

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5069232号

(P5069232)

(45) 発行日 平成24年11月7日(2012.11.7)

(24) 登録日 平成24年8月24日(2012.8.24)

(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 7/00 (2006.01)

H O 1 L 21/30 5 1 6 A

G O 3 F 7/20 (2006.01)

G O 2 B 7/00 D

G O 2 B 7/00 B

G O 3 F 7/20 5 2 1

請求項の数 23 (全 27 頁)

(21) 出願番号 特願2008-523209 (P2008-523209)
 (86) (22) 出願日 平成18年7月24日(2006.7.24)
 (65) 公表番号 特表2009-503826 (P2009-503826A)
 (43) 公表日 平成21年1月29日(2009.1.29)
 (86) 国際出願番号 PCT/EP2006/007273
 (87) 国際公開番号 W02007/017089
 (87) 国際公開日 平成19年2月15日(2007.2.15)
 審査請求日 平成21年5月14日(2009.5.14)
 (31) 優先権主張番号 60/702,137
 (32) 優先日 平成17年7月25日(2005.7.25)
 (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
 コッペン、ルドルフ・エーバー・シュトラ
 ーセ 2
 (74) 代理人 100082005
 弁理士 熊倉 禎男
 (74) 代理人 100067013
 弁理士 大塚 文昭
 (74) 代理人 100086771
 弁理士 西島 孝喜
 (74) 代理人 100109070
 弁理士 須田 洋之

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 マイクロリソグラフィ投影露光装置の投影対物レンズ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

回転非対称結像誤差を低減させるためのマニピュレータ(M1~M11)を備えるマイクロリソグラフィ投影露光装置の投影対物レンズであって、マニピュレータは、

a) 屈折形式の第1の光学素子(52; 252; 352、452; 552; 652; 752; 852; 950; 1052; 1152)と、

b) 第2の素子(50; 250; 350; 550; 650; 750; 850; 950; 1050; 1150)と、

c) 第1の光学素子と第2の素子との間に形成された間隙(54; 254; 354; 54; 654; 754; 854; 954'; 1054)と、

d) 間隙を満たしている液体(62; 62')と、

e) アクチュエータの動作が第1の光学素子の回転非対称変形を生じるように第1の光学素子と結合されたアクチュエータ(711~718; 2711、2712; 3711~3718; 471; 571; 671; 7711~7718; 8711~8714; 9711~9714; 10711~10715; 11711~11715)とを備え、

第1の光学素子(52)の屈折率と液体(62)の屈折率との比率は0.9ないし1.1である、投影対物レンズ。

【請求項 2】

第1の光学素子は平行平板(52; 352; 552; 652; 752)である請求項1に記載の投影対物レンズ。

【請求項 3】

第 1 の光学素子はメニスカスレンズ (2 5 2 ; 8 5 2 ; 1 1 5 2) である請求項 1 に記載の投影対物レンズ。

【請求項 4】

第 1 の光学素子は膜 (8 5 0) である請求項 1 に記載の投影対物レンズ。

【請求項 5】

第 1 の光学素子 (5 2) の変形は、 $m = 2, 3, 4, \dots$ による m 回対称性又は複数の m 回対称性の重ね合せを有する請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の投影対物レンズ。

【請求項 6】

第 1 の光学素子 (5 2) に曲げモーメントを行使するように構成されている少なくとも 2 個のアクチュエータ (7 1 1 ~ 7 1 8) を備え、少なくとも 2 個のアクチュエータ (7 1 1 ~ 7 1 8) は第 1 の光学素子 (5 2) の円周に沿って配置されている請求項 5 に記載の投影対物レンズ。

10

【請求項 7】

アクチュエータ (7 1 1 ~ 7 1 8) は第 1 の光学素子 (5 2) の少なくとも 2 つの変形が異なる m 回対称性を持って生成されるように構成されている請求項 6 に記載の投影対物レンズ。

【請求項 8】

第 2 の素子 (2 5 0 ; 7 5 0 ; 8 5 0 ; 9 5 0) の変形を生成するためにもっぱら第 2 の素子 (2 5 0 ; 7 5 0 ; 8 5 0 ; 9 5 0) だけに作用する第 2 のアクチュエータ (2 7 1 1、2 7 1 2 ; 7 7 1 1' ~ 7 7 1 8' ; 8 7 1 1' ~ 8 7 1 4' ; 9 7 1 1 ~ 9 7 1 4) を備える請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の投影対物レンズ。

20

【請求項 9】

第 1 の光学素子 (5 2) は瞳平面 (3 2) に、又はそのごく近傍に配置されている、請求項 1 ~ 8 のいずれか 1 項に記載の投影対物レンズ。

【請求項 10】

アクチュエータ (3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 ; 4 7 1) は第 1 の光学素子 (3 5 2 ; 4 5 2) の前面又は背面 (3 7 2 ; 4 7 2) に設けられており、アクチュエータ (3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 ; 4 7 1) は、表面 (3 7 2 ; 4 7 2) に対し少なくとも実質的に接線方向である方向に沿って圧縮力及び/又は引張り力を第 1 の光学素子 (3 5 2 ; 4 5 2) で発生させるように構成されている請求項 1 ~ 9 のいずれか 1 項に記載の投影対物レンズ。

30

【請求項 11】

アクチュエータ (3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 ; 4 7 1) は表面に施された層によって形成されており、前記層は少なくとも 1 つの方向に沿って可変の寸法を有する請求項 10 に記載の投影対物レンズ。

【請求項 12】

層は第 1 の光学素子の熱膨張係数と異なる熱膨張係数を有する材料によって形成される請求項 11 に記載の投影対物レンズ。

【請求項 13】

層の温度を制御可能に変化させる装置を備える請求項 12 に記載の投影対物レンズ。

40

【請求項 14】

複数の層 (3 7 1 1 ~ 3 7 1 8) はリングセグメントの形状を有しており、前記リングセグメントが投影対物レンズ (2 0) の光軸 (O A) に関して中心に位置する円形リングを形成する請求項 11 ~ 13 のいずれか 1 項に記載の投影対物レンズ。

【請求項 15】

複数のアクチュエータ (4 7 1) が、投影光が伝播する領域内の表面 (4 7 2) にわたって分散されている請求項 10 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の投影対物レンズ。

【請求項 16】

複数のアクチュエータは投影光の波長で不透明であり、マニピュレータは投影対物レンズの瞳平面に、又はそのごく近傍に配置されている請求項 15 に記載の投影対物レンズ。

50

【請求項 17】

第1の光学素子(352)の前面又は背面(364)に締結されたセンサ(380)を備えており、センサ(380)はアクチュエータ(3711~3718)によって生成された第1の光学素子(352)の変形を測定するように構成されている請求項1~16のいずれか1項に記載の投影対物レンズ。

【請求項 18】

複数のアクチュエータ(671)が、液体(62)と接触している表面(664)の反対側にある第1の光学素子(652)の表面(672)の、投影光が通ることができる領域にわたって分散されている請求項1~17のいずれか1項に記載の投影対物レンズ。

【請求項 19】

第1の光学素子(952)はその非変形状態において回転非対称である形状を有する請求項1~18のいずれか1項に記載の投影対物レンズ。

【請求項 20】

第1の光学素子(952)はその非変形状態において回転非対称である厚さ分布を有する請求項19に記載の投影対物レンズ。

【請求項 21】

第1の光学素子(952)は、液体(62)と接触しており回転非対称の形状を有する第1の表面(964)及び、第1の表面(964)の反対側に第2の表面(972)を有しており、第2の表面(972)は回転対称の形状を有する請求項20に記載の投影対物レンズ。

【請求項 22】

結像誤差を低減させるためのマニピュレータ(M9)を備えるマイクロリソグラフィ投影露光装置の投影対物レンズであって、マニピュレータは、

a) 非変形状態において回転非対称である厚さ分布を有している屈折形式の第1の光学素子(952)と、

b) 第2の素子(986)と、

c) 第1の光学素子(952)と第2の素子(986)との間に形成された間隙(954)と、

d) 間隙を満たしている流体(62)と、

e) 第1の光学素子を変形させるための手段(960)とを備え、

第1の光学素子(52)の屈折率と液体(62)の屈折率との比率は0.9ないし1.1である、投影対物レンズ。

【請求項 23】

請求項1~22のいずれか1項に記載の投影対物レンズを備える投影露光装置。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、マイクロリソグラフィ投影露光装置の投影対物レンズに関する。そうした装置は大規模集積回路や他の微細構造構成要素の製造に使用されている。本発明は特に、回転非対称結像誤差を低減させるマニピュレータを備える投影対物レンズに関する。

【背景技術】**【0002】**

マイクロリソグラフィ(フォトリソグラフィ又は単にリソグラフィとも呼ばれる)は、集積回路、液晶ディスプレイ、その他の微細構造装置の製造のための技術である。マイクロリソグラフィのプロセスは、エッチングのプロセスとともに、例えばシリコンウエーハなどの基板上に形成された薄膜スタックにフィーチャをパターン形成するために使用される。製造の各々の層において、ウエーハにはまず、深紫外(DUV)線といった放射で感光する材料のフォトレジストで被覆される。次に、表面にフォトレジストを備えたウエーハが、投影露光装置でマスクを通して投影光に露光される。マスクはフォトレジスト上に投影される回路パターンを含んでいる。露光後、フォトレジストはマスクに含まれた回路

10

20

30

40

50

パターンに対応する像を生成するために現像される。その後、エッチングプロセスが回路パターンをウエーハの薄膜スタックに転写させる。最後に、フォトリソが除去される。種々のマスクによるこのプロセスの繰り返しが多層微細構造構成要素となる。

【0003】

投影露光装置は一般に、照明システム、マスクを位置合わせするためのマスクアライメントステージ、投影レンズを含み、かつフォトリソで被覆されたウエーハを位置合わせするためのウエーハアライメントステージを含む。照明システムは、矩形スリット又は幅の狭いリングセグメントの形状を有するマスクの視野を照明する。

【0004】

現在の投影露光装置において2つの異なる形式の装置を区別する。一方の形式では、ウエーハ上の各々のターゲット部分が、そのターゲット部分のマスクパターン全体を1回で露光することによって照射され、そのような装置は一般にウエーハステッパと呼ばれる。一般にステップアンドスキャン装置又はスキャナと呼ばれる他方の形式の装置において、各々のターゲット部分は、与えられた参照方向で投影光ビームの下でマスクパターンを漸次的に走査するとともに、基板をその方向と平行又は逆平行に同期して走査することによって照射される。ウエーハの速度とマスクの速度の比率は投影レンズの倍率に等しく、それは通常、例えば1:4などと1未満である。

【0005】

用語「マスク」(又はレチクル)がパターン形成手段として幅広く解釈されるべきであることを理解しなければならない。一般に使用されるマスクは、透過又は反射パターンを含んでおり、例えば、バイナリ、交番位相シフト、減衰位相シフト又は各種ハイブリッド型マスク形式のものとしてよい。しかし、例えばプログラマブルミラーアレイとして実現されるマスクなどのアクティブマスクも存在する。そのようなデバイスの例は、粘弾性制御層と反射面を有するマトリックスアドレスラブルサーフェス(matrix-addressable surface)である。そのようなミラーアレイに関する詳細な情報は、例えば、特許文献1や特許文献2から収集することができる。また、特許文献3に記載されているごとく、プログラマブルLCDアレイもアクティブマスクとして使用することができる。簡単のために、この本文の残りの部分ではマスクとマスクステージを備える装置に特定の関連する。しかし、そのような装置において検討された一般原理は上述したパターン形成手段の幅広い文脈において見なければならない。

【0006】

投影露光装置の開発における重要な目的の1つは、ウエーハ上でますます小さくなる寸法を備える構造をリソグラフィ式に生成できることである。小さな構造は高い集積密度につながり、それは一般に、そのような装置を用いて製造される微細構造構成要素の性能に有利な効果を及ぼす。

【0007】

生成され得る構造のサイズは、主に使用される投影対物レンズの解像度に依存する。投影対物レンズの解像度は投影光の波長に反比例するので、解像度を高める一方法はよりいっそう短い波長を備える投影光を使用することである。現在使用される最も短い波長は248nm、193nm又は157nmであり、従って(深)紫外線スペクトル範囲に存在する。

【0008】

解像度を高める別の方法は、投影対物レンズの像側の最終レンズと露光されるフォトリソ又は別の感光層上との間に残される液浸用間隙に高い屈折率を備える液浸液体を導入するという着想に基づいている。液浸動作向けに設計されており、それゆえ液浸対物レンズとも呼ばれる投影対物レンズは、1を超える、例えば1.4又はそれ以上もの開口数を達成することができる。

【0009】

結像誤差(すなわち収差)の補正は、特に高い解像度を備える投影対物レンズにとってますます重要になっている。投影対物レンズにおける結像誤差が補正できる多くの方法が

10

20

30

40

50

従来技術において知られている。

【0010】

回転対称の結像誤差の補正は比較的単純である。射出瞳における波面変形が回転対称である場合、結像誤差は回転対称であると呼ばれる。用語「波面変形」は、理想的な収差のない波からの波のずれを言う。回転対称結像誤差は、例えば、光軸に沿って個々の光学素子を移動させることによって少なくとも部分的に補正することができる。

【0011】

回転対称ではないそうした結像誤差の補正はもっと難しい。そのような結像誤差は、例えばレンズ、その他の光学素子が回転非対称に加熱されることから生じる。この形式の1つの結像誤差が非点収差であり、それは光軸に位置している視野点に現れる。回転非対称結像誤差の原因は、例えば、スキャナ形式の投影露光装置において一般に見られるように、マスクの回転非対称の、特にスリット形状の照明のためであると考えられる。スリット形状の照明視野は光学素子の不均一な加熱を生じさせ、そしてこれは、たいてい2回対称性を有する結像誤差を誘起する。

【0012】

しかし、例えば3回又は5回など他の対称性を有する結像誤差、又は完全に非対称の波面変形によって特徴づけられる結像誤差が、投影対物レンズにおいて観察されることが多い。完全に非対称の結像誤差はたいてい、投影対物レンズに含まれた光学素子の至る所に統計学的に分布する材料欠陥に起因する。

【0013】

回転非対称結像誤差を補正するために、特許文献4は、レンズの円周に沿って分散された複数のアクチュエータを用いて選択的に変形することができるレンズを提起している。可変形レンズの2つの光学表面が常に同時に変形するので、全体の補正効果は2つの変形した光学表面によって生じる個々の効果の重ね合せとして得られる。これは、測定又はシミュレーションによって決定され、投影対物レンズの他の要素によって発生したある特定の波面変形をそれによって補正することが極めて困難であるので、不利である。さらに、2つの変形した表面の個々の効果は互いに部分的に補償するので、その結果レンズは十分な補正効果を得るために極めて強く変形させられなければならない。

【0014】

特許文献5は、2個の膜又は薄い平行平板が空洞を包囲している、投影対物レンズのための結像誤差を補正するために適格なマニピュレータを開示している。膜又は板は、空洞に包含された流体（気体又は液体）の圧力を変化させることによって変形させることができる。回転非対称変形が膜又は板を回転非対称に枠組することによって達成される。しかし、この既知のマニピュレータの短所は、流体圧力だけが可変パラメータとして使用されるということである。これは、例えば、変形の対称性が膜又は板の枠組によってはっきりと固定されており、従って変更できないことを意味する。

【0015】

特許文献6は像面湾曲を低減するための種々の調整可能マニピュレータを開示している。いくつかの実施形態において、レンズ又は膜といった光学素子が、光学素子に隣接する液体の圧力を変化させることによって変形させられる。

【0016】

特許文献7は、可変プリズム角度を有するプリズムを開示している。プリズム角度の変化は、可変形接続リングによって相互に反らされる2個の平行平板を用いて実現される。板と接続リングによって形成される間隙は、有機液体で満たされる。接続リングは、それに係合するアクチュエータによって変形させられる。この装置は写真システムにおける振動防止光学システムに特に適している。

【0017】

特許文献8は、液体で満たされた空洞を有する眼鏡レンズを開示している。例えば非点収差などの回転非対称結像誤差の補正のために、非円形の円周を有する可変形膜が設けられている。常に複数の光学表面が液体の圧力を変化させることによって同時に変形させら

10

20

30

40

50

れるので、複数の他の変形を導入することなくある特定の（測定された）波面変形を幅広く補正することは難しい。

【0018】

焦点距離を変化させるための可変形レンズ表面を有する多くの他の液体レンズが従来技術には存在する。これらの既知の液体レンズでは、変形は常に回転対称であり、それゆえそれらは回転非対称結像誤差を補正するために適していない。そのような可変焦点距離レンズの例は、特許文献9、特許文献10、特許文献11、特許文献12、特許文献13において見ることができる。

【0019】

【特許文献1】米国特許第5296891号明細書

10

【特許文献2】米国特許第5523193号明細書

【特許文献3】米国特許第5229872号明細書

【特許文献4】米国特許第6338823B1号明細書

【特許文献5】米国特許出願第2001/0008440A1号明細書

【特許文献6】国際公開第2006/053751A2号パンフレット

【特許文献7】米国特許第5665275号明細書

【特許文献8】米国特許第5684637号明細書

【特許文献9】日本国特許出願第8114703A号明細書

【特許文献10】日本国特許第2002131513A号明細書

【特許文献11】日本国特許第2001013306A号明細書

20

【特許文献12】欧州特許第0291596B1号明細書

【特許文献13】米国特許第4289379号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0020】

本発明の目的は、回転非対称結像誤差を低減させるためのマニピュレータを有する、マイクロリソグラフィ投影露光装置の投影対物レンズを提供することである。より詳しくは、マニピュレータは単純な設計を有しており、多種多様な回転非対称の視野又は瞳に関連した結像誤差を補正することを可能にする。

【課題を解決するための手段】

30

【0021】

本発明によれば、この目的はマニピュレータを有する投影対物レンズによって達成される。マニピュレータは、

a) 屈折形式の第1の光学素子と、

b) 第2の光学素子と、

c) 第1の光学素子と第2の光学素子との間に形成された間隙と、

d) 間隙を満たしている液体と、

e) 少なくとも1個のアクチュエータの動作が第1の光学素子の回転非対称変形を生じるように第1の光学素子と結合された少なくとも1個のアクチュエータとを備える。

【0022】

40

少なくとも1個のアクチュエータがもっぱら第1の光学素子だけに作用するので、少なくとも1個のアクチュエータは、第2の光学素子の（少なくとも一般に）望ましくない変形を同時に生じることなく第1の光学素子の両表面を変形させる。しかし、第1の光学素子の一方の表面は液体と接触しており、従ってこの表面の変形は、第1の光学素子の屈折率 n_E と液体の屈折率 n_L との比率が1に近ければ、極めて小さい光学効果だけを及ぼす。屈折率比 $n_E / n_L = 1$ であれば、この表面の変形はいかなる光学効果も及ぼさない。

【0023】

従って、少なくとも1個のアクチュエータによる第1の光学素子の変形は、第1の光学素子の他方の表面、すなわち液体と反対を向いている表面の光学効果だけを変化させる。これは、屈折率比 $n_E / n_L = 1$ についてはまさしく当てはまるが、屈折率比 $n_E / n_L \neq 1$

50

(例えば $0.99 < n_E / n_L < 1.01$) についても少なくとも実質的に当てはまる。例えば $n_E / n_L = 1.1$ 又は 0.9 といったより大きい又は小さい屈折率比であっても、変形した第 1 の光学素子が 1 の屈折率を有する気体によって包囲されている状況と比較した場合に液体と光学素子との界面において光学効果の相当の低減が存在する。従って、単純及び簡潔さのために、屈折率比 n_E / n_L は 1 に等しいと仮定される。

【0024】

マニピュレータが事実上単一の光学表面だけを変形させるので、補正効果はいつでも良好に調整することができる。従来技術では必ず生じるように、2 つの同時変形に起因する光学効果の一般に望ましくない重なりは回避される。

【0025】

1 個以上のアクチュエータの使用は従来技術の解決策に比較して重要な利点である。それは、アクチュエータの装備だけが単一の可変形光学表面の可能性と設計の自由を十分に活用しているからである。光学表面が液体圧力を変化させることによってのみ変形させられる従来技術のマニピュレータでは、この光学表面の複雑かつ変化する変形を生じさせることは不可能である。しかし、本発明によれば、変形を修正するために液体の圧力を付加的に変化させることも可能である。

【0026】

このように、アクチュエータを適切に構成し駆動することによって、単純な回転非対称の波面変形だけでなく、高次のゼルニケ多項式の重ね合せとして数学的に記述されるかなり複雑な波面変形さえも補正することが可能である。

【0027】

この文脈において、用語「液体」は、高粘性ゲル又は類似物も含むように意図されている。液体は単に、それが投影光の波長で十分に透明であり、第 1 の光学素子の変形を第 2 の光学素子に（ほとんど）伝えないという特性を有していなければならないだけである。

【0028】

用語「変形」は、1 個以上のアクチュエータの 2 つの異なる作動状態における第 1 の光学素子の 2 つの形状間の相違を指示するように意図されている。従って、回転非対称変形は、作動状態の変化後に第 1 の光学素子が非回転的に変形していることを必ずしも意味するわけではない。例えば、第 1 の光学素子は以前に回転非対称形状を有しているかもしれないが、アクチュエータはそれが回転対称形状を受けようとして第 1 の光学素子を変形させる。

【0029】

用語「回転非対称」はここで、「軸対称ではない」という意味で使用される。従って、任意の角度に関する基準軸まわりの回転が異なる形状をもたらす場合、形状は回転非対称であると言える。基準軸まわりの回転が同じ形状となるために m の角度だけが存在する場合、形状は m 回（回転）対称性を有すると言える。従って、 m 回回転対称性を有する形状はこの意味でそれでもやはり回転非対称である。

【0030】

マニピュレータの第 1 の光学素子は、平行平板として設計することができる。そのような平行平板は、所要の変形を生じさせるために外部から板に作用しなければならない力を計算することがその場合より単純であるので、可変形要素として極めて適格である。そのような平行平板はより薄くなればなるほど、それらの力はより小さくなる。しかし、極めて薄い板は重力が不都合に板を曲げるという短所を有し、また極めて薄い板はおそらく、適用外力に対し過度に敏感に反応する。従って、数ミリメートルの範囲の板厚さが特に有利であるとわかったが、これは可変形の第 1 の光学素子としてのもっと薄いか厚い板又は薄い膜（ペリクル）の使用を決して排除するものではない。

【0031】

液体で満たすことができる間隙は、投影対物レンズの光軸に沿った方向で、1 mm 未満、好ましくは $2 \mu\text{m}$ 未満の最大厚さを有するとしてよい。少量の液体が、液体における圧力又は温度の変動がマニピュレータの光学特性にあまり強くなく影響を及ぼすという長所を有する。

10

20

30

40

50

【0032】

第1の光学素子に作用するアクチュエータの数、配置と設計に応じて、第1の光学素子のあらゆる変形が幅広い限度内で達成することができる。しかし、結像誤差を補正するためには、 m 回対称性又は複数の m 回対称性の重ねられた変形を生成することが通常十分である（ここで $m = 2, 3, 4, \dots$ ）。

【0033】

原理的に、少なくとも1個のアクチュエータが従来技術において既知の方式で第1の光学素子に係合すればよい。欧州特許第0678768A号に記載されているように、少なくとも1個のアクチュエータが放射方向で第1の光学素子に引張り力又は圧縮力を行使した場合、第1の光学素子の厚さは、著しい曲げが引き起こされることなく回転非対称的に変化するであろう。たいてい第1の光学素子の曲げがより望ましく、それはアクチュエータが第1の光学素子に曲げモーメントを行使するように構成されることを意味する。放射方向以外の方向での力の適用は、米国特許第6388823B1号においてさらに詳細に記載されている。

10

【0034】

スリット形状の照明視野に起因する回転非対称結像誤差の場合、結像誤差の対称性、従って補正に要求される変形の対称性は、極めて良好に予測することができる。その際アクチュエータは、第1の光学素子の円周に沿って配置され適切な位置に分散される。またマニピュレータが、その対称性が前もってわからない他の結像誤差を補正するように意図されている場合、第1の光学素子の少なくとも2つの変形が異なる対称性を伴って生成されるようにアクチュエータを構成することが適切である。

20

【0035】

第2の光学素子は反射形式のもの（すなわちミラー）とすることができる。しかし一般に、第2の光学素子は、レンズを形成するために片側又は両側で湾曲される別の屈折光学素子であるか、又はそれもまた平行平板として設計することができる。アクチュエータはまた、付加的な変形を生成するために第2の光学素子と係合させられてもよい。その変形は回転対称か又は非対称である。

【0036】

第2の光学素子との第1の光学素子の最適な分離を達成するために、マニピュレータは液浸空間における液体の一定圧力を維持するための圧力平衡装置を有する。第1の光学素子の変形に際して、これは圧縮力が液体を通して、それらが望ましくない変形を生じるかもしれない第2の光学素子に伝えられるのを防ぐことができる。

30

【0037】

最も単純な場合、圧力平衡装置は、密封された流路を通して間隙と連通する圧力平衡容器である。液位が圧力平衡容器における周囲気体体積に対して形成される。間隙の体積が第1の光学素子の変形に際して増大した場合、液体は平衡容器から流入する。体積縮小の場合には、液体は流路を通して平衡容器に戻る。その後、間隙における圧力は、周囲気体圧力と平衡容器の液体の静圧とを加えたものに等しい。

【0038】

マニピュレータが投影対物レンズの瞳平面に、又はそのごく近傍に配置された場合、同じ補正効果が全部の視野点について達成することができる。第1の光学素子の可変形表面が瞳平面から $h_{cr} / h_{mr} < 0.5$ であるような距離で位置する頂点を有する時、マニピュレータは瞳平面の近傍に存在する。ここで、 h_{cr} は、一方で光軸から最大距離で物体平面を通過し他方で瞳平面の中央を通過する中心光線の高さである。値 h_{mr} は、一方で光軸上の物体平面を通過し他方でその周縁の瞳平面を通過する周縁光線の高さとして定義される。第1の光学素子の可変形表面は、 $h_{cr} / h_{mr} < 0.15$ である時、瞳平面の間近に配置されているといわれる。

40

【0039】

しかし、マニピュレータを、投影対物レンズ内の他の位置に同様に配置することができる。像面湾曲といった視野依存性結像誤差を補正するためには、マニピュレータは、例え

50

ば投影対物レンズの物体平面又は像平面といった視野平面に、又はその近傍に配置されなければならない。投影対物レンズが中間像平面を有する場合、これは視野依存性結像誤差を補正するマニピュレータにとって理想的な位置であろう。

【 0 0 4 0 】

有利な実施形態において、アクチュエータは第 1 の光学素子の前面又は背面に締結される。アクチュエータは、表面に対し少なくとも実質的に接線方向である方向に沿って第 1 の光学素子で圧縮力及び / 又は引張り力を発生するように構成される。そのようなアクチュエータは、アクチュエータが載る付加的な剛体を必要としないので有利である。

【 0 0 4 1 】

そのようなアクチュエータは、表面に供給される層として実現される。層は、表面に対し接線方向の少なくとも 1 つの方向に沿って可変の寸法を有する。そのような特性を有する層は、例えば、圧電性材料によって、又は第 1 の光学素子の熱膨張係数と異なる熱膨張係数を有する材料によって形成することができる。

【 0 0 4 2 】

後者の場合、材料の温度を、例えば、放射を層上に指向させるか、又は層に電圧を印加するように構成され得る装置を利用して、制御可能に変えることが可能である。

【 0 0 4 3 】

リングセグメントの形状を有する複数の層アクチュエータにより多様な変形が生成される。リングセグメントは、投影対物レンズの光軸に関して中心に位置づけられる円形リングを形成する。

【 0 0 4 4 】

さらに、薄いアクチュエータ層は、投影光がその中を伝播する領域内の光学表面にアクチュエータを分散させるために特に適格である。そのようなアクチュエータが投影光の波長で不透明である場合、マニピュレータは投影対物レンズの瞳平面に、又はそのごく近傍に配置されなければならない。また、アクチュエータが投影光の波長で少なくとも実質的に透明であれば、瞳平面の外側の位置も考えることができる。

【 0 0 4 5 】

圧縮力及び / 又は引張り力を発生させる前述の (層) アクチュエータが他の種類の光学マニピュレータ、例えば液体を含まない、かつ / 又は対称変形だけを生じるマニピュレータにおいても有利に使用できることを理解するべきである。

【 0 0 4 6 】

本発明の別の実施態様によれば、1 個以上の付加的なセンサが第 1 の光学素子の前面又は背面に取り付けられる。センサは、アクチュエータによって生成された第 1 の光学素子の変形を測定するように構成されている。変形及び / 又は変形を生じる力を測定する他の装置も同様に考えられる。

【 0 0 4 7 】

別の有利な実施態様において、複数のアクチュエータは、液体と接触している表面の反対側にある第 1 の光学素子の表面の、投影光がその中を伝播することができる領域にわたって分散されている。このようにして、アクチュエータは液体と接触することなく、それゆえ液体とアクチュエータとの間の望ましくない相互作用が防止される。アクチュエータが層アクチュエータによって形成される場合、それらを支えるための別の透明光学部材を必要としない。従来のアクチュエータが使用される場合、屈折形式の剛性の光学素子が設けられ、その上に複数のアクチュエータが載る。

【 0 0 4 8 】

可能な変形の多様性は、第 2 の光学素子と第 3 の光学素子との間に形成されるさらなる間隙を設けることによってさらに増大する。第 2 の光学素子と第 3 の光学素子はともに屈折形式のものである。第 3 の光学素子を変形させるための手段、例えば第 3 の光学素子と結合されたさらなるアクチュエータが設けられる。第 3 の光学素子の変形は、必ずしもではないが好ましくは、同じく回転非対称である。そのような構成はまた、間隙が液体によってではなく気体によって満たされる場合に有利である。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 9 】

アクチュエータに加えて、液体の圧力が第 1 の光学素子の変形を生じるために使用することができる。このために、ポンプ又は可変形膜といった液体の圧力を変化させるための装置が使用される。この概念はまた、液体の代わりに気体を使用される場合にも適用可能である。

【 0 0 5 0 】

第 1 の光学素子は、その非変形状態において回転非対称である形状を有する。隣接する液体の圧力が変化した場合、これは回転非対称の波面変形を補正することができる回転非対称変形を生じる。しかし、第 1 の光学素子の回転非対称形状はまた、それが（もっぱら）アクチュエータを利用して変形させられる場合にも有用である。

10

【 0 0 5 1 】

回転非対称形状は、回転非対称輪郭の、又は第 1 の光学素子の非変形状態において回転非対称である厚さ分布の結果のどちらかである。後者の場合、液体に接触しており回転非対称形状を有する第 1 の表面を第 1 の光学素子が有する場合に有利である。第 1 の表面の反対側の第 2 の表面は回転対称形状を有する。その非変形状態において、そのような第 1 の光学素子は、回転非対称の表面が液体と接触しており、それゆえ全光学効果に（実質的に）寄与しないので、回転対称の光学効果を有する。

【 0 0 5 2 】

また、回転非対称の厚さ分布を付与するというこの概念は、例えば間隙が液体によってではなく気体によって満たされる、又は変形が気体の圧力変化によってのみ生じるマニピュレータなど、他の種類のマニピュレータとも有利に使用することができる。

20

【 0 0 5 3 】

少なくとも 1 個のアクチュエータを駆動するために、投影露光装置は、結像誤差を決定するためにセンサ装置と接続されているコントローラを備えることができる。センサ装置は、例えば、対物レンズの像平面又は、それと共役な視野平面に配置できる CCD センサを備えることができる。マニピュレータ、コントローラ、センサ装置は一緒に閉じたフィードバックループを形成している。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 5 4 】

本発明の種々の特徴と利益は、添付図面と関連づけてなされる以下の詳細な説明に関連してより容易に理解することができる。

30

【 0 0 5 5 】

図 1 は、極めて図式化された子午断面図において、投影モードでのマイクロリソグラフィ投影露光装置 10 を示している。投影露光装置 10 は、投影光 13 を生成するための照明システム 12 を備える。照明システム 12 は、光源 14、照明光学系 16、視野絞り 18 を含む。照明光学系 16 は種々の照明角度分布を設定することを可能にする。

【 0 0 5 6 】

投影露光装置 10 はさらに、開口絞り AS や複数の光学素子を含む投影対物レンズ 20 を備える。明瞭のために、わずかに数個の光学素子だけが図 1 には図式的に示されており、L1 ~ L6 によって指示されている。投影対物レンズ 20 は、投影対物レンズ 20 の物体平面 22 に配置されたマスク 24 の縮小画像を、投影対物レンズ 20 の像平面 28 に配置された感光層 26 上に投影する。感光層 26 はウエーハ 30 に塗布されたフォトリジストによって形成される。

40

【 0 0 5 7 】

光学素子 L1、L2、L3 は、光学素子 L1、L2 又は L3 の光学効果を変えることができるアクチュエータシステム A1、A2、A3（図式的にのみ指示）を備えている。この実施形態において、光学素子 L1 は、アクチュエータシステム A1 によって高精度で XY 平面内で動かされる両凸レンズである。アクチュエータシステム A2 は、やはり両凸レンズである光学素子 L2 の位置を、それに垂直な方向に沿って、すなわち Z 軸に沿って変化させることが可能である。光学素子 L3 は、図 2 ~ 4 に関して以下でさらに詳細に説明

50

するように、アクチュエータシステム A 3 とともにマニピュレータ M 1 を形成する平行平面板である。

【 0 0 5 8 】

アクチュエータシステム A 1 ~ A 3 は、アクチュエータシステム A 1 ~ A 3 を個別に制御するコントローラ 3 6 と信号線 3 4 1 ~ 3 4 3 によって接続されている。このために、コントローラ 3 6 は、投影対物レンズ 2 0 の結像特性を改善するために、いずれの制御命令をアクチュエータシステム A 1 ~ A 3 に伝達しなければならないかを決定するコンピュータ 3 8 を備える。

【 0 0 5 9 】

ここで例証として示された投影対物レンズ 2 0 は、像側でテレセントリックであると仮定する。これは射出瞳が無限遠に存在することを意味する。用語「射出瞳」は、開口絞り A 5 の像側の像を言う。図 1 において、点線によって表された光線 R 1、R 2 は、開口絞り A 5 が配置されている瞳平面 3 2 における点が以降の光学素子 L 4 ~ L 6 によって無限遠でどのように結像されるかを示している。

【 0 0 6 0 】

投影対物レンズ 2 0 の慎重な取付と調整によっても、それは一般に感光層 2 6 上へのマスク 2 4 の結像を劣化させる結像誤差を有するであろう。結像誤差の種々の原因が存在し得る。

【 0 0 6 1 】

一方で、投影対物レンズ 2 0 の設計から、すなわち詳細には投影対物レンズ 2 0 に含まれる光学素子の寸法、材料、間隔の仕様から生じる結像誤差が存在する。これの 1 例は、200 nm よりも短い波長でますます顕著になるフッ化カルシウム (CaF₂) の固有複屈折である。複屈折の影響は一般に、それが複屈折性材料を通過する時に投影光の偏光状態が望ましくない形で変化するということである。

【 0 0 6 2 】

他方、製造又は材料の欠陥に起因する結像誤差が存在する。一般に、この種の結像誤差は、いったん投影対物レンズが最終的に取り付けられた後に補正できるにすぎない。製造欠陥の例は、いわゆる形状欠陥、すなわち設計者によって指定された形状からの実際の表面のずれを含む。材料欠陥は、屈折又は反射面の状態に少なくとも一般的には影響を及ぼさないが、通常、不均一な屈折率プロファイル又は光学素子内部での局所的に変化する複屈折特性につながる。材料欠陥は、光学素子が作られる材料の不完全さに起因するかもしれない。しかし時には、これらの欠陥は、最初は存在せずに、稼動後何時間又は何ヵ月後に起こることもある。しばしば、この種の材料欠陥は、レンズ材料を不可逆的に圧縮する高エネルギー投影光によって生じる。

【 0 0 6 3 】

また、投影動作の間まで起こらないが、本質的に可逆的であり、それゆえ投影動作の終了後に悪化する結像誤差も存在する。そのような結像誤差の最も重要な原因は投影光によって入力される熱である。レンズ又はミラー材料によって吸収されるこの熱はしばしば不均一な温度分布につながり、従ってまた光学素子の变形にもつながる。变形は通常、回転対称ではなく、しばしば m 回対称性を有する (m = 2、3、4、...)。上述の通り、m 回対称性は、光学素子が 360° / m による回転後に再びその元の形状を有することを意味する。マスクがスリット形照明視野によって照明される投影露光装置の場合、m はたいてい 2 である。

【 0 0 6 4 】

光学素子の形状欠陥及び变形は、波面变形、すなわち射出瞳における理想的波形からのずれにつながる。以下では、どのようにしてそのような波面变形がマニピュレータ M 1 により少なくとも部分的に補正できるかを説明する。

【 0 0 6 5 】

最初に、投影露光装置は投影モードから測定モードに変換される。投影対物レンズ 2 0 の結像特性の極めて迅速な分析を可能にするシャーリング干渉計 4 0 が投影露光装置 1 0

10

20

30

40

50

に組み込まれている。シャーリング干渉計 40 は、照明システム 12 と特殊なテストマスクを使用する。投影露光装置が測定モードに変換されると、テストマスクは、通常レチクルステージと呼ばれる第 1 の変位装置 45 を用いて投影対物レンズの物体平面 22 に導入される。このようにしてテストマスクは最終的に投影されるマスク 24 に取って代わる。ウエーハ 30 を像平面 28 と平行に移動させる第 2 の変位装置 42 (ウエーハステージ) により、ウエーハ 30 は回折格子と取り替えられる。シャーリング干渉計 40 の他の部分、すなわち例えば CCD チップとすることができる感光性センサ 44 は、変位装置 42 の内部に配置されている。シャーリング干渉計 40 の機能は、そうしたものとして当業において既知であり (例えば米国特許第 2002/0001088 A1 号参照)、従ってこれ以上詳細に説明しない。選定した視野点について、シャーリング干渉計 40 は射出瞳における波面を決定することを可能にする。投影対物レンズ 20 における結像誤差が大きくなればなるほど、視野点について測定された波面は射出瞳における理想的波形からより大きくずれるであろう。

10

【0066】

当然のことながら、結像誤差を決定するための複数の既知の装置及び方法のうちの他のいずれかが、シャーリング干渉計 40 の代わりに、又は付加的に使用することができる。

【0067】

図示された実施形態において、非点収差結像誤差に起因する波面変形がゼルニケ多項式 Z_5 によって (特定の視野点について) 射出瞳において記述できることが前提とされる。2 回対称性を伴うそのような波面変形は一般に、アクチュエータ A1、A2 を用いて動かされる光学素子 L1 と L2 によって補正することはできない。

20

【0068】

投影露光装置 10 のコントローラ 36 のコンピュータ 38 はこの時、測定された実際の波面プロフィールを記憶された目標波面プロフィールとコンパレータ 46 において比較し、見つかったあらゆるずれに基づき、当該視野点について波面変形が低減されるように光学素子 L3 の適切な曲げを計算する。計算された曲げは、測定された波面変形と相補的であり、従ってそれらを補償する波面変形につながる。好ましくは、これらの計算は複数の視野点について繰り返され、ある特定の平均化関数 (例えば、算術、二次、又は重み係数を伴うものなど) を用いた平均で、全部の想定視野点について測定された波面変形を低減させる光学素子 L3 の形状が決定される。その後アクチュエータ A3 が、対立効果を伴う補償変形が投影対物レンズ 20 における波面に課されるように制御される。

30

【0069】

マニピュレータ M1 の構造は図 2、3 に関して以下でさらに詳細に説明するが、それらの図はそれぞれ、線 II-II に沿った子午断面図と下方からの図において倍尺でマニピュレータ M1 を示している。

【0070】

マニピュレータ M1 は、平行に配置され小距離によって離間された第 1 の平行平板 50 と第 2 の平行平板 52 を備える。2 個の板 50、52 は各々、投影光の波長で透明である材料より構成される。波長 = 193 nm の場合、板 50、52 に適格な材料の例は、約 1.56 の屈折率 n_{SiO_2} を有する合成石英ガラスである。LiF、NaF、CaF₂ 又は MgF₂ といった材料もまた適格である。波長 = 157 nm の場合、合成石英ガラスがこれらの短波長で十分に透明ではないので、CaF₂ 又は BaF₂ といった材料を使用しなければならない。

40

【0071】

2 個の板 50、52 は、それらの間に残っている間隙 54 が液気密に封止されるように組み立てられている。図 2 の部分的表現において、第 1 の板 50 のための第 1 のフレーム 56 と第 2 の板 52 のための第 2 のフレーム 58 は、中間リング 60 によって離れて保たれている環状フレームとして簡略化された形で描かれている。中間リング 60 は、間隙 54 の液気密閉鎖を保証するシール (詳細には図示せず) を含む。

【0072】

50

間隙 5 4 は液体 6 2 で完全に満たされている。図示された実施形態において、間隙 5 4 は明瞭のために相対的に大きい高さを有する。しかし、2 個の板 5 0、5 2 が単に液体フィルムによってのみ互いに分離されているのがより有利である。投影対物レンズの光軸 O A の方向に沿って測定されるフィルムの厚さは、せいぜい約 2 μm ほどである。

【0073】

液体 6 2 は、例えば、22 の温度で約 1.44 の屈折率 $n_{\text{H}_2\text{O}}$ を有する極めて純粋な脱イオン水とすることができる。第 2 の板 5 2 が石英ガラスで構成される場合、図 1 の第 2 の板 5 2 における上側光学表面 6 4 での屈折率比 $V = n_{\text{SiO}_2} / n_{\text{H}_2\text{O}}$ は 1.01 未満であり、これは 1 % の相対屈折率の差に対応する。第 2 の板 5 2 の上面 6 4 での 1 に近いこの屈折率比 V のために、上面 6 4 は最小限の光学効果を有するにすぎない。上側光学表面 6 4 の効果は、一方で液体 6 2 の、そして他方で第 2 の板 5 2 の材料の屈折率を互いにさらに近づけることによって、よりいっそう低減できる。水を液体 6 2 として使用し、そして例えば、193 nm の波長で約 1.44 の屈折率 n_{LiF} を有する LiF を第 2 の板 5 2 の材料として使用した場合、相対屈折率比 $V = n_{\text{LiF}} / n_{\text{H}_2\text{O}}$ は 0.1 % 未満である。

【0074】

他の物質も同様に液体 6 2 として考えることができる。例えば、マイクロリソグラフィ液浸対物レンズ用の液浸液体として提起されている全部の液体はたいがい適格である。液体 6 2 がフォトレジスト又は他のいずれの感光層 2 6 ととも接触しないので、フォトレジストとの併用性に関する限りいかなる制限もない。

【0075】

間隙 5 4 は、中間リング 6 0 に形成された流路 6 6 を通して容器 6 8 と連通している。容器 6 8 は、投影対物レンズ 2 0 が、その中に設置されたマニピュレータ M 1 とともに作動状態にある時に、液位が間隙 5 4 より上方にあるように配置されている。このようにして、間隙 5 4 の液体 6 2 の圧力は、周囲の気体体積の圧力と、液体 6 2 が容器 6 8 において発生させる静圧との合計に等しい。

【0076】

間隙 5 4 はまた、容器から供給された液体 6 2 が排出される排水路（図示せず）とも接続されているかもしれない。両方の流路は、液体 6 2 を浄化するための浄化手段及び、さらには液体 6 2 の温度を所要の目標温度に保つための温度制御手段を含む閉じた循環システムの一部とすることができる。液体 6 2 の温度は、屈折率比 V が可能な限り 1 に近くなるように制御される。付加的又は代替的に、液体 6 2 の温度は、マニピュレータ M 1 によって生じる光学効果を変化させるための、付加的なパラメータとして使用することができる。

【0077】

中間リング 6 0 の他方側に、第 2 の板 5 2 のための第 2 のフレーム 5 8 が、一緒にアクチュエータシステム A S 3 を形成するアクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 のための保持リング 7 0 に隣接している。第 2 の板 5 2 の円周上のアクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 の分布は、図 3 の下方からの図においてより明確に見ることができる。アクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 はねじピンとして簡略化された形で描かれており、ねじピンは第 2 の板 5 2 に接着又は別の方式で連結されている。保持リング 7 0 の歯車伝動装置（詳細には図示せず）を通して、アクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 の各個のねじピンは、図 2 において両方向矢印によって指示された通り、極めて高い精度でねじピンの縦軸に沿ってマイクロメータドライブの方式で互いに独立して動かされる。それによってアクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 は第 2 の板 5 2 に曲げモーメントを行使することができ、それはその変形をもたらす。変形の形状は、アクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 が第 2 の板 5 2 の円周に沿って配置される方式によって、そして第 2 の板 5 2 に行使される力の方向と大きさによって決定される。

【0078】

図 2、3 におけるねじピンとしてのアクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 の表現は単に例示的であるにすぎない。例えば圧電素子などの他の形式のアクチュエータを、特に微調整力を行行使するために一般に使用することができる。アクチュエータの他の例は、図 6 ~ 10 に

10

20

30

40

50

関して以下でさらに説明する。

【 0 0 7 9 】

図 2、3 に示された状態において、アクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 は第 2 の板 5 2 に対し、それがこの実施形態において平面平行であるその本来の構成を有するように、いかなる曲げモーメントも行使しないことが前提とされる。図 2 に示された子午平面において互いに対向して位置するアクチュエータ 7 1 1 と 7 1 5 がこの時、ねじピンを保持リング 7 0 から下方にねじることによって作動させられた場合、第 2 の板 5 2 は図 4 に示されたように曲がる。アクチュエータ 7 1 2 と 7 1 4 及び 7 1 6 と 7 1 8 は、それらが第 2 の板 5 2 と力を伴わずに連結されるように相応に再調整される。図 4 に示されたこの状態において、第 2 の板 5 2 は 2 回対称性を伴うサドル様に変形する。そのような変形は、マスク 2 4 上でスリット形の照明視野によって生じる、ゼルニケ多項式 Z_5 によって記述できる波面変形を補正するために適切である。

10

【 0 0 8 0 】

明瞭のために、アクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 による第 2 の板 5 2 の変形は、図 4 では相当に誇張して表現されている。実際には、約 5 0 0 又は、さらには 5 0 ナノメートル未満だけの曲げが所要の波面変形を実現するために十分であろう。この高感度は主に、屈折率比が 1 に近く存在するために、第 2 の板 5 2 の上側光学表面 6 4 が下側光学表面 7 2 に由来する光学効果を補償しないという事実起因する。

【 0 0 8 1 】

間隙 5 4 の体積は一般に第 2 の板 5 2 の変形の際に変化する。例えば、図 4 に示された変形によれば、この体積のわずかな体積増が起きる。第 2 の板 5 2 の変形の間に流体 6 2 を通して第 1 の板 5 0 に行使される圧縮力を防ぐために、液体 6 2 を容器 6 8 から流路 6 6 を通して流すことができる。

20

【 0 0 8 2 】

結果として生じる容器 6 8 における液位の低下は、図 4 では誇張して表現されており、実際には、生じる体積変化は容器 6 8 の液位がほんのわずかに変化する程度に小さい。従って、静圧は間隙 5 4 においてほとんど一定のままである。これは、第 2 の板 5 2 がアクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 を用いて第 1 の板 5 0 と完全に独立して変形できることを保証する。

【 0 0 8 3 】

結像誤差を補正するために第 2 の板 5 2 の異なる変形が必要であることがシャーリング干渉計 4 0 を用いた分析の間にわかった場合、コントローラ 3 6 はアクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 を別の方式で適切に駆動することができる。例えば、互いの間でそれぞれ 1 2 0 ° の角度になる、アクチュエータ 7 1 2、7 1 5、7 1 8 を同時に作動させることによって、3 回対称性を伴う変形が生成される。それらと 6 0 ° ずつ角度上オフセットされたアクチュエータ 7 1 1、7 1 4、7 1 6 は、対応する対抗動きを実行するかもしれない。さらに、複数の変形を重ね合わせることも可能であり、それによりかなり複雑な波面変形でさえも補正されるようになる。このためには、個々のアクチュエータ 7 1 1 ~ 7 1 8 の偏倚が単純に合計される。

30

【 0 0 8 4 】

図 5 は、図 2 に類似の子午断面図において M 2 によって全体として指示されたマニピュレータの別の実施形態を示している。同じ部品には図 2 ~ 4 においてと同じ参照数字が使用されており、そして互いに対応する部品には 2 0 0 ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータ M 2 では、図 2 ~ 4 に示された実施形態の上側平行平面板 5 0 が厚いメニスカスレンズ 2 5 0 に取り替えられており、下側平行平面板 5 2 は薄いメニスカスレンズ 2 5 2 に取り替えられている。従って、間隙 2 5 4 の液体フィルムは湾曲している。結果的に、マニピュレータ M 2 は全体としてメニスカスレンズの効果を有する。厚いメニスカスレンズ 2 5 0 は代替的又は付加的に変形させられるかもしれない。このために、図 5 は、厚いメニスカスレンズ 2 5 0 において曲げモーメントを生成することができるアクチュエータ 2 7 1 1、2 7 1 2 を示している。従って、マニピュレータ M 2 は波面変形

40

50

のより多様な補正を可能にする。

【 0 0 8 5 】

図 6、7 はそれぞれ、線 VI - VI に沿った子午断面図と下方からの図においてマニピュレータ M 3 の別の実施形態を示している。同じ部品には図 2 ~ 4 においてと同じ参照数字が使用されており、そして互いに対応する部品には 3 0 0 ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータ M 3 は、投影対物レンズ 2 0 内で瞳平面 3 2 の近く、又は光軸 O A に沿った他の位置に配置されるために同様に適格である。

【 0 0 8 6 】

マニピュレータ M 3 は主に、それが前の実施形態の保持リング 7 0 といった固定され剛性の対抗部材に支持される必要はない異なる種類のアクチュエータを備えるという点で、
10
上述したマニピュレータ M 1 及び M 2 と異なる。より具体的には、マニピュレータ M 3 は、第 2 の平行平板 3 5 2 の下側光学表面 3 7 2 に単に載っている 8 個のアクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 を備える。図 7 において最も良く見られるように、アクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 は、図示された実施形態において、それらがスリット状の隙間によって断続したリングを形成するように第 2 の板 3 5 2 の円周の近くに配置されたリングセグメントの形状を有する。しかし、アクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 のセグメントはまた、それらが隣接する要素に当接して結果的に疑似連続アクチュエータリングとなるように構成することもできる。

【 0 0 8 7 】

各々のアクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 は、この実施形態では圧電素子によって形成されている。圧電素子のクリスタルは、付加的なコネクタ層、接着剤、接合、溶融接合、
20
ソルダリング又はオプティカルコンタクトリングを用いて第 2 の板 3 5 2 の下面 3 7 2 に固定することができる。アクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 は第 2 のフレーム 5 8 にすぐ隣接して配置されるので、圧電素子に電圧を供給するための導体が第 2 のフレーム 5 8 内部に付着又は受容される。

【 0 0 8 8 】

圧電素子のクリスタルは、電圧の印加時に、図 7 において両方向矢印で示された接線方向に沿ってアクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 によって引張り力又は圧縮力が生成されるように整列されている。従って、力の方向は光軸 O A に対し垂直である平面において延在する。これは、光軸 O A に平行な力が生成される以前の実施形態のアクチュエータ 7 1
30
1 ~ 7 1 8 と異なる。

【 0 0 8 9 】

アクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 が第 2 の板 3 5 2 の片側だけに配置されているので、第 2 の板 3 5 2 内部にはその曲げを生じる非対称な力の分布が存在するであろう。これは、アクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 によって生成される力が実質的に回転対称である場合にも当てはまる。個別に制御可能なアクチュエータ層が第 2 の板 3 5 2 の円周のまわりにより多く配置されればされるほど、より多くの異なる変形がアクチュエータ層によって生成される。アクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 が同じ幾何学形状を有する必要はなく、特定の結像誤差を補正するために要求される特定の所要の変形に適応されることを理解するべきである。
40

【 0 0 9 0 】

保持リング 7 0 又は類似の対抗部材を必要としないこととは別に、アクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 は、より平坦であり、従って投影対物レンズ 2 0 内でより少ない余地を必要とする。

【 0 0 9 1 】

別の実施形態において、アクチュエータ層 3 7 1 1 ~ 3 7 1 8 は、圧電素子によってではなく、第 2 の板 3 5 2 と異なる熱膨張係数を有する層によって形成される。そのような層が例えば電圧の印加又はレーザー光線による照明によって加熱された場合、そのような層の長さの変化はやはり、光軸 O A に垂直な平面において第 2 の板 3 5 2 での圧縮力又は引張り力をもたらす。従って、第 2 の板 3 5 2 は異なる熱膨張係数の結果として変形する
50

であろう。

【0092】

マニピュレータM3が閉じたフィードバック制御ループの一部である場合、第2の板352は、許容できるしきい値を下回るまで結像誤差を低減させることが必要である限り変形させられる。しかし、第2の板352がアクチュエータ層3711~3718によって実際にどれほど変形させられたかの情報が得られれば、補正プロセスは促進される。このために、アクチュエータ層3711~3718が下側光学表面372に配置されるのと同様に、センサ380が第2の板352の上側光学表面364でその円周のまわりに配置される。センサ380はアクチュエータ層3711~3718によって生成された変形を測定する。センサ380によって生成された測定された厚さデータは好適にコントローラ36に供給され、それによりアクチュエータ層3711~3718は、測定された変形と、結像誤差を補正するために要求される計算された目標変形との間のあらゆる差を低減させるために調整される。

10

【0093】

センサ380はまた圧電素子によっても形成することができる。これらの素子は、それらが圧縮力又は引張り力を受けた場合に電圧を発生する。他の種類のセンサ380、例えばゲージ間の応力に依存して各自の電気抵抗を変化させる抵抗式ひずみゲージも同様に考えられる。

【0094】

当然のことながら、アクチュエータ層3711~3718とセンサ380の位置は逆にしてもよく、すなわちアクチュエータ層3711~3718が上側光学表面364に施され、センサは下側光学表面372に形成することができる。これらの要素がどちら側に施されるかの選択は、液体62との要素の併用性に依存するかもしれない。

20

【0095】

なおさらなる代替実施形態において、アクチュエータ層は、上側光学表面364と下側光学表面372の両方に施される。そのような構成は、第2の板352のより大きな変形が利用可能でなければならぬ場合に好都合である。例えば、非対称レンズ加熱によって生じるようなより強い波面変形を補正するために、第2の板352の所要の変形は約500nmほどにもなるかもしれない。

【0096】

図8は、本発明のさらなる実施形態に従ったマニピュレータM4の下方からの図である。同じ部品には図2~4においてと同じ参照数字が使用されており、そして互いに対応する部品には400ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータM4は、投影対物レンズ20内で瞳平面32の近く、又は同じく光軸OAに沿った他の位置に配置されるために同様に適格である。マニピュレータM4は、大多数のアクチュエータ層471が第2の板452の下面472全体に分散されているという点で図6、7に示されたマニピュレータM3と異なる。

30

【0097】

アクチュエータ層471が投影光の波長で透明でないか、又は部分的に透明であるにすぎない場合、マニピュレータM4は投影対物レンズ20の瞳平面に、又はそのごく近傍に配置されなければならない。その際、アクチュエータ層471によって吸収される投影光は、投影レンズ20の像平面28において光強度が低下するであろうが、瞳平面から遠く離れた構成の場合のように、結像誤差を生じない。光損失を小さく保つために、アクチュエータ層471の全領域は、板52の、投影光が通る領域の30%、好ましくは10%を超えてはならない。

40

【0098】

光損失は、アクチュエータ層471と必要な電気配線(図8には示さず)が投影光の波長で透明であれば、(少なくとも実質的に)回避することができる。この場合、マニピュレータM4を投影対物レンズ20の瞳平面の外に配置することも考えられる。透明アクチュエータ層471を、圧電効果を示す結晶性クォーツ素子によって形成することができる

50

。圧電素子のための電気配線は、200nm未満の波長で透明であるインジウム - スズ酸化物 (ITO) で作製することができる。電気配線が極めて薄い導電性ストライプによって形成される場合、やはりアルミニウムといった不透明導電性材料が、電気配線による吸収に起因する光損失をほとんど増加させることなく使用することができる。

【0099】

アクチュエータ層471が第2の板452の下側光学表面472全体に分散されているので、第2の板452のほとんどあらゆる任意の変形を生じさせることが可能である。より多くのアクチュエータ層471が設けられれば設けられるほど、生成される変形の多様性は大きくなる。従って、マニピュレータM4は、高次のゼルニケ多項式によってのみ適切に記述できる極めて複雑な波面変形も補正することを可能にする。

10

【0100】

図8に示された実施形態において、アクチュエータ層471は一般にカーテシアングリッドを形成しており、それにより圧縮力及び/又は引張り力が、図8において両方向矢印482、484によって示された通り2つの直交方向で第2の板52に加えられる。当然のことながら、アクチュエータ層471の他の構成も、予想される結像誤差及びそれらの誤差を補正するために要求される第2の板52の変形に応じて選択することができる。例えば、アクチュエータ層471は、光軸OAから第2の板452の縁まで放射状に延びるストライプとして形成されるかもしれない。この構成は、第2の板452の変形によって補正される波面変形の対称性に適応されたm回対称性を有する。適切な構成の別の代替策は、ハチの巣状パターンが得られるようにアクチュエータ層のストライプを配置すること

20

【0101】

上述した実施形態はすべて可変形光学表面に隣接して液体を含むが、薄いアクチュエータ層を可変形光学表面に施すという原理は幅広い意味にとることができるという点に留意しなければならない。従って、薄いアクチュエータ層はまた、液体と接触していないそれらの屈折又は反射光学表面にも施すことができる。

【0102】

図9は、図2に類似の子午断面図において、さらに別の実施形態に従ったマニピュレータM5を示している。同じ部品には図2～4においてと同じ参照数字が使用されており、そして互いに対応する部品には500ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータM5は、投影対物レンズ20内で瞳平面32の近く、又は同じく光軸OAに沿った他の位置に配置されるために同様に適格である。

30

【0103】

マニピュレータM5は、主にアクチュエータ571が第2の板552の下側光学表面572にではなくその上側光学表面564に配置されるという点で、図2～4に示されたマニピュレータM1と異なる。従って、アクチュエータ571は間隙554内に配置され液体62に完全に浸漬されている。さらに、アクチュエータ571は、第2の板52の円周のまわりに配置されているのではなく、その上側光学表面564全体に分散している。図8に示されたマニピュレータM4と同様、これはマニピュレータM5が、アクチュエータ571によって生じる吸収のために、投影対物レンズ20の瞳平面に、又はそのごく近傍に配置されなければならないことを意味する。それとは別に、アクチュエータ571は投影光の波長で透明でなければならないか、又はアクチュエータ571によってカバーされる全領域は、光損失を低減し光吸収から生じる熱に起因する問題を回避するために小さく保たなければならないかのどちらかである。

40

【0104】

第2の板552のほとんどあらゆる任意の変形が実現可能であるように、第2の板552の上側光学表面564上に格子状に、アクチュエータ571を配置することができる。アクチュエータ571を個別に制御するために必要な電気配線(図示せず)は好ましくは、アクチュエータ571が操作された場合に著しくは変形しない剛性の第1の板550の下面に施される。これは変形に起因する電気配線の損傷の危険が低減する。

50

【 0 1 0 5 】

アクチュエータ 5 7 1 は、例えば結晶性クォーツで作製された、圧電素子として実現することができる。圧電素子は、光軸 O A に沿ったそれらの長さが印加電圧に応答して変化するように配向されている。代替として、それぞれの温度に応じてこの方向に沿ってそれぞれの長さを変化させる要素を使用することができる。温度は、例えば、これらの要素を流れる電流によって、又は外部レーザーによって変化するであろう。

【 0 1 0 6 】

図 1 0、1 1 はそれぞれ、線 X - X を通る子午断面図と下方からの図においてさらに別の実施形態に従ったマニピュレータ M 6 を示している。同じ部品には図 2 ~ 4 においてと同じ参照数字が使用されており、そして互いに対応する部品には 6 0 0 ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータ M 6 は、投影対物レンズ 2 0 内で瞳平面 3 2 の近く、又は同じく光軸 O A に沿った他の位置に配置されるために同様に適格である。

10

【 0 1 0 7 】

マニピュレータ M 6 は、主にアクチュエータ 6 7 1 が液体 6 2 で満たされた間隙 6 5 4 内に分散されていないという点で、図 9 に示されたマニピュレータ M 5 とは異なる。代わりに、アクチュエータ 6 7 1 は第 2 の板 6 5 2 の下側光学表面 6 7 2 にわたって分散させられている。この実施形態において、アクチュエータ 6 7 1 は光軸 O A に沿って各自の長さを変化させることが前提とされており、従って剛性の対抗部材に載っていなければならない。この対抗部材は、第 2 の板 6 5 2 に隣接する保持リング 7 0 に受け入れられた第 3 の透明な平行平板 6 8 8 として実現されている。第 3 の板 6 8 8 は、それがアクチュエータ 6 7 1 によって変形可能ではない、又は少なくとも著しくは変形可能ではないような厚さを有する。従って、アクチュエータ 6 7 1 の動作が光軸 O A に沿って各自の長さの変化をもたらす場合、それは第 3 の板 6 8 8 ではなく第 2 の板 6 5 2 の変形をもたらすにすぎない。層アクチュエータが図 6 ~ 8 に示された実施形態の場合のように使用される場合、第 3 の板 6 8 8 は省かれるかもしれない。

20

【 0 1 0 8 】

液体 6 2 の外部でのアクチュエータ 6 7 1 の配置は種々の理由で有利である。第一に、アクチュエータ 6 7 1 は液体に浸漬されておらず、気体、例えば窒素といった不活性ガスによって包囲される。それゆえ液体 6 2 とアクチュエータ 6 7 1 の選択において、液体 6 2 がアクチュエータ 6 7 1 によって汚染されるかどうか、かつ / 又は液体 6 2 がアクチュエータ 6 7 1 に損傷を与えるかどうか、いかなる配慮もする必要がない。それとは別に、液体との電気配線（図示せず）の接触に由来するあらゆる問題も完全に回避される。さらに、隣接する板へのアクチュエータ 6 7 1 の締結は、多くの締結技術が周囲の液体に起因する損傷に影響されやすいので、相当に容易になる。その理由で、アクチュエータ 6 7 1 は、図 9 に示されたマニピュレータ M 5 の場合には一般に困難であるか不可能でさえある、オプティカルボンディングによって第 2 の板 6 5 2 と第 3 の板 6 8 8 に締結することができる。別の利点は、薄い可変形の第 2 の板 6 5 2 がこの時、組立及び保守作業中に可変形の第 2 の板 6 5 2 を損傷から保護する 2 個のより厚くより剛直な板に挟まれているということである。

30

【 0 1 0 9 】

マニピュレータ M 6 を設計する際には、以下の側面が考慮される。

40

【 0 1 1 0 】

可変形の第 2 の板 6 5 2 は、それを変形させるために要求される力を、従ってアクチュエータ 6 7 1 の数と大きさを少なくするために、できる限り薄くなければならない。他方、第 1 の板 6 5 0 と第 3 の板 6 8 8 はできる限り剛性でなければならない。アクチュエータ 6 7 1 の数は、全体のアクチュエータ領域を、それゆえ瞳平面における光損失を最小限にするために、できる限り少なくなければならない。さらに、アクチュエータ 6 7 1 は、低い電力消費を有していなければならず、それらの小サイズにもかかわらず著しいドリフト挙動を示してはならない。上で言及した圧電素子とは別に、ローレンツアクチュエータ又は熱弾性アクチュエータがしばしばこれらの判定基準を満たす。アクチュエータ 6 7 1

50

は、CVD/PVD法、スパッタリング又はエッチングプロセスを用いて第3の板688上に製作することができる。また、同様の考慮事項は図6～9に示された他の実施形態にも当てはまる。

【0111】

上述において、第1の板650、第2の板652、第3の板688は密封して環状フレームに受け入れられることが前提とされている。しかし、例えばアイソスタティックマウンティング(isostatic mounting)又は弾性脚を備えるマウントなどといった、これらの板を取り付けるための他の方法も代わりに使用することができ、それらは当業においてそうしたものとして知られている。液体62で満たされた間隙654の密封エンクロージャは、図16において下方に示されたものに類似のベローズによって実現されるかもしれない。

10

【0112】

図11に示したようなアクチュエータ671の例示的配置は、種々の形で変更することができる。アクチュエータ671を規則的な格子として配置する代わりに、補正を必要とする予想される波面変形に特殊に適応された構成が考慮されるかもしれない。

【0113】

図12及び13は、線XII-XIIに沿った子午断面図と下方からの図において別の実施形態に従ったマニピュレータM7を示している。同じ部品には図2～4においてと同じ参照数字が使用されており、そして互いに対応する部品には700ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータM7は、投影対物レンズ20内で瞳平面32の近く、又は同じく光軸OAに沿った他の位置に配置されるために同様に適格である。

20

【0114】

マニピュレータM7は主に、第1の厚い板50が、複数の第1のアクチュエータ7711'～7718'の動作時に変形可能である薄い第1の板750で置き換えられているという点で、図2～4に示されたマニピュレータM1とは異なる。第1のアクチュエータ7711'～7718'は、第1のフレーム56と連結されている第2の保持リング70'に受け入れられている。従って、マニピュレータM7は、個別に変形させられる2つの光学表面を有する。これらの変形は液体62の圧力変化によって(だけ)ではなく第1のアクチュエータ7711'～7718'と第2のアクチュエータ7711～7718によって独立して生じるので、多様な変形が生成される。

30

【0115】

図14は、第1と第2の可変形板750、752がそれぞれ個別に変形させられる構成によるマニピュレータM7を示している。ここでは、一般には細長いスリット状の形状を有する照明視野により生じるごとく、2回回転対称性を第2の板752がその変形構成において有するようにして、第2のアクチュエータ7711～7718が制御されるということが前提とされている。第1の板750は、その変形構成において、3回回転対称性を伴う形状を有することが前提とされている。これに関して、第2の板752のための第2のアクチュエータ7711～7718は、第1の板750に作用する第1のアクチュエータ7711'～7718'と同様にして第2の板752の円周のまわりに配置されていないことが指摘される。このように、第1の板750は、第2の板752では達成できない

40

【0116】

図15は、子午断面図においてさらに別の実施形態に従ったマニピュレータM8を示している。同じ部品には図2～4においてと同じ参照数字が使用されており、そして互に対応する部品には800ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータM8は、投影対物レンズ20内で瞳平面32の近く、又は同じく光軸OAに沿った他の位置に配置されるために同様に適格である。

【0117】

マニピュレータM8は、主に間隙54が剛性の平行平板86によって第1の間隙854'と第2の間隙854に分割されているという点で、図12～14に示されたマニピュ

50

レータM7とは異なる。第1と第2の間隙854'、584に隣接する可変形部材は、この実施形態ではペリクル850と薄いメニスカスレンズ852によって形成されている。図15の子午断面図において、第1のアクチュエータ8711'~8714'はペリクル850を変形させるための第1の保持リング70'に受け入れられていることがわかるであろう。第2のアクチュエータ8711~8715はメニスカスレンズ852を変形させるための第2の保持リング70に受け入れられていることがわかるであろう。

【0118】

剛性板86は、メニスカスレンズ852の変形が液体の圧力変動を通してペリクル850の変形を生じない、そしてその逆も同様であることを確実に保証する。

【0119】

液体62、62'で満たされた2つの完全に分離された間隙854、854'の備えはさらに、液体62、62'の圧力を変化させることによって互いに独立してペリクル850とメニスカスレンズ852を変形させることを可能にする。このために、マニピュレータM8は、それぞれ液体62、62'を収容する容器68、68'、及び間隙854、854'に到る流路66、66'と接続されている2個のポンプ860、860'を備える。ポンプ860、860'を適切に制御することによって、間隙854、854'の液体62、62'の圧力を独立して変化させることが可能である。

【0120】

従って、ポンプ860、860'によって制御された圧力は、第1と第2のアクチュエータ8711'~8714'及び8711~8715に加えて、ペリクル850とメニスカスレンズ852に結像誤差を補正するために要求される形状を付与するために使用される付加的なパラメータを提供する。圧力変化に起因する変形は、それぞれ第1と第2のアクチュエータ8711'~8714'と8711~8715に起因する変形に重畳する。従って、分離された間隙854、854'とポンプ860、860'の備えは、マニピュレータM8によって達成され得る変形の範囲をさらにまた増大させることを可能にする。

【0121】

当然のことながら、ポンプ860、860'の代わりに、種々の他の手段を、液体62、62'の圧力を変化させるために設けることができる。例えば、油圧シリンダー又は可変形膜を使用することができる。

【0122】

圧力変動により達成され得る変形は、主に材料特性と可変形部材の形状に、さらにそれが投影対物レンズ20の非変形可能部材に取り付けられる方式に依存する。

【0123】

可変形部材の形状のための重要な設計パラメータは、その外部輪郭とその厚さ分布である。例えば、平行平板が矩形の輪郭を有する場合、圧力の増加は2回対称性を有する板の変形をもたらすであろう。

【0124】

マニピュレータM8の可変形部材、すなわちペリクル850とメニスカスレンズ852は、円形の輪郭を有することが前提とされている。それでもやはり、両部材850、852が異なる厚さ分布を有するので、両部材850、852は圧力変化に対し別様に応答するであろう。ペリクル850とメニスカスレンズ852の両方とも完全に回転対称であるので、液体62、62'内での圧力変化は必然的に、同様に回転対称である変形を生じるであろう。

【0125】

可変形光学素子が回転非対称である厚さ分布を有する場合、たとえ素子の外部輪郭が円形であるとしても、圧力変化もまた回転非対称変形を生じるであろう。

【0126】

この概念は、図16に子午断面図で示されたマニピュレータM9において実現されている。同じ部品には図2~4においてと同じ参照数字が使用されており、そして互いに対応する部品には900ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータM9は、投

10

20

30

40

50

影対物レンズ20内で瞳平面32の近く、又は同じく光軸OAに沿った他の位置に配置されるために同様に適格である。

【0127】

マニピュレータM9は主に、回転対称の輪郭を有するが、その非変形状態でさえ、すなわち重力以外のいずれの力も存在しない時にも回転非対称の厚さ分布を有するレンズ952によってメニスカスレンズ852が取って代わられているという点で、図15に示されたマニピュレータM8と異なる。

【0128】

レンズ952がアクチュエータを使用することによって、又はこの特定の実施形態ではポンプ960を利用してもっぱら液体62の圧力を変化させることによって変形させられる時、その変形は非変形レンズ952の回転非対称形状のために回転非対称である。この特定の実施形態において、非変形レンズ952のこの回転非対称形状は、それが変形後にコマ収差を補正するように設計されている。

10

【0129】

好ましくは、レンズ952はその非変形状態において回転対称の光学効果を有する。これはレンズ952に回転非対称である上面964を備えることによって達成されるが、レンズ952の下面972は回転対称であり、この場合そうであるように、例えば平面かつ光軸OAに対して垂直である。第2の間隙954を満たしている液体62がレンズ952と(ほとんど)同じ屈折率を有する場合、上側の回転非対称表面964は、いかなる光学効果も、又は少なくともいかなる実質的な光学効果も持たない。気体(又は代替的に著しく異なる屈折率を有する液体)に隣接する下面972だけがレンズ952の全光学効果に貢献する。この実施形態において、これは平行平板の効果である。凸又は凹に湾曲した下面972を備える実施形態において、レンズ952はその非変形状態において、普通のレンズのような回転対称の屈折力を有する。

20

【0130】

図示された実施形態において、レンズ952は2個以上の取付脚990を利用して取り付けられている。第2の間隙954を外部に対して密封するために、金属ベローズ992がレンズ952と保持リング994に密封して連結されている。金属ベローズ992は、ポンプ960によって生じた圧力変化に由来するレンズ952のわずかな動きに対するものである。

30

【0131】

第1の間隙954'が剛性の平行平板986と薄い可変形の平行平板950との間に形成されている。この実施形態において、板950はアクチュエータによって変形させられるにすぎず、それらのうちの4個のアクチュエータ9711~9714が図16の子午断面図に見ることができる。

【0132】

板950が、レンズ952を光軸OAのまわりで90°回転させることによって得られる別のレンズに置き換えられた場合、あらゆる任意の方向のコマ収差を、隣接する液体の圧力を変化させることによって、又はアクチュエータを使用して補正することができる。

【0133】

40

図17は、子午断面図においてさらに別の実施形態に従ったマニピュレータM10を示している。同じ部品には図2~4においてと同じ参照数字が使用されており、そして互に対応する部品には1000ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータM10は、投影対物レンズ20内で瞳平面32の近く、又は同じく光軸OAに沿った他の位置に配置されるために同様に適格である。

【0134】

一方のマニピュレータM10と前の実施形態に従ったマニピュレータとの主な相違は、この実施形態では薄い膜1052によって実現されている可変形部材が、液体やガス状媒体ではなく、異なる屈折率を有する2つの液体媒体を分離しているということである。やはり、そのうちのアクチュエータ10711~10715が図17の子午断面図に見るこ

50

とができるアクチュエータを用いて変形させられる１つの屈折表面だけが存在する。しかし、２つの液体の屈折率比が一般に、液体と気体で得られる比率よりも極めて１に近いことから、膜１０５２の変形はこれまで説明してきた可変形部材の変形よりも相当に弱い光学効果を有するであろう。従って、マニピュレータＭ１０は、高い精度でわずかな結像誤差を慎重に補正するために特に適している。

【０１３５】

図示された実施形態において、第１の間隙１０５４'が第１の厚く剛性の両凸レンズ１０５０と膜１０５２との間に形成されている。第１の間隙１０５４'は第１の液体６２'で満たされている。第２の間隙１０５４が膜１０５２と第２の剛性の両凸レンズ１０５３との間に形成されており、第２の液体６２で満たされている。マニピュレータＭ１０の感度
10
が第１の液体６２'と第２の液体６２との屈折率比に依存するので、この感度を変えることは、マニピュレータＭ１０が投影対物レンズ２０に取り付けられた後でさえ、一方又は両方の液体を異なる屈折率を有する液体と取り替えることによって容易に可能である。代替として、屈折率、従ってマニピュレータＭ１０の感度は、一方又は両方の液体６２、６２'の温度を変化させることによって変更することができる。これは、液体の屈折率が通常、強い温度依存性に置き換わるという事実を利用している。

【０１３６】

可変形部材がもっぱら液体内の圧力変化の結果として変形する従来技術の解決策とは対照的に、マニピュレータＭ１０は、アクチュエータ１０７１１～１０７１５を利用して多様な完全に異なる変形を生じさせることができる。例えば、３回対称性を有する変形を最初に生じさせ、動作の数時間後に、２回対称性を有するさらなる変形を、アクチュエータ
20
１０７１１～１０７１５の適切な構成と制御の下に重ねることができる。従って、マニピュレータＭ１０は、像面湾曲収差ばかりでなく、高次のゼルニケ多項式でのみ記述できるだけである視野独立性の結像誤差を補正するためにも適している。

【０１３７】

当然のことながら、アクチュエータの装備は、図１５に示したマニピュレータＭ８に関して上述した通り、圧力変更手段の付加的な装備を排除しない。

【０１３８】

膜１０５２が十分に薄い場合、それは隣接する液体６２、６２'の両方の屈折率とは異なる屈折率を有する。この実施形態においてもまた、例えば薄い板又はメニスカスレンズなどの他の可変形光学部材の使用が同様に考えられる。
30

【０１３９】

当然のことながら、上述した実施形態においても、それぞれの間隙内で液体を間欠的又は連続的に循環させることが考えられる。

【０１４０】

図１８は、子午断面図においてさらに別の実施形態に従ったマニピュレータＭ１１を示している。同じ部品には図２～４においてと同じ参照数字が使用されており、そして互に対応する部品には１１００ずつ増補した参照数字が使用されている。マニピュレータＭ１１は、投影対物レンズ２０内で瞳平面３２の近く、又は同じく光軸ＯＡに沿った他の位置に配置されるために同様に適格である。
40

【０１４１】

マニピュレータＭ１１は、それが１個の可変形光学部材、すなわち薄いメニスカスレンズ１１５２だけを有するという点で、図１５に示されたマニピュレータＭ８とは異なる。メニスカスレンズ１１５２は、図１６に示されたマニピュレータＭ９のレンズ９５２に類似した、（弱い）２回回転対称性（図１８には示さず）を有する上面１１６４を有する。アクチュエータ１１７１１～１１７１５が、３回対称性を有する変形が達成され得るようにレンズ１１２の円周のまわりに配置されている。

【０１４２】

一方でポンプ１１６０（類似の圧力変更手段）及び他方でアクチュエータ１１７１１～１１７１５を用いて液体６２の圧力を独立して制御することによって、２回対称性と３回
50

対称性を備える変形が連続的又は同時に生成される。異なる対称性を有する２つの変形を個別に生成できることがたいへん十分であるので、例えば図１５に示されたマニピュレータＭ８の膜８５０などの付加的な可変形部材を省いてもよい。

【０１４３】

好ましい実施形態の上記の説明は例証として提示されている。提示された開示から、当業者は、本発明及びその付随する利益を理解するばかりでなく、開示された構造及び方法に対する明白な種々の変更及び修正を認めるであろう。従って、出願人は、添付の請求の範囲及びその等価物によって規定される通り、本発明の精神及び範囲に該当する全部のそうした変更及び修正を包含することを求める。

【図面の簡単な説明】

10

【０１４４】

【図１】投影対物レンズ及びマニピュレータが回転非対称結像誤差を補正するために中に配置されている、本発明に従った投影露光装置の極めて図式化された表現による子午断面図である。

【図２】図１のマニピュレータを通る線II-IIに沿った簡略化された拡大子午断面図である。

【図３】図２に示されたマニピュレータの下方からの図である。

【図４】その可変形光学素子の変形状態にある図２及び３のマニピュレータの子午断面図である。

【図５】液体充填された間隙が曲面を有するレンズ間に形成されている、別の実施形態に従ったマニピュレータの子午断面図である。

20

【図６】アクチュエータ層を備える別の実施形態に従ったマニピュレータを通る線VI-VIに沿った子午断面図である。

【図７】図６に示されたマニピュレータの下方からの図である。

【図８】光学表面全体にわたり分散されたアクチュエータ層を備える別の実施形態に従ったマニピュレータの下方からの図である。

【図９】アクチュエータが液体に浸漬されている別の実施形態に従ったマニピュレータの子午断面図である。

【図１０】液体で満たされた間隙の外側であるが光学表面全体にわたり分散されたアクチュエータを備えるさらに別の実施形態に従ったマニピュレータを通る線X-Xに沿った子午断面図である。

30

【図１１】図１０に示されたマニピュレータの下方からの図である。

【図１２】２個の可変形光学素子を備える別の実施形態に従ったマニピュレータを通る線XII-XIIに沿った子午断面図である。

【図１３】図１２に示されたマニピュレータの下方からの図である。

【図１４】変形した光学表面を備える図１２及び１３のマニピュレータを示す。

【図１５】変形が圧力変化によっても生じる別の実施形態に従ったマニピュレータの子午断面図である。

【図１６】回転非対称形状を有する可変形部材を備えるさらに別の実施形態に従ったマニピュレータの子午断面図である。

40

【図１７】２つの流体を互いに分離する柔軟な膜を備えるさらに別の実施形態に従ったマニピュレータの子午断面図である。

【図１８】圧力変化及びアクチュエータの両方によって変形可能である部材を備えるさらに別の実施形態に従ったマニピュレータの子午断面図である。

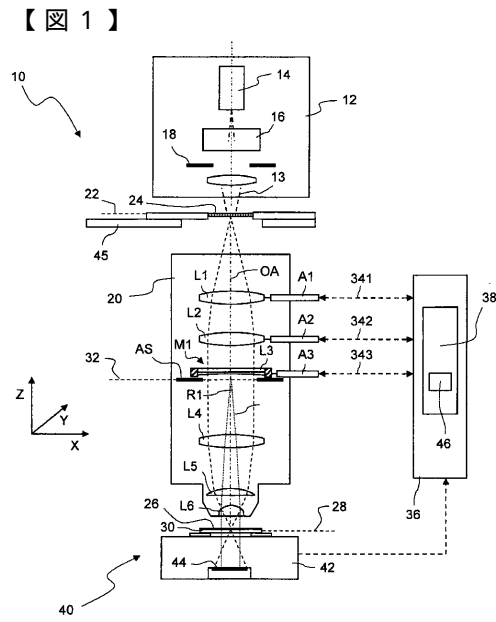


FIG. 1

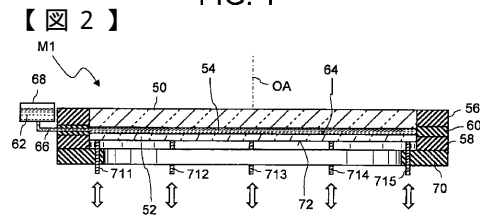


FIG. 2

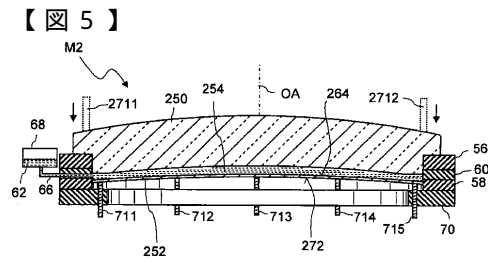


FIG. 5

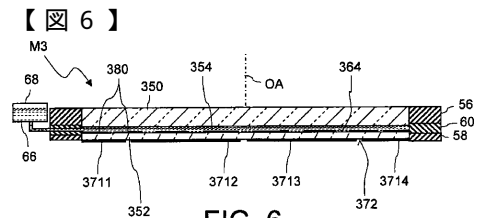


FIG. 6

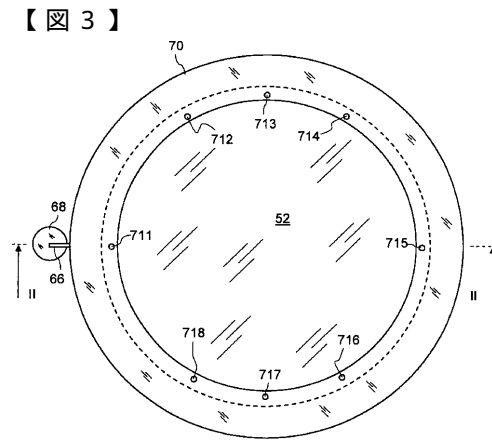


FIG. 3

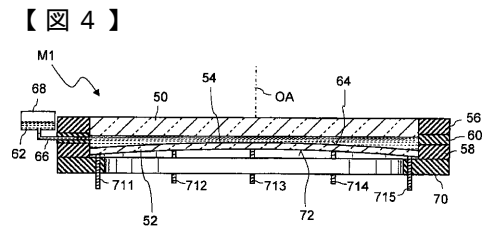


FIG. 4

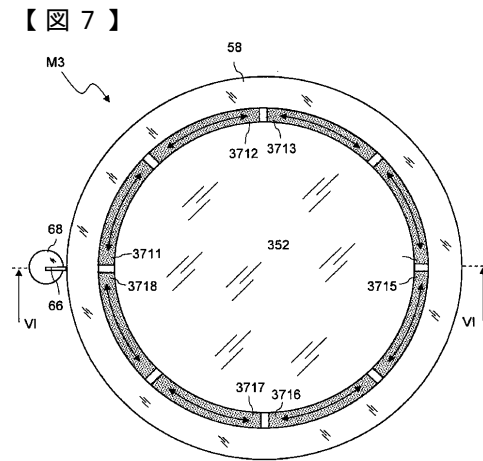


FIG. 7

【図 8】

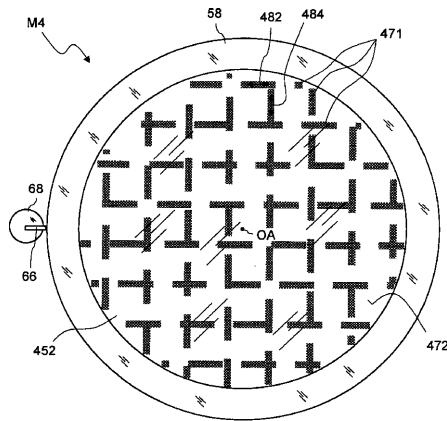


FIG. 8

【図 9】

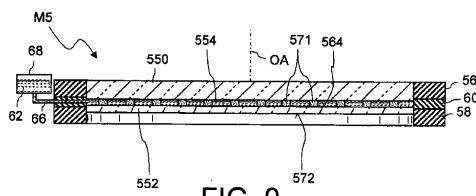


FIG. 9

【図 10】

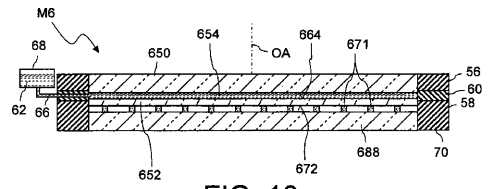


FIG. 10

【図 11】

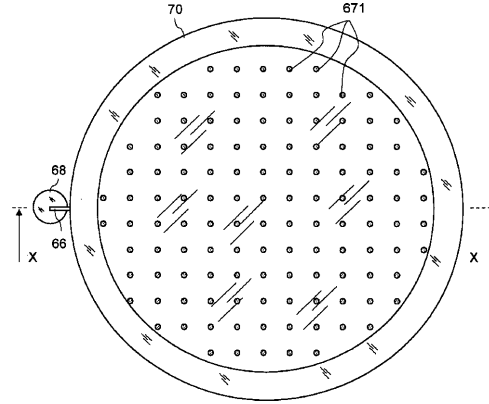


FIG. 11

【図 12】

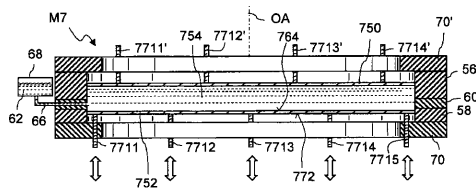


FIG. 12

【図 14】

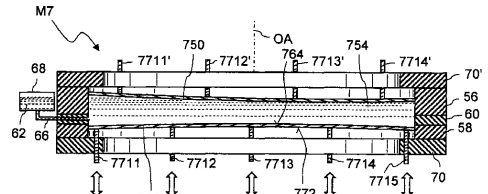


FIG. 14

【図 13】

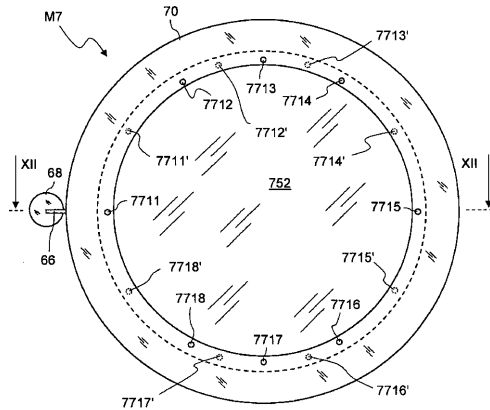


FIG. 13

【図 15】

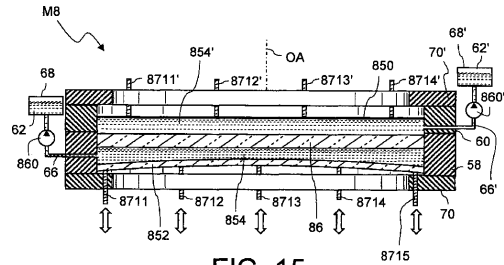
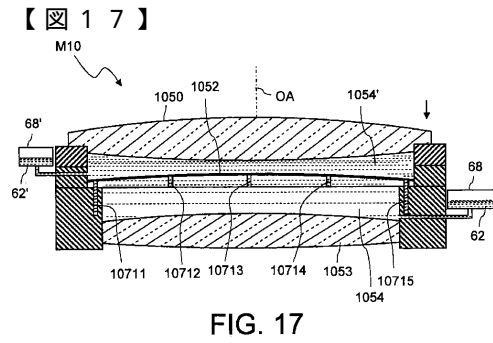
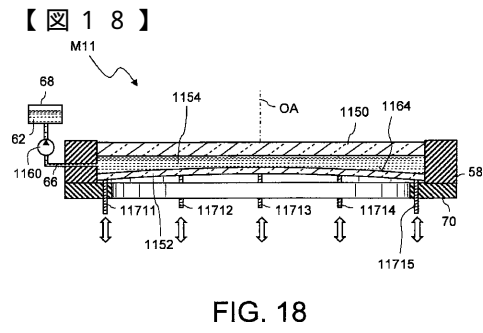
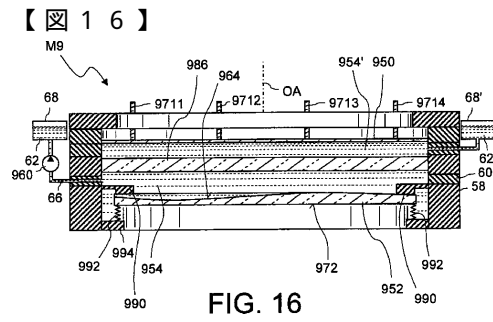


FIG. 15



フロントページの続き

- (72)発明者 コンラディ, オラルフ
ドイツ連邦共和国・7 3 4 6 3 ヴェストハウゼン・アイヒェンドルフシュトラッセ・8
- (72)発明者 ビットナー, ボリス
ドイツ連邦共和国・9 1 1 5 4 ロス・ラインゴールドシュトラッセ・6
- (72)発明者 ブライジステル, サシャ
ドイツ連邦共和国・7 3 4 3 2 アーレン・フォルダー キルヒエベルク・3 1
- (72)発明者 ハウフ, マルクス
ドイツ連邦共和国・8 9 3 3 5 イヒェンハウゼン・フリードリヒ - ジルヒャー - シュトラッセ
・ 1 1
- (72)発明者 フメル, ヴォルフガング
ドイツ連邦共和国・7 3 4 3 0 アーレン・ツェッペリンシュトラッセ・6 9
- (72)発明者 カツイ, アリフ
ドイツ連邦共和国・7 3 4 3 0 アーレン・パルクシュトラッセ・2
- (72)発明者 トロスバッハ, ペアベル
ドイツ連邦共和国・7 3 4 3 2 アーレン・ドルフミュレ・5
- (72)発明者 ウェーバー, ヨッヘン
ドイツ連邦共和国・8 9 5 2 0 ハイデンハイム・ロハッケルヴェーク・2
- (72)発明者 ホルデーラー, フーベルト
ドイツ連邦共和国・7 3 4 4 7 オーバーコッヘン・ツェッペリンヴェーク・1 9
- (72)発明者 タエバチ, パヤン
ドイツ連邦共和国・8 9 0 7 5 ウルム・オクセンシュタイゲ・4 0

審査官 植木 隆和

- (56)参考文献 特開2001-217189(JP, A)
特開2003-029150(JP, A)
特表平11-505335(JP, A)
特開2003-114309(JP, A)
特表2002-519843(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/027

G03F 7/20

G02B 3/14