001】

技術分野

本発明は、投影光学系、その製造方法、並びにそれを使用した投影露光装置に関する。より詳しくは、半導体製造に好適な紫外域の光源を用いて所定のマスクパターンを基板上に転写する場合に使用する投影光学系、その製造方法、並びにそれを使用した投影露光装置に関する。

30

【0002】

背景技術

従来、半導体製造用の投影露光装置としては、図 16 A 及び図 16 B に示すような構造を有するものが用いられている。

【0003】

すなわち、図 16 A に示す投影露光装置 800 においては、水銀アーク灯等の光源 501 からの光束は楕円鏡 502 により集光された後、コリメータレンズ 503 により平行光束に変換される。そしてこの平行光束は、図 16 B に示すような断面が四角形の光学素材 504 a の集合体よりなるフライアイレンズ 504 を通過することにより、これの射出側に複数の光源像が形成される。この光源像位置には、円形状の開口部を有する開口絞り 505 が設けられている。この複数の光源像からの光束はコンデンサーレンズ 506 によって集光され、被照射物体としてのレチクル R を重畳的に均一照明する。

40

【0004】

このようにして照明光学系によって均一照明されたレチクル R 上のパターンは、複数のレンズよりなる投影光学系 507 によって、レジストが塗布されたウェハ W 上に投影露光される。このウェハ W は 2 次元的に移動するウェハステージ W S 上に載置されており、図 16 A の投影露光装置 800 では、ウェハ上での 1 ショット領域の露光が完了すると、次のショット領域への露光のために、順次ウェハステージを 2 次元移動させるいわゆるステッ

50

プアンドリピート方式の露光が行われる。

【0005】

また、近年においては、レチクルRに対し長形状または円弧状の光束を照射し、投影光学系507に関して共役配置されたレチクルRとウェハWとを一定方向に走査することにより、高いスループットでレチクルRのパターンをウェハW上へ転写することが可能な走査露光方式が提案されている。

【0006】

上記いずれの方式の投影露光装置においても、その光学系に用いられる光学部材としては、使用する光源の波長に対する透過率が高いことが望まれる。これは、投影露光装置の光学系は多数の光学部材の組み合わせにより構成されており、たとえレンズ1枚当たりの光損失が少なくとも、それが光学部材の使用枚数分だけ積算されると、トータルでの透過率低下の影響が大きいからである。透過率が悪い光学部材を用いると、露光光を吸収することによって光学部材の温度が上昇して屈折率の不均質が生じ、さらには光学部材の局所的熱膨張によって研磨面の変形をもらたす。これによって光学性能の劣化が生じる。

10

【0007】

一方、投影光学系においては、より微細かつ鮮明な投影露光パターンを得るために、光学部材の屈折率の高い均質性が要求される。これは、屈折率のばらつきにより光の進み遅れが生じ、これが投影光学系の結像性能に大きく影響するからである。

【0008】

そこで、紫外域（波長400nm以下）の投影露光装置の光学系に用いられる光学部材の材料としては、紫外域での透過率が高く、均質性に優れた石英ガラスあるいはフッ化カルシウム結晶が一般的に用いられている。

20

【0009】

また、近年においては、ウェハ面上により微細なマスクパターン像を転写する、すなわち解像度を向上させるために、光源の波長を短くすることが提案されている。例えば、これまでのg線（436nm）やi線（365nm）から、KrF（248nm）やArF（193nm）エキシマレーザへと短波長化が進められている。

【0010】

このような短波長のエキシマレーザを用いた投影露光においては、より微細なマスクパターンを得ることを目的としているため、透過率や屈折率の均質性について、より高い特性をもつ材料が用いられている。

30

【0011】

発明の開示

しかしながら、そのような高い透過率や高い屈折率の均質性を有する材料であっても、複数の材料を組み上げて光学系とした際に、所望の解像度が得られないことがあった。

【0012】

そこで、本発明は、高い結像性能を有する投影光学系、その製造方法、並びに高い解像度を得ることが可能な投影露光装置を提供することを目的とする。

【0013】

本発明者らは、上記目的を達成すべく鋭意研究を行った結果、まず、光学部材の材料の複屈折が、投影光学系の結像性能及び投影露光装置の解像度に大きく影響することを突き止めた。そして、光学部材の材料の複屈折の大きさ、すなわち複屈折値（絶対値）が2nm/cm以下で且つ光学部材内の複屈折の分布が中央対称であれば、投影光学系の設計性能に近い結像性能及び投影露光装置の設計性能に近い解像度が得られることを見出し、特開平8-107060号公報において開示している。

40

【0014】

しかしながら、投影露光装置の解像度に対する要求がさらに高まり、光源としてより短波長の光を用いたり、光学部材として大口径かつ厚みの大きなものを用いた場合には、上記従来の設計思想を採用しても投影光学系の良い結像性能及び投影露光装置の良い解像度を得ることができない場合があった。

50

【0015】

そこで、本発明者らはさらに研究した結果、良好な透過率や良好な屈折率の均質性を有する光学部材を使用しても所望の光学性能を有する投影光学系及び投影露光装置を得ることができない原因として、光学部材の有する複屈折の分布状態が光学部材ごとに異なるため、複数の光学部材を投影光学系として組み上げた場合に光学系全体で異なる複屈折の分布が積算され、結果として光学系全体での光の波面に乱れを生じさせ、投影光学系の結像性能や投影露光装置の解像度に大きな影響を与えていることを見出した。

【0016】

すなわち、従来の光学部材の複屈折の評価は、その大きさ（絶対値）の大小で議論されているに過ぎず、また、上記の光学部材内の複屈折値の分布という概念もなかった。例えば、石英ガラス部材の複屈折値を測定する場合は、部材の径の95%付近の数箇所の複屈折値を測定し、その最大値をその部材における複屈折値として用いることが当業者の認識であった。ところが、石英ガラス部材の複屈折値の分布を詳細に測定したところ、本発明者らは複屈折値は実際は不均一な分布を有していることを見出したのである。

10

【0017】

従って、屈折率の均質性の高い石英ガラス部材であっても部材内の数カ所の複屈折値の最大値の管理だけでは部材内の複屈折の影響を十分に評価することができず、特に、複数の部材を組み合わせる場合に所望の性能の光学系を得ることは非常に困難であることがわかった。このような石英ガラス部材内の複屈折値の不均一な分布は、合成時の温度分布、不純物の不均一な分布、あるいはSiO₂の構造欠陥の不均一な分布に起因して、石英ガラス部材の冷却時に部材内に複屈折値の不均一な分布が形成されるものと考えられる。

20

【0018】

このように、複数の光学部材により構成された光学系全体での複屈折の評価は、個々の光学部材の複屈折の大きさのみでは単純に表すことはできないため、本発明者らは、光学部材内の複屈折値の不均一な分布が光学系に与える影響を詳細に検討した。その結果、この複屈折値の不均一な分布を進相軸の向きに注目してみた場合に、進相軸の向きが同じである複屈折値の分布を有する光学部材を用いて光学系を構成すると複屈折値が積算され、光学系の性能に悪影響を及ぼすこと、反対に進相軸の向きの異なる光学部材を組み合わせることにより、個々の部材の有する複屈折による悪影響が光学系全体では打ち消されることを初めて見出し、本発明に到達した。

30

【0019】

すなわち、本発明の投影光学系は、少なくとも2つの石英ガラス光学部材を有する投影光学系において、各光学部材の光軸との交点を中心とする光軸に垂直な面内の複数の箇所の複屈折値を測定し、複数の複屈折値とその進相軸の向きに基づいて符号付複屈折値の分布を求め、符号付複屈折値の分布に基づき算出される投影光学系全体の符号付複屈折特性値が $-0.5 \sim +0.5 \text{ nm/cm}$ となる配置条件を満たすように各光学部材が互いに組み合わせられていることを特徴とする。

【0020】

各光学部材を上記の符号付複屈折値に基づく配置条件を満たすように組み合わせることにより、個々の光学部材の有する複屈折値の不均一な分布を進相軸の向きに注目して定量的に評価することができ、更に光学部材内の複屈折の分布が互いに打ち消し合うようにそれぞれの符号付複屈折値から光学系全体の符号付複屈折特性値を定量的に見積もりながら光学系を組み上げることが可能となるので、良好な結像性能を有する投影光学系を得ることができる。

40

【0021】

また、本発明の投影露光装置は、露光光源と、パターン原像の形成されたレチクルと、露光光源から出力される光を前記レチクルに照射する照射光学系と、レチクルから出力されるパターン像を感光基板上に投影する投影光学系と、レチクルと前記感光基板の位置合わせを行うアライメント系とを有する投影露光装置であって、投影光学系として前記本発明の投影光学系を備えることを特徴とするものである。

50

【0022】

前記本発明の投影光学系を備えることにより、本発明の投影露光装置は、優れた解像度を得ることができる。

【0023】

さらに、本発明の投影光学系の製造方法は、少なくとも2つの石英ガラス光学部材を有する投影光学系の製造方法であって、各光学部材の光軸との交点を中心とする光軸に垂直な面内の複数の箇所の複屈折値を測定し、複数の複屈折値とその進相軸の向きに基づいて光軸に垂直な面内の符号付複屈折値の分布を求める工程と、各光学部材の符号付複屈折値の分布に基づき投影光学系全体の符号付複屈折特性値を算出する工程と、投影光学系全体の符号付複屈折特性値が $-0.5 \sim +0.5 \text{ nm/cm}$ となる配置条件を満たすように光学部材を互いに組み合わせる工程とを有することを特徴とする。

10

【0024】

ここで、本発明における「符号付複屈折値」の概念について説明する。

【0025】

符号付複屈折値とは、光学部材の複屈折値を求める際に屈折率楕円体において定義される進相軸の向きを考慮して複屈折値に符号を付したものである。

【0026】

より詳しくは、光学部材の光軸との交点を中心とする光軸に垂直な面内において、光束の円形照射を受ける領域を略円形の有効断面とし、この有効断面上にある複屈折測定点の微小領域内の進相軸の向きと、光学部材の光軸との交点である中心からの放射方向とが平行な場合に測定された複屈折値にプラス（或いはマイナス）の符号を付し、垂直な場合にマイナス（或いはプラス）の符号を付するものである。

20

【0027】

また、上記の複屈折値への符号の付し方は、光学部材の光軸との交点を中心とする光軸に垂直な面内に複数の光束が照射される場合にも適用できる。この場合にも、光学部材の光軸との交点である中心からの放射方向と、複数の光束が照射されているそれぞれの有効断面上にある複屈折測定点の微小領域内の進相軸の向きとが平行な場合に測定された複屈折値にプラス（或いはマイナス）の符号を付し、垂直な場合にマイナス（或いはプラス）の符号を付するものである。

【0028】

更に、上記の複屈折値への符号の付し方は、光学部材の光軸との交点を中心とする光軸に垂直な面内に断面円形状以外の形状を有する光束、例えば断面リング状或いは断面楕円状の光束が照射される場合にも適用できる。この場合にも、光学部材の光軸との交点である中心からの放射方向と、複数の光束が照射されているそれぞれの有効断面上にある複屈折測定点の微小領域内の進相軸の向きとが平行な場合に測定された複屈折値にプラス（或いはマイナス）の符号を付し、垂直な場合にマイナス（或いはプラス）の符号を付するものである。

30

【0029】

なお、以下の説明においては、光束が照射されている有効断面上にある複屈折測定点の微小領域内の進相軸の向きと、光学部材の光軸との交点である中心からの放射方向とが平行な場合に測定された複屈折値にプラスの符号を付し、垂直な場合にマイナスの符号を付する場合について説明する。

40

【0030】

以下に、図1A、図1B、図2A、図2B、図3A、及び図3Bを用いて符号付複屈折値を更に具体的に説明する。

【0031】

図1Aは、光学部材L1の有効断面上の中心 O_1 からそれぞれ r_1 , r_2 , r_3 , r_4 の距離にある複屈折測定点 P_{11} , P_{12} , P_{13} , P_{14} における進相軸の向きを示す模式図である。なお、この図においては説明の便宜上、複屈折測定点 $P_{11} \sim P_{14}$ は中心 O_1 を通り半径方向にのびる直線 Q_1 上に設定されている。図中、各測定点の円で示される微小領域の大き

50

さは各測定点における光路差に相当する。また、これらの微小領域内の線分 W_{11} , W_{12} , W_{13} , W_{14} の向きは進相軸の向きを示す。測定点 $P_{11} \sim P_{14}$ の進相軸の向きは全て直線 Q_1 の方向すなわち半径方向に平行であるので、測定点 $P_{11} \sim P_{14}$ の複屈折値は全てプラスの符号を付して表現される。このようにして得られた図1Aに示す測定点 $P_{11} \sim P_{14}$ の符号付複屈折値 A_{11} , A_{12} , A_{13} , A_{14} の半径方向に対する分布を描くと、例えば図1Bのようなプロファイルとなる。

【0032】

図2Aは、図1Aと同様に光学部材L2の有効断面上の中心 O_2 からそれぞれ r_1 , r_2 , r_3 , r_4 の距離にある複屈折測定点 P_{21} , P_{22} , P_{23} , P_{24} における進相軸の向きを示す模式図である。この場合には、測定点 $P_{21} \sim P_{24}$ の進相軸 W_{21} , W_{22} , W_{23} , W_{24} の向きは全て直線 Q_2 の方向すなわち半径方向に垂直であるので、測定点 $P_{21} \sim P_{24}$ の符号付複屈折値 A_{21} , A_{22} , A_{23} , A_{24} は全てマイナスの符号を付して表現される。このようにして得られた図2Aに示す測定点 $P_{21} \sim P_{24}$ の符号付複屈折値 $A_{21} \sim A_{24}$ の半径方向に対する分布を描くと、例えば図2Bのようなプロファイルとなる。

10

【0033】

図3Aは、図1Aと同様に光学部材L3の有効断面上の中心 O_3 からそれぞれ r_1 , r_2 , r_3 , r_4 , r_5 の距離にある複屈折測定点 P_{31} , P_{32} , P_{33} , P_{34} , P_{35} における進相軸の向きを示す模式図である。この場合には、測定点 $P_{31} \sim P_{35}$ の進相軸 W_{31} , W_{32} , W_{33} , W_{34} , W_{35} の向きは、測定点 $P_{31} \sim P_{33}$ においては直線 Q_3 の方向すなわち半径方向に平行であり、測定点 P_{34} , P_{35} においては半径方向に垂直であるので、測定点 $P_{31} \sim P_{35}$ において得られる符号付複屈折値 $A_{31} \sim A_{35}$ の半径方向に対する分布は、図3Bに示すようなプロファイルとなる。

20

【0034】

次に、本発明における「投影光学系全体の符号付複屈折特性値」について図4A及び図4Bに基づき説明する。

【0035】

図4Aは、投影光学系を構成する m 個の光学部材を光源から順に配列させた模式的側面図である。また、図4Bは、図4Aに示す m 個の光学部材のうち光源から i 番目に配置される光学部材 L_i の光軸に垂直な有効断面を示す模式的断面図である。

【0036】

本発明においては、光学部材内の複屈折値の分布は光軸方向に平行な部材の厚み方向については均一であり、光軸に垂直な有効断面上の半径方向については不均一であると仮定する。ここで、「有効断面」とは光学部材の光軸に垂直な面内のうち光束の照射を受ける領域を示す。そして、光軸との交点を有効断面の中心とし、その半径を光学部材の有効断面の有効半径とする。また、投影光学系全体の符号付複屈折特性値を測定する際には、光学部材ごとにその有効断面の大きさが相違するため、図4Aに示すように各光学部材の最大有効半径 r_n が1となるように予め全光学部材の有効断面の大きさをノーマライズする。

30

【0037】

なお、光学部材の光軸との交点を中心とする光軸に垂直な面内に複数の光束が照射される場合には、個々の光束に対応する有効断面について各光学部材の最大有効半径 r_n が1となるように予め全光学部材の有効断面の大きさをノーマライズする。

40

【0038】

更に、光学部材の光軸との交点を中心とする光軸に垂直な面内に断面円形状以外の形状を有する光束、例えば断面リング状或いは断面楕円状の光束が照射される場合にも、個々の光束に対応する有効断面について各光学部材の最大有効半径 r_n が1となるように予め全光学部材の有効断面の大きさをノーマライズする。

【0039】

例えば、断面リング状の光束が照射される場合には、リングの最大外径が1となるように予め全光学部材の有効断面の大きさをノーマライズし、符号付複屈折値の測定については以下に説明する断面円形状の光束に対する測定と同様に行えばよい。また、断面楕円状の

50

光束が照射される場合には、楕円の長軸の最大外径が1となるように予め全光学部材の有効断面の大きさをノーマライズし、符号付複屈折値の測定については以下に説明する断面円形状の光束に対する測定と同様に行えばよい。

【0040】

投影光学系全体の符号付複屈折特性値を測定するためには、先ず、図4Bに示すように、1つの光学部材 L_i についてその有効断面上に中心を O_i とし且つ中心からの半径が互いに相違する複数の同心円 C_{ij} のモデルを仮定する。次に中心 O_i からの半径が r_j である j 番目の同心円 C_{ij} 上にある k 番目の測定点 P_{ijk} の複屈折値を測定する。更に、測定点 P_{ijk} における進相軸の向きと半径方向との関係から符号を付して測定点 P_{ijk} の符号付複屈折値 A_{ijk} とする。

10

【0041】

ここで、 i は、投影光学系を構成する前記光学部材 L の番号($i = 1, 2, \dots, m; 2 \leq m$)を示す。また、 j は、光学部材 L における光軸に垂直な有効断面上に想定される、光軸を中心とし且つ該光軸からの半径が互いに相違する同心円 C の番号($j = 1, 2, \dots, n; 1 \leq n$)を示す。更に、 k は、同心円 C の円周上にある測定点の番号($k = 1, 2, \dots, h; 1 \leq h$)を示す。このようにして同一の同心円 C_{ij} 上の所定の測定点 $P_{ij1} \sim P_{ijh}$ における符号付複屈折値 $A_{ij1} \sim A_{ijh}$ を測定する。

【0042】

次に、下記式に従い、光学部材 L_i における同心円 C_{ij} の円周上にある測定点の符号付複屈折値の相加平均である平均符号付複屈折値 B_{ij} を算出する。

20

【0043】

【数5】

$$B_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^h A_{ijk}}{h} \quad (6)$$

次に、下記式に従い、平均符号付複屈折値 B_{ij} と見かけの厚み T_i との積である平均符号付複屈折量を示し E_{ij} を算出する。

30

【0044】

【数6】

$$E_{ij} = B_{ij} \times T_i \quad (5)$$

ここで、 T_i は、光学部材 L_i の見かけの厚みを示す。この見かけの厚みとしては、光学部材 L_i の有効断面内の厚みの平均値、又は、光学系内に配置した場合に光学部材 L_i の上下の位置に組み合わされる他の部材とのマッチングによる実効的な厚みのどちらかが適宜選択されることになる。

40

【0045】

次に、下記式に従い、投影光学系全体における平均符号付複屈折量 E_{ij} の総和を総光路長 D で除した符号付複屈折値の平均変化量 G_j を算出する。

【0046】

【数7】

$$G_j = \frac{\sum_{i=1}^m E_{ij}}{D} \quad (3)$$

ここで、Dは、下記式で表される投影光学系全体の見かけの総光路長を示す。

【0047】

【数8】

10

$$D = \sum_{i=1}^m T_i \quad (4)$$

次に、下記式に従い、投影光学系全体における符号付複屈折値の平均変化量 G_j の総和を同心円の数 n で除した投影光学系全体の符号付複屈折特性値 H を算出する。

【0048】

【数9】

$$H = \frac{\sum_{j=1}^n G_j}{n} \quad (2)$$

20

このようにして求めた投影光学系全体の符号付複屈折特性値 H が下記式を満たす場合にその投影光学系全体は優れた結像性能を示し、このような投影光学系を備える投影露光装置は優れた解像度を示すことになる。

【0049】

【数10】

30

$$-0.5 \leq H \leq +0.5 \text{ nm/cm} \quad (1)$$

【0050】

発明を実施するための最良の形態

先ず、本発明の投影光学系について説明する。図5は、本発明の投影光学系の一例を示す概略構成図である。

【0051】

図5に示す投影光学系100は、第1物体としてのレチクルR側より順に、正のパワーの第1レンズ群G1と、正のパワーの第2レンズ群G2と、負のパワーの第3レンズ群G3と、正のパワーの第4レンズ群G4と、負のパワーの第5レンズ群G5と、正のパワーの第6レンズ群G6とから構成されている。そして、物体側（レチクルR側）及び像側（ウエハW側）においてはほぼテレセントリックとなっており、縮小倍率を有するものである。また、この投影光学系のN.A.は0.6、投影倍率が1/4である。

40

【0052】

この投影光学系においては、L45、L46、L63、L65、L66、L67の6箇所に、色収差を補正する目的でフッ化カルシウム単結晶を用いる。

【0053】

上記の本発明の投影光学系は、先に述べた(1)～(6)式の算出法により、各光学部材

50

L 1 1 ～ L 6 1 0 について光軸 Z との交点を中心とする光軸 AX に垂直な面内の符号付複屈折値の分布から投影光学系全体の符号付複屈折特性値を算出しており、この投影光学系全体の符号付複屈折特性値が $-0.5 \sim +0.5 \text{ nm/cm}$ となる配置条件を満たすように各光学部材が互いに組み合わせられている。

【0054】

各光学部材を先に述べた符号付複屈折値に基づく配置条件を満たすように組み合わせることにより、個々の光学部材の有する複屈折値の不均一な分布を進相軸の向きに注目して定量的に評価することができ、更に光学部材の複屈折値の分布が互いに打ち消し合うようにそれぞれの符号付複屈折値から光学系全体の符号付複屈折特性値を定量的に見積もりながら光学系を組み上げることが可能となるので、良好な結像性能を有する投影光学系を得ることができる。

10

【0055】

また、本発明の投影光学系は、光学部材が、投影光学系全体の実効光路に基づく符号付複屈折値のストレール (Strehl) 値が 0.93 以上となる配置条件を更に満たすように互いに組み合わせられていることが好ましい。

【0056】

本発明者らは光学部材内の複屈折の分布の評価について、光学部材有効断面の中心及びその周辺部の実効光路を考慮した符号付複屈折値のストレール強度を用いることが有効であることを見出した。本発明者らによりはじめて導入された複屈折のストレール値は、有効断面を通過する光線の実効光路を考慮しているため、光学系全体の符号付複屈折特性値による評価とあわせることにより、光学部材内の更に精密な複屈折の分布の評価を行うことができる。

20

【0057】

この符号付複屈折値のストレール値による各光学部材の配置条件は下記式に基づいて表現される。

【0058】

【数11】

$$0.93 \leq S \quad (7)$$

30

$$S = \prod_{i=1}^m S_i \quad (8)$$

$$S_i = 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma^2}{2} + \frac{|X|^2}{4} \right) \quad (9)$$

[式 (7) ～ (9) 中、 λ は光源の波長を示す。X は、投影光学系全体の光線追跡試験により光学部材 L i について得られる実効光路に基づく符号付複屈折値の有効半径方向に対する分布から決定される符号付複屈折値の平均値を示す。 σ は、投影光学系全体の光線追跡試験により光学部材 L i について得られる実効光路に基づいた符号付複屈折値の有効半径方向に対する分布から決定される符号付複屈折値の標準偏差を示す。 S_i は、各光学部材 L i ごとの実効光路に基づいた符号付複屈折値のストレール (Strehl) 強度を示す。S は、各光学部材 L i を全て組み合わせた場合における投影光学系全体の実効光路に基づいた符号付複屈折値のストレール値を示す。]

40

【0059】

更に、本発明の投影光学系は、光学部材 L i の中心 O_i 周辺の符号付複屈折値が、 0.2 nm/cm 以下であることが好ましい。光学部材に照射される光のほとんどは、光学部材

50

の中心部に光軸を持つため、上記の条件を満たす光学部材を用いることにより、中心部に複屈折を有する光学部材を用いた場合と比較して複屈折の影響を大幅に低減することが可能となる。

【0060】

また、本発明の投影光学系は、光学部材 L_i において平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布が、中心 O_i 以外に極値を持たないことが好ましい。さらに、光学部材の符号付複屈折値の分布が中心以外に極値を持たないものであれば、光学系全体での符号付複屈折特性値を見積もることが容易であり、個々の部材の複屈折の影響を効果的に打ち消し合っ所望の光学性能を得ることが可能となる。

【0061】

更に、本発明の投影光学系は、光学部材 L_i において平均符号付複屈折値 B_{ij} の最大値と最小値の差 ΔB_i が 2.0 nm/cm 以下であることが好ましい。

【0062】

本発明者らはこのような光学部材を用いて投影光学系を構成することにより、投影光学系良好な結像性能を得ることを見出した。更にこのような投影光学系を投影露光装置に備えた場合に、ウェハ面全体にわたって均一な解像度が得られることを見出した。平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布における最大値と最小値の差 ΔB_i が大きいということは、光学部材の平均符号付複屈折値 B_{ij} 、更には、符号付複屈折値 A_{ijk} のばらつきが大きいことになる。平均符号付複屈折値 B_{ij} の最大値と最小値の差 ΔB_i が 2.0 nm/cm より大きい光学部材に光を照射した場合、光の通る位置によって符号付複屈折値 A_{ijk} の差が大きいため、光束の波面に乱れを生じ、光学系の結像性能が極端に低下する傾向がある。

【0063】

また、本発明の投影光学系は、各光学部材 L_i において平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向における分布曲線の勾配の最大値 F_i が、半径方向の幅 10 mm 当たり 0.2 nm/cm 以下であることが好ましい。このような光学部材を用いて投影光学系を構成することにより、投影光学系良好な結像性能を得ることができる。更にこのような投影光学系を投影露光装置に備えた場合には、ウェハ面全体にわたって均一な解像度が得られる。上記の平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布における最大値と最小値の差 ΔB_i が大きい場合と同様に、平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向における分布曲線の勾配の最大値 F_i が大きいということは、光学部材の平均符号付複屈折値 B_{ij} 、更には、符号付複屈折値 A_{ijk} のばらつきが大きいことになる。平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向における分布曲線の勾配の最大値 F_i が、半径方向の幅 10 mm 当たり 0.2 nm/cm より大きい光学部材に光を照射した場合、光の通る位置によって符号付複屈折値 A_{ijk} の差が大きいため、光束の波面に乱れを生じ、光学系の結像性能が極端に低下する傾向がある。

【0064】

なお、従来の「複屈折の大きさ（複屈折値）」と本発明における「符号付複屈折値の最大値と最小値の差」は、いずれも単位 nm/cm で表されるが、前者は進相軸の方向を考慮していない複屈折値の最大値 $|m_{\text{ax}}|$ で示される値であるのに対し、後者は進相軸の方向が光学部材の半径方向と平行な部分で最大の値（プラスの符号付複屈折値の最大値）と進相軸の方向が光学部材の半径方向と垂直な部分で最大の値（マイナスの符号付複屈折値の最大値）との差： $(+A_{\text{max}}) - (-A_{\text{max}})$ 或いは平均符号付複屈折値 B_{ij} の場合には $(+B_{\text{max}}) - (-B_{\text{max}})$ で示されるものである。

【0065】

次に、本発明の投影光学系の製造方法について説明する。

【0066】

図6は、本発明の投影光学系の製造方法の一例を示すフローチャートである。

【0067】

図示の通り、本発明の投影光学系の製造方法は、主として合成石英ガラスインゴットを製造するステップ200と、得られた合成石英ガラスインゴットから光学部材の切り出しを

10

20

30

40

50

行うステップ210と、切り出した光学部材の熱処理を行うステップ220と、熱処理済みの光学部材内の符号付複屈折値 A_{ijk} を測定するステップ230と、得られた符号付複屈折値 A_{ijk} から平均符号付複屈折値 B_{ijk} 及びそこから平均符号付複屈折値 E_{ij} を算出するステップ240と、ステップ240において得られた光学部材内の符号付複屈折値の分布データから使用する光学部材を選択するステップ250と、ステップ250において選択された複数の光学部材を投影光学系全体の複屈折複屈折特性値に基づく配置条件のもとに配列するステップ260と、ステップ260において組み上げた投影光学系について実効光路に基づく符号付複屈折値のストレール値を測定するステップ270と、ステップ270において得られたストレール値に基づく配置条件のもとに光学部材を再び配列するステップ280とから構成されている。

10

【0068】

以下、図6のフローチャートに従い、本発明の投影光学系の製造方法の詳細について説明する。

【0069】

先ず、ステップ200の合成石英ガラスの製造について説明する。

【0070】

本発明の投影光学系に用いられる石英ガラス部材は、例えば、a) ケイ素化合物を酸水素火炎中で加水分解してガラス微粒子（いわゆるスート）を得、該ガラス微粒子を堆積させて多孔質ガラス（いわゆるスート体）を形成する。該多孔質ガラスを軟化点（好ましくは融点）近傍以上の温度で透明化させ、透明石英ガラスを得る方法b) ケイ素化合物を酸水素火炎中で加水分解し、得られたガラス微粒子をターゲット上に堆積させると同時に透明ガラス化を行い、透明石英ガラスを得る方法等が用いられる。aの方法はスート法、bの方法は直接法と呼ばれる。

20

【0071】

スート法において、多孔質ガラスの形成方法は特に限定されず、VAD法、OVD法、ゾルゲル法などが用いられる。

【0072】

以下に、直接法（火炎加水分解法とも呼ばれる）により石英ガラス部材を製造する方法を説明する。

【0073】

図7に、本発明において用いられる石英ガラスインゴット470を合成するための合成炉400を示す。

30

【0074】

バーナ410は石英ガラス製の多重管構造のものであって、炉の上部からターゲット420にその先端部を向けて設置されている。炉壁は炉枠440及び耐火物430により構成されており、観察用の窓（図示せず）、IRカメラ監視用窓450、及び排気系460が設けられている。炉の下部には、インゴット470形成用のターゲット420が配設されており、ターゲット420は、支持軸480を介して炉の外にあるXYステージ（図示せず）に接続されている。支持軸480はモータにより回転可能とされており、XYステージはX軸サーボモータおよびY軸サーボモータによりX方向およびY方向に2次元的に移動可能とされている。

40

【0075】

バーナ410から酸素含有ガス、水素含有ガスが噴出され、これが混合され火炎を形成する。この火炎中に原料のケイ素化合物をキャリアガスで希釈してバーナの中心部から噴出させると、原料が加水分解されて石英ガラス微粒子（スート）が発生する。これを、回転、揺動するターゲット上に堆積させ、これと同時に熔融・ガラス化することにより、透明石英ガラスのインゴットが得られる。このとき、インゴット上部は火炎に覆われており、インゴット上部の合成面の位置を常にバーナから等距離に保つようにターゲットがZ方向に引き下げられる。

【0076】

50

バーナ410の中心部から噴出させる原料としては、 SiCl_4 、 SiHCl_3 等のケイ素の塩化物、 SiF_4 、 Si_2F_6 等のケイ素のフッ化物、ヘキサメチルジシロキサン、オクタメチルシクロテトラシロキサン、テトラメチルシクロテトラシロキサン等のシロキサン類、メチルトリメトキシシラン、テトラエトキシシラン、テトラメトキシシラン等のシラン類などの有機ケイ素、その他 SiH_4 、 Si_2H_6 等が挙げられる。

【0077】

石英ガラス部材の有効断面の中心周辺の符号付複屈折値が $-0.2 \sim +0.2 \text{ nm/cm}$ である石英ガラス部材を得る方法としては、上述の合成石英ガラスの製造方法により大口径のインゴットを製造し、ここから所望の口径の光学部材を切り出すことが最も簡易な方法である。この場合、インゴットと、光学部材の幾何学的中心を一致させることが必要となる。大口径のインゴットは、口径の小さいインゴットと比較して符号付複屈折値の分布がフラットとなる傾向があるため、ここから切り出された光学部材の歪の分布もフラットとなる。これは、インゴットの合成面中央部の温度勾配が、インゴット側面に近い合成面周辺部の温度勾配より小さいことによると考えられる。

10

【0078】

また、有効断面の中心周辺以外に符号付複屈折値の分布の極値を持たない石英ガラスを得る際もやはり大口径のインゴットを製造し、その符号付複屈折値の分布を確認して中心部以外に複屈折を持たないように光学部材を切り出す。あるいは、複屈折が緩和される充分に高い温度で保持した後、徐々に冷却するアニール操作を行うことにより、中心部の複屈折が 0.2 nm/cm 以下で、中心部以外に極値を持たない符号付複屈折値の分布を有する石英ガラス部材を得ることができる。

20

【0079】

符号付複屈折値の最大値と最小値の差が 2.0 nm/cm 以下、あるいは符号付複屈折値の半径方向に対する符号付複屈折値の分布の勾配の最大値が、幅 10 mm に対して 0.2 nm/cm 以下といった、部材内の符号付複屈折値の分布のばらつきの小さい光学部材を得る際にも大口径のインゴットから切り出す方法や複屈折を緩和するようなアニール操作を行うことが効果的である。また、合成時のインゴット上部（合成面）の温度分布を最適化する等、合成条件を制御することによってもある程度、符号付複屈折値のばらつきを小さくすることが可能である。

【0080】

このようにして製造された光学部材はステップ210において切り出される。更にステップ220において、切り出した光学部材を、急速加熱→短時間保持→急速冷却といった熱処理を施して先に述べたように光学部材内の符号付複屈折値のばらつきを抑制する。このようにして、図5に示した投影光学系を構成する様々な形状を有する光学部材の候補が製造される。すなわち、図5に示した投影光学系を製造する場合、図5に示した石英ガラスレンズL11に対して同じ形状と大きさを有する複数枚の石英ガラスレンズが製造される。

30

【0081】

次にステップ230において光学部材ごとに符号付複屈折値を測定する。すなわち、光学部材の光軸に垂直な有効断面内に仮定される複数の同心円上にある複数の測定点 P_{ijk} における符号付複屈折値 A_{ijk} を測定する。

40

【0082】

以下に本発明において用いられる複屈折の測定法について説明する。まず、位相変調法について説明する。光学系は光源、偏光子、位相変調素子、試料、検光子を配置している。光源としてはHe-Neレーザーまたはレーザーダイオード、位相変調素子としては光弾性変換器が用いられる。光源からの光は偏光子により直線偏光となって位相変調素子に入射する。試料上に投射される位相変調素子からの光束は素子により直線偏光→円偏光→直線偏光と連続的に偏光状態が変化する変調光である。測定に際しては、試料上の測定点に入射する光束を中心に試料を回転させ、検知器の出力のピークを見つけ、そのときの振幅を測定することによって進相軸（または遅相軸）の方向と複屈折位相差の大きさを求める

50

。光源にゼーマンレーザーを用いれば試料を回転させない測定も可能になる。また、位相シフト法、光ヘテロダイン干渉法も、本発明において使用することが可能である。

【0083】

その他、測定精度ではやや劣るが以下のような方法での測定も可能である。

【0084】

回転検光子法では、光源と光検出器の間の試料を偏光子と回転検光子で挟むような装置構成となっている。被測定資料の後に於いた検光子を回転させながら検知器からの信号を測定し、検知器からの信号の最大値と最小値から位相差を求める。

【0085】

位相補償法では、光源、偏光子、試料、位相補償板、検光子、光検出器を配置する。偏光子と検光子の軸はお互いに直交状態に置く、被測定試料に入射した直線偏光は試料の複屈折により楕円偏光になるので、位相補償板を調節してやることにより直線偏光に戻してやる。補償板を調節することにより、検知器での信号はほとんどゼロになる。最も良く消光した位相補償値が複屈折の量となる。

【0086】

クロスニコル光学系の中で標準試料を置き比較する簡便な方法でも、測定試料の厚みが十分あれば、測定は可能になる。

【0087】

複屈折の測定値には、先に述べたように進相軸の方向が部材の直径と平行な方向な場合は＋、垂直な方向を－の符号を付ける。なお、複屈折の測定値が小さいような場合は進相軸は必ずしも直径と完全に平行もしくは垂直にはならず、傾きを持つことがある。この場合は直径に対して45度の角度より平行に近いものは＋、垂直に近いものは－の符号を付けて取り扱えばよい。

【0088】

次に、ステップ240においてステップ230で得られた光学部材 L_i ごとの符号付複屈折値 A_{ijk} から平均符号付複屈折値 B_{ijk} を求める。ここで、平均符号付複屈折値 B_{ijk} は、有効断面の中心 O_i から等距離 r_j にある同心円 C_{ij} 上にある複数の測定点における複数の符号付複屈折値の相加平均である。

【0089】

図8A、図8B、図9A、図9B、図10A及び図10Bを用いて、符号付複屈折値 A_{ijk} から平均符号付複屈折値 B_{ijk} を求める場合について説明する。

【0090】

図8Aは、光学部材 L_1 の有効断面上の中心 O_1 からそれぞれ r_1, r_2, r_3, r_4 の半径を有する同心円 $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}$ と中心 O_1 から半径方向にのびる2つの直線 Q_{101} 及び Q_{102} との交点 $P_{111}, P_{121}, P_{131}, P_{141}, P_{112}, P_{122}, P_{132}, P_{142}$ を測定点とした場合の模式図である。この場合には、同一の同心円の円周上にある2つの測定点から得られる符号付複屈折値の相加平均が光学部材 L_1 の同心円ごとの平均符号付複屈折値となる。すなわち、同心円 C_{11} の場合には、同心円 C_{11} の円周上にある測定点 P_{111} と測定点 P_{112} とにおいて得られる符号付複屈折値 A_{111} と A_{112} との相加平均が同心円 C_{11} の円周上にある点群の符号付複屈折値を代表する平均符号付複屈折値 B_{11} となる。以下同様にして、同心円 $C_{12} \sim C_{14}$ について平均符号付複屈折値 $B_{12} \sim B_{14}$ が得られる。そして平均符号付複屈折値 $B_{11} \sim B_{14}$ を中心 O_1 からの距離の関数として図示することにより、光学部材 L_1 の半径方向に対する平均符号付複屈折値の分布を定量的に理解することができる。例えば、平均符号付複屈折値 $B_{11} \sim B_{14}$ が全て正の値を取り半径方向に単調増加をしている場合には、図8Bに示すような光学部材 L_1 の半径方向に対する平均符号付複屈折値の分布のプロフィールを得ることができる。

【0091】

図9Aは、光学部材 L_2 の有効断面上の中心 O_2 からそれぞれ r_1, r_2, r_3, r_4 の半径を有する同心円 $C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}$ と中心 O_2 から半径方向にのびる2つの直線 Q_{201} 及び Q_{202} との交点 $P_{211}, P_{221}, P_{231}, P_{241}, P_{212}, P_{222}, P_{232}, P_{242}$ を測定点

10

20

30

40

50

とした場合の模式図である。この場合にも、図 8 A において説明したように同心円 $C_{21} \sim C_{24}$ について平均符号付複屈折値 $B_{21} \sim B_{24}$ が得られる。そして平均符号付複屈折値 $B_{21} \sim B_{24}$ を中心 O_2 からの距離の関数として図示することにより、光学部材 L 2 の半径方向に対する平均符号付複屈折値の分布を定量的に理解することができる。例えば、平均符号付複屈折値 $B_{21} \sim B_{24}$ が全て負の値を取り半径方向に単調減少をしている場合には、図 9 B に示すような光学部材 L 2 の半径方向に対する平均符号付複屈折値の分布のプロフィールを得ることができる。

【0092】

図 10 A は、光学部材 L 3 の有効断面上の中心 O_3 からそれぞれ r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 の半径を有する同心円 $C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{35}$ と中心 O_3 から半径方向にのびる 2 つの直線 Q_{301} 及び Q_{302} との交点 $P_{311}, P_{321}, P_{331}, P_{341}, P_{351}, P_{312}, P_{322}, P_{332}, P_{342}, P_{352}$ を測定点とした場合の模式図である。この場合にも、図 8 A において説明したように同心円 $C_{31} \sim C_{35}$ について平均符号付複屈折値 $B_{31} \sim B_{35}$ が得られる。そして平均符号付複屈折値 $B_{31} \sim B_{35}$ を中心 O_3 からの距離の関数として図示することにより、光学部材 L 3 の半径方向に対する平均符号付複屈折値の分布を定量的に理解することができる。例えば、平均符号付複屈折値 $B_{31} \sim B_{33}$ が正の値、 B_{34} 及び B_{35} が負の値を取り、これらの平均符号付複屈折値 $B_{31} \sim B_{35}$ が r_2 付近において極大値をとり r_2 から r_5 にかけて半径方向に単調減少をしている場合には、図 10 B に示すような光学部材 L 3 の半径方向に対する平均符号付複屈折値の分布のプロフィールを得ることができる。

【0093】

更にステップ 240 では、このようにして得られた光学部材ごとの平均符号付複屈折値 B_{ijk} と光学部材ごとの見かけの厚み T_i から、(5) 式に従い光学部材ごとの平均符号付複屈折量 E_{ijk} を算出する。

【0094】

次に、ステップ 250 において使用する光学部材を選択する。この際に、図 5 に示す投影光学系において示すように、光学部材は投影光学系内において果たす役割に応じてその有効断面がそれぞれ異なるため、図 4 A において示したように全ての光学部材について最大有効半径が 1 となるようにその有効断面をノーマライズする。そしてノーマライズされた共通の有効半径のもとで、全光学部材の平均符号付複屈折値 B_{ijk} の半径方向の分布をみることににより、以下の光学部材の選択を行い、投影光学系の各部位に使用する光学部材の候補を絞り込む。

【0095】

このステップ 250 における光学部材の選択条件は、選択条件 251；光学部材 L i の中心 O_i 周辺の符号付複屈折値が 0.2 nm/cm 以下であること、選択条件 252；光学部材 L i において平均符号付複屈折値 B_{ij} の最大値と最小値の差 ΔB_i が 2.0 nm/cm 以下であること、選択条件 253；各光学部材 L i において平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向における分布曲線の勾配の最大値 F_i が、半径方向の幅 10 mm 当たり 0.2 nm/cm 以下であること、選択条件 254；光学部材 L i において平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布が、中心 O_i 以外に極値を持たないこと、である。

【0096】

以上の選択条件 251～254 の全てか或いは少なくとも 1 つをクリアする光学部材を使用することにより、結像性能の高い投影光学系をより効率良く構成することができる。

【0097】

次に、ステップ 260 において先に (1) で示した投影光学系全体の符号付複屈折特性値 H が $-0.5 \sim +0.5 \text{ nm/cm}$ となるように光学部材を配列する。この時、投影光学系全体の符号付複屈折特性値 H は、先に示した (2)～(4) 式により算出される。このように配列された投影光学系は優れた結像性能を示す。

【0098】

次に、ステップ 270、280 において投影光学系全体の実効光路に基づく符号付複屈折値のストレール (Strehl) 値が 0.93 以上となる配置条件を更に満たすように互いに組

10

20

30

40

50

み合わせる。複屈折のストレール値は、有効断面を通過する光線の実効光路を考慮しているため、光学系全体の符号付複屈折特性値による評価とあわせることにより、光学部材内の更に精密な複屈折の分布の評価を行うことができる。複屈折のストレール値 S は、光線追跡試験により得られる符号付複屈折値の半径方向の分布のデータを用いて (8) 式及び (9) 式に基づき算出される。

【0099】

例えば、図5に示した投影光学系100の場合、フッ化カルシウム単結晶から製造したレンズL45、L46、L63、L65、L66、L67を除く石英ガラスレンズL11～L610に対応する符号付複屈折値の半径方向に対する分布の測定結果をストレール値計算用のコンピュータに入力する。そして、光軸上、近軸域、軸外等と、光学系の収差計算等に用いられる光線追跡に準ずる手法により、各レンズ上の光線通過ポイントを求め、そのポイントに対応する符号付複屈折値を式(9)に代入し、ストレール値を求める。つまり、種々の入射角度で投影光学系100に入射する複数の光線に対応する複数のストレール値を求め、このうちの最低値をそのサンプルの組み合わせのストレール値と定める。

【0100】

なお、フッ化カルシウム単結晶から製作される6枚のレンズの符号付複屈折の分布については、理論値をコンピュータに代入しても良いし、標準的な複屈折値の分布を有する材料の実測値を入力しても良い。或いはこれら6枚のレンズ用材料を同時に作製し、石英ガラスレンズと共に評価を行うことも可能である。

【0101】

なお、以上の投影光学系の製造方法においては、光学部材を選択するステップ250と、ストレール値を測定するステップ270、及びストレール値に基づいて光学部材を配列するステップ280とを設ける場合について説明したが、本発明の投影光学系の製造方法は上記形態に限定されるものではなく、本発明の投影光学系の製造方法においては、上記の3つのステップはいずれも省略可能なステップである。

【0102】

また、上記の説明においては、光学部材ごとに平均符号付複屈折値 B_{ijk} の半径方向に対する分布を測定した際に、全ての光学部材についてその中心周辺の複屈折値がほぼゼロであって、半径方向における平均符号付複屈折値 B_{ijk} の分布が僅かに単調増加するか、或いは僅かに単調減少するような分布の場合には、上記の投影光学系全体の符号付複屈折特性値の代わりに投影光学系全体の複屈折の影響を評価する基準として以下の方法により算出される値を目安とすることもできる。すなわち、光学部材内の平均符号付複屈折値 B_{ijk} の半径方向の値の相加平均をとりその部材を代表する符号付複屈折値とし、全光学部材について加算した値である。この加算値が光学系全体でゼロとなるように部材を組み合わせることにより、簡便に複屈折の影響を考慮した部材の選択を行うことが可能である。

【0103】

図11は、本発明の投影光学系を備える投影露光装置の一例の概略構成図を示す。図11において、投影光学系304の光軸に平行な方向をZ方向、紙面内にあってZ方向に垂直な方向をY方向、紙面及びZ方向に垂直な方向をX方向とする。

【0104】

図11に示す投影露光装置は、主として露光光源303と、パターン原像の形成されたレチクルRと、露光光源303から出力される光をレチクルRに照射する照射光学系302と、レチクルRから出力されるパターン像をウェハ(感光基板)W上に投影する投影光学系304と、レチクルRとウェハWの位置合わせを行うアライメント系305とから構成されている。

【0105】

ウェハWは、レベリングステージ(図示せず)上に載置され、このレベリングステージは、駆動モーター330により投影光学系の光軸方向(Z方向)に微動可能なZステージ301上に設置されている。Zステージ301は、駆動モーター320よりステップ・アンド・リピート方式で2次元方向(XY)方向に移動可能なXYステージ315に載置され

ている。レチクルRは水平面内で2次元移動可能なレチクルステージ306上に載置されている。露光光源303からの露光光は、照明光学系302を介してレチクルRに形成されたパターンを均一に照明し、レチクルRのパターン像は投影光学系304によってウェハWのショット領域に露光転写される。この露光光には、248nm (KrFエキシマレーザ)、193nm (ArFエキシマレーザ)、157nm (F₂レーザ)等の波長を有する露光光を用いることができる。

【0106】

XYステージ315は、ウェハW上の1つのショット領域に対するレチクルRのパターンの転写露光が終了すると、ウェハWの次のショット領域が投影光学系304の露光領域と一致するようにステッピング移動される。ウェハWが載置されたレベリングステージの2次元的な位置はレベリングステージに固定された移動鏡340との距離をレーザー干渉計(図示せず)で計測することによって、例えば0.01μm程度の分解能で常時モニターされており、レーザー干渉計の出力はステージコントロール系311に供給されている。

10

【0107】

レチクルRはレチクルステージ306上で、レチクルR上の転写パターンの中心が投影光学系304の光軸AXと一致するように位置決めされる。レチクルRの位置決めは、レチクルRの外周付近に設けられた複数のレチクルアライメントマーク(レチクルマーク)を用いて行われる。レチクルマークは、X方向の位置決めを行うためのレチクルマークと、Y方向の位置決めを行うためのレチクルマークの2種類のものが設けられている。アライメント系305は、露光光源303から露光光の一部を分岐して取り出した露光光を照明光(アライメント光)として使用する。アライメント系305は各レチクルアライメントマークの位置に1つずつ設けられている。

20

【0108】

照明光学系302を通過した照明光は、レチクルRのパターン領域の外側に設けられたレチクルマークに入射する。レチクルマークは、例えば、パターン周囲の不透明部に形成された矩形の透明窓からなる。レチクルマーク部で反射されたアライメント光は、アライメント系305に再び入射する。一方レチクルマークを通過したアライメント光は、投影光学系304を通過してウェハW上の各ショット領域の周囲に設けられた基板アライメントマーク(ウェハマーク)上に入射する。ウェハマークは各ショット領域の周囲にそれぞれ設けるのではなく、ウェハの所定の位置、例えばウェハの外周部領域にのみ設けてもよい。ウェハマークもレチクルマークに対応してX方向の位置決めを行うためのウェハマークと、Y方向の位置決めを行うためのウェハマークの2種類のものが設けられている。ウェハマークからの反射光は入射光と逆の経路を辿り、投影光学系304、レチクルマーク部を通過してアライメント系305に再び入射する。

30

【0109】

このようにしてアライメント系305は、レチクルRとウェハWとからのアライメント光の反射を入力することにより、レチクルRとウェハWとの相対的な位置を検出する。このアライメント系305の出力は主制御系312に供給される。そして主制御系312の出力がレチクル交換系307とステージコントロール系311に供給されることにより、レチクルRとウェハWとの空間的な位置が調整される。その結果、ウェハW上の各ショット領域に形成されているパターンと、これから転写露光するレチクルRのパターン像との重ね合わせ精度を高精度に維持することができる。

40

【0110】

図12A及び図12Bは、図11に示す投影露光装置の照明光学系302の詳細な構造を示す概略構成図である。

【0111】

図12Aは、照明光学系302を図11のY方向からみた場合の正面図であり、図12Bは、照明光学系302を図11のX方向からみた場合の正面図である。なお、いずれの図においても照明光学系302に入射する露光光の一部を分岐して使用するアライメント系305を省略している。

50

【0112】

露光光源303（図示せず）からは、248nm（KrFエキシマレーザ）、193nm（ArFエキシマレーザ）、157nm（F₂レーザ）等の波長を有するほぼ平行な光束が出力され、このときの平行光束の断面形状は矩形状となっている。この露光光源303からの平行光束は、所定の断面形状の光束に整形する光束整形部としてのビーム整形光学系20に入射する。このビーム整形光学系20は、Y方向に屈折力を持つ2つのシリンドリカルレンズ（20A、20B）で構成されており、光源側のシリンドリカルレンズ20Aは、負の屈折力を有し、X方向の光束を発散させる一方、被照射面側のシリンドリカルレンズ20Bは、正の屈折力を有し、光源側のシリンドリカルレンズAからの発散光束を集光して平行光束に変換する。従って、ビーム整形光学系20を介した露光光源303からの平行光束は、Y方向の光束幅が拡大されて光束断面が所定の大きさを持つ長方形に整形される。なお、ビーム整形光学系20としては、正の屈折力を持つシリンドリカルレンズを組み合わせたものでも良く、さらにはアナモルフィックプリズム等でも良い。

10

【0113】

ビーム整形光学系20からの整形された光束は、第1リレー光学系21に入射する。ここで、第1リレー光学系21は、2枚の正レンズからなる正の屈折力の前群（21A、21B）と、2枚の正レンズからなる正の屈折力の後群（21C、21D）とを有しており、第1リレー光学系21の前群（21A、21B）は、この前群のレチクルR側（後側）の焦点位置に集光点（光源像）Iを形成し、第1リレー光学系21の後群（21C、21D）は、その前群（21A、21B）の焦点位置に光源側（前側）の焦点位置が一致するように配置されている。そして、この第1リレー光学系21は、露光光源303の射出面と後述する第1多光源像形成手段としてのオプティカルインテグレータ30の入射面とを共役にする機能を有している。この第1リレー光学系21の機能によって、露光光源303からの光の角度ずれに伴うオプティカルインテグレータ30を照明する光束のずれを補正し、露光光源303からの光の角度ずれに対する許容度を大きくしている。なお、露光光源303からの光を第1多光源形成手段へと導く導光光学系は、ビーム整形光学系20と第1リレー光学系21とで構成される。

20

【0114】

第1リレー光学系21を介した光束は、直線状に3列配列された複数の光源像を形成する第1多光源形成手段としてのオプティカルインテグレータ30に入射する。このオプティカルインテグレータ30は、ほぼ正形状のレンズ断面を有する複数の両凸形状のレンズ素子が複数配置されて構成されており、オプティカルインテグレータ30全体としては長形状の断面を有している。そして、各々の両凸形状のレンズ素子は、Y方向とX方向とで互いに等しい曲率（屈折力）を有している。

30

【0115】

このため、オプティカルインテグレータ30を構成する個々のレンズ素子を通過する平行光束は、それぞれ集光されて各レンズ素子の射出側には光源像が形成される。従って、オプティカルインテグレータ30の射出側位置A1にはレンズ素子の数に相当する複数の光源像が形成され、ここには実質的に2次光源が形成される。

40

【0116】

オプティカルインテグレータ30によって形成された複数の2次光源からの光束は、第2リレー光学系40によって集光されて、さらに複数の光源像を形成する第2多光源像形成手段としてのオプティカルインテグレータ50に入射する。

【0117】

このオプティカルインテグレータ50は、長方形のレンズ断面を有する複数の両凸形状のレンズ素子が複数配置されて構成されており、このレンズ素子は断面形状がオプティカルインテグレータ30の断面形状と相似になるように構成されている。そして、オプティカルインテグレータ50全体としては正形状の断面を有している。また、各々のレンズ素子は、図12Aの紙面方向と図12Bの紙面方向とで互いに等しい曲率（屈折力）を有している。

50

【0118】

このため、オプティカルインテグレータ50を構成する個々のレンズ素子を通過するオプティカルインテグレータ30からの光束は、それぞれ集光されて各レンズ素子の射出側には光源像が形成される。従って、オプティカルインテグレータ50の射出側位置A2には、正形状に配列された複数の光源像が形成され、ここには実質的に3次光源が形成される。

【0119】

なお、第2リレー光学系40は、オプティカルインテグレータ30の入射面位置B1とオプティカルインテグレータ50の入射面位置B2とを共役にすると共に、オプティカルインテグレータ30の射出面位置A1とオプティカルインテグレータ50の射出面位置A2とを共役にしている。更に、上記の説明においてオプティカルインテグレータ30及びオプティカルインテグレータ50は、フライアイレンズの形状で示したが本発明の投影露光装置の照明系に使用されるオプティカルインテグレータの形状は特に限定されるものではなく、例えば極めて微小な複数のレンズ素子から構成されるマイクロフライアイや、ロッド状内面反射型の光学素子（カレイドスコープロッド）や、回折光学素子（DOE）等を用いることが可能である。

【0120】

この3次光源が形成される位置A2若しくはその近傍位置には、所定形状の開口部を有する開口絞りASが設けられており、この開口絞りASにより円形状に形成された3次光源からの光束は、集光光学系としてのコンデンサー光学系60により集光されて被照射物体としてのレチクルR上をスリット状に均一照明する。

【0121】

また、図11に示す投影光学系304は、投影光学系全体の符号付複屈折特性値が $-0.5 \sim +0.5 \text{ nm/cm}$ となる配置条件を満たすように各光学部材が互いに組み合わせられている。また、各光学部材が、投影光学系全体の実効光路に基づく符号付複屈折値のストレール（Strehl）値が0.93以上となる配置条件を更に満たすように互いに組み合わせられている。更に、使用されている光学部材は、その有効断面の中心周辺の符号付複屈折値が、 $-0.2 \sim +0.2 \text{ nm/cm}$ であり、平均符号付複屈折値の半径方向の分布が、中心以外に極値を持たないものであり、平均符号付複屈折値の最大値と最小値の差 ΔB_{ij} が 2.0 nm/cm 以下であり、平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向における分布曲線の勾配の最大値 F_{ij} が、半径方向の幅10mm当たり 0.2 nm/cm 以下である。

【0122】

このように本発明の投影光学系を備えることにより、光学部材の複屈折による影響を最小限に抑制することができるので、解像度の高い投影露光装置を得ることが可能となる。

【0123】

以下、実施例を用いて本発明の投影光学系、その製造方法及びそれを用いた投影露光装置について詳細に説明する。

【0124】

<合成石英ガラスの製造>

先ず、以下に示す実施例1～実施例3、比較例1～比較例3に使用した石英ガラス部材の製造方法について説明する。

【0125】

図7に示す合成炉を用いて、直接法（火炎加水分解法）により合成石英ガラスの製造を行った。まず、四塩化けい素を多重管バーナの中央部より噴出させ、酸水素火炎中で加水分解し、ガラス微粒子を得た。これを回転及び揺動が行われているターゲット上に堆積する同時に透明化して図13に示す $\phi 400 \text{ mm} \times t 800 \text{ mm}$ の石英ガラスインゴット470を得た。このときX軸方向の揺動幅（ストローク）を、第1の合成では100mm、第2の合成では150mmに設定した。

【0126】

それぞれの合成において、インゴット470をこの形状のまま放冷した後、 $\phi 400 \text{ mm}$

× t 100 mmの円筒形状のテストピース e、m、f を切り出した。具体的には、テストピース e は第 1 の合成により得られたインゴット 470 の下面から 500 ~ 600 mm の高さの部分から、テストピース m は第 2 の合成により得られたインゴット 472 の下面から 500 ~ 600 mm の高さの部分から切り出した。また、テストピース f は、第 1 の合成により得られたインゴット 470 又は第 2 の合成により得られたインゴット 472 の下面から 100 ~ 200 mm の高さの部分から切り出した。これらのテストピース e、m、f を 1000 °C まで昇温して 10 時間保持した後、10 °C / 時で 500 °C まで降温した。その後再び放冷し熱処理済みのテストピース e、m、f を得た。

【0127】

一方、X 軸方向の揺動幅（ストローク）を 50 mm に設定する以外は上記と同様の合成石英ガラスの製造方法により、φ 120 mm ~ φ 300 mm の石英ガラスインゴットを作成した。これらのインゴットから適当なサイズのテストピースを切り出し、上記と同様の条件で熱処理を行った。そして、図 5 の光学系において必要とされる φ 100 mm ~ φ 280 mm のテストピース g を切り出した。

【0128】

＜合成石英ガラスの評価＞

合成石英ガラスからなる円板状のテストピース e、m、f、g について、それぞれの符号付複屈折値の半径方向の分布を測定した。なお、複屈折の測定は、位相変調法により行った。また、測定点は、図 10 A に示したようにテストピース e、m、f、g についてそれぞれの有効断面上に想定される複数の同心円と、有効断面の中心から半径方向にのびる 2 つの直線との交点とした。

【0129】

先ず、テストピース e、m、f、g について符号付複屈折値の半径方向の分布のデータから、所望の径に切り出した後の符号付複屈折値の値を予測し、符号付複屈折値が + の部材と - の部材を組み合わせることで光学系全体で符号付複屈折値が極力小さくなるように、使用できるテストピースの選択を行った。

【0130】

図 5 に示した投影光学系 100 を組み上げるのに必要な部材の大きさは φ 100 ~ φ 280 である。この範囲内において、テストピース g を除くテストピース e、m、f は符号付複屈折値が半径方向に単純増加あるいは単純減少しており、且つその絶対値も $2 \text{ nm} / \text{cm}$ と比較的小さいことがわかった。

【0131】

そこで、テストピース e、m、f の符号付複屈折値の半径方向の分布の平均を求め、それぞれのテストピースの符号付複屈折値の仮の代表値を求めた。次いで、テストピース e、m、f を選択し組み合わせることで光学系を組み、全体でその代表値を加算して、光学系全体での加算値が ± 0 になることを確認した。このように、先ず簡便に複屈折の影響を考慮した部材の選択を行い、特性の良好なテストピース e、m、f を更に正確にガラスインゴットから切り出すこととした。なお、部材内の複屈折の特性を上記の符号付複屈折値の仮の代表値を用いて評価する手法は一つの目安であり、投影光学系を実際に組み上げる場合には、先に述べた投影光学系全体の符号付複屈折特性値を改めて算出する。

【0132】

上記の選択に基づいて、インゴット外径から割り出したインゴット回転対称な中心位置とテストピースの中心位置を合わせて改めて石英ガラスからなるテストピース e、m、f を切り出す。実際には、熱処理やアニールを行ったテストピースの熱処理中心とテストピースの中心位置を合わせるようにして、所望の大きさの部材を切り出した。これら切り出した円筒形状のテストピース e、m、f のうち、φ 200 mm のものの平均符号付複屈折値 B_{ijk} の半径方向の分布曲線を図、図 14 A ~ C に示す。これらの合成石英ガラスは、いずれも平均符号付複屈折値 B_{ijk} が単調増加、もしくは単調減少のパターンを有している。また、テストピース e、m、f の中心周辺の符号付複屈折値 A_{i0} はいずれも $-0.2 \sim +0.2 \text{ nm} / \text{cm}$ 以下である。また、それぞれのテストピース e、m、f が中心以外に

10

20

30

40

50

平均符号付複屈折値 B_{ijk} の極値を持たないことがわかった。更に、平均符号付複屈折値 B_{ijk} の半径方向の分布曲線の勾配の最大値 F_i が 10 mm あたり 0.2 nm/cm 以下であること、平均符号付複屈折値 B_{ijk} の半径方向の分布における最大値と最小値の差 ΔB_i が 2.0 nm/cm 以下であることを確認した。

【0133】

一方、切り出した円筒形状のテストピース g のうち、 $\phi 200\text{ mm}$ のものの平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布曲線を図 14D に示す。テストピース g は、平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布が中心周辺以外の半径の $70\% \sim 80\%$ の位置に正の極大値を有していることがわかった。

【0134】

なお、上記のテストピース e 、 m 、 f 、 g は、これらを使用して投影光学系を実際に組むためにそれぞれ複数個用意した。すなわち、先ず複数の石英ガラスインゴットを先に述べた合成法と同じ条件のもとに作製し、次いで作製した複数の石英ガラスインゴットから切り出すテストピースの平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布特性が上記のテストピース e 、 m 、 f 、 g と一致するものをそれぞれ複数個用意した。

【0135】

[実施例 1]

上記のテストピース e 、 m 、 f をレンズ状に加工して図 5 に示す投影光学系 100 を組んだ。より詳しくは、投影光学系 100 を構成する光学部材の内フッ化カルシウム結晶から製造したレンズ $L45$ 、 $L46$ 、 $L63$ 、 $L65$ 、 $L66$ 、 $L67$ を除く残り 23 枚をこのテストピース e 、 m 、 f から構成した。そして、完成した投影光学系に対して投影光学系系全体の符号付複屈折特性値 H 、及び符号付複屈折値のストレール値 S を算出して最も良好な値を示した配置のものを実施例 1 とした。更に、図 11 に示した投影露光装置の投影光学系として実施例 1 を使用した場合の解像度を測定した。図 15A にテストピース e 、 m 、 f をそれぞれ 1 つずつ組み合わせた場合の平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布を示す。

【0136】

[実施例 2]

テストピース e 、 f を用いた以外は実施例 1 と同様にして投影光学系を組んだ。更に、図 11 に示した投影露光装置の投影光学系として実施例 2 を使用した場合の解像度を測定した。図 15B にテストピース e 、 f をそれぞれ 1 つずつ組み合わせた場合の平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布を示す。

【0137】

[実施例 3]

テストピース m 、 f 、 g を用いた以外は実施例 1 と同様にして投影光学系を組んだ。更に、図 11 に示した投影露光装置の投影光学系として実施例 3 を使用した場合の解像度を測定した。図 15C にテストピース m 、 f 、 g をそれぞれ 1 つずつ組み合わせた場合の平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布を示す。

【0138】

[比較例 1]

テストピース g を用いた以外は実施例 1 と同様にして投影光学系を組んだ。更に、図 11 に示した投影露光装置の投影光学系として比較例 1 を使用した場合の解像度を測定した。図 15D にテストピース g の平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布を示す。

【0139】

[比較例 2]

テストピース f 、 g を用いた以外は実施例 1 と同様にして投影光学系を組んだ。図 11 に示した投影露光装置の投影光学系として比較例 2 を使用した場合の解像度を測定した。図 15E にテストピース f 、 g をそれぞれ 1 つずつ組み合わせた場合の平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布を示す。

【0140】

〔比較例 3〕

テストピース f を用いた以外は実施例 1 と同様にして投影光学系を組んだ。図 1 1 に示した投影露光装置の投影光学系として比較例 3 を使用した場合の解像度を測定した。図 1 5 F にテストピース f の平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布を示す。

【0 1 4 1】

以上の実施例 1 ～ 3、比較例 1 ～ 3 の投影光学系の符号付複屈折に基づく光学特性とこれらを使用した投影露光装置の解像度の測定値を表 1 に示す。

【0 1 4 2】

【表 1】

	使用した 石英ガラス	Aio nm/cm	中心 Oi 以外の Bij の極値の有無	Δ Bi nm/cm	Fi nm/cm	H nm/cm	S	解像度
実施例1	e,m,f	e: ≤ 0 m: ≤ 0 f: ≤ 0	e: なし m: なし f: なし	e: 1.6 m: 1.6 f: 0.5	e: ≤ 0.2 m: ≤ 0.2 f: ≤ 0.1	0.12	0.99	0.15
実施例2	e,f	e: ≤ 0 f: ≤ 0	e: なし f: なし	e: 1.6 f: 1.6	e: ≤ 0.2 f: ≤ 0.1	0.17	0.97	0.18
実施例3	m,f,g	m: ≤ 0 f: ≤ 0 g: ≤ 0	m: なし f: なし g: あり	m: 1.6 f: 1.6 g: 3.5	m: ≤ 0.2 f: ≤ 0.1 g: ≤ 0.4	0.38	0.94	0.18
比較例1	g	g: ≤ 0	g: あり	g: 3.5	g: ≤ 0.4	1.9	0.85	測定不能
比較例2	f,g	f: ≤ 0 g: ≤ 0	f: なし g: あり	f: 1.6 g: 3.5	f: ≤ 0.1 g: ≤ 0.4	0.6	0.92	0.20
比較例3	f	f: ≤ 0	f: なし	f: 1.6	f: ≤ 0.1	0.93	0.90	0.22

表1に示す実施例1～3の有する光学特性の結果より、符号付複屈折値に基づく配置条件、すなわち投影光学系全体の符号付複屈折特性値が $-0.5 \sim +0.5 \text{ nm/cm}$ である条件を満たす本発明の投影光学系は良好な結像性能を示すことが確認された。また、本発明の投影光学系を投影露光装置の投影光学系として使用した場合には、非常に高い解像度が達成されることが確認された。特に実施例1を使用した投影露光装置においては、0.

10

20

30

40

50

15 という高い解像度が達成されている。

【0143】

また、平均符号付複屈折値 B_{ij} の半径方向の分布のばらつきの大きなテストピース g を一部使用した実施例3においても良好な結像性能を有しており、更にはこれを使用した投影露光装置の解像度も良好な値を示すことから、光学部材内の符号付複屈折値の分布に注目して符号付複屈折特性値が $-0.5 \sim +0.5 \text{ nm/cm}$ となるように光学部材を配置する本発明の投影光学系の製造方法の有効性が確認された。

【0144】

一方比較例1～比較例3の投影光学系は、符号付複屈折特性値が $+0.5 \text{ nm/cm}$ 以上であり良好な結像特性を示さず、これらを用いた投影露光装置は、実施例1～3のように良好な値の解像度を得ることができなかった。特に、比較例1においては、投影光学系全体の波面収差は測定範囲をはるかに越えており、解像度を測定することが不可能であった。

10

【0145】

産業上の利用可能性

以上説明したように、本発明によれば、光学部材の有する複屈折値の不均一な分布を進相軸の向きに注目して定量的に評価することができ、更に光学部材内の複屈折の分布が互いに打ち消し合うようにそれぞれの符号付複屈折値から光学系全体の符号付複屈折特性値を定量的に見積もりながら光学系を組み上げることが可能となる。従って、光学部材内の複屈折値の不均一な分布が投影光学系の結像性能、或いは投影露光装置の解像度に与える影響を最小限にすることが可能となり、高い結像性能を有する投影光学系、その製造方法、並びに高い解像度を得ることが可能な投影露光装置を提供することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【図1】 図1Aは、符号付複屈折値の概念を示す説明図であり、図1Bは、図1Aに示す光学部材内における符号付複屈折値の分布を示すグラフである。

【図2】 図2Aは、符号付複屈折値の概念を示す別の説明図であり、図2Bは、図2Aに示す光学部材内における符号付複屈折値の分布を示すグラフである。

【図3】 図3Aは、符号付複屈折値の概念を示す別の説明図であり、図3Bは、図3Aに示す光学部材内における符号付複屈折値の分布を示すグラフである。

【図4】 図4Aは、投影光学系を構成する複数の光学部材を示す側面図であり、図4Bは、図4Aの投影光学系を構成する光学部材の断面図である。

30

【図5】 図5は、本発明の投影光学系の一例を示す概略構成図である。

【図6】 図6は、本発明の投影光学系の製造方法の一例を示すフローチャートである。

【図7】 図7は、本発明において用いられる石英ガラスインゴットの合成炉の説明図である。

【図8】 図8Aは、本発明の投影光学系を構成する光学部材内の符号付複屈折値の測定点を示す光学部材の断面図であり、図8Bは、図8Aに示す光学部材内の平均符号付複屈折値の分布を示すグラフである。

【図9】 図9Aは、本発明の投影光学系を構成する光学部材内の符号付複屈折値の測定点を示す光学部材の別の断面図であり、図9Bは、図9Aに示す光学部材内の平均符号付複屈折値の分布を示すグラフである。

40

【図10】 図10Aは、本発明の投影光学系を構成する光学部材内の符号付複屈折値の測定点を示す光学部材の別の断面図であり、図10Bは、図10Aに示す光学部材内の平均符号付複屈折値の分布を示すグラフである。

【図11】 図11は、本発明の投影露光装置の一例を示す概略構成図である。

【図12】 図12A及び図12Bは、図11に示す投影露光装置の照明光学系の構成の一例を示す説明図である。

【図13】 図13は、本発明の投影光学系の実施例及び比較例を構成する光学部材の原材料として製造した石英ガラスインゴットを示す概略図である。

【図14】 図14A～Dは、本発明の投影光学系の実施例及び比較例を構成する光学部

50

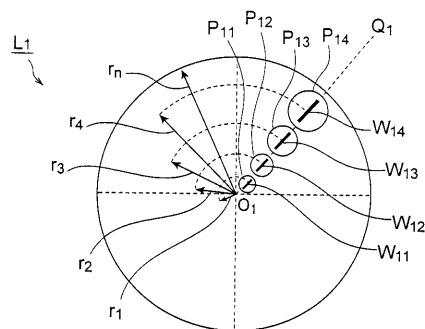
材内の平均符号付複屈折値の分布を示すグラフである。

【図 1 5】 図 1 5 A～F は、それぞれ本発明の投影光学系の実施例 1～3、比較例 1～3 に用いられた光学部材内の平均符号付複屈折値の分布を示すグラフである。

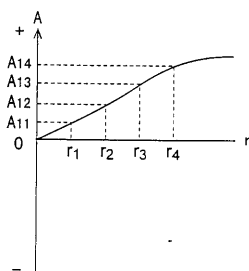
【図 1 6】 図 1 6 A は、従来の投影露光装置の一例を示す概略構成図であり、図 1 6 B は図 1 6 A の投影露光装置に用いられるフライアイレンズの断面図である。

【図 1】

A

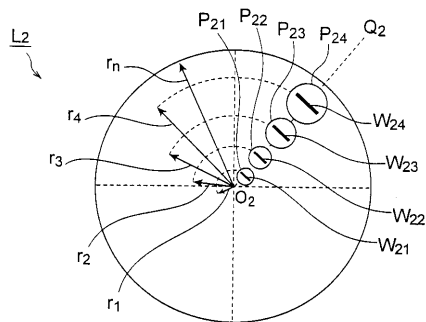


B

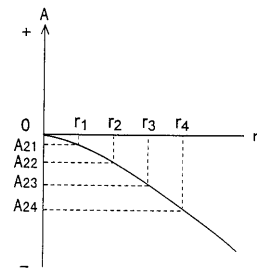


【図 2】

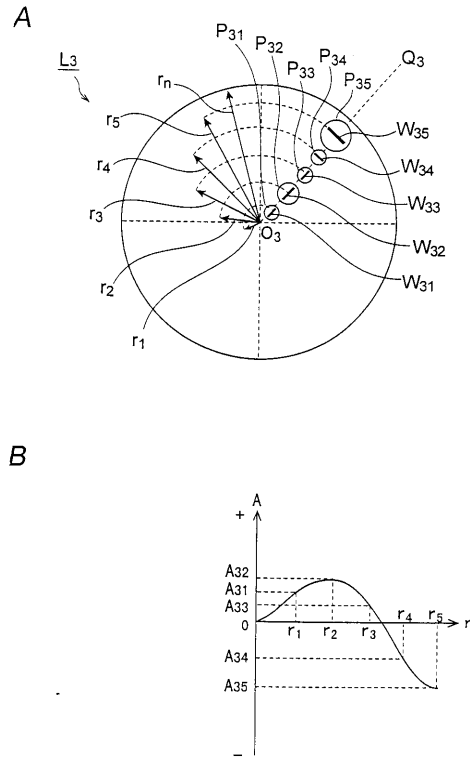
A



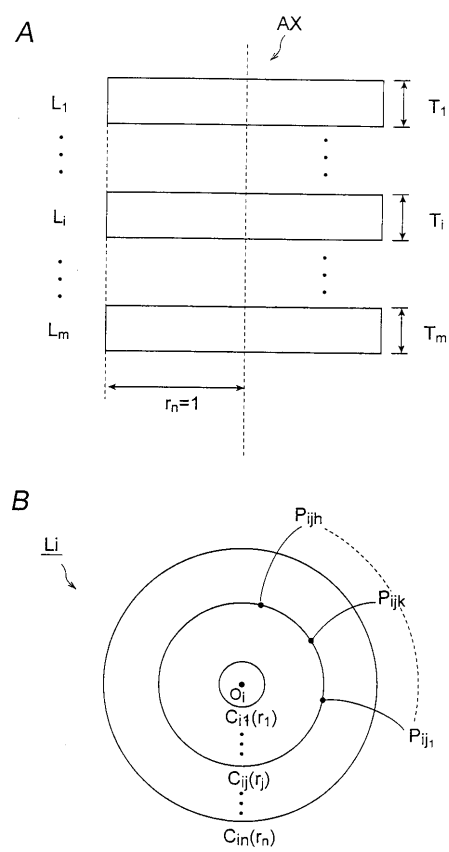
B



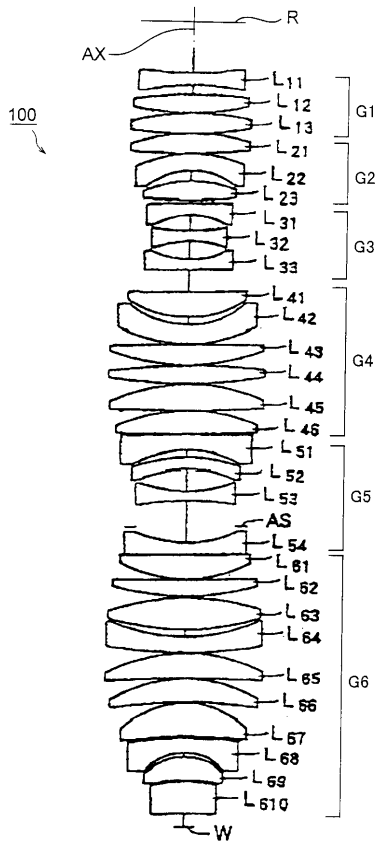
【図 3】



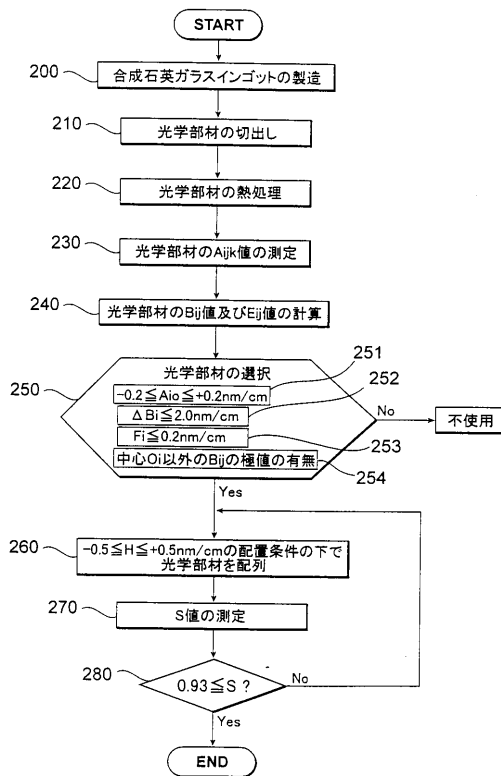
【図 4】



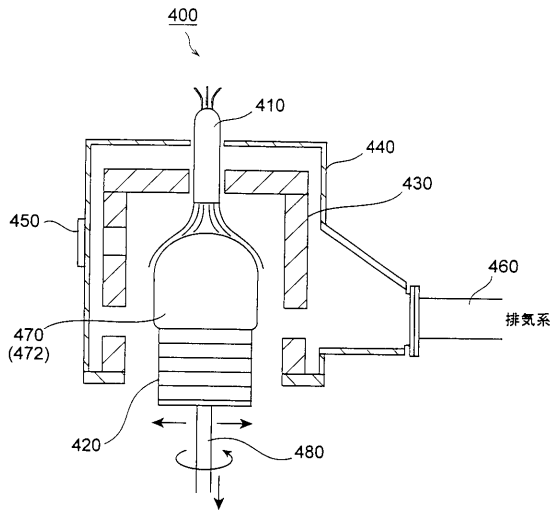
【図 5】



【図 6】

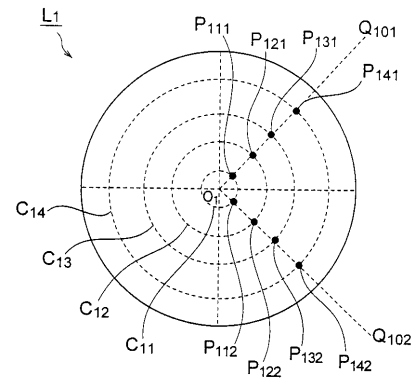


【図 7】

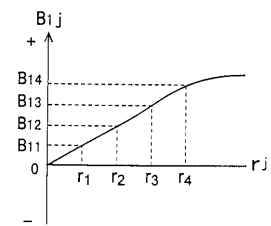


【図 8】

A

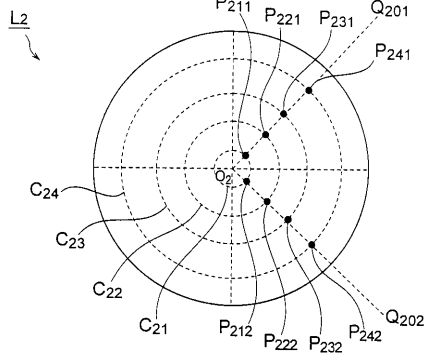


B

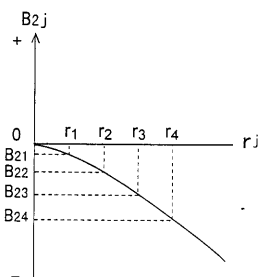


【図 9】

A

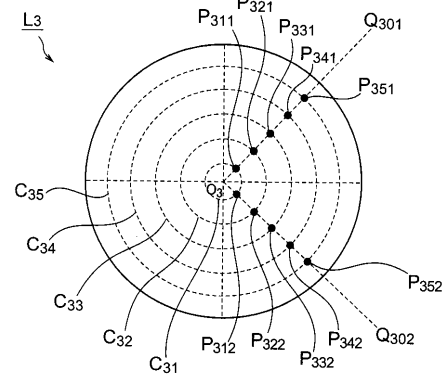


B

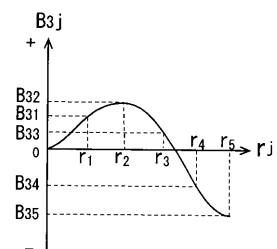


【図 10】

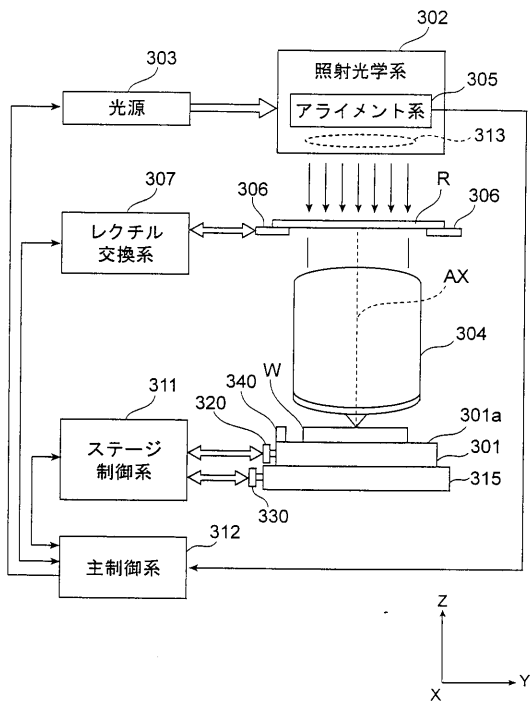
A



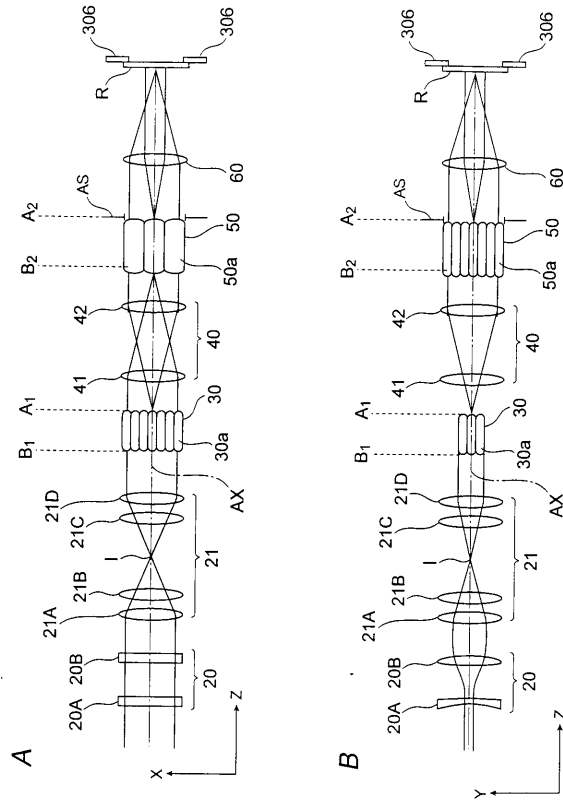
B



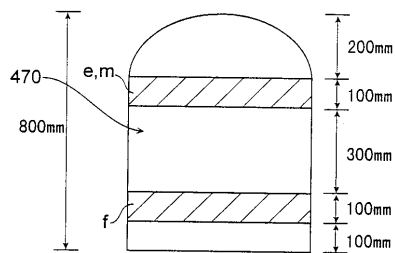
【図 1 1】



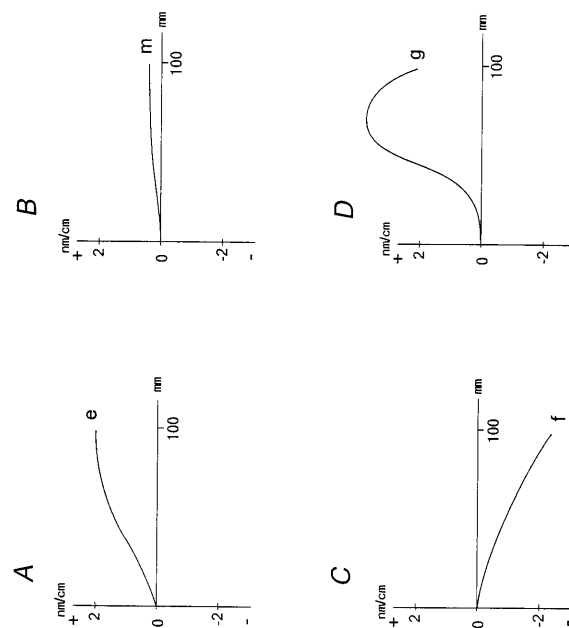
【図 1 2】



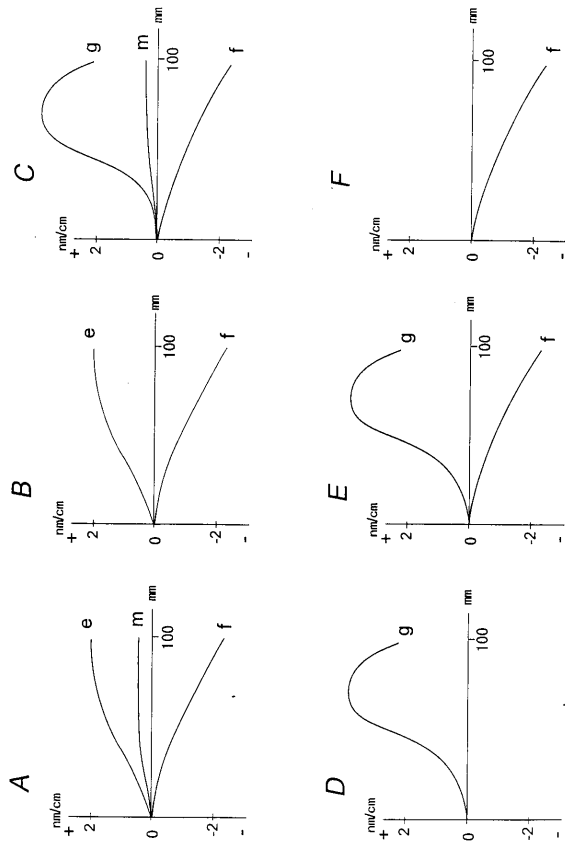
【図 1 3】



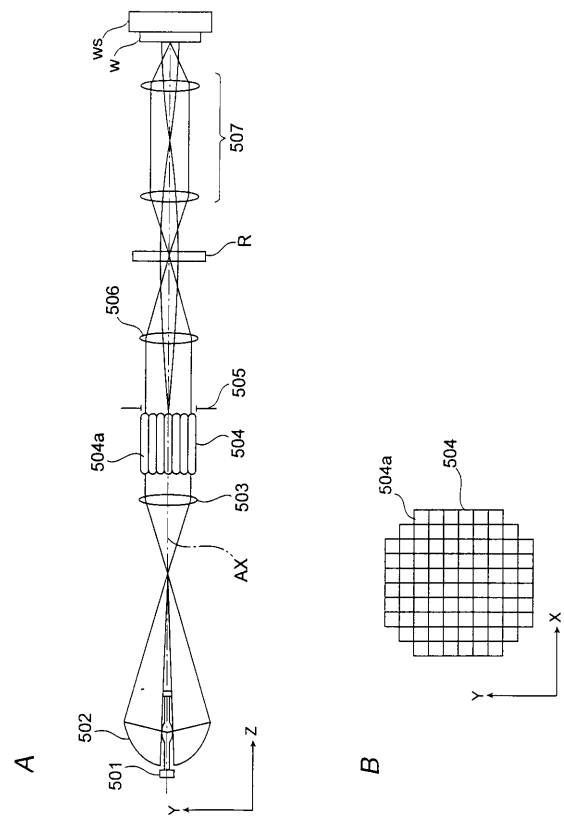
【図 1 4】



【図 15】



【図 16】



フロントページの続き

(72)発明者 田中 一政

東京都千代田区丸の内三丁目2番3号富士ビル 株式会社ニコン知的財産部内

審査官 南 宏輔

(56)参考文献 特開平11-054411 (JP, A)

特開平10-022217 (JP, A)

特開平08-005801 (JP, A)

特開平08-107060 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/027

G02B 13/24

G03F 7/20