

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5418768号
(P5418768)

(45) 発行日 平成26年2月19日 (2014. 2. 19)

(24) 登録日 平成25年11月29日 (2013. 11. 29)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 L 21/027 (2006. 01)

H O 1 L 21/30 5 1 6 A

G O 3 F 7/20 (2006. 01)

G O 3 F 7/20 5 2 1

G O 1 M 11/02 (2006. 01)

G O 1 M 11/02 B

請求項の数 5 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2009-152852 (P2009-152852)
 (22) 出願日 平成21年6月26日 (2009. 6. 26)
 (65) 公開番号 特開2011-9575 (P2011-9575A)
 (43) 公開日 平成23年1月13日 (2011. 1. 13)
 審査請求日 平成24年6月26日 (2012. 6. 26)

(73) 特許権者 000001007
 キヤノン株式会社
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
 (73) 特許権者 504132881
 国立大学法人東京農工大学
 東京都府中市晴見町3-8-1
 (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、調整方法及びデバイスの製造方法

(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、
 前記調整部に与えられる前記光学素子の調整量に応じて前記光学素子を調整できたときの前記投影光学系の光学特性値の理論上の変化を表す変数と、前記調整部が前記光学素子を調整したときの調整誤差によって生じる前記投影光学系の光学特性値の変化の不確実性を含む目的関数の値が許容レベルを満たすように、前記光学素子の調整量を2次計画法又は2次錐計画法を用いて算出し、当該算出し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】

前記光学特性値は、波面収差係数の線形結合で表される光学特性の値、前記投影光学系の収差としてのディストーションの値、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及び波面収差 R M S 値の平方の少なくとも1つを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の露光装置。

【請求項 3】

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 2 に記載の露光装置

。

【請求項 4】

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、レチクルのパターンからの光を基板に投影する投影光学系の調整方法であって、

前記光学素子の調整量に応じて前記光学素子を調整できたときの前記投影光学系の光学特性値の理論上の変化を表す変数と、前記光学素子を調整したときの調整誤差によって生じる前記投影光学系の光学特性値の変化の不確実性とを含む目的関数を生成する生成ステップと、

前記生成ステップで生成した目的関数の値が許容レベルを満たすように、前記光学素子の調整量を、2 次計画法又は 2 次錐計画法を用いて算出する算出ステップと、

前記算出ステップで算出した調整量に基づいて、前記光学素子を調整する調整ステップと、

を有することを特徴とする調整方法。

【請求項 5】

請求項 1 乃至 3 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、

を有することを特徴とするデバイスの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、露光装置、調整方法及びデバイスの製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

フォトリソグラフィ技術を用いて半導体メモリや論理回路などの微細な半導体デバイスを製造する際に、露光装置が使用されている。露光装置は、レチクル（マスク）に形成されたパターンを、投影光学系を介して、ウエハ等の基板に投影してパターンを転写する。

【0003】

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投影光学系の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】

一方、調整対象となる光学特性には、波面収差の RMS（Root Mean Square）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（各光学素子の調整量の 1 次関数で表される光学特性値）と 2 次の評価値（各光学素子の調整量の 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）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献 1】特開 2002 - 367886 号公報

【特許文献 2】特開 2005 - 268451 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

20

30

40

50

【 0 0 0 7 】

しかしながら、特許文献 1 や特許文献 2 で決定された調整量を目標値として各光学素子を調整する調整部に与えたとしても、実際の調整量と目標値との間には公差が生じている。従って、僅かな調整量であっても光学特性を大きく変化させる敏感な光学素子を調整した場合には、投影光学系の光学特性を悪化させてしまう可能性がある。

【 0 0 0 8 】

本発明は、このような従来技術の課題に鑑みてなされ、光学特性値を変化させる光学素子を調整することで生じる光学特性値の不確実性を考慮して、光学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

【 0 0 0 9 】

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、前記調整部に与えられる前記光学素子の調整量に応じて前記光学素子を調整できたときの前記投影光学系の光学特性値の理論上の変化を表す変数と、前記調整部が前記光学素子を調整したときの調整誤差によって生じる前記投影光学系の光学特性値の変化の不確実性とを含む目的関数の値が許容レベルを満たすように、前記光学素子の調整量を 2 次計画法又は 2 次錐計画法を用いて算出し、当該算出し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

【 0 0 1 0 】

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

【発明の効果】

【 0 0 1 1 】

本発明によれば、例えば、光学特性値を変化させる光学素子を調整することで生じる光学特性値の不確実性を考慮して、光学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。

【図面の簡単な説明】

30

【 0 0 1 2 】

【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光学特性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ートである。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 3 】

40

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。

【 0 0 1 4 】

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・リピート方式やその他の露光方式も適用することができる。

【 0 0 1 5 】

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

50

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。

【0016】

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。

【0017】

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。

【0018】

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、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。

【0019】

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、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。

【0020】

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。

【0021】

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。

【0022】

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。

【0023】

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）の各点で測定することが可能である。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、ここでは詳しい構成及び動作の説明は省略する。

【0024】

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、アクチュエータを含み、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。

【0025】

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を2次計画法又は2次錐計画法を用いて算出する。例えば、制御部90は、後述するように、調整部80に与えられる調整量に応じて光学素子を調整できたときの投影光学系30の光学特性値の理論上の変化を表す変数と

10

20

30

40

50

、投影光学系 30 の光学特性値の変化の不確実性とを含む目的関数を生成する。そして、制御部 90 は、かかる目的関数の値が許容レベルを満たすように、光学素子の調整量を、2 次計画法又は 2 次錐計画法を用いて算出する。なお、投影光学系 30 の光学特性値の変化の不確実性は、光学素子を調整したときの調整誤差によって生じるものである。更に、制御部 90 は、2 次計画法又は 2 次錐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に基づいて、調整部 80 を制御する。

【0026】

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、 $\bar{X}1$ 、 $\bar{Y}1$ 及び $\bar{Z}1$ 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、 $\bar{X}4$ 、 $\bar{Y}4$ 及び $\bar{Z}4$ 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、 $\bar{X}2$ 、 $\bar{Y}2$ 及び $\bar{Z}2$ 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、 $\bar{X}3$ 、 $\bar{Y}3$ 及び $\bar{Z}3$ の方向）に位置調整される。

【0027】

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 の光学特性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 の光学特性の自動調整は、制御部 90 が露光装置 1 の各部を統括的に制御することで実現される。

【0028】

図 3 を参照するに、S1002 では、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。同様に、S1004 では、測定部 70 を介して投影光学系 30 の露光領域内の H 箇所の測定点ごとに波面収差を測定する。

【0029】

次に、S1006 では、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_{jh} を算出する。

【0030】

次に、S1006 で算出した投影光学系 30 の測定点 h ごとのゼルニケ係数（波面収差係数）から、投影光学系 30 の光学特性値を算出する。具体的には、S1008 では、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 I 種の光学特性値を算出する。かかる光学特性値は、投影光学系 30 を構成する光学素子 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。S1010 では、投影光学系 30 の測定点 h における j 番目のゼルニケ係数の平方値、及び、ゼルニケ成分ごと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 値の平方などの波面収差量に対して 2 次の特性を有する M 種の光学特性値を算出する。かかる光学特性値は、投影光学系 30 を構成する光学素子 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。

【0031】

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。

【0032】

【数 1】

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

【0033】

【数 2】

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

10

20

30

40

50

【 0 0 3 4 】

【 数 3 】

 $j = 1、2、\dots、J$ (数式 3)

【 0 0 3 5 】

【 数 4 】

 $k = 1、2、\dots、K$ (数式 4)

【 0 0 3 6 】

【 数 5 】

 $m = 1、2、\dots、M$ (数式 5)

【 0 0 3 7 】

投影光学系 3 0 の露光領域にの測定点 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、各調整箇所（本実施形態では、光学素子 3 0 2 及び 3 0 4）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 番目の調整箇所の調整量 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調整部の調整量 x_k の影響度である。なお、調整箇所は、光学素子 3 0 2 及び 3 0 4 に限定されるものではなく、例えば、レチクルステージ 2 0 やウエハステージ 5 0 などを含んでもよい。

【 0 0 3 8 】

【 数 6 】

$$y_{ih} = \sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{jh} \quad (\text{数式 6})$$

【 0 0 3 9 】

【 数 7 】

$$Z_{jh} = Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \quad (\text{数式 7})$$

【 0 0 4 0 】

数式 6 と数式 7 から数式 8 が導かれる。

【 0 0 4 1 】

【 数 8 】

$$y_{ih} = \sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \quad (\text{数式 8})$$

【 0 0 4 2 】

このとき、各調整箇所を調整（操作）することで生じる 1 次光学特性値 y_{ih} の不確実性 py_{ih} を数式 9 で定義する。但し、数式 9 において、 qy_{ihk} は、 k 番目の調整箇所を調整することで生じる 1 次光学特性値 y_{ih} の不確実性であり、 e_k は、 k 番目の調整箇所を調整（操作）するか調整しないか（非操作）を表す変数である。なお、1 次光学特性値 y_{ih} の不確実性 qy_{ih} は、 k 番目の調整箇所の光学特性敏感度に調整上の公差を乗じたものである。

【 0 0 4 3 】

【 数 9 】

$$py_{ih} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J qy_{ihk} e_k \quad (\text{数式 9})$$

【 0 0 4 4 】

10

20

30

40

50

また、投影光学系 30 の測定点 h におけるディストーション u_h も k 番目の調整箇所の調整量 x_k に対して 1 次の関数で表される 1 次光学特性値である。従って、調整箇所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 10 に示すように、k 番目の調整箇所の調整量 x_k の線形結合で表される。但し、数式 10 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調整箇所の調整量 x_k の影響度である。

【0045】

【数 10】

$$u_h = u_{0h} + \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \quad (\text{数式 10})$$

10

【0046】

このとき、各調整箇所を調整することで生じるディストーション u_h の不確実性 pu_h を数式 11 で定義する。但し、数式 11 において、 qu_{hk} は、k 番目の調整箇所を調整することで生じるディストーション u_h の不確実性である。

【0047】

【数 11】

$$pu_h = \sum_{k=1}^K qu_{hk} e_k \quad (\text{数式 11})$$

【0048】

一方、投影光学系 30 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 12 で表される。但し、数式 12 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。

20

【0049】

【数 12】

$$w_{mh} = \sum_{j=1}^J d_{jm} Z_{jh}^2 \quad (\text{数式 12})$$

【0050】

数式 7 及び数式 12 から、投影光学系 30 の測定点 h における M 個の 2 次光学特性値 w_{mh} を表す数式 13 が導かれる。

30

【0051】

【数 13】

$$w_{mh} = \sum_{j=1}^J d_{jm} \left(Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K b_{ijk} x_k \right)^2 \quad (\text{数式 13})$$

【0052】

このとき、各調整箇所を調整することで生じる 2 次光学特性値 w_{mh} の不確実性 pw_{mh} を数式 14 で定義する。但し、数式 13 において、 qw_{mhk} は、k 番目の調整箇所を調整することで生じる 2 次光学特性値 w_{mh} の不確実性である。

【0053】

40

【数 14】

$$pw_{mh} = \sum_{k=1}^K qw_{mhk} e_k \quad (\text{数式 14})$$

【0054】

また、各調整箇所の調整量 x_k には物理的限界値が存在することから、各調整箇所の調整量 x_k は、数式 15 で表される。但し、数式 15 において、 L_k は、k 番目の調整箇所の調整量の下限値であり、 U_k は、k 番目の調整箇所の調整量の上限値である。

【0055】

【数 1 5】

$$L_k \leq x_k \leq U_k \quad (\text{数式 1 5})$$

【0 0 5 6】

なお、数式 6 乃至数式 1 5 において、 y_{ih} 、 u_h 、 x_k 及び e_k は、未知である。一方、 Z_{jh} 、 Z_{0ij} 、 a_{ij} 、 b_{hjk} 、 u_{0h} 、 c_{hk} 、 d_{jm} 、 L_k 、 U_k 、 $p_{y_{ih}}$ 、 p_{u_h} 、 $p_{w_{mh}}$ 、 $q_{y_{ihk}}$ 、 $q_{u_{hk}}$ 及び $q_{w_{mhk}}$ は、既知である。

【0 0 5 7】

S 1 0 1 2 では、各調整箇所の調整量を求めるための目的関数、及び、1 次光学特性値、ディストーション及び 2 次光学特性値の制約条件式を生成する。具体的には、数式 1 6 乃至数式 2 3 で示すように、1 次光学特性値、ディストーション及び各調整箇所の調整量の調整範囲について、特許文献 1 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式を生成する。従って、数式 1 6 乃至数式 2 3 は、最適化問題の制約条件式となる。なお、数式 1 6 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である。

【0 0 5 8】

【数 1 6】

$$\sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \leq t_{1i} \quad (\text{数式 1 6})$$

【0 0 5 9】

【数 1 7】

$$-\sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \leq t_{1i} \quad (\text{数式 1 7})$$

【0 0 6 0】

【数 1 8】

$$u_{0h} + \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \leq t_2 \quad (\text{数式 1 8})$$

【0 0 6 1】

【数 1 9】

$$-u_{0h} - \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \leq t_2 \quad (\text{数式 1 9})$$

【0 0 6 2】

【数 2 0】

$$0 \leq t_{1i} \quad (\text{数式 2 0})$$

【0 0 6 3】

【数 2 1】

$$0 \leq t_2 \quad (\text{数式 2 1})$$

【0 0 6 4】

【数 2 2】

$$-x_k \leq -L_k \quad (\text{数式 2 2})$$

【0 0 6 5】

【数 2 3】

$$x_k \leq U_k \quad (\text{数式 2 3})$$

10

20

30

40

50

【 0 0 6 6 】

一方、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、投影光学系 3 0 の測定点 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 4 及び数式 2 5 で表す。

【 0 0 6 7 】

【 数 2 4 】

$$Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \leq Z_{ajh} \quad (\text{数式 2 4})$$

【 0 0 6 8 】

【 数 2 5 】

$$-Z_{0jh} - \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \leq Z_{ajh} \quad (\text{数式 2 5})$$

10

【 0 0 6 9 】

数式 2 4 及び数式 2 5 から明らかなように、上限 Z_{ajh} は常に非負である。

【 0 0 7 0 】

ここで、数式 2 6 乃至数式 2 8 に示す制約条件式を追加する。数式 2 6 及び数式 2 7 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である。

【 0 0 7 1 】

【 数 2 6 】

$$\sum_{j=1}^J d_{jm} Z_{ajh}^2 \leq t_{3m} \quad (\text{数式 2 6})$$

20

【 0 0 7 2 】

【 数 2 7 】

$$0 \leq Z_{ajh} \quad (\text{数式 2 7})$$

【 0 0 7 3 】

【 数 2 8 】

$$0 \leq t_{3m} \quad (\text{数式 2 8})$$

30

【 0 0 7 4 】

また、調整箇所を調整したときに生じる光学特性値の不確実性の上限値を以下の数式 2 9 乃至 3 1 で表す。なお、数式 2 9 の右辺における s_{1i} は、1 次光学特性値の不確実性の上限値に対応するダミー変数である。数式 3 0 の右辺における s_2 は、ディストーションの不確実性の上限値に対応するダミー変数である。数式 3 1 の右辺における s_{3m} は、2 次光学特性値の不確実性の上限値に対応するダミー変数である。

【 0 0 7 5 】

【 数 2 9 】

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J q_{ihk} e_k \leq s_{1i} \quad (\text{数式 2 9})$$

40

【 0 0 7 6 】

【 数 3 0 】

$$\sum_{k=1}^K q_{hk} e_k \leq s_2 \quad (\text{数式 3 0})$$

【 0 0 7 7 】

【数 3 1】

$$\sum_{k=1}^K q w_{mhk} e_k \leq s_{3m} \quad \cdots (\text{数式 3 1})$$

【0 0 7 8】

このようにして、最小化したい目的関数を数式 3 2 で表せば、以下に示す制約 2 次計画問題が生成される。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 9】

【数 3 2】

最小化：

$$f = \sum_{i=1}^I \frac{t_{1i}}{Y_i} + \frac{t_2}{U} + \sum_{m=1}^M \frac{t_{3m}}{W_m} + \sum_{i=1}^I \frac{s_{1i}}{Y_i} + \frac{s_2}{U} + \sum_{m=1}^M \frac{s_{3m}}{W_m} \quad (\text{数式 3 2})$$

制約条件：

$$\sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \leq t_{1i} \quad (\text{数式 1 6})$$

$$-\sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k \leq t_{1i} \quad (\text{数式 1 7}) \quad 10$$

$$u_{0h} + \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \leq t_2 \quad (\text{数式 1 8})$$

$$-u_{0h} - \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k \leq t_2 \quad (\text{数式 1 9})$$

$$Z_{0jh} + \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \leq Z_{ajh} \quad (\text{数式 2 4})$$

$$-Z_{0jh} - \sum_{k=1}^K b_{hjk} x_k \leq Z_{ajh} \quad (\text{数式 2 5}) \quad 20$$

$$\sum_{j=1}^J d_{jm} Z_{ajh}^2 \leq t_{3m} \quad (\text{数式 2 6})$$

$$0 \leq Z_{ajh} \quad (\text{数式 2 7})$$

$$0 \leq t_{1i} \quad (\text{数式 2 0})$$

$$0 \leq t_2 \quad (\text{数式 2 1}) \quad 30$$

$$0 \leq t_{3m} \quad (\text{数式 2 8})$$

$$-x_k \leq -L_k \quad (\text{数式 2 2})$$

$$x_k \leq U_k \quad (\text{数式 2 3})$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J qy_{ihk} e_k \leq s_{yjh} \quad (\text{数式 2 9})$$

$$\sum_{k=1}^K qu_{ihk} e_k \leq s_{uh} \quad (\text{数式 3 0}) \quad 40$$

$$\sum_{k=1}^K qw_{mhk} e_k \leq s_{wmh} \quad (\text{数式 3 1})$$

【0 0 8 0】

S 1 0 1 4 では、S 1 0 1 2 で生成した制約 2 次計画問題に対して、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い、各調整箇所（光学素子 3 0 2 及び 3 0 4）の調整量を算出する。数式 3 2 で示される目的関数においては、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

して正規化するとよい。これにより、いずれの光学特性値も評価量が 1 以下で許可、1 を超えると不許可となり、複数の収差をバランスよく最小化することができる。

【0081】

S1016では、S1014で算出した各調整箇所の調整量に基づいて、各調整箇所を調整する。具体的には、調整部80を介して、投影光学系30の光学素子302及び304のそれぞれについて、位置、姿勢及び形状などを調整する。これにより、投影光学系30の光学特性が調整される（即ち、投影光学系30の収差が補正される）。

【0082】

このように、本実施形態における投影光学系30の光学特性の調整方法によれば、光学特性値を変化させる素子を調整することで生じる光学特性値の不確実性を考慮して、素子の調整量を求めることができる。また、非常に簡易な処理でありながら、素子の調整を行うかどうかを含めて、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。

10

【0083】

上述したように、制御変数である各調整箇所の調整量 x_k には、ウエハステージ50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）も含めることが可能である。従って、投影光学系30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、各調整箇所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ィスト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、各調整箇所の調整量を得ることができる。

20

【0084】

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の光学特性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の光学特性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（S1002）、投影光学系30の波面収差の測定（S1004）、ゼルニケ係数の算出（S1006）、1次光学特性値の算出（S1008）及び2次光学特性値の算出（S1010）は、上述した通りである。

【0085】

30

S1012Aでは、各調整箇所の調整量を求めるための目的関数、及び、1次光学特性値、ディストーション及び2次光学特性値の制約条件式を生成する。具体的には、数式16乃至数式31を以下に示す等価な式（数式33乃至数式45）に変形する。これにより、2次錐計画問題が生成される。

【0086】

【数 3 3】

最小化：

$$f = \sum_{i=1}^I \frac{t_{li}}{Y_i} + \frac{t_2}{U} + \sum_{m=1}^M \frac{t_{3m}}{W_m} + \sum_{i=1}^I \frac{s_{li}}{Y_i} + \frac{s_2}{U} + \sum_{m=1}^M \frac{s_{3m}}{W_m} \quad (\text{数式 3 2})$$

制約条件：

$$0 \leq -\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k + t_{li} - \sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} \quad (\text{数式 3 3})$$

$$0 \leq \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J a_{ij} b_{hjk} x_k + t_{li} + \sum_{j=1}^J a_{ij} Z_{0jh} \quad (\text{数式 3 4})$$

10

$$0 \leq -\sum_{k=1}^K c_{hk} x_k + t_2 - u_{0h} \quad (\text{数式 3 5})$$

$$0 \leq \sum_{k=1}^K c_{hk} x_k + t_2 + u_{0h} \quad (\text{数式 3 6})$$

$$\left\| \begin{pmatrix} B_{hm} & 0 \\ -\frac{\alpha_{hm}^T}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ t_{3m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\beta_{hm} + 1}{2} \end{pmatrix} \right\| \leq \begin{pmatrix} -\frac{\alpha_{hm}^T}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ t_{3m} \end{pmatrix} + \frac{-\beta_{hm} + 1}{2} \quad (\text{数式 3 7})$$

20

$$0 \leq t_{li} \quad (\text{数式 3 8})$$

$$0 \leq t_2 \quad (\text{数式 3 9})$$

$$0 \leq t_{3m} \quad (\text{数式 4 0})$$

$$0 \leq x_k - L_k \quad (\text{数式 4 1})$$

$$0 \leq -x_k + U_k \quad (\text{数式 4 2})$$

$$0 \leq s_{li} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J q y_{ihk} e_k \quad (\text{数式 4 3})$$

$$0 \leq s_2 - \sum_{k=1}^K q u_{hk} e_k \quad (\text{数式 4 4})$$

30

$$0 \leq s_{3m} - \sum_{k=1}^K q w_{mhk} e_k \quad (\text{数式 4 5})$$

【0 0 8 7】

ここで、数式 3 3 乃至数式 4 5 において、 X 、 B_{hm} 、 α_{hm} 及び β_{hm} は、以下の数式 4 6 乃至数式 4 9 で表される。

【0 0 8 8】

【数 3 4】

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_K \end{pmatrix} \quad (\text{数式 4 6})$$

40

【0 0 8 9】

【数 3 5】

$$B_{hm} = \begin{pmatrix} d_{1m}b_{h11} & d_{1m}b_{h12} & \cdots & d_{1m}b_{h1K} \\ d_{2m}b_{h21} & d_{2m}b_{h22} & \cdots & d_{2m}b_{h2K} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{Jm}b_{hJ1} & d_{Jm}b_{hJ2} & \cdots & d_{Jm}b_{hJK} \end{pmatrix} \quad (\text{数式 4 7})$$

【 0 0 9 0】

【数 3 6】

$$\alpha_{hm} = \begin{pmatrix} 2 \sum_{j=1}^J d_{jm}^2 b_{hj1} Z_{0jh} \\ 2 \sum_{j=1}^J d_{jm}^2 b_{hj2} Z_{0jh} \\ \vdots \\ 2 \sum_{j=1}^J d_{jm}^2 b_{hjK} Z_{0jh} \end{pmatrix} \quad (\text{数式 4 8})$$

10

【 0 0 9 1】

【数 3 7】

$$\beta_{hm} = \sum_{j=1}^J d_{jm}^2 Z_{0jh}^2 \quad (\text{数式 4 9})$$

20

【 0 0 9 2】

S 1 0 1 4 Aでは、S 1 0 1 2 Aで生成した2次錐計画問題に対して、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い、各調整箇所（光学素子302及び304）の調整量を算出する。

【 0 0 9 3】

S 1 0 1 6では、S 1 0 1 4 Aで算出した各調整箇所の調整量に基づいて、各調整箇所を調整する。具体的には、調整部80を介して、投影光学系30の光学素子302及び304のそれぞれについて、位置、姿勢及び形状などを調整する。これにより、投影光学系30の光学特性が調整される（即ち、投影光学系30の収差が補正される）。

30

【 0 0 9 4】

このように、2次錐計画法を用いても、光学特性値を変化させる素子を調整することで生じる光学特性値の不確実性を考慮して、素子の調整量を求めることができる。

【 0 0 9 5】

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。かかるデバイスは、露光装置1を用いてフォトリソ（感光剤）が塗布された基板（ウエハ、ガラスプレート等）を露光する工程と、露光された基板を現像する工程と、その他の周知の工程と、を経ることによって製造される。

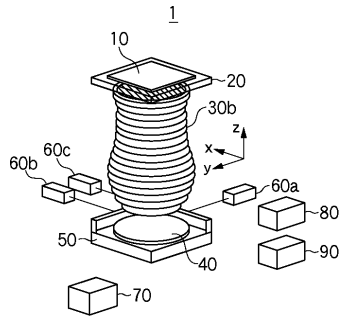
40

【 0 0 9 6】

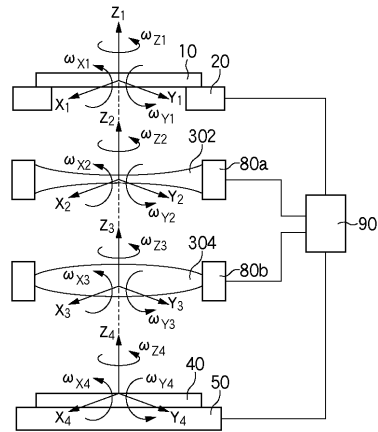
以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されないことはいうまでもなく、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。

。

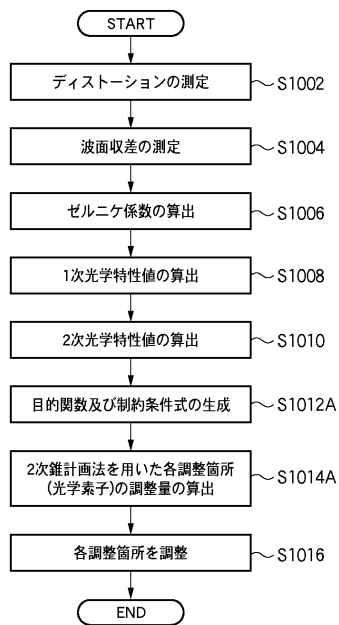
【図 1】



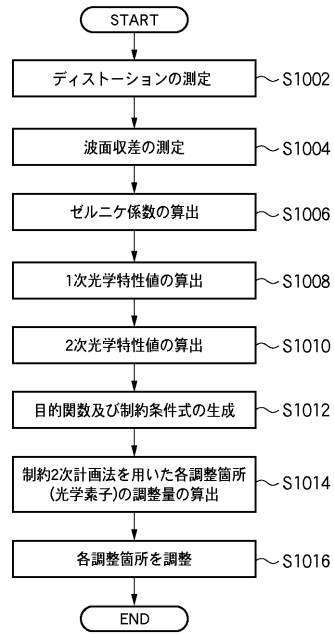
【図 2】



【図 4】



【図 3】



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 宮代 隆平
東京都小金井市中町2丁目24番16号 国立大学法人東京農工大学内
- (72)発明者 品野 勇治
東京都小金井市中町2丁目24番16号 国立大学法人東京農工大学内
- (72)発明者 深川 容三
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
- (72)発明者 久保 諭史
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
- (72)発明者 高野 義巳
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
- (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 宮川 数正

- (56)参考文献 特開2005-268451(JP,A)
特開2009-105097(JP,A)
特開2002-367886(JP,A)
特開2009-094178(JP,A)
特開2009-117556(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01L 21/027
G03F 7/20-7/24, 9/00-9/02
G01M 11/00-11/08