

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7441640号
(P7441640)

(45)発行日 令和6年3月1日(2024.3.1)

(24)登録日 令和6年2月21日(2024.2.21)

(51)国際特許分類

G 0 3 F

7/20 (2006.01)

F I

G 0 3 F

7/20

5 0 1

G 0 3 F

7/20

5 2 1

請求項の数 15 外国語出願 (全24頁)

(21)出願番号	特願2019-226548(P2019-226548)	(73)特許権者	503263355
(22)出願日	令和1年12月16日(2019.12.16)		カール・ツァイス・エスエムティー・ゲ
(65)公開番号	特開2020-112786(P2020-112786		ーエムペーハー
	A)		ドイツ連邦共和国、7 3 4 4 7 オーバ
(43)公開日	令和2年7月27日(2020.7.27)		ーコッヘン、ルドルフ・エーバー・シュ
審査請求日	令和4年12月15日(2022.12.15)		トラーセ 2
(31)優先権主張番号	10 2019 200 218.8	(74)代理人	100147485
(32)優先日	平成31年1月10日(2019.1.10)		弁理士 杉村 憲司
(33)優先権主張国・地域又は機関	ドイツ(DE)	(74)代理人	230118913
			弁護士 杉村 光嗣
		(74)代理人	100147692
			弁理士 下地 健一
		(72)発明者	ビョーン ブッチャー
			ドイツ国 7 3 4 3 1 アーレン カント
			シュトラーセ 8 7

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に関してマニピュレータを制御する制御装置及び方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

マイクロリソグラフィ投影露光装置（50）のパラメータを変更する少なくとも1つのマニピュレータ（M1～M4、36）を、該マニピュレータにより行われる前記パラメータの変更を規定する移動変数（38、138）に関するターゲットを生成することにより制御する制御装置（14、114）であって、該制御装置は、メリット関数（42）を最適化することにより前記投影露光装置の状態特性評価（34）から前記ターゲット（38）を生成するよう構成され、前記メリット関数は、暗黙制約として前記投影露光装置の特性に関する極限（44）を考慮する少なくとも1つのペナルティ項（46）を含み、前記ペナルティ項は、前記特性が前記極限に近付くにつれてその関数値が「無限大」に向かうように定式化され、前記極限は有限の所定の値であり、

前記ペナルティ項（46）は、少なくとも一区間で少なくとも1回連続微分可能である関数（47）を含み、前記区間は実際の境界条件により制限される関数の定義域の90％超を占める、制御装置。

【請求項2】

請求項1に記載の制御装置において、
前記関数は、最小増分での数値表現で利用可能であり、前記関数値が該制御装置の計算プログラムで表現可能な最小数の10倍となる区間の各点において、線形近似により求められた関連の近似点の関数値の実際の関数値からのずれが実際の関数値の50％以下であることにより、連続微分可能性が満たされ、前記各点に関連する前記近似点は、その点か

ら前記最小増分の2倍以上離れている制御装置。

【請求項3】

請求項1又は2に記載の制御装置において、

前記関数(47)は、少なくとも前記区間で少なくとも2回連続微分可能である制御装置。

【請求項4】

請求項1～3のいずれか1項に記載の制御装置において、

前記関数(47)は、対数関数(47a)を少なくとも近似的に含む制御装置。

【請求項5】

請求項1～4のいずれか1項に記載の制御装置において、

前記関数(47)は、有理分数関数(47b)を少なくとも近似的に含む制御装置。

【請求項6】

請求項1～5のいずれか1項に記載の制御装置において、

前記ペナルティ項(46)は、その関数値が前記極限(44)を超える場合に「無限大」と定義されるように定式化される制御装置。

【請求項7】

請求項1～6のいずれか1項に記載の制御装置において、

該制御装置(14、114)は、第1最適化変数として働く前記移動変数(38)及び別カテゴリのさらに別の最適化変数(43)により前記メリット関数を最適化することにより、前記ターゲットを実装するよう構成される制御装置。

【請求項8】

請求項7に記載の制御装置において、

前記さらに別の最適化変数(43)は、前記極限(44)をスケーリングするためのスケール因子(43a)を含む制御装置。

【請求項9】

請求項8に記載の制御装置において、

前記メリット関数(42)は、前記スケール因子(43a)の値を制限するさらに別のペナルティ項(48)を含む制御装置。

【請求項10】

請求項7～9のいずれか1項に記載の制御装置において、

前記極限(44)は、前記投影露光装置の各特性に関する複数の個別極限值を含み、前記さらに別の最適化変数は、前記個別極限値をスケーリングするための複数のスケール因子(43a)と前記個別極限値の少なくとも1つを超えることができない群極限値とを含む制御装置。

【請求項11】

請求項1～10のいずれか1項に記載の制御装置において、

前記ペナルティ項(46)が前記極限を含む前記投影露光装置の前記特性は、前記投影露光装置の投影レンズの結像収差を含む制御装置。

【請求項12】

請求項1～11のいずれか1項に記載の制御装置において、

前記ペナルティ項(46)が前記極限を含む前記投影露光装置の前記特性は、前記移動変数(38)に関する前記ターゲットを含む制御装置。

【請求項13】

マイクロリソグラフィ投影レンズ(16)を調整する調整機構(10)であって、

前記投影レンズの状態特性評価(34)を確認する測定装置(12)と、前記状態特性評価から移動変数(38)に関するターゲットを生成する請求項1～12のいずれか1項に記載の制御装置(14)とを備えた調整機構。

【請求項14】

マイクロリソグラフィ投影露光装置(50)であって、投影レンズの該投影露光装置のパラメータを変更するよう構成された少なくとも1つのマニピュレータ(M1～M4)と

10

20

30

40

50

、前記少なくとも1つのマニピュレータを制御する請求項1～12のいずれか1項に記載の制御装置（114）とを備えたマイクロリソグラフィ投影露光装置。

【請求項15】

マイクロリソグラフィ投影露光装置のパラメータを変更する少なくとも1つのマニピュレータ（M1～M4、114）を制御する方法であって、

メリット関数（42）を最適化することにより前記投影露光装置の状態特性評価（34）から前記少なくとも1つのマニピュレータの移動変数（38）に関するターゲットを生成するステップであり、

前記メリット関数は、暗黙制約として前記投影露光装置の特性に関する極限（44）を考慮する少なくとも1つのペナルティ項（46）を含み、

前記ペナルティ項は、前記特性が前記極限に近づくにつれてその関数値が「無限大」に向かうように定式化され、前記極限は有限の所定の値であり、

前記ペナルティ項（46）は、少なくとも一区間で少なくとも1回連続微分可能である関数（47）を含み、前記区間は実際の境界条件により制限される関数の定義域の90%超を占めるステップと、

前記移動変数に関して生成された前記ターゲットに基づいて前記少なくとも1つのマニピュレータにより前記投影露光装置のパラメータを変更するステップとを含む方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本願は、2019年1月10日付けで出願された独国特許出願第10 2019 200 218. 8号の優先権を主張する。この特許出願の全開示を参照により本願に援用する。

【0002】

本発明は、マイクロリソグラフィ投影露光装置のパラメータを変更する少なくとも1つのマニピュレータを制御する制御装置及び方法に関する。さらに、本発明は、それぞれがかかる制御装置を有する、マイクロリソグラフィ投影レンズを調整する調整機構及びマイクロリソグラフィ投影露光装置に関する。

【背景技術】

【0003】

マイクロリソグラフィ投影露光装置は、半導体コンポーネントの製造中に半導体ウェハの形態の基板の構造を形成する役割を果たす。この目的で、投影露光装置は、露光プロセス中にウェハにマスク構造を結像するための複数の光学素子を有する投影レンズを備える。

【0004】

ウェハへのマスク構造のできる限り高精度の結像を補償するために、波面収差ができる限り小さな投影レンズが必要である。したがって、投影レンズには、投影レンズの個々の光学素子の状態を変更することにより波面誤差を補正することを可能にするマニピュレータが設けられる。このような状態変更の例は、該当光学素子の剛体6自由度のうち1つ又は複数の位置の変化、熱及び／又は低温での光学素子に対する作用、光学素子の変形、又は後処理デバイスによる光学素子における材料アブレーションを含む。本願の範囲内では、こうした後処理デバイスも、その一般的な意味で投影レンズのマニピュレータであると理解される。

【0005】

投影レンズに特有の収差を補正するために実行されるマニピュレータ変更は、「マニピュレータ変更モデル」とも称する移動生成（travel-generating）最適化アルゴリズムにより計算される。例として、このような最適化アルゴリズムは、特許文献1及び特許文献2に記載されている。

【0006】

したがって、従来技術から既知の最適化アルゴリズムは、以下の最適化問題を解くよう構成され得る： $F_j(x) \leq s_j$ の場合、

10

20

30

40

50

【数 1】

$$\min \|Mx - b_{mess}\|_2^2 \quad (1)$$

【0007】

このような最適化問題は、 $F_j(x) \leq s_j$ で表される制約を考慮して、

$$\|Mx - b_{mess}\|_2^2$$

で表される性能指数関数とも称するメリット関数を最小化するように構成される。ここで、 M は感度行列を指し、 x は個々のマニピュレータ毎の移動に関する移動ベクトルを指し、 b_{mess} は投影レンズの状態ベクトルを指し、当該状態ベクトルは上記投影レンズの測定収差特性を表し、

$$\| \cdot \|_2$$

はユークリッドノルムを指し、 $F_j(x)$ は制約を表す適当な関数を指し、 s_j は投影レンズの特性に関する、例えば状態ベクトル b のパラメータ及び／又は個々の移動 x_i 等に関する各一定の極限值を指す。

【0008】

ここで、「移動」は、光学素子の光学効果を変更する目的でマニピュレータ作動により実行される光学素子の状態変数の変更を意味すると理解される。光学素子の状態変数の変更により定められるこのような移動は、関連するマニピュレータのセットポイント変化量により指定される。例として、操作は、光学素子の特定の方向の変位からなり得るが、例えば、光学素子に対する熱、低温、力、トルク、特定の波長を有する光、又は電流での作用、特に局所的な又は2次元の作用からなり得る。さらに、操作は、後処理デバイスにより実行しようとする光学素子における材料アブレーションを規定し得る。例として、セットポイント変化量は、変位の場合に対象となる経路長又は対象となる角度範囲を規定し得る。

【0009】

$F_j(x) \leq s_j$ で定義される制約は、投影レンズの該当特性に関して超えてはならないハードリミットを規定する。この問題のサイズでの計算時間のスケージングの悪さは、この最適化法における実質的な問題を表す。それゆえ、マニピュレータ自由度が比較的多数である場合は、移動ターゲットの時間効率のよい計算が達成不可能となる。

【0010】

計算時間を短縮するために、従来技術（特許文献2）では、制約により規定された極限がメリット関数に含まれるペナルティ関数を用いて考慮される最適化法が開示されており、このペナルティ関数は、偶数指数を有する累乗に基づく。しかしながら、この方法は、制約が全ての条件下で正確に順守されることを保証するものとはなっていない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0011】

【文献】国際公開第2010／034674号

【文献】独国特許出願公開第2015 206 448号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

本発明の目的は、上記問題を解決すると共に特に投影露光装置の特性に関する極限によりよく従って時間効率よく移動ターゲットを確認できるようにする、冒頭に記載したタイ

10

20

30

40

50

プの制御装置及び方法を提供することである。特に、極限は厳密に従われるべきである。

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明によれば、上記目的は、例えば、マイクロリソグラフィ投影露光装置のパラメータ、特にマイクロリソグラフィ投影レンズの少なくとも1つの光学素子のパラメータを変更する少なくとも1つのマニピュレータを制御する制御装置が、マニピュレータにより行われるパラメータの変更を規定する移動変数に関するターゲットを生成することにより達成することができ、上記制御装置は、メリット関数を最適化することにより投影露光装置の、特に投影レンズの状態特性評価 (state characterization) からターゲットを生成するよう構成され、メリット関数は、暗黙制約として投影露光装置の、特に投影レンズの特性に関する極限を考慮する少なくとも1つのペナルティ項を含み、ペナルティ項は、特性が極限に近づくにつれてその関数値が「無限大」に向かうように定式化される。

10

【0014】

上述のように、制御装置により制御される少なくとも1つのマニピュレータは、投影露光装置の投影レンズの少なくとも1つの光学素子のパラメータを変更するよう働くことができる。さらに、マニピュレータは、特に、測定マスク又はセンサ又は照明放射線の波長を調整するよう働き得る。投影露光装置の特性に関する極限は、上限又は下限とすることができ、概して、極限は1つ又は複数の制約を規定する。ペナルティ項は、メリット関数の項を意味すると理解されたく、上記ペナルティ項の関数は、最適化中に、特性を定量化する値が極限に近づくことを抑制するか又は上記値が極限を超越することを少なくとも抑制する関数である。

20

【0015】

上述のように、本発明による制御装置は、投影露光装置の状態特性評価から移動変数に関するターゲットを生成するよう構成される。ここで、状態特性評価は唯一の入力量である必要はなく、他の入力量、例えばマスクの放射照度又は測定周囲圧力等を、移動変数に関するターゲットを確認する目的で状態特性評価に加えて制御装置により考慮することができる。移動変数はベクトル変数として構成されることができ、そのベクトル要素のそれぞれが、マニピュレータにより行われる投影レンズの光学素子のパラメータの調整を規定する。

【0016】

状態特性評価は、投影レンズの結像収差であり得る。結像収差は、ゼルニケ像収差 (Zernike image aberration) の形態又は1つ又は複数のゼルニケ像収差から得られる量の形態で入手可能であり得る。さらに、結像収差は、いわゆるリソグラフィ誤差、すなわち、マスク構造の空中像又はウェハ像の誤差、例えばオーバーレイ誤差又はライン幅誤差等であり得る。

30

【0017】

本発明によれば、ペナルティ項は、特性が極限に近づくにつれてその関数値が「無限大」に向かうように定式化される。例として、これは、対数関数又は有理分数関数により実施することができる。本発明によるこのようなペナルティ項の定式化は、極限の超越を効果的に防止する結果として、1つ又は複数の制約の順守が確保される。同時に、メリット関数に含まれるペナルティ項を用いて制約を暗黙的に考慮することにより、移動ターゲットの時間効率のよい計算が促される。すなわち、最適化の計算時間を少なく抑えることができると同時に、制約の順守を確保することができる。

40

【0018】

本発明による一実施形態によれば、ペナルティ項は、少なくとも一区間で少なくとも1回連続微分可能である関数を含む。連続微分可能性により、オブティマイザが傾斜法を用いることが可能となる。解は、傾斜法により効率的に求めることができる。

【0019】

一変形実施形態によれば、関数が少なくとも1回連続微分可能である区間は、実際の境界条件により制限される関数の定義域の90%超、特に98%超、99%超、99.9%

50

超、又は99.99%超を占める。実際の境界条件による定義域の制限は、関数の引数が、操作システム及び／又は投影露光装置の境界条件により、数学的観点から可能な最大定義域の全値をとることが実際にはできないことを意味すると理解されたい。したがって、例えば、像収差をゼロまで減らすことが不可能な場合があり、その代わりに、ゼロの絶対値から特定の値まで近付くことができるにすぎない。特に、数学的観点から $-\infty$ 又は $+\infty$ の下限又は上限を有する定義域は、実際の境界条件により有限の数値に制限される。

【0020】

さらに別の実施形態によれば、関数は、最小増分での数値表現で利用可能である。ここで、関数値が制御装置の計算プログラムで表現可能な最小数の10倍となる区間の各点において、線形近似により求められた関連の近似点の関数値の実際の関数値からのずれが実際の関数値の50%以下、特に20%以下、10%以下、5%以下、又は1%以下であることにより、連続微分可能性が満たされる。各点に関連する近似点は、その点から最小増分の2倍以上、特に最小増分の5倍以上又は10倍以上離れている。特に、これは、関数値が制御装置の計算プログラムで表現可能な最小数の1000倍又は 10^6 倍となる区間の各点に当てはまる。さらに別の実施形態によれば、関数は、少なくとも一区間で少なくとも2回連続微分可能である。これにより、オプティマイザが2次微分を用いてより迅速に傾斜法により確認されるターゲットを求めることができる。

【0021】

一変形実施形態によれば、関数は、最小増分での数値表現で利用可能であり、少なくとも2回連続微分可能性は、関数値が制御装置の計算プログラムで表現可能な最小数の10倍となる区間の各点において、二次近似により求められた関連の近似点の関数値の実際の関数値からのずれが実際の関数値の50%以下、特に20%以下、10%以下、5%以下、又は1%以下であることにより満たされ、この場合の各点に関連する近似点は、その点から最小増分の2倍以上、特に最小増分の5倍以上又は10倍以上離れている。特に、これは、関数値が制御装置の計算プログラムで表現可能な最小数の1000倍又は 10^6 倍となる区間の各点に当てはまる。

【0022】

さらに別の実施形態では、ペナルティ項は、対数関数及び／又は有理分数関数を少なくとも近似的に含む。これらの関数により、極限に特に効果的に従うことができる。対数関数の場合、これは解析関数として、そうでなければ表形式の表現で (or else however in the tabular representation) 利用可能である。ここで、「少なくとも近似的に」という指定は、ペナルティ項が対数関数及び／又は有理分数関数で表される関数を含むか、又はペナルティ項が少なくともこれらの関数と非常に類似しているのでペナルティ項におけるその効果が上記関数に匹敵することを意味すると理解されたい。

【0023】

さらに別の実施形態によれば、ペナルティ項は、極限が超越される場合にその関数値が「無限大」と定義されるように定式化される。最適化アルゴリズムが比較的大きな増分を用いる場合、ペナルティ項の上記定式化では極限值が「無限大」に向かわないにもかかわらず、極限が超越され得る (the limit may be exceeded despite the aforementioned formulation of the penalty term with the limit value running counter to "infinity")。極限が超越される場合にペナルティ項の関数値を「無限大」と定義することにより、例えば最適化中に比較的大きな増分の使用により極限が超越される場合に当該超越が最適化のさらなる範囲内で取り消されることを確実にすることが可能である。

【0024】

さらに別の実施形態によれば、制御装置は、第1最適化変数として働く移動変数及び別カテゴリーのさらに別の最適化変数によりメリット関数を最適化することにより、ターゲットを実装するよう構成される。上記別カテゴリーのさらに別の最適化変数は、この最適化変数がマニピュレータの移動変数ではないことを意味すると理解されたい。

【0025】

さらに別の実施形態によれば、上記さらに別の最適化変数は、極限をスケーリングする

10

20

30

40

50

ためのスケール因子を含む。一変形実施形態によれば、メリット関数は、スケール因子の値を制限するさらに別のペナルティ項を含む。例として、このペナルティ項は、スケール因子の2乗又は高累乗を含み得る。

【0026】

さらに別の実施形態によれば、極限は、投影露光装置の各特性に関する複数の個別極限值を含み、上記さらに別の最適化変数は、個別極限値をスケールリングするための複数のスケール因子と個別極限値の少なくとも1つを超えることができない群極限値 (group limit value) とを含む。メリット関数の上記さらに別のペナルティ項は、スケール因子及び群極限値の両方の値を制限するよう構成される。さらに、上記さらに別の最適化変数は、複数の群極限値及び上位群 (supra-group) 極限値を含むことができ、群極限値は、異なる群のスケール因子に関係し、群極限値のいずれも上位群極限値を超えてはならない。さらに別の実施形態によれば、メリット関数は、群極限値を制限するさらに別のペナルティ項を含み得る。この概念は、さらに上位の群極限値 (supra-supra-group limit values) でのさらなるカスケードリングに拡張することができる。

10

【0027】

さらに他の実施形態によれば、ペナルティ項が極限を含む投影露光装置の特性は、投影露光装置の投影レンズの結像収差及び／又は移動変数に関するターゲットを含む。特性が少なくとも移動変数に関するターゲットを含む変形形態では、第1ペナルティ項は、マニピュレータ移動の少なくとも1つに関する境界条件に関係する。特に、第1ペナルティ項は、少なくとも1つの結像収差及び少なくとも1つの移動変数に関する各極限を含み得る。

20

【0028】

さらに、本発明によれば、マイクロリソグラフィ投影レンズを調整する調整機構が提供される。本発明による調整機構は、投影レンズの状態特性評価を確認する測定装置と、状態特性評価から移動変数に関するターゲットを生成する前述の実施形態又は変形実施形態のいずれか1つによる制御装置とを備える。

【0029】

さらに、本発明によれば、マイクロリソグラフィ投影露光装置が提供される。本発明による投影露光装置は、投影露光装置の光学素子のパラメータを変更するよう構成された少なくとも1つのマニピュレータと、少なくとも1つのマニピュレータを制御する前述の実施形態又は変形実施形態のいずれか1つによる制御装置とを備える。一実施形態によれば、少なくとも1つのマニピュレータは、投影露光装置の投影レンズの光学素子のパラメータを変更するよう構成される。

30

【0030】

例として、上記目的はさらに、投影露光装置の、特にマイクロリソグラフィ投影レンズの少なくとも1つの光学素子のパラメータを変更する少なくとも1つのマニピュレータを制御する方法により達成することができる。本発明による方法は、メリット関数を最適化することにより投影露光装置の、特に投影レンズの状態特性評価から少なくとも1つのマニピュレータの移動変数に関するターゲットを生成するステップを含み、メリット関数は、暗黙制約として投影レンズの特性に関する極限を考慮する少なくとも1つのペナルティ項を含み、ペナルティ項は、特性が極限に近付くにつれてその関数値が「無限大」に向かうように定式化される。さらに、本発明による方法は、移動変数に関して生成されたターゲットに基づいて少なくとも1つのマニピュレータにより投影露光装置の、特に投影レンズの少なくとも1つの光学素子のパラメータを変更するステップを含む。

40

【0031】

上記で挙げた、本発明による制御装置の実施形態、例示的な実施形態及び変形実施形態等に関して指定した特徴は、本発明による制御法に適宜転記することができる。本発明による実施形態のこれら及び他の特徴は、図の説明及び特許請求の範囲で説明される。個々の特徴は、本発明の実施形態として個別に又は組み合わせて実施することができる。さらに、個々の特徴は、独立して保護可能な有利な実施形態を説明するものであり、適切な場合は本願の係属中又は係属後にのみその保護が求められる。

50

【0032】

本発明の上記及びさらに他の有利な特徴を、添付の概略図を参照して以下の本発明による例示的な実施形態の詳細な説明に示す。

【図面の簡単な説明】

【0033】

【図1】マイクロリソグラフィ投影レンズの状態特性評価を確認する測定装置と、投影レンズに組み込まれた操作及び後処理デバイスの形態のマニピュレータを制御する制御装置とを有する、投影レンズを調整する調整機構の本発明による一実施形態の視覚化を示す。

【図2】制御装置により実行される最適化アルゴリズムの基礎となるメリット関数の構成の視覚化を示す。

【図3】本発明によるメリット関数の一実施形態の効果を視覚化するグラフを示す。

【図4】メリット関数の比較例の効果を視覚化するグラフである。

【図5】投影レンズと投影レンズのマニピュレータを制御する制御装置とを備えた、本発明によるマイクロリソグラフィ投影装置の一実施形態の視覚化を示す。

【発明を実施するための形態】

【0034】

以下に記載する例示的な実施形態又は実施形態又は変形実施形態において、相互に機能的又は構造的に類似した要素にはできる限り同一又は同様の参照符号を付す。したがって、特定の例示的な実施形態の個々の要素の特徴を理解するためには、他の例示的な実施形態の説明又は本発明の概要を参照されたい。

【0035】

説明を容易にするために、直交 x y z 座標系が図示されており、当該座標系から図示のコンポーネントの各位置関係が明らかである。図1において、 y 方向は図の平面に対して垂直に延び、 x 方向は右側に延び、 z 方向は上方に延びる。

【0036】

図1は、マイクロリソグラフィ投影露光装置の投影レンズ16を調整する調整機構10を示す。ここで、調整機構の個々のコンポーネントは、相互に別個に配置することができるか又は単一の装置に組み込むことができる。調整装置10は、投影レンズ16の状態特性評価34を確認する測定装置12と、状態特性評価34から移動コマンド38を生成するいわゆる移動確認デバイスの形態の制御装置14とを備える。

【0037】

投影レンズ16は、マスク構造を物体面24から像面28へ結像するよう働き、例えば248nm又は193nm等の種々の波長の露光放射線用に設計することができる。本実施形態では、投影レンズ16は、EUV波長域の波長、例えば13.5nm用に設計される。

【0038】

測定装置12は、投影レンズ16の波面誤差を測定するよう構成され、投影レンズ16の入射側に照明デバイス18及び測定マスク22と、投影レンズの出射側にセンサ素子26、検出器30、及び評価デバイス32とを備える。図1では、測定マスク22は透過型の素子として示されている。しかしながら、好ましい実施形態によれば、測定マスク22は反射型である。照明デバイス18は、試験対象の投影レンズ16の作動波長の測定放射線20を、この場合はEUV放射線の形態で発生させると共に、当該放射線を物体面24に配置された測定マスク22に放射するよう構成される。本願の範囲内において、EUV放射線は、100nm未満の波長、特に約13.5nm又は約6.7nmの波長を有する電磁放射線を意味すると理解されたい。多くの場合に「コヒーレンスマスク」とも称する測定マスク22は、第1周期構造を有する。第2周期構造を有する像格子の形態のセンサ素子26は、像面28に配置される。測定マスク22の市松構造をセンサ素子26の市松構造と組み合わせることも可能である。シアリング干渉法又は点回折干渉法の分野からの当業者に既知の周期構造の他の組み合わせを用いることも可能である。図1では、センサ素子26は透過型の素子として示されている。しかしながら、特に、センサ素子26は反

10

20

30

40

50

射型とすることもできる。

【0039】

2次元分解するカメラの形態の検出器30が、センサ素子26の下に、厳密には投影レンズ16の瞳面と共役な平面に配置される。センサ素子26及び検出器30は合わせてセンサモジュールを形成する。測定マスク22及びセンサモジュールは、当業者に既知のシアリング干渉計又は点回折干渉計を形成し、投影レンズ16の波面誤差を測定するよう働く。この目的で、当業者に既知の位相シフト法が特に適用される。

【0040】

評価デバイス32は、検出器30により記録された強度パターンから投影レンズ16の状態特性評価34を確認する。本実施形態によれば、状態特性評価34は、投影レンズ16の波面誤差を特徴付ける1組のゼルニケ係数 b_j を含む。

10

【0041】

本願において、例えばDaniel Malacara著の学術書「Optical Shop Testing（光学実験・測定法）」第2版、John Wiley & Son, Inc.、13.2.3章（1992年）から知られる

ゼルニケ関数 Z_m^n

は、例えば米国出願公開第2013/0188246号明細書の段落[0125]～[0129]に記載のようにいわゆるフリンジ分類（fringe sorting）に従って Z_j で表され、この場合、 b_j が各ゼルニケ多項式（「ゼルニケ関数」とも称する）に割り当てられたゼルニケ係数である。フリンジ分類は、例えばH. Gross著、「Handbook of Optical Systems（光学系ハンドブック）」第2巻、Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA、ヴァインハイム、2005年、215ページの表20-2に示されている。次式のように、瞳面内の極座標（ ρ ， Φ ）に応じて、投影レンズの像面における1点での波面ずれ W （ ρ ， Φ ）が展開される。

20

【数2】

$$W(\rho, \Phi) = \sum_j b_j \cdot Z_j(\rho, \Phi) \quad (2)$$

30

【0042】

本願の範囲内では、ゼルニケ多項式が Z_j で、すなわち下付き添字 j を用いて示されるのに対して、ゼルニケ係数は b_j で示される。ここで、当業界では、ゼルニケ係数 b_j が Z_j で、すなわち標準表記の添字を用いて、例えば非点収差を表す Z_5 及び Z_6 等で示されることも多いことに留意されたい。

【0043】

40

50

測定装置 1 2 の評価デバイス 3 2 により確認された状態特性評価 3 4 は、制御装置 1 4 へ伝達され、制御装置 1 4 は、そこから移動変数 x の形態の移動コマンド 3 8 を生成する。本実施形態では、移動変数 x は、ベクトルの形態を有し、移動 x_i 及び移動 x_n^L を含む。これらの移動 x_i は、投影レンズ 1 6 のマニピュレータ M_s を制御する役割を果たし、移動 x_n^L は、投影レンズ 1 6 の光学素子の機械的後処理のための後処理デバイス 3 6 を制御する役割を果たす。本願の範囲内において、マニピュレータ M_s 及び後処理デバイス 3 6 の両方が、一般的な意味で投影レンズ 1 6 用のマニピュレータであると理解される。概して、移動 x_i 及び移動 x_n^L を有する移動コマンド 3 8 は、移動変数に関するターゲットを含み、これらのターゲットは、マニピュレータにより行われる投影レンズ 1 6 の 1 つ又は複数の光学素子の各パラメータの変更を規定し、光学素子の変更対象のパラメータは、特に、マニピュレータ M_s により調整可能である光学素子の配置位置又は後処理デバイス 3 6 により行われることができる形状状態を含み得る。

10

20

【0044】

投影レンズ 1 6 は、図 1 に示す実施形態では 4 つの光学素子 E 1 ~ E 4 のみを有する。全ての光学素子が可動式に取り付けられる。この目的で、各マニピュレータ M_s 、特にマニピュレータ M 1 ~ M 4 のそれぞれが、光学素子 E 1 ~ E 4 のそれぞれに割り当てられる。マニピュレータ M 1、M 2、及び M 3 は、それぞれが割り当てられた光学素子 E 1、E 2、及び E 3 の x 方向及び y 方向の、したがって光学素子の各反射面が位置する平面と実質的に平行な変位を可能にする。

30

【0045】

マニピュレータ M 4 は、 y 軸と平行に配置された傾斜軸 4 0 の周りの回転により光学素子 E 4 を傾斜させるよう構成される。結果として、E 4 の反射面の角度は、入射放射線に対して変更される。マニピュレータのさらに他の自由度も考えられる。したがって、例えば、該当光学素子の光学面と交差するこの光学素子の変位、及び反射面に対して垂直な基準軸の周りの回転を行わせることができる。

【0046】

一般的には、ここに図示するマニピュレータ M 1 ~ M 4 のそれぞれが、所定の移動に沿った剛体運動を行いながら割り当てられた光学素子 E 1 ~ E 4 の変位をもたらすために、対応する光学素子のパラメータを変更させるよう設けられる。例として、このような移動は、種々の方向の並進、傾斜、及び／又は回転をいかなる形で組み合わせることもできる。代替として又は追加として、割り当てられた光学素子のパラメータの異なる様式での変更をマニピュレータの適当な作動により行うよう構成されたマニピュレータを設けることも可能である。この点で、例えば、特定の温度分布又は特定の力分布を光学素子に適用することにより、作動を実行することができる。この場合、移動は、光学素子の温度分布の変更又は変形可能レンズ若しくは変形可能ミラーとして具現された光学素子に対する局所的な張力の付与の結果として得ることができる。

40

【0047】

50

図示の場合では、移動コマンド 38 に含まれる移動 x_i は、移動 x_1 、 x_2 、 x_3 、及び x_4 を含み、これらはマニピュレータ M1～M4 により実行される光学素子 E1～E4 の 1 つ又は複数の少なくとも 1 つのパラメータの変更を予め決定し、したがって投影レンズ 16 のマニピュレータ M1～M4 を制御する役割を果たす。確認された移動 $x_1 \sim x_4$ は、移動信号により個々のマニピュレータ M1～M4 に伝達され、実行すべき各補正移動を上記マニピュレータに提供する。これらは、生じた投影レンズ 16 の波面誤差を補正するための割り当てられた光学素子 E1～E4 の対応する変位を規定する。マニピュレータが複数の自由度を有する場合、複数の移動 x_i をマニピュレータに伝達することも可能である。

【0048】

移動コマンド 38 にさらに含まれる移動 x_n^L は、図示の場合は移動 x_n^1 、 x_n^2 、 x_n^3 、及び x_n^4 を含み、これらの移動は投影レンズ 16 の光学素子 E1、E2、E3、及び E4 の各機械的後処理のための後処理デバイス 36 を制御する役割を果たし、ひいては光学素子 E1～E4 の 1 つ又は複数の少なくとも 1 つのパラメータを変更する役割を果たす。したがって、移動 $x_1 \sim x_4$ のように、移動 $x_n^1 \sim x_n^4$ は、生じた投影レンズ 16 の波面誤差を補正する役割を果たす。後処理デバイス 36 は、レンズ又はミラーの形態の光学素子の光学面における材料の機械的アブレーションのためのデバイスを意味すると理解されたい。このアブレーションは、光学素子の製造に続いて行われ、特に表面の形状を変更する役割を果たす。行われる表面形状の変更は、この場合は非球面である（さらに、これは回転対称である必要もない）。したがって、変更対象の表面を補正非球面と称する。特に、投影レンズ 16 にすでに組み込まれた光学素子を、後処理目的で取り外すことができ、続いて投影レンズに組み込み戻すことができる。特に、補正非球面の機械的処理に通常用いられるアブレーションデバイスを、後処理デバイス 36 として用いることができる。したがって、以下ではアブレーションを「補正非球面アブレーション」とも称する。例として、イオンビームを機械的処理に用いることができる。これを用いて、後処理される光学素子に任意の補正プロファイルを加工することが可能である。

【0049】

制御装置 14 に恒久的又は一時的に接続され得るマニピュレータシステム（本例示的な実施形態ではマニピュレータ M1～M4）に関する上記移動 x_i と、補正非球面後処理デバイス 36 に関する

移動 x_n^L

とに加えて、移動コマンド 38 は、ここでは詳細に説明しないさらに他の実施形態による

さらに他の移動も含み得る。これらは、測定マスク 22 又はセンサ素子 26 の作動波長又は位置等、制御装置 14 により恒久的に作動可能なさらなる自由度を調整するための移動を含み得る。さらに、これらの移動は、投影レンズ 16 の機械構造における介入を規定する手動操作可能な自由度及び移動を含み得る。このような介入は、調整リング又はフレーム位置の変化に関するものであり得るが、これにはレンズの部分的な分解及び再組立てが必要であり、したがって通常はレンズを調整機構から取り外す必要もある。

【0050】

制御装置 14 の機能を、図 2 を参照して以下に視覚化する。この機能は、移動生成最適化アルゴリズム 41 を実行するよう構成される。最適化アルゴリズム 41 は、図 2 に参照符号 42 で示すメリット関数 H を最適化する役割を果たす。

【0051】

既に上述したように、最適化アルゴリズムにより生成される移動コマンド 38 の移動は、ベクトル型の移動変数 x で表され、これは、投影レンズ 16 に設けられたマニピュレータ $M1 \sim M4$ の移動 x_i と、補正非球面後処理デバイス 36 のコントローラの

移動 x_n^L

とを含む。状態特性評価 34 は、状態ベクトル b で表され、そのベクトル成分は、ここに記載する実施形態では上記ゼルニケ係数 b_j である。ゼルニケ係数 b_j は、状態パラメータとも称する。さらに他の実施形態によれば、状態ベクトル b は、ゼルニケ係数又はその代替物に加えて、空中像量 (aerial image quantities) 及び／又は直接 2 次元波面表現及び／又は上記量から得られる量、例えば一次結合等のパラメータを含み得る。

【0052】

状態変更の場合のマニピュレータ、この場合はマニピュレータ $M1 \sim M4$ 、及び後処理デバイス 36 の自由度に関するそれらの感度は、一変形実施形態に従って感度行列 M で表される。ここで、感度行列 M は、標準移動 x_i^0 によるマニピュレータの自由度 i の調整と、そこから得られる投影レンズ 16 の状態ベクトル b の変更との間の関係を表す。ゼルニケ係数 b_j の 1 つに関する感度行列 M の個々の行は、いずれの場合も図 2 に M_j で示す。

【0053】

図 2 に示す実施形態では、メリット関数 H は、移動変数 x 及び以下でより詳細に説明するスケーリング量 t (参照符号 43) の関数として定式化される。スケーリング量 t は、メリット関数の最適化中に本例示的な実施形態では対応するゼルニケ係数 b_j (参照符号 34) の形態の投影レンズ 16 の各特性が超えてはならない各極限值 a_j をスケーリングするための 1 つ又は複数のスケール因子 t_j (参照符号 43a) を含む。ここで、極限值 a_j は、各初期極限值 (initial limit values) s_j に対するスケール因子 t_j によりスケーリングされる ($a_j = t_j \cdot s_j$)。極限值 a_j 全体を、極限 a (参照符号 44) と称する。本文では、極限值 a_j を個々の極限值とも称する。図 2 にはより詳細に示さないさらに別の実施形態によれば、極限は、ゼルニケ係数 b_j に関する極限值に加えて投影レンズ 16 のさらなる特性に関する極限值も含み得る。これらは、マニピュレータシステム $M1 \sim M4$ 又は 36 の移動 x_i に関する極限值 a_{Mi} を含む得る。極限值 a_{Mi} は、技術的理由で生じるマニピュレータ $M1 \sim M4$ の最大撓みから例えば生じ得るマニピュレータ移動の境界条件と、その実際の位置とを規定する。最大撓みが技術的理由で生じる理由は、例えば、マニピュレータの機械的限界に、又は他の技術的境界条件、例えば精度又は速度の理由による増分の制限にあり得る。

【0054】

図 2 に示す実施形態のとおり、移動生成最適化アルゴリズム 41 は、以下の最適化問題を解くよう構成される。

【数 3】

10

20

30

40

50

$$\min_{x,t} H(x,t) \quad (3)$$

【0055】

ここで、移動変数 x 及びスケーリング量 t は、最適化変数 45 として働き、これは、最適化アルゴリズム 41 の実行時に移動変数 x のベクトル成分の 1 つ又は複数及びスケーリング量 t の成分 t_j の 1 つ又は複数が最適化変数 45 として働くことを特に意味すると理解されたい。したがって、スケーリング量 t と共に、異なるカテゴリの、すなわち移動変数に関係しないカテゴリの変数も、移動変数 x に加えて最適化変数 45 として働く。このような最適化問題の基本的な解法に関するさらなる詳細は、例えば、特許文献 1 の特に 38 ページ～45 ページから得ることができる。

10

【0056】

ここで説明する例示的な実施形態によるメリット関数 H は、以下のとおりである。

【数 4】

$$H(x,t) = \dots + \sum_j p(|M_j x - b_j|, t_j \cdot s_j) + \dots + \sum_j \Gamma_{t_j} |t_j|^2 + \dots \quad (4)$$

20

【0057】

異なる表現をすると、メリット関数 H は、以下の形態の少なくとも 1 つの第 1 ペナルティ項 46 を含む。

【数 5】

$$\sum_j p(|M_j x - b_j|, t_j \cdot s_j) \quad (5)$$

30

【0058】

この項は、暗黙制約として、ゼルニケ係数 b_j の形態の投影レンズ 16 の 1 つ又は複数の特性に関する上記極限 a と、場合によってはメリット関数におけるマニピュレータ移動とを考慮する役割を果たす。

【0059】

ペナルティ項 46 は、図 2 に参照符号 47 で示すペナルティ関数 $p(\xi, a)$ の和を含み、ここで a は上記極限であり、 ξ はここで説明する例示的な実施形態に従って以下のよう

【数 6】

$$\xi = |M_j x - b_j| \quad (6)$$

40

ここで、いずれの場合も上述したように、 M_j は感度行列 M の列を指し、 x は移動変数を指し、 b_j はゼルニケ係数を指す。

【0060】

図 2 のペナルティ関数 $p(\xi, a)$ について、2 つの変形実施形態を以下の形態で示し、第 1 に、以下の形態 i) がある。

【数 7】

50

$$p(\xi, a) = \begin{cases} \left(-\log \left(\frac{a - \xi}{a - \xi_{\min}} \right) \right)^k, & \xi \in [\xi_{\min}; a[, \quad k \in \mathbb{N} \\ \infty, & \xi \geq a \end{cases} \quad (7)$$

【0061】

第2に、以下の形態*i i*)がある。

【数8】

$$p(\xi, a) = \begin{cases} (a - \xi)^{-k}, & \xi \in [\xi_{\min}; a[, \quad k \in \mathbb{N} \\ \infty, & \xi \geq a \end{cases} \quad (8)$$

【0062】

ペナルティ関数 $p(\xi, a)$ は、いずれの場合も、投影レンズ16の対応する特性が極限 a 、すなわち各極限值 a_j に近付くとその関数値が「無限大」に向かうように定式化される。この挙動は、式(7)によるペナルティ関数 $p(\xi, a)$ における対数関数47aの使用と、式(8)によるペナルティ関数 $p(\xi, a)$ における有理分数関数47bの使用とにより、いずれの場合も範囲 $[\xi_{\min}; a[$ における ξ に関してもたらされ、ここで $\xi_{\min}$ は ξ の最小許容値を指す。 $\xi = a$ 又は極限 a を超える ξ の値の場合、次式が当てはまる： $p(\xi, a) = \infty$ 。例として、式(7)で用いられる対数関数は、自然対数、常用対数、又は任意の他の底（特に正の底）の対数に関し得る。

【0063】

式(7)で用いられる対数関数47a及び式(8)で用いられる有理分数関数47bの両方が、両方の変数で複数回連続微分可能である。これは許容範囲に当てはまる。この許容範囲は、該当の関数の定義域全体を含むことができ、この場合、これは対数関数47a又は有利分数関数の値が無限大にならない範囲全体である。一実施形態によれば、数学的観点から可能な最大定義域は、実際の境界条件により制限される。これは、関数の引数が、操作システム及び／又は投影露光装置の境界条件により、数学的観点から可能な最大定義域の全値をとることが実際にはできないことを意味すると理解されたい。したがって、例えば、像収差をゼロまで減らすことが不可能な場合があり、その代わりに、ゼロの絶対値に特定の値まで近付くことができるにすぎない。特に、数学的観点から $-\infty$ 又は $+\infty$ の下限又は上限を有する定義域は、実際の境界条件により有限の数値に制限される。

【0064】

さらに別の実施形態によれば、関数は、ある区間で複数回連続微分可能であり、この区間は、実際の境界条件により制限される関数の定義域の90%超、特に98%超、99%超、99.9%超、又は99.99%超を占める。

【0065】

上記区間の微分可能性のこの制限は、特に、関数が数値表現で利用可能である場合に当てはまる。ここで、一実施形態による1回連続微分可能性は、関数値が制御装置14の計算プログラムで表現可能な最小数の10倍となる上記区間の各点において、線形近似により求められた関連の近似点の関数値の実際の関数値からのずれが実際の関数値の50%以下、特に20%以下、10%以下、5%以下、又は1%以下であることにより満たされ、この場合の各点に関連する近似点は、その点から最小増分の2倍以上、特に最小増分の5倍以上又は10倍以上離れている。

【0066】

一実施形態によれば、数値表現における関数の2回連続微分可能性は、関数値が制御装

10

20

30

40

50

置 1 4 の計算プログラムで表現可能な最小数の 1 0 倍となる区間の各点において、二次近似により求められた関連の近似点の関数値の実際の関数値からのずれが実際の関数値の 5 0 % 以下、特に 2 0 % 以下、1 0 % 以下、5 % 以下、又は 1 % 以下であることにより満たされ、この場合の各点に関連する近似点は、その点から最小増分の 2 倍以上、特に最小増分の 5 倍以上又は 1 0 倍以上離れている。これは、関数値が制御装置の計算プログラムで表現可能な最小数の 1 0 0 0 倍又は 1 0 ⁶ 倍となる区間の各点に当てはまる。

【 0 0 6 7 】

一般的に表現すると、微分可能性の数学的定義は、関数引数の任意の小さな変化に関する差分商の極限值に基づく。この極限值は、数値表現の有限精度での数値計算の場合には厳密に考慮することができない。正確には、数値的应用に不可欠なのは、定義域の各点 x_0 についての連続微分可能な関数 $f(x)$ を、所定の精度又は最大偏差 Δf で、概して x_0 に応じた適当な勾配因子 $\tilde{f}_1(x_0)$ を用いた線形関数 $\tilde{f}(x) = f(x_0) + \tilde{f}_1(x_0) \cdot (x - x_0)$ により上記点 x_0 付近の特定の領域で近似でき、このとき微分可能性が方程式 $\tilde{f}_1(x_0) = \left. \frac{d}{dx} f(x) \right|_{x=x_0}$ を可能にすることである。その場合、 $x \in]x_0 - \epsilon_1, x_0 + \epsilon_1[$ について $\|\tilde{f}(x) - f(x)\| < \Delta f$ が当てはまり、式中 $\epsilon_1 > 0$ である。量 ϵ_1 は、所定の最大偏差 Δf で関数を線形近似できる、 x_0 付近の領域の「最小半径」を特定する。この「最小半径」は、点 x_0 に応じて異なるサイズを有するよう選択されることができる。上述のように、これは、関数の定義域の大部分において数値表現の最小増分の 2 倍、すなわち最小増分よりも大きくなるべきである。当然ながら、この領域は、関数 $p(\xi, a)$ について要求されるように、関数の無限遠点付近で小さくなるべきである。上述の実施形態によれば、最大偏差 Δf は、関数値 f の 5 0 % 以下に設定される。

【 0 0 6 8 】

10

20

30

40

50

全く同様に、数値的応用での2回連続微分可能性の重要性は、概して x_0 に応じた適当な勾配因子 $\tilde{f}_1(x_0)$ と、概して x_0 に応じた適当な「曲率」 $\tilde{f}_2(x_0)$ とを用いた2次関数 $\tilde{f}(x) = f(x_0) + \tilde{f}_1(x_0) \cdot (x - x_0) + \tilde{f}_2(x_0) \cdot (x - x_0)^2$ により関数を近似できることにある。この場合も、この場合の2回微分可能性は、方程式 $\tilde{f}_1(x_0) = \left. \frac{d}{dx} f(x) \right|_{x=x_0}$ 及び $\tilde{f}_2(x_0) = \left. \frac{d^2}{dx^2} f(x) \right|_{x=x_0}$ を可能にする。その場合、 $x \in]x_0 - \epsilon_2, x_0 + \epsilon_2[$ について $\|\tilde{f}(x) - f(x)\| < \Delta f$ が当てはまり、式中 $\epsilon_2 > 0$ であり、この場合も所定の精度が達成される領域に関して「最小半径」を指定する。

10

【0069】

例えば $p(\xi, a)$ 等の2次元関数と ξ 及び a に関するその微分可能性とへの拡張は、数学において既知であり、キーワードとして例えば「偏微分」及び「全微分」を含む。微分可能性に関する上記説明は、数値的応用に関する計算精度を考慮して理解すべきである。

【0070】

さらに、図2に関して、範囲 $[\xi_{\min}; a]$ におけるペナルティ関数 $p(\xi, a)$ の1階微分の利用可能性により、最適化アルゴリズム41が勾配法を用いてそのターゲットを求めることができる。範囲 $[\xi_{\min}; a]$ におけるペナルティ関数 $p(\xi, a)$ の2階微分の利用可能性、特に高階微分の利用可能性の結果として、勾配関数により確認されたターゲットを特に短時間で、例えば大きな増分を用いて求めることができる。

20

【0071】

上記の式(4)から明らかなように、メリット関数 H はさらに、次の形態の第2ペナルティ項48を含む。

【数9】

$$\sum_j \Gamma_{t_j} |t_j|^2 \quad (9)$$

30

【0072】

この項は、スケール因子 t_j を制限する役割を果たす。ここで、制限のサイズは、

パラメータ Γ_{t_j}

40

を適切に予め決定することにより設定することができる。ここで、一実施形態に従って群極限值を提供することができ、スケールファクタ t_j に関連する個々の極限值 a_j の少なくとも1つは、この群極限值を超えてはならない。さらに別の実施形態によれば、ペナルティ項48は、スケールファクタ t_j 及び群極限値の両方の値を制限するよう構成される。さらに、複数の群極限值及び上位群極限値が提供されてもよく、群極限値は、それぞれ異なる群のスケール因子 t_j に関係し、群極限値のいずれも上位群極限値を超えてはならない。さらに別の実施形態によれば、メリット関数42は、群極限値を制限するさらに別のペナルティ項を含み得る。上記概念は、さらに上位の群極限値でのさらなるカスケードに拡張することができる。

【0073】

50

ペナルティ項 4 6（式（5））及びペナルティ項 4 8（式（9））に加えて、式（4）で表されるメリット関数 H は、

$$\text{式 } \|Mx - b\|_2^2$$

を任意に含むことができ、式中、 b はゼルニケ係数 b_j のベクトル表現であり、

$$\| \cdot \|_2$$

はユークリッドノルムを指す。さらに、メリット関数 H は、例えば、フェージング収差 (fading aberrations)、オーバーレイ誤差、マニピュレータシステム $M_1 \sim M_4$ の境界条件、後処理デバイス 3 6 により行われる補正非球面アブレーションの境界補正、及び／又はゼルニケ係数 b_j のグループ化 RMS 値 (grouped RMS values) を考慮するために、さらに他のペナルティ項を任意に含み得る。フェージング収差は、像収差が投影露光装置の走査方向に、すなわち露光中のマスクとウェハとの相対移動の方向にどのように変化するかを特定するものを意味すると理解されたい。オーバーレイ誤差は、基板上の結像マスク構造の目標位置に対するその局所的な像位置変位を特定する。

【0074】

図 3 及び図 4 は、本発明によるメリット関数 $H(x, t)$ に基づく最適化の効果を視覚化する役割を果たす。この目的で、図 3 に示すグラフは、ここでは H_1 で示す、 ξ が極限 a に近づくときのペナルティ項 4 6 及び 4 8 の和から形成されたメリット関数の値を示す。この目的で、(7) で提示される変形実施形態 i が、ペナルティ関数 $p(\xi, a)$ として選択される。図 3 のグラフの説明に関して、以下の置換 $\chi = \frac{|Mx - b|}{s}$ が行われ、式中、 s は初期極限值 s_j 全体を表す役割を果たす。この置換を用いて、且つ $k = 1$ 及び $\xi_{min} = 0$ を選択することにより、範囲 $\xi \in [\xi_{min}; a]$ において H_1 に関して次式が得られる。

$$H_1(\chi, t) = -\log\left(1 - \frac{\chi}{t}\right) + \Gamma t^2 \quad (10)$$

【0075】

図 3 のグラフにおいて、 H_1 の値を t の値に応じた χ/t の関数として示し、 $\Gamma = 1$ とする。グラフ中、 ξ が極限 a に近づくことは、 χ/t が値「1」に近づくことに対応する。グラフから明らかなように、 χ/t が値 1 に近づくとき t の全代表値の曲線は「無限大」に向かう。すなわち、 H_1 は、 t でスケールされた初期極限值 s_j の侵害 (infringement) が防止されるよう構成される。

【0076】

これに対して、図 4 のグラフは、 ξ が極限 a に近づくときの従来技術から導出されたメリット関数 H_2 の値を示す。このメリット関数は、

【数 10】

$$H_2(x, t) = \left(\frac{|Mx - b|}{t \cdot s}\right)^{2N} + \Gamma t^2; \quad N \in \mathbb{N} \quad (11)$$

10

20

30

40

50

【 0 0 7 7 】

メリット関数 H_2 の第 1 項

$$\left(\frac{|Mx-b|}{t \cdot s} \right)^{2N}$$

は、従来技術から既知であり本明細書で最初に述べた、偶数指数を有する累乗に基づくペナルティ関数を用いたメリット関数に基づく。この既知のペナルティ関数は、この場合は、 t により極限 a に関するスケールリング量が導入され且つ χ に加えてさらに別の最適化変数として提供されるように変更される。 H_1 に関してすでに上述した置換

$$\text{置換 } \chi := \frac{|Mx-b|}{s}$$

10

を行うと、次式が得られる。

【数 1 1】

$$H_2(\chi, t) = \left(\frac{\chi}{t} \right)^{2N} + \Gamma t^2 \quad (12)$$

【 0 0 7 8 】

20

図 4 のグラフにおいて、図 3 に示す H_1 と同様に、 H_2 を t の値に応じた χ/t の関数として示し、 $\Gamma = 1$ 及び $N = 12$ とする。 ξ が極限 a に近付くことは、グラフ中で χ/t が値「1」に近付くことに対応し、このとき関数値 H_2 が顕著に増加するが、値「1」を超えることが確実に防止されるほど強くはない。すなわち、メリット関数 H_2 は、 t でスケールリングされた初期極限值 s_j の侵害を十分確実に防止しない。

【 0 0 7 9 】

図 5 は、マイクロリソグラフィ投影露光装置 50 の発明による実施形態を示す。本実施形態は、EUV 波長域で動作するように設計される。この動作波長の結果として、全ての光学素子がミラーとして具現される。しかしながら、本発明は EUV 波長域での投影露光装置に限定されない。本発明によるさらに他の実施形態は、例えば、UV 域の作動波長、例えば 365 nm、248 nm、又は 193 nm 等用に設計される。この場合、光学素子の少なくともいくつかは、従来の透過レンズ素子として構成される。

30

【 0 0 8 0 】

図 5 に示す投影露光装置 50 は、露光放射線 54 を発生させる露光放射線源 52 を備える。この場合、露光放射線源 52 は、EUV 源として具現され、例えばプラズマ放射線源を含み得る。露光放射線 54 は、最初に照明光学ユニット 56 を通過し、それによりマスク 58 へ偏向される。照明光学ユニット 56 は、マスク 58 に入射する露光放射線 54 の種々の角度分布を発生させるよう構成される。ユーザが所望する照明設定に応じて、照明光学ユニット 556 は、マスク 58 に入射する露光放射線 54 の角度分布を構成する。選択可能な照明設定の例には、いわゆる 2 重極照明、輪帯照明、及び 4 重極照明が含まれる。

40

【 0 0 8 1 】

マスク 58 は、ウェハの形態の基板 64 に結像されるマスク構造を有し、マスク変位ステージ 60 上に変位可能に搭載される。図 5 に示すように、マスク 58 は、反射マスクとして具現することができ、又は代替として、特に UV リソグラフィ用の透過マスクとして構成することもできる。図 5 に示す実施形態では、露光放射線 54 は、マスク 58 で反射されてから投影レンズ 16 を通過し、投影レンズ 16 は、図 1 に示す調整機構 10 を参照してすでに記載されたものである。投影レンズ 16 は、マスク 58 のマスク構造を基板 64 に結像するよう働く。露光放射線 54 は、ここではミラーの形態である複数の光学素子により投影レンズ 16 内で誘導される。基板 64 は、基板変位ステージ 66 上に変位可能に搭載される。投影露光装置 50 は、いわゆるスキャナ又はいわゆるステッパとして設計

50

することができる。

【0082】

ステップアンドスキャン投影露光装置とも称するスキャナとしての実施形態の場合、マスク変位ステージ60及び基板変位ステージ66は、マスク58を基板64に結像する各インスタンス、すなわち視野を基板64に結像する各インスタンスで協調して動く。図5に示すように、この場合、マスク変位ステージ60は走査方向62に動き、基板変位ステージは走査方向68に動く。上述のフェーシング収差は、このようなスキャナのフィールド露光中の走査運動まで遡ることができる。

【0083】

投影露光装置50はさらに、マスク変位ステージ60及び基板変位ステージ66を含む露光プロセスを制御する中央制御デバイス72を備える。さらに、投影露光装置50は、マニピュレータM1～M4を制御する制御装置114を備える。制御装置114はさらに、状態エンコーダ80及び移動確認デバイス86を備える。状態エンコーダ80は、投影レンズ16の現在状態特性評価34aを移動確認デバイス86へ送り、移動確認デバイス86はそこから移動コマンド138を発生させる。移動コマンド138は、移動 x_i 、図示の場合では移動 x_1 、 x_2 、 x_3 、及び x_4 を含む。図1に示す調整機構10に関してさらに詳細に上述したように、これらの移動は、マニピュレータM1～M4を制御する役割を果たす。

【0084】

移動確認デバイス86が発生させた移動コマンド138は、移動 x_i に対応する光学素子E1～E4の状態変数の形態でマニピュレータM1～M4により実行される変更を含む。確認された移動 x_i は、移動信号を用いて個々のマニピュレータM1～M4に通信され、それらのそれぞれについて行うべき補正移動を予め規定する。これらにより、生じた投影レンズ16の波面誤差を補正するために割り当てられた光学素子E1～E4の対応する変位が規定される。移動 x_i を確認するために、移動確認デバイス86は、特に露光プロセスの実行時に、それぞれ更新された状態特性評価34aを状態エンコーダ80からの波面を特徴付けるゼルニケ係数 b_j の形態で受け取る。

【0085】

一実施形態によれば、移動確認デバイス86は、基板64の露光中に複数回更新される移動 x_i を生成する。一実施形態によれば、状態エンコーダ80は、メモリ82及びシミュレーションデバイス84を有する。波面測定により投影レンズ16で確認された収差パラメータの形態の状態特性評価34は、メモリ82に記憶される。これらの測定結果は、図1を参照して記載した測定装置12等の外部の波面測定装置により収集することができる。しかしながら、代替として、状態特性評価34は、基板変位ステージ66に組み込まれた波面測定デバイス70により測定されることもできる。例として、このような測定は、いずれの場合もウェハの各露光後又はウェハー式の露光後に行うことができる。代替として、測定の代わりにシミュレーション又はシミュレーションと緩い測定(reduced measurement)との組み合わせを行うことも可能である。

【0086】

メモリ82に記憶された、ゼルニケ係数の形態の収差パラメータの形態の状態特性評価34の測定値は、いずれの場合も必要に応じてシミュレーションデバイス84により露光プロセス中に更新された条件に適合される。一変形実施形態によれば、中央制御デバイス72は、現在照射強度74をシミュレーションデバイス84に定期的に伝達する。これから、且つ各照明設定に基づいて、シミュレーションデバイス84は、レンズ素子加熱により引き起こされる収差パラメータの変化を計算する。さらに、シミュレーションデバイスは、投影露光装置50の周囲圧力を監視する圧力センサ76から測定値を継続して得る。収差パラメータに対する周囲圧力の変更の効果が、シミュレーションデバイス84により考慮される。

【0087】

図5に示す投影露光装置50の制御デバイス114が図1に示す調整機構10の制御デ

10

20

30

40

50

バイス 14 とは異なるのは、制御デバイス 114 が状態エンコーダ 80 により現在照射強度 74 を用いて、波面測定デバイスにより測定された状態特性評価 34 を現在状態特性評価 34 a に変換するという点である。制御装置 114 の移動確認デバイス 86 の関数は、制御デバイス 14 の関数に対応するが、制御装置 114 が発生させた移動コマンド 138 がマニピュレータの移動 x_i を有する移動変数 x のみを含み、補正非球面後処理デバイス 36 を制御するための移動

ベクトル x^L

を含まないという制約がある。図 2 ～図 4 を参照して記載した調整機構 10 の制御デバイス 14 の特性は、制御装置 114 の移動確認デバイス 86 の特性にも同様に当てはまる。

【0088】

上記の例示的な実施形態、実施形態、又は変形実施形態の説明は、例として示すと理解されたい。それにより行われる開示は、第 1 に当業者が本発明及びそれに関連する利点を理解できるようにし、第 2 に当業者の理解では自明でもある記載の構造及び方法の変更及び修正を包含する。したがって、添付の特許請求の範囲の記載に従って本発明の範囲内に入る限りの全てのそのような変更及び修正、並びに等価物は、特許請求の範囲の保護の対象となることが意図される。

【符号の説明】

【0089】

- 10 調整機構
- 12 測定装置
- 14 制御装置
- 16 投影レンズ
- 18 照明デバイス
- 20 測定放射線
- 22 測定マスク
- 24 物体面
- 26 センサ素子
- 28 像面
- 30 検出器
- 32 評価デバイス
- 34 状態特性評価
- 34 a 現在状態特性評価
- 36 後処理デバイス
- 38 移動変数 x の形態の移動コマンド
- 40 傾斜軸
- 41 最適化アルゴリズム
- 42 メリット関数 H
- 43 スケーリング量 t
- 43 a スケール因子 t_j
- 44 極限 a
- 45 最適化変数
- 46 第 1 ペナルティ項
- 47 ペナルティ関数
- 47 a 対数関数
- 47 b 有理分数関数
- 48 第 2 ペナルティ項
- 50 投影露光装置
- 52 露光放射線源

10

20

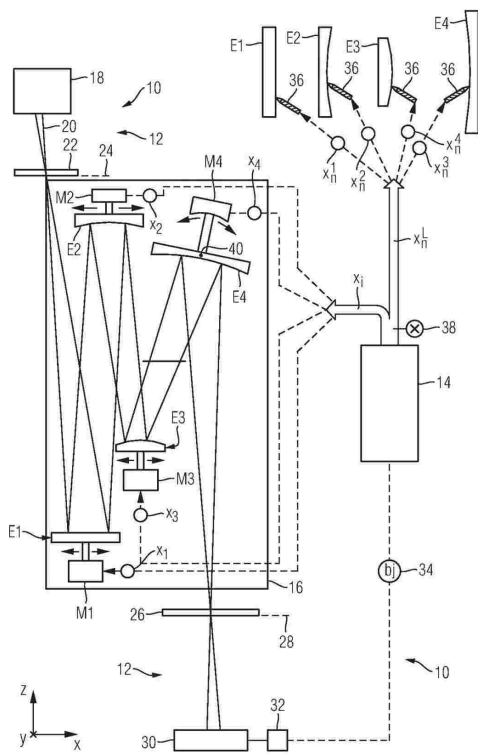
30

40

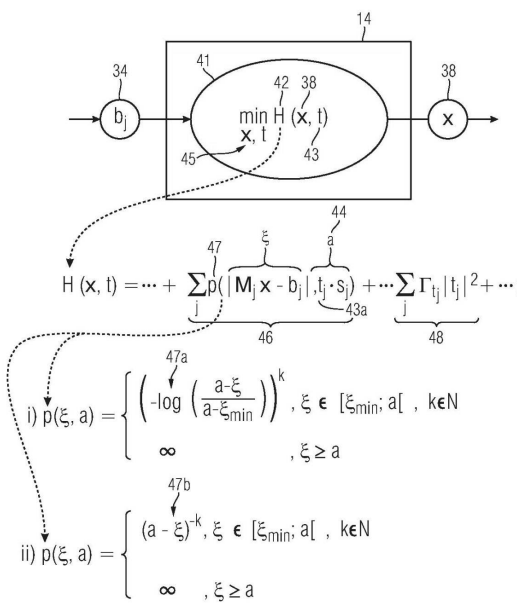
50

5 4	露光放射線	
5 6	照明光学ユニット	
5 8	マスク	
6 0	マスク変位ステージ	
6 2	マスク変位ステージの走査方向	
6 4	基板	
6 6	基板変位ステージ	
6 8	基板変位ステージの走査方向	
7 0	波面測定デバイス	
7 2	中央制御ユニット	10
7 4	現在照射照度	
7 6	圧力センサ	
8 0	状態エンコーダ	
8 2	メモリ	
8 4	シミュレーションユニット	
8 6	移動確認デバイス	
1 1 4	制御装置	
1 3 8	移動コマンド	
E 1 ~ E 4	光学素子	
M 1 ~ M 4	マニピュレータ	20
x i	マニピュレータの移動	
x_n^L	補正非球面後処理デバイスの移動	

【図面】
【図 1】



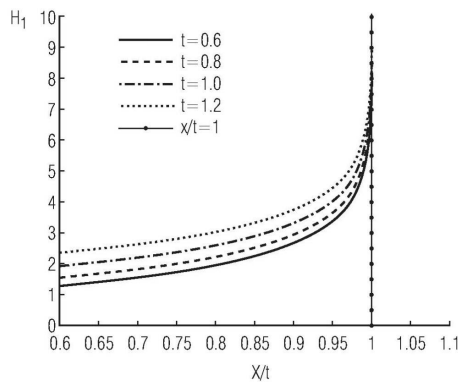
【図 2】



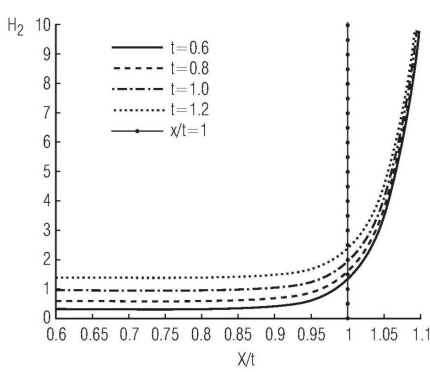
10

20

【図 3】



【図 4】

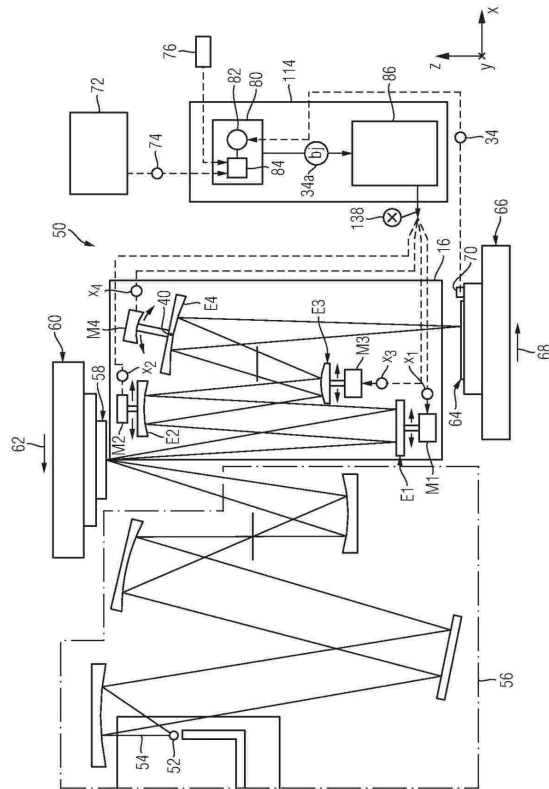


30

40

50

【圖 5】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(72)発明者 クリスティアン ヴァルト
 ドイツ国 73432 アーレン ベーリングシュトラッセ 26
審査官 田中 秀直
(56)参考文献 特表2017-536579 (JP, A)
 特開2006-332146 (JP, A)
 特開2010-045309 (JP, A)
 特開2016-200818 (JP, A)
(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
 G03F 7/20
 H01L 21/027