

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4352458号  
(P4352458)

(45) 発行日 平成21年10月28日(2009.10.28)

(24) 登録日 平成21年8月7日(2009.8.7)

(51) Int.Cl.		F I		
HO 1 L 21/027 (2006.01)		HO 1 L 21/30	5 1 6 A	
GO 1 M 11/02 (2006.01)		GO 1 M 11/02	B	
GO 3 F 7/20 (2006.01)		GO 3 F 7/20	5 2 1	

請求項の数 61 (全 74 頁)

(21) 出願番号	特願2003-573687 (P2003-573687)	(73) 特許権者	000004112 株式会社ニコン 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号
(86) (22) 出願日	平成15年2月28日(2003.2.28)	(74) 代理人	100102901 弁理士 立石 篤司
(86) 国際出願番号	PCT/JP2003/002375	(72) 発明者	蛭川 茂 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株 式会社ニコン内
(87) 国際公開番号	W02003/075328	(72) 発明者	中島 利治 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株 式会社ニコン内
(87) 国際公開日	平成15年9月12日(2003.9.12)	(72) 発明者	東 健司 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株 式会社ニコン内
審査請求日	平成17年12月27日(2005.12.27)		
(31) 優先権主張番号	特願2002-56116 (P2002-56116)		
(32) 優先日	平成14年3月1日(2002.3.1)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		
(31) 優先権主張番号	特願2003-43682 (P2003-43682)		
(32) 優先日	平成15年2月21日(2003.2.21)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 投影光学系の調整方法、予測方法、評価方法、調整方法、露光方法及び露光装置、露光装置の製造方法、プログラム並びにデバイス製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1面上のパターンの像を第2面上に投影する投影光学系の調整方法であって、  
前記投影光学系の第1の光学特性を含む光学特性の情報を得る第1工程と；  
前記第1面上に配置された所定方向に延びる第1のラインパターンとこれに直交する第2のラインパターンとの像を前記投影光学系を用いて前記第2面上に形成するとともに、前記第1のラインパターンの像の線幅である第1線幅と前記第2のラインパターンの像の線幅である第2線幅との差である線幅差を計測する第2工程と；  
前記第1工程で得られた前記第1の光学特性の値と前記線幅差とに応じて、前記第1の光学特性との相互作用により前記線幅差に影響を与える第2の光学特性の大きさを制御するように前記投影光学系を調整する第3工程と；を含む投影光学系の調整方法。

【請求項2】

請求項1に記載の投影光学系の調整方法において、  
前記第1工程で得られる情報は、前記投影光学系の波面収差の情報であり、  
前記第3工程では、前記第1工程で得た波面収差をツェルニケ多項式を用いて級数展開した複数のツェルニケ項のうち4次以上の任意の2回回転対称成分項の大きさが零でないとき、前記2回回転対称成分項の大きさと前記線幅差とに応じて、前記2回回転対称成分項と同一次数の回転対称成分項の大きさを制御するように前記投影光学系を調整することを特徴とする投影光学系の調整方法。

【請求項3】

請求項 2 に記載の投影光学系の調整方法において、

前記 2 回回転対称成分項は、4 次  $\cos^2$  成分項である第 1 2 項であり、前記回転対称成分項は 4 次 0 成分項である第 9 項であることを特徴とする投影光学系の調整方法。

【請求項 4】

請求項 2 に記載の投影光学系の調整方法において、

前記 2 回回転対称成分項は、4 次  $\sin^2$  成分項である第 1 3 項であり、前記回転対称成分項は 4 次 0 成分項である第 9 項であることを特徴とする投影光学系の調整方法。

【請求項 5】

請求項 2 ~ 4 のいずれか一項に記載の投影光学系の調整方法において、

前記第 1 工程では、前記投影光学系の波面を直接計測することより前記波面収差の情報を得ることを特徴とする投影光学系の調整方法。

10

【請求項 6】

請求項 2 ~ 4 のいずれか一項に記載の投影光学系の調整方法において、

前記第 1 工程では、前記第 1 面上に配置されたサイズが異なる複数組の前記第 1 のラインパターンと前記第 2 のラインパターンとの像形成時におけるベストフォーカス位置の差を各組毎に計測し、この計測結果に基づいて、前記波面収差の情報として前記 2 回回転対称成分項の情報を推定することを特徴とする投影光学系の調整方法。

【請求項 7】

請求項 2 ~ 6 のいずれか一項に記載の投影光学系の調整方法において、

前記第 3 工程では、前記 2 回回転対称成分項の大きさが零でなく、かつ前記第 2 工程で計測された前記線幅差が零でないとき、前記 2 回回転対称成分項の大きさと前記線幅差とに基づいて、前記線幅差が設計値に近づくように、前記 2 回回転対称成分項と同一次数の回転対称成分項の大きさを最適化するように前記投影光学系を調整することを特徴とする投影光学系の調整方法。

20

【請求項 8】

請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載の投影光学系の調整方法において、

前記第 2 工程は、前記第 2 面上に配置された物体上に前記第 1、第 2 のラインパターンの像を形成する像形成工程と；

前記物体上に形成された前記第 1 のラインパターンの像の線幅である第 1 線幅と前記第 2 のラインパターンの像の線幅である第 2 線幅とを計測する線幅計測工程と；を含むことを特徴とする投影光学系の調整方法。

30

【請求項 9】

請求項 1 ~ 8 のいずれか一項に記載の投影光学系の調整方法において、

前記第 3 工程では、前記投影光学系を構成する少なくとも 1 つの光学素子の少なくとも 1 自由度方向の位置制御及び一部の光路中の気体の気圧の制御の少なくとも一方により、前記第 2 の光学特性の大きさを制御することを特徴とする投影光学系の調整方法。

【請求項 10】

請求項 1 ~ 9 のいずれか一項に記載の投影光学系の調整方法において、

前記第 1 のラインパターンは縦線パターンであり、前記第 2 のラインパターンは横線パターンであり、

40

前記第 1 の光学特性と第 2 の光学特性とは、前記縦線パターンの像と前記横線パターンの像それぞれの線幅変化に対するツェルニケ項の組み合わせのクロスタームにおけるツェルニケ感度を求める工程と、そのクロスタームにおけるツェルニケ感度の符号が縦横線で異なるツェルニケ項同士の組み合わせを求める工程と、を経て決定されていることを特徴とする投影光学系の調整方法。

【請求項 11】

請求項 1 に記載の投影光学系の調整方法において、

前記第 1 工程で得られる情報は、前記投影光学系の波面収差の情報であり、

前記第 1 及び第 2 の光学特性は、前記第 1 工程で得た波面収差を、ツェルニケ多項式を用いて級数展開した複数のツェルニケ項のうち同一次数で、かつ種類が異なる成分の項で

50

あることを特徴とする投影光学系の調整方法。

【請求項 1 2】

第 1 面上の回路パターンを投影光学系を介して第 2 面上に配置された物体に転写する露光方法であって、

請求項 1 ~ 1 1 のいずれか一項に記載の投影光学系の調整方法を用いて前記投影光学系を調整する工程と；

前記調整後の投影光学系を用いて前記回路パターンを前記物体上に転写する工程と；を含む露光方法。

【請求項 1 3】

マスクに形成されたパターンを露光光学系を介して物体上に転写する露光装置であって

10

、  
請求項 1 ~ 1 1 のいずれか一項に記載の投影光学系の調整方法を用いて調整された投影光学系を前記露光光学系として備えることを特徴とする露光装置。

【請求項 1 4】

第 1 面上のパターンの像を第 2 面上に投影する投影光学系の調整方法であって、

前記投影光学系の第 1 の光学特性を含む光学特性の情報を得る第 1 工程と；

前記第 1 工程で得られた前記第 1 の光学特性の値と、前記第 1 面上に配置された所定方向に延びる第 1 のラインパターンの線幅と前記第 1 のラインパターンに直交する第 2 のラインパターンの線幅との差とに応じて、前記第 1 の光学特性との相互作用によって前記投影光学系によって前記第 2 面上に形成される前記第 1 のラインパターンの像の線幅と前記第 2 のラインパターンの像の線幅との差である線幅差に影響を与える第 2 の光学特性の大きさを制御するように前記投影光学系を調整する第 2 工程と；を含む投影光学系の調整方法。

20

【請求項 1 5】

請求項 1 4 に記載の投影光学系の調整方法において、

前記第 1 のラインパターンは縦線パターンであり、前記第 2 のラインパターンは横線パターンであり、

前記第 1 の光学特性と第 2 の光学特性とは、前記縦線パターンの像と前記横線パターンの像それぞれの線幅変化に対するツェルニケ項の組み合わせのクロスタームにおけるツェルニケ感度を求める工程と、そのクロスタームにおけるツェルニケ感度の符号が縦横線で異なるツェルニケ項同士の組み合わせを求める工程と、を経て決定されていることを特徴とする投影光学系の調整方法。

30

【請求項 1 6】

第 1 面上の回路パターンを投影光学系を介して第 2 面上に配置された物体に転写する露光方法であって、

請求項 1 4 又は 1 5 に記載の投影光学系の調整方法を用いて前記投影光学系を調整する工程と；

前記調整後の投影光学系を用いて前記回路パターンを前記物体上に転写する工程と；を含む露光方法。

【請求項 1 7】

マスクに形成されたパターンを露光光学系を介して物体上に転写する露光装置であって

40

、  
請求項 1 4 又は 1 5 に記載の投影光学系の調整方法を用いて調整された投影光学系を前記露光光学系として備えることを特徴とする露光装置。

【請求項 1 8】

マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して物体上に転写する露光装置を製造する露光装置の製造方法であって、

請求項 1 ~ 1 1、1 4、1 5 のいずれか一項に記載の投影光学系の調整方法を用いて前記投影光学系を調整する工程を含む露光装置の製造方法。

【請求項 1 9】

50

第 1 面上に配置されたパターンをエネルギービームで照明し、前記パターンを投影光学系を介して第 2 面上に配置された物体上に転写する露光装置であって、

前記投影光学系の第 1 の光学特性を含む光学特性を計測する光学特性計測装置と；

前記投影光学系により前記第 2 面上に形成された前記第 1 面上で所定方向に延びる第 1 のラインパターンとこれに直交する第 2 のラインパターンとの像の線幅をそれぞれ計測する線幅計測装置と；

前記投影光学系によるパターン像の形成状態を調整する像形成状態調整装置と；

前記光学特性計測装置で計測された前記第 1 の光学特性の値と、前記線幅計測装置で計測された前記第 1 のラインパターンの像の線幅である第 1 線幅と前記第 2 のラインパターンの像の線幅である第 2 線幅との差である線幅差と、に応じて、前記第 1 の光学特性との相互作用により前記線幅差に影響を与える第 2 の光学特性の大きさを、前記像形成状態調整装置を用いて制御する制御装置と；を備える露光装置。

10

【請求項 2 0】

請求項 1 9 に記載の露光装置において、

前記光学特性計測装置は、前記投影光学系の波面収差を計測する波面収差計測装置であることを特徴とする露光装置。

【請求項 2 1】

請求項 2 0 に記載の露光装置において、

前記第 1 の光学特性は、前記波面収差計測装置で計測された波面収差をツェルニケ多項式を用いて級数展開した複数のツェルニケ項のうち 4 次以上の任意の 2 回回転対称成分項であり、前記第 2 の光学特性は、前記 2 回回転対称成分項と同次数の回転対称成分項であることを特徴とする露光装置。

20

【請求項 2 2】

請求項 2 1 に記載の露光装置において、

前記 2 回回転対称成分項は、4 次 2 成分項である第 1 2 項及び第 1 3 項のいずれかであり、前記回転対称成分項は 4 次 0 成分である第 9 項であることを特徴とする露光装置。

【請求項 2 3】

請求項 1 9 ~ 2 2 のいずれか一項に記載の露光装置において、

前記線幅計測装置は、前記第 2 面上に形成された前記各パターンの投影像を計測する空間像計測器を含むことを特徴とする露光装置。

30

【請求項 2 4】

請求項 1 9 ~ 2 2 のいずれか一項に記載の露光装置において、

前記線幅計測装置は、前記第 2 面上に配置された物体上に形成された像を撮像する撮像装置を含むことを特徴とする露光装置。

【請求項 2 5】

請求項 1 9 ~ 2 4 のいずれか一項に記載の露光装置において、

前記像形成状態調整装置は、前記投影光学系を構成する少なくとも 1 つの光学素子の少なくとも 1 自由度方向の位置の調整、一部の光路中の気体の気圧の調整、前記エネルギービームの波長シフト量の調整、及び前記パターンが形成されたパターン形成部材及び前記物体の少なくとも一方の前記投影光学系の光軸方向に関する位置の調整、の少なくとも 1 つを行うことを特徴とする露光装置。

40

【請求項 2 6】

リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、

前記リソグラフィ工程では、請求項 1 3、1 7、1 9 ~ 2 5 のいずれか一項に記載の露光装置を用いて露光を行うことを特徴とするデバイス製造方法。

【請求項 2 7】

投影光学系を介したパターンの像の特性を予測する予測方法であって、

前記投影光学系の波面収差を所定の式を用いて級数展開して得られる各収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合に基づいて、所定露光条件下で前記投影光学系を介して投影

50

される所定パターンの像に関する、最良フォーカス位置からのデフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線の前記波面収差に起因する移動量を算出して、前記算出された移動量に基づいて前記変動曲線を予測する予測工程を含む予測方法。

【請求項 28】

請求項 27 に記載の予測方法において、  
前記予測工程に先立って、

前記所定露光条件下で前記投影光学系に収差が無いと仮定した場合に求められる、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線を、シミュレーションによって求め、求めた変動曲線を高次関数に近似する工程をさらに含むことを特徴とする予測方法。

10

【請求項 29】

請求項 28 に記載の予測方法において、  
前記予測工程では、

前記所定露光条件下での前記デフォーカス量に対する前記各収差成分の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記デフォーカス量の方向に関する移動量を算出し、

前記所定露光条件下での前記像のサイズの変化に対する前記各収差成分の二乗の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の二乗の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記像のサイズの変化の方向に関する移動量を算出することを特徴とする予測方法。

20

【請求項 30】

請求項 29 に記載の予測方法において、  
前記予測工程では、

前記各収差成分の二乗の線形結合に加え、前記所定露光条件下での前記像のサイズの変化の方向に対する、互いに異なる収差成分同士のクロス項の感度をそれぞれの係数とする前記各クロス項の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記像のサイズの変化に関する移動量を算出することを特徴とする予測方法。

【請求項 31】

請求項 28 ~ 30 のいずれか一項に記載の予測方法において、

前記高次関数は、偶数次の項のみから成る関数であることを特徴とする予測方法。

【請求項 32】

請求項 27 に記載の予測方法において、  
前記予測工程では、

前記各収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記波面収差に起因する変形具合を算出し、前記移動量及び前記変形具合に基づいて前記変動曲線を予測することを特徴とする予測方法。

30

【請求項 33】

請求項 32 に記載の予測方法において、  
前記予測工程に先立って、

前記所定露光条件下で前記投影光学系に収差が無いと仮定した場合に求められる、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線をシミュレーションによって求め、求めた変動曲線を高次関数に近似する工程をさらに含むことを特徴とする予測方法。

40

【請求項 34】

請求項 33 に記載の予測方法において、  
前記予測工程に先立って、

実際の収差状態における前記投影光学系を介して前記所定露光条件下で投影される前記パターンの像に関する、前記変動曲線を算出する算出工程をさらに含み、

前記予測工程では、前記移動量に基づいて移動した変動曲線を近似する高次関数と、前記算出工程で求められた変動曲線を表す関数との差分を示す差分関数を、前記波面収差に起因する前記変動曲線の変動具合として求めることを特徴とする予測方法。

50

## 【請求項 3 5】

請求項 3 4 に記載の予測方法において、  
前記算出工程は、シミュレーションによって行われることを特徴とする予測方法。

## 【請求項 3 6】

請求項 3 4 に記載の予測方法において、  
前記予測工程では、

前記所定露光条件下における前記差分関数の偶数次の項に対する前記各収差成分の二乗の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の二乗の線形結合に基づいて、前記差分関数のその偶数次の項の係数を算出し、

前記所定露光条件下における前記差分関数の奇数次の項に対する前記各収差成分の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の線形結合に基づいて、前記差分関数のその奇数次の項の係数を算出することを特徴とする予測方法。

10

## 【請求項 3 7】

請求項 2 7 ~ 3 6 のいずれか一項に記載の予測方法において、  
前記所定の式は、ツェルニケ多項式であり、  
前記各収差成分は、各ツェルニケ項の係数であることを特徴とする予測方法。

## 【請求項 3 8】

投影光学系を介したパターンの像の特性を評価する評価方法であって、

前記投影光学系の有効視野内の少なくとも 1 つの計測点について、請求項 2 7 ~ 3 7 のいずれか一項に記載の予測方法を用いて、所定露光条件下で前記投影光学系を介して前記少なくとも 1 つの計測点に投影される所定パターンの像に関する、最良フォーカス位置からのデフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線を予測する工程と；

20

前記予測結果に基づいて、前記所定パターンの像の特性を評価する工程と；を含む評価方法。

## 【請求項 3 9】

請求項 3 8 に記載の評価方法において、

前記所定パターンは、前記投影光学系の有効視野内の複数の計測点のそれぞれに対応して配置され、

前記特性は、前記投影光学系の有効視野内における前記像の均一性を含むことを特徴とする評価方法。

30

## 【請求項 4 0】

請求項 3 8 に記載の評価方法において、

前記所定パターンは、前記投影光学系の光軸方向に直交する平面上に設けられた互いに直交する 2 つのラインパターンを含み、

前記予測する工程では、前記ラインパターン毎に、前記変動曲線を予測することを特徴とする評価方法。

## 【請求項 4 1】

請求項 4 0 に記載の評価方法において、

前記評価する工程では、前記像の特性としてラインパターンの像同士の線幅差を評価することを特徴とする評価方法。

40

## 【請求項 4 2】

請求項 3 8 に記載の評価方法において、

前記所定パターンは、前記投影光学系の光軸方向に直交する平面上に設けられた互いに平行な 2 つのラインパターンを含み、

前記予測する工程では、前記ラインパターン毎に、前記変動曲線を予測することを特徴とする評価方法。

## 【請求項 4 3】

請求項 4 2 に記載の評価方法において、

前記評価する工程では、前記像の特性としてラインパターンの像同士の線幅差を評価することを特徴とする評価方法。

50

## 【請求項 4 4】

投影光学系を介したパターンの像の形成状態を調整する調整方法であって、  
 請求項 3 8 に記載の評価方法を用いて、前記投影光学系の有効視野内の少なくとも 1 つの計測点に対応して配置された所定パターンの像の特性を評価する評価工程と；  
 前記評価結果に基づいて、前記投影光学系を介した前記所定パターンの像の形成状態を調整する調整工程と；を含む調整方法。

## 【請求項 4 5】

請求項 4 4 に記載の調整方法において、  
 前記調整工程では、  
 前記計測点に関する、前記所定パターンの像の形成状態を調整する調整パラメータの単位調整量当たりの前記各収差成分の変化量と、前記所定露光条件下における前記所定パターンの像のサイズの変化に対する前記各収差成分の感度と、前記デフォーカス量に対する前記所定パターンの像のサイズの変動を示す変動曲線の各次の項の係数に関する目標値からのずれとを用いて前記調整パラメータの調整量を算出し、算出された調整量に基づいて、前記所定パターンの像の形成状態を調整することを特徴とする調整方法。 10

## 【請求項 4 6】

請求項 4 5 に記載の調整方法において、  
 前記評価工程では、前記投影光学系の有効視野内の複数の計測点にそれぞれ対応して配置された所定パターンの像の特性をそれぞれ評価し、  
 前記調整工程では、前記変動曲線の同一次の項の係数に関する目標値を、前記計測点間で同一とすることを特徴とする調整方法。 20

## 【請求項 4 7】

請求項 4 5 に記載の調整方法において、  
 所定パターンが複数のパターンを含む場合には、  
 前記変動曲線の同一次の項の係数に関する目標値を、前記パターン間で同一とすることを特徴とする調整方法。

## 【請求項 4 8】

請求項 4 5 ~ 4 7 のいずれか一項に記載の調整方法において、  
 前記調整量を、最小二乗法を用いて求めることを特徴とする調整方法。

## 【請求項 4 9】

第 1 面上の回路パターンを投影光学系を介して第 2 面上に配置された物体に転写する露光方法であって、  
 請求項 4 4 ~ 4 8 のいずれか一項に記載の調整方法を用いて、前記投影光学系を介した前記回路パターンの像の形成状態を調整する工程と；  
 前記調整された像の形成状態で、前記回路パターンを、前記投影光学系を介して前記物体に転写する工程と；を含む露光方法。 30

## 【請求項 5 0】

リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、  
 前記リソグラフィ工程では、請求項 4 9 に記載の露光方法を用いることを特徴とするデバイス製造方法。 40

## 【請求項 5 1】

投影光学系を介したパターンの像の特性の予測をコンピュータに実行させるプログラムであって、  
 前記投影光学系の波面収差を所定の式を用いて級数展開して得られる各収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合に基づいて、所定露光条件下で前記投影光学系を介して投影される所定パターンの像に関する、前記最良フォーカス位置からのデフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線の前記波面収差に起因する移動量を算出して、前記算出された移動量に基づいて前記変動曲線を予測する予測手順を、前記コンピュータに実行させるプログラム。

## 【請求項 5 2】

50

請求項 5.1 に記載のプログラムにおいて、  
前記予測手順に先立って、

前記所定露光条件下で前記投影光学系に収差が無いと仮定した場合に求められる、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線を高次関数に近似する手順を、前記コンピュータにさらに実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項 5.3】

請求項 5.2 に記載のプログラムにおいて、  
前記予測手順として、

前記所定露光条件下での前記デフォーカス量に対する前記各収差成分の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記デフォーカス量の方向に関する移動量を予測する手順と、

前記所定露光条件下での前記像のサイズの変化に対する前記各収差成分の二乗の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の二乗の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記像のサイズの変化の方向に関する移動量を予測する手順と、を前記コンピュータに実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項 5.4】

請求項 5.3 に記載のプログラムにおいて、  
前記予測手順として、

前記各収差成分の二乗の線形結合に加え、前記所定露光条件下での前記像のサイズの変化に対する、互いに異なる収差成分同士のクロス項の感度をそれぞれの係数とする前記各クロス項の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記像のサイズの変化の方向に関する移動量を予測する手順を、前記コンピュータに実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項 5.5】

請求項 5.2 ~ 5.4 のいずれか一項に記載のプログラムにおいて、

前記高次関数は、偶数次の項のみから成る関数であることを特徴とするプログラム。

【請求項 5.6】

請求項 5.1 に記載のプログラムにおいて、  
前記予測手順として、

前記各収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記波面収差に起因する変形具合を算出し、前記移動量及び前記変形具合に基づいて前記変動曲線を予測する手順を、前記コンピュータに実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項 5.7】

請求項 5.6 に記載のプログラムにおいて、  
前記予測手順に先立って、

前記所定露光条件下で前記投影光学系に収差が無いと仮定した場合に求められる、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線を高次関数に近似する手順を、前記コンピュータにさらに実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項 5.8】

請求項 5.7 に記載のプログラムにおいて、  
前記予測手順に先立って、

前記所定露光条件下における実際の収差状態での前記投影光学系を介して投影される所定パターンの像に関する、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を算出する算出手順を、前記コンピュータにさらに実行させ、

前記予測手順として、前記移動量に基づいて移動した高次関数と、前記算出手順で求められた変動関数との差分を示す差分関数を、前記波面収差に起因する前記変動曲線の変動具合として求める手順を、前記コンピュータに実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項 5.9】

請求項 5.8 に記載のプログラムにおいて、  
前記予測手順として、

前記所定露光条件下における前記差分関数の偶数次の項に対する前記各収差成分の二乗

10

20

30

40

50

の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の二乗の線形結合に基づいて、前記差分関数のその偶数次の項の係数を予測する手順と、

前記所定露光条件下における前記差分関数の奇数次の項に対する前記各収差成分の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の線形結合に基づいて、前記差分関数のその奇数次の項の係数を予測する手順と、を前記コンピュータに実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項 60】

請求項 5 1 ~ 5 9 のいずれか一項に記載のプログラムにおいて、

前記所定の式は、ツェルニケ多項式であり、

前記各収差成分は、各ツェルニケ項の係数であることを特徴とするプログラム。

10

【請求項 61】

請求項 5 1 ~ 5 9 のいずれか一項に記載のプログラムが記録されたコンピュータによる読み取りが可能な情報記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、投影光学系の調整方法、予測方法、評価方法、調整方法、露光方法及び露光装置、露光装置の製造方法、プログラム並びにデバイス製造方法に係り、更に詳しくは、第 1 面上のパターンの像を第 2 面上に投影する投影光学系の調整方法、投影光学系を介したパターンの像の特性を予測する予測方法、該予測方法を利用したパターンの像の特性を評価する評価方法、該評価方法を利用したパターンの像の形成状態を調整する調整方法、該調整方法又は前記投影光学系の調整方法を利用して物体上にパターンを形成する露光方法及び該露光方法又は投影光学系の調整方法の実施に好適な露光装置、前記投影光学系の調整方法を用いて投影光学系を調整する工程を含む露光装置の製造方法、前記予測方法をコンピュータに実行させるプログラム、並びに前記露光方法又は露光装置を用いるデバイス製造方法に関する。

20

【背景技術】

【0002】

一般に、半導体素子、表示素子、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシーン等のマイクロデバイスを製造するリソグラフィ工程では、マスク又はレチクル（以下、「レチクル」と総称する）に形成されたパターンを、投影光学系を介してウエハ又はガラスプレート等の感応物体（以下、「ウエハ」と総称する）上に転写する、いわゆるステッパやいわゆるスキャナ（スキャニング・ステッパとも呼ばれる）などの投影露光装置が用いられている。

30

【0003】

従来、この種の露光装置では、露光によりウエハ上に形成された縦線パターンと横線パターンとの転写像（レジスト像など）の線幅差が計測された場合に、投影光学系における縦線パターンと横線パターンとの像のコントラスト差の原因となるのはコマ収差等の非対称収差が主因であると考えられていた。このため、計測の結果、コマ収差等の非対称収差成分が計測されない場合には線幅差の補正は困難であった。

【0004】

40

最近では、投影光学系の組立て時に、干渉計を用いて投影光学系の視野内（又は露光フィールド内）の各位置の波面収差を計測し、その計測された波面収差（収差関数）をツェルニケ（Zernike）多項式（例えばフリンジツェルニケ多項式）を用いて級数展開して、得られた級数の各項（各ツェルニケ項）の各係数（ツェルニケ係数）の大きさを、それぞれの目標値以下にするような調整が行われている。かかる調整をするのは、前記級数の各項（各ツェルニケ項）は、それぞれ特定の波面収差成分を表わし、各項の係数は各収差成分の大きさを表わすからである。

【0005】

最近、投影光学系（投影レンズ）の収差の管理精度は、上述した投影光学系の製造工程への波面計測の導入、波面収差のツェルニケ多項式を用いた級数展開による管理により、

50

飛躍的に向上した。

【0006】

また、波面収差（収差関数）をツェルニケ多項式を用いて展開した各項（各ツェルニケ項）の大きさ（ツェルニケ係数）と、ツェルニケ感度（Zernike Sensitivity）表との線形結合に基づいて、投影光学系の結像性能、例えば収差（あるいはその指標値）を求める、所謂Zernike Sensitivity法により、収差の影響についても、簡易なものについては簡素な方法で判断することが可能になっている。ここで、Zernike Sensitivity（ツェルニケ感度）表とは、それぞれ異なる露光条件、すなわち光学条件（露光波長、最大N・A、使用N・A、照明N・A、照明系開口絞りの開口形状など）、評価項目（マスク種、線幅、評価量、パターンの情報など）と、これら光学条件と評価項目との組み合わせにより定まる複数の露光条件の下でそれぞれ求めた、投影光学系の結像性能、例えば諸収差（あるいはその指標値）の各ツェルニケ項の1当たりの変化量から成る計算表を指す。

10

【0007】

しかしながら、所謂Zernike Sensitivity法が必ずしも適用できない評価量として、線幅変化がある。この線幅変化については、Proc.SPIE Vol.4346の第713頁に開示されているように、収差の回転対称成分（0成分）、2回転対称成分（2成分）に応じて線幅が最大となるフォーカス位置が変化し、またその線幅の最大値も変化する。さらに、二つの収差（0成分、2成分）の相互作用が存在する。このために所謂Zernike Sensitivity法は線幅の推定には適用されてこなかった。

20

【0008】

波面収差をフリンジツェルニケ多項式を用いて級数展開した上述の回転対称成分（0成分）項には、デフォーカスを表す低次の項すなわち第4項（係数 $Z_4$ ）や低次の球面収差を表す第9項（係数 $Z_9$ ）が含まれるが、これらの0成分項による波面の変化は等方的で、このため、V線（縦線）、H線（横線）のパターンの結像状態への影響は等しい。また、2回転対称成分（2成分）項は低次の非点収差を表す第5項（係数 $Z_5$ ）、高次の非点収差を表す第12項（係数 $Z_{12}$ ）があるが、これらの2成分項の縦線のパターンの結像状態への影響と横線のパターンの結像状態への影響は符号は逆だが、その大きさは等しい。このため、従来は、この0成分項と2成分項の両方が存在する（すなわち両者の係数（成分）がともに零でない）ことによる、縦線、横線のパターン像の線幅に対する、収差の影響の差は考えられていなかった。

30

【0009】

このような事情により、現状では、縦線パターンと横線パターンとの像の線幅差に関しては、簡易かつ確実な判定方法がなく、従ってその調整が困難なものとなっている。

【0010】

本発明は、かかる事情の下になされたもので、その第1の目的は、特に、相互に直交するラインパターンの像同士の線幅差を自在に制御することを可能とする投影光学系の調整方法を提供することにある。

【0011】

本発明の第2の目的は、投影光学系を介したパターンの像の特性を、簡易にかつ高精度に予測することができる予測方法を提供することにある。

40

【0012】

本発明の第3の目的は、投影光学系を介したパターンの像の特性を簡易にかつ高精度に評価することができる評価方法を提供することにある。

【0013】

本発明の第4の目的は、投影光学系を介したパターンの像の形成状態を簡易にかつ高精度に調整することができる調整方法を提供することにある。

【0014】

本発明の第5の目的は、物体上にパターンを精度良く形成することができる露光方法及び露光装置を提供することにある。

【0015】

50

本発明の第6の目的は、投影光学系を介したパターンの転写特性の予測を短時間かつ高精度にコンピュータに実行させるプログラムを提供することにある。

【0016】

本発明の第7の目的は、デバイスの生産性の向上に寄与するデバイス製造方法を提供することにある。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0017】

一見、波面収差をツェルニケ多項式（例えばフリンジツェルニケ多項式）を用いて級数展開した回転対称成分（0成分）項と2回回転対称成分（2成分）項には相互に関連性がないように思われる。しかし、発明者等は、種々の実験（シミュレーションを含む）を繰り返した結果、実際には、動径多項式の独立変数が同一次数である0成分と2成分との各々による瞳面内の位相分布の相互作用により、瞳面内における波面の乱れが縦方向と横方向とで異なる場合があることを見出した。例えば、波面収差をフリンジツェルニケ多項式を用いて級数展開した第12項（係数 $Z_{12}$ ）の成分が零でないとき、球面収差成分である第9項（係数 $Z_9$ ）の大きさを投影光学系を構成する光学素子の移動や交換によって変更することにより、瞳面内の上下、左右方向の位相分布を制御することができ、前述の縦横線の線幅差を調整できることを見出した。

10

【0018】

本発明は、発明者等が得た上記の新規知見に基づいてなされたもので以下のような方法及び構成を採用する。

20

【0019】

本発明は、第1の観点からすると、第1面上のパターンの像を第2面上に投影する投影光学系の調整方法であって、前記投影光学系の第1の光学特性を含む光学特性の情報を得る第1工程と；前記第1面上に配置された所定方向に延びる第1のラインパターンとこれに直交する第2のラインパターンとの像を前記投影光学系を用いて前記第2面上に形成するとともに、前記第1のラインパターンの像の線幅である第1線幅と前記第2のラインパターンの像の線幅である第2線幅との差である線幅差を計測する第2工程と；前記第1工程で得られた前記第1の光学特性の値と前記線幅差とに応じて、前記第1の光学特性との相互作用により前記線幅差に影響を与える第2の光学特性の大きさを制御するように前記投影光学系を調整する第3工程と；を含む第1の投影光学系の調整方法である。

30

【0020】

ここで、第2工程において第1のラインパターンと第2のラインパターンとの像を投影光学系を用いて形成しつつ、第1のラインパターンの像の線幅である第1線幅と第2のラインパターンの像の線幅である第2線幅との差である線幅差を計測しても良いし、第1のラインパターンと第2のラインパターンとの像を形成した後に、前記線幅差を計測しても良い。

【0021】

これによれば、例えば投影光学系の調整が困難な第1の光学特性の存在に起因して生じる前述の線幅差を、調整が容易な第2の光学特性の大きさを制御するように投影光学系を調整することで、制御することが可能となる。従って、従来困難とされていた、相互に直交するラインパターンの像同士の線幅差の制御を自在にかつ確実に行うことが可能となる。

40

【0022】

この場合において、前記第1工程で得られる情報が、前記投影光学系の波面収差の情報である場合、前記第3工程では、前記第1工程で得た波面収差をツェルニケ多項式を用いて級数展開した複数のツェルニケ項のうち4次以上（動径多項式の独立変数の次数が4次以上）の任意の2回回転対称成分項の大きさが零でないとき、前記2回回転対称成分項の大きさと前記線幅差とに応じて、前記2回回転対称成分項と同一次数の回転対称成分項の大きさを制御するように前記投影光学系を調整することとすることができる。

50

## 【 0 0 2 3 】

この場合において、前記 2 回回転対称成分項は、4 次  $\cos^2$  成分項である第 1 2 項であり、前記回転対称成分項は 4 次 0 成分項である第 9 項であることとすることができるし、あるいは、前記 2 回回転対称成分項は、4 次  $\sin^2$  成分項である第 1 3 項であり、前記回転対称成分項は 4 次 0 成分項である第 9 項であることとすることができる。

## 【 0 0 2 4 】

本発明の第 1 の投影光学系の調整方法では、第 1 工程で得られる情報が、投影光学系の波面収差の情報である場合、前記第 1 工程では、前記投影光学系の波面を直接計測することより前記波面収差の情報を得ることとすることができるし、あるいは、前記第 1 工程では、前記第 1 面上に配置されたサイズが異なる複数組の前記第 1 のラインパターンと前記第 2 のラインパターンとの像形成時におけるベストフォーカス位置の差を各組毎に計測し、この計測結果に基づいて、前記波面収差の情報として前記 2 回回転対称成分項の情報を推定することとすることもできる。

10

## 【 0 0 2 5 】

本発明の第 1 の投影光学系の調整方法では、第 1 工程で得られる情報が、投影光学系の波面収差の情報である場合、前記第 3 工程では、前記 2 回回転対称成分項の大きさが零でなく、かつ前記第 2 工程で計測された前記線幅差が零でないとき、前記 2 回回転対称成分項の大きさと前記線幅差とに基づいて、前記線幅差が設計値に近づくように（例えば零となるように）、前記 2 回回転対称成分項と同次数の回転対称成分項の大きさを最適化するように前記投影光学系を調整することとすることができる。

20

## 【 0 0 2 6 】

本発明の第 1 の投影光学系の調整方法では、第 2 工程において、第 1、第 2 のラインパターンの空間像（投影像）を投影光学系を介して第 2 面上に形成し、それらの空間像を空間像計測器を用いて計測し、第 1 のラインパターンと第 2 のラインパターンの像の線幅を求めることもできるが、これに限らず、前記第 2 工程は、前記第 2 面上に配置された物体上に前記第 1、第 2 のラインパターンの像を形成する像形成工程と；前記物体上に形成された前記第 1 のラインパターンの像の線幅である第 1 線幅と前記第 2 のラインパターンの像の線幅である第 2 線幅とを計測する線幅計測工程と；を含むこととすることができる。すなわち、物体上に形成された第 1 のラインパターン、第 2 のラインパターンの潜像、レジスト像、あるいはエッチング像などを露光装置のアライメント系、あるいは SEM などを用いて計測し、その線幅を求めることができる。

30

## 【 0 0 2 7 】

本発明の第 1 の投影光学系の調整方法では、前記第 3 工程では、前記投影光学系を構成する少なくとも 1 つの光学素子の少なくとも 1 自由度方向の位置制御及び一部の光路中の気体の気圧の制御の少なくとも一方により、前記第 2 の光学特性の大きさを制御することとすることができる。

## 【 0 0 2 8 】

本発明の第 1 の投影光学系の調整方法では、前記第 1 のラインパターンは縦線パターンであり、前記第 2 のラインパターンは横線パターンであり、前記第 1 の光学特性と第 2 の光学特性とは、前記縦線パターンの像と前記横線パターンの像それぞれの線幅変化に対するツェルニケ項の組み合わせのクロスタームにおけるツェルニケ感度を求める工程と、そのクロスタームにおけるツェルニケ感度の符号が縦横線で異なるツェルニケ項同士の組み合わせを求める工程と、を経て決定されていることとすることができる。

40

## 【 0 0 2 9 】

本発明の第 1 の投影光学系の調整方法では、前記第 1 工程で得られる情報は、前記投影光学系の波面収差の情報であり、前記第 1 及び第 2 の光学特性は、前記第 1 工程で得た波面収差を、ツェルニケ多項式を用いて級数展開した複数のツェルニケ項のうち同次数で、かつ種類が異なる成分の項であることとすることができる。

## 【 0 0 3 0 】

本発明は、第 2 の観点からすると、第 1 面上の回路パターンを投影光学系を介して第 2

50

面上に配置された物体に転写する露光方法であって、本発明の第1の投影光学系の調整方法を用いて前記投影光学系を調整する工程と；前記調整後の投影光学系を用いて前記回路パターンを前記物体上に転写する工程と；を含む第1の露光方法である。

【0031】

これによれば、本発明の第1の投影光学系の調整方法を用いて投影光学系を調整するので、縦線パターンと横線パターンとの像の線幅差が設計値に忠実な値となるように投影光学系が調整される。例えば、同一線幅の縦線パターンと横線パターンの像の線幅差が最小（例えば零）となるように投影光学系が調整される。そして、この調整された投影光学系を用いて回路パターンが物体上に転写されるので、縦線パターンと横線パターンとの線幅差を低減した高精度なパターンの転写を実現することができる。

10

【0032】

本発明は、第3の観点からすると、マスクに形成されたパターンを露光光学系を介して物体上に転写する露光装置であって、本発明の第1の投影光学系の調整方法を用いて調整された投影光学系を前記露光光学系として備えることを特徴とする第1の露光装置である。

【0033】

これによれば、本発明の第1の投影光学系の調整方法を用いて調整された投影光学系を露光光学系として備えるので、その投影光学系を用いてマスクに形成されたパターンを物体上に転写することにより、縦線パターンと横線パターンとの線幅差を低減した高精度なパターンの転写を実現することができる。

20

【0034】

本発明は、第4の観点からすると、第1面上のパターンの像を第2面上に投影する投影光学系の調整方法であって、前記投影光学系の第1の光学特性を含む光学特性の情報を得る第1工程と；前記第1工程で得られた前記第1の光学特性の値と、前記第1面上に配置された所定方向に延びる第1のラインパターンの線幅と前記第1のラインパターンに直交する第2のラインパターンの線幅との差とに応じて、前記第1の光学特性との相互作用によって前記投影光学系によって前記第2面上に形成される前記第1のラインパターンの像の線幅と前記第2のラインパターンの像の線幅との差である線幅差に影響を与える第2の光学特性の大きさを制御するように前記投影光学系を調整する第2工程と；を含む第2の投影光学系の調整方法である。

30

【0035】

これによれば、第1の光学特性の値と、第1のラインパターンと第2のラインパターンの線幅との差とに応じて、第1の光学特性との相互作用によって投影光学系によって前記第2面上に形成される前記第1のラインパターンの像の線幅と前記第2のラインパターンの線幅との差である線幅差に影響を与える第2の光学特性の大きさを制御するように投影光学系が調整される。このため、投影光学系によって第2面上に形成される第1のラインパターンの像の線幅と第2のラインパターンの線幅との差である線幅差が、第1面上の第1のラインパターンの線幅と第2のラインパターン線幅との差によって生じる場合、例えばマスク上のパターンの描画誤差などに起因して生じる場合に、直交するラインパターン同士の線幅差を自在に制御することが可能となる。

40

【0036】

この場合において、前記第1のラインパターンは縦線パターンであり、前記第2のラインパターンは横線パターンであり、前記第1の光学特性と第2の光学特性とは、前記縦線パターンの像と前記横線パターンの像それぞれの線幅変化に対するツェルニケ項の組み合わせのクロスタームにおけるツェルニケ感度を求める工程と、そのクロスタームにおけるツェルニケ感度の符号が縦横線で異なるツェルニケ項同士の組み合わせを求める工程と、を経て決定されていることとすることができる。

【0037】

本発明は、第5の観点からすると、第1面上の回路パターンを投影光学系を介して第2面上に配置された物体に転写する露光方法であって、本発明の第2の投影光学系の調整方

50

法を用いて前記投影光学系を調整する工程と；前記調整後の投影光学系を用いて前記回路パターンを前記物体上に転写する工程と；を含む第2の露光方法である。

【0038】

これによれば、本発明の第2の投影光学系の調整方法を用いて投影光学系を調整するので、例えばマスク上のパターンの描画誤差などに起因して、投影光学系によって第2面上に形成される第1のラインパターンの像の線幅と第2のラインパターンの線幅との差である線幅差が生じる場合にも、直交するラインパターン同士の線幅差を自在に制御するような投影光学系の調整が行われ、この調整された投影光学系を用いて回路パターンが物体上に転写されるので、縦線パターンと横線パターンとの線幅差を低減した高精度なパターンの転写を実現することができる。

10

【0039】

本発明は、第6の観点からすると、マスクに形成されたパターンを露光光学系を介して物体上に転写する露光装置であって、本発明の第2の投影光学系の調整方法を用いて調整された投影光学系を前記露光光学系として備えることを特徴とする第2の露光装置である。

【0040】

これによれば、本発明の第2の投影光学系の調整方法を用いて調整された投影光学系を露光光学系として備えるので、その投影光学系を用いてマスクに形成されたパターンを物体上に転写することにより、縦線パターンと横線パターンとの線幅差を低減した高精度なパターンの転写を実現することができる。

20

【0041】

本発明は、第7の観点からすると、第1面上に配置されたパターンをエネルギービームで照明し、前記パターンを投影光学系を介して第2面上に配置された物体上に転写する露光装置であって、前記投影光学系の第1の光学特性を含む光学特性を計測する光学特性計測装置と；前記投影光学系により前記第2面上に形成された前記第1面上で所定方向に延びる第1のラインパターンとこれに直交する第2のラインパターンとの像の線幅をそれぞれ計測する線幅計測装置と；前記投影光学系によるパターン像の形成状態を調整する像形成状態調整装置と；前記光学特性計測装置で計測された前記第1の光学特性の値と、前記線幅計測装置で計測された前記第1のラインパターンの像の線幅である第1線幅と前記第2のラインパターンの像の線幅である第2線幅との差である線幅差と、に応じて、前記第1の光学特性との相互作用により前記線幅差に影響を与える第2の光学特性の大きさを、前記像形成状態調整装置を用いて制御する制御装置と；を備える第3の露光装置である。

30

【0042】

これによれば、光学特性計測装置により投影光学系の少なくとも第1の光学特性を含む光学特性が計測される。また、線幅計測装置により、投影光学系によって第2面（像面）上に形成された第1面（物体面）上で所定方向に延びる第1のラインパターンとこれに直交する第2のラインパターンとの像の線幅がそれぞれ計測される。ここで、線幅計測装置による線幅の計測は、第2面上に配置された物体上に形成された縦線パターンと横線パターンとの転写像（潜像、レジスト像、エッチング像）の線幅を計測しても良いし、縦線パターンと横線パターンとの空間像を第2面上に形成し、その空間像の線幅を計測しても良い。

40

【0043】

そして、制御装置では、光学特性計測装置で計測された第1の光学特性が存在するとき、その第1の光学特性の値と、線幅計測装置で計測された前記第1のラインパターンの像の線幅である第1線幅と前記第2のラインパターンの像の線幅である第2線幅との差である線幅差とに応じて、第1の光学特性との相互作用により線幅差に影響を与える第2の光学特性の大きさを、像形成状態調整装置を用いて制御する。

【0044】

このため、例えば第1の光学特性が調整が困難な光学特性である場合であっても、例えば調整が容易な第2の光学特性の大きさを像形成状態調整装置を用いて制御することで、

50

第1の光学特性の存在に起因して生じる前述の線幅差を、制御することができる。

【0045】

従って、第1面上に配置されたパターンをエネルギービームで照明し、そのパターンを、像形成状態調整装置により第2の光学特性が調整された後の投影光学系を介して第2面上に配置された物体上に転写することにより、直交するラインパターン転写像同士の線幅差が効果的に低減された良好な露光を実現することができる。

【0046】

この場合において、前記光学特性計測装置は、前記投影光学系の波面収差を計測する波面収差計測装置であることとすることができる。

【0047】

この場合において、前記第1の光学特性は、前記波面収差計測装置で計測された波面収差をツェルニケ多項式を用いて級数展開した複数のツェルニケ項のうち4次以上の任意の2回回転対称成分項であり、前記第2の光学特性は、前記2回回転対称成分項と同一次数の回転対称成分項であることとすることができる。

【0048】

この場合において、前記2回回転対称成分項は、4次2成分項である第12項及び第13項のいずれかであり、前記回転対称成分項は4次0成分である第9項であることとすることができる。

【0049】

本発明の第3の露光装置では、前記線幅計測装置は、前記第2面上に形成された前記各パターンの投影像を計測する空間像計測器を含むこととすることもできるし、あるいは前記線幅計測装置は、前記第2面上に配置された物体上に形成された像を撮像する撮像装置を含むこととすることもできる。

【0050】

本発明の第3の露光装置では、前記像形成状態調整装置は、前記投影光学系を構成する少なくとも1つの光学素子の少なくとも1自由度方向の位置の調整、一部の光路中の気体の気圧の調整、前記エネルギービームの波長シフト量の調整、及び前記パターンが形成されたパターン形成部材及び前記物体の少なくとも一方の前記投影光学系の光軸方向に関する位置の調整、の少なくとも1つを行うこととすることができる。

【0051】

本発明は、第8の観点からすると、投影光学系を介したパターンの像の特性を予測する予測方法であって、前記投影光学系の波面収差を所定の式を用いて級数展開して得られる各収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合に基づいて、所定露光条件下で前記投影光学系を介して投影される所定パターンの像に関する、最良フォーカス位置からのデフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線の前記波面収差に起因する移動量を算出して、前記算出された移動量に基づいて前記変動曲線を予測する予測工程を含む予測方法である。

【0052】

投影光学系を介してパターンを転写する場合、そのパターンの像のサイズは、その転写位置の最良フォーカス位置からのデフォーカス量に応じて変動し、その変動を示す変動曲線、すなわちいわゆるCD-フォーカス曲線は、投影光学系の波面収差によって変化することが知られている。また、投影光学系の波面収差は、所定の式、例えばツェルニケ多項式を用いて級数展開することにより複数のツェルニケ項(収差成分項)に分解可能であることが知られている。

【0053】

発明者等が鋭意研究した結果、上記ツェルニケ項の係数、すなわち収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合の値と、投影光学系を介して投影されるパターンの像に関する、前述の変動曲線の変化(すなわち、デフォーカス量及びパターン像のサイズをそれぞれ座標軸とする座標系上での、デフォーカス量方向及び像のサイズ方向に関するその変動曲線の平行移動)とに密接な関係があることが、判明した。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 5 4 】

従って、本発明の予測方法によれば、上記の関係を利用して、多大な計算時間を要する複雑な計算を伴う結像シミュレーションを用いずとも、収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合の値を求めるという至極単純な演算により、所定の収差状態にある投影光学系を介した所定露光条件下でのパターンに関するCD-フォーカス曲線を短時間に予測することが可能となり、その予測結果に基づき、パターンの投影像（又は転写像）の特性を短時間に予測することが可能となる。

## 【 0 0 5 5 】

この場合において、前記予測工程に先立って、前記所定露光条件下で前記投影光学系に収差が無いと仮定した場合に求められる、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線を、シミュレーションによって求め、求めた変動曲線を高次関数に近似する工程をさらに含むこととすることができる。

10

## 【 0 0 5 6 】

この場合において、前記予測工程では、前記所定露光条件下での前記デフォーカス量に対する前記各収差成分の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記デフォーカス量に関する移動量を算出し、前記所定露光条件下での前記像のサイズの変化に対する前記各収差成分の二乗の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の二乗の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記像のサイズの変化に関する移動量を算出することとすることができる。

20

## 【 0 0 5 7 】

前述のように、変動曲線の移動は、デフォーカス量を示す軸の方向（デフォーカス量軸方向）に関する曲線の移動と、パターン像のサイズを示す軸の方向（像サイズ軸方向）に関する移動とに分解することができる。デフォーカス量の軸方向に関する変動曲線の移動は、投影光学系の波面収差を展開したときの各収差成分に感度があり、その移動量を、各収差成分の線形結合によって予測することができる。また、像のサイズの軸方向に関する変動曲線の移動は、各収差成分の二乗に感度があり、その移動量を、各収差成分の二乗の線形結合によって予測することができる。

## 【 0 0 5 8 】

この場合において、前記予測工程では、前記各収差成分の二乗の線形結合に加え、前記所定露光条件下での前記像のサイズの変化の方向に対する、互いに異なる収差成分同士のクロス項の感度をそれぞれの係数とする前記各クロス項の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記像のサイズの変化に関する移動量を算出することとすることができる。

30

## 【 0 0 5 9 】

像のサイズの軸方向に関する変動曲線の移動は、各収差成分の二乗に感度があるだけでなく、互いに異なる収差成分同士のクロス項にも感度があるので、それらのクロス項の線形結合をさらに考慮すれば、像のサイズの軸方向の移動量をさらに精度良く予測することができる。

## 【 0 0 6 0 】

本発明の予測方法では、前述の高次関数は、偶数次の項のみから成る関数であることとすることができる。

40

## 【 0 0 6 1 】

本発明の予測方法では、前記予測工程において、前記各収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記波面収差に起因する変形具合を算出し、前記移動量及び前記変形具合に基づいて前記変動曲線を予測することとすることができる。かかる場合には、変動曲線の移動量だけでなく、各収差成分を含む項の線形結合に基づいて、投影光学系の波面収差に起因する変動曲線の変形具合も算出するので、変動曲線をさらに精度良く予測することができる。

## 【 0 0 6 2 】

この場合において、前記予測工程に先立って、前記所定露光条件下で前記投影光学系に収差が無いと仮定した場合に求められる、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの

50

変動を示す変動曲線をシミュレーションによって求め、求めた変動曲線を高次関数に近似する工程をさらに含むこととすることができる。

【0063】

この場合において、前記予測工程に先立って、実際の収差状態における前記投影光学系を介して前記所定露光条件下で投影される前記パターンの像に関する、前記変動曲線を算出する算出工程をさらに含み、前記予測工程では、前記移動量に基づいて移動した変動曲線を近似する高次関数と、前記算出工程で求められた変動曲線を表す関数との差分を示す差分関数を、前記波面収差に起因する前記変動曲線の変動具合として求めることとすることができる。

【0064】

この場合において、前記算出工程は、シミュレーションによって行われることとすることができる。

【0065】

本発明の予測方法では、前記予測工程において、前記移動量に基づいて移動した変動曲線を近似する高次関数と、前記算出工程で求められた変動曲線を表す関数との差分を示す差分関数を、前記波面収差に起因する前記変動曲線の変動具合として求める場合に、前記予測工程では、前記所定露光条件下における前記差分関数の偶数次の項に対する前記各収差成分の二乗の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の二乗の線形結合に基づいて、前記差分関数のその偶数次の項の係数を算出し、前記所定露光条件下における前記差分関数の奇数次の項に対する前記各収差成分の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の線形結合に基づいて、前記差分関数のその奇数次の項の係数を算出することとすることができる。かかる場合には、変動関数の変形具合を示す差分関数の偶数次の項の係数は、投影光学系の波面収差を展開したときの各収差成分の二乗に感度があり、その係数を各収差成分の二乗の線形結合によって予測することができる。また、差分関数の奇数次の項の係数は、各収差成分に感度があり、その係数を、各収差成分の線形結合によって予測することができる。そのため、変動曲線の変形具合についても、投影光学系の波面収差の各収差成分を含む項の線形結合などを用いて、短時間で、かつ精度良く予測することができる。

【0066】

本発明の予測方法では、前記所定の式は、ツェルニケ多項式であり、前記各収差成分は、各ツェルニケ項の係数であることとすることができる。

【0067】

本発明は、第9の観点からすると、投影光学系を介したパターンの像の特性を評価する評価方法であって、前記投影光学系の有効視野内の少なくとも1つの計測点について、本発明の予測方法を用いて、所定露光条件下で前記投影光学系を介して前記少なくとも1つの計測点に投影される所定パターンの像に関する、最良フォーカス位置からのデフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線を予測する工程と；前記予測結果に基づいて、前記所定パターンの像の特性を評価する工程と；を含む第1の評価方法である。

【0068】

これによれば、本発明の予測方法を用いて、所定露光条件下で投影光学系を介して投影される所定パターンの像に関する上記変動曲線を、投影光学系の有効視野内の少なくとも1つの計測点について精度良く予測することができるようになるので、その変動曲線に基づいて、投影光学系の有効視野内における所定パターンの像の特性を精度良く評価することが可能となる。

【0069】

この場合において、前記所定パターンは、前記投影光学系の有効視野内の複数の計測点のそれぞれに対応して配置され、前記特性は、前記投影光学系の有効視野内における前記像の均一性を含むこととすることができる。

【0070】

本発明の第1の評価方法では、前記所定パターンは、前記投影光学系の光軸方向に直交

10

20

30

40

50

する平面上に設けられた互いに直交する2つのラインパターンを含み、前記予測する工程では、前記ラインパターン毎に、前記変動曲線を予測することとすることができる。

【0071】

この場合において、前記評価する工程では、前記像の特性としてラインパターンの像同士の線幅差を評価することとすることができる。かかる場合には、少なくとも1つの計測点において、前記特性として、例えば主に非点収差による直交する2つのラインパターン同士の線幅差を評価することができる。

【0072】

本発明の第1の評価方法では、前記所定パターンは、前記投影光学系の光軸方向に直交する平面上に設けられた互いに平行な2つのラインパターンを含み、前記予測する工程では、前記ラインパターン毎に、前記変動曲線を予測することとすることができる。

10

【0073】

この場合において、前記評価する工程では、前記像の特性としてラインパターンの像同士の線幅差を評価することとすることができる。かかる場合には、前記特性として主にコマ収差による線幅異常値などを評価することができる。

【0074】

本発明は、第10の観点からすると、投影光学系を介したパターンの像の形成状態を調整する調整方法であって、本発明の第1の評価方法を用いて、前記投影光学系の有効視野内の少なくとも1つの計測点に対応して配置された所定パターンの像の特性を評価する評価工程と；前記評価結果に基づいて、前記投影光学系を介した前記所定パターンの像の形成状態を調整する調整工程と；を含む第1の調整方法である。

20

【0075】

これによれば、本発明の第1の評価方法を用いて、投影光学系の有効視野内における少なくとも1つの計測点における所定パターンの像の特性が評価され、その評価結果に基づいて、前記投影光学系を介した所定パターンの像の形成状態が調整される。従って、評価結果に応じて所定パターンの像の特性を所望の状態に調整することが可能となる。

【0076】

この場合において、前記調整工程では、前記少なくとも1つの計測点に関する、前記所定露光条件下における前記所定パターンの像の形成状態を調整する調整パラメータの単位調整量当たりの前記各収差成分の変化量と、前記所定パターンの像のサイズの変化に対する前記各収差成分の感度と、前記デフォーカス量に対する前記所定パターンの像のサイズの変動を示す変動曲線の各次の項の係数に関する目標値からのずれとを用いて算出された調整量に基づいて、前記所定パターンの像の形成状態を調整することとすることができる。

30

【0077】

計測点における変動曲線は、投影光学系の収差などの影響を受けて変化する。従って、投影光学系を調整するなどして収差成分を変化させれば、その計測点における変動曲線を所望の曲線（目標）に近づけることも可能である。そこで、本発明では、計測点における変動曲線と所望の曲線とのずれをキャンセルするのに必要な調整パラメータ（パターンの像の形成状態を調整する調整パラメータ）の調整量を、該調整パラメータの単位調整量当たりの前記各収差成分の変化量と、前記所定露光条件下における前記所定パターンの像のサイズの変化に対する前記各収差成分の感度と、前記デフォーカス量に対する前記所定パターンの像のサイズの変動を示す変動曲線の各次の項の係数に関する目標値からのずれとを用いて前記調整パラメータの調整量を算出し、算出された調整量に基づいて、前記所定パターンの像の形成状態を調整する。これにより、デフォーカス量に対するパターン像のサイズの変動曲線を所望の変動曲線に近づけるようなパターンの像の形成状態の調整が可能となる。

40

【0078】

この場合、所望の曲線（目標）をどのようなものとするかは、求められるパターンの像の調整項目によって異なる。例えば、前記評価工程では、前記投影光学系の有効視野内の

50

複数の計測点にそれぞれ対応して配置された所定パターンの像の特性をそれぞれ評価し、前記調整工程では、前記変動曲線の同一次の項の係数に関する目標値を、前記計測点間で同一とすることとすることができる。かかる場合には、投影光学系の有効視野内におけるパターンの像の面内均一性を向上させることができる。また、所定パターンが複数のパターンを含む場合には、前記変動曲線の同一次の項の係数に関する目標値を、前記パターン間で同一とすることとすることができる。かかる場合には、同一計測点における、例えば縦線パターンの像と横線パターンの像との線幅や、平行パターンの像同士の線幅などが可能な限り同一となるような調整が可能となる。

【0079】

本発明の第1の調整方法では、前述の調整量を、最小二乗法を用いて求めることとすることができる。

10

【0080】

本発明は、第11の観点からすると、第1面上の回路パターンを投影光学系を介して第2面上に配置された物体に転写する露光方法であって、本発明の第1の調整方法を用いて、前記投影光学系を介した前記回路パターンの像の形成状態を調整する工程と；前記調整された像の形成状態で、前記回路パターンを、前記投影光学系を介して前記物体に転写する工程と；を含む第3の露光方法である。

【0081】

これによれば、本発明の第1の調整方法を用いて投影光学系を介した回路パターンの像の形成状態が調整され、調整された像の形成状態で、回路パターンが物体上に転写されるので、その回路パターンを物体上に精度良く形成することが可能となる。

20

【0082】

本発明は、第12の観点からすると、投影光学系を介したパターンの像の特性の予測をコンピュータに実行させるプログラムであって、前記投影光学系の波面収差を所定の式を用いて級数展開して得られる各収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合に基づいて、所定露光条件下で前記投影光学系を介して投影される所定パターンの像に関する、前記最良フォーカス位置からのデフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線の前記波面収差に起因する移動量を算出して、前記算出された移動量に基づいて前記変動曲線を予測する予測手順を、前記コンピュータに実行させるプログラムである。

【0083】

30

このプログラムがコンピュータにインストールされると、コンピュータが、上記各手順を実行する。これにより、本発明の予測方法が、コンピュータによって実行される。従って、前述と同様に、多大な計算時間を要する複雑な計算を伴う結像シミュレーションを用いずとも、収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合の値を求めるという至極単純な演算により、所定の収差状態にある投影光学系を介した所定露光条件下でのパターンに関するCD-フォーカス曲線を短時間に予測することが可能となり、その予測結果に基づき、パターンの転写特性を短時間に予測することが可能となる。

【0084】

この場合において、前記予測手順に先立って、前記所定露光条件下で前記投影光学系に収差が無いと仮定した場合に求められる、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線を高次関数に近似する手順を、前記コンピュータにさらに実行させることとすることができる。

40

【0085】

この場合において、前記予測手順として、前記所定露光条件下での前記デフォーカス量に対する前記各収差成分の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記デフォーカス量に関する移動量を予測する手順と、前記所定露光条件下での前記像のサイズの変化に対する前記各収差成分の二乗の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の二乗の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記像のサイズの変化の方向に関する移動量を予測する手順と、を前記コンピュータに実行させることとすることができる。

50

## 【0086】

本発明のプログラムでは、前記予測手順として、前記各収差成分の二乗の線形結合に加え、前記所定露光条件下での前記像のサイズの変化に対する、互いに異なる収差成分同士のクロス項の感度をそれぞれの係数とする前記各クロス項の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記像のサイズの変化の方向に関する移動量を予測する手順を、前記コンピュータに実行させることとすることができる。

## 【0087】

本発明のプログラムでは、前述の高次関数は、偶数次の項のみから成る関数であることとすることができる。

## 【0088】

本発明のプログラムでは、前記予測手順として、前記各収差成分をそれぞれ含む複数の項の線形結合に基づいて、前記変動曲線の前記波面収差に起因する変形具合を算出し、前記移動量及び前記変形具合に基づいて前記変動曲線を予測する手順を、前記コンピュータに実行させることとすることができる。

## 【0089】

この場合において、前記予測手順に先立って、前記所定露光条件下で前記投影光学系に収差が無いと仮定した場合に求められる、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を示す変動曲線を高次関数に近似する手順を、前記コンピュータにさらに実行させることとすることができる。

## 【0090】

この場合において、前記予測手順に先立って、前記所定露光条件下における実際の収差状態での前記投影光学系を介して投影される所定パターンの像に関する、前記デフォーカス量に対する前記像のサイズの変動を算出する算出手順を、前記コンピュータにさらに実行させ、前記予測手順として、前記移動量に基づいて移動した高次関数と、前記算出手順で求められた変動関数との差分を示す差分関数を、前記波面収差に起因する前記変動曲線の変動具合として求める手順を、前記コンピュータに実行させることとすることができる。

## 【0091】

この場合において、前記予測手順として、前記所定露光条件下における前記差分関数の偶数次の項に対する前記各収差成分の二乗の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の二乗の線形結合に基づいて、前記差分関数のその偶数次の項の係数を予測する手順と、前記所定露光条件下における前記差分関数の奇数次の項に対する前記各収差成分の感度をそれぞれの係数とする前記各収差成分の線形結合に基づいて、前記差分関数のその奇数次の項の係数を予測する手順と、を前記コンピュータに実行させることとすることができる。

## 【0092】

本発明のプログラムでは、前記所定の式は、ツェルニケ多項式であり、前記各収差成分は、各ツェルニケ項の係数であることとすることができる。

## 【0093】

本発明のプログラムは、情報記録媒体に記録した状態で、販売等の対象とすることができる。従って、本発明は、第13の観点からすると、本発明のプログラムが記録されたコンピュータによる読み取りが可能な情報記録媒体であるとも言える。

## 【0094】

また、本発明は、第14の観点からすると、マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して物体上に転写する露光装置を製造する露光装置の製造方法であって、本発明の第1又は第2の投影光学系の調整方法を用いて前記投影光学系を調整する工程を含む露光装置の製造方法である。

## 【0095】

また、リソグラフィ工程において、本発明の第1～第3の露光装置のいずれかを用いて露光を行うことにより、物体上にパターンを精度良く形成することができ、これにより、

10

20

30

40

50

より高集積度のマイクロデバイスを歩留まり良く製造することができ、その生産性を向上させることができる。同様に、リソグラフィ工程において、本発明の第1～第3の露光方法のいずれかを用いて露光を行うことにより、物体上にパターンを精度良く形成することができ、これにより、より高集積度のマイクロデバイスを歩留まり良く製造することができ、その生産性を向上させることができる。従って、本発明は、更に別の観点からすると、本発明の第1～第3の露光装置のいずれかを用いるデバイス製造方法、あるいは本発明の第1～第3の露光方法のいずれかを用いるデバイス製造方法であるとも言える。

【図面の簡単な説明】

【0096】

【図1】本発明の一実施形態に係る露光装置の構成を概略的に示す図である。 10

【図2】図1の波面収差計測装置を示す断面図である。

【図3】図3Aは、光学系に収差が存在しない場合においてマイクロレンズアレイから射出される光束を示す図、図3Bは、光学系に収差が存在する場合においてマイクロレンズアレイから射出される光束を示す図である。

【図4】直交2軸方向のラインパターンの像同士の線幅差の調整を目的とする、投影光学系PLの調整方法を示すフローチャートである。

【図5】計測用レチクルをパターン面側から見た平面図である。

【図6】図6A～図6Fは、投影光学系の波面収差を展開したツェルニケ多項式の第9項と第12項との値の変化に応じた瞳面における波面の乱れ方を説明するための図である。

【図7】図7A～図7Fは、投影光学系の波面収差を展開したツェルニケ多項式の第4項と第5項との値の変化に応じた瞳面における波面の乱れ方を説明するための図である。 20

【図8】縦線パターンと横線パターンとのベストフォーカス位置の差に対応して縦線パターンの像(V)と横線パターンの像(H)との線幅の差が生じる様子を説明するためのCD-フォーカス線図である。

【図9】波長248.3nmのKrFレーザを光源とし、照明 $\sigma = 0.75$ の2/3輪帯照明条件、投影光学系PLの開口数(N.A.) = 0.68の場合に、計測用レチクル上のパターンを転写して得られるレジスト像の線幅計測の結果得られる、縦横線の線幅差(実験結果)の一例を示す図である。

【図10】図9の $Z_{12} = 40\text{nm}$ 、 $20\text{nm}$ 、 $0\text{nm}$ の部分(上3段の部分)をより詳細に示す図(等高線マップ)である。 30

【図11】図9の $Z_{12} = -20\text{nm}$ 、 $-40\text{nm}$ の部分(下2段の部分)をより詳細に示す図である。

【図12】図12A～図12Dは、図9の各等高線マップの意味を説明するための図である。

【図13】所定の条件下でシミュレーションにより求めた収差間のクロスタームの計算結果の一例を示す図表である。

【図14】線幅ばらつきCDに関するZS(Zernike Sensitivity)の計算結果の一例を示す図である。

【図15】線幅ばらつきCDに関して、従来のZS法を用いた計算結果と、空間像による計算結果との関係を示す図である。 40

【図16】一実施形態の予測方法を示すフローチャート(その1)である。

【図17】図17Aは10次関数の一例を示す図、図17Bは、そのフィッティング誤差の一例を示す図である。

【図18】ツェルニケ感度 $S_i$ の一例を示すグラフである。

【図19】 $-50\text{nm} \sim 50\text{nm}$ まで $10\text{nm}$ ピッチでフォーカス方向の移動量を11点計算して、最小二乗法を使って直線の傾きを計算した計算結果の一例を示す図である。

【図20】図19の場合と同様の像計算で得た11点の線幅変化量の計算結果に二次関数を仮定して、最小二乗法による近似をした結果の一例を示す図である。

【図21】ツェルニケ感度 $S_i$ の一例を示すグラフである。

【図22】図22Aは、 $Z_6$ と $Z_{13}$ のクロストークを示す図、図22Bは、 $Z_9$ と $Z_{12}$ のク 50

ロストークを示す図である。

【図 2 3】各クロス項の感度の一例を示すグラフである。

【図 2 4】一実施形態の予測方法を示すフローチャート（その 2）である。

【図 2 5】ツェルニケ項の感度  $S_{5i}$  の感度の一例を示す図である。

【図 2 6】ツェルニケ項の感度  $S_{3i}$  の感度の一例を示す図である。

【図 2 7】ツェルニケ項の感度  $S_{1i}$  の感度の一例を示す図である。

【図 2 8】ツェルニケ項の感度  $S_{4i}$  の感度の一例を示す図である。

【図 2 9】ツェルニケ項の感度  $S_{2i}$  の感度の一例を示す図である。

【図 3 0】CD - フォーカス曲線  $y''_k, y''_{k+1}$  を、求める際の動作を示す模式図である。

10

【図 3 1】図 3 1 A は、精密な結像シミュレーションによって算出された、代表的な計測点における CD - フォーカス曲線の一例を示す図、図 3 1 B は、本発明の一実施形態の予測方法によって予測された同一露光条件、同一パターンでの代表的な計測点における CD - フォーカス曲線の一例を示す図である。

【図 3 2】線幅ばらつきに CD に関して、新たな Z S 法を用いた計算結果と、空間像の計算結果との関係を示す図である。

【図 3 3】本発明に係るデバイス製造方法の実施形態を説明するためのフローチャートである。

【図 3 4】図 3 3 のステップ 2 0 4 の詳細を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

20

【0 0 9 7】

以下、本発明の一実施形態を図 1 ~ 図 1 2 に基づいて説明する。

【0 0 9 8】

図 1 には、一実施形態に係る露光装置 1 0 0 の概略構成が示されている。この露光装置 1 0 0 は、露光用光源（以下「光源」という）にパルスレーザー光源を用いたステップ・アンド・スキャン方式の縮小投影露光装置（いわゆるスキャナ）である。

【0 0 9 9】

露光装置 1 0 0 は、光源 1 6 及び照明光学系 1 2 から成る照明系、この照明系からのエネルギービームとしての露光用照明光 E L により照明されるマスクとしてのレチクル R を保持するマスクステージとしてのレチクルステージ R S T、レチクル R から出射された露光用照明光 E L を物体としてのウエハ W 上（像面上）に投射する投影光学系 P L、ウエハ W を保持するウエハステージ W S T、及びこれらの制御系等を備えている。

30

【0 1 0 0】

前記光源 1 6 としては、ここでは、K r F エキシマレーザー（出力波長 2 4 8 n m）が用いられている。なお、光源 1 6 として、F<sub>2</sub>レーザー（出力波長 1 5 7 n m）あるいは A r F エキシマレーザー（出力波長 1 9 3 n m）等の真空紫外域のパルス光を出力するパルス紫外光源を用いても良い。

【0 1 0 1】

前記光源 1 6 は、実際には、照明光学系 1 2 の各構成要素及びレチクルステージ R S T、投影光学系 P L、及びウエハステージ W S T 等から成る露光装置本体が収納されたチャンバ 1 1 が設置されたクリーンルームとは別のクリーン度の低いサービスルームに設置されており、チャンバ 1 1 にビームマッチングユニットと呼ばれる光軸調整用光学系を少なくとも一部に含む不図示の送光光学系を介して接続されている。この光源 1 6 では、主制御装置 5 0 からの制御情報 T S に基づいて、内部のコントローラにより、レーザービーム L B の出力のオン・オフ、レーザービーム L B の 1 パルスあたりのエネルギー、発振周波数（繰り返し周波数）、中心波長及びスペクトル半値幅（波長幅）などが制御されるようになっている。

40

【0 1 0 2】

前記照明光学系 1 2 は、シリンダレンズ、ビームエキスパンダ（いずれも不図示）及びオプティカルインテグレータ（ホモジナイザ）2 2 等を含むビーム整形・照度均一化光学

50

系 20、照明系開口絞り板 24、第 1 リレーレンズ 28A、第 2 リレーレンズ 28B、固定レチクルブラインド 30A、可動レチクルブラインド 30B、光路折り曲げ用のミラー M 及びコンデンサレンズ 32 等を備えている。なお、オプティカルインテグレートとしては、フライアイレンズ、ロッドインテグレート（内面反射型インテグレート）、あるいは回折光学素子などを用いることができる。本実施形態では、オプティカルインテグレート 22 としてフライアイレンズが用いられているので、以下ではフライアイレンズ 22 と呼ぶものとする。

#### 【0103】

前記ビーム整形・照度均一化光学系 20 は、チャンバ 11 に設けられた光透過窓 17 を介して不図示の送光光学系に接続されている。このビーム整形・照度均一化光学系 20 は、光源 16 でパルス発光され光透過窓 17 を介して入射したレーザービーム LB の断面形状を、例えばシリンダレンズやビームエキスパンダを用いて整形する。また、このビーム整形・照度均一化光学系 20 において、レーザービーム LB は、透過率を等比級数的に複数段階で又は連続的に変更可能な ND フィルタを備えるエネルギー粗調器（不図示）と、交換可能に配置される複数の回折光学素子、照明光学系の光軸に沿って可動なプリズム（円錐プリズム、多面体プリズムなど）、及びズーム光学系の少なくとも 1 つを含む光学ユニット（不図示）とを経て、オプティカルインテグレート 22 に至る。上記光学ユニットは、オプティカルインテグレート 22 がフライアイレンズであるときはその入射面上での照明光の強度分布、オプティカルインテグレート 22 が内面反射型インテグレートであるときはその入射面に対する照明光の入射角度範囲などを可変とすることで、照明光学系の瞳面上での照明光の光量分布（2 次光源の大きさや形状）、すなわちレチクル R の照明条件を変更する。また、この光学ユニットは、その照明条件の変更の際に、光量損失を極力抑えるようになっている。

#### 【0104】

そして、ビーム整形・照度均一化光学系 20 内部の射出端側に位置するフライアイレンズ 22 は、レチクル R を均一な照度分布で照明するために、前記断面形状が整形されたレーザービームの入射により、照明光学系 12 の瞳面とほぼ一致するように配置されるその射出側焦点面に多数の点光源（光源像）から成る面光源（2 次光源）を形成する。この 2 次光源から射出されるレーザービームを以下においては、「照明光 EL」と呼ぶものとする。

#### 【0105】

なお、フライアイレンズ 22 の射出側焦点面の近傍に、ほぼ等角度間隔で、複数の開口絞り、例えば通常の円形開口より成る開口絞り（通常絞り）、小さな円形開口より成りコヒーレンスファクタである値を小さくするための開口絞り（小絞り）、輪帯照明用の輪帯状の開口絞り（輪帯絞り）、及び変形光源法用に複数の開口を偏心させて配置して成る変形開口絞りなどが形成された円板状部材から成る照明系開口絞り板を配置しても良い。かかる場合には、前述の光学ユニットとともに、この照明系開口絞り板を用い、いずれかの開口絞りを照明光 EL の光路上に選択的に設定することにより、照明光学系の瞳面上での照明光の光量分布（2 次光源の大きさや形状）、すなわちレチクル R の照明条件の変更を行うことが可能となる。特に、前述の光学ユニットのみで設定できない照明条件であっても、照明系開口絞り板を設けることで、光量損失を少なくしつつその照明条件を簡単に設定することができる。

#### 【0106】

フライアイレンズ 22（又は照明系開口絞り板）から射出された照明光 EL の光路上に、固定レチクルブラインド 30A、可動レチクルブラインド 30B を介在させて第 1 リレーレンズ 28A 及び第 2 リレーレンズ 28B から成るリレー光学系が配置されている。固定レチクルブラインド 30A は、レチクル R のパターン面に対する共役面から僅かにデフォーカスして配置され、レチクル R 上の矩形の照明領域 IAR を規定する矩形開口が形成されている。また、この固定レチクルブラインド 30A の近傍に走査方向（図 1 における紙面内左右方向である Y 軸方向）に対応する方向の位置及び幅が可変の開口部を有する可動レチクルブラインド 30B が配置され、走査露光の開始時及び終了時にその可動レチク

10

20

30

40

50

ルブラインド30Bを介して照明領域を更に制限することによって、不要な部分の露光が防止されるようになっている。さらに、可動レチクルブラインド30Bは走査方向と直交する非走査方向(図1における紙面直交方向であるX軸方向)に対応する方向に対しても開口部の幅が可変であり、ウエハW上に転写すべきレチクルRのパターンに応じて照明領域の非走査方向の幅を調整できるようになっている。

**【0107】**

リレー光学系を構成する第2リレーレンズ28B後方の照明光ELの光路上には、当該第2リレーレンズ28Bを通過した照明光ELをレチクルRに向けて反射する折り曲げミラーMが配置され、このミラーM後方の照明光ELの光路上にコンデンサレンズ32が配置されている。

10

**【0108】**

以上の構成において、フライアイレンズ22の入射面、可動レチクルブラインド30Bの配置面、及びレチクルRのパターン面は、光学的に互いに共役に設定され、フライアイレンズ22の射出側焦点面に形成される光源面(照明光学系の瞳面)、投影光学系PLのフーリエ変換面(射出瞳面)は光学的に互いに共役に設定され、ケーラー照明系となっている。

**【0109】**

このようにして構成された照明系の作用を簡単に説明すると、光源16からパルス発光されたレーザビームLBは、ビーム整形・照度均一化光学系20に入射して断面形状が整形されるなどした後、フライアイレンズ22に入射する。これにより、フライアイレンズ22の射出側焦点面に前述した2次光源が形成される。

20

**【0110】**

上記の2次光源から射出された照明光ELは、第1リレーレンズ28Aを経て固定レチクルブラインド30Aに至り、該固定レチクルブラインド30Aの開口及び可動レチクルブラインド30B、さらには第2リレーレンズ28Bを通過してミラーMによって光路が垂直下方に折り曲げられた後、コンデンサレンズ32を経て、レチクルステージRST上に保持されたレチクルR上の矩形の照明領域IARを均一な照度分布で照明する。

**【0111】**

前記レチクルステージRST上にはレチクルRが装填され、不図示の静電チャック(又はバキュームチャック)等を介して吸着保持されている。レチクルステージRSTは、不図示の駆動系により水平面(XY平面)内で微小駆動(回転を含む)が可能な構成となっている。レチクルステージRSTは、例えばリニアモータ等を含む不図示のレチクルステージ駆動部によって、照明系の光軸IX(後述する投影光学系PLの光軸AXに一致)に垂直なXY平面内で微小駆動可能(Z軸回りの回転を含む)であるとともに、所定の走査方向(ここではY軸方向とする)に指定された走査速度で駆動可能となっている。

30

**【0112】**

レチクルステージRSTのXY平面内の位置は、レチクルステージRSTに設けられた又は形成された反射面を介してレチクルレーザ干渉計(以下、「レチクル干渉計」という)54Rによって、例えば0.5~1nm程度の分解能で常時検出される。レチクル干渉計54RからのレチクルステージRSTの位置情報は、本体チャンバ11の外部に設置された主制御装置50に供給される。主制御装置50は、レチクルステージRSTの位置情報に基づいてレチクルステージ駆動部(不図示)を介してレチクルステージRSTを駆動制御する。

40

**【0113】**

なお、レチクルRに用いる材質は、使用する光源によって使い分ける必要がある。すなわち、KrFエキシマレーザ、ArFエキシマレーザを光源とする場合は、合成石英、ホタル石等のフッ化物結晶、あるいはフッ素ドープ石英等を用いることができるが、F<sub>2</sub>レーザを用いる場合には、ホタル石等のフッ化物結晶や、フッ素ドープ石英等で形成する必要がある。

**【0114】**

50

前記投影光学系 P L は、例えば両側テレセントリックな縮小系が用いられている。この投影光学系 P L の投影倍率は例えば 1 / 4、1 / 5 あるいは 1 / 6 等である。このため、前記の如くして、照明光 E L によりレチクル R 上の照明領域 I A R が照明されると、投影光学系 P L を介してその照明領域 I A R 内のレチクル R の回路パターン等の縮小像がその照明領域 I A R と共役なウエハ W 上の照明光 E L の照射領域（露光領域）I A に形成される。

#### 【 0 1 1 5 】

投影光学系 P L としては、複数枚、例えば 1 0 ~ 2 0 枚程度の屈折光学素子（レンズ素子）1 3 のみから成る屈折系が用いられている。この投影光学系 P L を構成する複数枚のレンズ素子 1 3 のうち、物体面側（レチクル R 側）の複数枚（ここでは、説明を簡略化するために 5 枚とする）のレンズ素子 1 3<sub>1</sub>、1 3<sub>2</sub>、1 3<sub>3</sub>、1 3<sub>4</sub>、1 3<sub>5</sub> は、結像性能補正コントローラ 4 8 によって外部から駆動可能な可動レンズとなっている。レンズ素子 1 3<sub>1</sub> ~ 1 3<sub>5</sub> は、不図示の二重構造のレンズホルダをそれぞれ介して鏡筒に保持されている。これらレンズ素子 1 3<sub>1</sub> ~ 1 3<sub>5</sub> は、内側レンズホルダにそれぞれ保持され、これらの内側レンズホルダが不図示の駆動素子、例えば piezo 素子などにより重力方向に 3 点で外側レンズホルダに対して支持されている。そして、これらの駆動素子に対する印加電圧を独立して調整することにより、レンズ素子 1 3<sub>1</sub> ~ 1 3<sub>5</sub> のそれぞれを投影光学系 P L の光軸方向である Z 軸方向にシフト駆動、及び X Y 面に対する傾斜方向（すなわち X 軸回りの回転方向（ x ）及び Y 軸回りの回転方向（ y ））に駆動可能（チルト可能）な構成となっている。

#### 【 0 1 1 6 】

その他のレンズ素子 1 3 は、通常のレンズホルダを介して鏡筒に保持されている。なお、レンズ素子 1 3<sub>1</sub> ~ 1 3<sub>5</sub> に限らず、投影光学系 P L の瞳面近傍、又は像面側に配置されるレンズ、あるいは投影光学系 P L の収差、特にその非回転対称成分を補正する収差補正板（光学プレート）などを駆動可能に構成しても良い。更に、それらの駆動可能な光学素子の自由度（移動可能な方向）は 3 つに限られるものではなく 1 つ、2 つあるいは 4 つ以上でも良い。

#### 【 0 1 1 7 】

また、投影光学系 P L の瞳面の近傍には、開口数（N . A .）を所定範囲内で連続的に変更可能な瞳開口絞り 1 5 が設けられている。この瞳開口絞り 1 5 としては、例えばいわゆる虹彩絞りが用いられている。この瞳開口絞り 1 5 は、主制御装置 5 0 によって制御される。

#### 【 0 1 1 8 】

なお、照明光 E L として K r F エキシマレーザ光、A r F エキシマレーザ光を用いる場合には、投影光学系 P L を構成する各レンズ素子としてはホタル石等のフッ化物結晶や前述したフッ素ドーブ石英の他、合成石英をも用いることができるが、F<sub>2</sub>レーザ光を用いる場合には、この投影光学系 P L に使用されるレンズの材質は、全てホタル石等のフッ化物結晶やフッ素ドーブ石英が用いられる。

#### 【 0 1 1 9 】

前記ウエハステージ W S T 上には不図示のウエハホルダを介してウエハ W が静電吸着（あるいは真空吸着）等により保持されている。

#### 【 0 1 2 0 】

ウエハステージ W S T は、投影光学系 P L の下方に配置され、リニアモータ、ボイスコイルモータ（V C M）等から成る不図示のウエハステージ駆動部により、X Y 平面内方向及び Z 軸方向に駆動可能であり、X Y 面に対する傾斜方向（X 軸回りの回転方向（ x 方向）及び Y 軸回りの回転方向（ y 方向））にも微小駆動可能となっている。すなわち、ウエハステージ W S T は、走査方向（Y 軸方向）の移動のみならず、ウエハ W 上の複数のショット領域をそれぞれ露光領域 I A に対して相対移動して走査露光を行うことができるように、走査方向に直交する非走査方向（X 軸方向）にも移動可能に構成されており、これにより、ウエハ W 上の各ショット領域を走査（スキャン）露光する動作と、次ショット

10

20

30

40

50

の露光のための加速開始位置まで移動（ステップ）する動作とを繰り返すステップ・アンド・スキャン動作が可能となる。

【0121】

ウエハステージWSTのXY平面内での位置（Z軸回りの回転（z回転）を含む）は、ウエハステージWSTに設けられた又は形成された反射面を介してウエハレーザ干渉計（以下、「ウエハ干渉計」と略述する）54Wによって、例えば0.5～1nm程度の分解能で常時検出されている。ウエハ干渉計54Wは、測長軸を複数有する多軸干渉計を複数含み、これらの干渉計によって、ウエハステージWSTの回転（z回転（ヨーイング）、Y軸回りの回転であるy回転（ピッチング）、及びX軸回りの回転であるx回転（ローリング））が計測可能となっている。

10

【0122】

ウエハ干渉計54Wによって検出されたウエハステージWSTの位置情報（又は速度情報）は主制御装置50に供給される。主制御装置50は、ウエハステージWSTの上記位置情報（又は速度情報）に基づいて、不図示のウエハステージ駆動部を介してウエハステージWSTの位置を制御する。

【0123】

また、ウエハステージWST上には、後述するアライメント系ALGのいわゆるベースライン計測用の基準マーク等の基準マークが形成された基準マーク板FMが、その表面がほぼウエハWの表面と同一高さとなるように固定されている。

【0124】

また、ウエハステージWSTの+Y側（図1における紙面内右側）の側面には、着脱自在のポータブルな光学特性計測装置としての波面収差計測装置80が取り付けられている。

20

【0125】

この波面収差計測装置80は、図2に示されるように、中空の筐体82と、該筐体82の内部に所定の位置関係で配置された複数の光学素子から成る受光光学系84と、筐体82の内部の-X側端部に配置された受光部86とを備えている。

【0126】

前記筐体82は、XZ断面L字状で内部に空間が形成された部材から成り、その最上部（+Z方向端部）には、筐体82の上方からの光が筐体82の内部空間に向けて入射するように、平面視（上方から見て）円形の開口82aが形成されている。また、この開口82aを筐体82の内部側から覆うようにカバーガラス88が設けられている。カバーガラス88の上面には、クロム等の金属の蒸着により中央部に円形の開口を有する遮光膜が形成され、該遮光膜によって、投影光学系PLの波面収差の計測の際に周囲からの不要な光が受光光学系84に入射するのが遮られている。

30

【0127】

前記受光光学系84は、筐体82の内部のカバーガラス88の下方に、上から下に順次配置された、対物レンズ84a、リレーレンズ84b、折り曲げミラー84cと、該折り曲げミラー84cの-X側に順次配置されたコリメータレンズ84d、及びマイクロレンズアレイ84eから構成されている。折り曲げミラー84cは、45°で斜設されており、該折り曲げミラー84cによって、上方から鉛直下向きに対物レンズ84aに対して入射した光の光路がコリメータレンズ84dに向けて折り曲げられるようになっている。なお、この受光光学系84を構成する各光学部材は、筐体82の壁の内側に不図示の保持部材を介してそれぞれ固定されている。前記マイクロレンズアレイ84eは、複数の小さな凸レンズ（レンズ素子）が光路に対して直交する面内にアレイ状に配置されて構成されている。

40

【0128】

前記受光部86は、2次元CCD等から成る受光素子と、例えば電荷転送制御回路等の電気回路等から構成されている。受光素子は、対物レンズ84aに入射し、マイクロレンズアレイ84eから出射される光束のすべてを受光するのに十分な面積を有している。な

50

お、受光部 86 による計測データは、不図示の信号線を介して、あるいは無線送信にて主制御装置 50 に出力される。

【0129】

上述した波面収差計測装置 80 を用いることにより、投影光学系 PL の波面収差の計測を、オン・ボディ（すなわち、投影光学系 PL が露光装置に組み込まれた状態）にて行うことができる。なお、この波面収差計測装置 80 を用いた投影光学系 PL の波面収差の計測方法については後述する。

【0130】

図 1 に戻り、本実施形態の露光装置 100 には、主制御装置 50 によってオン・オフが制御される光源を有し、投影光学系 PL の結像面に向けて多数のピンホール又はスリットの像を形成するための結像光束を光軸 AX に対して斜め方向より照射する照射系 60a と、それらの結像光束のウエハ W 表面での反射光束を受光する受光系 60b とからなる射入射方式の多点焦点位置検出系（以下、単に「焦点位置検出系」と呼ぶ）が設けられている。なお、本実施形態の焦点位置検出系（60a、60b）と同様の多点焦点位置検出系の詳細な構成は、例えば特開平 6-283403 号公報及びこれに対応する米国特許第 5,448,332 号等に開示されている。上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

【0131】

なお、上記公報及び米国特許に記載の多点焦点位置検出系は、露光領域 IA 内で少なくとも非走査方向に離れて設定される複数点でそれぞれ投影光学系 PL の光軸 AX と平行な方向（Z 軸方向）に関するウエハ W の位置情報を検出するだけでなく、走査方向のウエハ W の起伏を先読みする機能等を有しているが、それらの機能は有していなくても良く、また、照射系 60a によって照射される光束の形状は、平行四辺形その他の形状であっても良い。

【0132】

主制御装置 50 では、走査露光時等に、受光系 60b からの焦点ずれ信号（デフォーカス信号）、例えば S カーブ信号に基づいて焦点ずれが零あるいは焦点深度内となるように、ウエハ W の Z 位置及び XY 面に対する傾斜をウエハステージ駆動部（不図示）を介して制御することにより、オートフォーカス（自動焦点合わせ）及びオートレベリングを実行する。また、主制御装置 50 では、後述する波面収差の計測の際に、焦点位置検出系（60a、60b）を用いて波面収差計測装置 80 の Z 位置の計測及び位置合わせを行う。このとき、必要に応じて波面収差計測装置 80 の傾斜計測も行うようにしても良い。

【0133】

さらに、露光装置 100 は、ウエハステージ WST 上に保持されたウエハ W 上のアライメントマーク及び基準マーク板 FM 上に形成された基準マークの位置計測等に用いられるオフ・アクシス（off-axis）方式のアライメント系 ALG を備えている。このアライメント系 ALG としては、例えばウエハ上のレジストを感光させないブロードバンドな検出光束を対象マークに照射し、その対象マークからの反射光により受光面に結像された対象マークの像と不図示の指標の像とを撮像素子（CCD 等）を用いて撮像し、それらの撮像信号を出力する画像処理方式の FIA（Field Image Alignment）系のセンサが用いられる。なお、FIA 系に限らず、コヒーレントな検出光を対象マークに照射し、その対象マークから発生する散乱光又は回折光を検出したり、その対象マークから発生する 2 つの回折光（例えば同次数）を干渉させて検出したりするアライメントセンサを単独であるいは適宜組み合わせることは勿論可能である。

【0134】

さらに、本実施形態の露光装置 100 では、図示は省略されているが、レチクル R の上方に、投影光学系 PL を介してレチクル R 上のレチクルマークと対応する基準マーク板上の基準マークとを同時に観察するための露光波長を用いた TTR（Through The Reticule）アライメント系から成る一対のレチクルアライメント検出系が設けられている。これらのレチクルアライメント検出系としては、例えば特開平 7-176468 号公報及びこ

10

20

30

40

50

れに対応する米国特許第5,646,413号などに開示されるものと同様の構成のものが用いられている。出願で指定した指定国又は選択した選択国の国内法令が許す限りにおいて、上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

【0135】

前記制御系は、図1中、前記主制御装置50によって主に構成される。主制御装置50は、CPU(中央演算処理装置)、ROM(リード・オンリ・メモリ)、RAM(ランダム・アクセス・メモリ)等からなるいわゆるワークステーション(又はマイクロコンピュータ)等から構成され、前述した種々の制御動作を行う他、装置全体を統括して制御する。主制御装置50は、例えば露光動作が的確に行われるように、例えば、ウエハステージWSTのショット間ステップング、露光タイミング等を統括して制御する。

10

【0136】

また、主制御装置50には、例えばハードディスクから成る記憶装置42、キーボード、マウス等のポインティングデバイス等を含んで構成される入力装置45及びCRTディスプレイ(又は液晶ディスプレイ)等の表示装置44が接続されている。また、主制御装置50には、LANなどの通信ネットワークを通じてワークステーションやパーソナルコンピュータ等のシミュレーション用コンピュータ46が接続されている。このシミュレーション用コンピュータ46には、露光装置100の光学モデルが設定された結像シミュレーションソフトウェア、すなわち結像シミュレータがインストールされている。

【0137】

次に、メンテナンス時などに行われる露光装置100における波面収差の計測方法について説明する。なお、以下の説明においては、説明の簡略化のため、波面収差計測装置80内の受光光学系84の収差は無視できるほど小さいものとする。

20

【0138】

通常露光時には、波面収差計測装置80は、ウエハステージWSTから取り外されているため、波面計測に際しては、まず、オペレータあるいはサービスエンジニア等(以下、適宜「オペレータ等」という)によりウエハステージWSTの側面に対して波面収差計測装置80を取り付ける作業が行われる。この取り付けに際しては、波面計測時に波面収差計測装置80が、ウエハステージWSTの移動ストローク内に収まるように、所定の基準面(ここでは+Y側の面)にボルトあるいはマグネット等を介して固定される。

【0139】

上記の取り付け終了後、オペレータ等による計測開始のコマンドの入力に応答して、主制御装置50では、アライメント系ALGの下方に波面収差計測装置80が位置するように、ウエハステージ駆動部(不図示)を介してウエハステージWSTを移動させる。そして、主制御装置50では、アライメント系ALGにより波面収差計測装置80に設けられた不図示の位置合わせマークを検出し、その検出結果とそのときのウエハ干渉計54Wの計測値とに基づいて位置合わせマークの位置座標を算出し、波面収差計測装置80の正確な位置を求める。そして、波面収差計測装置80の位置計測後、主制御装置50では以下のようにして波面収差の計測を実行する。

30

【0140】

まず、主制御装置50は、不図示のレチクルローダによりピンホールパターンが形成された不図示の計測用レチクル(以下、「ピンホールレチクル」と呼ぶ)をレチクルステージRST上にロードする。このピンホールレチクルは、そのパターン面の複数点にピンホール(ほぼ理想的な点光源となって球面波を発生するピンホール)が形成されたレチクルである。なお、例えば中心が投影光学系PLの光軸AXと一致するようにピンホールレチクルが設定されるとき、複数のピンホールは照明領域IAR内に配置され、かつその投影像が投影光学系PLの視野内で波面収差を計測すべき複数点(後述の第1~第n計測点)にそれぞれ形成されるようになっている。

40

【0141】

なお、ここで用いられるピンホールレチクルには、上面に拡散面を設けるなどして、投影光学系PLの瞳面のほぼ全面にピンホールパターンからの光を分布させることで、投影

50

光学系 P L の瞳面の全面で波面収差が計測されるようになっていているものとする。なお、本実施形態では投影光学系 P L の瞳面近傍に開口絞り 1 5 が設けられているので、実質的に開口絞り 1 5 で規定されるその瞳面で波面収差が計測されることになる。

【 0 1 4 2 】

ピンホールレチクルのロード後、主制御装置 5 0 では、前述のレチクルアライメント検出系を用いて、ピンホールレチクルに形成されたレチクルアライメントマークを検出し、その検出結果に基づいて、ピンホールレチクルを所定の位置に位置合わせする。これにより、ピンホールレチクルの中心と投影光学系 P L の光軸とがほぼ一致する。

【 0 1 4 3 】

この後、主制御装置 5 0 では、光源 1 6 に制御情報 T S を与えてレーザビーム L B を発光させる。これにより、照明光学系 1 2 からの照明光 E L が、ピンホールレチクルに照射される。そして、ピンホールレチクルの複数のピンホールから射出された光が投影光学系 P L を介して像面上に集光され、ピンホールの像が像面に結像される。

【 0 1 4 4 】

次に、主制御装置 5 0 は、ピンホールレチクル上のいずれかのピンホール（以下においては、着目するピンホールと呼ぶ）の像が結像する結像点に波面収差計測装置 8 0 の開口 8 2 a のほぼ中心が一致するように、ウエハ干渉計 5 4 W の計測値をモニタしつつ、ウエハステージ駆動部（不図示）を介してウエハステージ W S T を移動する。この際、主制御装置 5 0 は、焦点位置検出系（ 6 0 a , 6 0 b ）の検出結果に基づいて、ピンホール像が結像される像面に波面収差計測装置 8 0 のカバーガラス 8 8 の上面を一致させるべく、ウエハステージ駆動部（不図示）を介してウエハステージ W S T を Z 軸方向に微少駆動する。このとき、必要に応じてウエハステージ W S T の傾斜角も調整する。これにより、着目するピンホールの像光束がカバーガラス 8 8 の中央の開口を介して受光光学系 8 4 に入射し、受光部 8 6 を構成する受光素子によって受光される。

【 0 1 4 5 】

これを更に詳述すると、ピンホールレチクル上の着目するピンホールからは球面波が発生し、この球面波が、投影光学系 P L 、及び波面収差計測装置 8 0 の受光光学系 8 4 を構成する対物レンズ 8 4 a 、リレーレンズ 8 4 b 、ミラー 8 4 c 、コリメータレンズ 8 4 d を介して平行光束となって、マイクロレンズアレイ 8 4 e を照射する。これにより、投影光学系 P L の瞳面がマイクロレンズアレイ 8 4 e にリレーされ、分割される。そして、このマイクロレンズアレイ 8 4 e の各レンズ素子によってそれぞれの光が受光素子の受光面に集光され、該受光面にピンホールの像がそれぞれ結像される。

【 0 1 4 6 】

このとき、投影光学系 P L が、波面収差の無い理想的な光学系であるならば、投影光学系 P L の瞳面における波面は理想的な波面（ここでは平面）になり、その結果マイクロレンズアレイ 8 4 e に入射する平行光束が平面波となり、その波面は理想的な波面となる筈である。この場合、図 3 A に示されるように、マイクロレンズアレイ 8 4 e を構成する各レンズ素子の光軸上の位置にスポット像（以下、「スポット」とも呼ぶ）が結像する。

【 0 1 4 7 】

しかるに、投影光学系 P L には通常、波面収差が存在するため、マイクロレンズアレイ 8 4 e に入射する平行光束の波面は理想的な波面からずれ、そのずれ、すなわち波面の理想波面に対する傾きに応じて、図 3 B に示されるように、各スポットの結像位置がマイクロレンズアレイ 8 4 e の各レンズ素子の光軸上の位置からずれることとなる。この場合、各スポットの基準点（各レンズ素子の光軸上の位置）からの位置のずれは、波面の傾きに対応している。

【 0 1 4 8 】

そして、受光部 8 6 を構成する受光素子上の各集光点に入射した光（スポット像の光束）が受光素子でそれぞれ光電変換され、該光電変換信号が電気回路を介して主制御装置 5 0 に送られる。主制御装置 5 0 では、その光電変換信号に基づいて各スポットの結像位置を算出し、更に、その算出結果と既知の基準点の位置データとを用いて、位置ずれ（

10

20

30

40

50

( ) を算出して R A M に格納する。このとき、主制御装置 5 0 には、ウエハ干渉計 5 4 W のそのときの計測値 (  $X_i$  ,  $Y_i$  ) が供給されている。

【 0 1 4 9 】

上述のようにして、1つの着目するピンホール像の結像点における波面収差計測装置 8 0 による、スポット像の位置ずれの計測が終了すると、主制御装置 5 0 では、次のピンホール像の結像点に、波面収差計測装置 8 0 の開口 8 2 a のほぼ中心が一致するように、ウエハステージ W S T を移動する。この移動が終了すると、前述と同様にして、主制御装置 5 0 により、光源 1 6 からレーザビーム L B の発光が行われ、同様にして主制御装置 5 0 によって各スポットの結像位置が算出される。以後、他のピンホール像の結像点で同様の計測が順次行われる。

10

【 0 1 5 0 】

このようにして、必要な計測が終了した段階では、主制御装置 5 0 の R A M には、前述した各ピンホール像の結像点における位置ずれデータ ( , ) と、各結像点の座標データ (各ピンホール像の結像点における計測を行った際のウエハ干渉計 5 4 W の計測値 (  $X_i$  ,  $Y_i$  ) ) とが格納されている。なお、上記計測時に全てのピンホールに照明光 E L を同時に照射しても良いが、可動レチクルブラインド 3 0 B を用いて、レチクル上の着目するピンホールのみ、あるいは少なくとも着目するピンホールを含む一部領域のみが照明光 E L で照明されるように、例えばピンホール毎に、レチクル上での照明領域の位置や大きさなどを変更しても良い。

【 0 1 5 1 】

20

次に、主制御装置 5 0 では、R A M 内に格納されている各ピンホール像の結像点における位置ずれデータ ( , ) と、各結像点の座標データとに基づいて、以下に説明する原理に従ってピンホール像の結像点に対応する、すなわち投影光学系 P L の視野内の第 1 計測点 (評価点) ~ 第 n 計測点 (評価点) に対応する波面 (波面収差)、ここでは、後述する式 ( 3 ) のフリンジツェルニケ多項式 (以下、適宜「ツェルニケ多項式」と略述する) の各項 (ツェルニケ項) の係数、例えば第 1 項の係数  $Z_1$  ~ 第 3 7 項の係数  $Z_{37}$  を変換プログラムに従って演算する。本実施形態では、ツェルニケ多項式として、フリンジツェルニケ多項式を採りあげて、以下説明を行うものとする。

【 0 1 5 2 】

本実施形態では、上記の位置ずれ ( , ) に基づいて、変換プログラムに従った演算により投影光学系 P L の波面を求める。すなわち、位置ずれ ( , ) は、波面の理想波面に対する傾斜をそのまま反映した値になり、逆に位置ずれ ( , ) に基づいて波面を復元することができる。なお、上述した位置ずれ ( , ) と波面との物理的な関係から明らかのように、本実施形態における波面の算出原理は、周知の Shack-Hartmann の波面算出原理そのものである。

30

【 0 1 5 3 】

次に、上記の位置ずれに基づいて、波面を算出する方法について、簡単に説明する。

【 0 1 5 4 】

上述の如く、位置ずれ ( , ) は波面の傾きに対応しており、これを積分することにより波面の形状 (厳密には基準面 (理想波面) からのずれ) が求められる。波面 (波面の基準面からのずれ) の式を  $W(x, y)$  とし、比例係数を  $k$  とすると、次式 ( 1 )、( 2 ) のような関係式が成立する。

40

【 0 1 5 5 】

【数 1】

$$\Delta\xi = k \frac{\partial W}{\partial x} \quad \dots(1)$$

$$\Delta\eta = k \frac{\partial W}{\partial y} \quad \dots(2)$$

50

スポット位置のみでしか与えられていない波面の傾きをそのまま積分するのは容易ではないため、面形状を級数に展開して、これにフィットするものとする。この場合、級数は直交系を選ぶものとする。ツェルニケ多項式は軸対称な面の展開に適した級数で、円周方向は三角級数に展開する。すなわち、波面Wを極座標系(ρ, θ)で表すと、次式(3)のように展開できる。

【0156】  
【数2】

$$W(\rho, \theta) = \sum_i Z_i f_i(\rho, \theta) \quad \dots(3)$$

10

直交系であるから各項の係数Z<sub>i</sub>を独立に決定することができる。iを適当な値で切ることある種のフィルタリングを行うことに対応する。なお、一例として第1項～第37項までのf<sub>i</sub>(ρ, θ) (ρを独立変数とする動径多項式)を係数Z<sub>i</sub>とともに例示すると、次の表1ようになる。但し、表1中の第37項は、実際のツェルニケ多項式では、第49項に相当するが、本明細書では、i = 37の項(第37項)として取り扱うものとする。すなわち、本発明において、ツェルニケ多項式の項の数は、特に限定されるものではない。

【0157】  
【表1】

Z <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	Z <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>
Z <sub>1</sub>	1	Z <sub>19</sub>	(5ρ <sup>5</sup> -4ρ <sup>3</sup> ) cos 3θ
Z <sub>2</sub>	ρ cos θ	Z <sub>20</sub>	(5ρ <sup>5</sup> -4ρ <sup>3</sup> ) sin 3θ
Z <sub>3</sub>	ρ sin θ	Z <sub>21</sub>	(15ρ <sup>6</sup> -20ρ <sup>4</sup> +6ρ <sup>2</sup> ) cos 2θ
Z <sub>4</sub>	2ρ <sup>2</sup> -1	Z <sub>22</sub>	(15ρ <sup>6</sup> -20ρ <sup>4</sup> +6ρ <sup>2</sup> ) sin 2θ
Z <sub>5</sub>	ρ <sup>2</sup> cos 2θ	Z <sub>23</sub>	(35ρ <sup>7</sup> -60ρ <sup>5</sup> +30ρ <sup>3</sup> -4ρ) cos θ
Z <sub>6</sub>	ρ <sup>2</sup> sin 2θ	Z <sub>24</sub>	(35ρ <sup>7</sup> -60ρ <sup>5</sup> +30ρ <sup>3</sup> -4ρ) sin θ
Z <sub>7</sub>	(3ρ <sup>3</sup> -2ρ) cos θ	Z <sub>25</sub>	70ρ <sup>8</sup> -140ρ <sup>6</sup> +90ρ <sup>4</sup> -20ρ <sup>2</sup> +1
Z <sub>8</sub>	(3ρ <sup>3</sup> -2ρ) sin θ	Z <sub>26</sub>	ρ <sup>5</sup> cos 5θ
Z <sub>9</sub>	6ρ <sup>4</sup> -6ρ <sup>2</sup> +1	Z <sub>27</sub>	ρ <sup>5</sup> sin 5θ
Z <sub>10</sub>	ρ <sup>3</sup> cos 3θ	Z <sub>28</sub>	(6ρ <sup>6</sup> -5ρ <sup>4</sup> ) cos 4θ
Z <sub>11</sub>	ρ <sup>3</sup> sin 3θ	Z <sub>29</sub>	(6ρ <sup>6</sup> -5ρ <sup>4</sup> ) sin 4θ
Z <sub>12</sub>	(4ρ <sup>4</sup> -3ρ <sup>2</sup> ) cos 2θ	Z <sub>30</sub>	(21ρ <sup>7</sup> -30ρ <sup>5</sup> +10ρ <sup>3</sup> ) cos 3θ
Z <sub>13</sub>	(4ρ <sup>4</sup> -3ρ <sup>2</sup> ) sin 2θ	Z <sub>31</sub>	(21ρ <sup>7</sup> -30ρ <sup>5</sup> +10ρ <sup>3</sup> ) sin 3θ
Z <sub>14</sub>	(10ρ <sup>5</sup> -12ρ <sup>3</sup> +3ρ) cos θ	Z <sub>32</sub>	(56ρ <sup>8</sup> -105ρ <sup>6</sup> +60ρ <sup>4</sup> -10ρ <sup>2</sup> ) cos 2θ
Z <sub>15</sub>	(10ρ <sup>5</sup> -12ρ <sup>3</sup> +3ρ) sin θ	Z <sub>33</sub>	(56ρ <sup>8</sup> -105ρ <sup>6</sup> +60ρ <sup>4</sup> -10ρ <sup>2</sup> ) sin 2θ
Z <sub>16</sub>	20ρ <sup>6</sup> -30ρ <sup>4</sup> +12ρ <sup>2</sup> -1	Z <sub>34</sub>	(126ρ <sup>9</sup> -280ρ <sup>7</sup> +210ρ <sup>5</sup> -60ρ <sup>3</sup> +5ρ) cos θ
Z <sub>17</sub>	ρ <sup>4</sup> cos 4θ	Z <sub>35</sub>	(126ρ <sup>9</sup> -280ρ <sup>7</sup> +210ρ <sup>5</sup> -60ρ <sup>3</sup> +5ρ) sin θ
Z <sub>18</sub>	ρ <sup>4</sup> sin 4θ	Z <sub>36</sub>	252ρ <sup>10</sup> -630ρ <sup>8</sup> +560ρ <sup>6</sup> -210ρ <sup>4</sup> +30ρ <sup>2</sup> -1
		Z <sub>37</sub>	924ρ <sup>12</sup> -2772ρ <sup>10</sup> +3150ρ <sup>8</sup> -1680ρ <sup>6</sup> +420ρ <sup>4</sup> -42ρ <sup>2</sup> +1

20

30

40

実際には、その微分が上記の位置ずれとして検出されるので、フィッティングは微係数について行う必要がある。極座標系(x = ρ cos θ, y = ρ sin θ)では、次式(4)、(5)のように表される。

【0158】

【数3】

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial \rho} \cos \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial W}{\partial \theta} \sin \theta \quad \dots(4)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\partial W}{\partial \rho} \sin \theta + \frac{1}{\rho} \frac{\partial W}{\partial \theta} \cos \theta \quad \dots(5)$$

ツェルニケ多項式の微分形は直交系ではないので、フィッティングは最小二乗法で行う必要がある。1つのスポット像の結像点の情報(ずれ量)はXとY方向につき与えられるので、ピンホール数をn(nは、投影光学系PLの視野内の計測点(評価点)の数に対応しており、本実施形態では、説明の簡略化のためにnは例えば33とする)とすると、上記式(1)~(5)で与えられる観測方程式の数は2n(=66)となる。

10

【0159】

ツェルニケ多項式のそれぞれの項は光学収差に対応する。しかも低次の項(iの小さい項)は、ザイデル収差にほぼ対応する。ツェルニケ多項式を用いることにより、投影光学系PLの波面収差を求めることができる。

【0160】

上述のような原理に従って、変換プログラムの演算手順が決められており、この変換プログラムに従った演算処理により、投影光学系PLの視野内の第1計測点~第n計測点に対応する波面の情報(波面収差)、ここでは、ツェルニケ多項式の各項の係数、例えば第1項の係数Z<sub>1</sub>~第37項の係数Z<sub>37</sub>が求められる。

20

【0161】

前記憶装置42内には、投影光学系PLの波面収差変化表のデータベースが記憶されている。ここで、波面収差変化表とは、投影光学系PLと実質的に等価なモデルを用いて、シミュレーションを行い、このシミュレーション結果として得られた、パターンの投影像のウエハ上での形成状態を最適化するのに使用できる調整パラメータの単位調整量の変化と、投影光学系PLの視野内の複数の計測点それぞれに対応する結像性能、具体的には波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の第1項~第37項の係数の変動量との関係を示すデータを所定の規則に従って並べたデータ群から成る変化表である。

【0162】

本実施形態では、上記の調整パラメータとしては、可動レンズ13<sub>1</sub>, 13<sub>2</sub>, 13<sub>3</sub>, 13<sub>4</sub>, 13<sub>5</sub>の各自由度方向(駆動可能な方向)の駆動量Z<sub>1</sub>, X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, X<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, X<sub>3</sub>, Y<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub>, X<sub>4</sub>, Y<sub>4</sub>, Z<sub>5</sub>, X<sub>5</sub>, Y<sub>5</sub>と、ウエハW表面(ウエハステージWST)の3自由度方向の駆動量Wz, Wx, Wy、及び照明光ELの波長のシフト量の合計19のパラメータが用いられる。

30

【0163】

ここで、上記の波面収差変化表のデータベースの作成手順について、簡単に説明する。まず、特定の光学ソフトがインストールされているシミュレーション用コンピュータに、露光装置100の光学条件(例えば、投影光学系PLの設計値(開口数N.A.や各レンズデータなど)、コヒーレンスファクタ値(照明)又は照明光学系の開口数N.A.、及び照明光ELの波長(露光波長)等)を入力する。次に、シミュレーション用コンピュータ46に、投影光学系PLの視野内の任意の第1計測点のデータを入力する。

40

【0164】

次いで、可動レンズ13<sub>1</sub>~13<sub>5</sub>の各自由度方向(可動方向)、ウエハW表面の上記各自由度方向、照明光の波長のシフト量のそれぞれについての単位量のデータを入力する。例えば可動レンズ13<sub>1</sub>をZ方向シフトの+方向に関して単位量だけ駆動するという指令を入力すると、シミュレーション用コンピュータ46により、投影光学系PLの視野内の予め定めた第1計測点についての第1波面の理想波面からの変化量のデータ、例えばツェルニケ多項式の各項(例えば第1項~第37項)の係数の変化量が算出され、その変化量のデータがシミュレーション用コンピュータ46のディスプレイの画面上に表示されると

50

ともに、その変化量がパラメータ  $PARA 1 P 1$  としてメモリに記憶される。

【 0 1 6 5 】

次いで、可動レンズ  $1 3_1$  を Y 方向チルト ( x 軸回りの回転 x ) の + 方向に関して単位量だけ駆動するという指令を入力すると、シミュレーション用コンピュータ 4 6 により、第 1 計測点についての第 2 波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の上記各項の係数の変化量が算出され、その変化量のデータが上記ディスプレイの画面上に表示されるとともに、その変化量がパラメータ  $PARA 2 P 1$  としてメモリに記憶される。

【 0 1 6 6 】

次いで、可動レンズ  $1 3_1$  を X 方向チルト ( y 軸回りの回転 y ) の + 方向に関して単位量だけ駆動するという指令を入力すると、シミュレーション用コンピュータ 4 6 により、第 1 計測点についての第 3 波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の上記各項の係数の変化量が算出され、その変化量のデータが上記ディスプレイの画面上に表示されるとともに、その変化量がパラメータ  $PARA 3 P 1$  としてメモリに記憶される。

【 0 1 6 7 】

以後、上記と同様の手順で、第 2 計測点 ~ 第 n 計測点までの各計測点の入力が行われ、可動レンズ  $1 3_1$  の Z 方向シフト、Y 方向チルト、X 方向チルトの指令入力が行われる度毎に、シミュレーション用コンピュータ 4 6 によって各計測点における第 1 波面、第 2 波面、第 3 波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の上記各項の係数の変化量が算出され、各変化量のデータがディスプレイの画面上に表示されるとともに、パラメータ  $PARA 1 P 2$  ,  $PARA 2 P 2$  ,  $PARA 3 P 2$  , ..... ,  $PARA 1 P n$  ,  $PARA 2 P n$  ,  $PARA 3 P n$  としてメモリに記憶される。

【 0 1 6 8 】

他の可動レンズ  $1 3_2$  ,  $1 3_3$  ,  $1 3_4$  ,  $1 3_5$  についても、上記と同様の手順で、各計測点の入力と、各自由度方向に関してそれぞれ単位量だけ + 方向に駆動する旨の指令入力が行われ、これに回答してシミュレーション用コンピュータ 4 6 により、可動レンズ  $1 3_2$  ,  $1 3_3$  ,  $1 3_4$  ,  $1 3_5$  を各自由度方向に単位量だけ駆動した際の第 1 ~ 第 n 計測点のそれぞれについての波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の各項の変化量が算出され、パラメータ (  $PARA 4 P 1$  ,  $PARA 5 P 1$  ,  $PARA 6 P 1$  , ..... ,  $PARA 1 5 P 1$  )、パラメータ (  $PARA 4 P 2$  ,  $PARA 5 P 2$  ,  $PARA 6 P 2$  , ..... ,  $PARA 1 5 P 2$  )、.....、パラメータ (  $PARA 4 P n$  ,  $PARA 5 P n$  ,  $PARA 6 P n$  , ..... ,  $PARA 1 5 P n$  ) がメモリ内に記憶される。

【 0 1 6 9 】

また、ウエハ W についても、上記と同様の手順で、各計測点の入力と、各自由度方向に関してそれぞれ単位量だけ + 方向に駆動する旨の指令入力が行われ、これに回答してシミュレーション用コンピュータ 4 6 により、ウエハ W を Z、 x、 y の各自由度方向に単位量だけ駆動した際の第 1 ~ 第 n 計測点のそれぞれについての波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の各項の変化量が算出され、パラメータ (  $PARA 1 6 P 1$  ,  $PARA 1 7 P 1$  ,  $PARA 1 8 P 1$  )、パラメータ (  $PARA 1 6 P 2$  ,  $PARA 1 7 P 2$  ,  $PARA 1 8 P 2$  )、.....、パラメータ (  $PARA 1 6 P n$  ,  $PARA 1 7 P n$  ,  $PARA 1 8 P n$  ) がメモリ内に記憶される。

【 0 1 7 0 】

さらに、波長シフトに関して、上記と同様の手順で、各計測点の入力と、単位量だけ + 方向に波長をシフトする旨の指令入力が行われ、これに回答してシミュレーション用コンピュータにより、波長を + 方向に単位量だけシフトした際の第 1 ~ 第 n 計測点のそれぞれについての波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の各項の変化量が算出され、  $PARA 1 9 P 1$  ,  $PARA 1 9 P 2$  , ..... ,  $PARA 1 9 P n$  がメモリ内に記憶される。

【 0 1 7 1 】

ここで、上記パラメータ  $PARA i P j$  (  $i = 1 \sim 19$  ,  $j = 1 \sim n$  ) のそれぞれは、3 7 行 1 列の列マトリックス ( 縦ベクトル ) である。すなわち、  $n = 33$  とすると、調整パラメータ  $PARA 1$  について、次式 ( 6 ) のようになる。なお、パラメータ  $PARA i$

10

20

30

40

50

P<sub>j</sub> は、いずれも列マトリックスであるが、次式(6)以下の式では、便宜上、行マトリックスであるかのような表現形式を採用している。

【0172】

【数4】

$$\left. \begin{aligned} PARA1P1 &= [Z_{1,1} \ Z_{1,2} \ \cdots \ Z_{1,37}] \\ PARA1P2 &= [Z_{2,1} \ Z_{2,2} \ \cdots \ Z_{2,37}] \\ &\vdots \\ PARA1Pn &= [Z_{33,1} \ Z_{33,2} \ \cdots \ Z_{33,37}] \end{aligned} \right\} \dots(6)$$

10

また、調整パラメータ PARA2 について、次式(7)のようになる。

【0173】

【数5】

$$\left. \begin{aligned} PARA2P1 &= [Z_{1,1} \ Z_{1,2} \ \cdots \ Z_{1,37}] \\ PARA2P2 &= [Z_{2,1} \ Z_{2,2} \ \cdots \ Z_{2,37}] \\ &\vdots \\ PARA2Pn &= [Z_{33,1} \ Z_{33,2} \ \cdots \ Z_{33,37}] \end{aligned} \right\} \dots(7)$$

20

同様に、他の調整パラメータ PARA3 ~ PARA19 についても、次式(8)のようになる。

【0174】

【数6】

$$\left. \begin{aligned} PARA3P1 &= [Z_{1,1} \ Z_{1,2} \ \cdots \ Z_{1,37}] \\ PARA3P2 &= [Z_{2,1} \ Z_{2,2} \ \cdots \ Z_{2,37}] \\ &\vdots \\ PARA3Pn &= [Z_{33,1} \ Z_{33,2} \ \cdots \ Z_{33,37}] \\ &\vdots \\ PARA19P1 &= [Z_{1,1} \ Z_{1,2} \ \cdots \ Z_{1,37}] \\ PARA19P2 &= [Z_{2,1} \ Z_{2,2} \ \cdots \ Z_{2,37}] \\ &\vdots \\ PARA19Pn &= [Z_{33,1} \ Z_{33,2} \ \cdots \ Z_{33,37}] \end{aligned} \right\} \dots(8)$$

30

そして、このようにしてメモリ内に記憶されたツェルニケ多項式の各項の係数の変化量から成る列マトリックス(縦ベクトル) PARA1P1 ~ PARA19Pn は、調整パラメータ毎に纏められ、19個の調整パラメータ毎の波面収差変化表として並べ替えが行われる。その結果、列マトリックス(縦ベクトル) PARA1P1 ~ PARA19Pn を要素とする次式(9)で示されるマトリックス(行列)Oが作成される。なお、式(9)では、m = 19である。

40

【0175】

【数7】

$$O = \begin{bmatrix} PARA1P1 & PARA2P1 & \dots & \dots & PARAmP1 \\ PARA1P2 & PARA2P2 & \dots & \dots & PARAmP2 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ PARA1Pn & PARA2Pn & \dots & \dots & PARAmPn \end{bmatrix} \dots(9)$$

10

そして、このようにして作成された、投影光学系 PL の波面収差変化表から成るデータベースが、記憶装置 42 の内部に格納されている。

【0176】

次に、本実施形態の露光装置 100 のメンテナンス時などにおいて行われる、投影光学系 PL によるパターン像の結像状態を調整するための、可動レンズ 13<sub>1</sub> ~ 13<sub>5</sub> などの前述の 19 個の調整パラメータの設定方法、すなわち投影光学系 PL の通常の調整方法について、その原理説明を含めて詳述する。

【0177】

まず、前述した手順で投影光学系 PL の波面収差を、波面収差計測装置 80 を用いて計測する。その計測結果、すなわち投影光学系 PL の視野内の第 1 計測点（評価点）~ 第 n 計測点（評価点）に対応する波面（波面収差）のデータ、すなわちツェルニケ多項式の各項、例えば第 1 項の係数 Z<sub>1</sub> ~ 第 37 項の係数 Z<sub>37</sub> が求められ、主制御装置 50 の RAM などのメモリ内に記憶される。

20

【0178】

以下の説明においては、第 1 計測点 ~ 第 n 計測点に対応する波面（波面収差）のデータを、次式（10）のような列マトリックス Q で表現する。

【0179】

【数8】

$$Q = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \dots(10)$$

30

なお、上式（10）において、マトリックス Q の要素 P<sub>1</sub> ~ P<sub>n</sub> は、それぞれがツェルニケ多項式の第 1 項 ~ 第 37 項の係数（Z<sub>1</sub> ~ Z<sub>37</sub>）から成る列マトリックス（縦ベクトル）である。

40

【0180】

次に、主制御装置 50 により、次のようにして前述した可動レンズ 13<sub>1</sub> ~ 13<sub>5</sub> の各自由度方向の調整量、ウエハ W の各自由度方向の調整量、照明光 EL の波長シフト量が演算される。

【0181】

すなわち、第 1 計測点 ~ 第 n 計測点に対応する波面（波面収差）のデータ Q と、前述したデータベース（マトリックス O）と、前述の 19 個の調整量 P との間には、次式（11）のような関係が成立する。

【0182】

$$Q = O \cdot P \dots\dots (11)$$

50

上式(11)において、Pは、次式(12)で表されるm個、すなわち19個の要素から成る列マトリックス(すなわち縦ベクトル)である。

【0183】

【数9】

$$P = \begin{bmatrix} ADJ1 \\ ADJ2 \\ \vdots \\ \vdots \\ ADJm \end{bmatrix} \dots(12)$$

10

従って、上式(12)より、次式(13)の演算を行うことにより、すなわち最小二乗法により、Pの各要素ADJ1~ADJm、すなわち可動レンズ131~135の各自由度方向の調整量(目標調整量)、ウエハWの各自由度方向の調整量(目標調整量)、及び照明光ELの波長シフト量(目標シフト量)を求めることができる。

【0184】

$$P = (O^T \cdot O)^{-1} \cdot O^T \cdot Q \dots\dots(13)$$

上式(13)において、O<sup>T</sup>は、行列Oの転置マトリックスであり、(O<sup>T</sup>・O)<sup>-1</sup>は、(O<sup>T</sup>・O)の逆マトリックスである。

20

【0185】

従って、主制御装置50は、記憶装置42内のデータベースをRAM内に順次読み込みつつ、調整量ADJ1~ADJmを算出する。

【0186】

次に、主制御装置50では、記憶装置42に記憶された調整量ADJ1~ADJ15に従って、可動レンズ131~135を各自由度方向に駆動すべき旨の指令値を、結像性能補正コントローラ48に与える。これにより、結像性能補正コントローラ48により、可動レンズ131~135をそれぞれの自由度方向に駆動する各駆動素子に対する印加電圧が制御され、可動レンズ131~135の位置及び姿勢の少なくとも一方がほぼ同時に調整される。これと同時に、主制御装置50は、実際の走査露光時には、露光領域IA内でウエハWが、常に調整量ADJ16~ADJ18によって調整されたのと等価な姿勢に保たれるように、ウエハWをZ、x、yの各自由度方向に駆動するための指令値を、ウエハステージ駆動部(不図示)に与えて、ウエハステージWSTを駆動する。さらに、上記の各動作と同時に、主制御装置50は、調整量ADJ19に従って光源16に指令を与え、照明光ELの波長をシフトする。これにより、投影光学系PLの光学特性、例えばディストーション、像面湾曲、コマ収差、球面収差、及び非点収差等が補正される。なお、コマ収差、球面収差、及び非点収差については、低次のみならず高次の収差をも補正可能である。

30

【0187】

次に、本実施形態の露光装置100で行われる直交2軸方向のラインパターンの像同士の線幅差の調整を目的とする、投影光学系PLの調整方法について、図4のフローチャートに沿って、かつ適宜他の図面を参照しつつ説明する。

40

【0188】

まず、図4のステップ102において、前述した手順で投影光学系PLの波面収差が、波面収差計測装置80を用いて計測され、その計測結果、すなわち投影光学系PLの視野内のn個(ここではn=33とする)の計測点(評価点)における、ツェルニケ多項式の各項、例えば第1項の係数Z1~第37項の係数Z37が求められ、主制御装置50のRAMなどのメモリ内に記憶される。

【0189】

次のステップ104では、次に説明する計測用レチクルR<sub>T</sub>(以下、「レチクルR<sub>T</sub>」と

50

略述する)がレチクルステージRST上にロードされるとともに、計測用ウエハ(便宜上ウエハ $W_T$ と呼ぶ)がウエハステージWST上にロードされる。かかるレチクル $R_T$ のロードとウエハ $W_T$ のロードは、主制御装置50の指示の下、不図示のレチクルローダ、ウエハローダによって行われる。

【0190】

ここで、レチクル $R_T$ について、図5に基づいて説明する。この図5は、レチクル $R_T$ を、パターン面側から見た平面図である。この図5に示されるように、レチクル $R_T$ は、正方形のガラス基板から成り、そのパターン面の中央部に、遮光帯SBで囲まれる、照明領域IARとほぼ同様の形状を有する長方形のパターン領域PAが形成されている。パターン領域PAの内部には、合計33個の計測用パターン $MP_1 \sim MP_{33}$ が形成されている。各計測用パターン $MP_j$ ( $j = 1 \sim 33$ )は、例えばレチクル $R_T$ (パターン領域PA)の中心が投影光学系PLの光軸AXと一致するときに、前述の波面収差が計測される投影光学系PLの有効視野内の各計測点(評価点)に対応する位置に配置されるようにその位置関係が設定されている。

10

【0191】

各計測用パターン $MP_j$ は、図5に示されるように、Y軸方向に延びる設計上の線幅が例えば600nmの第1ラインパターンと、X軸方向に延びる設計上の線幅が例えば600nmの第2ラインパターンとを含む。投影光学系PLの投影倍率を1/4として、これら第1ラインパターンと第2ラインパターンとをウエハ上に転写すると、投影光学系PLに球面収差、非点収差などの諸収差が存在しない理想的な状態では、第1ラインパターンと第2ラインパターンの像として、線幅150nmのラインパターン像がそれぞれ得られることとなる。

20

【0192】

また、パターン領域PAの中心(レチクルセンタに一致)を通るX軸上のパターン領域PAの両外側には、レチクルアライメントマークM1、M2が形成されている。このレチクル $R_T$ は、レチクルステージRST上にロードされた状態では、パターン面(図5における紙面手前側の面)が、投影光学系PLに対向する側の面となる。

【0193】

図5に戻り、次のステップ106では、レチクルアライメントが行われる。このレチクルアライメントは、例えば特開平7-176468号公報及びこれに対応する米国特許第5,646,413号などに詳細に開示されるように、主制御装置50が、前述のレチクルアライメント検出系を用いて、レチクル $R_T$ に形成されたレチクルアライメントマークM1、M2とこれらに対応してウエハステージWST上の基準マーク板FM上に形成された基準マークとの位置ずれをそれぞれ検出し、その検出結果に基づいて、位置ずれがともに最小になるように、レチクルステージRSTのXY面内の位置(z回転を含む)を調整することにより行われる。このレチクルアライメントにより、レチクル $R_T$ の中心と投影光学系PLの光軸とがほぼ一致する。

30

【0194】

次のステップ108では、所定の照明条件下で照明領域IAR内に配置されたレチクル $R_T$ の各計測用パターン $MP_j$ が投影光学系PLを介してウエハ $W_T$ 上に、レチクルステージRST及びウエハステージWSTが静止したまま転写され、パターン領域PA内の計測用パターン $MP_j$ の像(潜像)が、ウエハ $W_T$ 表面に塗布されたポジレジスト層に形成される。なお、レチクル $R_T$ 上のパターン領域PAの転写に先立って、主制御装置50では、焦点位置検出系(60a, 60b)の検出結果に基づいて、計測用パターン $MP_j$ の像が結像される像面にウエハ $W_T$ の表面を一致させるべく、ウエハステージ駆動部(不図示)を介してウエハステージWSTをZ軸方向に微少駆動し、必要に応じてウエハステージWSTの傾斜角も調整する。なお、ウエハステージWSTをステップ移動させて、ウエハ $W_T$ 上の複数の領域にレチクル $R_T$ のパターン領域PAを、順次転写しても勿論良い。

40

【0195】

次のステップ110では、上記のレチクル $R_T$ 上の計測用パターン $MP_j$ が転写されたウ

50

エハ $W_T$ が、主制御装置50からの指示に基づき、ウエハステージ $WST$ からアンロードされ、露光装置100にインラインにて接続されている不図示のレジスト塗布現像装置(コータ・デベロッパ)に不図示の搬送系によって送られる。

【0196】

次のステップ112では、主制御装置50が不図示のコータ・デベロッパの制御系に指示を与え、この指示に基づいて不図示のコータ・デベロッパによってウエハ $W_T$ 上に計測用パターン $MP_j$ のレジスト像が形成される。

【0197】

次のステップ114では、その現像後のウエハ $W_T$ が、前述と同様にして再びウエハステージ $WST$ 上にロードされる。

【0198】

次のステップ116では、ウエハ $W_T$ 上の計測用パターン $MP_j$ のレジスト像の線幅計測が行われる。この線幅計測は、一例として、主制御装置50により、ウエハステージ $WST$ を $XY$ 面内で移動しつつ、ウエハ $W_T$ 上の少なくとも1つの計測用パターン $MP_j$ のレジスト像を、アライメント系 $ALG$ を用いて順次撮像し、その撮像の結果得られた撮像信号に基づいて所定の処理(演算を含む)を行うことにより行われる。この結果、投影光学系 $PL$ の評価点(計測点)毎、すなわち計測用パターン $MP_j$ 毎に第1ラインパターンの像(この場合レジスト像)の線幅である第1の線幅 $L_1$ と第2ラインパターンの像(この場合レジスト像)の線幅である第2の線幅 $L_2$ が求められ、 $RAM$ などのメモリ内に格納される。

【0199】

次のステップ118では、主制御装置50は、上で求めた各計測用パターン $MP_j$ についての線幅 $L_1$ と線幅 $L_2$ とに基づいて、各計測用パターン $MP_j$ についての線幅差 $L = L_1 - L_2$ を求め、 $RAM$ などのメモリ内に格納する。

【0200】

ここで、ウエハ $W_T$ 上の複数の領域について、上記の計測用パターン $MP_j$ の転写、レジスト像の形成が行われている場合には、複数の領域のそれぞれについて、上記の線幅計測、線幅差の算出が行われる。この場合、複数の領域のそれぞれから得られた各計測用パターン $MP_j$ についての線幅差の例えば単純平均値を、各計測用パターン $MP_j$ についての線幅差とすれば良い。かかる場合には、平均化効果により、計測誤差が低減され、各計測用パターン $MP_j$ についての線幅差(すなわち第1ラインパターン(縦線パターン)の像の線幅と第2ラインパターン(横線パターン)の像の線幅との差(以下、「縦横線の線幅差」とも呼ぶ))をより精度良く求めることができる。

【0201】

次のステップ120では、評価点毎に縦横線の線幅差 $L$ と、ツェルニケ多項式の第12項の係数 $Z_{12}$ の値(大きさ)とに応じて、第9項の係数 $Z_9$ を設定する。

【0202】

ここでは、いずれの評価点についても、波面収差の計測結果として得られた第12項の係数 $Z_{12}$ は零でない、すなわち表1中に4次(の次数が4次) $\cos 2$ 成分として表される高次非点収差が存在していたものとする。これは、図6のシミュレーション結果に示されるように、 $Z_{12}$ が零、すなわち $Z_{12} = 0m$ の場合、4次0成分である第9項の係数 $Z_9$ の大きさの如何にかかわらず、瞳面内の波面はいずれの方向についても同様の乱れ方になっている。このことは、 $Z_{12} = 0$ 、すなわち図6中の上段(図6A~図6C)では、いずれの図面にも複数の同心円から成る等高線図形が描かれていることからわかる。

【0203】

すなわち、 $Z_{12}$ が零では、ここで目的にしている縦横線の線幅差の制御(調整)は、困難であるから、いずれの評価点についても、波面収差の計測結果として得られた第12項の係数 $Z_{12}$ は零でないものとしたのである。現実の投影光学系では、視野内のいずれの評価点においても、波面収差を展開したツェルニケ多項式の第12項の係数 $Z_{12}$ は零でないことが通常であり、このような仮定は、実情にあっているものと言える。

10

20

30

40

50

## 【 0 2 0 4 】

また、本実施形態において、第 9 項の係数  $Z_9$  を設定するとは、次のような処理を行うことを意味する。

## 【 0 2 0 5 】

すなわち、評価点毎に、縦横線の線幅差  $L$  と、ツェルニケ多項式の第 12 項の係数  $Z_{12}$  の値（大きさ）とに応じて、所定の演算を行い、第 9 項の係数  $Z_9$  の変化量の目標値  $r_1$ 、 $r_2$ 、……、 $r_n$  ( $n = 33$ ) を算出し（この算出方法の根拠については後述する）、その他の項の変化量の目標値を零とする次式（14）で表されるような波面収差の変化量の目標値  $Q'$  を算出する。

## 【 0 2 0 6 】

## 【 数 1 0 】

$$Q' = \begin{bmatrix} P_1' \\ P_2' \\ \vdots \\ \vdots \\ P_n' \end{bmatrix} \quad \dots(14)$$

10

上式（14）において、各要素  $P_1'$ 、 $P_2'$ 、……、 $P_n'$  ( $n = 33$ ) は、それぞれが、次式（15<sub>1</sub>）、（15<sub>2</sub>）、……、（15<sub>n</sub>）で表される 37 行 1 列の列マトリックス（列ベクトル）である。

20

## 【 0 2 0 7 】

【数 1 1】

$$P_1' = \begin{bmatrix} Z_{1,1} \\ \vdots \\ Z_{1,8} \\ Z_{1,9} \\ Z_{1,10} \\ \vdots \\ Z_{1,37} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ r_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \dots(15_1)$$

10

$$P_2' = \begin{bmatrix} Z_{2,1} \\ \vdots \\ Z_{2,8} \\ Z_{2,9} \\ Z_{2,10} \\ \vdots \\ Z_{2,37} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ r_2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \dots(15_2)$$

20

⋮  
⋮

$$P_n' = \begin{bmatrix} Z_{33,1} \\ \vdots \\ Z_{33,8} \\ Z_{33,9} \\ Z_{33,10} \\ \vdots \\ Z_{33,37} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ r_{33} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \dots(15_n)$$

30

上記の式(15<sub>1</sub>)、(15<sub>2</sub>)、……、(15<sub>n</sub>)からも分かるように、各要素 P<sub>1</sub>'、P<sub>2</sub>'、……、P<sub>n</sub>' は、各評価点(計測点)における、ツェルニケ多項式の第9項以外の係数が全て零で、第9項の係数が r<sub>j</sub> (j = 1 ~ 33) である37行1列の列マトリックス(列ベクトル)であると見なすことができる。

【0208】

従って、この場合の各調整パラメータの調整量を列マトリックス P' であらわすと、前述のマトリックス O を用いて、次式(16)の関係が成立する。

【0209】

$$Q' = O \cdot P' \dots\dots (16)$$

40

上式(16)において、P' は、次式(17)で示される列マトリックスである。

【0210】

【数 1 2】

$$P' = \begin{bmatrix} ADJ1 \\ ADJ2 \\ \vdots \\ \vdots \\ ADJm \end{bmatrix} \dots(17)$$

次のステップ 1 2 2 では、主制御装置 5 0 が、上式 ( 1 6 ) を最小二乗法で解いて、各調整量からなる列マトリックス  $P'$  を求める。すなわち、次式 ( 1 8 ) の演算を行う。

【 0 2 1 1】

$$P' = (O^T \cdot O)^{-1} \cdot O^T \cdot Q' \dots\dots (18)$$

次のステップ 1 2 4 では、主制御装置 5 0 が、上で算出した  $P'$ 、すなわち調整量  $ADJ1 \sim ADJ15$ 、 $ADJ19$  に従って、前述と同様にして可動レンズ  $13_1 \sim 13_5$  などの調整各部を制御して投影光学系  $PL$  等を調整した後、一連の処理を終了する。なお、ウエハの位置及び姿勢に関する調整量  $ADJ16 \sim$  調整量  $18$  については、後述する走査露光時のウエハステージ  $WST$  の位置制御に用いるため、 $RAM$  又は記憶装置  $44$  に記憶しておく。これにより、投影光学系  $PL$  の視野内の  $33$  個の評価点における波面収差、具体的にはツェルニケ多項式の第 9 項の係数が  $r_j$  分だけ変動するような投影光学系  $PL$  の調整が終了する。

【 0 2 1 2】

この結果、調整が終了した投影光学系  $PL$  を用いて、縦線 (  $V$  線 ) パターンと横線 (  $H$  線 ) パターンとが混在するレチクル  $R$  上の回路パターンをウエハ  $W$  上に転写することにより、それらの縦線 (  $V$  線 ) パターンの像と横線 (  $H$  線 ) パターンの像との線幅差 ( 縦横線の線幅差 ) が設計値に近づくように、例えば零に近づくように補正される。

【 0 2 1 3】

ここで、上述した投影光学系  $PL$  の調整により、縦横線の線幅差を補正できる理由について詳述する。

【 0 2 1 4】

図 6 の下段 ( 図 6 D ~ 図 6 F ) には、高次非点収差項であるツェルニケ多項式の第 1 2 項の係数  $Z_{12} = + 20 m$  の場合の、低次球面収差項であるツェルニケ多項式の第 9 項の係数  $Z_9$  の変化に応じた瞳面内の波面の変化の様子 ( シミュレーション結果 ) が示されている。この内、図 6 D は、 $Z_9 = - 20 m$  の場合を示し、図 6 E は、 $Z_9 = 0 m$  の場合を示し、図 6 F は、 $Z_9 = + 20 m$  の場合を示す。

【 0 2 1 5】

これらの図から明らかなように、第 1 2 項成分が零でないときに第 9 項を変化させると、足し合わされた波面の形状は、縦方向と横方向とで異なる。

【 0 2 1 6】

第 1 2 項の符号が正のとき、例えば図 6 E に示されるように、瞳の左右は位相が正、上下は位相が負となる。一方、第 9 項の符号が正のとき、例えば図 6 C に示されるように、瞳の外周縁部は位相が正となり、第 9 項の符号が負のときは、例えば図 6 A に示されるように、瞳の外周縁部は位相が負となる。従って、第 1 2 項の符号が正のとき、第 9 項の符号が正なら、瞳の左右では第 1 2 項による位相変化と第 9 項による位相変化はともに正方向で強め合うが、瞳の上下では第 1 2 項による位相変化は負で、第 9 項による位相変化は正なので互いに弱め合う。この場合、例えば図 6 F に示されるように瞳の左右方向で波面が大きく乱れ、上下方向の波面の乱れが小さくなる。

【 0 2 1 7】

ここで、レチクル上の縦線 (  $V$  線 ) パターンは横方向に空間周波数成分を持つため、縦線 (  $V$  線 ) パターンからは左右方向に回折光が発生し、横線 (  $H$  線 ) パターンは、縦方向

10

20

30

40

50

に空間周波数成分を持つため、横線（H線）パターンからは上下方向に回折光が発生する。

#### 【0218】

従って、上述した如く、第9項と第12項の符号が等しい場合（図6Fのような場合）には位相変化が大きい左右方向に回折光が発生する縦線パターンの像のコントラストが低くなり、線幅が細くなる。これに対して、位相変化が小さい上下方向に回折光が発生する横線パターンの像のコントラスト低下は殆どないので、線幅はほぼ設計値通りになる。この結果、縦横線の線幅差は、負の値になる。

#### 【0219】

上記と反対に、第12項の符号が正のとき、第9項の符号が負なら、瞳の左右では第12項による位相変化は正で、第9項による位相変化は負なので互いに弱め合うが、瞳の上下では第12項による位相変化と第9項による位相変化はともに負で強め合う。この場合、例えば図6Dに示されるような瞳面内の波面分布となる。この場合には位相変化が大きい上下方向に回折光が発生する横線パターンの像のコントラストが低くなり、線幅が細くなる。これに対して、位相変化が小さい左右方向に回折光が発生する縦線パターンの像のコントラスト低下は殆どないので、線幅はほぼ設計値通りになる。この結果、縦横線の線幅差は、正の値になる。

#### 【0220】

以上のことより、第9項と第12項がともに零でないとき、瞳の上下方向と左右方向の波面の乱れ方は、第9項と第12項の符号の正負に応じて異なり、この点に着目して、第12項の値を固定したままの状態、比較的調整が容易な第9項（低次球面収差成分）を調整することにより、縦横線の線幅差を調整できることがわかる。

#### 【0221】

上述した第9項（の次数が4次の0成分）と第12項（の次数が4次の2成分（ $\cos^2$ 成分））の位相変化の方向差は、の次数を下げて、第4項（の次数が2次の0成分のデフォーカス項：係数 $Z_4$ ）と第5項（の次数が2次の2成分（ $\cos^2$ 成分）の低次非点収差項：係数 $Z_5$ ）の相関との比較を考えると理解し易い。

#### 【0222】

第5項の符号が正のとき、例えば図7Eに示されるように、瞳の左右方向の位相は正、上下方向の位相は負である。一方、第4項の符号が正のとき、例えば図7Cに示されるように、瞳の外周縁部の位相は正であり、第4項の符号が負のとき、例えば図7Aに示されるように、瞳の外周縁部の位相は負である。このため、第5項と第4項との符号が等しい図7Fのような場合には、瞳の左右方向の位相変化は大きく、上下方向の位相変化は小さい。これと反対に、第5項と第4項との符号が等しくない（逆である）図7Dのような場合には、瞳の左右方向の位相変化は小さく、上下方向の位相変化が大きい。

#### 【0223】

ところで、第5項が零でないときには、その係数 $Z_5$ の値に応じて縦線パターンと横線パターンとでベストフォーカス位置が異なるため、第4項を変化させると、縦線（V線）パターンと横線（H線）パターンの像の線幅の差（線幅差）が、デフォーカス、すなわち第4項の変化に応じて生じる。すなわち、線幅がデフォーカスによって変化する場合には、図8のCD-フォーカス線図に示されるように、第4項が0でないフォーカス位置では、第5項による縦線パターンと横線パターンとのベストフォーカス位置の差に対応して縦線パターンの像（V）と横線パターンの像（H）との線幅の差が生じる。これが、通常みられる、2成分である非点収差存在時の、0成分変化（デフォーカス）に伴う、縦線パターンの像と横線パターンの像の線幅への影響の差である。これより、低次の非点収差成分第5項が零でないとき、デフォーカスを示す第4項を調整することで、縦線パターンの像と横線パターンの像との線幅差を小さくできることは明らかであろう。

#### 【0224】

図9には、波長 $248.3\text{ nm}$ のKrFレーザを光源とし、照明 $=0.75$ の $2/3$ 輪帯照明条件、投影光学系PLの開口数（N.A.） $=0.68$ の場合に、前述の計測用レ

10

20

30

40

50

チクル  $R_T$  上のパターンを転写して得られるレジスト像の線幅計測の結果得られる、縦横線の線幅差の実験結果の一例が示されている。また、図 10 には、図 9 の  $Z_{12} = 40 \text{ m}$ 、 $20 \text{ m}$ 、 $0 \text{ m}$  の部分（上 3 段の部分）がより詳細に示され、図 11 には、図 9 の  $Z_{12} = -20 \text{ m}$ 、 $-40 \text{ m}$  の部分（下 2 段の部分）がより詳細に示されている。図 10、図 11 において、各等高線マップにおける横軸は、第 4 項の係数  $Z_4$  を示し、縦軸は第 5 項の係数  $Z_5$  を示す。

【 0 2 2 5 】

これらの説明からわかるように、図 9 は、第 9 項の係数  $Z_9$  と第 12 項の係数  $Z_{12}$  の値を、それぞれ  $\pm 40 \text{ m}$  の範囲内でかつ  $20 \text{ m}$  ステップで変化させたそれぞれの  $Z_9$ 、 $Z_{12}$  の組み合わせについて、 $Z_4$  と  $Z_5$  とがそれぞれ変化したときの縦横線の線幅差の関係を示す図である。図 9 中の各領域内に付されたハッチング等は、図 9 の下欄に示されるような縦横線の線幅差を示す。線幅差の値が正の領域は、縦線（V 線）パターンの像の線幅が横線（H 線）パターンの像の線幅より太いことを、線幅差の値が負の領域は、縦線（V 線）パターンの像の線幅が横線（H 線）パターンの像の線幅より細いことを、それぞれ示す。

【 0 2 2 6 】

図 12 A には、図 9 における左上に示される  $Z_{12} = 40 \text{ m}$ 、 $Z_9 = -40 \text{ m}$  の等高線マップが取り出して示され、図 12 C には、図 12 A の C - C 線に対応する CD - フォーカス線図が示されている。また、図 12 B には、図 10 における上段中央に示される  $Z_{12} = 40 \text{ m}$ 、 $Z_9 = 0 \text{ m}$  の等高線マップが取り出して示され、図 12 D には、図 12 B の D - D 線に対応する CD - フォーカス線図が示されている。これらの図から明らかなように、図 9 の各等高線マップは、 $Z_{12}$ 、 $Z_9$  のある組み合わせ条件下において、デフォーカス項（係数  $Z_4$ ）と低次非点収差項（係数  $Z_5$ ）との変化に応じて、V 線パターンの像と H 線パターンの像との線幅差（以下、「VH 差」とも呼ぶ）がどのように変化するかを示す図である。

【 0 2 2 7 】

$Z_{12}$  の値が 0 のとき（図 9 中の上から 3 段目に並ぶ 5 つの等高線マップ）では、 $Z_9$  の値がそれぞれのマップで異なっているが、図 10 の下段の各マップに示されるように、どのマップのどのフォーカス位置でも、 $Z_5$  の値が 0 であれば、VH 差は生じない。

【 0 2 2 8 】

これに対して、 $Z_{12}$  が 0 でないとき、例えば  $Z_{12} = +40 \text{ m}$  のときには、図 10 の上段の各マップから明らかなように、 $Z_5 = 0$  では  $Z_{12}$  に起因して V 線パターンと H 線パターンとのベストフォーカス差が生じ、 $Z_4$  の値によって線幅の VH 差が変化するが、このときも、各  $Z_4$  における VH 差の値は、 $Z_9$  の大きさに依存して変化している。この VH 差の値の  $Z_9$  依存性をもっとも明確にわかるのは、高次非点収差項の係数  $Z_{12}$  の値の  $1/2$  に相当する  $20 \text{ m}$  の  $Z_5$  を与え、高次非点収差項である第 12 項による V 線パターンと H 線パターンとのベストフォーカス差を低次非点収差項（係数  $Z_5$ ）で補正し、線幅差のフォーカス依存性がないようにした場合である。

【 0 2 2 9 】

線幅の VH 差が  $Z_9$  の値に依存し、 $Z_{12}$  が正の値のときには V 線パターンの像の線幅は H 線パターンの像の線幅より細く、逆に  $Z_{12}$  が負のときには V 線は H 線より太く、先に図 6 を用いて説明した内容が裏付けられることがわかる。

【 0 2 3 0 】

発明者等が行った実験の結果、球面収差  $Z_9$  項の大きさを、ベストフォーカス差（照明  $= 0.4$  の通常照明条件下での線幅  $0.72 \mu\text{m}$  ラインアンドスペースパターン（L/S パターン）と線幅  $1.4 \mu\text{m}$  L/S パターンとのベストフォーカス位置の差）で、 $-0.18 \mu\text{m}$  から  $-0.02 \mu\text{m}$  へと変更することにより、線幅の VH 差を  $27 \text{ nm}$  から  $7 \sim 8 \text{ nm}$  へと低減できることが確認された。

【 0 2 3 1 】

以上説明したことから、前述した如く、投影光学系の視野内の評価点毎に、縦横線の線

10

20

30

40

50

幅差（VH差）Lと、ツェルニケ多項式の第12項の係数 $Z_{12}$ の値（大きさ）とに応じて、所定の演算を行い、第9項の係数 $Z_9$ の変化量の目標値 $r_1$ 、 $r_2$ 、……、 $r_n$ （ $n=33$ ）を算出し、その算出した第9項の係数 $Z_9$ の変化量の目標値に基づいて、前述の投影光学系の調整を行うことにより、縦横線の線幅差を調整できることが裏付けられた。

【0232】

ところで、本実施形態の露光装置100では、半導体デバイスの製造時には、デバイス製造用のレチクルRがレチクルステージRST上に装填され、その後、レチクルアライメント及びいわゆるベースライン計測、並びにEGA（エンハンスド・グローバル・アライメント）等のウエハアライメントなどの準備作業が行われる。

【0233】

なお、上記のレチクルアライメント、ベースライン計測等の準備作業については、例えば特開平7-176468号公報及びこれに対応する米国特許第5,646,413号などに詳細に開示され、また、これに続くEGAについては、特開昭61-44429号公報及びこれに対応する米国特許第4,780,617号等に詳細に開示されており、上記各公報並びにこれらに対応する上記米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

【0234】

その後、ウエハアライメント結果に基づいて、ステップ・アンド・スキャン方式の露光が行われる。なお、露光時の動作等は通常の走査型露光装置と異なることがないので、詳細説明については省略する。但し、本実施形態の露光装置100では、上記のステップ・アンド・スキャン方式の露光に際し、前述した図4のフローチャートで示される調整方法により調整された投影光学系PLが用いられ、また、走査露光時に露光領域IAにおけるウエハWの位置及び姿勢が、算出された調整量ADJ16～ADJ18に基づいて制御される。これにより、本実施形態では、レチクルRに形成された回路パターン中の縦線パターンと横線パターンとの像の線幅差が低減された状態で、これらの像（潜像）がウエハW上の各ショット領域に形成される。

【0235】

これまでの説明から明らかなように、本実施形態では、可動レンズ13<sub>1</sub>～13<sub>5</sub>、ウエハステージWST、光源16によって調整部が構成され、可動レンズ13<sub>1</sub>～13<sub>5</sub>、ウエハステージWSTのZ、x、y方向の位置（あるいはその変化量）、及び光源16からの照明光の波長のシフト量が調整量となっている。そして、上記各調整部と、可動レンズを駆動する駆動素子及び結像性能補正コントローラ48、ウエハステージWSTを駆動するウエハステージ駆動部（不図示）とによって、像形成状態調整装置が構成されている。また、主制御装置50によって、この像形成状態調整装置を制御する制御装置が構成されている。しかしながら、像形成状態調整装置の構成は、上記のものに限定されるものではなく、例えば調整部として可動レンズ13<sub>1</sub>～13<sub>5</sub>のみを含んでいても良い。かかる場合であっても、投影光学系の結像性能（諸収差）の調整は可能だからである。

【0236】

また、本実施形態では、ウエハ上に形成された計測用パターンのレジスト像を撮像するアライメント系ALGと、このアライメント系ALGによる撮像信号に基づいて計測用パターンに含まれる縦線パターンと横線パターンとのレジスト像の線幅を算出する主制御装置50とによって、線幅計測装置が構成されている。なお、線幅計測装置として、例えば露光装置100の外部に設けられた専用の計測装置（SEMなど）を用いても良い。

【0237】

なお、これまでの説明では、投影光学系PLの調整等に際して行われる波面収差の計測は、波面収差計測装置80を用い、ピンホール及び投影光学系PLを介して形成された空間像に基づいて行うものとしたが、これに限らず、例えば米国特許第5,978,085号などに開示されている特殊な構造の計測用マスクを用い、そのマスク上の複数の計測用パターンのそれぞれを、個別に設けられたピンホール及び投影光学系を順次介して基板上に焼き付けるとともに、マスク上の基準パターンを集光レンズ及びピンホールを介するこ

10

20

30

40

50

となく、投影光学系を介して基板上に焼き付けて、それぞれの焼き付けの結果得られる複数の計測用パターンレジスト像それぞれの基準パターンレジスト像に対する位置ずれを計測して所定の演算により、波面収差を算出することとしても良い。

【0238】

以上詳細に説明したように、本実施形態に係る投影光学系PLの調整方法によると、例えば投影光学系PLの調整が困難な高次非点収差(第12項)の存在に起因して生じる前述の縦横線の線幅差を、調整が容易な低次球面収差(第9項)の大きさを制御するように投影光学系PLを調整することで、制御することが可能となる。従って、従来困難とされていた、縦線パターンと横線パターンとの像の線幅差の制御を自在にかつ確実に行うことが可能となる。

10

【0239】

また、本実施形態に係る露光装置100及びその露光方法によると、波面収差計測装置80により投影光学系PLの波面収差が計測される。また、計測用レチクルR<sub>T</sub>の計測用パターンが投影光学系PLを介してウエハW上に転写され、そのウエハを現像後にウエハ上に形成された計測用パターンレジスト像が、主制御装置50によってアライメント系ALGを用いて撮像され、その撮像信号に基づいて計測用パターンに含まれる縦線パターンと横線パターンとのレジスト像の線幅がそれぞれ算出される。

【0240】

そして、主制御装置50では、波面収差計測装置80により計測された波面収差を展開したツェルニケ多項式の第12項である高次非点収差項(第1の光学特性)が零でないとき、その第12項(係数Z<sub>12</sub>)の値と、上で計測された縦線パターンの像の線幅である第1線幅と横線パターンの像の線幅である第2線幅との差である線幅差とに応じて、第12項との相互作用により上記の線幅差に影響を与えるツェルニケ多項式の第9項である低次球面収差項(第2の光学特性)の大きさを、前述の像形成状態調整装置を用いて制御すること、調整が容易な低次球面収差の大きさを像形成状態調整装置を用いて制御すること、調整が困難とされている高次非点収差の存在に起因して生じる前述の線幅差を、制御することが可能となる。

20

【0241】

そして、レチクルRの回路パターンを照明光ELで照明し、その回路パターンを、調整後の投影光学系PLを介してウエハW上に転写する。これにより、縦線パターンと横線パターンの転写像同士の線幅差が効果的に低減された良好な露光を実現することができる。

30

【0242】

なお、上記実施形態では、第1の光学特性が波面収差を展開したツェルニケ多項式の第12項である高次非点収差項であり、第2の光学特性がツェルニケ多項式の第9項である低次球面収差項である場合について説明したが、本発明がこれに限定されるものではない。例えば、第1の光学特性として、上記第12項(の次数が4次のcos<sup>2</sup>成分)と同じ次数が4次のsin<sup>2</sup>成分である第13項を計測しても良い。この場合、第2の光学特性としては、上記実施形態と同じ第9項をそのまま用いることができる。第9項と第13項との相互作用により、レチクル上で前述の縦線(V線)、横線(H線)に対してそれぞれ45°で交差する方向の第1の斜め線パターンとこれに直交する第2の斜め線パターンとの像の線幅差が影響を受ける。従って、上記実施形態と同様に、ツェルニケ多項式の第13項が零でないとき、その第13項(係数Z<sub>13</sub>)の値と、計測された第1の斜め線パターン像の線幅である第1線幅と第2の斜め線パターンの像の線幅である第2線幅との差である線幅差とに応じて、ツェルニケ多項式の第9項である低次球面収差項の大きさを、前述の像形成状態調整装置を用いて制御すること、前述の線幅差を、制御することが可能となる。

40

【0243】

この他、第1の光学特性を、波面収差を展開したツェルニケ多項式の上記第12項、第13項以外の次数がm(m≧4)の2回回転対称成分とし、第2の光学特性を、第9項以外の前記2回回転対称成分と同次数の回転対称成分としても良い。このようにして

50

も、第1の光学特性の大きさが零でないとき、その第1の光学特性の大きさと計測された直交2軸方向のラインパターン同士の像の線幅差とに応じて、第2の光学特性を制御するように投影光学系PLを調整することにより、上記実施形態と同等の効果を得ることができるものと推測される。

【0244】

さらに、前述の縦横線の線幅差(VH差)に影響を与える第1の光学特性と第2の光学特性の組み合わせとして、これまでに説明したツェルニケ多項式の第9項と第12項の他、第6項(係数 $Z_6$ )と第18項(係数 $Z_{18}$ )、第13項(係数 $Z_{13}$ )と第18項(係数 $Z_{18}$ )、第12項(係数 $Z_{12}$ )と第17項(係数 $Z_{17}$ )などの組み合わせが挙げられる。

【0245】

発明者等は、波面収差を展開したツェルニケ多項式の項(ツェルニケ項)の組み合わせがVH差の原因となるかを、効率的に判断するため、VH差の原因となる組み合わせを体系的に発見するためのシミュレーションを行った。

【0246】

図13には、光源がArFエキシマレーザー(波長193nm)、投影光学系PLの開口数(N.A.)=0.68、照明 $\sigma$ =0.85、2/3輪帯照明条件にて、ウエハ上換算値で線幅140nm(マスクバイアス:+40nmを含む)の孤立線(2 $\mu$ mピッチ)をレチクルパターンとし、透過率が6%のハーフトーン型の位相シフトマスク(レチクル)を用いて、ウエハ上で孤立線の線幅を100nmに上げるときの収差間のクロスタームの計算結果が、図表にて示されている。この図13において、 $Z_i$ ( $i=4\sim 20$ )は、ツェルニケ項第*i*項を示す。

【0247】

この図13において、斜めの境界線の右上側が横線、左下側が縦線に対する各収差(ツェルニケ項)のクロスタームの大きさである。この図13の表より、第9項( $Z_9$ )と第12項( $Z_{12}$ )の組み合わせのクロスタームは、横線で759、縦線で-759となっており、ちょうど符号が反転していることがわかる。

【0248】

この他にも、前述した第6項( $Z_6$ )と第18項( $Z_{18}$ )、第13項( $Z_{13}$ )と第18項( $Z_{18}$ )、第12項( $Z_{12}$ )と第17項( $Z_{17}$ )などの組み合わせで、縦横線のクロスタームの符号が反転しており、VH差の原因となることがわかる。

【0249】

第1の光学特性と第2の光学特性との組み合わせとしては、上述した種々のツェルニケ項同士の組み合わせが考えられるが、これに限らず、第1の光学特性を非点収差とし、第2の光学特性を球面収差としても良い。このようにしても、非点収差と球面収差との相互作用が、縦線パターンと横線パターンとの像の線幅差に影響を与えることを考えれば、投影光学系の光学特性の計測の結果、非点収差が存在するとき、その非点収差の大きさと計測された直交2軸方向のラインパターン同士の像の線幅差とに応じて、球面収差を制御するように投影光学系PLを調整することにより、線幅差を抑制することは可能である。

【0250】

また、この場合を考えれば明らかであるが、投影光学系PLの光学特性計測装置は、波面収差計測装置に限らず、投影光学系PLの球面収差、非点収差などのいわゆるザイデルの5収差を計測するための装置であっても良い。例えば、このような装置としては、ウエハステージWST上にスリット状あるいは矩形状の開口パターンを形成し、この開口パターンを投影光学系PLによって形成された所定の計測用パターンの空間像に対して走査し、開口パターンを介した光を光電素子にて検出する、いわゆる空間像計測器などが挙げられる。

【0251】

なお、上記実施形態では、投影光学系PLの波面収差は波面収差測定器80を用いて直接計測するものとしたが、これに限らず、第12項(係数 $Z_{12}$ )は高次非点収差項であるから、例えば周期方向の異なる複数種類のL/Sパターン(あるいは方向の異なる孤立ラ

10

20

30

40

50

インパターン)のベストフォーカス位置をそれぞれ求め、その結果得られる非点収差が、低次非点収差項(係数 $Z_5$ )と高次非点収差項(係数 $Z_{12}$ )との線形結合であると仮定した計算式の各未定係数を最小二乗法などで算出することにより、第12項(係数 $Z_{12}$ )を近似的に求めても良い。上記の周期方向の異なる複数種類のL/Sパターンのベストフォーカス位置は、上記のパターンをウエハの光軸方向の位置を変えながらそのウエハ上に焼き付けた結果得られるウエハ上の各ショット領域に形成されたレジスト像をSEMなどで計測して、求めても良いし、前述の空間像計測器を用いて、その空間像計測器の光軸方向の位置を変えながら上記のパターンの空間像計測を行い、その空間像の計測結果に基づいて求めても良い。

【0252】

10

また、線幅計測装置を上記実施形態と同様の構成で構成する場合に、レジスト像に限らず、ウエハ上に形成された前記縦線パターンと横線パターンとの潜像あるいはエッチング像の線幅を計測しても良い。あるいは、線幅計測装置を、前述の空間像計測装置によって構成しても良い。この場合には、例えば縦線パターンと横線パターンとの空間像を像面上に形成し、その空間像の線幅を空間像計測装置によって計測することとなる。すなわち、像の形成と線幅の計測とが同時に行われることとなる。

【0253】

なお、上記実施形態では、説明の簡略化のため、同一線幅の縦線パターンと横線パターンとの像の線幅差がほぼ零となるような線幅差の制御を行う場合について説明したが、本発明の投影光学系の調整方法などでは、これに限らず、直交2軸方向のラインパターン同士であれば、線幅の如何にかかわらず(その線幅が異なっても)、それらの像同士の線幅差の制御を行うことが可能である。線幅差の制御としては、設計上の線幅差に正確に近づけるようなパターン像の線幅差の制御が可能である。

20

【0254】

また、上記実施形態では、オン・ボディ(投影光学系が露光装置に搭載された状態)で投影光学系の調整を行うものとしたが、例えば露光装置(特に投影光学系)の製造工程などで、露光装置への搭載前に投影光学系を単体で調整しても良い。

【0255】

ところで、直交2軸方向のラインパターンの像同士の線幅差が生じる要因は、投影光学系の収差によるものに限られず、レチクル上のパターンの描画誤差に起因する場合も考えられる。このような要因に起因する、直交2軸方向のラインパターンの像同士の線幅差の低減のためにも、本発明に係る投影光学系の調整方法、露光方法、あるいは露光装置を用いることができる。この場合には、上記実施形態と同様にして計測された第1の光学特性、例えばツェルニケ多項式の第12項の値と、既知の第1のラインパターンの線幅とこれに直交する第2のラインパターンの線幅との差(描画誤差)とに依じて、第1の光学特性との相互作用によって投影光学系によって像面上に形成される前記第1のラインパターンの像の線幅と前記第2のラインパターンの像の線幅との差である線幅差に影響を与える第2の光学特性、例えばツェルニケ多項式の第9項の大きさを制御するように投影光学系が調整される。このため、投影光学系によって像面上に形成される第1のラインパターンの像の線幅と第2のラインパターンの線幅との差である線幅差が、レチクル上のパターンの描画誤差などに起因して生じる場合に、直交するラインパターン同士の線幅差を自在に制御することが可能となる。

30

40

【0256】

なお、これまでの説明からもわかるように、投影光学系の波面収差の情報を得、さらにパターンの投影像に関する情報を得、さらにこれらの情報に基づいて、投影光学系を調整する際に、前記波面収差をツェルニケ多項式を用いて級数展開した複数のツェルニケ項のうち、その相互作用が前記投影像の特性に影響を与える任意のツェルニケ項の組み合わせのクロスタームにおける前記投影像の特性の変化に対するツェルニケ感度を考慮して前記投影光学系を調整することとしても良い。このようにしても、従来考慮されていなかったその相互作用がパターンの投影像の特性に影響を与える任意のツェルニケ項の組み合わせ

50

のクロスタームにおける前記投影像の特性の変化に対するツェルニケ感度を考慮して投影光学系を調整するので、従来調整が困難であった収差成分、例えば高次収差成分などの調整も可能となり、パターンの像の形成状態がより良好となるような投影光学系の調整が可能となる。この場合において、パターンが、ラインパターンを含む場合、前記投影像の特性として、そのラインパターンの線幅を少なくとも含む特性の変化に対する上記のツェルニケ感度を考慮することとしても良い。また、この場合も調整された投影光学系を用いて回路パターンをウエハ等の物体上に転写することとしても良い。かかる場合にも、高精度なパターンの転写を実現することが可能となる。

【0257】

ところで、縦横線の線幅差だけでなく、孤立のラインパターンの像の線幅なども、デフォーカス量による影響を受ける。そこで、発明者等は、前述のCD-フォーカス曲線を求めるため、実験を行った。

【0258】

露光条件としては、光源がArFエキシマレーザ(波長193nm)、投影光学系PLの開口数(N.A.)=0.78、照明=0.85、2/3輪帯照明条件、対象パターンが6%ハーフトーンマスク(レチクル)に形成される、ウエハ上換算値で線幅100nmの孤立線(2μmピッチ)を仮定した。また、露光量(スライスレベル)は、無収差でデフォーカスなしの条件で求め、+0.15μmデフォーカスした位置での線幅ばらつきCDを求めた。

【0259】

単純にツェルニケ項毎に例えば50mの収差を光学シミュレーション用のコンピュータに入力してツェルニケ感度(Zernike Sensitivity)を第1項から第37項について求めると、図14のようになる。この図14において、横軸のZ.i(i=1~37)は、各ツェルニケ項を示す。

【0260】

線幅ばらつきCDは、従来のツェルニケ感度法(Zernike Sensitivity法:以下、適宜「ZS法」と呼ぶ)では、次式(19)で表されるようなZernike Sensitivity(以下、適宜「ツェルニケ感度」又は「ZS」と略述する) $s_i$ (i=1~37)と、第n計測点(以下では計測点nとも呼ぶ)における各ツェルニケ項の大きさ $C_{n,i}$ (=係数Zi)との線形結合で表現することができる。なお、以下では、 $C_{n,i}$ を各計測点のツェルニケ項の成分(ツェルニケ項成分)と略述する。

【0261】

【数13】

$$\Delta CD = \sum_{i=1}^{37} S_i C_{n,i} \quad \dots (19)$$

しかしながら、上式(19)を用いたZS法を用いた計算結果と、適当な波面収差を与えて直接空間像を計算する手法との間には、図15のグラフに示されるような乖離が見られる。すなわち、上式(19)を用いたZS法による計算では誤差が大きすぎる。

【0262】

このため、発明者等は、CD-フォーカス曲線を、フォーカスと線幅を座標軸とする2次元面内で移動させて線幅を推定する方法を考えてみた。

【0263】

上述したように、CDを直接ツェルニケ項成分の線形結合で表現する手法による線幅予測誤差は大きいので、ツェルニケ感度の算出と、CDの計算との間に、CD-フォーカス曲線の平行移動という1ステップを加え、そのステップ(平行移動)実行後のCD-フォーカス曲線に基づいて、CDを算出するという手法を採用することとした。

【0264】

例えば、CD-フォーカス曲線の移動に関しては、各計測点nのフォーカス方向の移動量( $f_n$ )と線幅(CD)方向の移動量( $d_n$ )をそれぞれツェルニケ感度で表現する。次

10

20

30

40

50

に例えば  $y = f(x)$  という関数であった CD - フォーカス曲線を平行移動して  $y = f(x - x_n) + y_n$  という CD - フォーカス曲線を作成し、新しくできた関数について CD を計算すれば良い。

【0265】

《予測方法》

以下、本発明の予測方法の一例に係る CD - フォーカス曲線の予測方法の実施形態について、その処理の流れを示すフローチャート(図16、図24)に沿って、かつ適宜他の図面を参照しつつ説明する。

【0266】

本実施形態においても、露光装置100の前述の波面収差の各計測点  $n$  ( $n = 1 \sim 33$ ) について、パターンの投影像の特性の1つである、CD - フォーカス曲線を、ツェルニケ項成分  $C_{n,i}$  を含む複数の項の線形結合を用いたツェルニケ感度法を用いて予測する。各ツェルニケ項成分  $C_{n,i}$  としては、シミュレーション用コンピュータ46上の結像シミュレータによって予め求められたものを用いても良いし、前述のように、波面収差計測装置80による計測によって求められた値を用いても良い。

【0267】

まず、図16のステップ202において、実際の露光時の光学条件(例えば、照明光ELの波長、即ち露光波長(及び露光用の光源16の種類など)、投影光学系PLの最大N.A.(開口数)、使用N.A.(本実施形態では、露光時に開口絞り15にて設定される開口数)、コヒーレンスファクタ 値(照明)又は照明N.A.(照明光学系の開口数)、及びレチクルの照明条件(照明光学系の瞳面上での照明光ELの光量分布、即ち2次光源の形状や大きさ)など)等を含む露光条件を、シミュレーション用コンピュータ46にその入力装置を介して設定する。このとき、シミュレーション用コンピュータ46上では、すでに結像シミュレータが起動しており、その画面上には、結像シミュレータの露光条件設定画面が表示されているものとする。オペレータ等は、その設定画面にしたがって、実際の露光に用いられる光学条件などを設定する。なお、この露光条件の設定時には、各計測点  $n$  ( $n = 1 \sim 33$ ) にそれぞれ転写されるレチクル上のパターンの形状、寸法などのパターンに関する情報もここで併せて設定する。パターンに関する情報としては、例えば、孤立ラインパターン、ライン・アンド・スペース(L/S)パターン、ラインパターンが直交している直交パターンなどのパターン種別(位相シフトパターンであるか否か及びその種類なども含む)、ラインパターンの線幅、長さ、ピッチなどのパターンサイズ情報などがある。パターンの選択は、評価すべき評価項目に応じて決定される。例えば、上述の動作と同様に縦横の線幅差を評価項目とするならば、図5に示されるレチクルR<sub>T</sub>のような、互いに直交するラインパターンが形成されたレチクルを用いるものと仮定し、そのレチクル上のパターンに関する情報を設定する必要がある。ここでは、説明を簡単にするため、計測点毎に同一サイズの孤立ラインパターンが形成されたレチクルを用いるものとし、そのレチクル上のパターンの情報が設定されたものとする。

【0268】

次のステップ204において、結像シミュレーションにより投影光学系PLが無収差のときのCD - フォーカス曲線の作成が行われる。具体的には、オペレータ等は、シミュレーション用コンピュータ46に対し、投影光学系PLが無収差である場合のCD - フォーカス曲線の作成を入力装置を介して指示する。

この指示に回答して、シミュレーション用コンピュータ46は、上記ステップ202で設定された露光条件下で投影光学系PLを無収差と仮定した状態、すなわち(すなわち式(3)に示されるツェルニケ項成分  $Z_i$  ( $i = 1 \sim 37$ 、すなわち  $C_{n,i}$ ) をすべて0にした状態)での、デフォーカス量に対するラインパターンの線幅の変動、すなわちCD - フォーカス曲線を結像シミュレータによって作成する。

【0269】

次のステップ206において、シミュレーション用コンピュータ46は、作成したCD - フォーカス曲線を、次式(20)に示される10次関数でフィッティングする。

10

20

30

40

50

【 0 2 7 0 】

【 数 1 4 】

$$y = C_a x^{10} + C_b x^8 + C_c x^6 + C_d x^4 + C_e x^2 + C_f \quad (20)$$

ここで、 $x$  は、デフォーカス量であり、 $y$  は、そのデフォーカス量に対応する対象パターン（上記ステップ 202 においてパターン情報が設定されたラインパターン）の像の線幅であり、 $C_a \sim C_f$  は、この 10 次関数の各次の項の係数である。この式（20）からも明らかのように、この関数は、2 次から 10 次までの偶数次の項のみから成る関数である。図 17A に、このフィッティングの結果得られた 10 次関数の一例が示され、図 17B に、その 10 次関数と、結像シミュレーションによって得られた CD - フォーカス曲線とのフィッティング誤差の一例が示されている。図 17B に示されるように、10 次関数のフィッティング誤差は、 $\pm 0.02 \text{ nm}$  以下に収まっており、フィッティング精度が非常に高くなっているのがわかる。

10

【 0 2 7 1 】

次に、ステップ 208 において、オペレータ等は、シミュレーション用コンピュータ 46 を用いて、デフォーカス量に対する、各ツェルニケ項のツェルニケ感度  $S_i$  を空間像計算により求める。ここで、ツェルニケ多項式で表現された収差を例えば 1 種類だけ入力して CD - フォーカス曲線を作ってみると、項ごとに異なる振る舞いをするのがわかる。ここでは、その振る舞いのうち、ベストフォーカス位置の変化を求める。

20

【 0 2 7 2 】

図 18 には、そのツェルニケ感度  $S_i$  が示されている。この図 18 において、横軸の  $Z_i$  ( $i = 1 \sim 37$ ) は、各ツェルニケ項を示す。図 18 に示されるように、デフォーカス量に対して感度があるのは、ツェルニケ項  $Z_4$ 、 $Z_9$ 、 $Z_{16}$ 、 $Z_{25}$ 、 $Z_{36}$ 、 $Z_{37}$  の回転成分や  $Z_5$ 、 $Z_{12}$ 、 $Z_{17}$ 、 $Z_{21}$ 、 $Z_{28}$ 、 $Z_{32}$  などの 2 回回転成分、すなわち偶数成分のみとなっている。他（奇数成分）はツェルニケ感度が 0 であるため、CD - フォーカス曲線は、フォーカス方向のシフトに関しては、奇数成分には影響を受けず、収差間のクロス項の影響を受けることもない。

【 0 2 7 3 】

図 19 には、第 9 項 ( $Z_9$ )、第 12 項 ( $Z_{12}$ )、第 16 項 ( $Z_{16}$ ) の 3 種類の各ツェルニケ項を、それぞれ  $-50 \text{ m}$  から  $50 \text{ m}$  まで  $10 \text{ m}$  ピッチで 11 点動かしたときのフォーカス方向の移動量 ( $\Delta_n$ ) の変化の様子が示されている。図 19 には、各 11 点での各移動量に基づいて最小二乗法を使って求められた直線の傾きも併せて示されている。すなわち、各直線の傾きがそれぞれのツェルニケ項の感度の値となる。なお、この図 19 には、第 9 項 ( $Z_9$ )、第 12 項 ( $Z_{12}$ )、第 16 項 ( $Z_{16}$ ) の 3 種類だけが代表的に示されているが、他のツェルニケ項についても収差量がこの範囲であれば、ほぼ完全に線形性が保たれていることが確認されている。図 19 からわかるように、相関係数  $R^2 \approx 1$  なので、通常のツェルニケ感度の計算では、計算時間を節約するために、収差を 1 値だけ入力して直線の傾きを求めれば良いが、ここでは、再確認と、より正確な値を導き出すことを目的に、 $-50 \text{ m} \sim 50 \text{ m}$  まで  $10 \text{ m}$  ピッチでフォーカス方向の移動量 ( $\Delta_n$ ) を 11 点計算して、最小二乗法を使って直線の傾き（すなわちツェルニケ感度の値）を計算した。

30

40

【 0 2 7 4 】

次に、ステップ 210 において、シミュレーション用コンピュータ 46 は、各ツェルニケ項のツェルニケ感度  $S_i$  と、各計測点  $n$  ( $n = 1 \sim 33$ ) におけるツェルニケ項成分  $C_{n,i}$  ( $i = 1 \sim 37$ ) とを用いて、総合焦点差 (TFD)、非点収差、球面収差量などを求めるツェルニケ感度法と同様な式である次式 (21) を用いて、計測点  $n$  ( $n = 1 \sim 33$ ) における CD - フォーカス曲線のフォーカス方向のずれ量  $\Delta_n$  を求める。

【 0 2 7 5 】

【数 15】

$$\alpha_n = \sum_{i=1}^{37} S\alpha_i C_{n,i} \quad (21)$$

ところで、ツェルニケ項毎に - 50 m ~ 50 m まで 10 m ピッチで 11 点収差を入力して、その振る舞いから  $\alpha_n$  (ベストフォーカス位置における線幅の変化) と収差の関係を求めた場合、収差の量がプラスであってもマイナスであっても影響が同じであることや、収差が増えると比例関係以上に像の劣化が観察されることから、 $\alpha_n$  は、各ツェルニケ項成分の二乗の線形結合で表されるものと仮定することができる。

【0276】

そこで、次のステップ 212 において、オペレータ等は、シミュレーション用コンピュータ 46 を用いて、設定された露光条件下での、ラインパターンの線幅に対する、各ツェルニケ項成分の二乗のツェルニケ感度  $S_{\alpha_i}$  を、空間像計算により求める。像計算で得た 11 点の線幅変化量の計算に 2 次関数を仮定し、最小二乗法によって近似をしてみると、図 20 に示されるように、 $y = s x^2$  という関数に乗っていることが観察される。なお、この図 20 には、第 6 項 (Z. 6)、第 7 項 (Z. 7)、第 9 項 (Z. 9) の 3 種類だけが代表的に示されているが、他のツェルニケ項についても二次関数で表現できることが確認されている。なお、各ツェルニケ項の感度  $S_{\alpha_i}$  ( $i = 1 \sim 37$ ) を図 21 に示す。この図 21 において、横軸の Z. i ( $i = 1 \sim 37$ ) は、各ツェルニケ項を示す。図 21 に示されるように、この線幅変化に対しては、奇数成分、偶数成分ともに感度がある。

【0277】

次に、ステップ 214 において、シミュレーション用コンピュータ 46 は、各計測点におけるツェルニケ項成分  $C_{n,i}$  をメモリから読み出すとともに、次式 (22) を用いて、ラインパターンの線幅方向の CD - フォーカス曲線のずれ量  $\alpha_n$  を求める。

【0278】

【数 16】

$$\beta_n = \sum_{i=1}^{37} S\beta_i C_{n,i}^2 \quad (22)$$

次に、ステップ 216 において、シミュレーション用コンピュータ 46 は、上記ステップ 210 で求めた  $\alpha_n$  と、上記ステップ 214 で求めた  $\beta_n$  を用いて、次式 (23) に基づき、計測点  $n$  ( $n = 1 \sim 33$ ) における CD - フォーカス曲線を求める。これにより求められた CD - フォーカス曲線が、計測点  $n$  における投影光学系 PL の収差を考慮したときに予想される各計測点  $n$  における CD - フォーカス曲線となる。但し、ここで求められた CD - フォーカス曲線では、未だその変形は考慮されていない。

【0279】

【数 17】

$$y_n = C_a(x - \alpha_n)^{10} + C_b(x - \alpha_n)^8 + C_c(x - \alpha_n)^6 + C_d(x - \alpha_n)^4 + C_e(x - \alpha_n)^2 + C_f + \beta_n \quad \dots(23)$$

なお、 $\alpha_n$  を求める際には、上述の式 (22) に代えて、次式 (24) を用いることもできる。

【0280】

【数 18】

$$\beta_n = \sum_{i=1}^{37} \sum_{j=i}^{37} S\beta_{i,j} C_{n,i} C_{n,j} \quad (24)$$

上述の式 (24) は、互いに異なるツェルニケ項同士の積、すなわち前述のクロスターム (クロス項) を考慮するように、式 (22) を拡張したものである。すなわち、パター

10

20

30

40

50

ン像の線幅は、式(22)に示される各ツェルニケ項成分の二乗だけでなく、クロスタームの影響も受ける。図22A、図22Bのグラフに示されるように、収差の組み合わせによっては、線幅分布が傾いた楕円上に分布していることがある(図22Aでは、Z.6とZ.13との関係であり、図22BではZ.9とZ.12との関係である)。この場合には、それらの収差の組み合わせのクロスタームは、線幅変化に対して感度を有することとなる。図23には、ラインパターンの線幅に対する各クロスタームの感度(クロストーク)が示されている。なお、式(24)において、 $i = j$ の $S_{i,j}$ のところには、式(22)の $S_i$ と同じ値が入り、式(24)の中で、2項だけ取り出すと、例えば次式(25)のような形となる。

【0281】

【数19】

$$\beta_n = S\beta_{i,i}C_{n,i}^2 + S\beta_{i,j}C_{n,i}C_j + S\beta_{j,j}C_{n,j}^2 \quad \dots(25)$$

これより、図22A、図22Bのグラフに示されるような傾いた楕円分布の表現が可能であることがわかる。実際にクロスタームの計算をしてみると、かなり多くの項の間でクロスタームが存在することを確認できる。

【0282】

これまでの説明から明らかなように、ある収差のツェルニケ項のCD-フォーカス曲線への影響はCD-フォーカス曲線のフォーカス方向への移動と最大線幅の変化として表現できる。

【0283】

次に、図24のステップ302において、シミュレーション用コンピュータ46は、結像シミュレータを用いた空間像計算により、実際に収差が存在する状態での投影光学系PLにおけるCD-フォーカス曲線を計測点毎に求める。実際の収差に関する情報は、前述のように求められた波面収差を、主制御装置50を介して、記憶装置42から読み出すことによって行なうようにしても良い。

【0284】

次いで、ステップ304において、シミュレーション用コンピュータ46は、上記ステップ302で結像シミュレータにより算出されたCD-フォーカス曲線と、上述した式(23)を用いて算出されたCD-フォーカス曲線との差分を表す差分関数 $y'_n$ を、次式(26)に示されるような、5次関数で近似する。

【0285】

【数20】

$$y'_n = \gamma 5_n(x - \alpha_n)^5 + \delta 4_n(x - \alpha_n)^4 + \gamma 3_n(x - \alpha_n)^3 + \delta 2_n(x - \alpha_n)^2 + \gamma 1_n(x - \alpha_n) \dots(26)$$

ここで、 $5_n$ 、 $4_n$ 、 $3_n$ 、 $2_n$ 、 $1_n$ は、5次関数 $y'_n$ の各次の項の係数である。

【0286】

この各係数 $5_n$ 、 $4_n$ 、 $3_n$ 、 $2_n$ 、 $1_n$ も、ツェルニケ項成分 $C_{n,i}$ を含む項の線形結合で表現することができる。具体的には、奇数次の項(以下では奇数項とも呼ぶ)の係数 $5_n$ 、 $3_n$ 、 $1_n$ は、各ツェルニケ項成分 $C_{n,i}$ の線形結合で表すことができ、偶数次の項(以下では偶数項とも呼ぶ)の係数 $4_n$ 、 $2_n$ は、各ツェルニケ項成分の二乗 $C_{n,i}^2$ の線形結合で表すことができる。

【0287】

そこで、次のステップ306では、シミュレーション用コンピュータ46は、式(26)で示される $y'_n$ の奇数項に着目し、5次、3次、1次の係数 $5_n$ 、 $3_n$ 、 $1_n$ に対するツェルニケ項の感度 $S_{5i}$ 、 $S_{3i}$ 、 $S_{1i}$ を空間像計算により求める。図25~図27には、各ツェルニケ項の感度 $S_{5i}$ 、 $S_{3i}$ 、 $S_{1i}$ の一例がそれぞれ示されている

10

20

30

40

50

## 【 0 2 8 8 】

次のステップ 3 0 8 では、シミュレーション用コンピュータ 4 6 は、関数  $y'_n$  の偶数項に着目し、4 次、2 次の係数  $4_n$ 、 $2_n$  に対する各ツェルニケ項成分の二乗  $C_{n,i}^2$  の感度  $S_{4,i}$ 、 $S_{2,i}$  を空間像計算により求める。図 2 8、図 2 9 には、各ツェルニケ項成分の二乗  $C_{n,i}^2$  の感度  $S_{4,i}$ 、 $S_{2,i}$  の一例がそれぞれ示されている。

## 【 0 2 8 9 】

そして、ステップ 3 1 0 において、シミュレーション用コンピュータ 4 6 は、投影光学系 P L の現在の収差状態での計測点  $n$  ( $n = 1 \sim 33$ ) における、5 次、3 次、1 次の係数  $5_n$ 、 $3_n$ 、 $1_n$ 、及び、4 次、2 次の係数  $4_n$ 、 $2_n$  を、次の式 ( 2 7 )、式 ( 2 8 ) を用いて求める。

## 【 0 2 9 0 】

## 【 数 2 1 】

$$\gamma 5_n = \sum_{i=1}^{37} S \gamma_{5,i} C_{n,i}, \quad \gamma 3_n = \sum_{i=1}^{37} S \gamma_{3,i} C_{n,i}, \quad \gamma 1_n = \sum_{i=1}^{37} S \gamma_{1,i} C_{n,i} \quad \dots(27)$$

$$\delta 4_n = \sum_{i=1}^{37} S \delta_{4,i} C_{n,i}^2, \quad \delta 2_n = \sum_{i=1}^{37} S \delta_{2,i} C_{n,i}^2 \quad \dots(28)$$

## 【 0 2 9 1 】

以上により、式 ( 2 3 ) に示される関数  $y_n$  と式 ( 2 6 ) で表される関数  $y'_n$  との和を示す関数  $y''_n (= y_n + y'_n)$  の各次の項の係数が全て計算され、計測点  $n$  ( $n = 1 \sim 33$ ) における C D - フォーカス曲線 ( 変形をも考慮したもの ) がすべて予測されたことになる。

## 【 0 2 9 2 】

図 3 0 には、設定された露光条件下で、各計測点  $n$  ( $n = 1 \sim 33$ ) のうち、代表的に示される計測点  $k$ 、 $k + 1$  ( $k = 1 \sim 32$ ) の C D - フォーカス曲線  $y''_k$ 、 $y''_{k+1}$  を、求める際の模式図が示されている。図 3 0 に示されるように、本実施形態の予測方法では、上述したステップ 2 0 2 ~ ステップ 3 1 0 を実行することにより、投影光学系 P L の収差が 0 であると仮定した場合の C D - フォーカス曲線を、1 0 次関数  $y$  で近似し、その 1 0 次関数  $y$  を、計測点  $k$  におけるツェルニケ項成分  $C_{k,i}$  の線形結合によって求められるデフォーカス量 ( 横軸 ) の方向及び線幅 ( 縦軸 ) の方向に、それぞれ  $k$ 、 $k$  だけずらし、さらに、5 次関数  $y'_k$  分変形させることによって計測点  $k$  における関数  $y''_k$  を予測している。前述のように、投影光学系 P L の瞳面上の波面は、計測点によって異なるため、ツェルニケ項成分  $C_{n,i}$  も計測点によって異なる。したがって、上述の  $y''_k$  と  $y''_{k+1}$  は、違う曲線となる。

## 【 0 2 9 3 】

図 3 1 A には、精密な結像シミュレーションによって算出された、計測点 1、1 1、1 7、3 3 における C D - フォーカス曲線の一例が示されており、図 3 1 B には、上述の予測方法によって予測された同一露光条件、同一パターンでの計測点 1、1 1、1 7、3 3 における C D - フォーカス曲線の一例が示されている。図 3 1 A、図 3 1 B に示されるように、結像シミュレーションによる C D - フォーカス曲線と、上述の予測方法によって予測された C D - フォーカス曲線とは、各計測点において良く一致しており、精度良く C D - フォーカス曲線を予測できているのがわかる。すなわち、上述の予測方法を実行すれば、所定露光条件下での所定パターンの転写の際の、C D - フォーカス曲線を精度良く予測することが可能となる。

## 【 0 2 9 4 】

図 3 2 には、線幅ばらつき C D に関して、上で説明した新たな Z S 法を用いた計算結果と、適当な波面収差を与えて直接空間像を計算する手法との関係が示されている。この図 3 2 と前述の図 1 5 とを比較すると明らかなように、新たな Z S 法によると、誤差が格段に低減されていることがわかる。

10

20

30

40

50

## 【0295】

図32からも明らかのように、結像シミュレーションによる空間像計算を行なわなくても、ZS法を拡張することで線幅を正確に計算できることがわかる。

## 【0296】

なお、上述のステップ202～310の説明では、オペレータ等が介在することを前提として説明を行ったが、オペレータ等は、露光条件等の指定(ステップ202)のみを行い、ステップ204以降の処理は、シミュレーション用コンピュータ46(又はその他のコンピュータがシミュレーション用コンピュータと連携して)が全て行うようにすることも勿論可能である。あるいは、前述のオペレータ等の操作に代えて、ホストコンピュータなどから指令を与えるようにしても良い。このような変形は、ソフトウェアプログラムを

10

## 【0297】

上述した露光条件等の指定以外の処理を、シミュレーション用コンピュータ46などのコンピュータに行わせるプログラムは、例えばCD(compact disc)、DVD(digital versatile disc)、MO(magneto-optical disc)あるいはFD(flexible disc)等の情報記録媒体に記録した状態で譲渡(販売等)の対象にすることができる。勿論、インターネットなどの電気通信回線を介してデジタルコンテンツとして譲渡等することもできる。

## 【0298】

## 《評価方法》

上述のようにして予測された計測点1～計測点nのCD-フォーカス曲線を用いて、露光装置100におけるパターンの投影像(又は転写像)の特性を評価することが可能である。例えば、上述のように、投影光学系PLの物体面側で、計測点1～nに対応する位置にそれぞれ孤立ラインパターンを配置した場合を想定し、計測点毎にCD-フォーカス曲線を予測すれば、評価点毎にCD-フォーカス曲線のずれに基づいて、露光領域IA内における孤立ラインパターンの像の特性、例えば面内均一性を評価することができるようになる。

20

## 【0299】

また、図5に示されるような、計測点1～nに対応する位置にそれぞれ互いに直交するラインパターンが配置されたレチクルR<sub>T</sub>を使用する場合を想定し、縦ラインパターン、横ラインパターンについてそれぞれ上述したステップ202～ステップ310を実行してCD-フォーカス曲線を予測すれば、前述の図8に示されるような、縦パターン及び横パターンのCD-フォーカス曲線が作成され、CDフォーカス曲線の差に基づいて各計測点における縦横線幅差を評価することもできる。

30

## 【0300】

すなわち、縦線と横線それぞれの像のCD(線幅)変化に対するツェルニケ感度を求め、収差(ツェルニケ項)の組み合わせのクロスタームのツェルニケ感度 $S_{i,j}(i,j)$ を求め、その符号が縦横線で異なる組み合わせが、VH差に影響を及ぼす収差(ツェルニケ項)の組み合わせとして探し出せる。この理由は、V線とH線とで、式(25)中の第2項以外は、同一の値となるので、VH差=CD(V)-CD(H)の計算において

40

## 【0301】

また、計測点1～nに対応する位置にそれぞれL/Sパターンを配置した場合を想定し、そのL/Sパターンの像の両端のラインパターン像についてそれぞれCD-フォーカス曲線を予測すれば、CDフォーカス曲線の差に基づいて各計測点における両端の像の線幅差を評価することができ、これにより例えば投影光学系PLのコマ収差を評価できるようになる。

## 【0302】

なお、これまでの式(21)、式(22)(又は式(24))、式(27)、式(28

50

)をまとめてマトリックス形式で表現すると、以下の式(29)のようになる。

【0303】

【数22】

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{33} \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{33} \\ \gamma_{5,1} \\ \vdots \\ \gamma_{5,33} \\ \gamma_{3,1} \\ \vdots \\ \gamma_{3,33} \\ \gamma_{1,1} \\ \vdots \\ \gamma_{1,33} \\ \delta_{4,1} \\ \vdots \\ \delta_{4,33} \\ \delta_{2,1} \\ \vdots \\ \delta_{2,33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W\beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W\gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S\alpha_1 \\ \vdots \\ S\alpha_{37} \\ S\beta_{1,1} \\ \vdots \\ S\beta_{37,37} \\ S\gamma_{5,1} \\ \vdots \\ S\gamma_{5,37} \\ S\gamma_{3,1} \\ \vdots \\ S\gamma_{3,37} \\ S\gamma_{1,1} \\ \vdots \\ S\gamma_{1,37} \\ S\delta_{4,1} \\ \vdots \\ S\delta_{4,37} \\ S\delta_{2,1} \\ \vdots \\ S\delta_{2,37} \end{bmatrix} \tag{29}$$

ただし、W、W、W、Wは、それぞれ、以下のようになる。

【0304】

【数23】

$$W\alpha = W\gamma = \begin{bmatrix} C_{1,1} & \cdots & C_{1,37} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{33,1} & \cdots & C_{33,37} \end{bmatrix}$$

$$W\beta = \begin{bmatrix} C_{1,1}^2 & C_{1,2}^2 & \cdots & C_{1,37}^2 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ C_{33,1}^2 & C_{33,2}^2 & \cdots & C_{33,37}^2 \end{bmatrix} \text{ または } \begin{bmatrix} C_{1,1}^2 & C_{1,2}C_{1,1} & \cdots & C_{1,37}^2 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ C_{33,1}^2 & C_{33,2}C_{33,1} & \cdots & C_{33,37}^2 \end{bmatrix}$$

$$W\delta = \begin{bmatrix} C_{1,1}^2 & C_{1,2}^2 & \cdots & C_{1,37}^2 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ C_{33,1}^2 & C_{33,2}^2 & \cdots & C_{33,37}^2 \end{bmatrix}$$

Wは、式(22)または式(24)のいずれを選択するかで、マトリックスが異なっ 50

たものとなる。なお、上述の式(29)は、以下のように纏められる。

【0305】

【数24】

$$f = Wa \cdot ZS \quad (30)$$

ここで、 $f$ は、CD-フォーカス曲線の各係数のマトリックスであり、 $Wa$ は波面収差に関するマトリックスであり、 $ZS$ は、ツェルニケ感度に関するマトリックスである。

【0306】

《調整方法》

次に、上述のCD-フォーカス曲線の予測方法、その予測方法によって予測されたCD-フォーカス曲線に基づく露光装置100におけるパターンの転写状態を評価する評価方法を実行後、その評価結果に基づいてパターンの転写状態を調整する調整方法について説明する。なお、ここでは、前述のステップ102において設定した孤立ラインパターンの像における面内均一性を高めることを目標として調整を行うものとする。

【0307】

前述のように、各計測点 $n$  ( $n = 1 \sim 33$ )に対応するパターンが全て均一であっても、各計測点間のCD-フォーカス曲線がずれていれば、その計測点上に結像するパターン像は均一とはならない。したがって、本実施形態の調整方法では、上述のように予測された各計測点のCD-フォーカス曲線ができるだけ均一となるように、露光装置100におけるパターンの転写状態を調整する。以下では、その調整方法について説明するが、まず、その調整方法に用いる算出式の根拠について説明する。

【0308】

各計測点 $n$  ( $n = 1 \sim 33$ )におけるCD-フォーカス曲線を均一にするには、前述のように求めた、 $n_n$ 、 $n_n$ 、 $5_n$ 、 $4_n$ 、 $3_n$ 、 $2_n$ 、 $1_n$ が、各計測点において、できるだけ同一となるように、前述の19個のパラメータを調整すれば良い。そこで、各計測点 $n$  ( $n = 1 \sim 33$ )における $n_n$ 、 $n_n$ 、 $5_n$ 、 $4_n$ 、 $3_n$ 、 $2_n$ 、 $1_n$ の目標値を計測点間で同一としたうえで、 $n_n$ 、 $n_n$ 、 $5_n$ 、 $4_n$ 、 $3_n$ 、 $2_n$ 、 $1_n$ をそれぞれの目標値に近づけることができるような調整パラメータの調整量を算出する。

【0309】

上述のように各調整パラメータを調整した場合には、投影光学系PLの波面収差等が変化する。計測点 $n$  ( $n = 1 \sim 33$ )における前述の19個の調整パラメータ(これらをそれぞれ調整パラメータ $PARA1 \sim PARA19$ とする)の単位調整量当たりの上述のマトリックス $Wa$ の各要素(すなわち $C_{n,i}$  ( $i = 1 \sim 37$ )を含む項)の変化)を、それぞれマトリックス $PARA1P' \sim PARA19P'$ で表すと、例えば $PARA1P'$ は以下に示すようになる。

【0310】

【数25】

$$PARA1P' = \begin{bmatrix} W\alpha' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W\beta' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W\gamma' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W\gamma' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W\gamma' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W\delta' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W\delta' \end{bmatrix} \quad (31)$$

ただし、 $W$ 、 $W$ 、 $W$ 、 $W$ は、それぞれ、以下に示されるようになる。

10

20

30

40

50

【 0 3 1 1 】

【 数 2 6 】

$$W\alpha' = W\gamma' = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & \cdots & Z_{1,37} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{33,1} & \cdots & Z_{33,37} \end{bmatrix}$$

$$W\beta' = \begin{bmatrix} Z_{1,1}^2 & Z_{1,2}^2 & \cdots & Z_{1,37}^2 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Z_{33,1}^2 & Z_{33,2}^2 & \cdots & Z_{33,37}^2 \end{bmatrix} \text{ または } \begin{bmatrix} Z_{1,1}^2 & Z_{1,2}Z_{1,1} & \cdots & Z_{1,37}^2 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Z_{33,1}^2 & Z_{33,2}Z_{33,1} & \cdots & Z_{33,37}^2 \end{bmatrix}$$

10

$$W\delta' = \begin{bmatrix} Z_{1,1}^2 & Z_{1,2}^2 & \cdots & Z_{1,37}^2 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Z_{33,1}^2 & Z_{33,2}^2 & \cdots & Z_{33,37}^2 \end{bmatrix}$$

ここで、各マトリックス  $W'$ 、 $W''$ 、 $W'''$ 、 $W''''$  の各要素に含まれる  $Z_{n,i}$  ( $n = 1 \sim 33$ 、 $i = 1 \sim 37$ ) は、調整パラメータ  $PARA 1$  の計測点  $n$  における  $C_{n,i}$  の変化である。

20

【 0 3 1 2 】

したがって、次式 (32) に示されるように、マトリックス  $PARA 1 P n'$  を上述した各係数の感度を要素とする列ベクトル  $Z S$  に掛け合わせれば、調整パラメータ  $PARA 1$  の単位量当たりの計測点  $n$  における係数の変化量 (例えば  $\frac{\partial C_{n,i}}{\partial P_1}$ ) の列ベクトル  $B'$  [1] を求めることができる。

【 0 3 1 3 】

【数 2 7】

$$B'[1] = \text{PARA1}P' \cdot ZS = \begin{bmatrix} \alpha_1^{(P1)} \\ \vdots \\ \alpha_{33}^{(P1)} \\ \beta_1^{(P1)} \\ \vdots \\ \beta_{33}^{(P1)} \\ \gamma 5_1^{(P1)} \\ \vdots \\ \gamma 5_{33}^{(P1)} \\ \gamma 3_1^{(P1)} \\ \vdots \\ \gamma 3_{33}^{(P1)} \\ \gamma 1_1^{(P1)} \\ \vdots \\ \gamma 1_{33}^{(P1)} \\ \delta 4_1^{(P1)} \\ \vdots \\ \delta 4_{33}^{(P1)} \\ \delta 2_1^{(P1)} \\ \vdots \\ \delta 2_{33}^{(P1)} \end{bmatrix} \quad (32)$$

同様に、調整パラメータ  $\text{PARA}2' \sim \text{PARA}19'$  についても、単位量当たりの計測点  $n$  における係数の変化量の列ベクトル  $B'[2] \sim B'[19]$  が求まる。

【0 3 1 4】

ここで、各調整パラメータの調整量の縦ベクトルを次式(33)に示す縦ベクトル  $P$  とする。

【0 3 1 5】

【数 2 8】

$$P = \begin{bmatrix} \text{ADJ1} \\ \text{ADJ2} \\ \vdots \\ \text{ADJ19} \end{bmatrix} \quad (33)$$

調整パラメータ  $\text{PARA}1 \sim \text{PARA}19$  の調整量に対する  $CD$ -フォーカス曲線の係数の変化  $f'$  は、次式(34)のようになる。

【0 3 1 6】

【数 2 9】

$$f' = \text{ADJ1} \cdot B'[1] + \text{ADJ2} \cdot B'[2] + \dots + \text{ADJ19} \cdot B'[19] \quad (34)$$

ここでは、調整パラメータの調整量と、それに伴うCD-フォーカス曲線の係数との上述した関係を利用し、以下に示す計算を行って、各計測点におけるパターンの均一化を図る。すなわち、CD-フォーカス曲線の各係数の目標値の列ベクトルを $f_t$ とし、現在の各係数の列ベクトルを $f$ とし、前述の列ベクトル $B' [ 1 ] \sim B' [ 19 ]$ の1次結合によって形成されるマトリックスを $B$ とすると、それらの関係は、次式(35)で表される。

【0317】

【数30】

$$f_t - f = B \cdot P \quad (35)$$

10

上式を最小二乗法で解くと、次式(36)のようになる。

【0318】

【数31】

$$P = (B^T \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot (f_t - f) \quad (36)$$

ここで、 $B^T$ は、前述のマトリックス $B$ の転置マトリックスであり、 $(B^T \cdot B)^{-1}$ は、 $(B^T \cdot B)$ の逆マトリックスである。

【0319】

20

この調整方法では、主制御装置50が、上述の式(36)を用いて、調整量の列ベクトル $P$ を求め、調整量ADJ1～調整量ADJ19を算出する。なお、式(36)を用いて列ベクトル $P$ を求めるためには、各計測点におけるCD-フォーカス曲線の各係数の目標値、すなわち列ベクトル $f_t$ を決定する必要があるが、ここでは、前述のように、孤立ラインパターンの像の面内均一性を高めることを目標としているため、各計測点における関数 $y''_n$ についての各次の係数の目標値をすべて同じ値に設定するようにすれば良い。

【0320】

次に、縦横線幅差を調整する場合の調整方法について説明する。これには、前述のように、図5に示されるようなレチクル $R_T$ の計測用パターンがそれぞれ計測点1～ $n$ に対応する位置に配置される場合を想定し、前述の予測方法を実行すれば、同一計測点において、ラインパターン毎にCD-フォーカス曲線が得られる。

30

【0321】

この場合にも、上述の式(36)と同様の式を用いて調整量ADJ1～調整量ADJ19を算出するが、前述のように、各計測点において、2つのCD-フォーカス曲線が得られるようになるため、係数マトリックス $f_t$ 及び $f$ の要素数は、上述の式(30)における $f$ の要素数( $33 \times 7 = 231$ )の2倍、すなわち462となり、同一計測点における縦ラインパターン及び横ラインパターンに対応する係数の目標値を同一の値とすれば、縦横線幅差を最も低減することができる調整量ADJ1～ADJ19を算出することが可能となる。

【0322】

40

次に、主制御装置50では、記憶装置42に記憶された調整量ADJ1～ADJ15に従って、前述と同様に、結像性能補正コントローラ48により、可動レンズ13<sub>1</sub>～13<sub>5</sub>の位置及び姿勢の少なくとも一方を調整し、上記の各動作と同時に、主制御装置50は、調整量ADJ19に従って光源16に指令を与え、照明光ELの波長をシフトする。

【0323】

なお、本実施形態では、投影光学系PL等の調整後の状態で、さらに、上述したステップ202～ステップ310を実行して、調整後の各計測点のCD-フォーカス曲線を予測し、さらに上述した評価方法、調整方法を繰り返し実行し、各計測点のパターンの転写状態を逐次接近的に均一化するようにしても良い。

【0324】

50

## 《露光方法》

半導体デバイスの製造時における露光工程では、デバイス製造用のレチクルRがレチクルステージRST上に装填され、前述した動作により、ステップ・アンド・スキャン式の露光が行われる。なお、本実施形態の露光装置100では、上記のステップ・アンド・スキャン方式の露光に際し、前述の露光領域IA内におけるウエハWの位置及び姿勢を、算出された調整量ADJ16～ADJ18に基づいて制御することは、前述した通りである。

## 【0325】

また、本実施形態では、露光条件の設定や、レチクルRの交換により、実際に転写する回路パターンが変更された場合には、図18、図21、図23、図25～図28に示される各ツェルニケ項成分を含む項のツェルニケ感度が変化するため、それらの感度を求め直して、改めて上述の予測方法、評価方法、調整方法を実行する必要があることはいうまでもない。

10

## 【0326】

以上詳細に説明したように、上述の予測方法によれば、投影光学系PLの波面収差 $W(\theta, \rho)$ を級数展開して得られる各収差成分 $C_{n,i}$  ( $n=1\sim33$ 、 $i=1\sim37$ )をそれぞれ含む複数の項の線形結合の値に基づいて、投影光学系PLを介して投影されるパターンの像に関する変動曲線としてのCD-フォーカス曲線を求めることができる。従って、多大な計算時間を要する複雑な計算を伴う結像シミュレーションを用いずとも、各収差成分 $C_{n,i}$  ( $n=1\sim33$ 、 $i=1\sim37$ )を含む項の線形結合の値を求めるという至極単純な演算により、所定露光条件下での所定の収差状態にある投影光学系PLを介したパターンの像に関するCD-フォーカス曲線を予測することが可能となり、その予測結果に基づき、パターンの投影像(又は転写像)の特性を短時間に予測することが可能となる。

20

## 【0327】

また、この予測方法によれば、CD-フォーカス曲線の移動量だけでなく、各収差成分 $C_{n,i}$  ( $n=1\sim33$ 、 $i=1\sim37$ )を含む項の線形結合に基づいて、投影光学系PLの波面収差 $W(\theta, \rho)$ に起因するCD-フォーカス曲線の変形具合も算出するので、CD-フォーカス曲線をさらに精度良く予測することができる。

## 【0328】

また、この予測方法によれば、像サイズ軸方向(線幅変化方向)に関するCD-フォーカス曲線の移動は、各収差成分の二乗 $C_{n,i}^2$ に感度があるだけでなく、互いに異なる収差成分同士のクロス項にも感度があるので、それらのクロス項の線形結合をさらに考慮すれば、像のサイズ軸方向の移動量をさらに精度良く予測することができる。

30

## 【0329】

また、この予測方法によれば、計測点nにおける変動関数の変形具合を示す差分関数 $y'_n$ の奇数次の項の係数は、投影光学系PLの波面収差 $W(\theta, \rho)$ を展開したときの各ツェルニケ項成分 $C_{n,i}$  ( $n=1\sim33$ 、 $i=1\sim37$ )に感度があるため、差分関数 $y'_n$ の奇数次の項の係数を、各ツェルニケ項成分 $C_{n,i}$ の線形結合によって予測することができる。また、差分関数 $y'_n$ の偶数次の項の係数は、各ツェルニケ項成分の二乗 $C_{n,i}^2$ に感度があるため、その偶数次の項の係数を、各ツェルニケ項成分の二乗 $C_{n,i}^2$ の線形結合によって予測することができるので、短時間で、かつ精度良くCD-フォーカス曲線の変形を予測することができる。

40

## 【0330】

また、上述の評価方法によれば、上述の予測方法を用いて、所定露光条件下で投影光学系PLを介して投影される所定パターンの像についてのCD-フォーカス曲線を、投影光学系PLの有効視野内の各計測点についてそれぞれ短時間に精度良く予測することができるようになるので、そのCD-フォーカス曲線に基づいて、投影光学系PLの有効視野内における所定パターンの像の特性、例えば均一性を、短時間に、精度良く評価することが可能となる。

## 【0331】

50

また、この評価方法を用いる調整方法によれば、本実施形態の評価方法を用いて、投影光学系 P L の有効視野内における所定パターンの像の均一性が評価され、その評価結果に基づいて、投影光学系 P L を介した所定パターンの像の形成状態が調整される。従って、評価結果に応じて所定パターンの像の特性を所望の状態、例えば転写像の均一性が改善する方向に調整することが可能となる。

【 0 3 3 2 】

また、上記実施形態の予測方法では、投影光学系 P L が無収差である仮定した場合に求めた C D - フォーカス曲線をフィッティングする関数として、偶数次の項のみ有する 1 0 次関数を選択したが、本発明はこれに限定されるものではなく、フィッティングする関数の最高次数は、8 次以下であっても良いし、1 2 次以上であっても良い。いずれにしても、C D - フォーカス曲線をフィッティングする関数は、高次偶関数であれば良い。

10

【 0 3 3 3 】

また、上記実施形態の予測方法では、差分関数  $y'_n$  を 5 次の関数としたが、これは 4 次以下であっても良いし、6 次以上であっても良い。

【 0 3 3 4 】

また、上記実施形態の予測方法では、各計測点に対応する点に配置される計測用レチクルのパターンを、縦ラインパターン及び横パターン（すなわち交差パターン）が 1 つずつ設けられたパターン、あるいは、孤立ラインパターンとしたが、本発明はこれに限定されるものではなく、複数の平行ラインパターン（L / S パターン）であっても良いし、交差パターンや平行ラインパターンが組み合わされたパターンであっても良い。また、縦、横だけでなく、斜めに延びるラインパターンが含まれていても良い。なお、L / S パターンを採用した場合には、その L / S パターンの両端のラインパターンの線幅をそれぞれ本実施形態の予測方法で予測し、それらの線幅差、すなわち線幅異常値を本実施形態の評価方法で評価し、本実施形態の調整方法と同様に、その評価結果に基づいて、パターンの像の形成状態を調整した上で、線幅異常値の大きさを低減したうえで、露光を実行すれば、高精度な露光が可能となる。

20

【 0 3 3 5 】

また、上記実施形態の評価方法では、ラインパターンの面内均一性、縦横線幅差、線幅異常値を評価項目としたが、本発明はこれに限定されるものではなく、C D - フォーカス曲線に基づいて評価可能なあらゆる項目を評価項目とすることができる。

30

【 0 3 3 6 】

なお、上記実施形態の評価方法では、所定露光条件下で投影光学系 P L を介して投影される所定パターンの像についての C D - フォーカス曲線を、投影光学系 P L の有効視野内の各計測点についてそれぞれ短時間に精度良く予測し、その C D - フォーカス曲線に基づいて、投影光学系 P L の有効視野内における所定パターンの像の特性、例えば均一性を評価する場合について説明したが、本発明の評価方法がこれに限定されるものではない。すなわち、投影光学系 P L の波面収差の情報を得、さらにパターンの投影像に関する情報を得る。そして、これらに基づいて、波面収差をツェルニケ多項式を用いて級数展開した複数のツェルニケ項のうち、その相互作用が前記投影像の特性に影響を与える任意のツェルニケ項の組み合わせのクロスタームにおける前記投影像の特性の変化に対するツェルニケ感度を考慮して前記パターンの像の特性を評価することとしても良い。かかる場合であっても、従来考慮されていなかったその相互作用がパターンの投影像の特性に影響を与える任意のツェルニケ項の組み合わせのクロスタームにおける前記投影像の特性の変化に対するツェルニケ感度を考慮してパターンの像の特性を評価するので、パターンの像の特性をより高精度に評価することができる。

40

【 0 3 3 7 】

また、上記実施形態の調整方法では、前述した式（3 6）等を用いて算出された最適な調整量に基づいて、主制御装置 5 0 の制御の下、結像性能補正コントローラ 4 8 等による調整を自動的に行うものとしたが、これに限らず、前記調整量に基づいて、投影光学系の結像性能などを手動で調整しても良い。

50

## 【 0 3 3 8 】

また、上記実施形態の予測方法には、様々な変形例が考えられ得る。また、上記実施形態では、C D - フォーカス曲線の予測方法、予測されたC D - フォーカス曲線で露光装置 1 0 0 におけるパターンの転写状態を評価する評価方法、その評価結果に応じてパターンの転写状態を調整する調整方法、その調整後に露光を行う露光方法を、一連の処理によって説明したが、すべての方法を一連の処理で行う必要はなく、本発明の予測方法、評価方法、調整方法は、それぞれ単独で、あるいは任意に組み合わせて実行しうるものである。上記実施形態の予測方法の後に続く、評価方法、調整方法、露光方法は、それら予測方法の様々な変形例の後にも実行しうるものである。また、上記実施形態の予測方法及びその変形例の実行後には、上記実施形態の評価方法、調整方法、露光方法の他、上述したような、様々な項目を評価項目とする評価方法、手動による調整方法、ステップ・アンド・リピート方式による露光方法など、様々な評価方法、調整方法、露光方法を適用可能であることはいうまでもない。

10

## 【 0 3 3 9 】

なお、上記実施形態において、投影光学系 P L の波面収差の計測に用いる波面収差計測器として全体形状がウエハホルダと交換可能な形状を有する波面収差計測器を用いても良い。かかる場合には、この波面収差計測器は、ウエハ又はウエハホルダをウエハステージ W S T 上に搬入し、ウエハステージ W S T から搬出する搬送系（ウエハローダなど）を用いて自動搬送することが可能である。さらに、上記実施形態では、ウエハステージに対して波面収差計測装置 8 0 を着脱自在としたが、常設としても良い。このとき、波面収差計測装置 8 0 の一部のみをウエハステージに設置し、残りをウエハステージの外部に配置しても良い。さらに上記実施形態では、波面収差計測装置 8 0 の受光光学系の収差を無視するものとしたが、その波面収差を考慮して投影光学系の波面収差を決定しても良い。また、波面収差の計測に例えば前述の米国特許第 5 , 9 7 8 , 0 8 5 号などに開示された計測用レチクルを用いる場合には、ウエハ上のレジスト層に転写され形成された計測用パターンの潜像の基準パターンの潜像に対する位置ずれを、例えば露光装置が備えるアライメント系 A L G によって検出することとしても良い。なお、計測用パターンの潜像を検出する場合には、ウエハなどの基板上の感光層としてフォトレジストを用いても良いし、あるいは光磁気材料などを用いても良い。このような種々の工夫により、前述した投影光学系 P L の調整を、オペレータやサービスエンジニアを介在させることなく露光装置 1 0 0 によって全て自動的に行うようにすることも可能である。

20

30

## 【 0 3 4 0 】

さらに、上記実施形態では、投影光学系 P L の光学素子を移動して結像性能を調整するものとしたが、これに限らず、その駆動機構に加えて、あるいはその代わりに、例えば投影光学系 P L の光学素子間での気体の圧力を変更する、レチクル R を投影光学系の光軸方向に移動又は傾斜させる、あるいはレチクルとウエハとの間に配置される平行平板の光学的な厚さを変更する機構などを用いても良い。但し、この場合には上記実施形態における自由度の数が変更され得る。また、上記実施形態では 1 9 個の調整パラメータを用いるものとしたが、その数や種類は任意で良く、例えばウエハ表面（ウエハステージ W S T ）の駆動量や照明光 E L の波長シフトなどを含まなくても良い。

40

## 【 0 3 4 1 】

なお、上記実施形態では、露光装置として走査型露光装置を用いる場合について説明したが、これに限らず、例えばステップ・アンド・リピート型の露光装置を用いても良い。

## 【 0 3 4 2 】

この場合の露光装置の用途としては半導体製造用の露光装置に限定されることなく、例えば、角型のガラスプレートに液晶表示素子パターンを転写する液晶用の露光装置、プラズマディスプレイ又は有機 E L などの表示装置、撮像素子（C C D など）、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシーン及び D N A チップなどを製造するための露光装置にも広く適用できる。また、半導体素子などのマイクロデバイスだけでなく、光露光装置、E U V 露光装置、X 線露光装置、及び電子線露光装置などで使用されるレチクル又はマスクを製造するた

50

めに、ガラス基板又はシリコンウエハなどに回路パターンを転写する露光装置にも本発明を適用できる。

【0343】

また、上記実施形態の露光装置の光源は、 $F_2$ レーザ、ArFエキシマレーザ、KrFエキシマレーザなどの紫外パルス光源に限らず、連続光源、例えばg線（波長436nm）、i線（波長365nm）などの輝線を発する超高圧水銀ランプを用いることも可能である。さらに、照明光ELとして、X線、特にEUV光などを用いても良い。

【0344】

また、DFB半導体レーザ又はファイバーレーザから発振される赤外域、又は可視域の単一波長レーザ光を、例えばエルビウム（又はエルビウムとイッテルビウムの両方）がドープされたファイバーアンプで増幅し、非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換した高調波を用いても良い。また、投影光学系の倍率は縮小系のみならず等倍及び拡大系のいずれでも良い。また、投影光学系としては、屈折系に限らず、反射光学素子と屈折光学素子とを有する反射屈折系（カタディオプトリック系）あるいは反射光学素子のみを用いる反射系を用いても良い。なお、投影光学系PLとして反射屈折系又は反射系を用いるときは、前述した可動の光学素子として反射光学素子（凹面鏡や反射鏡など）の位置などを変更して投影光学系の結像性能を調整する。また、照明光ELとして、特に $Ar_2$ レーザ光、又はEUV光などを用いる場合には、投影光学系PLを反射光学素子のみから成るオール反射系とすることもできる。但し、 $Ar_2$ レーザ光やEUV光などを用いる場合にはレチクルRも反射型とする。

【0345】

なお、露光装置100などの製造に際しては、まず、複数のレンズ素子、ミラー等の光学素子などを含む照明光学系12をユニット単体として組み立てるとともに、投影光学系PLを単体として組み立てる。また、多数の機械部品から成るレチクルステージ系やウエハステージ系などを、それぞれユニットとして組み立てる。そして、それぞれユニット単体としての所望の性能を発揮するように、光学的な調整、機械的な調整、及び電気的な調整等を行う。なお、この調整に際して、特に投影光学系PLについては、上記各実施形態で説明した投影光学系の調整方法、又は予測方法及びこれに続く評価方の少なくとも一部を含む投影光学系を介したパターンの像の特性の調整方法を用いて、調整を行うことができる。

【0346】

次に、照明光学系12や投影光学系PLなどを露光装置本体に組むとともに、レチクルステージ系やウエハステージ系などを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続する。

【0347】

次いで、照明光学系12や投影光学系PLについては、光学的な調整を更に行う。これは、露光装置本体への組み付け前と組み付け後とでは、それらの光学系、特に投影光学系PLの結像性能が微妙に変化するからである。本実施形態では、この露光装置本体に対する組み込み後に行われる投影光学系PLの光学的な調整に際し、前述した波面収差計測装置80をウエハステージWSTに取り付け、前述と同様にして波面収差を計測し、その波面収差の計測結果をコンピュータに入力し、前述と同様の手順で、例えば各レンズ素子の6自由度方向それぞれの調整量を算出し、その算出結果を、そのコンピュータのディスプレイ上に表示させる。そして、この表示に従って、技術者（作業員）などが、各レンズ素子を調整する。これにより、所望の結像性能を確実に満たすような投影光学系PLの調整が完了する。なお、この段階で、修正されていない収差、主として高次収差は自動調整が困難な収差であると判断できるので、レンズ等の組付けなどを再調整することが望ましい。

【0348】

なお、上記の再調整により所望の性能が得られない場合などには、一部のレンズを再加工又は交換する必要も生じる。なお、投影光学系PLの光学素子の再加工を容易に行うため、投影光学系PLを露光装置本体に組み込む前に波面収差を専用の波面計測装置等を用

10

20

30

40

50

いて計測し、この計測結果に基づいて再加工が必要な光学素子の有無や位置などを特定し、その光学素子の再加工と他の光学素子の再調整とを並行して行うなどしても良い。

【0349】

その後、更に総合調整（電気調整、動作確認等）をする。これにより、光学特性が高精度に調整された投影光学系PLを用いて、レチクルRのパターンをウエハW上に精度良く転写することができる、本実施形態の露光装置10などの露光装置を製造することができる。なお、露光装置の製造は温度およびクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

【0350】

《デバイス製造方法》

次に上述した露光装置をリソグラフィ工程で使用したデバイスの製造方法の実施形態について説明する。

【0351】

図33には、デバイス（ICやLSI等の半導体チップ、液晶パネル、CCD、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシーン等）の製造例のフローチャートが示されている。図33に示されるように、まず、ステップ401（設計ステップ）において、デバイスの機能・性能設計（例えば、半導体デバイスの回路設計等）を行い、その機能を実現するためのパターン設計を行う。引き続き、ステップ402（マスク製作ステップ）において、設計した回路パターンを形成したマスクを製作する。一方、ステップ403（ウエハ製造ステップ）において、シリコン等の材料を用いてウエハを製造する。

【0352】

次に、ステップ404（ウエハ処理ステップ）において、ステップ401～ステップ403で用意したマスクとウエハを使用して、後述するように、リソグラフィ技術等によってウエハ上に実際の回路等を形成する。次いで、ステップ405（デバイス組立てステップ）において、ステップ404で処理されたウエハを用いてデバイス組立てを行う。このステップ405には、ダイシング工程、ボンディング工程、及びパッケージング工程（チップ封入）等の工程が必要に応じて含まれる。

【0353】

最後に、ステップ406（検査ステップ）において、ステップ405で作成されたデバイスの動作確認テスト、耐久テスト等の検査を行う。こうした工程を経た後にデバイスが完成し、これが出荷される。

【0354】

図34には、半導体デバイスにおける、上記ステップ404の詳細なフロー例が示されている。図34において、ステップ411（酸化ステップ）においてはウエハの表面を酸化させる。ステップ412（CVDステップ）においてはウエハ表面に絶縁膜を形成する。ステップ413（電極形成ステップ）においてはウエハ上に電極を蒸着によって形成する。ステップ414（イオン打ち込みステップ）においてはウエハにイオンを打ち込む。以上のステップ411～ステップ414それぞれは、ウエハ処理の各段階の前処理工程を構成しており、各段階において必要な処理に応じて選択されて実行される。

【0355】

ウエハプロセスの各段階において、上述の前処理工程が終了すると、以下のようにして後処理工程が実行される。この後処理工程では、まず、ステップ415（レジスト形成ステップ）において、ウエハに感光剤を塗布する。引き続き、ステップ416（露光ステップ）において、上で説明した露光装置及び露光方法によってマスクの回路パターンをウエハに転写する。次に、ステップ417（現像ステップ）においては露光されたウエハを現像し、ステップ418（エッチングステップ）において、レジストが残存している部分以外の部分の露出部材をエッチングにより取り去る。そして、ステップ419（レジスト除去ステップ）において、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。

【0356】

これらの前処理工程と後処理工程とを繰り返し行うことによって、ウエハ上に多重に回

10

20

30

40

50

路パターンが形成される。

【0357】

以上説明した本実施形態のデバイス製造方法を用いれば、露光工程（ステップ416）において上記実施形態の露光装置が用いられるので、縦線パターンと横線パターンの転写像同士の線幅差、あるいは孤立パターンの線幅均一性などが効果的に低減された良好な露光を実現することができる。従って、最終製品であるデバイスの歩留まりが向上し、その生産性の向上が可能となる。

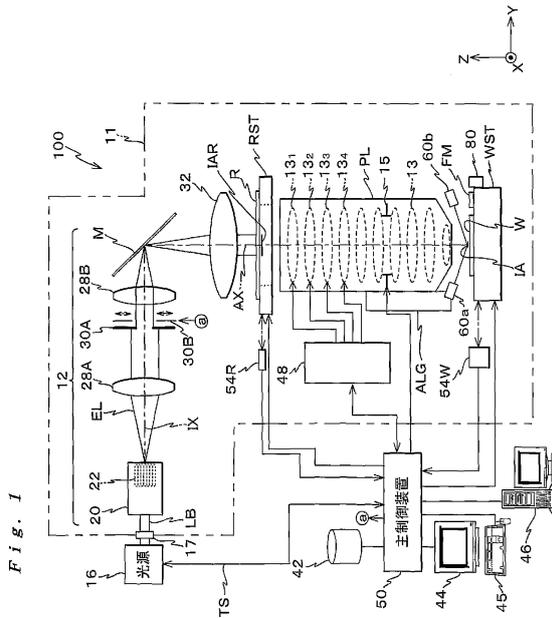
【産業上の利用可能性】

【0358】

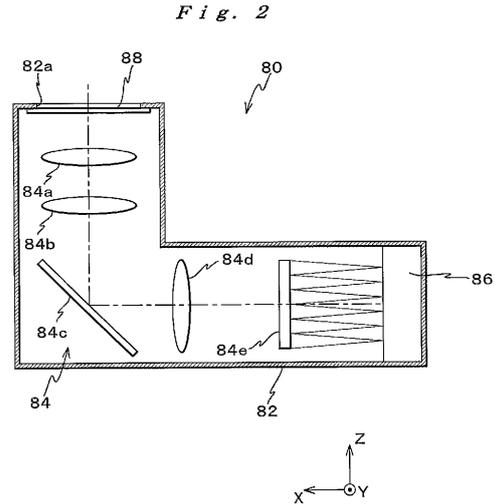
以上説明したように、本発明の投影光学系の調整方法は、相互に直交するラインパターンの像の投影に用いられる投影光学系の調整に適している。また、本発明の予測方法及びプログラムは、投影光学系を介したパターンの像の特性を予測するのに適している。また、本発明の評価方法は、投影光学系を介したパターンの像の特性を評価するのに適している。本発明の調整方法は、投影光学系を介したパターンの像の形成状態を調整するのに適している。また、本発明の露光方法及び露光装置は、物体上にパターンを転写するのに適している。また、本発明のデバイス製造方法は、デバイスの生産に適している。

10

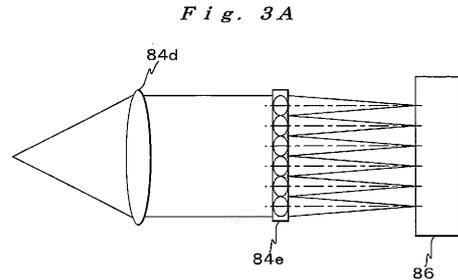
【図1】



【図2】

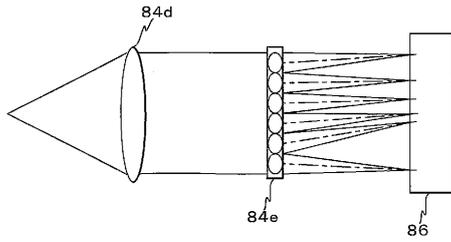


【図3A】



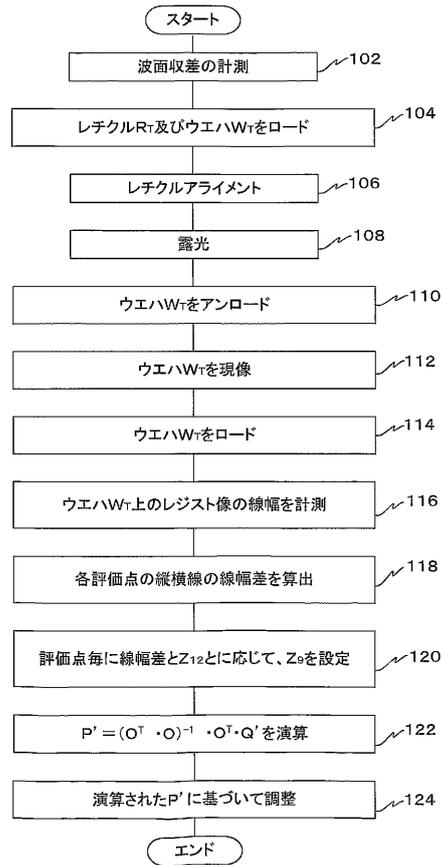
【図3B】

Fig. 3B



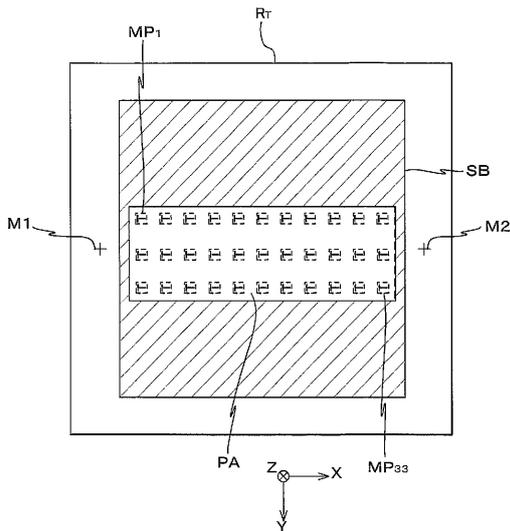
【図4】

Fig. 4



【図5】

Fig. 5



【図6】

Fig. 6A Fig. 6B Fig. 6C

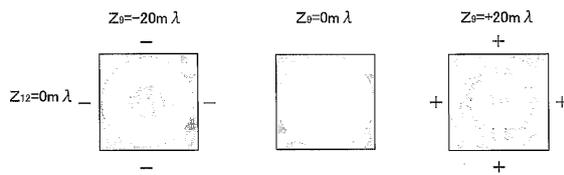
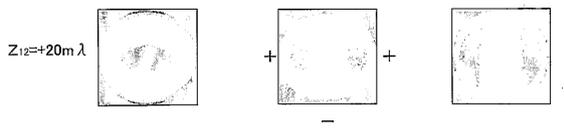


Fig. 6D Fig. 6E Fig. 6F



【図7】

Fig. 7A Fig. 7B Fig. 7C

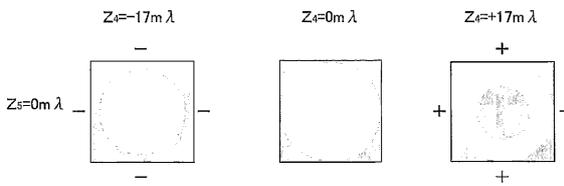
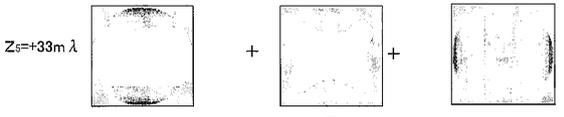
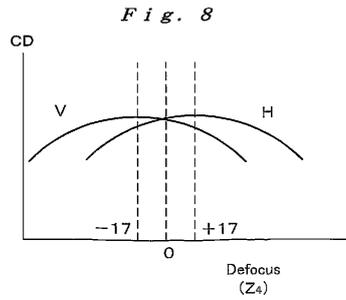


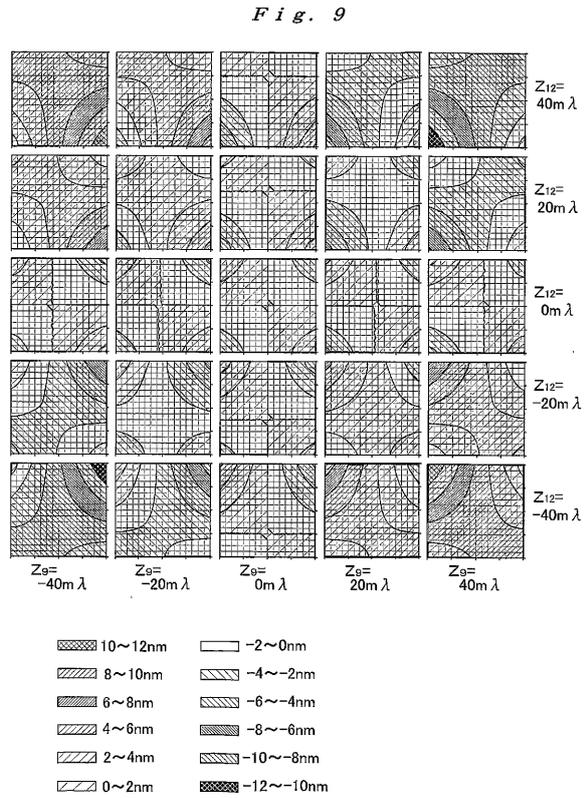
Fig. 7D Fig. 7E Fig. 7F



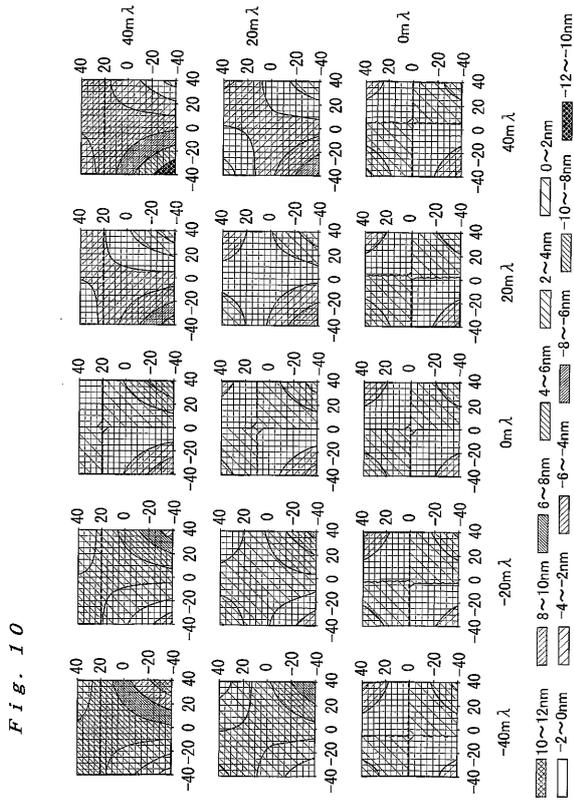
【 図 8 】



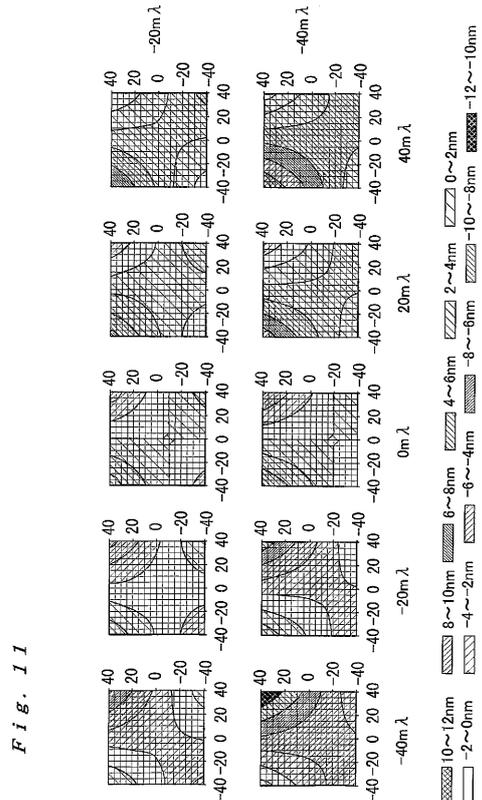
【 図 9 】



【 図 10 】



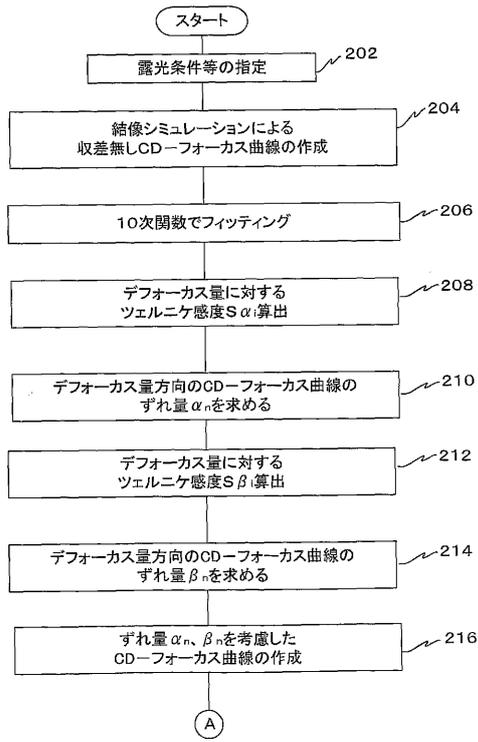
【 図 11 】





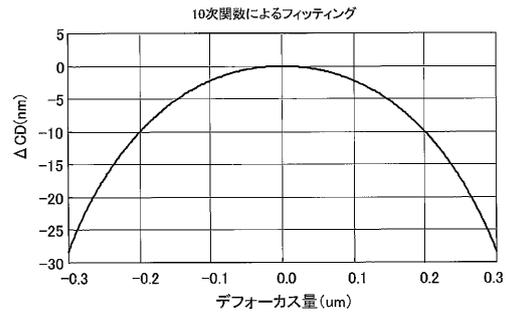
【図16】

Fig. 16



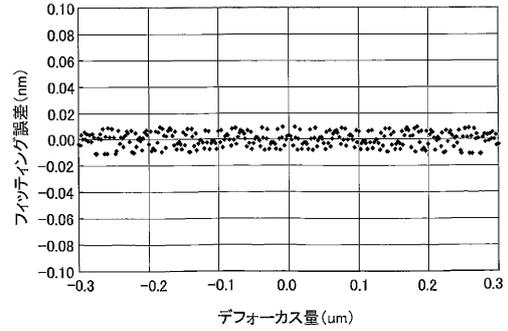
【図17A】

Fig. 17A

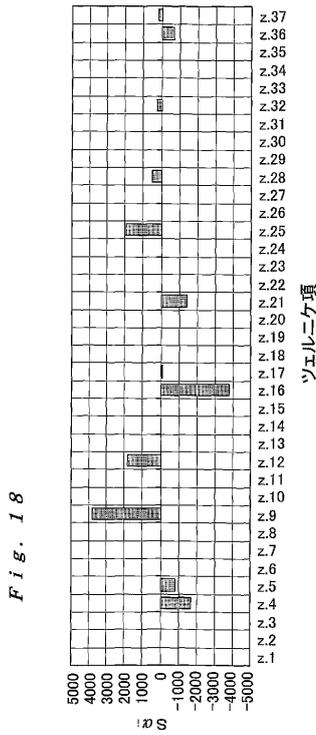


【図17B】

Fig. 17B

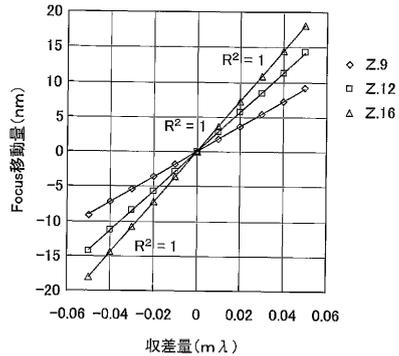


【図18】



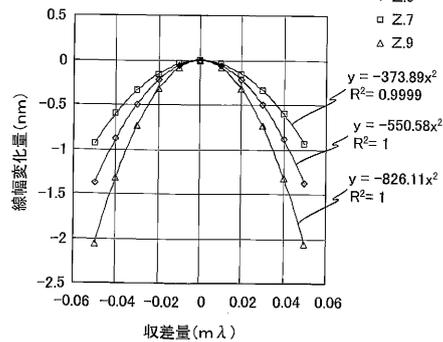
【図19】

Fig. 19

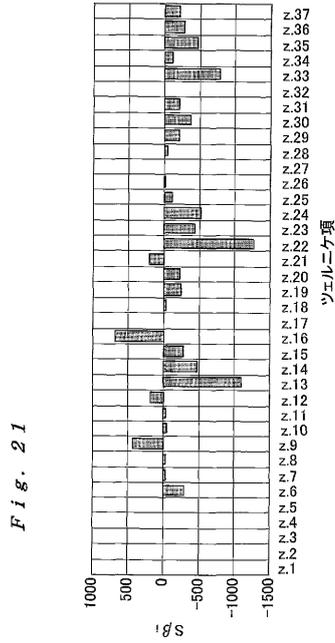


【図20】

Fig. 20

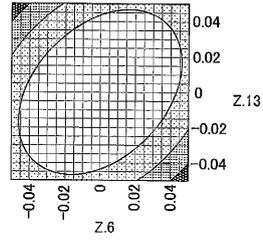


【図 21】



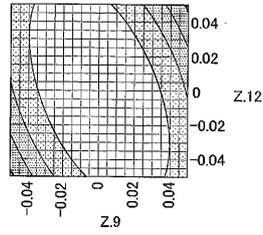
【図 22 A】

Fig. 22A



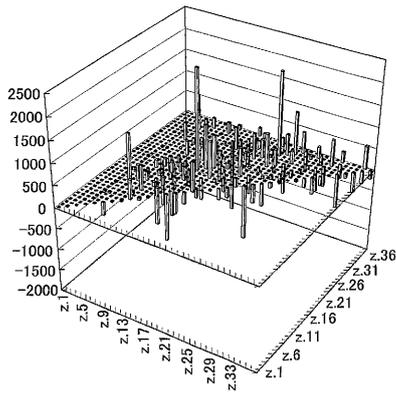
【図 22 B】

Fig. 22B



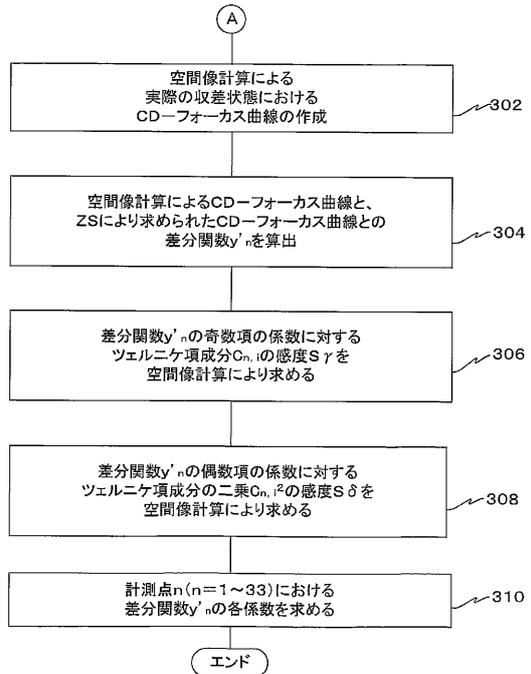
【図 23】

Fig. 23



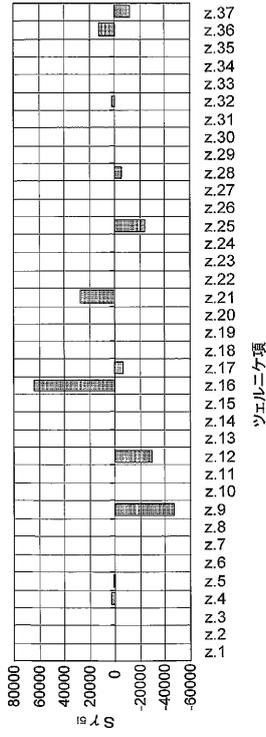
【図 24】

Fig. 24



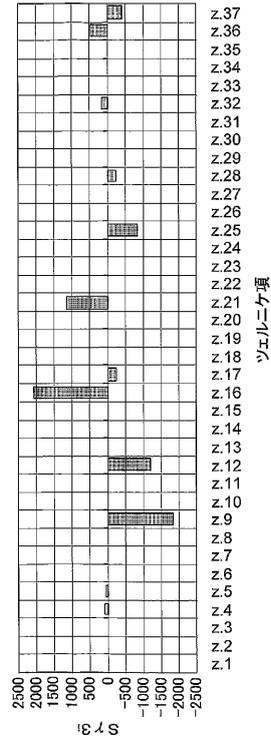
【図 25】

Fig. 25



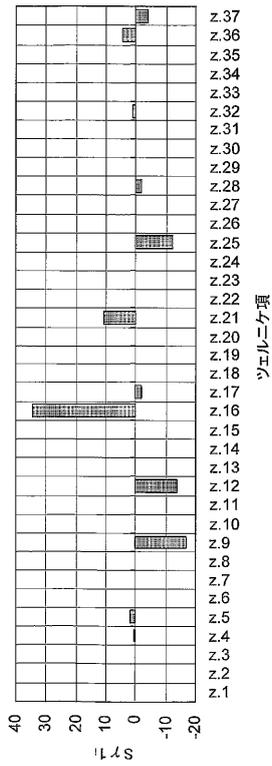
【図 26】

Fig. 26



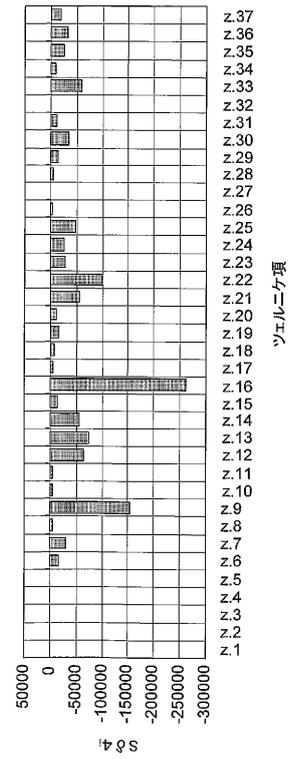
【図 27】

Fig. 27

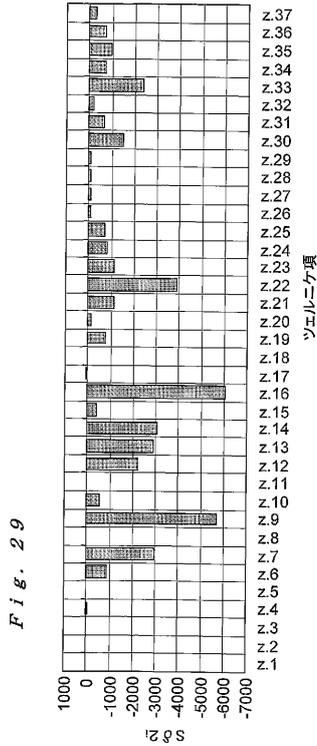


【図 28】

Fig. 28

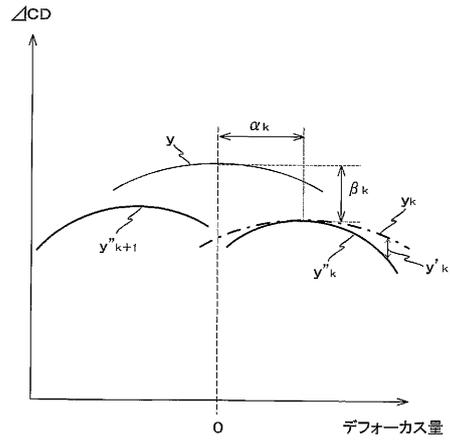


【図29】



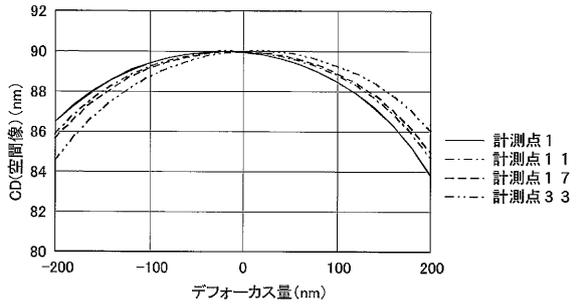
【図30】

Fig. 30



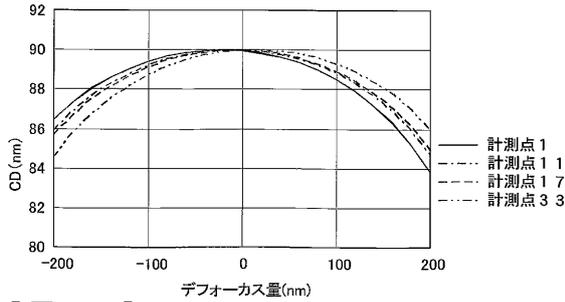
【図31A】

Fig. 31A



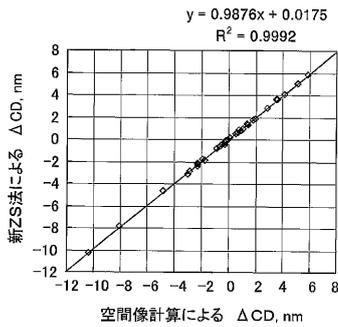
【図31B】

Fig. 31B



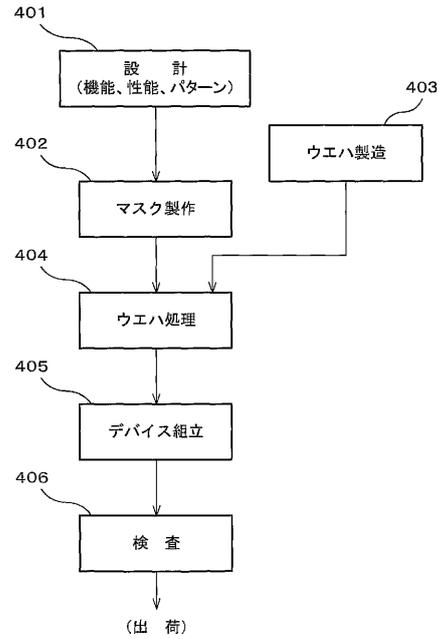
【図32】

Fig. 32



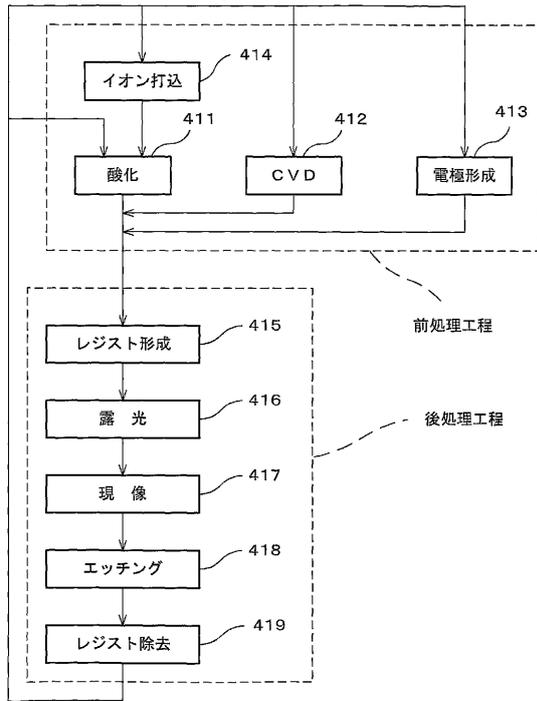
【図33】

Fig. 33



【図34】

Fig. 34



---

フロントページの続き

審査官 新井 重雄

- (56)参考文献 特開2002-025884(JP,A)  
特開2001-289735(JP,A)  
特開2001-085305(JP,A)  
特開2000-121491(JP,A)  
特開平06-084757(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/027

G01M 11/02

G03F 7/20