

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第5105474号
(P5105474)

(45) 発行日 平成24年12月26日 (2012.12.26)

(24) 登録日 平成24年10月12日 (2012.10.12)

(51) Int.Cl.

F I

HO 1 L 21/027 (2006.01)

HO 1 L 21/30 5 1 6 A

GO 3 F 7/20 (2006.01)

GO 3 F 7/20 5 2 1

請求項の数 10 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2007-273092 (P2007-273092)	(73) 特許権者	504132881
(22) 出願日	平成19年10月19日 (2007.10.19)		国立大学法人東京農工大学
(65) 公開番号	特開2009-105097 (P2009-105097A)		東京都府中市晴見町 3-8-1
(43) 公開日	平成21年5月14日 (2009.5.14)	(73) 特許権者	000001007
審査請求日	平成22年10月19日 (2010.10.19)		キヤノン株式会社
			東京都大田区下丸子 3 丁目 3 〇 番 2 号
		(74) 代理人	100076428
			弁理士 大塚 康德
		(74) 代理人	100112508
			弁理士 高柳 司郎
		(74) 代理人	100115071
			弁理士 大塚 康弘
		(74) 代理人	100116894
			弁理士 木村 秀二

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 露光装置及びデバイス製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レチクルのパターンを介して基板を露光する露光装置であって、
位置、姿勢及び形状の少なくとも 1 つを調整可能な光学素子を含み、前記パターンからの光を前記基板に投影する投影光学系と、
前記光学素子の位置、姿勢及び形状の少なくとも 1 つを調整する調整部と、
前記調整部による前記光学素子の調整量の 1 次関数で表される前記投影光学系の 1 次光学特性値の上限としての第 1 変数と、前記調整部による前記光学素子の調整量の 2 次関数で表される前記投影光学系の 2 次光学特性値の上限としての第 2 変数との 1 次式で表される目的関数の値を、前記 1 次光学特性値が前記第 1 変数以下であるとの 1 次不等式で表される制約条件および前記 2 次光学特性値が前記第 2 変数以下であるとの 2 次不等式で表される制約条件の下で最小化する前記光学素子の調整量を、制約条件に 2 次不等式を含む制約 2 次計画法を用いて算出し、該算出された調整量に基づいて前記調整部を制御する制御部と、
を有することを特徴とする露光装置。

【請求項 2】

レチクルのパターンを介して基板を露光する露光装置であって、
位置、姿勢及び形状の少なくとも 1 つを調整可能な光学素子を含み、前記パターンからの光を前記基板に投影する投影光学系と、
前記光学素子の位置、姿勢及び形状の少なくとも 1 つを調整する調整部と、

前記調整部による前記光学素子の調整量の1次関数で表される前記投影光学系の1次光学特性値の上限としての第1変数と、前記調整部による前記光学素子の調整量の2次関数で表される前記投影光学系の2次光学特性値の上限としての第2変数との1次式で表される目的関数の値を、前記1次光学特性値が前記第1変数以下であるとの1次不等式で表される制約条件、および前記第2光学特性値が前記第2変数以下であるとの2次不等式で表される制約条件と等価な2次錘計画問題の制約条件の下で最小化する前記光学素子の調整量を、2次錘計画法を用いて算出し、該算出された調整量に基づいて、前記調整部を制御する制御部と、

を有することを特徴とする露光装置。

【請求項3】

10

前記1次光学特性値は、波面収差係数の線形結合で表される光学特性の値である、ことを特徴とする請求項1又は2に記載の露光装置。

【請求項4】

前記1次光学特性値は、前記投影光学系の収差としてのディストーションの値である、ことを特徴とする請求項1又は2に記載の露光装置。

【請求項5】

前記2次光学特性値は、波面収差係数の重みつき2乗和で表される光学特性の値である、ことを特徴とする請求項1又は2に記載の露光装置。

【請求項6】

前記波面収差係数は、ゼルニケ係数である、ことを特徴とする請求項3又は5に記載の露光装置。

20

【請求項7】

前記2次光学特性値は、波面収差のRMS値の平方である、ことを特徴とする請求項1又は2に記載の露光装置。

【請求項8】

前記基板を保持して前記基板の位置及び姿勢の少なくとも1つを調整するステージを更に有し、

前記1次光学特性値は、前記ステージによる前記基板の位置及び姿勢の少なくとも1つの調整量の1次関数で表される前記投影光学系の光学特性値を含み、

前記2次光学特性値は、前記ステージによる前記基板の位置及び姿勢の少なくとも1つの調整量の2次関数で表される前記投影光学系の光学特性値を含み、

30

前記制御部は、前記目的関数の値を最小化する前記光学素子の調整量および前記ステージによる前記基板の位置及び姿勢の少なくとも1つの調整量を算出し、該算出された各調整量に基づいて前記調整部および前記ステージを制御する、ことを特徴とする請求項1又は2に記載の露光装置。

【請求項9】

前記レチクルを保持して前記レチクルの位置及び姿勢の少なくとも1つを調整するステージを更に有し、

前記1次光学特性値は、前記ステージによる前記レチクルの位置及び姿勢の少なくとも1つの調整量の1次関数で表される前記投影光学系の光学特性値を含み、

40

前記2次光学特性値は、前記ステージによる前記レチクルの位置及び姿勢の少なくとも1つの調整量の2次関数で表される前記投影光学系の光学特性値を含み、

前記制御部は、前記目的関数の値を最小化する前記光学素子の調整量および前記ステージによる前記レチクルの位置及び姿勢の少なくとも1つの調整量を算出し、該算出された各調整量に基づいて前記調整部および前記ステージを制御する、ことを特徴とする請求項1又は2に記載の露光装置。

【請求項10】

請求項1乃至9のうちいずれか1項に記載の露光装置を用いて基板を露光するステップと、

露光された前記基板を現像するステップと、

50

を有することを特徴とするデバイス製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レチクルのパターンを介して基板を露光する露光装置に関する。

【背景技術】

【0002】

フォトリソグラフィ技術を用いて半導体デバイス等のデバイスを製造する際に、投影露光装置が従来から使用されている。当該装置は、レチクル（マスク）に描画された回路パターンを投影光学系によってウエハ等に塗布されたフォトレジスト投影し、該レジストに回路パターンを転写する。

10

【0003】

投影露光装置の投影光学系は、投影光学系の光学特性（各種収差等）を測定する工程と、測定された光学特性に基づいて該光学特性を調整するための調整量（補正量）を算出する工程と、算出された調整量に基づいて投影光学系を調整する工程とを経て調整される。

【0004】

調整対象となる多くの光学特性（各種収差等）は、各素子（例えば、レンズ等の光学素子）の調整量に比例して変化し、その絶対値を最小化することが要求される。そこで、線形計画法を用いて各素子の調整量を決定する技術が提案されている（特許文献1参照）。

【0005】

20

一方、調整対象となる光学特性には、波面収差のRMS値の平方のように、像平面（露光領域）内の各点における波面収差係数の重みつき2乗和で表される特性も含まれる。そこで、線形の制約条件式の下で、1次の評価値（各素子の調整量の1次関数で表される光学特性値）と2次の評価値（各素子の調整量の2次関数で表される光学特性値）とをバランスよく最適化する技術も提案されている（特許文献2参照）。

【0006】

また、投影光学系の光学特性の調整に関する他の技術も従来から幾つか提案されている（特許文献3及び4参照）。

【特許文献1】特開2002-367886号公報

【特許文献2】特開2005-268451号公報

30

【特許文献3】特開平11-176744号公報

【特許文献4】国際公開第02/054036号パンフレット

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

例えば、半導体デバイスには様々な回路パターンが存在するため、投影光学系の調整においては、このような様々な回路パターンに対して結像性能を総合的に良好に維持することが要求されている。従って、投影光学系の瞳面内全域の収差を表す波面収差のRMS値の平方のように、露光領域内の各点における波面収差係数、例えば、ゼルニケ係数の重みつき2乗和で表されるような2次の光学特性を投影光学系の調整のための目的関数に加味することが必要である。

40

【0008】

しかしながら、特許文献1、3及び4の技術では、波面収差係数の重みつき2乗和で表されるような2次の光学特性を考慮していなかった。

【0009】

また、投影露光装置の投影光学系は、一般には、 $26 \times 8 \text{ [mm}^2\text{]}$ 程度の広い露光領域を有し、かかる露光領域全域において良好な結像性能を維持するためには、光学特性の露光領域内における最悪値を考慮することが好ましい。特許文献2に開示された技術は、波面収差係数の重みつき2乗和で表されるような2次の光学特性を光学系の調整のための目的関数に加味している。しかしながら、特許文献2に開示された技術は、露光領域内の

50

1 点の 2 次光学特性値、又は、露光領域内の複数点の 2 次光学特性値の合計値を考慮している。従って、特許文献 2 の技術では、2 次光学特性の露光領域内における最悪値を最良にする最適な調整量を決定することができなかった。更に、特許文献 2 の技術は、1 次の評価値を最小化する調整量を決定する処理と、かかる処理結果に基づく制約の下で 2 次の評価値を最小化する調整量を決定する処理とを含み、1 次の評価値と 2 次の評価値とのバランスがとれるまで処理を繰り返す必要があった。

【0010】

そこで、本発明は、光学特性値を変化させるための素子の調整量を求める新たな技術を提供することを例示的目的とする。

【課題を解決するための手段】

10

【0011】

上記目的を達成するために、本発明の一側面としての露光装置は、レチクルのパターンを介して基板を露光する露光装置であって、位置、姿勢及び形状の少なくとも 1 つを調整可能な光学素子を含み、前記パターンからの光を前記基板に投影する投影光学系と、前記光学素子の位置、姿勢及び形状の少なくとも 1 つを調整する調整部と、前記調整部による前記光学素子の調整量の 1 次関数で表される前記投影光学系の 1 次光学特性値の上限としての第 1 変数と、前記調整部による前記光学素子の調整量の 2 次関数で表される前記投影光学系の 2 次光学特性値の上限としての第 2 変数との 1 次式で表される目的関数の値を、前記 1 次光学特性値が前記第 1 変数以下であるとの 1 次不等式で表される制約条件および前記 2 次光学特性値が前記第 2 変数以下であるとの 2 次不等式で表される制約条件の下で最小化する前記光学素子の調整量を、制約条件に 2 次不等式を含む制約 2 次計画法を用いて算出し、該算出された調整量に基づいて前記調整部を制御する制御部と、を有することを特徴とする。

20

【0012】

本発明の別の側面としての露光装置は、レチクルのパターンを介して基板を露光する露光装置であって、位置、姿勢及び形状の少なくとも 1 つを調整可能な光学素子を含み、前記パターンからの光を前記基板に投影する投影光学系と、前記光学素子の位置、姿勢及び形状の少なくとも 1 つを調整する調整部と、前記調整部による前記光学素子の調整量の 1 次関数で表される前記投影光学系の 1 次光学特性値の上限としての第 1 変数と、前記調整部による前記光学素子の調整量の 2 次関数で表される前記投影光学系の 2 次光学特性値の上限としての第 2 変数との 1 次式で表される目的関数の値を、前記 1 次光学特性値が前記第 1 変数以下であるとの 1 次不等式で表される制約条件、および前記第 2 光学特性値が前記第 2 変数以下であるとの 2 次不等式で表される制約条件と等価な 2 次錘計画問題の制約条件の下で最小化する前記光学素子の調整量を、2 次錘計画法を用いて算出し、該算出された調整量に基づいて、前記調整部を制御する制御部と、を有することを特徴とする。

30

【0013】

本発明の更なる目的又はその他の特徴は、以下、添付図面を参照して説明される好ましい実施例によって明らかにされるであろう。

【発明の効果】

【0014】

40

本発明によれば、例えば、光学特性値を変化させるための素子の調整量を求める新たな技術を提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

以下、添付図面を参照して、本発明の好適な実施の形態について説明する。なお、各図において、同一の部材については同一の参照番号を付し、重複する説明は省略する。

【0016】

図 1 は、本発明の一側面としての露光装置 1 の構成を示す概略斜視図である。露光装置 1 は、本実施形態では、ステップ・アンド・スキャン方式でレチクル 10 のパターンをウエハ 40 に露光する投影露光装置である。但し、露光装置 1 は、ステップ・アンド・リピ

50

ート方式やその他の露光方式も適用することができる。

【0017】

露光装置1は、図示しない照明光学系と、レチクル10を保持するレチクルステージ20と、投影光学系30と、ウエハ40を保持するウエハステージ50と、レーザー干渉計60a、60b及び60cと、測定部70と、調整部80と、制御部90とを備える。

【0018】

図示しない照明光学系は、波長約248nmのKrFエキシマレーザー、波長約193nmのArFエキシマレーザー、波長約157nmのF2レーザーなどの光源からの光束を用いて回路パターンが形成されたレチクル10を照明する。

【0019】

レチクル10は、回路パターンを有し、レチクルステージ20に支持及び駆動される。レチクル10から発せられた回折光は、投影光学系30を介して、ウエハ40に投影される。

【0020】

レチクルステージ20は、レチクル10を支持し、例えば、リニアモータを利用して、レチクル10を移動させる。レチクルステージ20は、後述する制御部90に制御され、レチクル10の位置及び姿勢の少なくとも1つを調整する機能を有する。

【0021】

投影光学系30は、複数の光学素子（例えば、レンズや開口絞りなどの光学要素）を含み、レチクル10のパターンをウエハ40に投影する光学系である。投影光学系30に含まれる複数の光学素子のうち一部の光学素子は、後述する調整部80によって、位置、姿勢及び形状の少なくとも1つを調整可能に構成される。

【0022】

ウエハ40は、レチクル10のパターンが投影（転写）される基板である。但し、ウエハ40は、ガラスプレートやその他の基板に置換することもできる。

【0023】

ウエハステージ50は、ウエハ40を支持し、例えば、リニアモータを利用して、ウエハ40を移動させる。ウエハステージ50は、制御部90に制御され、ウエハ40の位置及び姿勢の少なくとも1つを調整する機能を有する。

【0024】

レーザー干渉計60a乃至60cは、ウエハステージ50の近傍に配置され、ウエハステージ50の位置を計測する。

【0025】

測定部70は、露光装置1における光学特性、特に、投影光学系30の光学特性を測定する。測定部70は、例えば、干渉計や光強度センサを含み、投影光学系30の露光領域内の各点における波面収差を測定する機能を有する。また、測定部70は、投影光学系30の収差としてのディストーション（歪曲）を測定する機能も有する。ここで、ディストーションは、例えば、像平面上の実際の像高が理想像高からどれだけずれているかを表す量であり、像平面上（露光領域内）の各点で測定し得る。なお、測定部70は、当業界で周知のいかなる構成をも適用することができるので、ここでは詳しい構造及び動作の説明は省略する。

【0026】

調整部80は、制御部90に制御され、投影光学系30に含まれる複数の光学素子のうち一部の光学素子の位置、姿勢及び形状の少なくとも1つを調整する。調整部80は、例えば、光軸方向（図1に示すZ軸方向）、光軸方向に垂直な方向に駆動する機構、光学素子を支持する支持部を駆動する機構、光学素子に応力（光学素子を押す力又は光学素子を引く力）を付加する機構などで構成される。

【0027】

制御部90は、図示しないCPUやメモリを有し、露光装置1の動作を制御する。制御部90は、例えば、レチクルステージ20及びウエハステージ50のスキャン速度を制御

10

20

30

40

50

する。また、制御部 90 は、本実施形態では、測定部 70 の測定結果に基づいて、調整部 80 による投影光学系 30 の光学素子の調整量やウエハステージ 50 の調整量を 2 次計画法又は 2 次錘計画法を用いて算出する。更に、制御部 90 は、2 次計画法又は 2 次錘計画法を用いて算出した投影光学系 30 の光学素子の調整量やウエハステージ 50 の調整量に基づいて、調整部 80 やウエハステージ 50 を制御する。なお、制御部 90 における投影光学系 30 の光学素子の調整量やウエハステージ 50 の調整量の算出については後で詳細に説明する。

【0028】

図 2 は、位置を調整可能なレチクル 10、ウエハ 40、投影光学系 30 に含まれる光学素子 302 及び 304 の可動方向（駆動方向）の一例を模式的に示す図である。レチクル 10 は、制御部 90 に制御されたレチクルステージ 20 を介して 6 自由度方向（即ち、矢印 X1、Y1、Z1、X1、Y1 及び Z1 の方向）に位置調整される。同様に、ウエハ 40 は、制御部 90 に制御されたウエハステージ 50 を介して 6 自由度方向（即ち、矢印 X4、Y4、Z4、X4、Y4 及び Z4 の方向）に位置調整される。光学素子 302 は、制御部 90 に制御された調整部 80 としての駆動機構 80a を介して 6 自由度方向（即ち、矢印 X2、Y2、Z2、X2、Y2 及び Z2 の方向）に位置調整される。同様に、光学素子 304 は、制御部 90 に制御された調整部 80 としての駆動機構 80b を介して 6 自由度方向（即ち、矢印 X3、Y3、Z3、X3、Y3 及び Z3 の方向）に位置調整される。

【0029】

以下、投影光学系 30 の光学特性（波面収差等）の調整方法について説明する。図 3 は、露光装置 1 における投影光学系 30 の自動調整を説明するためのフローチャートである。なお、投影光学系 30 の自動調整は、制御部 90 によって制御される。

【0030】

図 3 を参照するに、ステップ S1002 において、測定部 70 を介して投影光学系 30 のディストーションを測定する。次いで、ステップ S1004 において、測定部 70 を介して投影光学系 30 の収差（波面収差）を測定する。具体的には、投影光学系 30 の露光領域内の H 箇所の測定点毎に波面収差を測定する。

【0031】

次に、ステップ S1006 において、制御部 90 は、ステップ S1004 で測定した投影光学系 30 の露光領域内の測定点 h の波面収差を J 個のゼルニケ直交関数で展開し、各々のゼルニケ係数 Z_{ih} を算出する。これにより、投影光学系 30 の露光領域内の H 箇所の測定点毎のゼルニケ係数（波面収差係数）から、線幅非対称性、像面湾曲、非点収差などの波面収差量に対して 1 次の特性を有する光学特性値を算出することが可能となる。かかる光学特性値は、レチクルステージ 20、ウエハステージ 50、光学素子 302 及び 304 の調整量の 1 次関数で表され、本実施形態では、1 次光学特性値と称する。また、投影光学系 30 の露光領域内の測定点 h における j 番目のゼルニケ係数 Z_{jh} の平方値、及び、ゼルニケ成分毎の重み係数の積和で表される光学特性値、例えば、波面収差 RMS 値の平方を算出することが可能となる。かかる光学特性値は、レチクルステージ 20、ウエハステージ 50、光学素子 302 及び 304 の調整量の 2 次関数で表され、本実施形態では、2 次光学特性値と称する。

【0032】

ここで、1 次光学特性値、2 次光学特性値及びディストーションについて説明する。なお、以下で使用する添え字 h、i、j、k 及び m は、数式 1 乃至数式 5 で定義される。

【0033】

【数 1】

$$h = 1, 2, \dots, H$$

【0034】

【数 2】

$i = 1, 2, \dots, I$

【 0 0 3 5 】

【数 3】

$j = 1, 2, \dots, J$

【 0 0 3 6 】

【数 4】

$k = 1, 2, \dots, K$

10

【 0 0 3 7 】

【数 5】

$m = 1, 2, \dots, M$

【 0 0 3 8 】

投影光学系 30 の露光領域内の測定点 h における i 番目の 1 次光学特性値 y_{ih} は、数式 6 に示すように、ゼルニケ係数の線形結合で表される。また、各部（レチクルステージ 20、ウエハステージ 50、光学素子 302 及び 304）の調整量を変化させたとき、測定点 h における j 番目のゼルニケ係数 Z_{jh} は、数式 7 に示すように、 k 番目の各部調整量 x_k の線形結合で表される。但し、数式 6 において、 a_{ij} は、 i 番目の 1 次光学特性値に対する j 番目のゼルニケ係数の影響度である。また、数式 7 において、 Z_{0jh} は、測定点 h における j 番目のゼルニケ係数の初期値であり、 b_{hjk} は、測定点 h における j 番目のゼルニケ係数への各部調整量 x_k の影響度である。

20

【 0 0 3 9 】

【数 6】

$$y_{ih} = \sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{jh} \quad (i=1, 2, \dots, I; h=1, 2, \dots, H)$$

【 0 0 4 0 】

【数 7】

$$Z_{jh} = Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \quad (j=1, 2, \dots, J; h=1, 2, \dots, H)$$

30

【 0 0 4 1 】

数式 6 と数式 7 から数式 8 が導かれる。

【 0 0 4 2 】

【数 8】

$$y_{ih} = \sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \quad (i=1, 2, \dots, I; h=1, 2, \dots, H)$$

40

【 0 0 4 3 】

測定点 h におけるディストーション u_h も k 番目の各部調整量 x_k に対して 1 次関数で表される 1 次光学特性値である。従って、各部（レチクルステージ 20、ウエハステージ 50、光学素子 302 及び 304）の調整量を変化させたとき、測定点 h におけるディストーション u_h は、数式 9 に示すように、 k 番目の各部調整量 x_k の線形結合で表される。但し、数式 9 において、 u_{0h} は、測定点 h におけるディストーションの初期値であり、 c_{hk} は、測定点 h におけるディストーションへの各部調整量 x_k の影響度である。

【 0 0 4 4 】

【数 9】

$$u_h = u_{0h} + \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \quad (h=1, 2, \dots, H)$$

【0045】

一方、投影光学系30の露光領域内の測定点hにおけるm番目の2次光学特性値 W_{mh} は、数式10で表される。但し、数式10において、 d_{jm} は、m番目の2次光学特性値に対するj番目のゼルニケ係数の影響度である。

【0046】

【数10】

10

$$w_{mh} = \sum_{j=1}^J d_{jm} Z_{jh}^2 \quad (m=1, 2, \dots, M; h=1, 2, \dots, H)$$

【0047】

数式10及び数式7から、測定点hにおけるM個の2次光学特性値 W_{mh} を示す数式11が導かれる。

【0048】

【数11】

$$w_{mh} = \sum_{j=1}^J d_{jm} \left(Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \right)^2 \quad (m=1, 2, \dots, M; h=1, 2, \dots, H) \quad 20$$

【0049】

なお、各部調整量 x_k には物理的限界値が存在することから、各部調整量 x_k は、数式12で表される。但し、数式12において、 L_k は、k番目の各部調整量の下限值であり、 U_k は、k番目の各部調整量の上限值である。

【0050】

【数12】

$$L_k \leq x_k \leq U_k \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad 30$$

【0051】

ステップS1008では、制御部90は、2次計画法（制約2次計画法）を用いて、1次光学特性値、ディストーション及び2次光学特性値を最小にするための制約条件式を作成し、各部の調整量（例えば、光学素子302及び304の調整量）を算出する。

【0052】

ステップS1008について具体的に説明する。まず、1次光学特性値、ディストーション及び各部の調整量の調整範囲について、特許文献4で提案されたダミー変数を用いた線形計画法の制約条件を数式13乃至数式20に示す。換言すれば、数式13乃至数式20は、最適化問題の制約条件式となる。

【0053】

40

【数13】

$$\sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \leq t_{1i} \quad (i=1, 2, \dots, I; h=1, 2, \dots, H)$$

【0054】

【数 1 4】

$$-\sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \leq t_{1i} \quad (i=1, 2, \dots, I; h=1, 2, \dots, H)$$

【0 0 5 5】

【数 1 5】

$$u_{0h} + \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \leq t_2 \quad (h=1, 2, \dots, H)$$

10

【0 0 5 6】

【数 1 6】

$$-u_{0h} - \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \leq t_2 \quad (h=1, 2, \dots, H)$$

【0 0 5 7】

【数 1 7】

$$0 \leq t_{1i} \quad (i=1, 2, \dots, I)$$

【0 0 5 8】

20

【数 1 8】

$$0 \leq t_2$$

【0 0 5 9】

【数 1 9】

$$-x_k \leq -L_k \quad (k=1, 2, \dots, K)$$

【0 0 6 0】

【数 2 0】

$$x_k \leq U_k \quad (k=1, 2, \dots, K)$$

30

【0 0 6 1】

なお、数式 1 7 の右辺における t_{1i} 及び数式 1 8 の右辺における t_2 は、1 次光学特性値の上限値に対応するダミー変数（第 1 のダミー変数）である。

【0 0 6 2】

一方、制約 2 次計画法でゼルニケ係数の重みつき 2 乗和で表される 2 次光学特性値を最小化するために、測定点 h における j 番目のゼルニケ係数の絶対値の上限 Z_{ajh} を数式 2 1 及び数式 2 2 で表す。

【0 0 6 3】

【数 2 1】

40

$$Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \leq Z_{ajh} \quad (j=1, 2, \dots, J; h=1, 2, \dots, H)$$

【0 0 6 4】

【数 2 2】

$$-Z_{0jh} - \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \leq Z_{ajh} \quad (j=1, 2, \dots, J; h=1, 2, \dots, H)$$

【0 0 6 5】

数式 2 1 及び数式 2 2 から明らかなように、上限 Z_{ajh} は常に非負である。

50

【 0 0 6 6 】

ここで、数式 2 3 乃至数式 2 5 に示す制約式を追加すれば、これは制約 2 次計画問題であって、最適解を算出することが可能であり、投影光学系 3 0 の露光領域内における 2 次光学特性値の最悪値を最小化することができる。

【 0 0 6 7 】

【 数 2 3 】

$$\sum_{j=1}^J d_{jm} Z_{ajh} Z_{ajh} \leq t_{3m} \quad (m=1, 2, \dots, M; h=1, 2, \dots, H)$$

【 0 0 6 8 】

10

【 数 2 4 】

$$0 \leq Z_{ajh} \quad (j=1, 2, \dots, J; h=1, 2, \dots, H)$$

【 0 0 6 9 】

【 数 2 5 】

$$0 \leq t_{3m} \quad (m=1, 2, \dots, M)$$

【 0 0 7 0 】

数式 2 3 及び数式 2 5 の各々の右辺における t_{3m} は、2 次光学特性値の上限値に対応するダミー変数（第 2 のダミー変数）である。

20

【 0 0 7 1 】

このようにして、以下に示す制約 2 次計画問題が作成される。但し、 Y_i は、 i 番目の 1 次光学特性値の許容値であり、 U は、ディストーションの許容値であり、 W_m は、 m 番目の 2 次光学特性値の許容値である。

【 0 0 7 2 】

【数 2 6】

最小化：

$$f = \frac{1}{Y_i} \sum_{i=1}^I t_{1i} + \frac{1}{U} t_2 + \frac{1}{W_m} \sum_{m=1}^M t_{3m} \quad (\text{数式 2 6})$$

制約条件：

$$\sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \leq t_{1i} \quad (i=1, 2, \dots, I; h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 1 3})$$

$$-\sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \leq t_{1i} \quad (i=1, 2, \dots, I; h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 1 4})$$

$$u_{0h} + \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \leq t_2 \quad (h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 1 5})$$

$$-u_{0h} - \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \leq t_2 \quad (h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 1 6})$$

$$Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \leq Z_{ajh} \quad (j=1, 2, \dots, J; h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 2 1})$$

$$-Z_{0jh} - \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \leq Z_{ajh} \quad (j=1, 2, \dots, J; h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 2 2})$$

$$\sum_{j=1}^J d_{jm} Z_{ajh} Z_{ajh} \leq t_{3m} \quad (m=1, 2, \dots, M; h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 2 3})$$

$$0 \leq Z_{ajh} \quad (j=1, 2, \dots, J; h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 2 4})$$

$$0 \leq t_{1i} \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (\text{数式 1 7})$$

$$0 \leq t_2 \quad (\text{数式 1 8})$$

$$0 \leq t_{3m} \quad (\text{数式 2 5})$$

$$-x_k \leq -L_k \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (\text{数式 1 9})$$

$$x_k \leq U_k \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (\text{数式 2 0})$$

【0 0 7 3】

数式 2 6 で示される目的関数では、投影光学系 3 0 の各光学特性をバランスよく最適化するために、各光学特性値を許容値で除して正規化することが好ましい。これにより、複数の収差をバランスよく最小化することができる。

【0 0 7 4】

そして、数式 1 3 乃至数式 2 6 から各部（レチクルステージ 2 0、ウエハステージ 5 0、光学素子 3 0 2 及び 3 0 4）の調整量を算出する。

【0 0 7 5】

各部（レチクルステージ 2 0、ウエハステージ 5 0、光学素子 3 0 2 及び 3 0 4）の調整量を算出したら、制御部 9 0 は、ステップ S 1 0 1 0 において、各部を駆動する。これにより、投影光学系 3 0 の光学特性が調整される（即ち、投影光学系 3 0 の収差を補正する）。

【0 0 7 6】

なお、定式化された制約 2 次計画問題には必ず最適解が存在し、それを解くことが可能である。従って、上述した定式化方法に基づいて、制約 2 次計画法の計算プログラム（制約 2 次計画ソルバ）を用いて最適化計算を行えば、1 次光学特性値及び 2 次光学特性値の最悪値を最小化するための各部の調整量（制御変数）を算出することができる。

【 0 0 7 7 】

本実施形態の投影光学系 30 の調整方法によれば、投影光学系 30 の波面収差を表すゼルニケ係数の重みつき 2 乗和を含む光学特性を調整するための各部の最適な調整量を得ることができる。また、非常に簡易な処理でありながら、露光領域内の各点毎（即ち、露光領域内全体）の光学特性値を適正な範囲（即ち、許容範囲）に維持するための各部の調整量を得ることができる。

【 0 0 7 8 】

また、図 4 に示すように、2 次錐計画法を用いて投影光学系 30 の自動調整を行ってもよい。図 4 は、露光装置 1 における投影光学系 30 の自動調整を説明するためのフローチャートである。なお、投影光学系 30 のディストーションの測定（ステップ S 1 0 0 2）、投影光学系 30 の波面収差の測定（ステップ S 1 0 0 4）及びゼルニケ係数の算出（ステップ S 1 0 0 6）は、図 3 に示したフローチャートでの処理と同じである。

【 0 0 7 9 】

ステップ S 1 0 0 8 A では、制御部 90 は、2 次錐計画法を用いて、1 次光学特性値、ディストーション及び 2 次光学特性値を最小にするための制約条件式を作成し、各部の調整量（例えば、光学素子 302 及び 304 の調整量）を算出する。

【 0 0 8 0 】

具体的には、数式 13 乃至数式 26 を以下に示す等価な式に変形すれば、これは、2 次錐計画問題であって、最適解を算出することが可能であり、投影光学系 30 の露光領域内における 2 次光学特性値の最悪値を最小化することができる。

【 0 0 8 1 】

【 数 2 7 】

最小化：

$$f = \frac{1}{Y_i} \sum_{i=1}^I t_{1i} + \frac{1}{U} t_2 + \frac{1}{W_m} \sum_{m=1}^M t_{3m} \quad (\text{数式 27})$$

制約条件：

$$0 \leq -\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k + t_{1i} - \sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} \quad (i=1, 2, \dots, I; h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 28})$$

$$0 \leq \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k + t_{1i} + \sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} \quad (i=1, 2, \dots, I; h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 29})$$

$$0 \leq -\sum_{k=1}^K c_{hk} x_k + t_2 - u_{0h} \quad (h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 30})$$

$$0 \leq \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k + t_2 + u_{0h} \quad (h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 31})$$

$$\left\| \begin{pmatrix} B_{hm} & 0 \\ -\frac{\alpha_{hm}^T}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t_{3m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\beta_{hm}+1}{2} \end{pmatrix} \right\| \leq \left(-\frac{\alpha_{hm}^T}{2} \quad \frac{1}{2} \right) \begin{pmatrix} s \\ t_{3m} \end{pmatrix} + \frac{-\beta_{hm}+1}{2}$$

$$(m=1, 2, \dots, M; h=1, 2, \dots, H) \quad (\text{数式 32})$$

$$0 \leq t_{1i} \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (\text{数式 33})$$

$$0 \leq t_2 \quad (\text{数式 34})$$

$$0 \leq t_{3m} \quad (\text{数式 35})$$

$$-x_k \leq -L_k \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (\text{数式 36})$$

$$x_k \leq U_k \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (\text{数式 37})$$

【 0 0 8 2 】

ここで、数式 32 において、 s 、 B_{hm} 、 α_{hm} 及び β_{hm} は、以下のように表される

10

20

30

40

50

。【 0 0 8 3 】
【 数 2 8 】

$$s = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_K \end{pmatrix} \quad (\text{数式 3 8})$$

$$B_{hm} = \begin{pmatrix} d_{1m}b_{h11} & d_{1m}b_{h12} & \cdots & d_{1m}b_{h1K} \\ d_{2m}b_{h21} & d_{2m}b_{h22} & \cdots & d_{2m}b_{h2K} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{Jm}b_{hJ1} & d_{Jm}b_{hJ2} & \cdots & d_{Jm}b_{hJK} \end{pmatrix} \quad (m=1, 2, \cdots, M; h=1, 2, \cdots, H) \quad (\text{数式 3 9})$$

$$\alpha_{hm} = \begin{pmatrix} 2 \sum_{j=1}^J d_{jm}^2 b_{hj1} Z_{0jh} \\ 2 \sum_{j=1}^J d_{jm}^2 b_{hj2} Z_{0jh} \\ \vdots \\ 2 \sum_{j=1}^J d_{jm}^2 b_{hJK} Z_{0jh} \end{pmatrix} \quad (m=1, 2, \cdots, M; h=1, 2, \cdots, H) \quad (\text{数式 4 0}) \quad 20$$

$$\beta_{hm} = \sum_{j=1}^J d_{jm}^2 Z_{0jh}^2 \quad (m=1, 2, \cdots, M; h=1, 2, \cdots, H) \quad (\text{数式 4 1})$$

【 0 0 8 4 】

上述したように、数式 2 7 乃至数式 4 1 は、数式 1 3 乃至数式 2 6 の変形であり、且つ、 $\{x_k, t_{1i}, t_2, t_{3m}\}$ を変数とする 2 次錐計画問題である。

【 0 0 8 5 】

そして、数式 2 7 乃至数式 4 1 から各部（レチクルステージ 2 0、ウエハステージ 5 0、光学素子 3 0 2 及び 3 0 4）の調整量を算出する。

【 0 0 8 6 】

各部（レチクルステージ 2 0、ウエハステージ 5 0、光学素子 3 0 2 及び 3 0 4）の調整量を算出したら、制御部 9 0 は、ステップ S 1 0 1 0 において、各部を駆動する。これにより、投影光学系 3 0 の光学特性が調整される（即ち、投影光学系 3 0 の収差を補正する）。

【 0 0 8 7 】

なお、定式化された 2 次錐計画問題には必ず最適解が存在し、それを解くことが可能である。従って、上述した定式化方法に基づいて、2 次錐計画法の計算プログラム（2 次錐計画ソルバ）を用いて最適化計算を行えば、1 次光学特性値及び 2 次光学特性値の最悪値を最小化するための各部の調整量（制御変数）を算出することができる。また、本実施形態の露光装置 1 においては、制御変数の数は多くなく、上述した計算は短時間で終了する。従って、露光装置 1 においてリアルタイムで収差を補正する場合に、安定して高いスループットを維持することが可能となる。

【 0 0 8 8 】

更に、制御変数である各部の調整量 x_k には、ウエハステージ 5 0 の調整量（例えば、フォーカス調整やアライメント調整における調整量）が含まれる。従って、投影光学系 3 0 の露光領域内の各点の波面収差にデフォーカス成分が含まれる場合にも、本実施形態の

10

20

30

40

50

投影光学系 30 の調整方法によれば、かかるデフォーカス成分の影響を受けることなく、各部の調整量を得ることができる。同様に、投影光学系 30 の露光領域内の各点のデistonーションにアライメント成分が含まれる場合にも、本実施形態の投影光学系 30 の調整方法によれば、かかるアライメント成分の影響を受けることなく、各部の調整量を得ることができる。

【0089】

露光において、光源から発せられた光束は、照明光学系によってレチクル 10 を照明する。レチクル 10 のパターンを反映する光束は、投影光学系 30 によってウエハ 40 上に結像する。この際、投影光学系 30 は、上述した調整方法によって、露光領域内の光学特性が最適となるように調整されているため、優れた結像性能でレチクル 10 のパターンをウエハ 40 に投影することができる。従って、露光装置 1 は、高いスループットで経済性よく高品位なデバイス（半導体素子、LCD 素子、撮像素子（CCD など）、薄膜磁気ヘッドなど）を提供することができる。

【0090】

次に、図 5 及び図 6 を参照して、露光装置 1 を利用したデバイス製造方法の実施例を説明する。図 5 は、デバイス（半導体デバイスや液晶デバイス）の製造を説明するためのフローチャートである。ここでは、半導体デバイスの製造を例に説明する。ステップ 1（回路設計）では、デバイスの回路設計を行う。ステップ 2（レチクル製作）では、設計した回路パターンを形成したレチクルを製作する。ステップ 3（ウエハ製造）では、シリコンなどの材料を用いてウエハを製造する。ステップ 4（ウエハプロセス）は、前工程と呼ばれ、レチクルとウエハを用いてリソグラフィー技術によってウエハ上に実際の回路を形成する。ステップ 5（組み立て）は、後工程と呼ばれ、ステップ 4 によって作成されたウエハを用いて半導体チップ化する工程であり、アッセンブリ工程（ダイシング、ボンディング）、パッケージング工程（チップ封入）等の工程を含む。ステップ 6（検査）では、ステップ 5 で作成された半導体デバイスの動作確認テスト、耐久性テストなどの検査を行う。こうした工程を経て半導体デバイスが完成し、これが出荷（ステップ 7）される。

【0091】

図 6 は、ステップ 4 のウエハプロセスの詳細なフローチャートである。ステップ 11（酸化）では、ウエハの表面を酸化させる。ステップ 12（CVD）では、ウエハの表面に絶縁膜を形成する。ステップ 13（電極形成）では、ウエハ上に電極を蒸着などによって形成する。ステップ 14（イオン打ち込み）では、ウエハにイオンを打ち込む。ステップ 15（レジスト処理）では、ウエハに感光剤を塗布する。ステップ 16（露光）では、露光装置 1 によってレチクルの回路パターンをウエハに露光する。ステップ 17（現像）では、露光したウエハを現像する。ステップ 18（エッチング）では、現像したレジスト像以外の部分を削り取る。ステップ 19（レジスト剥離）では、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。これらのステップを繰り返し行うことによってウエハ上に多重の回路パターンが形成される。かかるデバイス製造方法によれば、従来よりも高品位のデバイスを製造することができる。このように、露光装置 1 を使用するデバイス製造方法、並びに結果物としてのデバイスも本発明の一側面を構成する。

【0092】

以上、本発明の好ましい実施例について説明したが、本発明はこれらの実施例に限定されないことはいうまでもなく、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。

【図面の簡単な説明】

【0093】

【図 1】本発明の一側面としての露光装置の構成を示す概略斜視図である。

【図 2】図 1 に示す露光装置において、位置を調整可能なレチクル、ウエハ、投影光学系に含まれる光学素子の可動方向（駆動方向）の一例を模式的に示す図である。

【図 3】図 1 に示す露光装置における投影光学系の自動調整を説明するためのフローチャートである。

【図 4】図 1 に示す露光装置における投影光学系の自動調整を説明するためのフローチャ

10

20

30

40

50

ートである。

【図5】デバイスの製造を説明するためのフローチャートである。

【図6】図5に示すステップ4のウエハプロセスの詳細なフローチャートである。

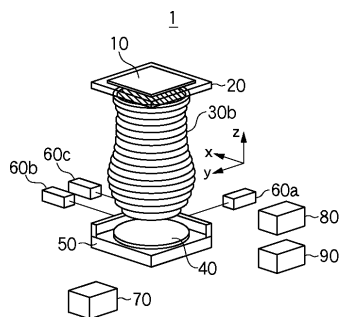
【符号の説明】

【0094】

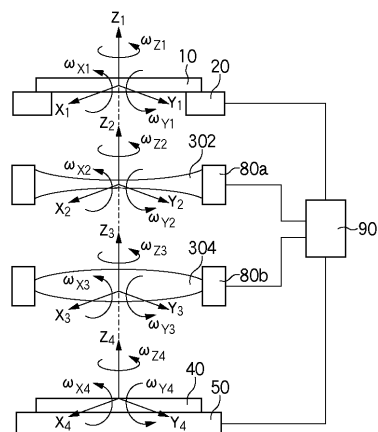
1	露光装置
10	レチクル
20	レチクルステージ
30	投影光学系
302及び304	光学素子
40	ウエハ
50	ウエハステージ
60a乃至60c	レーザー干渉計
70	測定部
80	調整部
80a及び80b	駆動機構
90	制御部

10

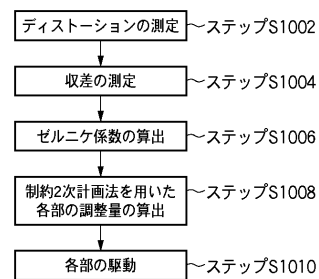
【図1】



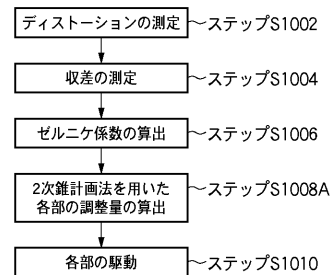
【図2】



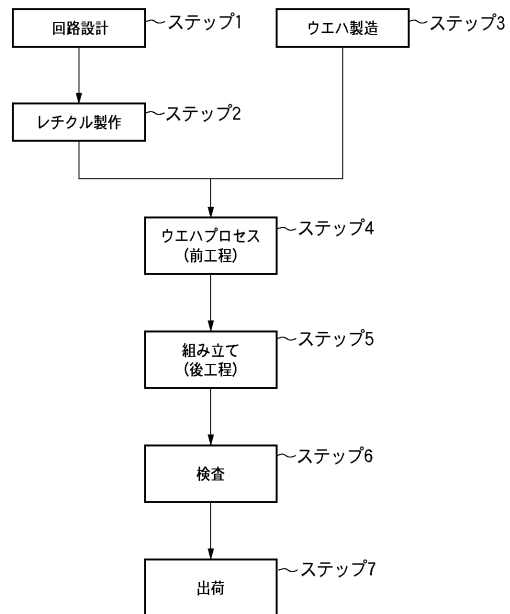
【図3】



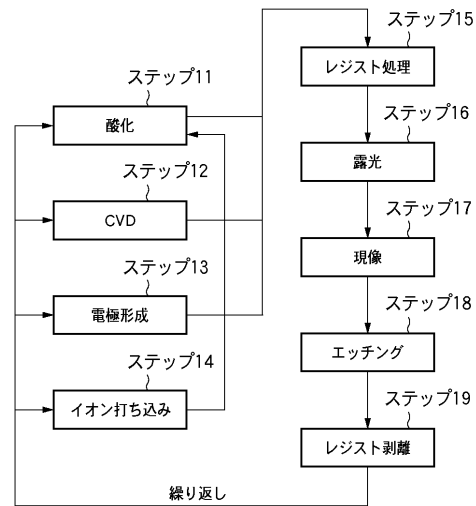
【図4】



【図 5】



【図 6】



フロントページの続き

(74)代理人 100130409

弁理士 下山 治

(74)代理人 100134175

弁理士 永川 行光

(72)発明者 品野 勇治

東京都府中市晴見町3 - 8 - 1 国立大学法人東京農工大学内

(72)発明者 吉原 俊幸

東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内

審査官 長井 真一

(56)参考文献 特開2005 - 268451 (JP, A)

特開2001 - 037087 (JP, A)

特開平10 - 187660 (JP, A)

特開2006 - 221676 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/027

G03F 7/20