(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第3552221号
(P3552221)
(45)発行日　平成16年8月11日(2004.8.11)　(24)登録日　平成16年5月14日(2004.5.14)

(51)Int.Cl.[7]	F I		
H01L 21/027	H01L	21/30	515D
G02B 27/18	G02B	27/18	Z
G03F 7/20	G03F	7/20	521
	H01L	21/30	516E
	H01L	21/30	518

請求項の数 12　(全 23 頁)

(21)出願番号　特願平7-232274
(22)出願日　平成7年9月11日(1995.9.11)
(65)公開番号　特開平9-82599
(43)公開日　平成9年3月28日(1997.3.28)
審査請求日　平成14年9月10日(2002.9.10)

(73)特許権者　000004112
株式会社ニコン
東京都千代田区丸の内３丁目２番３号
(74)代理人　100098165
弁理士　大森　聡
(72)発明者　西　健爾
東京都千代田区丸の内３丁目２番３号　株式会社ニコン内

審査官　佐藤　秀樹

最終頁に続く

(54)【発明の名称】投影露光装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

マスクのパターンを投影光学系を介して感光基板上に投影する投影露光装置において、

前記投影光学系は、第１の硝材からなる光学部材と、屈折率に関する温度特性が前記第１の硝材と異なる第２の硝材からなる光学部材とを有し、

前記第２の硝材からなる光学部材の温度を、前記投影光学系の結像特性の変化に応じて定まる目標温度に設定する温度制御手段と、

該温度制御手段によって、前記第２の硝材からなる光学部材の温度が前記目標温度に対して所定の許容範囲内に収まった後に前記感光基板への露光動作を開始する露光制御手段と、を設けたことを特徴とする投影露光装置。

【請求項２】

前記第２の硝材からなる光学部材の温度を計測する温度センサを設け、

前記露光制御手段は、前記温度センサの計測値と前記目標温度とを比較して露光動作を開始するか否かを判定することを特徴とする請求項１に記載の投影露光装置。

【請求項３】

前記第２の硝材からなる光学部材の温度が所定の温度に達するまでの時間を記憶する記憶手段を設け、

前記露光制御手段は、前記記憶手段に記憶されている時間が経過した後に前記感光基板への露光動作を開始することを特徴とする請求項１に記載の投影露光装置。

【請求項４】

前記温度制御手段は、前記第２の硝材からなる光学部材の温度を前記目標温度に設定する際に、前記目標温度に対してオーバーシュート又はアンダーシュートさせることを特徴とする請求項１～３のいずれか一項に記載の投影露光装置。
【請求項５】
前記温度制御手段は、前記投影光学系に対する照明光の照射履歴、又は環境変化に応じて、前記第２の硝材からなる光学部材の温度を制御することを特徴とする請求項１～４のいずれか一項に記載の投影露光装置。
【請求項６】
前記目標温度は、前記投影光学系を通過する露光用照明光の照射エネルギー、前記マスクを照明するための照明条件、大気圧の変化に応じて求められることを特徴とする請求項１～４のいずれか一項に記載の投影露光装置。
【請求項７】
前記露光制御手段は、前記第２の硝材からなる光学部材の温度が前記目標温度に対して所定の許容範囲内に達しないとき、アラーム情報を発することを特徴とする請求項１～６のいずれか一項に記載の投影露光装置。
【請求項８】
前記温度制御手段は、前記第２の硝材からなる光学部材の周囲の気体の温度を制御することによって、前記第２の硝材からなる光学部材の温度を調整することを特徴とする請求項１～７のいずれか一項に記載の投影露光装置。
【請求項９】
前記温度制御手段は、前記第２の硝材からなる光学部材の端部の両面に取り付けられた温度制御素子を有することを特徴とする請求項１～７のいずれか一項に記載の投影露光装置。
【請求項１０】
前記温度センサは、前記第２の硝材からなる光学部材の端部に取り付けられることを特徴とする請求項２に記載の投影露光装置。
【請求項１１】
前記第１の硝材は、石英であり、前記第２の硝材は、蛍石であることを特徴とする請求項１～１０のいずれか一項に記載の投影露光装置。
【請求項１２】
前記マスクを保持するマスクステージと、前記感光基板を保持する基板ステージとを更に有し、
前記マスクステージ及び前記基板ステージを同期移動させて、走査露光を行うことを特徴とする請求項１～１１のいずれか一項に記載の投影露光装置。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【発明の属する技術分野】
本発明は、例えば半導体素子、撮像素子（ＣＣＤ等）、液晶表示素子、又は薄膜磁気ヘッド等を製造するためのリソグラフィ工程で使用され、マスクパターンを投影光学系を介して感光基板上に転写する投影露光装置に関する。
【０００２】
【従来の技術】
ＩＣ，ＬＳＩ等の半導体素子等を製造するための投影露光装置は、マスクとしてのレチクルと、感光基板としてのウエハ（又はガラスプレート等）の各ショット領域とを投影光学系を介して所定の位置関係に位置決めし、一括で各ショット領域の全体にレチクルのパターン像を露光するステップ・アンド・リピート方式と、レチクルとウエハの各ショット領域とを投影光学系に対して相対走査することにより、各ショット領域にレチクルのパターン像を逐次露光していくステップ・アンド・スキャン方式とに大別される。これら両方式は、レチクルのパターンを投影光学系を介して投影する点では共通であり、ウエハ上にレチクルのパターンの像を如何に正確に投影できるかが重要となる。

【０００３】
一般に、投影光学系を設計する際には所定の条件下で光学的諸収差がほぼ０になるように設計されるが、投影露光を行う際の環境が変化して投影光学系近傍の大気圧や温度が変化するか、又は露光用照明光の照射による熱吸収等があると、投影光学系を構成するレンズ間の気体の屈折率変化、レンズ膨張、レンズの屈折率変化、及びレンズ鏡筒の膨張等が発生する。このため、レチクルのパターンをウエハ上に投影するときに、その投影像が投影光学系の光軸に垂直な方向にずれる現象であるディストーションが発生してしまう。このディストーションの内の線形倍率誤差（像高に対して倍率が１次関数的に変化する成分）を補正する手段として、従来より投影光学系内の一部のレンズを駆動したり、一部のレンズ間の気体圧力を制御したりするレンズ制御システムが使用されている。

【０００４】
また、そのディストーションと共に、その投影像の結像面（ベストフォーカス面）の投影光学系の光軸方向の位置（フォーカス位置）がずれて、ウエハの表面がその結像面から外れてしまうデフォーカスも発生していた。このデフォーカスの内の線形的なデフォーカス（像高に対してデフォーカス量が１次関数的に変化する成分）を補正する手段として、従来よりウエハのフォーカス位置を結像面の方向に制御するオートフォーカス機構、及びウエハの傾斜角を結像面に合わせ込むように制御するオートレベリング機構が知られている。

【０００５】
【発明が解決しようとする課題】
上記の如き従来の投影露光装置においては、環境変化等によって発生する投影像のディストーションの内の、特に非線形倍率誤差（高次倍率誤差）に対する補正を行うことができないという不都合があった。また、環境変化等によって発生する投影光学系の結像面に対するデフォーカスの内の非線形的なデフォーカス、特に像面湾曲に対する補正を行うことができないという不都合もあった。この場合、非線形倍率誤差は投影光学系の光軸に垂直な平面上での投影像の非線形的な横ずれ量であり、非線形的なデフォーカスは投影光学系の光軸方向での結像面の非線形的なずれ量であるため、両者を合わせて非線形誤差と呼ぶこともできる。

【０００６】
例えば、非線形倍率誤差が、ステップ・アンド・リピート方式（一括露光方式）の投影露光装置で発生すると、図１６（ａ）に示すように、本来の投影像６６、及び６７が像高によって非線形に変化して投影像６６Ａ，６７Ａのようになり、２層間での重ね合わせ精度が悪化する。一方、その非線形倍率誤差が、ステップ・アンド・スキャン方式（走査露光方式）の投影露光装置で発生すると、図１６（ｂ）に示すように、本来の投影像６６、及び６７が像高によって非線形に変化して投影像６６Ｂ，６７Ｂのようになり、同様に２層間での重ね合わせ精度が悪化する。また、図１６（ｂ）において、走査露光時のウエハの走査方向は矢印で示すＹ方向となっており、走査方向には平均化効果によって投影像のディストーションは発生していないものの、その平均化効果によって像劣化が生じている。また、非走査方向（Ｘ方向）には、一括露光方式と同様に像高に応じた倍率誤差が発生しているのが確認できる。

【０００７】
更に、投影像の像面湾曲が、ステップ・アンド・リピート方式の投影露光装置で発生すると、図１７（ａ）に示すように、本来の投影像の結像面７２のフォーカス位置が像高によって非線形に変化して結像面７３Ａのようになり、全体としての焦点深度の幅が狭くなる。一方、そのような像面湾曲が、ステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置で発生すると、図１７（ｂ）で示すように本来の投影像の結像面７２に対して、走査方向であるＹ方向には平均化効果によってデフォーカスは発生していないものの、その平均化効果によって像劣化が生じている。また、非走査方向（Ｘ方向）には、一括露光方式と同様に像高に応じたデフォーカスが発生して、走査露光後の実質的な結像面は結像面７３Ｂとなっているため、結果として所謂「かまぼこ型」の像面湾曲が発生していることが確認できる

。
【０００８】
更に近年、レチクルサイズが拡大してきており、大きなレチクルを使用する場合にそのレチクルの撓みによって、投影像の像面湾曲が拡大してしまうという不都合も生じている。本発明は斯かる点に鑑み、投影光学系の周囲の大気圧等の環境の変化、又は露光用照明光の吸収等によって悪化する投影光学系の非線形倍率誤差（高次倍率誤差）又は像面湾曲等の非線形誤差のような結像特性を補正できる投影露光装置を提供することを目的とする。
【０００９】
【課題を解決するための手段】
本発明による投影露光装置は、例えば図１、及び図２に示すように、マスクのパターン（Ｒ）を投影光学系を介して感光基板（Ｗ）上に投影する投影露光装置において、その投影光学系（ＰＬ１）は、第１の硝材からなる光学部材と、屈折率に関する温度特性がその第１の硝材と異なる第２の硝材からなる光学部材とを有し、その第２の硝材からなる光学部材の温度を、投影光学系（ＰＬ１）の結像特性の変化に応じて定まる目標温度に設定する温度制御手段（１３）と、この温度制御手段によって、その第２の硝材からなる光学部材の温度がその目標温度に対して所定の許容範囲内に収まった後に感光基板（Ｗ）への露光動作を開始する露光制御手段（１８）と、を設けたものである。
【００１０】
この場合、その第２の硝材からなる光学部材の温度を計測する温度センサ（５４Ａ，５４Ｂ）を設け、露光制御手段（１８）は、温度センサ（５４Ａ，５４Ｂ）の計測値とその目標温度とを比較して露光動作を開始するか否かを判定することが望ましい。
また、その第２の硝材からなる光学部材の温度が所定の温度に達するまでの時間を記憶する記憶手段を設け、露光制御手段（１８）は、その記憶手段に記憶されている時間が経過した後に感光基板（Ｗ）への露光動作を開始するようにしてもよい。
【００１１】
また、その第２の硝材からなる光学部材の温度をその目標温度に設定する際に、例えば図１３（ｂ）に示すように、その目標温度（T_2　）に対してオーバーシュート又はアンダーシュートさせるようにしてもよい。
斯かる本発明によれば、例えばＫｒＦエキシマレーザ光（波長２４８ｎｍ）やＡｒＦエキシマレーザ光（波長１９３ｎｍ）のような遠紫外域付近の光を露光光として用いる場合、その第１の硝材としては石英、その第２の硝材としては蛍石が挙げられる。この場合、石英は温度が上昇しても膨張係数が小さいため膨張はしないが、屈折率が大きくなる特性を持っている。従って、図６（ｂ）に示すように、石英の正レンズ４９Ｂでは温度が上昇すると、結像面ＦＢが正レンズ４９Ｂに近付く方向に変位する。一方、蛍石は温度の上昇で膨張し、屈折率は小さくなる特性を持っている。そのため、図６（ａ）に示すように、蛍石の正レンズ４９Ａでは温度が上昇すると、結像面ＦＢは正レンズ４９Ａから遠ざかる方向に変位する。なお、上述の硝材の屈折率の温度特性は、単にその屈折率自体の温度特性のみならず、その硝材からなるレンズの熱膨張及び鏡筒の伸縮をも考慮して温度が変化したときに結像面がどの方向に変化するかによって定められる特性である。
【００１２】
そこで、本発明では、その第２の硝材よりなる光学部材の温度を積極的に制御することで、投影光学系の非線形倍率誤差（高次倍率誤差）や像面湾曲等の非線形誤差のような結像特性を補正するものである。
例えば第１の硝材として石英を使用し、第２の硝材として蛍石を使用し、その第１の硝材で投影光学系（ＰＬ１）の大部分のレンズを構成した場合、投影光学系の結像特性の内のディストーションについて考えると、或る条件下でのその第１の硝材のレンズに依るディストーションは、図７（ａ）の曲線６１で示すような非線形倍率誤差となる。これに対して、その第２の硝材のレンズに依るディストーションは、図７（ｂ）の曲線６２Ａで示すように、曲線６１と逆の傾向の非線形倍率誤差に直線６２Ｂで示す線形倍率誤差のオフセット分を加算した傾向を有する。そこで、環境変化や露光用照明光の吸収等に応じて、例

えばその第２の硝材のレンズの温度を制御して、曲線６１の非線形倍率誤差を曲線６２Ａの非線形倍率誤差で相殺することにより、投影光学系（ＰＬ１）の非線形倍率誤差を小さくできる。

【００１３】

但し、そのままでは、線形倍率誤差が残存するため、このように残存する誤差を気体圧力制御装置、又はレンズ駆動機構等の線形倍率制御手段（１２）を介して低減させることにより、図８に示すように、投影光学系（ＰＬ１）のディストーションがほぼ完全に除去される。

次に、投影光学系の結像面のフォーカス位置の分布について考えると、或る条件下でのその第１の硝材のレンズに依るフォーカス位置Z_F　の像高Ｈに応じた分布の傾向は、図９（ａ）の曲線６１Ａで示すように下側に凸の像面湾曲となる。これに対して、その第２の硝材のレンズに依る結像面のフォーカス位置の分布は、図９（ｂ）の曲線６２Ｃで示すように、曲線６１Ａと逆の傾向の上側に凸の像面湾曲に、全部の像高Ｈで共通のオフセット分を加算した傾向を有する。

【００１４】

そこで、環境変化や露光用照明光の吸収等に応じて、例えばその第２の硝材のレンズの温度を制御して、曲線６１Ａの像面湾曲を曲線６２Ｃの像面湾曲で相殺することにより、投影光学系（ＰＬ１）の非線形的なデフォーカスである像面湾曲を小さくできる。

また、そのままでは結像面のフォーカス位置の分布には、図９（ｃ）の直線６３Ａで示すように、一定のオフセットが残存している。しかしながら、そのようなフォーカス位置のオフセットは、例えば基板（Ｗ）の高さを制御するステージ等の焦点位置制御手段（２）を介して基板（Ｗ）の高さを調整することによってほぼ完全に除去できる。これによって、基板（Ｗ）の表面を基準とした、結像面のフォーカス位置Z_F　の分布は、図１０の曲線６５Ａに示すようになって、デフォーカスはほぼ０となる。このように、投影光学系の光軸に垂直な平面上、及びその光軸方向での非線形誤差が良好に補正される。

【００１５】

上述のよう第２の硝材からなる光学部材の温度を制御する場合、その光学部材の温度が指定された目標温度になるまでには所定の時定数による遅れがある。例えば図１３（ａ）は、温度T_1　の光学部材の温度の目標値をT_2　に変更する場合を示し、この図１３（ａ）において、時点t_1　から例えばその光学部材の周囲の気体の設定温度（制御温度）T_{ij}を曲線５９に沿って次第に目標温度T_2　に近づけても、その光学部材の温度ＴＦは曲線５８に沿って遅れて変化する。そのため、その気体の温度T_{ij}が目標温度T_2　に達してから暫く経過した時点t_2　に至って初めて、その光学部材の温度ＴＦはその目標温度T_2　に対する許容範囲（±ΔＴの範囲内）に収まるようになる。その時点t_2　より前では結像特性の補正が高精度に行われていないため、本発明ではその光学部材の温度ＴＦがその目標温度T_2　に対する許容範囲（±ΔＴの範囲内）に収まる時点t_2　以降に露光を開始するようにしている。

【００１６】

この場合、その光学部材の温度ＴＦがその目標温度T_2　に対する許容範囲（±ΔＴの範囲内）に収まったかどうかを判定する手法としては、例えば予めその光学部材の温度の変化速度を求めておいて、計算で求められた時間だけ待つ手法と、その光学部材に温度センサを取り付けて実際にその光学部材の温度を計測する手法とがある。また、その光学部材の温度ＴＦを目標温度T_2　に短時間で近づけるためには、図１３（ｂ）に示すように、例えばその光学部材の周囲の気体の設定温度T_{ij}を曲線５９Ａに沿って目標温度T_2よりオーバーシュート（目標温度が低い場合にはアンダーシュート）させればよい。

【００１７】

【発明の実施の形態】

以下、本発明による投影露光装置の第１の実施の形態につき図１、図２、図６～図１５を参照して説明する。本例は露光用の照明光としてエキシマレーザ光を使用するステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置に本発明を適用したものである。但し、本例で使用

する投影光学系は、ステップ・アンド・リピート方式（一括露光方式）の投影露光装置でも使用できるものである。

【００１８】

図１は、本例の投影露光装置を示し、この図１において、エキシマレーザ光源１６からパルス発光されたレーザビームよりなる照明光ＩＬは、ミラー１５で偏向されて照明光学系１４に入射する。エキシマレーザ光源１６としては、ＫｒＦエキシマレーザ光源（発振波長：２４８ｎｍ）、又はＡｒＦエキシマレーザ光源（発振波長：１９３ｎｍ）等が使用できる。また、露光用の光源としては、ＹＡＧレーザの高調波発生装置、金属蒸気レーザ光源、又は水銀ランプ等も使用できる。

【００１９】

照明光学系１４は、ビームエクスパンダ、減光システム、フライアイレンズ、リレーレンズ、視野絞り（レチクルブラインド）、走査前後の不要な露光を避けるための可動ブレード、及びコンデンサーレンズ等から構成され、照明光学系１４によって均一な照度分布に整形された照明光ＩＬが、レチクルＲのパターン形成面（下面）の所定形状の照明領域を照明する。この場合、装置全体の動作を統轄制御する主制御装置１８が、照明制御系１７を介してエキシマレーザ光源１６のパルス発光のタイミング、照明光学系１４内の減光システムでの減光率の制御等を行う。その照明領域内のレチクルＲのパターンを透過した照明光は、投影光学系ＰＬ１を介してフォトレジストが塗布されたウエハＷ上に投影され、そのパターンを倍率β（βは例えば１／４、又は１／５等）で縮小した投影像がウエハＷ上に転写される。ここで、投影光学系ＰＬ１の光軸ＡＸに平行にＺ軸を取り、Ｚ軸に垂直な平面内で図１の紙面に平行にＹ軸を取り、図１の紙面に垂直にＸ軸を取る。

【００２０】

レチクルＲは、レチクルステージ６上に保持され、レチクルステージ６はエアベアリングを介してレチクル支持台５上にＹ方向に移動自在に載置されている。レチクルステージ６の上端に固定された移動鏡７、及びレチクル支持台５上のレーザ干渉計８により計測されたレチクルステージ６のＹ座標がステージ制御系１１に供給される。ステージ制御系１１は、主制御装置１８からの指令に従ってレチクルステージ６の位置、及び移動速度を制御する。

【００２１】

一方、ウエハＷはウエハステージ２上に保持され、ウエハステージ２はＸ方向、Ｙ方向、Ｚ方向、及び回転方向等にウエハＷの位置決めを行うと共に、Ｙ方向にウエハＷの走査を行う。ウエハステージ２の上端に移動鏡９が固定され、移動鏡９及び外部のレーザ干渉計１０によりウエハステージ２のＸ座標、及びＹ座標が常時計測され、計測結果がステージ制御系１１に供給されている。ステージ制御系１１は主制御装置１８からの指令に従って、ウエハステージ２のステッピング動作、及びレチクルステージ６と同期した走査動作の制御を行う。即ち、走査露光時には、上述の投影光学系ＰＬ１のレチクル側からウエハ側への倍率βを用いて、ステージ制御系１１の制御のもとで、投影光学系ＰＬ１に対してレチクルステージ６が－Ｙ方向（又は＋Ｙ方向）に速度V_R　で走査されるのと同期して、ウエハステージ２が＋Ｙ方向（又は－Ｙ方向）に速度V_W（＝β・V_R）で走査される。これにより、レチクルＲのパターンが逐次ウエハＷ上の各ショット領域に転写される。

【００２２】

また、ウエハステージ２上のウエハＷの近傍には、結像特性計測用センサ３が固定されている。結像特性計測用センサ３は、図１１（ｂ）に示すように、ウエハＷの表面と同じ高さに設定された表面に矩形の開口部５０ａが設けられた遮光膜５０が被着されたガラス基板５１と、その開口部５０ａを通過した露光用の照明光を光電変換する光電変換素子５２と、この光電変換素子５２からの検出信号Ｓ１を処理する信号処理部５３とを有し、この信号処理部５３の処理結果が図１の主制御装置１８に供給されている。本例では後述のように、ウエハステージ２を駆動することにより、レチクルＲのパターンの投影像を結像特性計測用センサ３の開口部５０ａで走査し、その際に光電変換素子５２から出力される検出信号Ｓ１より信号処理部５３が投影光学系ＰＬ１の非線形倍率誤差や像面湾曲を求める

ようになっている。

【００２３】

次に、図１において、本例の投影光学系ＰＬ１を構成する複数枚のレンズエレメントの内の大部分は石英よりなり、残りの一部のレンズエレメントが蛍石より形成され、その石英からなる所定の１対のレンズエレメントの間に形成された所定の気体室の気体圧力を制御するためのレンズ制御装置１２が設けられている。大気圧変化、若しくは温度変化等の環境変化、又は露光用照明光の投影光学系ＰＬ１に対する照射量の履歴等に応じて、投影光学系ＰＬ１の倍率、結像面の平均面の中央でのフォーカス位置（ベストフォーカス位置）、像面湾曲等の結像特性が変化した場合に、主制御装置１８からの指令に基づいてそれらの結像特性をレンズ制御装置１２が補正するようになっている。なお、レンズ制御装置１２としては、圧力制御装置の他に、例えば石英若しくは蛍石からなる所定のレンズエレメントの光軸ＡＸ方向の位置や傾斜角を制御するレンズ位置制御装置、又はレチクルＲの光軸ＡＸ方向の位置や傾斜角を制御するレチクル位置制御装置等を使用してもよい。

【００２４】

更に、投影光学系ＰＬ１には、一部の蛍石よりなる１枚又は複数枚のレンズエレメントの温度を制御するためのレンズ温度制御装置１３が接続されている。本例では、環境変化、又は照射量の履歴等に応じて、投影光学系ＰＬ１の非線形倍率誤差（高次倍率誤差）、像面湾曲、又はそれらの両方が悪化した場合に、主制御装置１８からの指令に基づいてレンズ温度制御装置１３がそれらの結像特性を補正するようになっている。また、その非線形倍率誤差、像面湾曲、又はそれらの両方の補正によって、投影光学系ＰＬ１の線形倍率誤差が悪化したときには、その線形倍率誤差をレンズ制御装置１２が補正するようになっている。

【００２５】

また、本例の投影露光装置には、投影光学系ＰＬ１による露光領域内の複数の計測点でウエハW上にスポット光を斜めに投射する投射光学系６８と、それらの計測点からの反射光を受光してそれぞれスポット光を再結像し、これらの再結像されたスポット光の横ずれ量に対応した焦点信号を出力する受光光学系６９と、からなる焦点位置検出系が設けられている。その受光光学系６９からの複数の焦点信号が主制御装置１８に供給されている。この場合、ウエハWの表面の投影光学系ＰＬ１の光軸方向（Ｚ方向）の位置（フォーカス位置）が変化すると、対応する焦点信号のレベルが変化することから主制御装置１８ではウエハWのフォーカス位置をモニタする。そして、主制御装置１８ではステージ制御系１１を介してウエハステージ２内のＺ方向への駆動機構の動作を制御することにより、ウエハWの露光対象のショット領域の平均面の中央でのフォーカス位置を、予め求めてある投影光学系ＰＬ１の結像面の平均面の中央でのフォーカス位置に維持させる。

【００２６】

また、本例では投影光学系ＰＬ１の像面湾曲を補正すると、結像面の平均面の中央でのフォーカス位置にオフセットが生ずることがあるため、そのようなオフセットが生じたときには、ウエハステージ２を駆動してウエハWのフォーカス位置をそのオフセット分だけ補正して、結像面とウエハWの表面との間にデフォーカスが生ずるのを防止している。更に、本例のウエハステージ２にはウエハWの傾斜角を補正する機構（レベリングステージ）も設けられ、主制御装置１８はその焦点位置検出系の複数の計測点でのフォーカス位置よりウエハWの傾斜角を求め、ウエハWの傾斜角を結像面の傾斜角に合わせ込むようにしている。

【００２７】

更に、本例の投影光学系ＰＬ１の側面には、ウエハW上の各ショット領域に付設されたアライメント用のウエハマークの位置を検出するためのオフ・アクシス方式の撮像方式のアライメントセンサ７０も設けられている。

次に、本例の投影光学系ＰＬ１の構成、及びレンズ温度制御装置１３等の構成につき、図２等を参照して詳細に説明する。

【００２８】

図２は、本例の投影光学系ＰＬ１の内部構造、及び結像特性の制御システムを示し、この図２において、投影光学系ＰＬ１は、一例として鏡筒４内にウエハW側から順に６枚のレンズエレメント２５～３０、４枚のレンズエレメント３１～３４、及び４枚のレンズエレメント３５Ａ～３８Ａを固定して構成されている。また、レンズエレメント３６Ａ及び３７Ａのみは蛍石より形成され、その他のレンズエレメントは石英より形成されている。そして、レンズエレメント３３，３４はレンズ枠Ｇ１を介して鏡筒４内に固定され、レンズエレメント３５Ａ～３８Ａはレンズ枠Ｇ２を介して鏡筒４内に固定され、他のレンズエレメントもそれぞれ不図示のレンズ枠を介して鏡筒４内に固定されている。

【００２９】

この場合、レンズエレメント３３，３４及びレンズ枠Ｇ１で囲まれた気体室は密封されており、その気体室が配管１２ｃを介してベローズ機構１２ｂに接続され、ベローズ機構１２ｂの伸縮量が制御部１２ａによって制御されるようになっている。この制御部１２ａ、ベローズ機構１２ｂ、及び配管１２ｃより図１のレンズ制御装置１２が構成され、ベローズ機構１２ｂの伸縮量の調整によってその気体室内の気体（例えば空気）の圧力が制御できるようになっている。

【００３０】

そして、蛍石よりなるレンズエレメント３６Ａ，３７Ａ及びレンズ枠Ｇ２で囲まれた気体室には、配管２１を介して温度制御装置１３ｂから、主制御装置１８に指示された任意の温度の気体が供給され、その気体室を循環した気体が配管２２を介して温度制御装置１３ｂに戻される構成となっている。なお、その気体室内に流す気体が投影光学系ＰＬ１の周囲の大気（空気）と同じ成分である場合には、必ずしもその気体室を通過した気体を配管２２を介して温度制御装置１３ｂに戻す必要はないが、例えば温度管理の容易な気体（例えば窒素ガス等）を使用する場合には、閉ループで温度制御を行うために配管２２を使用する必要がある。

【００３１】

更に、レンズエレメント３６Ａ及び３７Ａの端部の露光用照明光が通過しない領域に、それぞれサーミスタ等の温度センサ５４Ｂ及び５４Ａが被着され、温度センサ５４Ａ，５４Ｂの信号端子が温度検出装置５５に接続され、温度検出装置５５では温度センサ５４Ａ，５４Ｂの電気特性の変化からレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの平均の温度を求める。求められた温度はレンズ温度制御装置１３ｂ、及び主制御装置１８に供給され、レンズ温度制御装置１３ｂではレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの検出された温度が目標温度に速く達するように、配管２１を介して供給する気体の設定温度を細かく制御する（詳細後述）。そして、主制御装置１８では、レンズエレメント３６Ａ，３７Ａの検出された温度が目標温度に対して許容範囲内に収まった後に、ウエハWに対する露光を開始するようにしている。

【００３２】

また、本例では温度制御装置１３ｂによってレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの温度制御を行うため、これらレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの温度がレンズ枠Ｇ２、鏡筒４、及び気体を媒介として前後の石英よりなるレンズエレメント３５Ａ，３８Ａに伝導するのを防止する必要がある。そのため、レンズエレメント３７Ａ，３８Ａ及びレンズ枠Ｇ２により囲まれた気体室、及びレンズエレメント３５Ａ，３６Ａ及びレンズ枠Ｇ２により囲まれた気体室には、それぞれ配管１９及び２０を介して温度制御装置１３ａから一定温度の気体を流している。この一定温度の気体としては、温度伝導率の低い気体（空気等）が使用され、それらの気体室を循環した気体がそれぞれ配管２３Ａ及び２４Ａを介して温度制御装置１３ａに戻されている。温度制御装置１３ａ，１３ｂ、温度センサ５４Ａ，５４Ｂ、温度検出装置５５、配管１９～２２，２３Ａ，２４Ａより図１のレンズ温度制御装置１３が構成されている。

【００３３】

また、本例の投影露光装置では、種々のパターンを高い解像度で露光するために、図１の照明光学系１４による照明条件を通常の状態、変形光源、輪帯照明、及びコヒーレンスフ

ァクタであるσ値が小さい状態等に切り換えられるようになっている。
次に、本例で投影光学系ＰＬ１の非線形倍率誤差（高次倍率誤差）、又は像面湾曲を補正する場合の動作の一例につき説明する。なお、以下では図２の投影光学系ＰＬ１内の蛍石よりなるレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの温度制御によって、非線形倍率誤差、又は像面湾曲の一方を補正する場合について説明しているが、これは投影光学系ＰＬ１の使用条件によって、非線形倍率誤差、又は像面湾曲の一方のみが大きく悪化する場合に対応している。そのため、非線形倍率誤差、及び像面湾曲の両方が大きく悪化するような場合には、例えば１つの手法として、そのレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの温度を両方の結像特性がそれぞれ許容範囲となるような値に設定すればよい。また、そのような設定温度が存在しない場合には、投影光学系ＰＬ１内でそれぞれ非線形倍率誤差、及び像面湾曲の補正に有効なレンズエレメントの温度を互いに独立に制御すればよい。

【００３４】
本例の投影光学系ＰＬ１のレンズエレメントの硝材は、石英及び蛍石である。ここで、石英は温度が上昇しても膨張係数が小さいため殆ど膨張しないが、屈折率が大きくなる特性を持っている。従って、図６（ｂ）に示すように、石英の正のレンズ４９Ｂでは温度が上昇すると、結像面ＦＢがそのレンズに近付く方向に変位する。一方、蛍石は温度の上昇で膨張し、屈折率は小さくなる特性を持っている。そのため、図６（ａ）に示すように、蛍石の正のレンズ４９Ａでは温度が上昇すると、結像面ＦＢはそのレンズから遠ざかる方向に変位する。なお、上述の硝材の屈折率の温度特性は、単にその屈折率自体の温度特性のみならず、その硝材からなるレンズの熱膨張をも考慮して温度が変化したときに結像面がどの方向に変化するかによって定められる特性である。また、レンズ間距離を保持している鏡筒の伸縮も考慮する必要がある。

【００３５】
先ず投影光学系ＰＬ１の結像特性の内のディストーションについて図７及び図８を参照して説明する。図７及び図８において、縦軸は像高Ｈ、横軸はその像高Ｈにおける投影光学系ＰＬ１の倍率βであり、光軸上（Ｈ＝０）での倍率を設計上の倍率β_0　として示してある。この場合、或る環境下で、或る時間露光を継続して行った後における、投影光学系ＰＬ１の石英からなるレンズエレメントに依るディストーションは、図７（ａ）の曲線６１で示すように、像高Ｈが大きくなるに従って倍率βが一度設計値より小さくなってからほぼ単調に増大する非線形倍率誤差（高次倍率誤差）となる。

【００３６】
これに対して、本例では図１のレンズ温度制御装置１３を介して、投影光学系ＰＬ１内の蛍石よりなるレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの温度を調整することにより、投影光学系ＰＬ１の蛍石よりなるレンズエレメントに依るディストーションを、図７（ａ）の曲線６１とほぼ逆の特性の非線形倍率誤差を有するように設定する。しかしながら、そのように蛍石よりなるレンズエレメントのディストーションを設定しても、そのディストーションには所定の線形倍率誤差がオフセットとして重畳される。従って、投影光学系ＰＬ１の蛍石よりなるレンズエレメントに依るディストーションは、図７（ｂ）の曲線６２Ａで示すように、直線６２Ｂで示す線形倍率誤差に、図７（ａ）の曲線６１とほぼ逆の特性の非線形倍率誤差を重畳した特性となる。

【００３７】
そのため、図１のレンズ制御装置１２で結像特性の補正を行わない状態では、投影光学系ＰＬ１の全体としてのディストーションは、図７（ｃ）の直線６３で示すように、像高Ｈに応じて倍率βが設計値から線形に増大する線形倍率誤差で近似できる特性となる。そこで、図１のレンズ制御装置１２によって、投影光学系ＰＬ１に対して、図７（ｃ）の直線６３で近似される残存倍率誤差をほぼ相殺するような、直線６４で表される線形倍率誤差を付与する。その結果、本例の投影光学系ＰＬ１のディストーションは、図８の曲線６５に示すようになり、非線形倍率誤差と共に線形倍率誤差も除去されたものとなる。

【００３８】
次に、投影光学系ＰＬ１の結像特性の内の像面湾曲について図９及び図１０を参照して説

明する。図９及び図１０において、横軸は像高Ｈ、縦軸はその像高Ｈにおける投影光学系ＰＬ１の結像面のフォーカス位置Z_F　であり、光軸上（Ｈ＝０）でのフォーカス位置を設計上のフォーカス位置として示してある。この場合、或る環境下で、或る時間露光を継続して行った後における、投影光学系ＰＬ１の石英からなるレンズエレメントに依る結像面は、図９（ａ）の曲線６１Ａで示すように、下に凸の像面湾曲となる。

【００３９】

これに対して、本例では図１のレンズ温度制御装置１３を介して、投影光学系ＰＬ１内の蛍石よりなるレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの温度を調整することにより、投影光学系ＰＬ１の蛍石よりなるレンズエレメントに依る像面湾曲を、図９（ａ）の曲線６１Ａとほぼ逆の特性の像面湾曲を有するように設定する。しかしながら、そのように蛍石よりなるレンズエレメントの像面湾曲を設定しても、その結像面のフォーカス位置には像高Ｈの全範囲で一定のオフセットが重畳される。従って、投影光学系ＰＬ１の蛍石よりなるレンズエレメントに依る結像面のフォーカス位置の分布は、図９（ｂ）の曲線６２Ｃで示すように、所定のオフセットに、図９（ａ）の曲線６１Ａとほぼ逆の特性の像面湾曲を重畳した特性となる。

【００４０】

そのため、投影光学系ＰＬ１の全体としての結像面のフォーカス位置Z_F　は、図９（ｃ）の直線６３Ａで示すように、像高Ｈの全範囲でほぼ一定の値となり、ウエハＷの表面との間でデフォーカスが生ずる。そこで、図１のウエハステージ２内のＺ方向への駆動機構を用いて、投影光学系ＰＬ１に対して、そのデフォーカス分だけウエハＷの表面のフォーカス位置を補正する。これは、実質的に投影光学系ＰＬ１の結像面に対して、図９（ｃ）の直線６４Ａで示すようなフォーカス位置のオフセットを加えることを意味する。その結果、ウエハＷの表面を基準とした本例の投影光学系ＰＬ１の結像面のフォーカス位置Z_F　の分布は、図１０の曲線６５Ａに示すようになり、像面湾曲と共に一定のデフォーカスも除去されている。従って、結像面の全体で焦点深度の幅が従来例よりも広くなり、投影像が全体として高い解像度で投影露光される。

【００４１】

更に、蛍石よりなるレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの温度を調整することにより、その結像面の線形倍率誤差（像高Ｈに比例して倍率が変化する誤差）が悪化することがある。このような線形倍率誤差が発生したときには、図１のレンズ制御装置１２を介してその結像面に対して、発生した線形倍率誤差をほぼ相殺するような線形倍率誤差を付与する。その結果、本例の投影光学系ＰＬ１の結像特性は像面湾曲も、ディストーションも除去された良好な特性となる。

【００４２】

ここで、図１１を参照して投影光学系ＰＬ１のディストーション、及び像面湾曲の計測方法の一例につき説明する。

そのため、図１のレチクルＲとして、照明領域内に所定個数の対の（例えば１６対の）評価用マークが均等に分布するテストレチクルを使用する。この場合、各対の評価用マークは、種々の像高となるマークを含むことが望ましい。それら各組の評価用マークは、Ｘ方向に所定ピッチで配列されたライン・アンド・スペースパターンよりなるＸ軸の評価用マーク、及びこの評価用マークを９０°回転した構成のＹ軸の評価用マークよりなり、その内のｉ番目（ｉ＝１～１６）のＹ軸の評価用マークの投影像ＭＹ（ｉ）を図１１（ａ）に示す。

【００４３】

図１１（ａ）において、投影像ＭＹ（ｉ）はＹ方向に所定ピッチで明部Ｐ１～Ｐ５が配列されたパターンであり、図１のウエハステージ２を駆動することにより、結像特性計測用センサ３の矩形の開口部５０ａでその投影像ＭＹ（ｉ）をＹ方向に走査する。その際に図１１（ｂ）の光電変換素子５２から出力される検出信号Ｓ１が、信号処理部５３の内部でアナログ／デジタル（Ａ／Ｄ）変換されて、ウエハステージ２のＹ座標に対応して記憶される。そして、その検出信号Ｓ１の例えば微分信号に基づいて、その投影像ＭＹ（ｉ）の

中点のＹ座標、及びコントラストが求められ、その中点のＹ座標の設計値からのずれよりその像高での倍率誤差が求められ、結像特性計測用センサ３のＺ座標を変えて最もそのコントラストが高くなるときＺ座標を求めることにより、その像高での結像面のフォーカス位置が求められる。更に、全ての評価用マークの投影像について、それぞれ倍率誤差、及び結像面のフォーカス位置を求めることにより、ディストーション（非線形倍率誤差を含む）、及び像面湾曲が求められる。

【００４４】

次に、図２における蛍石よりなるレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの温度（以下、単に「蛍石の温度」という）の設定値の決定方法の一例につき説明する。例えば、投影光学系ＰＬ１の周囲の空気の圧力（大気圧）をｘとして、大気圧ｘが基準値$ｘ_0$　から変化することによって投影光学系ＰＬ１に非線形倍率誤差が生じた場合に、その非線形倍率誤差を相殺するための蛍石の温度ｙの設定値につき説明する。この場合、大気圧ｘが基準値$ｘ_0$　から変化することによって生ずる投影光学系ＰＬ１の非線形倍率誤差を光学計算によって求める。そして、このように求めた非線形倍率誤差と、逆の特性の非線形倍率誤差を発生させるための蛍石の温度ｙを計算によって求める。

【００４５】

図１２の実線の曲線は、そのようにして予め大気圧ｘの関数Ｆ（ｘ）として求められた温度ｙ（ｙ＝Ｆ（ｘ））を表し、この図１２において、横軸は大気圧ｘ、縦軸は蛍石の温度ｙであり、基準大気圧$ｘ_0$　で非線形倍率誤差を最小とするための蛍石の温度を$ｙ_0$　としてある。実用上でも、その関数Ｆ（ｘ）に基づいて温度ｙを設定するようにしてもよい。

【００４６】

しかしながら、実際には投影光学系ＰＬ１の各光学要素の製造誤差等によって、関数Ｆ（ｘ）で求めた温度ｙでは非線形倍率誤差が十分に小さくならないことがある。そこで、非線形倍率誤差をより小さくするためには、次のようにして関数Ｆ（ｘ）のキャリブレーションを行うことが望ましい。

即ち、実際に良く当てはまる関数を求めるために、基準大気圧$ｘ_0$　と異なる任意の１点の大気圧$ｘ_1$　において、図１の結像特性計測用センサ３を用いて投影光学系ＰＬ１の投影像の非線形倍率誤差を求める。次に、レンズ温度制御装置１３を介して蛍石の温度を制御して、その投影像の非線形倍率誤差が０（最小）になるときの温度$ｙ_1$　を求める。この際に、蛍石の温度は、理論的な関数Ｆ（ｘ）で定められる温度ｙの近傍で変化させるようにする。

【００４７】

また、その大気圧$ｘ_1$　と異なる他の大気圧$ｘ_2$　においても、同様にして実際に投影像の非線形倍率誤差を０にするための蛍石の温度$ｙ_2$　、及び残存する線形倍率誤差を０にするためのその気体室の圧力を求める。そして、大気圧が$ｘ_0$　，$ｘ_1$　，$ｘ_2$　の点での蛍石の実測された温度より、図１２に点線で示すように、例えば２次関数として、大気圧ｘに対する蛍石の温度ｙを表す関数Ｆ’（ｘ）を求めることができる。同様にして、大気圧ｘが変化した場合に、投影光学系ＰＬ１による投影像の像面湾曲を最小とするための蛍石の温度ｙを表す関数も求められる。更に、大気圧ｘに対して、投影像の非線形倍率誤差、及び像面湾曲をそれぞれ許容範囲内に収めるための蛍石の温度ｙを表す関数も（存在する場合には）求めることができる。

【００４８】

上述の例では、大気圧が変化した際の結像特性の補正について説明したが、それ以外にも、露光用の照明光が投影光学系を通過する際の照射エネルギーによっても結像特性が変化する。更に、図１の照明光学系１４の照明条件を通常の状態、輪帯照明、所謂変形光源法、又はコヒーレンスファクタであるσ値が小さい状態等の間で切り換えた場合にも結像特性が変化する。そこで、最終的には例えば照射エネルギーｅ、大気圧ｘ、照明条件Ｉをパラメータとした関数Ｑ（ｅ，ｘ，Ｉ）によって、非線形倍率誤差、及び像面湾曲をそれぞれ許容範囲内にするための蛍石の温度ｙを求めておく必要がある。その関数Ｑ（ｅ，ｘ，

Ｉ）を図１の主制御装置１８内の記憶部に記憶しておき、主制御装置１８では露光時の照射エネルギーｅ、大気圧ｘ、照明条件Ｉに応じて、その関数Ｑ（ｅ，ｘ，Ｉ）より蛍石の目標温度を求めることが望ましい。

【００４９】

次に、実際に蛍石の温度をその目標温度に設定する方法の一例につき図１３～図１５を参照して説明する。

先ず、図１３（ａ）は時間ｔの経過に伴う蛍石の温度等の変化を示し、この図１３（ａ）において、点線の曲線５９は図２のレンズ温度制御装置１３ｂから蛍石よりなるレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの間の気体室に供給される気体の設定温度T_{ij}、実線の曲線５８はそのレンズエレメント３６Ａ，３７Ａの温度センサ５４Ａ，５４Ｂによって計測される温度（蛍石の温度）ＴＦを示す。また、図１３（ａ）において、最初の時点t_0　での蛍石の目標温度はT_1　であり、予め定められた許容幅ΔＴを用いて、時点t_0　では蛍石の温度ＴＦは目標温度T_1　に対して許容範囲（±ΔＴ）内に収まっている。この場合、図２の主制御装置１８内のメモリの共通作業領域６０（図１５参照）に、蛍石の目標温度T_i　、及び許容幅ΔＴ等が書き込まれ、各種の制御部が独立にその共通作業領域６０内のデータを参照できるようになっている。

【００５０】

その後の時点t_1　において、図１４のステップ１０１で示すように、本例の投影光学系の使用条件に応じて、図２の主制御装置１８内の温度制御部によって蛍石の目標温度T_i　がT_2（＞T_1）に変更されたものとする。その目標温度T_2　は、図１５の共通作業領域６０内に書き込まれると共に、図２の温度制御装置１３ｂに伝達される。

【００５１】

その後、ステップ１０２において、図２の温度制御装置１３ｂは、レンズエレメント３６Ａ，３７Ａの間に供給される気体（本例での温度制御媒体）の温度（以下、「制御温度」と呼ぶ）T_{ij}を、図１３（ａ）に点線の曲線５９で示すように、所定の時間ステップで元の目標温度T_1　から次第に次の目標温度T_2　に変化させる。また、温度制御装置１３ｂには、蛍石の温度ＴＦも供給されており、温度制御装置１３ｂではサーボ方式でその蛍石の温度ＴＦが目標値T_2　に合致するように、その温度制御媒体の制御温度T_{ij}を連続的に調整する。従って、実際にはそのステップ１０２の動作は、露光動作中に継続して実行されている。この場合、図２の蛍石よりなるレンズエレメント３６Ａ，３６Ａの温度変化には所定の時定数があるため、その蛍石の温度ＴＦは、実線の曲線５８で示すように制御温度T_{ij}に遅れて変化する。

【００５２】

そのため、図１４のステップ１０３で、主制御装置１８内の温度制御部は図２の温度センサ５４Ａ，５４Ｂ、及び温度検出装置５５を介して蛍石の実際の温度ＴＦを計測し、図１５に示す主制御装置１８内のメモリ内の共通作業領域６０から目標温度T_i（ここでは、$T_i = T_2$）、及び許容幅ΔＴを読み出す。それに続くステップ１０４で、その温度制御部は、その蛍石の温度ＴＦが次のように目標温度に対する許容範囲内に収まったかどうかを判定する。

【００５３】

$|TF - T_i| \leqq \Delta T$

そして、その蛍石の温度ＴＦがその許容範囲内に収まったときには、ステップ１０６に移行して、その温度制御部は、その共通作業領域６０内の温度可変終了フラッグ（初期値はハイレベル”１”）の値をローレベル”０”に設定する。その後、再びステップ１０３に戻って蛍石の温度ＴＦのサンプリングが行われる。一方、ステップ１０４でその蛍石の温度ＴＦがその許容範囲内に収まっていないときには、ステップ１０５に移行して、主制御装置１８内の温度制御部は、その温度可変終了フラッグの値をハイレベル”１”に設定した後、ステップ１０３に移行する。この結果、図１３（ａ）の例では、時点t_2　において、蛍石の温度ＴＦが目標温度T_2　に対する許容範囲内に入って、図１５の温度可変終了フラッグがローレベル”０”に設定される。

【００５４】
また、図１４のステップ１０１～１０６の動作と並列に、ステップ１１１～１１６で示すように、主制御装置１８内の露光制御部による露光動作が行われている。即ち、ステップ１１１において、ウエハの交換や新しいウエハのアライメント等が実行された後、ステップ１１２において、主制御装置１８内の露光制御部は内部のタイマの計時を開始させる。その後、ステップ１１３において、その露光制御部は図１５の共通作業領域６０内の温度可変終了フラッグがローレベル”０”（即ち、蛍石の温度が目標値に対する許容範囲内に入った）かどうかを調べ、その温度可変終了フラッグがローレベル”０”であるときには、ステップ１１４に移行して露光を行った後、再びステップ１１１に戻る。
【００５５】
一方、ステップ１１３でその温度可変終了フラッグがハイレベル”１”であるときには、ステップ１１５において、主制御装置１８内の露光制御部は、先に設定したタイマの時間が所定の許容時間を超えてタイムアウトしたかどうかを調べ、まだタイムアウトしていないときには再びステップ１１３に戻って温度可変終了フラッグの値を調べる。そして、ステップ１１５でタイムアウトが発生したときには、その露光制御部はステップ１１６に移行して、オペレータに蛍石の温度が目標値に達しないとのアラーム情報を発する等のエラー処理を行う。
【００５６】
上述のように本例によれば、主制御装置１８内のメモリ内の共通作業領域６０のデータを介して、主制御装置１８内の温度制御部と露光制御部とが並列に動作することにより、投影光学系ＰＬ１内の蛍石よりなるレンズエレメントの温度の目標値への設定、及びその温度が目標値の許容範囲内に収まった後の露光が円滑に実行されている。
【００５７】
また、投影光学系ＰＬ１のモデルについて実際に数値解析した結果、蛍石よりなる１枚のレンズエレメントの温度を±１℃変化させることで、最大でほぼ±２０ｎｍ程度の非線形倍率誤差の補正が可能となることが分かった。そして、その蛍石よりなるレンズエレメントの温度制御の分解能としては、０．０１℃程度は可能であるため、蛍石よりなるレンズエレメントの温度を１℃程度変化させて非線形倍率誤差を補正する場合、その非線形倍率誤差の補正の分解能はほぼ±０．２ｎｍ（＝±２０／１００［ｎｍ］）となる。
【００５８】
同様に、蛍石よりなる１枚のレンズエレメントの温度を±１℃変化させることで、約±０．２μｍ程度の像面湾曲の補正が可能となることが分かった。更に、そのレンズエレメントの温度制御の分解能としては０．０１℃程度は可能であるため、蛍石よりなるレンズエレメントの温度を１℃程度変化させて像面湾曲を補正する場合、その像面湾曲の補正の分解能はほぼ±２ｎｍ（＝±０．２／１００［μｍ］）となる。従って、実際に必要な非線形倍率誤差、及び像面湾曲の精度によって上述の蛍石の温度の許容幅ΔＴ（図１３（ａ）参照）を設定すればよい。
【００５９】
なお、図１３（ａ）の例では温度制御媒体（気体）の制御温度T_{ij}を単調に元の目標温度T_1から次の目標温度T_2に変化させているが、より速く蛍石の温度ＴＦを次の目標温度T_2に近づけるためには、図１３（ｂ）の点線５９Ａで示すように、その温度制御媒体の制御温度T_{ij}を次の目標温度T_2に対して一度オーバーシュートさせればよい。これによって、実線の曲線５８Ａで示すように、蛍石の温度ＴＦは図１３（ａ）の場合より早い時点t_3において許容範囲内に達し、露光工程のスループット（単位時間当たりのウエハの処理枚数）を向上できる。
【００６０】
逆に、元の目標温度に対して次の目標温度の方が低いときには、逆に制御温度を次の目標温度に対して一度アンダーシュートさせればよい。
更に、上述の例では実際に蛍石の温度ＴＦを計測しているが、例えば図１３（ａ）において、蛍石の温度ＴＦが元の目標温度T_1から次の目標温度T_2の許容範囲内に達する

までの経過時間（$t_2 - t_1$）は、実験的に予め温度の制御幅（$T_2 - T_1$）の関数として求めておくことができる。そこで、その温度の制御幅（$T_2 - T_1$）の関数を図２の主制御装置１８内のメモリに記憶しておき、主制御装置１８の温度制御部では、温度の目標値を変更した際には、その関数で定まる時間及び所定のオフセット時間を経過した後に、蛍石の温度が変更後の目標値に対して許容範囲内に収まったものと判定するようにしてもよい。この方法によれば、その所定のオフセット時間だけ露光工程に要する時間が長くなるが、温度センサ等を省略できるため、装置構成が簡略化できる。

【００６１】

なお、本例では露光用光源としてエキシマレーザ光源が使用されているが、露光用照明光の照射エネルギーに関しては、水銀ランプのｉ線（波長：３６５ｎｍ）の方がエキシマレーザ光に比べて投影光学系での吸収が大きく、投影光学系の非線形倍率誤差や像面湾曲も大きく変化する。従って、照射エネルギーに応じて蛍石よりなるレンズエレメントの温度を制御する方法は、むしろ水銀ランプのｉ線等を使用した投影露光装置（ステッパー等）に適用することによって、非線形倍率誤差や像面湾曲を良好に低減できるという大きな利点がある。

【００６２】

次に、本発明の第２の実施の形態につき図３を参照して説明する。図３において図２に対応する部分には同一符号を付してその詳細説明を省略する。本例の投影光学系は、特にステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置に使用して好適な光学系である。

図３は、本例の投影光学系ＰＬ２を示し、この図３において、投影光学系ＰＬ２は、鏡筒４内にウエハW側から順に６枚のレンズエレメント２５～３０、４枚のレンズエレメント３１～３４、及び４枚のレンズエレメント３５Ｂ～３８Ｂを固定して構成されている。また、レンズエレメント３５Ｂ～３７Ｂはレンズ枠Ｇ３を介して鏡筒４内に固定され、レンズエレメント３８Ｂも不図示のレンズ枠を介して鏡筒４内に固定されている。

【００６３】

この場合、レンズエレメント３６Ｂのみは蛍石より形成され、その他のレンズエレメントは石英より形成されている。そして、レンズエレメント３６Ｂの走査方向であるＹ方向の一方の端部の両面に１対の温度制御素子４０Ａ，４０Ｂが固定され、そのＹ方向の他方の端部の両面にも１対の温度制御素子４０Ｃ，４０Ｄが固定されている。この場合、照明光学系によるレチクルＲのパターン形成面上でのスリット状の照明領域のＹ方向の幅をＬとすると、その幅Ｌの照明領域を通過した照明光が通過しない領域にそれらの温度制御素子４０Ａ～４０Ｄが固定してある。

【００６４】

それらの温度制御素子４０Ａ～４０Ｄとしては、ヒータ、又はペルチェ素子等が使用できる。そのペルチェ素子は加熱用に使用してもよく、吸熱用に使用してもよい。また、レンズエレメント３６ＢのＹ方向の端部に温度センサ５４Ａ，５４Ｂが固定され、この温度センサ５４Ａ，５４Ｂが温度検出装置５５に接続され、温度検出装置５５で検出されるレンズエレメント３６Ｂの温度が温度制御装置３９に供給され、温度制御装置３９は、検出された温度が主制御装置１８に指示された設定温度になるように、温度制御素子４０Ａ～４０Ｄの加熱、又は吸熱動作を制御する。従って、本例では温度制御素子４０Ａ～４０Ｄが温度制御媒体となる。

【００６５】

更に本例ではそのようにレンズエレメント３６Ｂの温度を制御することによって発生する熱の、近接するレンズエレメントへの影響を防止するための排熱機構が設けられている。即ち、レンズエレメント３６Ｂ，３７Ｂ及びレンズ枠Ｇ３で囲まれた気体室には、配管１９を介して温度制御装置１３ａから、所定温度の気体が供給され、その気体室を循環した気体が配管２３Ｂを介して温度制御装置１３ａに戻され、レンズエレメント３５Ｂ，３６Ｂ及びレンズ枠Ｇ３で囲まれた気体室には、配管２０を介して温度制御装置１３ａから、所定温度の気体が供給され、その気体室を循環した気体が配管２４Ｂを介して温度制御装置１３ａに戻される構成となっている。そして、主制御装置１８からの指令に基づいて温

度制御装置１３ａは、強制空調によって、レンズエレメント３６Ｂの前後のレンズエレメント３５Ｂ，３７Ｂの温度を一定に保つようにしている。それ以外の構成は図２の例と同様である。

【００６６】

以上のように、本例によれば、スリット状の照明領域を通過した照明光に照射されない空間を有効に活用して、温度制御素子４０Ａ～４０Ｄを用いて蛍石からなるレンズエレメント３６Ｂの温度を直接制御しているため、そのレンズエレメント３６Ｂの温度を高速且つ高精度に所望の目標温度に設定できる利点がある。これによって、投影光学系ＰＬ２の投影像の非線形倍率誤差や像面湾曲を迅速に、且つ高い精度で小さくできる。

【００６７】

次に、本発明の第３の実施の形態につき図４を参照して説明する。図４において図２に対応する部分には同一符号を付してその詳細説明を省略する。本例の投影光学系は、ステップ・アンド・リピート方式、及びステップ・アンド・スキャン方式の何れの投影露光装置に適用しても好適な光学系である。

図４は、本例の投影光学系ＰＬ３を示し、この図４において、投影光学系ＰＬ３は、鏡筒４内にウエハW側から順に６枚のレンズエレメント２５～３０、４枚のレンズエレメント３１，３２，３３Ａ，３４Ａ、及び４枚のレンズエレメント３５Ｃ～３８Ｃを固定して構成されている。また、レンズエレメント３３Ａ，３４Ａはレンズ枠Ｇ４を介して鏡筒４内に固定され、レンズエレメント３５Ｃ，３６Ｃはレンズ枠Ｇ５を介して鏡筒４内に固定され、他のレンズエレメントも不図示のレンズ枠を介して固定されている。

【００６８】

この場合、レンズエレメント３３Ａ、及び３６Ｃのみは蛍石より形成され、その他のレンズエレメントは石英より形成されている。この場合、上側の蛍石のレンズエレメント３６Ｃの温度変化によって主に非線形倍率誤差の特性が変化し、下側の蛍石のレンズエレメント３３Ａの温度変化によって主に線形倍率誤差の特性が変化するようになっている。また、レンズエレメント３５Ｃ，３６Ｃ及びレンズ枠Ｇ５で囲まれた気体室には、配管４１Ａを介して温度制御装置１３ｃから可変温度の気体が供給され、その気体室を循環した気体が配管４１Ｂを介して温度制御装置１３ｃに戻され、レンズエレメント３３Ａ，３４Ａ及びレンズ枠Ｇ４で囲まれた気体室には、配管４２Ａを介して温度制御装置１３ｄから、可変温度の温度の気体が供給され、その気体室を循環した気体が配管４２Ｂを介して温度制御装置１３ｄに戻される構成となっている。

【００６９】

更に、レンズエレメント３６Ｃ及び３５Ｃの対向する端部の露光用照明光が通過しない領域に、それぞれ温度センサ５４Ａ及び５４Ｂが被着され、温度センサ５４Ａ，５４Ｂが温度検出装置５５に接続され、温度検出装置５５で求められたレンズエレメント３６Ｃ，３５Ｃの温度がレンズ温度制御装置１３ｃ、及び主制御装置１８に供給されている。同様に、レンズエレメント３３Ａ及び３４Ａの対向する端部の露光用照明光が通過しない領域に、それぞれ温度センサ５６Ａ及び５６Ｂが被着され、温度センサ５６Ａ，５６Ｂが温度検出装置５７に接続され、温度検出装置５７で求められたレンズエレメント３３Ａ，３４Ａ温度がレンズ温度制御装置１３ｄ、及び主制御装置１８に供給されている。主制御装置１８からの指令に基づいて、温度制御装置１３ｃ及び１３ｄはそれぞれ、レンズエレメント３６Ｃ及び３３Ａの温度を目標温度に設定するようにしている。

【００７０】

そして、本例では投影光学系ＰＬ３の投影像の結像特性（非線形倍率誤差や像面湾曲）を補正するときには、温度制御装置１３ｃを介してレンズエレメント３６Ｃの温度を制御し、その際発生する線形倍率誤差を、温度制御装置１３ｄを介してレンズエレメント３３Ａの温度を制御することで相殺する方法を採っている。更にこの方法は、大気圧による結像特性の変化と、露光用の照明光の投影光学系に対する照射時の温度変化による結像特性とが異なり、３次以上の倍率誤差又はデフォーカスが大きく残る場合等に、それぞれに対応する２箇所の蛍石よりなるレンズエレメントで独立に結像特性制御を行う場合にも利用で

きる。即ち、例えば上側の蛍石よりなるレンズエレメント３６Ｃで大気圧による非線形倍率誤差又は像面湾曲を補正し、それより下側の蛍石よりなるレンズエレメントで照明光の照射による非線形倍率誤差又は像面湾曲を補正するようにしてもよい。

【００７１】

次に、本発明の第４の実施の形態につき図５を参照して説明する。図５において図２に対応する部分には同一符号を付してその詳細説明を省略する。本例の投影光学系は、ステップ・アンド・リピート方式、及びステップ・アンド・スキャン方式の何れの投影露光装置に使用しても好適な光学系である。

図５は、本例の投影光学系ＰＬ４を示し、この図５において、投影光学系ＰＬ４は、鏡筒４Ａ内にウエハW側から順に６枚のレンズエレメント２５，２６，２７Ａ，２８Ａ，２９Ａ，３０、４枚のレンズエレメント３１，３２，３３Ｂ，３４Ｂ、及び２枚のレンズエレメント３５Ｄ，３６Ｄを固定し、その鏡筒４Ａの上にレンズエレメント３７Ｄを保持する支持台４５、及びレンズエレメント３８Ｄを保持する支持台４６を固定して構成されている。また、レンズエレメント２８Ａ，２９Ａはレンズ枠Ｇ６を介して鏡筒４Ａ内に固定され、他のレンズエレメントも不図示のレンズ枠を介して鏡筒４Ａ内に固定されている。

【００７２】

本例では、レンズエレメント２８Ａ、及び２９Ａのみは蛍石より形成され、その他のレンズエレメントは石英より形成されている。また、レンズエレメント２８Ａ，２９Ａ及びレンズ枠Ｇ６で囲まれた気体室には、配管４３を介して温度制御装置１３ｅから可変温度の気体が供給され、その気体室を循環した気体が配管４４を介して温度制御装置１３ｅに戻されている。また、レンズエレメント２８Ａ及び２９Ａの対向する端部の露光用照明光が通過しない領域に、それぞれ温度センサ５４Ｂ及び５４Ａが被着され、温度センサ５４Ｂ，５４Ａが温度検出装置５５に接続され、温度検出装置５５で求められたレンズエレメント２８Ａ，２９Ａの温度がレンズ温度制御装置１３ｅ、及び主制御装置１８に供給されている。

【００７３】

そして、主制御装置１８からの指令に基づいて、温度制御装置１３ｅは、レンズエレメント２８Ａ，２９Ａの温度を目標温度に設定するようにしている。また、支持台４５及び４６は互いに独立に駆動装置４７によって、投影光学系ＰＬ４の光軸ＡＸに平行な方向への移動、及び所望の角度の傾斜ができるように構成されている。駆動装置４７の動作は、主制御装置１８からの指令に基づいて結像特性制御装置４８が制御する。

【００７４】

本例でも、蛍石よりなるレンズエレメント２８Ａ，２９Ａの温度を温度制御装置１３ｅを介して制御することによって、投影光学系ＰＬ４の投影像の非線形倍率誤差や像面湾曲を補正するが、その際発生する線形倍率誤差を支持台４５，４６を介してレンズエレメント３７Ｄ，３８Ｄを傾斜、又は上下動させることによって補正する。それら２つの支持台４５，４６の動きの組み合わせによって、倍率誤差のみでなく、焦点位置のデフォーカス、及び台形歪み状のディストーション等も補正できるので、非線形倍率誤差、又は像面湾曲の補正時に発生する他の収差の大半は温度制御装置１３ｅ、及び駆動装置４７の制御を最適化することで相殺することができる。

【００７５】

また、補正対象の結像特性が例えば非線形倍率誤差（高次倍率誤差）、及び像面湾曲であるとして、使用する投影光学系によって非線形倍率誤差、又は像面湾曲の一方の誤差が大きい場合には、その誤差が大きい方の結像特性の補正に有効な光学部材（レンズエレメント）の温度を制御すればよい。また、非線形倍率誤差と像面湾曲とが同時に発生する投影光学系に対しては、それぞれ別の光学部材の温度を独立に制御して、非線形倍率誤差と像面湾曲とを独立に補正してもよいが、それら両方の結像特性の補正に有効な同一の光学部材の温度を制御することによって、非線形倍率誤差と像面湾曲とを同時に補正することも可能である。

なお、本発明は上述の実施の形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の

構成を取り得ることは勿論である。

【００７６】

【発明の効果】

本発明によれば、第２の硝材からなる光学部材の温度を制御し、第２の硝材からなる光学部材の温度が目標温度に対して所定の許容範囲内に収まった後に露光動作を開始するようにしているため、露光動作中は投影光学系の結像特性は所望の状態に設定され、感光基板上に投影される投影像の結像特性が常に良好に維持される利点がある。

【００７７】

そして、例えば非線形倍率誤差の補正によって投影像の重ね合わせ精度が向上でき、像面湾曲の補正によって投影像全体としての焦点深度の幅を広くできる利点がある。

【００７８】

次に、第２の硝材からなる光学部材の温度を計測する温度センサを設け、露光制御手段が、その温度センサの計測値と目標温度とを比較して露光動作を開始するか否かを判定する場合には、その第２の硝材からなる光学部材の温度の実測値に基づいて迅速に露光動作を開始できると共に、露光動作中は常に結像特性が所望の状態に設定されている。

【００７９】

一方、その温度制御手段による第２の硝材からなる光学部材の温度が所定の温度に達するまでの時間を記憶する記憶手段を設け、露光制御手段が、その記憶手段に記憶されている時間に応じた時間が経過した後に感光基板への露光動作を開始するときには、温度センサ等が不要であるため簡単な機構によって、露光動作の開始のタイミングを決定できる利点がある。

【００８０】

また、その温度制御手段によって制御対象とする光学部材の温度を目標温度に設定する際に、その目標温度に対してオーバーシュート又はアンダーシュートさせるときには、その光学部材の温度をより早くその目標温度に設定できる利点がある。

【図面の簡単な説明】

【図１】本発明による投影露光装置の第１の実施の形態を示す構成図である。

【図２】第１の実施の形態で使用される投影光学系、及び結像特性の補正機構を示す一部を切り欠いた構成図である。

【図３】第２の実施の形態で使用される投影光学系、及び結像特性の補正機構を示す一部を切り欠いた構成図である。

【図４】第３の実施の形態で使用される投影光学系、及び結像特性の補正機構を示す一部を切り欠いた構成図である。

【図５】第４の実施の形態で使用される投影光学系、及び結像特性の補正機構を示す一部を切り欠いた構成図である。

【図６】温度変化に対して互いに異なる特性を有する２つの硝材のレンズを示す光路図である。

【図７】（ａ）は石英からなるレンズエレメントに依る非線形倍率誤差を示す図、（ｂ）は温度制御された蛍石からなるレンズエレメントに依る倍率誤差を示す図、（ｃ）は残存する線形倍率誤差を示す図である。

【図８】石英からなるレンズエレメント、温度制御された蛍石からなるレンズエレメント、及びレンズ制御装置を組み合わせて得られる倍率誤差を示す図である。

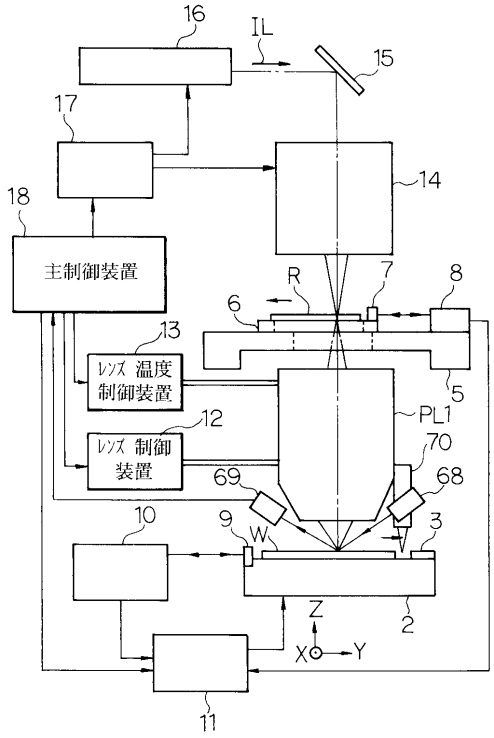
【図９】（ａ）は石英からなるレンズエレメントに依る像面湾曲を示す図、（ｂ）は温度制御された蛍石からなるレンズエレメントに依る像面湾曲を示す図、（ｃ）は残存するデフォーカス量を示す図である。

【図１０】石英からなるレンズエレメント、温度制御された蛍石からなるレンズエレメント、及びフォーカス位置の制御機構を組み合わせて得られるフォーカス位置の分布を示す図である。

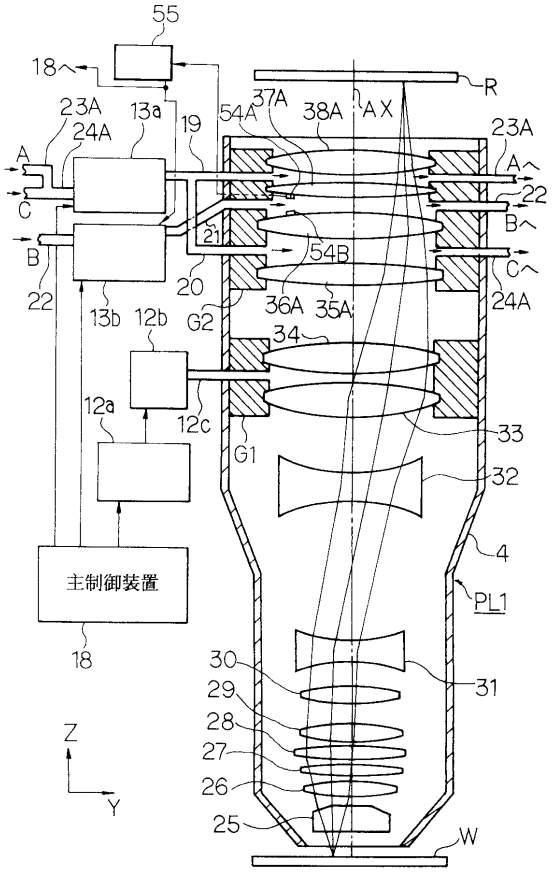
【図１１】（ａ）は結像特性計測用センサ３の開口部及び評価用マークの投影像を示す平面図、（ｂ）は結像特性計測用センサ３の構成を示す一部を断面とした構成図である。

【図１２】大気圧と蛍石よりなるレンズエレメントの温度との関係を示す図である。
【図１３】（ａ）は温度制御媒体の制御温度T_{ij}と蛍石の温度ＴＦとの関係を示す図、（ｂ）は温度制御媒体の制御温度T_{ij}をオーバーシュートさせた場合の説明図である。
【図１４】本発明の実施の形態における蛍石よりなるレンズエレメントの温度制御シーケンスと、露光シーケンスとの関係を示すフローチャートである。
【図１５】図２の主制御装置１８内のメモリの共通作業領域内のデータを示す図である。
【図１６】（ａ）は一括露光を行った場合の非線形倍率誤差の影響を示す図、（ｂ）は走査露光を行った場合の非線形倍率誤差の影響を示す図である。
【図１７】（ａ）は一括露光を行った場合の像面湾曲の影響を示す図、（ｂ）は走査露光を行った場合の像面湾曲の影響を示す図である。
【符号の説明】
Ｒ　レチクル
ＰＬ１，ＰＬ２，ＰＬ３，ＰＬ４　投影光学系
Ｗ　ウエハ
２　ウエハステージ
３　結像特性計測用センサ
４　鏡筒
Ｇ１，Ｇ２　レンズ枠
６　レチクルステージ
８，１０　レーザ干渉計
１２　レンズ制御装置
１３　レンズ温度制御装置
１３ａ，１３ｂ　温度制御装置
１４　照明光学系
１８　主制御装置
２５～３４，３５Ａ，３８Ａ　石英よりなるレンズエレメント
３６Ａ，３７Ａ　蛍石よりなるレンズエレメント
３６Ｂ　蛍石よりなるレンズエレメント
３３Ａ，３６Ｃ　蛍石よりなるレンズエレメント
２８Ａ，２９Ａ　蛍石よりなるレンズエレメント
４０Ａ～４０Ｄ　温度制御素子
５４Ａ，５４Ｂ，５６Ａ，５６Ｂ　温度センサ
５５，５７　温度検出装置

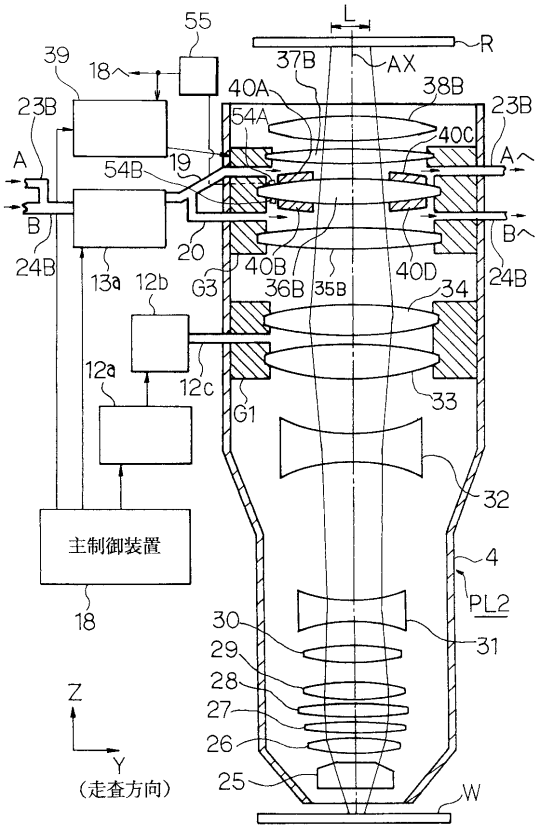
【図１】


16
IL
15
17
14
18
主制御装置
R
7
8
6
13
レンズ 温度制御装置
5
PL1
12
レンズ 制御装置
70
69
68
10
9
W
3
Z
X
Y
2
11

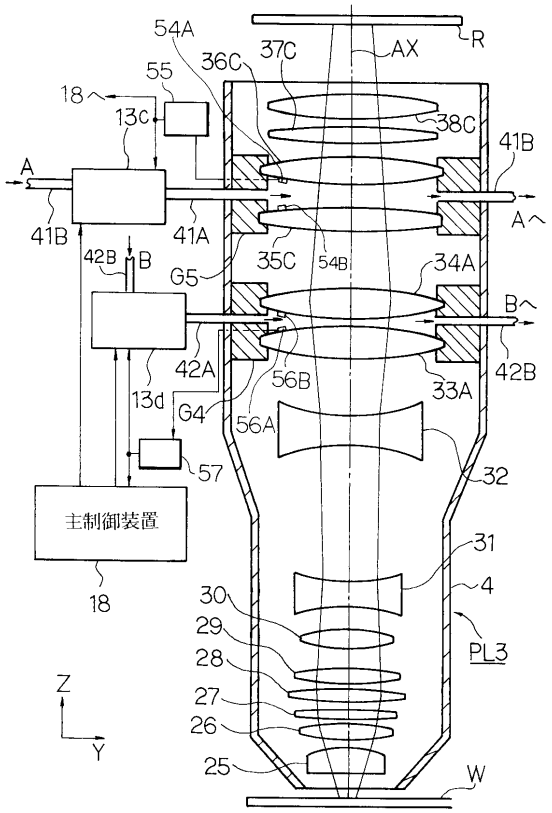
【図２】


55
18
R
23A
24A
13a
19
54A
37A
38A
AX
A
C
B
22
21
54B
20
36A
35A
13b
12b
G2
34
12a
12c
G1
33
32
主制御装置
4
PL1
18
30
29
28
27
26
25
31
W
Z
Y

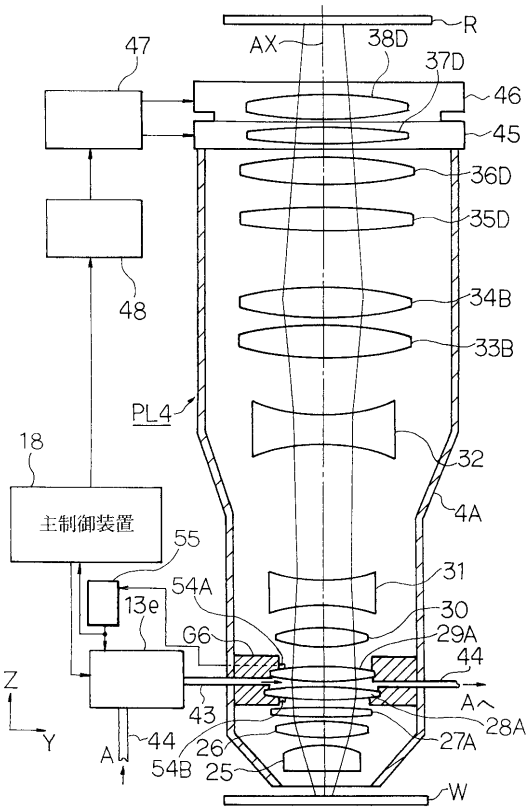
【図３】


55
L
R
39
18
37B
AX
40A
38B
23B
54A
40C
A
54B
19
B
20
24B
13a
12b
G3
40B
36B
35B
40D
34
12a
12c
G1
33
32
主制御装置
4
PL2
18
30
29
28
27
26
25
31
W
Z
Y
（走査方向）

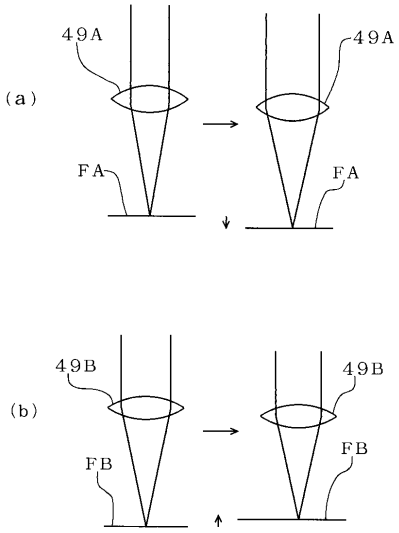
【図４】


54A
36C
37C
AX
R
55
18
13c
38C
41B
A
41B
41A
42B
B
G5
35C
54B
34A
42A
56B
33A
13d
G4
56A
57
32
主制御装置
31
4
PL3
18
30
29
28
27
26
25
W
Z
Y

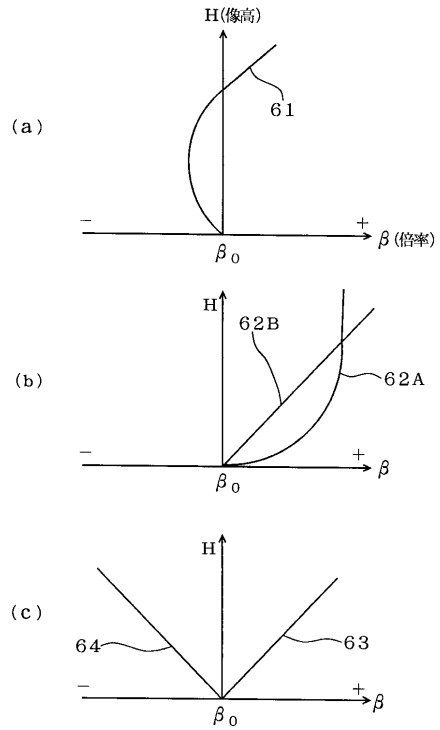
【図５】


R
AX
38D
37D
47
46
45
36D
35D
48
34B
33B
PL4
18
32
主制御装置
4A
55
31
54A
13e
30
G6
29A
44
Z
A
43
28A
Y
44
26
27A
A
54B
25
W

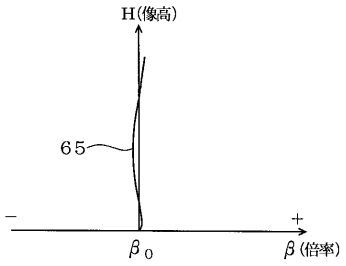
【図６】


(a)
49A
49A
FA
FA
(b)
49B
49B
FB
FB

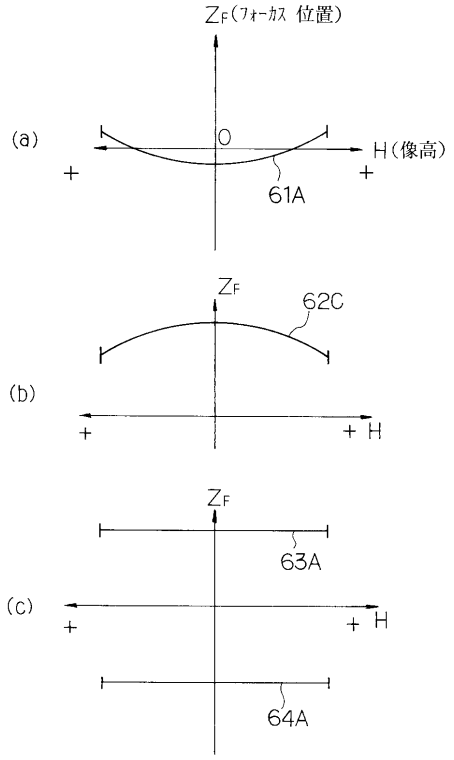
【図７】


H(像高)
(a)
61
−
+
β(倍率)
β0
H
(b)
62B
62A
−
+
β
β0
H
(c)
64
63
−
+
β
β0

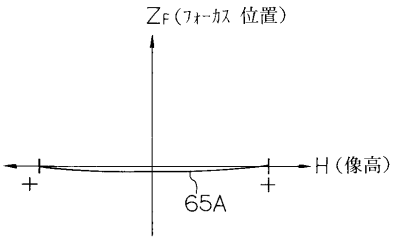
【図８】


H(像高)
65
−
+
β0
β(倍率)

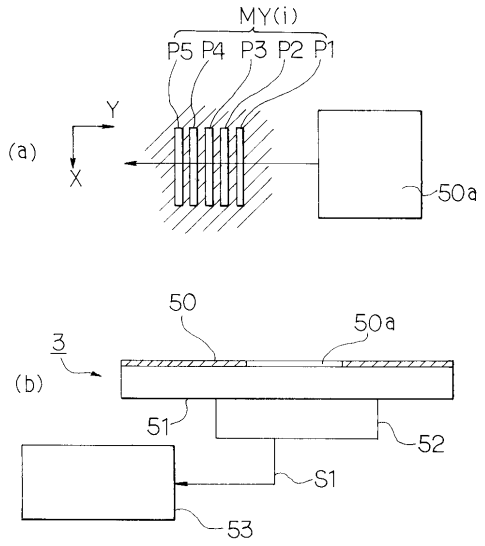
【図９】



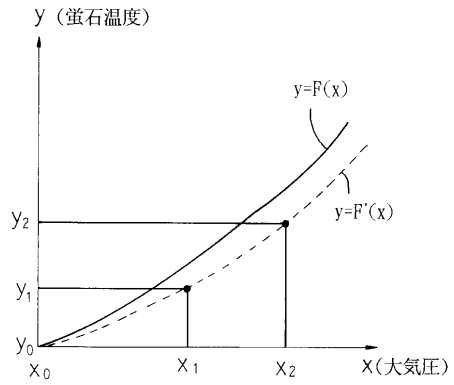
【図１０】



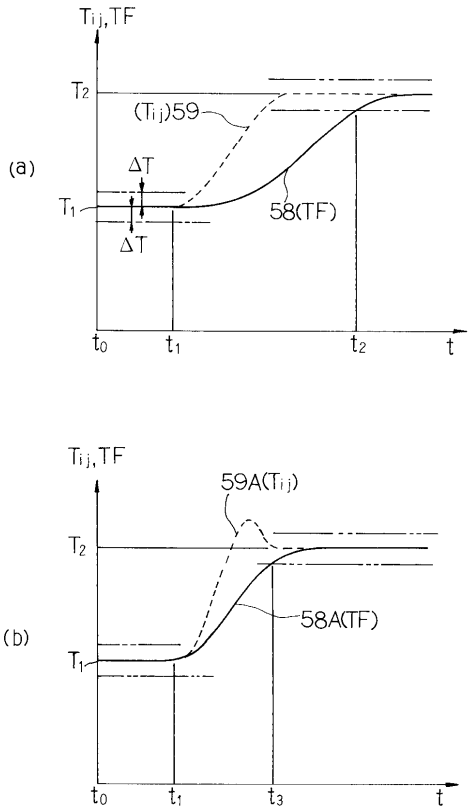
【図１１】



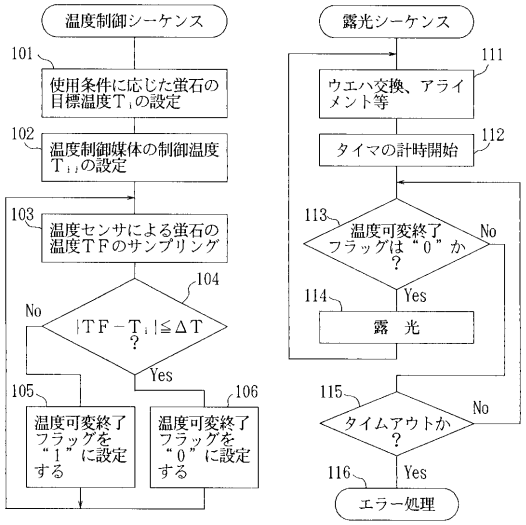
【図１２】



【図１３】



【図１４】

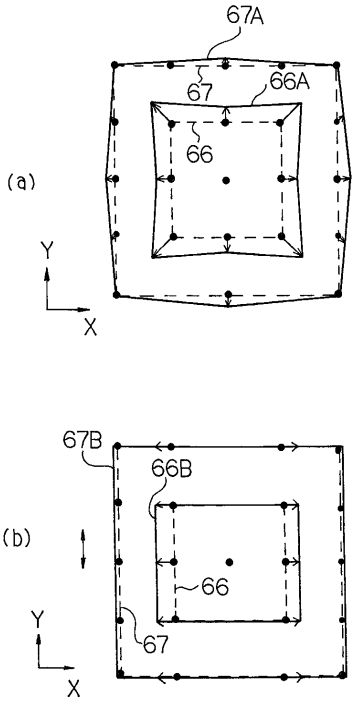


【図１５】

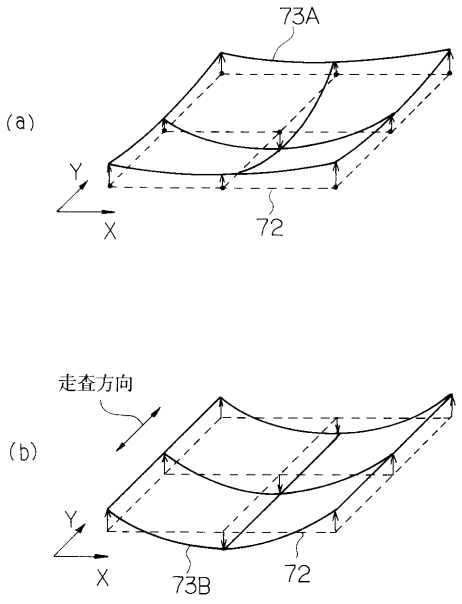
アドレス	データ
	温度可変終了フラッグ（“1”又は“0”）
	目標温度 T_i
	許容幅 ΔT
⋮	⋮

60

【図１６】



【図１７】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開昭６１－０７９２２８（ＪＰ，Ａ）
特開平０５－３４７２３９（ＪＰ，Ａ）
特開平０３－００３３１６（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－０４５８２７（ＪＰ，Ａ）
特開平０４－０８６６６８（ＪＰ，Ａ）
特開昭６０－１５９７４８（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.[7]，ＤＢ名)
H01L 21/027