

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5815987号
(P5815987)

(45) 発行日 平成27年11月17日(2015.11.17)

(24) 登録日 平成27年10月2日(2015.10.2)

(51) Int.Cl.

F 1

G03F 7/20 (2006.01)
G02B 13/00 (2006.01)G03F 7/20 521
G02B 13/00

請求項の数 13 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2011-114106 (P2011-114106)
 (22) 出願日 平成23年5月20日 (2011.5.20)
 (65) 公開番号 特開2012-244015 (P2012-244015A)
 (43) 公開日 平成24年12月10日 (2012.12.10)
 審査請求日 平成26年4月1日 (2014.4.1)

(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
 (74) 代理人 100076428
 弁理士 大塚 康徳
 (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
 (74) 代理人 100130409
 弁理士 下山 治
 (74) 代理人 100134175
 弁理士 永川 行光

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】露光装置およびデバイス製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

投影光学系を有し、前記投影光学系を介して基板を露光する露光装置であつて、
 前記投影光学系の温度計測箇所の温度を計測する温度計測部と、
 前記温度計測部によって計測された温度の変化に基づいて前記投影光学系の光学特性の
 变化を予測し、その予測に基づいて前記光学特性の変化による前記基板に形成される像の
 状態の変化を低減する処理を実行するコントローラと、を備え、

前記コントローラは、前記温度計測箇所の温度の変化に対する2次遅れ応答関数に従つ
 て前記光学特性の変化を予測する、

ことを特徴とする露光装置。

10

【請求項 2】

前記温度計測部によって温度を計測して前記光学特性の変化を予測する処理を実行する
 時間間隔の最小値を t_{min} 、前記2次遅れ応答関数における時定数の最大値を m_a
 x としたときに、 $t_{min} / m_a > 0.3$ が満たされる、

ことを特徴とする請求項1に記載の露光装置。

【請求項 3】

前記温度計測部は、前記投影光学系の複数の温度計測箇所の温度を計測するように構成
 されている、

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】

20

前記 2 次遅れ応答関数は、前記温度計測箇所における温度の変化と前記投影光学系の光学特性の変化との関係の実測に基づいて決定されている、

ことを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の露光装置。

【請求項 5】

前記投影光学系を介して前記基板を露光するために原版に光を照射する光源と、

前記原版を位置決めする原版位置決め機構と、を更に備え、

前記実測は、前記光源から光を射出させることなく前記原版位置決め機構を動作させ、

前記温度計測部によって前記温度計測箇所の温度の変化を計測することを含む、

ことを特徴とする請求項 4 に記載の露光装置。

【請求項 6】

前記温度計測箇所は、前記投影光学系の鏡筒の外面の一部分であり、前記原版位置決め機構が発生する熱が前記鏡筒の前記外面に伝わることによって前記投影光学系に温度勾配が生じ、該温度勾配によって前記投影光学系の光学素子に熱が伝わることで生じる前記光学特性の変化によって前記基板に形成される像の状態が変化し、前記処理は、当該像の状態の変化を低減する処理である、

ことを特徴とする請求項 5 に記載の露光装置。

【請求項 7】

前記投影光学系の光学素子を駆動する駆動部を更に備え、

前記コントローラは、前記光学特性の変化による前記基板に形成される像の状態の変化が低減されるように前記駆動部を制御する、

ことを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の露光装置。

【請求項 8】

前記光学特性は、前記投影光学系の投影倍率を含む、

ことを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の露光装置。

【請求項 9】

投影光学系を有し、前記投影光学系を介して基板を露光する露光装置であつて、

原版を位置決めする原版位置決め機構および前記基板を位置決めする基板位置決め機構の少なくとも一方を有し、前記原版位置決め機構および前記基板位置決め機構の前記少なくとも一方から前記投影光学系に伝わる熱量に基づいて前記投影光学系の光学特性の変化を予測し、その予測に基づいて前記光学特性の変化による前記基板に形成される像の状態の変化を低減する処理を実行するコントローラと、を備え、

前記コントローラは、前記熱量に対する 2 次遅れ応答関数に従って前記光学特性の変化を予測する、

ことを特徴とする露光装置。

【請求項 10】

前記 2 次遅れ応答関数は、前記熱量と前記投影光学系の光学特性の変化との関係の実測に基づいて決定されている、

ことを特徴とする請求項 9 に記載の露光装置。

【請求項 11】

前記原版位置決め機構は、前記原版を保持する原版ステージを含み、

前記コントローラは、前記原版位置決め機構が前記原版ステージを駆動するための情報に基づいて前記熱量を予測する、

ことを特徴とする請求項 9 に記載の露光装置。

【請求項 12】

前記原版位置決め機構の温度を制御するための冷媒コントローラを更に備え、

前記コントローラは、前記冷媒コントローラからの情報に基づいて前記熱量を予測する

ことを特徴とする請求項 9 に記載の露光装置。

【請求項 13】

デバイスを製造するデバイス製造方法であつて、

10

20

30

40

50

請求項 1 乃至 1 2 のいずれか 1 項に記載の露光装置によって基板を露光する工程と、前記工程で露光された基板を現像する工程と、を含む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、露光装置およびデバイス製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体デバイス等のデバイスにおける素子の集積度の向上に伴って、デバイスを製造するためには、より微細なパターンを正確な寸法で基板の正確な位置に転写することが要求されている。パターンを正確な寸法で基板に転写するために、投影光学系の結像面（フォーカス面）に基板面を一致させるフォーカス精度の向上が求められている。また、パターンの像を基板上の正確な位置に形成するために、投影光学系の投影倍率を目標倍率に維持することが重要な課題となっている。

【0003】

投影光学系の光学特性、例えば結像面位置（フォーカス位置）や投影倍率は、露光装置が使用される前に最適な状態に調整されうる。しかしながら、投影光学系の光学特性は、様々な要因によって変化する可能性がある。投影光学系の光学特性を変化させる要因の一つとして、投影光学系の外部からの熱に起因する投影光学系の温度変化がある。投影光学系の温度は、露光エネルギー以外の要因によっても変化しうる。温度変化の要因としては、例えば、露光装置の恒温チャンバの温度制御誤差、ステージを駆動するモータの発熱を挙げることができる。

【0004】

特許文献 1 には、投影光学系の鏡筒の外面の温度を制御することにより投影光学系の温度を安定させる方法が開示されている。特許文献 2 には、露光装置内の特定位置の温度計測値に対する幕多項式モデルによって光学特性の変化を予測し、補正を行う方法が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】特開 2005 - 203522 号公報

【特許文献 2】特開 2003 - 59807 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

上述の通り、投影光学系の外部の温度変化を抑制すること、もしくは温度変化の影響を予測し適切に補正することは、微細なパターンを基板に転写するために重要である。露光装置内で発生した熱は、露光装置を構成する各部材間の熱伝導、対流もしくは熱輻射現象によって投影光学系に伝達され、投影光学系の温度を変化させうる。そのため、温度の計測箇所における温度変化が直ちに投影光学系の光学特性の変化をもたらすとは限らず、光学特性の変化は、一般に、温度変化に対し一定の時間遅れを経たのちに現れる。従来技術における光学特性の補正方法では、この時間遅れのために、光学特性の十分な補正精度が得られない場合があった。

【0007】

本発明は、上記の課題認識を契機としてなされたものであり、投影光学系の温度変化による投影光学系の光学特性の変化を高い精度で予測しその影響を低減するために有利な技術を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

10

20

30

40

50

本発明の1つの側面は、投影光学系を有し、前記投影光学系を介して基板を露光する露光装置に係り、前記露光装置は、前記投影光学系の温度計測箇所の温度を計測する温度計測部と、前記温度計測部によって計測された温度の変化に基づいて前記投影光学系の光学特性の変化を予測し、その予測に基づいて前記光学特性の変化による前記基板に形成される像の状態の変化を低減する処理を実行するコントローラと、を備え、前記コントローラは、前記温度計測箇所の温度の変化に対する2次遅れ応答関数に従って前記光学特性の変化を予測する。

【発明の効果】

【0009】

本発明によれば、投影光学系の温度変化による投影光学系の光学特性の変化を高い精度で予測しその影響を低減するため有利な技術が提供される。 10

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】本発明の第1実施形態の露光装置を示す図。

【図2】投影光学系の温度変化と投影倍率の変化を例示する図。

【図3】投影光学系の投影倍率の計測値と予測値を例示する図。

【図4】投影光学系の光学特性の変化を予測し、その予測に基づいて光学特性の変化による基板に形成される像の状態の変化を低減する処理の流れを例示する図。

【図5】本発明の第2実施形態の露光装置を示す図。

【図6】本発明の第3実施形態の露光装置を示す図。 20

【発明を実施するための形態】

【0011】

以下、図面を参照しながら本発明のいくつかの実施形態を説明する。以下の説明において、光学特性という用語の概念には、例えば、フォーカス、倍率、歪曲、像面湾曲、非点収差、球面収差、コマ収差が含まれる。フォーカス、倍率、歪曲、像面湾曲、非点収差、球面収差、コマ収差は、いずれも収差の1つとして理解することができる。フォーカス、像面湾曲、非点収差、球面収差、コマ収差は、投影光学系の波面収差として取り扱うことも可能である。波面収差は、投影光学系の瞳面上の位相分布をツエルニケ多項式で展開したときの各係数の形で表現することができる。

【0012】

図1を参照しながら本発明の第1実施形態の露光装置100について説明する。露光装置100は、光源LS、照明光学系IL、原板位置決め機構RP、投影光学系PO、基板位置決め機構WP、ステージ定盤SP、コントローラCT、温度計(温度計測部)TPを備えうる。光源LSは、例えば、KrFまたはArF等のガスが封入された紫外光レーザ光源でありうる。 30

【0013】

光源LSから射出された光束は、照明光学系ILにおいて所望の照度分布、コピーレンズファクタを有する光束EBに変換され、原板Rに照射される。原板Rには、基板Wに転写すべき回路パターンが形成されている。原版位置決め機構RPは、原板Rを保持する原版チャックを有する原版ステージRSを不図示の駆動機構によって駆動し原版Rを位置決めする。露光装置100が走査露光装置として構成される場合は、原版位置決め機構RPは、基板Wの露光中に、原版Rを保持した原版ステージRSを所定速度で走査駆動する。 40

【0014】

投影光学系POは、原版Rに形成された回路パターンを縮小倍率(例えば= -1/4)で、フォトレジストが塗布された基板Wのショット領域に縮小投影し、該ショット領域に回路パターンの像を形成する。ここで、縮小倍率の符号が負であることは、基板Wに投影される回路パターンの像が倒立像であることを意味している。

【0015】

ステージ定盤SPの上には、基板位置決め機構WPが配置されている。基板位置決め機構WPは、基板Wを保持する基板チャックを有する基板ステージWSを不図示の駆動機構 50

によって駆動し基板 W を位置決めする。基板ステージ W S は、3 次元方向、即ち投影光学系 P O の光軸方向、およびそれに直交する 2 つの方向に駆動されうる。露光装置 1 0 0 が走査露光装置として構成される場合は、基板ステージ W S は、基板 W の露光中に、原板ステージ R S の走査速度の 1 倍の速度で、原版ステージ R S と同期して走査駆動される。原板ステージ R S および基板ステージ W S の位置は、不図示の位置検出装置（例えば、レーザ干渉計）により検出される。コントローラ C T は、光源 L S 、原版位置決め機構 R P 、基板位置決め機構 W P 、投影光学系 P O に組み込まれた補正部 P E を制御する。温度計測部 T P は、投影光学系 P O の温度計測箇所の温度を計測する温度計を含み、温度計測部 T P により、投影光学系 P O の温度計測箇所の温度が計測される。温度計測箇所は、例えば、投影光学系 P O の鏡筒の外部の一部分でありうる。

10

【 0 0 1 6 】

以下、温度計測部 T P で計測された温度に基づいて投影光学系 P O の倍率誤差の変化を予測する方法を説明する。以下で説明する倍率誤差とは、目標とする縮小倍率 に対する実際の投影倍率の誤差（差分）である。

【 0 0 1 7 】

図 2 (a) には、温度計測部 T P によって計測された投影光学系 P O の温度計測箇所の温度の変化が例示されている。図 2 (a) において、横軸は経過時間、縦軸は温度の変化である。図 2 (a) に示された時間区間 T T では、光源 L S から投影光学系 P O に光が射出されない状態で原版ステージ R S が駆動されている。時間区間 T T の開始前の区間では、露光装置 1 0 0 は、十分に長い時間にわたって停止状態であり、温度は定常値に安定している（即ち、温度は平衡状態になっている）。図 2 (a) に示された温度の変化は、露光装置 1 0 0 の構成要素、特に原版位置決め機構 R P から発せられる熱に起因したものである。

20

【 0 0 1 8 】

図 2 (b) には、図 2 (a) と同一の時間軸における投影光学系 P O の倍率誤差の推移が例示されている。図 2 (b) における各点は、投影光学系 P O の倍率誤差の計測値を示している。図 3 には、図 2 (a) に例示される温度の計測結果に基づいて以下に示す方法で予測した投影光学系 P O の倍率誤差の予測値が実線で例示されている。ここで、図 3 中の各点は、図 2 (b) に示す各点と同じである。

【 0 0 1 9 】

30

時刻 t における投影光学系 P O の倍率誤差を $\phi(t)$ 、時刻 t における温度計測部 T P による温度の計測値を $T(t)$ とする。まず、露光装置 1 0 0 を十分に長時間にわたって停止させた後に温度計 T P による計測値が一定値であることを確認する。そして、その時刻 t_0 における温度計 T P による計測値 $T(t_0)$ を T_0 とする。また、温度の変化 $\Delta T(t)$ を式 (1) のように定義する。以下では、一例として、温度計測部 T P による温度計測箇所が投影光学系 P O の鏡筒の外面の一部分であるものとして説明する。

【 0 0 2 0 】

【 数 1 】

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0$$

40

… 式 (1)

【 0 0 2 1 】

時刻 t_0 においては、投影光学系 P O の倍率は、露光装置 1 0 0 の他の構成要素（例えば、原版位置決め機構 R P ）の温度変化の影響を受けず、良好に調整された状態であると考えることができる。そこで、時刻 t_0 における投影光学系 P O の倍率誤差 $\phi(t_0)$ を式 (2) のように定義する。

【 0 0 2 2 】

【 数 2 】

$$\phi(t_0) = 0$$

50

・・・ (2)

【 0 0 2 3 】

次に、投影光学系 P O の鏡筒の温度が変化しているときの投影光学系 P O の倍率誤差 (t) の変化を示す予測モデル式について説明する。この予測モデル式は、以下で説明するように、2 次遅れ応答関数で与えられる。投影光学系 P O の倍率誤差の変化が発生する原因としては、例えば、投影光学系 P O を構成する光学素子の温度変化による屈折率変化や、光学素子の熱膨張や、光学素子を保持する鏡筒の熱膨張による光学素子間の間隔の変化などを挙げることができる。

【 0 0 2 4 】

原板位置決め機構 R P が発生する熱は、まず、投影光学系 P O の鏡筒の外面（この例では、外面の一部部分が温度計測部 T P による温度計測対象である。）に伝わる。その後、その熱は、熱伝導、対流もしくは熱輻射によって投影光学系 P O の光学素子およびそれを支持している部分に伝わり、これによって倍率誤差 (t) の変化が生じる。例えば、原板位置決め機構 R P が発生する熱によって投影光学系 P O の鏡筒の外部が加熱されて投影光学系 P O に温度勾配が生じる。熱は、その温度勾配により投影光学系 P O の内部の光学素子に伝わる。このような熱伝達の現象は、2 次遅れ伝達モデル式によって解析することができる。例えば、式 (3 a) で示される入力を考える。

【 0 0 2 5 】

【 数 3 a 】

$$X(s) = \frac{1}{s}$$

・・・ 式 (3 a)

【 0 0 2 6 】

2 次遅れ伝達モデルの伝達関数 G (s) 、応答 Y (s) は、式 (3 b) 、 (3 c) のように記述されうる。

【 0 0 2 7 】

【 数 3 b 】

$$G(s) = \frac{K}{(1 + \tau_1 s) \cdot (1 + \tau_2 s)}$$

・・・ 式 (3 b)

【 0 0 2 8 】

【 数 3 c 】

$$Y(s) = \frac{K}{(1 + \tau_1 s) \cdot (1 + \tau_2 s)} \cdot \frac{1}{s}$$

・・・ 式 (3 c)

【 0 0 2 9 】

上記の2次遅れ伝達モデル式を用いることにより、
 ・時刻 (t - t) (t は正値) における倍率誤差の計測値 (t - t) 、および、
 ・時刻 t における温度の変化 T (t) の情報、
 を与えれば、時刻 t における倍率誤差の計測値 (t) を式 (4) 、 (5) 、 (6) で与えられる2次遅れ応答関数に基づいて求めることができる。ここで、式 (5) 、 (6) は、漸化式の形式で与えられる。

【 0 0 3 0 】

【 数 4 】

$$\phi(t) = \sum_{i=1}^N (\phi_{i,1}(t) + \phi_{i,2}(t))$$

10

20

30

40

50

・・・式(4)

【0031】

【数5】

$$\phi_{i,1}(t) = \phi_{i,1}(t - \Delta t) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{i,1} + \tau_{i,2}}\right) + \alpha_i \cdot \Delta T(t) \cdot \frac{\tau_{i,1} + \tau_{i,2}}{\tau_{i,1}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{i,1} + \tau_{i,2}}\right) \right\}$$

・・・式(5)

【0032】

【数6】

10

$$\phi_{i,2}(t) = \phi_{i,2}(t - \Delta t) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{i,2}}\right) - \alpha_i \cdot \Delta T(t) \cdot \frac{\tau_{i,2}}{\tau_{i,1}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{i,2}}\right) \right\}$$

・・・式(6)

【0033】

式(2)の(t_0)を定める時刻 t_0 において、漸化式の初期値を式(7)より求め
ておけば、時刻 t_0 以後の任意の時刻 t における倍率誤差の予測値(t)が得られる。

【0034】

【数7】

20

$$\phi_{i,1}(t_0) = 0$$

$$\phi_{i,2}(t_0) = 0$$

・・・式(7)

【0035】

式(5)、(6)において、以下のパラメータが倍率誤差(t)の変化を予測するための予測パラメータになっている。

【0036】

N: 予測モデルの自由度

30

i : 温度に対する倍率誤差の変化の飽和値の敏感度パラメータ

i_1 、 i_2 : 第一の時定数パラメータ

i_1 、 i_2 : 第二の時定数パラメータ

上記の予測パラメータは、露光装置100の投影光学系POや発熱源の内部構造、配置、温度制御機構等の設計条件に依存する。この実施形態では、以下で説明するように、投影光学系POの温度と倍率誤差との関係を実測により求めることによって予測パラメータが決定される。

【0037】

まず、図2(a)に例示される投影光学系POの温度計測箇所の温度の変化のデータ(以下、温度変化データ)、および、図2(b)に例示される投影光学系POの倍率誤差の変化のデータ(倍率誤差変化データ)を取得する。温度変化データおよび倍率誤差変化データの取得方法の具体例を説明する。まず、図2(a)に例示される温度変化データの取得方法を例示的に説明する。まず、温度が定常値に安定するように露光装置100を十分に長い時間にわたって停止させる。その後、時刻 t_0 から時間区間TTにわたって、例えば、光源LSから光が射出されない状態で原版位置決め機構RPを動作させて原版ステージRSを駆動する。この際に、時刻 t_0 以降における温度計TPによる計測値(温度)を不図示のメモリ(例えば、コントローラCT内のメモリ)に記録する。これによって温度変化データを取得することができる。

【0038】

次に、図2(b)に例示される倍率誤差変化データの取得方法を例示的に説明する。ま

40

50

ず、温度が定常値に安定するように露光装置 100 を十分に長い時間にわたって停止させる。その後、時刻 t_0 から時刻 t ($(t - t_0) < TT$) にわたって、例えば、光源 LS から光が射出されない状態で原版位置決め機構 RP を動作させて原版ステージ RS を駆動する。そして、時刻 t における投影光学系 PO の倍率誤差を測定する。倍率誤差の測定は、例えば、露光によってテストパターンを基板に転写し、転写されたテストパターンを現像し（又は現像することなく潜像の状態で）計測することによってなされうる。以上の処理を、時刻 t を振りながら複数回にわたって実施することによって、時刻 t_0 から時刻 t ($(t - t_0) < TT$) までの倍率誤差変化データが得られる。次に、温度が定常値に安定するように露光装置 100 を十分に長い時間にわたって停止させた後に、時刻 t_0 から時間区間 TT にわたって、例えば、光源 LS から光が射出されない状態で原版位置決め機構 RP を動作させて原版ステージ RS を駆動する。そして、その後の時刻 t ($(t - t_0) > TT$) における投影光学系 PO の倍率誤差を測定する。以上の処理を、時刻 t を振りながら複数回にわたって実施することによって、時刻 t_0 から時刻 t ($(t - t_0) > TT$) までの倍率誤差変化データが得られる。

【0039】

以上のようにして温度変化データおよび倍率誤差変化データが得られる。温度変化データおよび倍率誤差変化データが得られた後、式(4)乃至(6)で表わされる予測モデル式に基づいて算出される倍率誤差が倍率誤差変化データを近似するように、最小二乗法等の計算プロセスにより予測パラメータ $i_i, i_i, 1_i, 1_i, 2_i, 2$ を決定する。

【0040】

図3の実線は、以上のようにして温度変化データおよび倍率誤差変化データが得られた後、式(4)乃至(6)で表わされる予測モデル式に基づいて算出される倍率誤差が倍率誤差変化データを近似するように、最小二乗法等の計算プロセスにより予測パラメータ $i_i, i_i, 1_i, 1_i, 2_i, 2$ を決定する。

【0041】

$N = 2$

```

 $i_1 = -62.8 [ppm/]$ 
 $i_2 = 54.9 [ppm/]$ 
 $i_{1,1} = 6500 [sec]$ 
 $i_{2,1} = 1 [sec]$ 
 $i_{1,2} = 1 [sec]$ 
 $i_{2,2} = 2200 [sec]$ 

```

【0042】

図3において実測結果を示す点と予測モデルによって計算した実線とが良く一致している。これより、上記の予測モデル式（2次遅れ応答関数）により投影光学系 PO の温度の計測結果から投影光学系 PO の倍率誤差の変化を高い精度で予測できることが分かる。

【0043】

十分な予測精度を得るために必要な予測モデルの自由度 N の値は、投影光学系の設計、例えば投影光学系を構成する光学素子の数などに依存しうる。ここで挙げた例を含め、一般的な露光装置の投影光学系においては、 $N = 2$ とすれば十分な予測精度が得られる場合が多い。

【0044】

以下、図4を参照しながら、上記の予測モデル（2次遅れ応答関数）を使って投影光学系 PO の倍率誤差の変化を予測し、その予測に基づいて光学特性の変化による基板に形成される像の状態の変化を低減する処理を例示的に説明する。この処理は、コントローラ CT によって実行される。像の状態とは、以下で説明する例では、投影光学系 PO の投影倍率に依存して変化する像の倍率（より正確には、原版のパターンに対する像の倍率）であるが、より一般的には、投影光学系の収差に起因する像の状態でありうる。

【0045】

まず、コントローラ CT は、露光装置 100 を十分に長い時間にわたって停止させて、

10

20

30

40

50

投影光学系 P O の温度が定常値に安定するのを待つ。具体的には、コントローラ C T は、ステップ S 4 1 において温度計 T P によって投影光学系 P O の鏡筒の温度を計測し、ステップ S 4 2 において、その温度が定常値に安定しているかどうかを判断する。そして、温度が定常値に安定するまで、ステップ S 4 1 、 S 4 2 を繰り返す。

【 0 0 4 6 】

投影光学系 P O の鏡筒の温度が定常値に安定したら、ステップ S 4 3 において、コントローラ C T は、時刻 t を t_0 として、時刻 t_0 における倍率誤差 (t) を式 (8) のように "0" に設定する。

【 0 0 4 7 】

【 数 8 】

$$\phi(t_0) = 0$$

・・・式 (8)

【 0 0 4 8 】

その後、ステップ S 4 4 において、コントローラ C T は、補正を実行すべき時刻になるのを待ち、当該時刻になったらステップ S 4 5 に処理を進める。ここでは、時間間隔 t でステップ S 4 5 ~ S 4 7 の処理が実行される。n 回目に実行されるステップ S 4 4 では、補正を実行すべき時刻は、 $(t_0 + t \times n)$ である。

【 0 0 4 9 】

ステップ S 4 5 において、コントローラ C T は、温度計測部 T P を用いて、投影光学系 P O の鏡筒の温度変化を、時刻 t_0 における温度からの変化 $T(t)$ として計測する。そして、ステップ S 4 6 において、コントローラ C T は、投影光学系 P O の倍率誤差 (t) を計算する。

【 0 0 5 0 】

具体的には、コントローラ C T は、

- ・ 温度計測部 T P を使って計測された温度変化 $T(t)$ と、
- ・ 既知のパラメータ $i_1, i_2, 1, i_1, i_2$ と、時刻 $(t - t)$ における倍率誤差の予測値 $(t - t)$ と、

に基づいて、式 (4)、(5)、(6) に従って時刻 t における倍率誤差の予測値 (t) を計算する。ここで、予測値 $(t - t)$ は、式 (9) で与えられ、最初 ($n = 1$ のとき) に実行されるステップ S 4 6 で使用される $(t - t)$ は、ステップ S 4 3 で設定された (t) の値、即ち "0" である。また、n 回目に実行されるステップ S 4 6 で使用される $(t - t)$ は、 $(n - 1)$ 回目に実行されたステップ S 4 6 で計算された (t) である。

【 0 0 5 1 】

【 数 9 】

$$\phi(t - \Delta t) = \sum_{i=1}^2 (\phi_{i,1}(t - \Delta t) + \phi_{i,2}(t - \Delta t))$$

・・・式 (9)

【 0 0 5 2 】

時間間隔 t は、例えば、10 [sec] 程度に設定されうる。時間間隔 t は、予測モデル (2 次遅れ応答関数) の時定数に対して一定の比率以下の短時間とするべきである。その理由は、時間間隔 t が長いと、倍率誤差の変化に対して倍率誤差の補正が十分に追隨できないからである。時間間隔 t の最小値 t_{min} は、例えば、時定数パラメータ $i_1, i_2, 1, i_1, i_2$ の最大値 max の 0.3 倍以下であることが望ましい。即ち、 $t_{min} / max = 0.3$ が満たされることが望ましい。

【 0 0 5 3 】

ステップ S 4 7 において、コントローラ C T は、ステップ S 4 6 で計算された倍率誤差の予測値 (t) に基づいて、投影光学系 P O の倍率誤差の変化による基板 W に形成され

10

20

30

40

50

る像の状態の変化を低減する処理を実行する。具体的には、コントローラCTは、ステップS46で計算された倍率誤差(t)が低減されるように、投影光学系POに組み込まれた補正部PEを動作させる。ここで、補正部PEは、投影光学系POの倍率補正用の光学素子を駆動することによって、倍率誤差(t)が低減されるように投影光学系POの倍率を補正することができる。補正部PEは、例えば、空気圧アクチュエータ、圧電素子、又は超音波モータなど、のアクチュエータを利用して、倍率補正用の光学素子を投影光学系POの光軸に沿って移動させうる。ここで、投影光学系POの光学素子を駆動する代わりに、又は、それに加えて、光源LSが発生する光の波長を変更することによって倍率誤差(t)が低減されるように投影光学系POの倍率を補正してもよい。ここで、投影光学系POの倍率の補正によってフォーカス位置が変化する場合には、この補正に合わせて原版ステージRSおよび基板ステージWSの少なくとも一方をベストフォーカス状態が得られるように移動させればよい。

【0054】

以上の説明では、投影光学系POの温度変化に応じて変化する光学特性が投影倍率(倍率誤差)であったが、本発明は、これに限定されるものではない。投影光学系POの温度変化により変化する光学特性であって2次遅れ伝達モデルあるいは2次遅れ応答関数によって補正される光学特性は、例えば、フォーカス、像面湾曲、非点収差、球面収差およびコマ収差の少なくとも1つであってもよい。ここで、補正の対象としての光学特性がフォーカスである場合には、その補正を原版ステージRSもしくは基板ステージWSの少なくとも一方の投影光学系の光軸方向における位置を調整することによってなされてもよい。

【0055】

上記の説明は、投影光学系POの温度変化が原板位置決め機構RPが発生する熱に起因するものとしてなされているが、本発明はそれに限定されることはない。投影光学系POの温度変化の要因は、例えば、基板ステージWSおよびそれを駆動する基板ステージ機構、又は、光源LSから発生する熱、露光装置内の温度を制御する空調装置の制御誤差、又は、それらの複合要因であっても良い。

【0056】

次に、図5を参照しながら本発明の第2実施形態の露光装置について説明する。ここで言及しない事項は、第1実施形態に従う。第2実施形態の露光装置200は、複数の温度計によって投影光学系POの温度を計測する構成の一例を提供するものである。図5に例示されるように、第2実施形態の露光装置200では、温度計測部TPが第1温度計TP1および第2温度計TP2を有する。第2実施形態では、倍率誤差の変化の予測パラメータの決定および倍率誤差の変化の予測の際に使用される温度変化 $T(t)$ を与える式として、式(1)の代わりに、式(10)が使用される。

【0057】

【数10】

$$\Delta T(t) = T1(t) - T2(t) - T0$$

…式(10)

【0058】

ここで、 $T1(t)$ 、 $T2(t)$ は、それぞれ、時刻 t において第1温度計TP1、第2温度計TP2によって計測される温度である。第2実施形態によれば、複数の温度計によって計測されたデータを取得することにより、投影光学系POの温度分布を示す情報を得ることができる。第1の実施形態の説明で述べたように、投影光学系POの温度変化は、その内部の熱伝導現象を介して生じることから、第2実施形態では、熱伝導現象をより詳細に捕捉し、倍率誤差の変化の予測精度を向上させている。

【0059】

次に、図6を参照しながら本発明の第3実施形態の露光装置について説明する。ここで言及しない事項は、第1および/または第2実施形態に従う。露光装置100が走査露光装置として構成される場合、露光動作に伴って原版ステージRSが高速で走査駆動さ

10

20

30

40

50

れるので、原板位置決め機構 R P から大きな熱が発生する。そのため、原板位置決め機構 R P には、その温度をほぼ一定値に制御するための冷媒配管 L U R が備えられ、その中を温度制御された冷媒が通過する構成となっている。この冷媒は、冷媒コントローラ L C T で温度制御され、冷媒配管 L U R に送り出される。露光装置 200 は、冷媒配管 L U R を流れる冷媒の温度を計測する温度計 T R I 、 T R O を備えている。温度計 T R I は、原板位置決め機構 R P に流入する冷媒の温度を計測するように配置されている。温度計 T R O は、原板位置決め機構 R P から流出した冷媒の温度を計測するように配置されている。○倍コントローラ L C T は、温度計 T R O と温度計 T R I とによって計測された温度に基づいて、原板位置決め機構 R P の温度が目標値になるように、冷媒の温度を制御する。

【0060】

10

原板位置決め機構 R P から投影光学系 P O に伝わる熱は、上記の温度制御によりある程度は抑制されるが、例えば原板ステージ R S の駆動速度が非常に高速である場合には、熱を完全に抑制できない場合がある。コントローラ C T は、原板ステージ R S を駆動するための電力情報、原板ステージ R S の駆動モータのエネルギー利用効率設計値の情報等を参照して、原板位置決め機構 R P から投影光学系 P O に伝わる漏れ熱量 J (t) (t は時刻) を予測することができる。また、コントローラ C T は、更に冷媒コントローラ L C T が得た温度計 T R O と温度計 T R I による計測値の情報を参照して、漏れ熱量 J (t) をより正確に予測することも可能である。

【0061】

20

漏れ熱量 J (t) は、投影光学系 P O に伝わって倍率誤差 (t) の変化をもたらす。その関係は、以下のように表現できる。

【0062】

【数11】

$$\phi(t) = \sum_{i=1}^N (\phi_{i,1}(t) + \phi_{i,2}(t))$$

…式(11)

【0063】

【数12】

$$\phi_{i,1}(t) = \phi_{i,1}(t - \Delta t) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{i,1} + \tau_{i,2}}\right) + \gamma_i \cdot J(t) \cdot \frac{\tau_{i,1} + \tau_{i,2}}{\tau_{i,1}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{i,1} + \tau_{i,2}}\right) \right\}$$

…式(12)

【0064】

【数13】

$$\phi_{i,2}(t) = \phi_{i,2}(t - \Delta t) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{i,2}}\right) - \gamma_i \cdot J(t) \cdot \frac{\tau_{i,2}}{\tau_{i,1}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{i,2}}\right) \right\}$$

…式(13)

【0065】

式(11)乃至(13)において、以下のパラメータが倍率誤差の変化を予測するための予測パラメータになっている。

【0066】

γ_i : 漏れ熱量に対する倍率誤差の変化の飽和値の敏感度パラメータ

$\tau_{i,1}$: 第一の時定数パラメータ

$\tau_{i,2}$: 第二の時定数パラメータ

【0067】

第1の実施形態で説明した方法と同様の予測パラメータ決定工程を経て、上記予測パラ

50

メータ_i、_i、₁、_i、₂を決定することができる。その予測パラメータを用い、上記モデル式を用いて倍率誤差の変化を予測し、補正を行うことができる。倍率誤差の変化の予測及び補正方法の詳細も、第1の実施形態で説明した方法と同様とすれば良い。

【0068】

上記の説明は、原版位置決め機構RPから投影光学系POに伝わる熱量に基づいて投影光学系POの光学特性の変化を予測し、その予測に基づいて該光学特性の変化による基板Wに形成される像の状態の変化を低減する処理である。これと同様に、基板位置決め機構WPから投影光学系POに伝わる熱量に基づいて投影光学系POの光学特性の変化を予測し、その予測に基づいて該光学特性の変化による基板Wに形成される像の状態の変化を低減することもできる。また、これらの両者を併用してもよい。即ち、原版位置決め機構および基板位置決め機構の少なくとも一方から投影光学系に伝わる熱量に基づいて投影光学系の光学特性の変化を予測し、その予測に基づいて該光学特性の変化による基板に形成される像の状態の変化を低減する処理を実行しうる。

10

【0069】

本実施形態において、変化の予測、補正を行う投影光学系POの光学特性も、倍率誤差に限られることはなく、フォーカス誤差、像面湾曲、非点収差、球面収差、コマ収差のいずれであっても構わない。

【0070】

つぎに、本発明の一実施形態のデバイス（半導体デバイス、液晶表示デバイス等）の製造方法について説明する。半導体デバイスは、基板に集積回路を作る前工程と、前工程で作られた基板上の集積回路チップを製品として完成させる後工程を経ることにより製造される。前工程は、本発明の第1実施形態乃至第3実施形態にて説明済みの露光装置を使用して感光剤が塗布された基板を露光する工程と、基板を現像する工程を含む。後工程は、アッセンブリ工程（ダイシング、ボンディング）と、パッケージング工程（封入）を含む。液晶表示デバイスは、透明電極を形成する工程を経ることにより製造される。透明電極を形成する工程は、透明導電膜が蒸着されたガラス基板に感光剤を塗布する工程と、前述の露光装置を使用して感光剤が塗布されたガラス基板を露光する工程と、ガラス基板を現像する工程を含む。本実施形態の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。

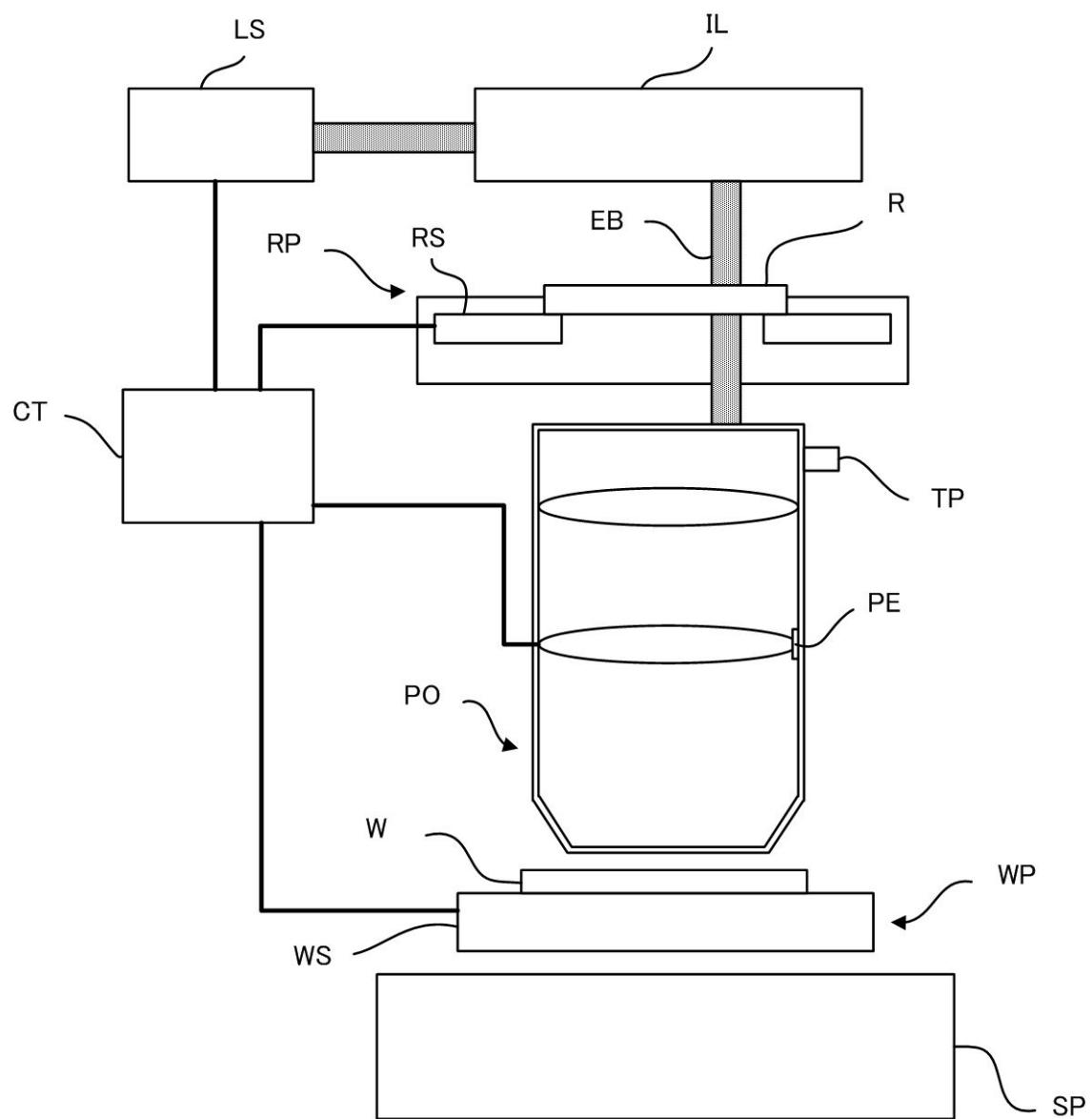
20

【0071】

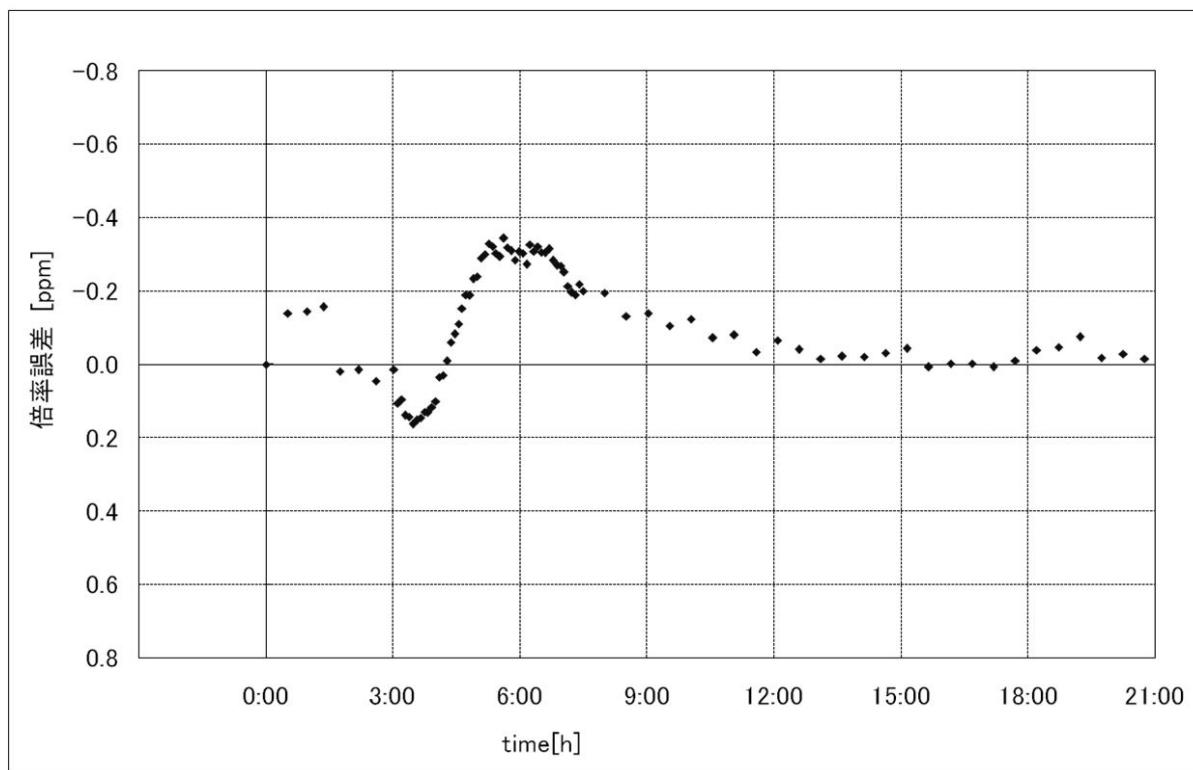
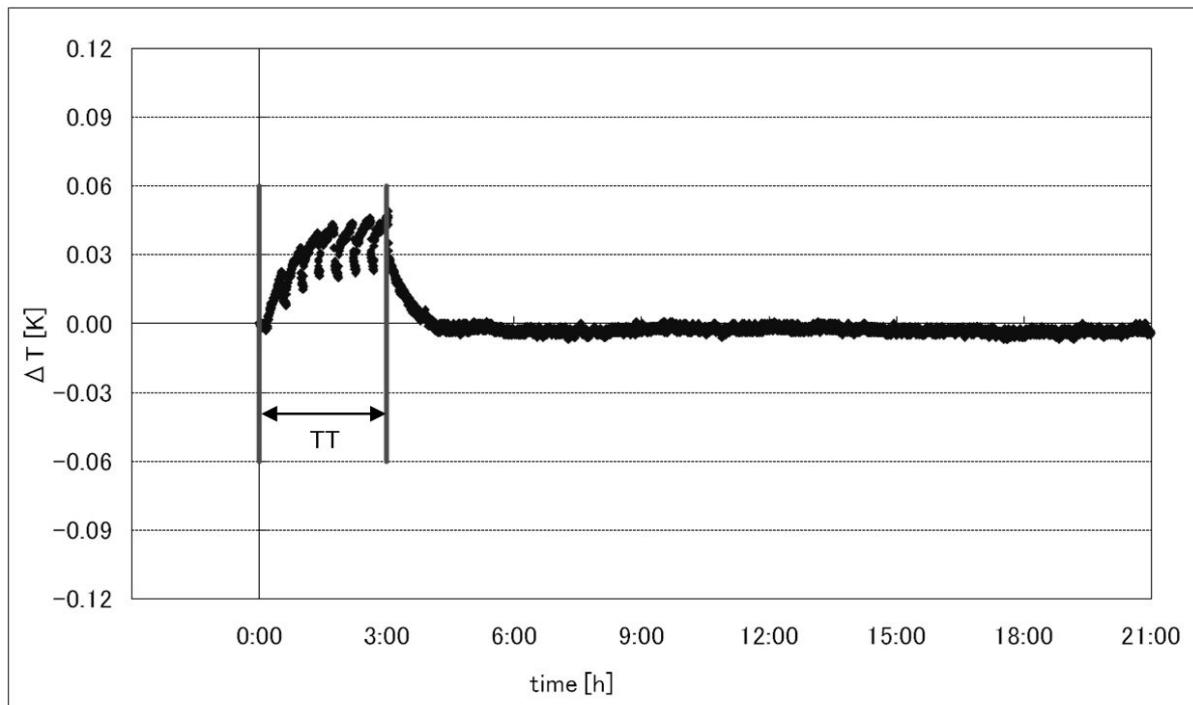
以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されず、その要旨の範囲内で種々の変形および変更が可能である。

30

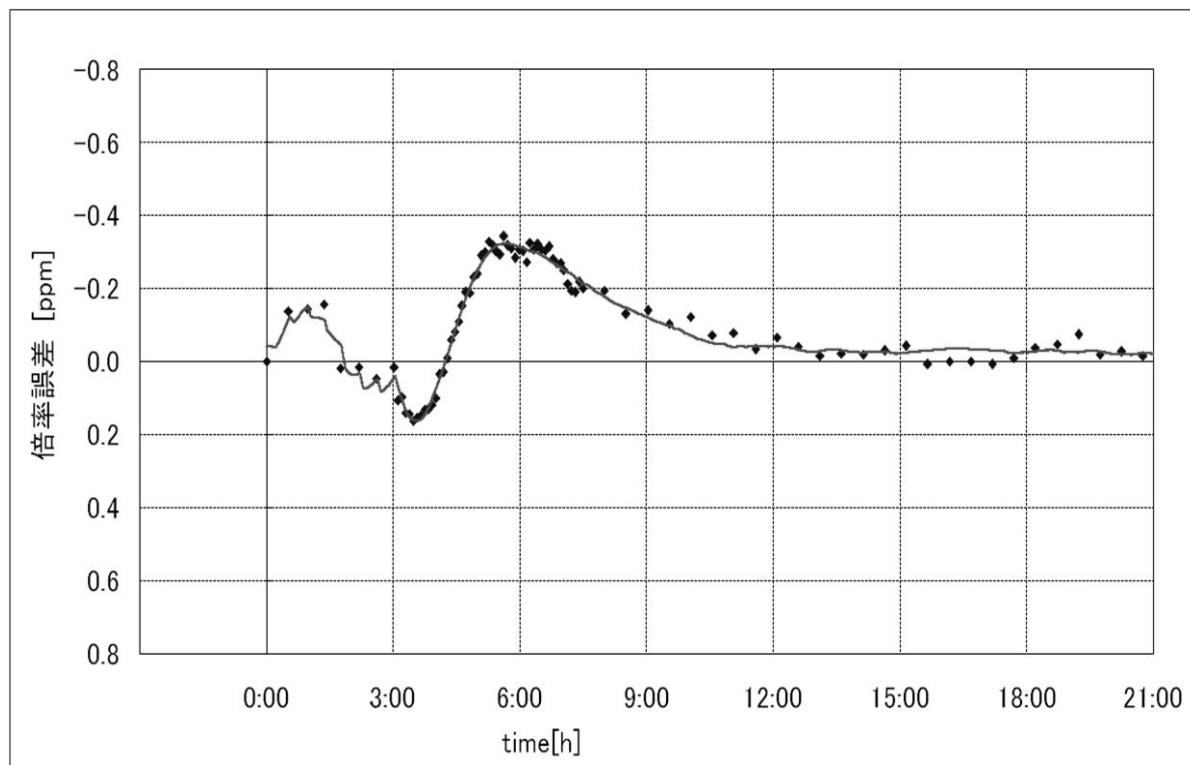
【 图 1 】



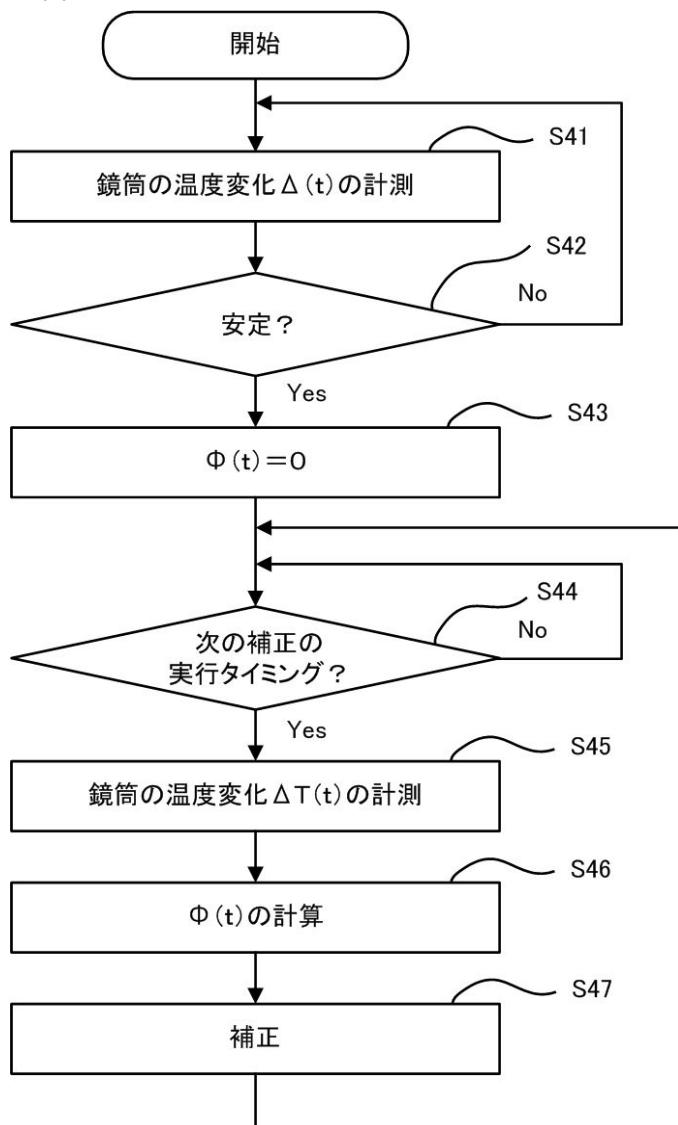
【図2】



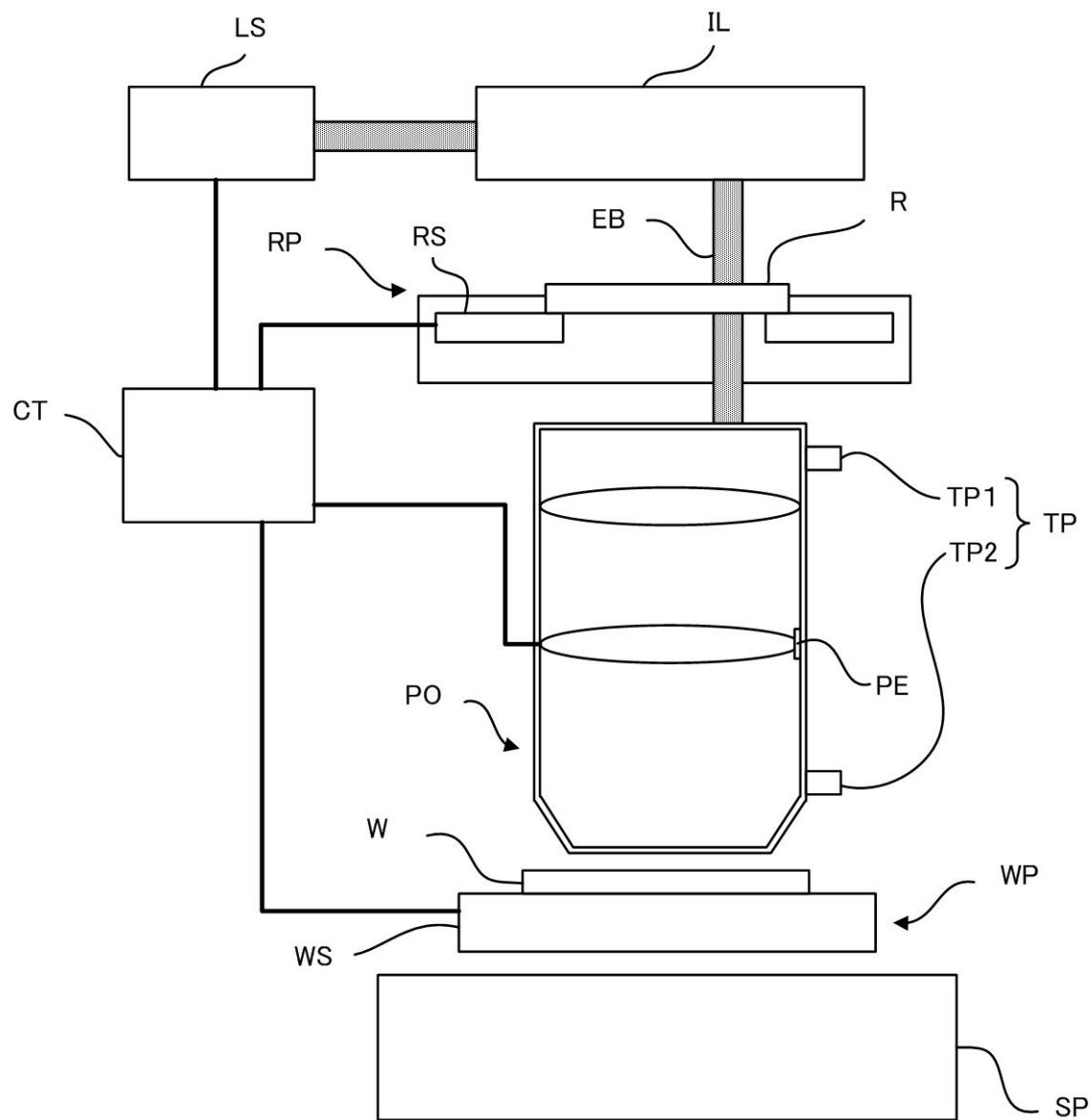
【図3】



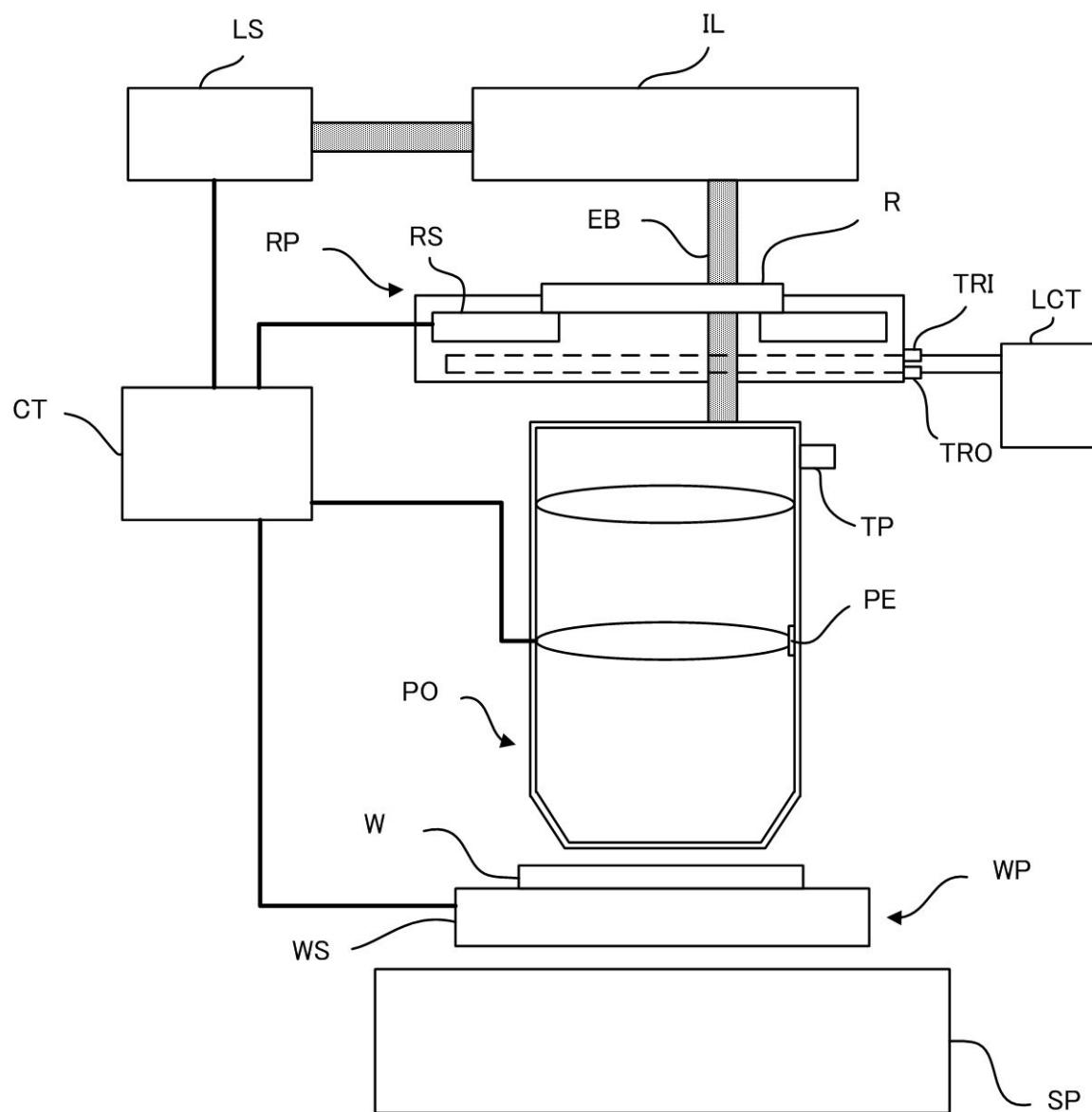
【図4】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

(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

(72)発明者 田所 和弘

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 関口 英樹

(56)参考文献 特開平06-019504(JP,A)

特開2005-101593(JP,A)

特開昭52-061686(JP,A)

特開2003-059807(JP,A)

特開2010-199615(JP,A)

特開2010-171175(JP,A)

特開2005-303042(JP,A)

特開2006-041094(JP,A)

特開2010-161344(JP,A)

特開2005-203522(JP,A)

特開2006-157020(JP,A)

特開2005-051145(JP,A)

特開平11-274070(JP,A)

特開2010-251801(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/027

G03F 7/20 - 7/24

G02B 7/02 - 7/16, 9/00 - 17/08,
21/02 - 21/04, 25/00 - 25/04