

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-129888

(P2017-129888A)

(43) 公開日 平成29年7月27日(2017.7.27)

(51) Int.Cl. F I テーマコード(参考)
G03F 7/20 (2006.01) G03F 7/20 521 2H197

審査請求 有 請求項の数 19 O L (全 27 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2017-91614 (P2017-91614)</p> <p>(22) 出願日 平成29年5月2日(2017.5.2)</p> <p>(62) 分割の表示 特願2013-554221 (P2013-554221) の分割</p> <p>原出願日 平成24年12月26日(2012.12.26)</p> <p>(31) 優先権主張番号 特願2012-7727 (P2012-7727)</p> <p>(32) 優先日 平成24年1月18日(2012.1.18)</p> <p>(33) 優先権主張国 日本国(JP)</p>	<p>(71) 出願人 000004112 株式会社ニコン 東京都港区港南二丁目15番3号</p> <p>(74) 代理人 100098165 弁理士 大森 聡</p> <p>(72) 発明者 大和 壮一 東京都港区港南二丁目15番3号 株式会社ニコン内</p> <p>(72) 発明者 渡邊 陽司 東京都港区港南二丁目15番3号 株式会社ニコン内</p> <p>Fターム(参考) 2H197 AA29 CC05 DA04 DB05 HA03 HA04 HA05 HA10</p>
--	--

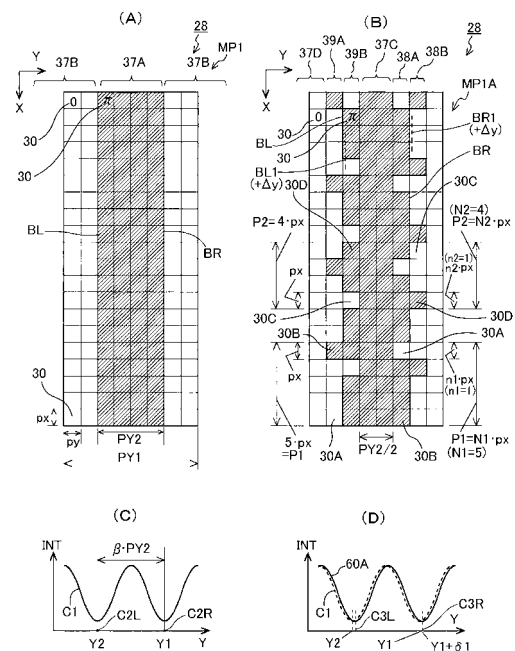
(54) 【発明の名称】露光方法及び装置、並びにデバイス製造方法

(57) 【要約】

【課題】空間光変調器を用いて物体にパターンを投影する際に、空間光変調器の各光学要素の像の幅よりも微細な位置精度又は形状精度でパターンを形成可能とする。

【解決手段】空間光変調器の駆動方法において、Y方向に隣接して配置されてX方向に伸びた第1境界領域及び第2境界領域のうち、第1境界領域内でX方向に投影光学系で解像されない第1ピッチで配列されたミラー要素を位相0に設定し、他のミラー要素を位相 に設定し、第2境界領域内でX方向に投影光学系で解像されない第2ピッチで配列されたミラー要素を位相 に設定し、他のミラー要素を位相0に設定する。

【選択図】図4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

それぞれ光を投影光学系に導くことが可能な複数の光学要素のアレイを有する空間光変調器の駆動方法であって、

第 1 方向に隣接して配置されるとともにそれぞれ前記第 1 方向に交差する第 2 方向に伸びた第 1 領域及び第 2 領域のうち、前記第 1 領域内で前記第 2 方向に前記投影光学系で解像されない第 1 のピッチで配列された複数の前記光学要素を第 1 の状態に設定し、前記第 1 領域内の他の前記光学要素を前記第 1 の状態と異なる第 2 の状態に設定し、

前記第 2 領域内で前記第 2 方向に前記投影光学系で解像されない第 2 のピッチで配列された複数の前記光学要素を前記第 2 の状態に設定し、前記第 2 領域内の他の前記光学要素を前記第 1 の状態に設定する

ことを特徴とする空間光変調器の駆動方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、複数の光学要素を有する空間光変調器の駆動方法、空間光変調器を用いる露光用パターンの生成方法、空間光変調器を用いて物体を露光する露光技術、及びこの露光技術を用いるデバイス製造技術に関する。

【背景技術】

【0002】

例えば半導体素子又は液晶表示素子等のデバイス（電子デバイス又はマイクロデバイス）を製造するためのリソグラフィ工程中で、所定の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基板の各ショット領域に形成するために、ステッパー等の一括露光型の露光装置、又はスキャニングステッパー等の走査露光型の露光装置等が使用されている。

【0003】

最近では、複数種類のデバイス毎に、さらに基板の複数のレイヤ毎にそれぞれマスクを用意することによる製造コストの増大を抑制し、各デバイスを効率的に製造するために、マスクの代わりに、それぞれ傾斜角が可変の多数の微小ミラーのアレイを有する空間光変調器 (spatial light modulators: SLM) を用いて、投影光学系の物体面に可変のパターンを生成するいわゆるマスクレス方式の露光装置が提案されている（例えば、特許文献 1 参照）。また、空間光変調器としては、入射する光の位相分布を制御するために、それぞれ反射面の高さが制御可能な多数の微小ミラーのアレイを有するタイプも提案されている（例えば、非特許文献 1 参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】国際公開第 2009/060745 号パンフレット

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献 1】Yijian Chen et al., "Design and fabrication of tilting and piston micromirrors for maskless lithography," Proc. of SPIE (米国) Vol. 5751, pp.1023-1037 (2005)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

従来の空間光変調器を用いて基板上にパターンを形成する場合には、空間光変調器の各微小ミラー（光学要素）の像を最小単位としてそのパターンが形成されていた。そのため、例えば微小ミラーの像の幅よりも微細な位置精度でそのパターンの位置を設定することが困難であるとともに、微小ミラーの像の幅の非整数倍のピッチを持つライン・アンド・

10

20

30

40

50

スペースパターンを形成することも困難であった。

【0007】

本発明の態様は、このような事情に鑑み、複数の光学要素のアレイを有する空間光変調器を用いて物体にパターンを投影（形成）する際に、その光学要素の像の幅よりも微細な位置精度又は形状精度でパターンを形成可能とすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の第1の態様によれば、それぞれ光を投影光学系に導くことが可能な複数の光学要素のアレイを有する第1の空間光変調器の駆動方法が提供される。この駆動方法は、第1方向に隣接して配置されるとともにそれぞれその第1方向に交差する第2方向に伸びた第1領域及び第2領域のうち、その第1領域内でその第2方向にその投影光学系で解像されない第1のピッチで配列されたその複数の光学要素を第1の状態に設定し、その第1領域内の他の光学要素をその第1の状態と異なる第2の状態に設定し、その第2領域内でその第2方向にその投影光学系で解像されない第2のピッチで配列されたその複数の光学要素をその第2の状態に設定し、その第2領域内の他の光学要素をその第1の状態に設定するものである。

10

【0009】

また、第2の態様によれば、それぞれ光を投影光学系に導くことが可能な複数の光学要素のアレイを有する第2の空間光変調器の駆動方法が提供される。この駆動方法は、第1方向に隣接して又は離れて配置されるとともにそれぞれその第1方向に交差する第2方向に伸びた第1領域及び第2領域のうち、その第1領域内でその第2方向にその投影光学系で解像されない第1のピッチで配列されたその複数の光学要素を第1の状態に設定し、その第1領域内の他の光学要素をその第1の状態と異なる第2の状態に設定し、その第2領域内の少なくとも一部の光学要素をその第1の状態に設定するものである。

20

【0010】

また、第3の態様によれば、露光光で複数の光学要素のアレイを有する空間光変調器及び投影光学系を介して基板を露光する露光方法が提供される。この露光方法は、第1の態様又は第2の態様の空間光変調器の駆動方法によって複数の光学要素の少なくとも一部をその第1の状態又はその第2の状態に設定し、その露光光でその第1の状態又はその第2の状態に設定されたその複数の光学要素及びその投影光学系を介して形成される空間像でその基板を露光するものである。

30

【0011】

また、第4の態様によれば、照明光学系からの露光光で投影光学系を介して基板を露光する露光装置が提供される。この露光装置は、その投影光学系の物体面側に配置されて、それぞれその露光光をその投影光学系に導くように制御可能な複数の光学要素のアレイを有する空間光変調器と、その空間光変調器の複数の光学要素を駆動する制御装置と、を備え、その制御装置は、その基板上にその投影光学系を介して形成される空間像に応じて、第1方向に隣接して又は離れて配置されるとともにそれぞれその第1方向に交差する第2方向に伸びた第1領域及び第2領域のうち、その第1領域内でその第2方向にその投影光学系で解像されない第1のピッチで配列されたその複数の光学要素を第1の状態に設定し、その第1領域内の他の光学要素をその第1の状態と異なる第2の状態に設定し、その第2領域内の少なくとも一部の光学要素をその第1の状態に設定するものである。

40

【0012】

また、第5の態様によれば、投影光学系を用いて基板を露光するとき用いられ、グリッド状に配列された複数の区画を備える露光用パターンの生成方法が提供される。この露光用パターンの生成方法は、第1方向に隣接して又は離れて配置されるとともにそれぞれその第1方向に交差する第2方向に伸びた第1領域及び第2領域に配列されたその複数の区画のうち、その第1領域内でその第2方向にその投影光学系で解像されない第1のピッチで配列されたその複数の区画を第1の状態に設定し、その第1領域内の他の区画をその第1の状態と異なる第2の状態に設定し、その第2領域内の少なくとも一部の区画をその

50

第 1 の状態に設定するものである。

【 0 0 1 3 】

また、第 6 の態様によれば、第 3 の態様の露光方法又は第 4 の態様の露光装置を用いて基板上に感光層のパターンを形成することと、そのパターンが形成されたその基板を処理することと、を含むデバイス製造方法が提供される。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 4 】

本発明の態様によれば、空間光変調器において、第 1 領域内で第 2 方向に投影光学系で解像されない第 1 のピッチで配列された複数の光学要素を第 1 の状態に設定し、その第 1 領域内の他の光学要素をその第 1 の状態と異なる第 2 の状態に設定することによって、その第 1 領域の境界線（光学要素の端部）の像は、その第 2 方向に交差する第 1 方向にその光学要素の像の幅よりも微細な位置精度でシフト可能になる。従って、複数の光学要素のアレイを有する空間光変調器を用いて物体にパターンを投影（形成）する際に、その光学要素の像の幅よりも微細な位置精度又は形状精度でパターンを形成可能になる。

10

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 5 】

【 図 1 】実施形態の一例に係る露光装置の概略構成を示す図である。

【 図 2 】（ A ）は図 1 中の空間光変調器 2 8 の一部を示す拡大斜視図、（ B ）は図 2 （ A ）の B B 線に沿う断面図である。

【 図 3 】（ A ）は走査露光時のウエハのショット領域を示す図、（ B ）はステップ・アンド・リピート方式で露光する際のウエハのショット領域を示す図である。

20

【 図 4 】（ A ）、（ B ）はそれぞれ空間光変調器によって設定される反射光の位相分布の例を示す部分拡大平面図、（ C ）、（ D ）はそれぞれ図 4 （ A ）、図 4 （ B ）の位相分布に対応する空間像の強度分布を示す図である。

【 図 5 】（ A ）、（ B ）、（ C ）はそれぞれ空間光変調器によって設定される反射光の位相分布の別の例を示す部分拡大平面図、（ D ）、（ E ）、（ F ）はそれぞれ図 5 （ A ）、図 5 （ B ）、図 5 （ C ）の位相分布に対応する空間像の強度分布を示す図である。

【 図 6 】（ A ）は実施形態で設定される反射光の位相分布の例を示す部分拡大平面図、（ B ）は比較例の反射光の位相分布を示す部分拡大平面図、（ C ）は実施形態の位相分布の空間像に対応するレジストパターンを示す拡大図、（ D ）は比較例のレジストパターンを示す拡大図である。

30

【 図 7 】（ A ）は L & S パターンを形成するために空間光変調器で設定される反射光の位相分布の一例を示す部分拡大平面図、（ B ）は図 7 （ A ）の位相分布に対応する空間像の強度分布を示す図である。

【 図 8 】空間光変調器を用いる露光動作の一例を示すフローチャートである。

【 図 9 】（ A ）は所定のパターンの目標とするシフト量と実際のシフト量との関係の一例を示す図、（ B ）は第 1 変形例における所定のパターンの目標とするシフト量と実際のシフト量との関係の一例を示す図である。

【 図 1 0 】（ A ）、（ B ）、（ C ）、（ D ）はそれぞれ第 1 変形例の空間光変調器で設定される反射光の位相分布の例を示す部分拡大平面図である。

40

【 図 1 1 】（ A ）は図 7 （ A ）の位相分布の空間像の強度分布等を示す図、（ B ）は第 2 変形例の位相分布の空間像の強度分布等を示す図である。

【 図 1 2 】第 2 変形例の空間光変調器で設定される反射光の位相分布を示す部分拡大平面図である。

【 図 1 3 】第 3 変形例に係る露光装置の概略構成を示す図である。

【 図 1 4 】電子デバイスの製造工程の一例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 】

【 0 0 1 6 】

本発明の実施形態の一例につき図 1 ~ 図 8 を参照して説明する。

図 1 は、本実施形態に係るマスクレス方式の露光装置 E X の概略構成を示す。図 1 にお

50

いて、露光装置 E X は、パルス発光を行う露光用の光源 2 と、光源 2 からの露光用の照明光（露光光）I L で被照射面を照明する照明光学系 I L S と、ほぼその被照射面又はその近傍の面上に二次元のアレイ状に配列されたそれぞれ高さが可変の微小ミラーである多数のミラー要素 3 0 を備えた空間光変調器 2 8 と、空間光変調器 2 8 を駆動する変調制御部 4 8 とを備えている。さらに、露光装置 E X は、多数のミラー要素 3 0 によって生成された反射型の可変の凹凸パターン（可変の位相分布を持つマスクパターン）で反射された照明光 I L を受光して、その凹凸パターン（位相分布）に対応して形成される空間像（デバイスパターン）をウエハ W（基板）の表面に投影する投影光学系 P L と、ウエハ W の位置決め及び移動を行うウエハステージ W S T と、装置全体の動作を統括制御するコンピュータよりなる主制御系 4 0 と、各種制御系等とを備えている。

10

【 0 0 1 7 】

以下、図 1 において、ウエハステージ W S T の底面（不図示のガイド面に平行な面）に垂直に Z 軸を設定し、Z 軸に垂直な平面内において図 1 の紙面に平行な方向に Y 軸を、図 1 の紙面に垂直な方向に X 軸を設定して説明する。また、X 軸、Y 軸、Z 軸の回りの角度をそれぞれ x 方向、y 方向、z 方向の角度とも呼ぶ。本実施形態では、露光時にウエハ W は Y 方向（走査方向）に走査される。

【 0 0 1 8 】

光源 2 としては、波長 1 9 3 n m でパルス幅 5 0 n s 程度のほぼ直線偏光のレーザ光を 4 ~ 6 k H z 程度の周波数でパルス発光する A r F エキシマレーザ光源が使用されている。なお、光源 2 として、波長 2 4 8 n m の K r F エキシマレーザ光源、パルス点灯される発光ダイオード、又は Y A G レーザ若しくは固体レーザ（半導体レーザ等）から出力されるレーザ光の高調波を生成する固体パルスレーザ光源等も使用できる。固体パルスレーザ光源は、例えば波長 1 9 3 n m（これ以外の種々の波長が可能）でパルス幅 1 n s 程度のレーザ光を 1 ~ 2 M H z 程度の周波数でパルス発光可能である。

20

【 0 0 1 9 】

本実施形態においては、光源 2 には電源部 4 2 が連結されている。主制御系 4 0 が、パルス発光のタイミング及び光量（パルスエネルギー）を指示する発光トリガパルス T P を電源部 4 2 に供給する。その発光トリガパルス T P に同期して、電源部 4 2 は指示されたタイミング及び光量で光源 2 にパルス発光を行わせる。

光源 2 から射出された断面形状が矩形でほぼ平行光束のパルスレーザ光よりなる照明光 I L は、1 対のレンズよりなるビームエキスパンダ 4、照明光 I L の偏光状態を制御する偏光制御光学系 6 及びミラー 8 A を介して、Y 軸に平行に、複数の回折光学素子（diffractive optical element）1 0 A、1 0 B 等から選択された回折光学素子（図 1 では回折光学素子 1 0 A）に入射する。偏光制御光学系 6 は、例えば照明光 I L の偏光方向を回転する 1 / 2 波長板、照明光 I L を円偏光に変換するための 1 / 4 波長板、及び照明光 I L をランダム偏光（非偏光）に変換するための楔型の複屈折性プリズム等を照明光 I L の光路に交換可能に設置可能な光学系である。

30

【 0 0 2 0 】

回折光学素子 1 0 A、1 0 B 等は、回転板 1 2 の周縁部にほぼ等角度間隔で固定されている。主制御系 4 0 が駆動部 1 2 a を介して回転板 1 2 の角度を制御して、照明条件に応じて選択された回折光学素子を照明光 I L の光路上に設置する。選択された回折光学素子で回折された照明光 I L は、レンズ 1 4 a、1 4 b よりなるリレー光学系 1 4 によってマイクロレンズアレイ 1 6 の入射面に導かれる。マイクロレンズアレイ 1 6 に入射した照明光 I L は、マイクロレンズアレイ 1 6 を構成する多数の微小なレンズエレメントによって二次元的に分割され、各レンズエレメントの後側焦点面である照明光学系 I L S の瞳面（照明瞳面 I P P）には二次光源（面光源）が形成される。

40

【 0 0 2 1 】

一例として、回折光学素子 1 0 A は通常照明用であり、回折光学素子 1 0 B は、小さいコヒーレンスファクター（値）の照明光を生成する小照明用であり、その他に、2 極照明用、4 極照明用、及び輪帯照明用等の回折光学素子（不図示）も備えられている。な

50

お、複数の回折光学素子 10A, 10B 等の代わりに、それぞれ傾斜角が可変の多数の微小ミラーのアレイを有する空間光変調器を使用してもよく、マイクロレンズアレイ 16 の代わりにフライアイレンズ等も使用可能である。

【0022】

照明瞳面 IPP に形成された二次光源からの照明光 IL は、第 1 リレーレンズ 18、視野絞り 20、光路を -Z 方向に折り曲げるミラー 8B、第 2 リレーレンズ 22、コンデンサ光学系 24、及びミラー 8C を介して、XY 平面に平行な被照射面（設計上の転写用パターンが配置される面）に x 方向に平均的な入射角 θ で入射する。言い換えると、その被照射面に対して照明光学系 ILS の光軸 AXI は x 方向に入射角 θ で交差している。入射角 θ は例えば数 deg (°) から数 10 deg である。その被照射面又はその近傍の面に、空間光変調器 28 の 2 次元のアレイ状に配列された多数のミラー要素 30 の電源オフ時の反射面が配置される。ビームエキスパンダ 4 からコンデンサ光学系 24 及びミラー 8C までの光学部材を含んで照明光学系 ILS が構成されている。照明光学系 ILS からの照明光 IL は、空間光変調器 28 の多数のミラー要素 30 のアレイ上の X 方向に細長い長方形の照明領域 26A をほぼ均一な照度分布で照明する。多数のミラー要素 30 は、照明領域 26A を含む長方形の領域に X 方向及び Y 方向に所定ピッチで配列されている。照明光学系 ILS 及び空間光変調器 28 は、不図示のフレームに支持されている。

10

【0023】

図 2 (A) は、図 1 中の空間光変調器 28 の反射面の一部を示す拡大斜視図、図 2 (B) は図 2 (A) の BB 線に沿う断面図である。図 2 (A) において、空間光変調器 28 の反射面には、X 方向及び Y 方向にそれぞれピッチ（周期） p_x 及び p_y で、多数のミラー要素 30 が配列されている。ミラー要素 30 の X 方向及び Y 方向の幅は、それぞれピッチ p_x 及び p_y とほぼ等しいとみなすことができる。一例としてミラー要素 30 は正方形であり、ピッチ p_x , p_y は互いに等しい。なお、ミラー要素 30 は長方形等でもよく、ピッチ p_x , p_y は互いに異なってもよい。

20

【0024】

その反射面において、X 方向に i 番目 ($i = 1, 2, \dots, I$) 及び Y 方向に j 番目 ($j = 1, 2, \dots, J$) の位置 $P(i, j)$ にそれぞれミラー要素 30 が配置されている。一例として、ミラー要素 30 の Y 方向（ウエハ W の走査方向に対応する方向）の配列数 J は数 100 ~ 数 1000 であり、X 方向の配列数 I は配列数 J の数倍 ~ 数 10 倍である。また、ミラー要素 30 の配列のピッチ（又は幅） $p_x (= p_y)$ は例えば $10 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 程度である。

30

【0025】

また、空間光変調器 28 は、多数のミラー要素 30 と、各ミラー要素 30 をそれぞれ可撓性（弾性）を持つヒンジ部 35（図 2 (B) 参照）を介して支持するベース部材 32 とを備えている。

図 2 (B) において、ベース部材 32 は、例えばシリコンよりなる平板状の基材 32A と、基材 32A の表面に形成された窒化ケイ素（例えば Si_3N_4 ）等の絶縁層 32B とから構成されている。また、ベース部材 32 の表面に X 方向、Y 方向に所定ピッチで支持部 34 が形成され、隣接する Y 方向の支持部 34 の間に、弾性変形によって Z 方向に可撓性を持つ 1 対の 2 段のヒンジ部 35 を介して、ミラー要素 30 の裏面側の凸部が支持されている。支持部 34、ヒンジ部 35、及びミラー要素 30 は例えばポリシリコンから一体的に形成されている。ミラー要素 30 の反射面（表面）には、反射率を高めるために金属（例えばアルミニウム等）の薄膜よりなる反射膜 31 が形成されている。

40

【0026】

また、ミラー要素 30 の底面側のベース部材 32 の表面に電極 36A が形成され、電極 36A に対向するようにヒンジ部 35 の底面に電極 36B が形成されている。ベース部材 32 の表面及び支持部 34 の側面には、ミラー要素 30 毎に対応する電極 36A, 36B 間に所定の電圧を印加するための信号ライン（不図示）がマトリクス状に設けられている。この場合、電源オフ状態又は電源オン状態で電極 36A, 36B 間に電圧が印加されて

50

いない状態（第1の状態）では、照明光 I L 2 が入射している位置 P (i , j - 1) のミラー要素 3 0 で示すように、ミラー要素 3 0 の反射面は、X Y 平面に平行な平面である基準平面 A 1 に合致している。一方、電源オン時で電極 3 6 A , 3 6 B 間に所定の電圧が印加されている状態（第2の状態）では、照明光 I L 1 が入射している位置 P (i , j) のミラー要素 3 0 で示すように、ミラー要素 3 0 の反射面は、X Y 平面に平行で基準平面 A 1 から Z 方向に間隔 d 1 だけ変位した平面 A 2 に合致している。図 1 の変調制御部 4 8 が、主制御系 4 0 から設定される照明光 I L の位相分布（凹凸パターン）の情報に応じて、位置 P (i , j) のミラー要素 3 0 毎に電極 3 6 A , 3 6 B 間の電圧を制御する。各ミラー要素 3 0 は、その第 1 の状態又はその第 2 の状態のいずれかに設定される。

【 0 0 2 7 】

このような微小な立体構造の空間光変調器 2 8 は、例えば背景技術で引用した非特許文献 1 に記載されているように、M E M S (Microelectromechanical Systems : 微小電気機械システム) 技術を用いて製造することが可能である。空間光変調器 2 8 の各ミラー要素 3 0 は、平行移動によって第 1 の状態又は第 2 の状態に設定できればよいだけであるため、ミラー要素 3 0 の小型化及びミラー要素 3 0 の配列数の増大が容易である。

【 0 0 2 8 】

また、各ミラー要素 3 0 の反射面が基準平面 A 1 に合致している状態（第 1 の状態）で、当該ミラー要素 3 0 によって反射される照明光 I L の位相の変化量を第 1 の位相 1 とすると、本実施形態では位相 1 は 0° である。また、各ミラー要素 3 0 の反射面が基準平面 A 1 から間隔 d 1 だけ変位した平面 A 2 に合致している状態（第 2 の状態）で、当該ミラー要素 3 0 で反射される照明光 I L の位相の変化量を第 2 の位相 2 とすると、位相 2 は位相 1 に対して 180° (rad) 異なっている。すなわち、以下の関係が成立する。ただし、空間光変調器 2 8 の製造誤差及び変調制御部 4 8 による駆動誤差等を考慮して、位相 2 は、以下の式に対して数 deg ($^\circ$) 程度の誤差は許容される。

【 0 0 2 9 】

$$1 = 0^\circ \dots (1 A) , \quad 2 = 180^\circ = \text{rad} \dots (1 B)$$

なお、以下では、単位のない位相は rad を意味する。また、位置 P (i , j) のミラー要素 3 0 の反射面が基準平面 A 1 に合致しているときの点線で示す反射光 B 1 の波面の位相の変化量と、その反射面が間隔 d 1 の平面 A 2 に合致しているときの反射光 B 2 の波面の位相の変化量との差分が第 2 の位相 2 である。一例として、入射角 θ をほぼ 0° とすると、ミラー要素 3 0 の反射面に入射する照明光 I L 1 の波長を (ここでは $\lambda = 193 \text{ nm}$) とすると、間隔 d 1 はほぼ次のようになる。

【 0 0 3 0 】

$$d 1 = \lambda / 4 \dots (2)$$

図 2 (A) において、空間光変調器 2 8 の各ミラー要素 3 0 はそれぞれ入射する照明光 I L の位相を 0° 変化させて反射する第 1 の状態、又は入射する照明光 I L の位相を 180° 変化させて反射する第 2 の状態に制御される。以下では、その第 1 の状態に設定されたミラー要素 3 0 を位相 0 のミラー要素、その第 2 の状態に設定されたミラー要素 3 0 を位相 1 のミラー要素とも呼ぶこととする。

【 0 0 3 1 】

一例として、所定パルス数の照明光 I L の発光毎に、主制御系 4 0 が変調制御部 4 8 に、空間光変調器 2 8 によって設定される照明光 I L の位相分布（凹凸パターン）の情報を供給する。これに応じて変調制御部 4 8 が空間光変調器 2 8 の各ミラー要素 3 0 を位相 0 又は位相 1 に制御する。ウエハ W の表面にはその位相分布に応じた空間像が形成される。

図 1 において、空間光変調器 2 8 の照明領域 2 6 A 内の多数のミラー要素 3 0 のアレイで反射された照明光 I L は、平均的な入射角 θ で投影光学系 P L に入射する。不図示のコラムに支持された光軸 A X W を持つ投影光学系 P L は、空間光変調器 2 8 (物体面) 側に非テレセントリックであり、ウエハ W (像面) 側にテレセントリックの縮小投影光学系である。投影光学系 P L は、空間光変調器 2 8 によって設定される照明光 I L の位相分布に応じた空間像の縮小像を、ウエハ W の 1 つのショット領域内の露光領域 2 6 B (照明領域

10

20

30

40

50

26Aと光学的に共役な領域)に形成する。投影光学系PLの投影倍率は例えば1/10~1/100程度である。投影光学系PLの像面側の開口数をNA、照明光ILの波長をとして、照明条件を通常照明とすると、投影光学系PLの解像度Re(周期的パターンのピッチ又は線幅の2倍で表した解像限界)は、次のようになる。

【0032】

$$Re = \lambda / NA \quad \dots (3)$$

一例として、解像度Reは、空間光変調器28のミラー要素30の像の幅($\lambda \cdot py$)の1倍~数倍程度である。例えば、ミラー要素30の大きさ(配列のピッチ)が数 μm 程度、投影光学系PLの投影倍率が1/100程度であれば、解像度Reは数10nm~その数倍程度である。ウエハW(基板)は、例えばシリコン又はSOI(silicon on insulator)等の円形の平板状の基材の表面に、フォトレジスト(感光材料)を数10nm~200nm程度の厚さで塗布したものを含む。

10

【0033】

本実施形態のように物体側に非テレセントリックの投影光学系PLを用いることによって、空間光変調器28の多数のミラー要素30の反射面とウエハWの露光面(フォトレジストの表面)とをほぼ平行に配置できる。従って、露光装置の設計・製造が容易である。さらに、照明光ILの偏光状態を任意の状態に設定できる。

また、露光装置EXが液浸型である場合には、例えば米国特許出願公開第2007/242247号明細書に開示されているように、投影光学系PLの先端の光学部材とウエハWとの間に照明光ILを透過する液体(例えば純水)を供給して回収する局所液浸装置が設けられる。液浸型の場合には開口数NAを1より大きくできるため、解像度をさらに高めることができる。

20

【0034】

図1において、ウエハWはウエハホルダ(不図示)を介してウエハステージWSTの上面に吸着保持され、ウエハステージWSTは、不図示のガイド面上でX方向、Y方向にステップ移動を行うとともに、Y方向に一定速度で移動する。ウエハステージWSTのX方向、Y方向の位置、及びZ方向の回転角等はレーザ干渉計45によって形成され、この計測情報がステージ制御系44に供給されている。ステージ制御系44は、主制御系40からの制御情報及びレーザ干渉計45からの計測情報に基づいて、リニアモータ等の駆動系46を介してウエハステージWSTの位置及び速度を制御する。なお、ウエハWのアライメントを行うために、ウエハWのアライメントマークの位置を検出するアライメント系(不図示)等も備えられている。

30

【0035】

ウエハWの露光時には、基本的な動作として、ウエハWのアライメントを行った後、照明光学系ILSの照明条件を設定する。また、主制御系40から変調制御部48に、ウエハWの各ショット領域に露光されるパターンに対応する位相分布の情報が供給される。そして、例えば図3(A)に示すウエハWの表面でY方向に一列に配列されたショット領域SA21, SA22, ...に露光を行うために、ウエハWを走査開始位置に位置決めする。その後、ウエハWの+Y方向への一定速度での走査を開始する。なお、図3(A)のショット領域SA21等の中の矢印は、ウエハWに対する露光領域26Bの相対的な移動方向を示している。

40

【0036】

次に、主制御系40は、露光領域26Bに対するウエハWのショット領域SA21の相対位置の情報を変調制御部48に供給し、その相対位置に応じて変調制御部48は、転写対象の部分位相分布を読み出し、読み出した部分位相分布を空間光変調器28で設定する。そして、主制御系40が電源部42に発光トリガパルスTPを供給することによって、ウエハW上の露光領域26Bには、Y方向の位置に応じて目標とする空間像が露光される。この動作は、ウエハWが所定量移動する毎に、かつショット領域SA21が露光領域26Bを横切るまで繰り返される。

【0037】

50

その後、ウエハWのショット領域SA21に隣接するショット領域SA22に露光するために、ウエハWを同じ方向に走査したまま、主制御系40は、変調制御部48に露光領域26Bに対するショット領域SA22の相対位置の情報を供給するとともに、電源部42に発光トリガパルスTPを供給する。このようにして、マスクレス方式で、ショット領域SA21からSA22にかけて連続的に露光を行うことができる。そして、図3(A)のウエハWのX方向に隣接するショット領域SA31, SA32を含む列の露光に移行する場合には、ウエハステージWSTを駆動してウエハWをX方向(走査方向に直交する非走査方向)にステップ移動する。そして、点線で示す露光領域26Bに対するウエハWの走査方向を逆の-Y方向に設定し、主制御系40から変調制御部48に露光領域26Bに対するショット領域SA31等の相対位置の情報を供給し、電源部42に発光トリガパルスTPを供給する。これによって、ショット領域SA32からSA31にかけて連続的に露光を行うことができる。この露光に際して、ショット領域SA21, SA22等に互いに異なる空間像を露光することも可能である。その後、ウエハWのフォトレジストの現像を行うことで、ウエハWの各ショット領域に回路パターンに対応するレジストパターンが形成される。

10

【0038】

次に、本実施形態の露光装置EXにおいて、空間光変調器28のミラー要素30の像の幅よりも微細な位置精度及び/又は形状精度でパターンを形成する動作につき説明する。初めに、ウエハWの表面に、X方向に伸びた一つ又は複数のラインパターンをミラー要素30の像の幅よりも微細なシフト量で次第にシフトさせて露光するものとする。この場合の照明光学系ILSの照明条件は、例えば値が0.14程度の小照明で、照明光ILの偏光方向がウエハW上でX方向(ラインパターンの長手方向)になるように設定される。

20

【0039】

まず、ウエハWの表面に形成されるラインパターンの中心が、複数のミラー要素30の像の境界部にある場合を想定する。この場合、空間光変調器28のミラー要素30のアレイの位相分布は、図4(A)の部分拡大平面図(ベース部材32側から見た配置、以下同様)で示すように、Y方向に複数列(例えば4列以上)でX方向に複数行(例えば15行以上)のミラー要素30を含む矩形の第1パターン領域37A内で各ミラー要素30が第2の状態(位相)となり、第1パターン領域37Aの-Y方向に隣接し、第1パターン領域37Aとほぼ同じ大きさの矩形の第2パターン領域37B(図4(A)ではそのうちの+Y方向の2列分が現れている)内で各ミラー要素30が第1の状態(位相0)となる分布に設定される。なお、説明の便宜上、図4(A)及び後述の図4(B)、図5(A)~(C)等では、第2の状態(位相)のミラー要素30にはハッチングを施している。また、ミラー要素30のX方向及びY方向の配列のピッチ(ミラー要素30の幅)は p_x 及び p_y (ここでは $p_x = p_y$)である。

30

【0040】

なお、一例として、Y方向の幅 P_{Y2} (図4(A)では $P_{Y2} = 4p_y$)のパターン領域37A, 37BはY方向に交互に繰り返して配列されて周期的な位相分布を形成しており、図4(A)にはその周期的な位相分布のうちのY方向に1ピッチ P_{Y1} ($P_{Y1} = 2P_{Y2}$)分の位相パターンMP1が示されている。図4(A)で、第1パターン領域37Aの+Y方向に隣接して配列されている2列分の位相0のミラー要素30のアレイは、次の周期の第2パターン領域37Bの一部である。同様に、後述の図4(B)、図5(A)~(C)等においても、それぞれ周期的な位相分布のうちのY方向に1ピッチ(1周期)分の位相パターンMP1A, MP1B~MP1D等が示されている。

40

【0041】

図4(A)の位相パターンMP1からの照明光ILによってウエハW表面の例えばポジ型のフォトレジスト層に投影される空間像のY方向の強度INTの分布は、図4(C)の強度分布C1で示すように、Y方向の位置 Y_1 , Y_2 で最小となり、位置 Y_1 , Y_2 の間隔は $\cdot P_{Y2}$ (\cdot は投影倍率)である。言い替えると、強度分布C1は、図4(A)の

50

パターン領域 37A と ± Y 方向のパターン領域 37B との境界線 BR 及び BL と共役な X 方向に平行な中心線 C2R 及び C2L (位置 Y1 及び Y2) を中心とする部分で低レベル (感光レベルより低いレベル) となり、その両側で高レベル (感光レベルを超えるレベル) となっている。そのフォトレジスト層を現像すると、図 6 (C) に示すように、Y 方向の幅が $\cdot 2PY/2$ (ここでは $PY2 = 4py$) で、Y 方向の間隔が $\cdot PY2/2$ の X 方向に細長いレジストパターンよりなる点線で現した 2 つのラインパターン C1P が得られる。2 つのラインパターン C1P の中心線 C2R, C2L の Y 方向の位置が図 4 (C) の Y2 及び Y1 である。実際には、多数のラインパターン C1P が Y 方向に周期的に形成される。

【0042】

次に、ウエハ W の表面に形成されるラインパターンの中心を、ミラー要素 30 の像の幅よりも狭い間隔 $\cdot 1$ (又はその像の幅の整数倍にその幅より狭い端数を加えた間隔) だけ Y 方向にシフトさせるものとする。シフトした後のラインパターンを形成するための空間像の強度 INT の分布は、図 4 (D) の実線の強度分布 60A で示すように、シフト前の点線の強度分布 C1 に対して Y 方向に $\cdot 1$ だけ移動している。これは、例えば図 4 (A) の位相パターン MP1 に対応するレジストパターンに対して X 方向に離れた位置に、そのレジストパターンを間隔 $\cdot 1$ だけ Y 方向にシフトさせた形状のレジストパターンを形成する場合、又はウエハ W の走査露光時にウエハ W の Y 方向への移動に追従して空間光変調器 28 で生成される位相パターン MP1 を Y 方向に次第にシフトさせる場合に必要となる。

【0043】

これらの場合、空間光変調器 28 のミラー要素 30 のアレイの位相パターン MP1A は、図 4 (B) に示すように、図 4 (A) の位相パターン MP1 の境界線 BR 及び BL を $\cdot 1$ に対応する y ($= 1/$) だけ Y 方向にシフトさせた境界線 BR1 及び BL1 の内側で位相 $\cdot 1$ となり、それらの外側で位相 0 となる位相分布 (目標とする位相分布) と実質的に等価であればよい。図 4 (B) の位相パターン MP1A において、図 4 (A) の第 1 パターン領域 37A のうち Y 方向の両端の 1 列のミラー要素 30 を除いた部分に対応する第 1 パターン領域 37C 内の全部のミラー要素 30 は位相 $\cdot 1$ (第 2 の状態) となる。また、図 4 (A) の第 2 パターン領域 37B のうち Y 方向の両端の 1 列を除いた部分に対応する複数列 (ここでは 2 列) のミラー要素 30 のアレイよりなる第 2 パターン領域 37D 内のミラー要素 30 は位相 0 (第 1 の状態) となる。そして、第 1 パターン領域 37C に対して + Y 方向に隣接して配置された 1 列のミラー要素 30 よりなる第 1 境界領域 38A において、X 方向に投影光学系 PL で解像されない第 1 のピッチ P1 で配列された複数のミラー要素 30A を位相 0 に設定し、第 1 境界領域 38A 内の他のミラー要素 30B を位相 $\cdot 1$ に設定する。さらに、第 1 境界領域 38A に対して + Y 方向に隣接して配置された 1 列のミラー要素 30 よりなる第 2 境界領域 38B において、X 方向に投影光学系 PL で解像されない第 2 のピッチ P2 で配列された複数のミラー要素 30D を位相 $\cdot 1$ に設定し、第 2 境界領域 38B 内の他のミラー要素 30C を位相 0 に設定する。境界領域 38A, 38B の境界が位相パターンをシフトさせる前の境界線 BR である。

【0044】

ここで、ピッチ P1 及び P2 内にそれぞれ N1 個及び N2 個 (N1 及び N2 はそれぞれ 2 以上の整数) のミラー要素 30 が含まれるものとする、次の関係が成立する。

$$P1 = N1 \cdot px \quad \dots (4A), \quad P2 = N2 \cdot px \quad \dots (4B)$$

ここで、投影光学系 PL の投影倍率 $\cdot M$ を用いると、ピッチ P1 の位相パターンの像のピッチは、 $\cdot P1$ となる。また、ピッチ P1, P2 は投影光学系 PL で解像されないように設定されているため、その位相パターンからの ± 1 次回折光が投影光学系 PL を通過しない条件を求めればよい。式 (3) の投影光学系 PL の解像度 Re 及び式 (4A)、(4B) を用いると、ピッチ P1, P2 の位相パターンが投影光学系 PL で解像されない条件、つまりピッチ P1, P2 の位相パターンが投影光学系 PL の解像限界を超える条件は次のようになる。

【0045】

10

20

30

40

50

$$\begin{aligned} \cdot P 1 &= \cdot N 1 \cdot p x < / N A \quad \dots (5 A), \\ \cdot P 2 &= \cdot N 2 \cdot p x < / N A \quad \dots (5 B) \end{aligned}$$

これらの条件から整数 $N 1$, $N 2$ の条件は次のようになる。ただし、 $\cdot p x$ (ミラー要素 30 の像の幅) を D とおいている。

$$N 1 < / (N A \cdot D) \quad \dots (6 A), \quad N 2 < / (N A \cdot D) \quad \dots (6 B)$$

一例として、 $\cdot = 193 \text{ nm}$ 、 $N A = 1.35$ (液浸法の適用時)、 $D = \cdot p x = 20$ (nm) とすると、式 (6 A) 及び (6 B) の右辺はほぼ 7.15 となるため、ピッチ $P 1$, $P 2$ の位相パターンが投影光学系 $P L$ で解像されない条件は、次のように整数 $N 1$, $N 2$ が 7 以下であればよい。

【0046】

$$N 1 \leq 7 \quad \dots (7 A), \quad N 2 \leq 7 \quad \dots (7 B)$$

また、図 4 (B) において、第 1 境界領域 38 A 内でピッチ $P 1$ 内の位相 0 のミラー要素 30 A の個数を $n 1$ ($n 1$ は $N 1$ より小さい整数)、第 2 境界領域 38 B 内でピッチ $P 2$ 内の位相 0 のミラー要素 30 D の個数を $n 2$ ($n 2$ は $N 2$ より小さい整数) とすると、境界線 $B R$ に対して y だけシフトした境界線 $B R 1$ を持つ位相分布と等価な位相パターン $M P 1 A$ を形成する条件は、境界領域 38 A , 38 B の Y 方向の幅 (ここではミラー要素 30 の Y 方向の幅と同じ) $p y$ を用いて次のようになる。

【0047】

$$y = \{ - (n 1 / N 1) + (n 2 / N 2) \} p y \quad \dots (8 A)$$

また、シフト量 y に対応する図 4 (D) の強度分布 60 A が最小となる位置 (境界線 $B R 1$ と共役な像 $C 3 R$) の位置 $Y 1$ からのシフト量 1 は、投影倍率 M を用いて次のようになる。ただし、 $\cdot p y$ (ミラー要素 30 の像の Y 方向の幅) を D とおいている。

$$1 = \{ - (n 1 / N 1) + (n 2 / N 2) \} D \quad \dots (8 B)$$

本実施形態では、ピッチ $P 1$, $P 2$ を規定する整数 $N 1$, $N 2$ が式 (6 A) 及び (6 B) を満たす範囲内で、整数 $N 1$, $N 2$ 及び整数 $n 1$, $n 2$ の値の少なくとも一つを変更することによって、位相パターン $M P 1 A$ と等価な位相分布における境界線 $B R 1$ のシフト量 y 、ひいては境界線 $B R 1$ と共役な像のシフト量 1 を調整する。また、光学的近接効果による誤差である $O P E$ (Optical Proximity Error) 等を考慮しないものとする。2つの境界領域 38 A , 38 B を用いる場合には、原則としてピッチ $P 1$ とピッチ $P 2$ とは異なっている。すなわち、ピッチ $P 1$, $P 2$ が互いに等しいときには、位相 0 のミラー要素 30 A と位相 0 のミラー要素 30 D との一方が相殺によって省略されるため、境界領域 38 A , 38 B のうちの一方が省略される。

【0048】

一例として、ミラー要素 30 の像の幅 D が 20 nm である場合に、シフト量 1 を 1 nm に設定する場合には、図 4 (B) に示すように、 $N 1 = 5$, $n 1 = 1$, $N 2 = 4$, $n 2 = 1$ に設定すればよい。これらの値を式 (8 B) に代入すると、次のようにシフト量 1 は 1 nm となる。

$$1 = (- 1 / 5 + 1 / 4) 20 = 1 \text{ (nm)} \quad \dots (9 A)$$

また、本実施形態では、図 4 (B) の位相パターン $M P 1 A$ と等価な位相分布の - Y 方向の境界線 $B L 1$ は、元の境界線 $B L$ に対して第 1 パターン領域 37 C 側を正の符号として y だけ移動している。このため、位相パターン $M P 1 A$ において、第 2 パターン領域 37 D に対して + Y 方向に隣接して配置された 1 列のミラー要素 30 よりなる第 3 境界領域 39 A の位相分布が第 1 境界領域 38 A の位相分布を反転した分布となり、第 3 境界領域 39 A に対して + Y 方向に隣接して配置された (第 1 パターン領域 37 C に対して - Y 方向に隣接して配置された) 1 列のミラー要素 30 よりなる第 4 境界領域 39 B の位相分布が第 2 境界領域 38 B の位相分布を反転した分布となっている。境界領域 39 A , 39 B の境界が位相パターンをシフトさせる前の境界線 $B L$ である。

【0049】

具体的に $N 1 = 5$, $n 1 = 1$, $N 2 = 4$, $n 2 = 1$ の場合には、第 3 境界領域 39 A において、X 方向にピッチ $5 p x$ でそれぞれ幅 $p x$ で配列された複数のミラー要素 30 B が

10

20

30

40

50

位相 に設定され、他のミラー要素 30A が位相 0 に設定される。さらに、第 4 境界領域 39B において、X 方向にピッチ $4p_x$ でそれぞれ幅 p_x で配列された複数のミラー要素 30C が位相 0 に設定され、他のミラー要素 30D が位相 に設定される。この位相パターン MP1A を用いることによって、図 4 (A) の位相パターン MP1 の空間像を Y 方向に 1 nm だけシフトさせた空間像を形成できる。

【0050】

同様に、図 4 (A) の位相パターン MP1 の像の強度分布 C1 を Y 方向に 2 nm 、 3 nm 、及び 4 nm だけシフトした図 5 (D) の強度分布 60B、図 5 (E) の強度分布 60C、及び図 5 (F) の強度分布 60D を形成するためには、空間光変調器 28 のミラー要素 30 のアレイの位相分布をそれぞれ図 5 (A) の位相パターン MP1B、図 5 (B) の位相パターン MP1C、及び図 5 (C) の位相パターン MP1D に設定すればよい。図 5 (A) の位相パターン MP1B において、第 1 パターン領域 37C の + Y 方向の第 1 境界領域 38C では、X 方向にピッチ $5p_x$ でそれぞれ幅 $2p_x$ で配列された複数のミラー要素 30A が位相 0 (第 1 の状態) に設定され、他のミラー要素 30B が位相 (第 2 の状態) に設定され、第 1 境界領域 38C に隣接する第 2 境界領域 38D において、X 方向にピッチ $2p_x$ でそれぞれ幅 p_x で配列された複数のミラー要素 30D が位相 に設定され、他のミラー要素 30C が位相 0 に設定される。また、第 2 パターン領域 37D に + Y 方向に隣接する第 3 境界領域 39C 及びこれに + Y 方向に隣接する (第 1 パターン領域 37C に - Y 方向に隣接する) 第 4 境界領域 39D の位相分布は、それぞれ境界領域 38C 及び 38D の分布を反転した分布となる。この位相分布は、図 4 (B) で $N_1 = 5$ 、 $n_1 = 2$ 、 $N_2 = 2$ 、 $n_2 = 1$ とした分布に相当するため、式 (8B) から次のようにシフト量 Δ_1 は 2 nm となる。

【0051】

$$\Delta_1 = (-2/5 + 1/2) \cdot 20 = 2 (\text{nm}) \quad \dots (9B)$$

また、図 5 (B) の位相パターン MP1C は、第 1 パターン領域 37C の + Y 方向の第 1 境界領域 38E で、X 方向にピッチ $4p_x$ でそれぞれ幅 p_x で配列された複数のミラー要素 30A を位相 0 に設定し、他のミラー要素 30B を位相 に設定し、それに隣接する第 2 境界領域 38F において、X 方向にピッチ $5p_x$ でそれぞれ幅 $2p_x$ で配列された複数のミラー要素 30D を位相 に設定し、他のミラー要素 30C を位相 0 に設定したものである。さらに、第 2 パターン領域 37D に + Y 方向に順次隣接する第 3 境界領域 39E 及び第 4 境界領域 39F の位相分布は、それぞれ境界領域 38E 及び 38F の分布を反転した分布である。この位相分布は、図 4 (B) で $N_1 = 4$ 、 $n_1 = 1$ 、 $N_2 = 5$ 、 $n_2 = 2$ とした分布に相当するため、式 (8B) からシフト量 Δ_1 は 3 nm となる。

【0052】

また、図 5 (C) の位相パターン MP1D において、3 列分の位相 のミラー要素 30 よりなる第 1 パターン領域 37E の + Y 方向に隣接する境界領域 62A では、X 方向にピッチ $5p_x$ でそれぞれ幅 p_x で配列された複数のミラー要素 30D が位相 に設定され、他のミラー要素 30C が位相 0 に設定され、3 列分の位相 0 のミラー要素 30 よりなる第 2 パターン領域 37F の + Y 方向 (第 1 パターン領域 37E の - Y 方向) に隣接する境界領域 64A の位相分布は境界領域 62A の分布を反転した分布に設定される。この位相分布は、図 4 (B) で $n_1 = 0$ 、 $N_2 = 5$ 、 $n_2 = 1$ とした分布に相当するため、式 (8B) からシフト量 Δ_1 は 4 nm となる。同様に、式 (8B) の整数 N_1 、 n_1 、 N_2 、 n_2 の値を調整することによって、図 4 (A) の位相パターン MP1 の像の強度分布を Y 方向に $5\text{ nm} \sim 19\text{ nm}$ まで 1 nm ずつ又はほぼ 1 nm ずつシフトした強度分布を持つ位相パターンを形成できる。

【0053】

また、仮に図 4 (B) の位相パターン MP1A の空間像でウエハ W を露光した場合には、図 6 (C) に示すように、図 4 (A) の位相パターン MP1 の空間像から得られるラインパターン C1P の中心線 C2R、C2L に対して Y 方向に Δ_1 だけシフトした中心線 C3R、C3L を持つレジストパターンよりなる X 軸に平行な 2 つのラインパターン 60A

10

20

30

40

50

Pが得られる。ラインパターン60APの中心線C3R及びC3Lは、それぞれ図4(B)の位相パターンMP1Aと等価な位相分布の境界線BR1及びBL1と共役(境界線BR1及びBL1の像)である。

【0054】

また、図6(A)は、図4(B)の位相パターンMP1Aで $N_1 = 5$, $n_1 = 1$, $N_2 = 4$, $n_2 = 1$ としたときの位相パターンMP1Aを示している。従って、図6(A)の位相パターンMP1Aの空間像を露光して現像すると、図6(C)においてシフト量が1nmであるラインパターン60APが得られる。ただし、ミラー要素30の像の幅Dを20nmとしている。これに対して、1nmのシフト量を得るためには、図6(B)の比較例の空間光変調器28Lで設定される位相パターンMP2で示すように、3列分の位相のミラー要素30よりなる第1パターン領域37Eの+Y方向に隣接する境界領域62Bでは、X方向にピッチ20pxでそれぞれ幅pxで配列された複数のミラー要素30Dを位相に設定し、他のミラー要素30Cを位相0に設定し、第1パターン領域37Eの-Y方向に隣接する境界領域64Bの位相分布を境界領域62Aの分布を反転した分布に設定することも考えられる。

10

【0055】

図6(B)の位相パターンMP2は、図4(B)で $n_1 = 0$, $N_2 = 20$, $n_2 = 1$ とした分布に相当するため、式(8B)からシフト量は1nmとなる。しかしながら、整数 N_2 の値20が、投影光学系PLで解像されない限界である式(7B)の上限値7を超えているため、境界領域62B及び64Bの像がウエハWに露光されてしまう。そのため、位相パターンMP2の空間像を露光して得られるレジストパターンは、図6(D)の2つのレジストパターン61Pで示すように、X方向に周期的にうねるような形状となり、パターン忠実度が低下しており、好ましくない。

20

【0056】

本実施形態においては、例えば図4(B)のように位相パターンMP1Aにおいて、2つの境界領域38A, 38B及び/又は39A, 39Bを設けることによって、投影光学系PLで解像されないという条件(例えば式(7A)及び(7B))を満たしつつ、得られるラインパターンのY方向のシフト量をミラー要素30の像の幅Dに対して例えば1/20以下程度の微量に設定できる。

【0057】

次に、ウエハWの表面に、X方向に伸びたラインパターンをY方向にミラー要素30の像の幅の非整数倍のピッチで配列したライン・アンド・スペースパターン(以下、L&Sパターンという。)を形成するものとする。この場合の照明条件も、例えば値が0.14程度の小照明に設定され、偏光条件も、照明光ILの偏光方向がウエハW上でX方向(ラインパターンの長手方向)になるように設定される。また、ミラー要素30の像の幅Dを20nmであるとして、ウエハW上でピッチが78nmのL&Sパターンを形成するものとする。

30

【0058】

このために、空間光変調器28のミラー要素30のアレイを用いて、図7(A)の部分拡大平面図で示すように、Y方向に7列でX方向に複数行(例えば20行以上)のミラー要素30を含む第1部分パターンSP1と、この第1部分パターンSP1に順次+Y方向に隣接するとともにそれぞれY方向に8行でX方向に複数行(例えば20行以上)のミラー要素30を含む第2、第3、第4、及び第5部分パターンSP2, SP3, SP4, SP5とを含む位相パターンMP3を生成する。第1部分パターンSP1に-Y方向に隣接する領域のミラー要素30は位相0に設定する。なお、図7(A)において図4(A)~図5(C)に対応する部分には同一の符号を付してその詳細な説明を省略する。

40

【0059】

図7(A)の位相パターンMP3において、第1部分パターンSP1は、Y方向に3列の位相のミラー要素30のアレイよりなる第1パターン領域37Eと、この領域に対して+Y方向に隣接して配置されて、X方向にピッチ2pxで配置された幅pxの位相0(

50

第1の状態)のミラー要素30Aとこれ以外の位相(第2の状態)のミラー要素30Bとを有する第1境界領域38Gと、この領域に対して+Y方向に隣接して配置されて、X方向にピッチ $5p_x$ で配置された幅 $2p_x$ (2個)のミラー要素30Dとこれ以外の位相0のミラー要素30Cとを有する第2境界領域38Hと、この領域に対して+Y方向に隣接して配置されたY方向に2行の位相0のミラー要素30のアレイよりなる第2パターン領域37Dと、を有する。この場合、ミラー要素30A, 30Dの配列のピッチは投影光学系PLによって解像されない値であり、式(8B)で、 $N_1 = 2$, $n_1 = 1$, $N_2 = 5$, $n_2 = 2$ とおくことで、境界領域38G, 38Hの境界線BRの像に対して等価的な位相分布(境界線BR1の-Y方向の位相が ϕ で+Y方向の位相が0となる分布)の境界線BR1の像の-Y方向へのシフト量 Δy は $2nm$ となる。

10

【0060】

また、第1パターン領域37Eの-Y方向の端部とその境界線BR1との間隔 PY_3 に投影倍率 M を掛けた値 $M \cdot PY_3$ は $78nm$ であり、この値 $M \cdot PY_1$ がウエハW上に形成されるL&SパターンのY方向のピッチとなる。さらに、第2部分パターンSP2, SP3, SP4, SP5は、それぞれ第1パターン領域37E又は37Cの-Y方向に隣接して配置されて等価的な位相分布の境界線の像を-Y方向に $4nm$, $8nm$, $12nm$, $16nm$ シフトさせるための境界領域64D, 64C, 64E, 64Aと、それぞれ第1パターン領域37E又は37Cの+Y方向に隣接して配置されて等価的な位相分布の境界線の像を-Y方向に $6nm$, $10nm$, $14nm$, $18nm$ シフトさせるための境界領域38G, 38I、境界領域62C、境界領域38A, 38D、及び境界領域38C, 38Dと、を有する。これによって、位相パターンMP3の空間像の強度INTは、図7(B)に示すようにピッチ $M \cdot PY_3$ が均一に $78nm$ のL&Sパターンの分布となる。従って、L&Sパターンのピッチの精度を形状精度の一つとみなすと、空間光変調器28のミラー要素30の像の幅よりも微細な形状精度で周期的パターンが形成できる。

20

【0061】

次に、図1の露光装置EXにおいて、空間光変調器28のミラー要素30の幅の像よりも微細な位置精度及び/又は形状精度でパターンを形成する場合の空間光変調器28の駆動方法を含む露光方法の一例につき、図8のフローチャートを参照して説明する。まず、図8のステップ102において、露光装置EXのウエハステージWSTにフォトレジストが塗布されたウエハWをロードし、次のステップ104において、主制御系40は、空間光変調器(SLM)28で設定する全体の位相分布の情報を露光データファイルから読み出し、読み出した情報を変調制御部48に供給する。次のステップ106でウエハステージWSTのY方向への走査を開始し、露光領域26Bとなる部分にウエハWの露光対象のショット領域の先端部が到達したときに、主制御系から変調制御部48に当該ショット領域の相対位置の情報が供給される。

30

【0062】

次のステップ108において、変調制御部48は、全体の位相分布のデータのうちの露光領域26Bに転写される領域(転写対象領域)の部分位相分布を読み出す。次のステップ110において、変調制御部48は、空間光変調器28のミラー要素30単位で、部分位相分布に対応させてミラー要素30を第1の状態(位相0)又は第2の状態(位相 ϕ)に設定する。これによって、転写対象の位相分布が図4(B)の場合には、第1パターン領域37Cのミラー要素30が位相0に、第2パターン領域37Dのミラー要素30が位相 ϕ に設定される。

40

【0063】

次のステップ112で、変調制御部48は、その部分位相分布がミラー要素30の幅の内部に設定される境界線(位相0の領域と位相 ϕ の領域との境界線)を含むかどうかを判定し、その境界線を含まないときにはステップ120に移行する。一方、ミラー要素30の幅の内部に設定される境界線を含む場合には、ステップ114に移行する。ステップ114において、変調制御部48は、その境界線が通過する領域及びこの領域に隣接する領域(境界線付近の領域)(図4(B)の例では境界線BR1, BL1が通過している境界

50

領域 38A, 38B 及び 39A, 39B) のうちの第 1 境界領域 38A (第 1 領域) で第 1 のピッチ P1 で複数のミラー要素 30A の位相を 0 に設定し、他のミラー要素 30B の位相を に設定する。

【0064】

次のステップ 116 において、変調制御部 48 は、図 4 (B) の第 2 境界領域 38B (第 2 領域) で第 2 のピッチ P2 で複数のミラー要素 30D の位相を に設定し、他のミラー要素 30C の位相を 0 に設定する。なお、境界線 BR の境界線 BR1 に対するシフトを一つの境界領域内のミラー要素 30 の位相分布を調整するのみで行うことができる場合には、ステップ 116 は省略できる。次のステップ 118 において、変調制御部 48 は、第 3 境界領域 39A (第 3 領域) 及び第 4 境界領域 39B (第 4 領域) の位相分布をそれぞれ境界領域 38A 及び 38B の分布を反転した分布 (逆の分布) に設定する。なお、境界線 BL1 が境界線 BL と一致する場合には、ステップ 118 は省略できる。さらに、境界線 BL1 の境界線 BL に対するシフト量が、境界線 BR1 のシフト量と異なる場合には、ステップ 118 の動作は、ステップ 114 (又はステップ 114, 116) と同様に独立に実行される。

10

【0065】

次のステップ 120 において、主制御系 40 は光源 2 から照明光学系 ILS を介して空間光変調器 28 に所定パルス数だけ照明光 IL を供給する。これによって、空間光変調器 28 で設定された位相分布に対応する空間像がウエハ W に露光される。次のステップ 122 で走査露光が終了していない場合には、動作はステップ 124 に移行し、主制御系 40 から露光領域 26B に対する露光対象のショット領域の更新された相対位置の情報が供給される。これに応じて変調制御部 48 は、全体の位相分布のうちの転写対象領域を走査方向に対応する方向にシフトする。その後、動作はステップ 108 に戻り、ステップ 108 ~ 120 において、シフトした転写対象領域内の部分位相分布に対応する空間像がウエハ W に露光される。この露光動作は、ステップ 122 で走査露光が終了するまで継続される。

20

【0066】

このように本実施形態によれば、孤立的なライン状の空間像、又は L & S パターンの空間像をそれぞれミラー要素 30 の像の幅よりも微細な位置精度又は形状精度でマスクレス方式で形成することができる。従って、ウエハ W の表面に種々のパターン (空間像) を高精度に形成できる。

30

本実施形態の効果等は以下の通りである。

【0067】

本実施形態の露光装置 EX は、空間光変調器 28 及び変調制御部 48 を備えている。また、変調制御部 48 による空間光変調器 28 の駆動方法は、それぞれ照明光 IL を投影光学系 PL に導く複数のミラー要素 30 (光学要素) のアレイを有する空間光変調器 28 の駆動方法である。この駆動方法は、Y 方向 (第 1 方向) に隣接して配置されるとともにそれぞれ Y 方向に直交する X 方向 (第 2 方向) に伸びた第 1 境界領域 38A 及び第 2 境界領域 38B のうち、第 1 境界領域 38A 内で X 方向に投影光学系 PL で解像されない (解像限界を超える) ピッチ P1 で配列された複数のミラー要素 30A を位相 0 の状態 (第 1 の状態) に設定し、他のミラー要素 30B を位相 の状態 (第 2 の状態) に設定するステップ 114 と、第 2 境界領域 38B 内で X 方向に投影光学系 PL で解像されないピッチ P2 で配列された複数のミラー要素 30D を位相 の状態に設定し、他のミラー要素 30C を位相 0 の状態に設定するステップ 116 と、を有する。

40

【0068】

この空間光変調器 28 の駆動方法は、露光用パターンの生成方法でもある。ここで、空間光変調器 28 の複数のミラー要素 30 (光学要素) のアレイは、グリッド状に配列された複数の区画と見なすことができ、第 1 の状態 (位相 0) および第 2 の状態 (位相) に設定された空間光変調器 28 の複数のミラー要素 30 (区画) の配列は、露光用パターンとみなすことができる。

50

【 0 0 6 9 】

本実施形態によれば、空間光変調器 2 8 において、第 1 境界領域 3 8 A 内にピッチ P 1 で配列された複数のミラー要素 3 0 A を位相 0 に設定し、第 2 境界領域 3 8 B 内にピッチ P 2 で配列された複数のミラー要素 3 0 D を位相 に設定することによって、境界領域 3 8 A , 3 8 B 間の境界線 B R の像は、実質的に式 (8 B) に基づいて Y 方向にミラー要素 3 0 の像の幅 D よりも微細な位置精度でシフトする。従って、空間光変調器 2 8 を用いてウエハ W にパターンを投影する際に、ミラー要素 3 0 の像の幅よりも微細な位置精度又は形状精度でパターンを形成可能になる。

【 0 0 7 0 】

さらに、ミラー要素 3 0 A , 3 0 D の配列ピッチが投影光学系 P L で解像されないピッチであるため、ウエハ W にラインパターンを形成する際に、ラインパターンの直線性が維持されるとともに、2 つの隣接する境界領域 3 8 A , 3 8 B 内で異なるピッチ P 1 , P 2 で配列されたミラー要素 3 0 A , 3 0 D の位相を設定することで、境界線 B R の像のシフト量をより微細な精度で制御できる。

10

【 0 0 7 1 】

また、露光装置 E X は、照明光 I L (露光光) で投影光学系 P L を介してウエハ W (基板) を露光する露光装置であって、投影光学系 P L の物体面側に配置されて、それぞれ照明光 I L を投影光学系 P L に導くように制御可能な複数のミラー要素 3 0 のアレイを有する空間光変調器 2 8 と、空間光変調器 2 8 の複数のミラー要素 3 0 を駆動する変調制御部 4 8 (制御装置) と、を備えている。そして、変調制御部 4 8 は、ウエハ W の表面に投影光学系 P L を介して形成される空間像に応じて、Y 方向に隣接して配置された境界領域 3 8 A 及び 3 8 B のうち、第 1 境界領域 3 8 A 内で X 方向に投影光学系 P L で解像されないピッチ P 1 で配列された複数のミラー要素 3 0 A を位相 0 の状態に設定し、他のミラー要素 3 0 B を位相 の状態に設定し、第 2 境界領域 3 8 B 内で X 方向に投影光学系 P L で解像されないピッチ P 2 で配列された複数のミラー要素 3 0 D を位相 の状態に設定し、他のミラー要素 3 0 C を位相 0 の状態に設定する。

20

【 0 0 7 2 】

従って、空間光変調器 2 8 を用いてウエハ W にパターンを投影 (形成) する際に、ミラー要素 3 0 の像の幅よりも微細な位置精度又は形状精度でパターン (レジストパターン等) を形成できる。

30

なお、ステップ 1 1 6 とステップ 1 1 8 とは、実質的に同時に実行することも可能である。また、ステップ 1 1 8 をステップ 1 1 6 よりも先に実行することも可能である。さらに、ミラー要素 3 0 のアレイの Y 軸に平行な境界線 (ミラー要素 3 0 の間の領域) に対して、実質的に X 方向にミラー要素 3 0 の幅よりも微細な量だけシフトした境界線で位相 0 の領域と位相 の領域とが分かれている位相分布と等価な位相分布を設定する場合にも本実施形態が適用できる。この場合には、ミラー要素 3 0 のアレイ中で、X 方向に隣接する 2 つの境界領域内で、投影光学系 P L に解像されないピッチで配列された複数のミラー要素 3 0 の位相を 0 又は に設定すればよい。

【 0 0 7 3 】

また、空間光変調器 2 8 は光学要素としてミラー要素 3 0 (反射要素) を有するため、照明光 I L の利用効率が高い。しかしながら、空間光変調器 2 8 の代わりに、個々の光学要素がそれぞれ透過する光の位相を所定の 1 又は (1 + 1 8 0 °) 変化させる透過型の空間光変調器を使用することも可能である。このような光学要素としては、電圧によって屈折率が変化する電気光学素子又は液晶セル等を使用できる。

40

【 0 0 7 4 】

また、本実施形態の露光装置 E X の露光方法は、照明光 I L (露光光) で複数のミラー要素 3 0 のアレイを有する空間光変調器 2 8 及び投影光学系 P L を介してウエハ W (基板) を露光する露光方法であって、上記の空間光変調器 2 8 の駆動方法によって複数のミラー要素 3 0 の少なくとも一部 (照明領域 2 6 A 内のミラー要素 3 0) を位相 0 又は の状態に設定するステップ 1 1 4 , 1 1 6 と、照明光 I L でその位相 0 又は の状態に設定さ

50

れた複数のミラー要素 30 及び投影光学系 PL を介して形成される空間像でウエハ W を露光するステップ 120 と、を有する。

【0075】

その露光方法又は露光装置 EX によれば、ミラー要素 30 の像の幅より微細な精度でパターン（空間像）を形成できるため、より微細で複雑なパターンをマスクレス方式で形成できる。

なお、空間光変調器 28 の各ミラー要素 30 は、位相 0 の状態（第 1 の状態）及び位相の状態（第 2 の状態）以外の第 3 の状態（位相を $\pi/2$ 変化させる状態等）等を含む複数の状態に設定可能としてもよい。

【0076】

また、照明光学系 ILS からの照明光 IL は、複数のミラー要素 30（反射要素）にほぼ入射角 θ で斜めに入射し、ミラー要素 30 からの反射光が、投影光学系 PL に対して投影光学系 PL の光軸 AXW に交差するように入射している。従って、投影光学系 PL は物体面側に非テレセントリックであるため、空間光変調器 28 からの反射光の全部を投影光学系 PL を介してウエハ W に照射でき、照明光 IL の利用効率が高い。さらに、偏光制御光学系 6 で設定される照明光 IL の偏光状態をウエハ W の表面で正確に再現できる。

【0077】

また、ミラー要素 30 は、X 方向（第 2 方向）を長手方向とする長方形の領域に設けられ、露光装置 EX は、ウエハ W を投影光学系 PL の像面で X 方向と直交する Y 方向（第 1 方向）に対応する走査方向に移動するウエハステージ WST（基板ステージ）を備え、変調制御部 48 は、ウエハステージ WST によるウエハ W の移動に応じて、複数のミラー要素 30 によって形成されるパターン（位相分布）を Y 方向に移動している。これによって、ウエハ W の全面を効率的に露光できる。

【0078】

なお、上記の実施形態では以下のような変形が可能である。

上記の実施形態の空間光変調器 28 のミラー要素 30 のアレイにおいて、図 4（B）に示すように、境界領域 38A 及び $\pi/2$ 又は 38B 内の位相 0 又は $\pi/2$ のミラー要素 30A, 30D のピッチ P_1, P_2 を規定する整数 N_1, N_2 及び 1 ピッチ内のミラー要素 30A, 30D の個数を規定する整数 n_1, n_2 を調整することで、境界領域 38A, 38B の境界線 BR に対して Y 方向に y だけシフトした境界線 BR1 の - Y 方向で位相が $\pi/2$ で + Y 方向で位相が 0 となる位相分布と等価な位相分布を生成できる。この際に、例えば光学的近接効果による誤差である OPE（Optical Proximity Error）等を考慮して、図 4（B）の位相パターン MP1A からの照明光 IL によって投影光学系 PL を介して像面に形成される強度分布をシミュレーションによって求め、その強度分布の図 4（D）の基準となる強度分布 C1 からのシフト量（実際のシフト量）を求めると、この実際のシフト量が、図 9（A）に示すように、整数 N_1, N_2 及び n_1, n_2 の値を式（8B）に代入して計算される値（ターゲットシフト量）に対してある誤差を持つことが分かった。図 9（A）において、点線の直線 C4T は、ターゲットシフト量（nm）と同じ縦軸の値を示し、実線の折れ線 C4R は、ターゲットシフト量に対する実際のシフト量（nm）を現している。従って、直線 C4T に対する折れ線 C4R の差分がシフト量の誤差 e_{r1} となる。誤差 e_{r1} は、特にターゲットシフト量が 9 nm のときに 1.6 nm で最大になっている。

【0079】

そこで、本実施形態の第 1 変形例では、例えば図 10（A）～（D）の例で示すように、空間像の強度分布の実際のシフト量がターゲットシフト量にできるだけ近づくように、投影光学系 PL によって解像されないという条件は維持した上で、隣接する 2 つの境界領域内の位相 0 又は $\pi/2$ のミラー要素 30A, 30D のピッチ P_1, P_2 （整数 N_1, N_2 ）及び 1 ピッチ内のミラー要素 30A, 30D の個数（整数 n_1, n_2 ）を変更する。図 10（A）の実際のシフト量が 2 nm の位相パターン MP42 は、第 1 パターン領域 37C に + Y 方向に隣接する第 1 境界領域 38J で $N_1 = 6, n_1 = 1$ として、それに隣接する第 2 境界領域 38B で $N_2 = 4, n_2 = 1$ として、第 1 パターン領域 37C の - Y 方向側

10

20

30

40

50

の境界領域 39J, 39B の位相分布を境界領域 38J, 38B の分布を反転した分布としたものである。位相パターン MP44 の式 (8B) から得られるシフト量はほぼ $1.7 (= +5 - 3.3) \text{ nm}$ である。また、図 10 (B) の実際のシフト量が 6 nm の位相パターン MP46 は、第 1 パターン領域 37C に +Y 方向に隣接する第 1 境界領域 38K で $N1 = 5$, $n1 = 3$ として、それに隣接する第 2 境界領域 38L で $N2 = 5$, $n2 = 4$ として、第 1 パターン領域 37C の -Y 方向側の境界領域 39K, 39L の位相分布を境界領域 38K, 38L の分布を反転した分布としたものである。この例では、整数 $N1$ と整数 $N2$ とが等しく設定されているとともに、式 (8B) から得られるシフト量はほぼ $4 (= +16 - 12) \text{ nm}$ である。

【0080】

同様に、図 10 (C) の実際のシフト量が 7 nm の位相パターン MP47 は、第 1 パターン領域 37C に +Y 方向に隣接する第 1 境界領域 38J で $N1 = 6$, $n1 = 1$ として、それに隣接する第 2 境界領域 38D で $N2 = 2$, $n2 = 1$ として、第 1 パターン領域 37C の -Y 方向側の境界領域 39J, 39D の位相分布を境界領域 38J, 38D の分布を反転した分布としたものである。この例では、式 (8B) から得られるシフト量はほぼ $6.66 (= +10 - 3.33) \text{ nm}$ である。また、図 10 (D) の実際のシフト量が 9 nm の位相パターン MP49 は、第 1 パターン領域 37C に +Y 方向に隣接する第 1 境界領域 38A で $N1 = 5$, $n1 = 1$ として、それに隣接する第 2 境界領域 38M で $N2 = 5$, $n2 = 3$ として、第 1 パターン領域 37C の -Y 方向側の境界領域 39A, 39M の位相分布を境界領域 38A, 38M の分布を反転した分布としたものである。この例では、整数 $N1$ と整数 $N2$ とが等しく設定されているとともに、式 (8B) から得られるシフト量はほぼ $8 (= +12 - 4) \text{ nm}$ である。

【0081】

図 9 (B) の点線の直線 C5T は、ターゲットシフト量 (nm) と同じ縦軸の値を示し、実線の折れ線 C5R は、シフト量が 2 nm、6 nm、7 nm、及び 9 nm の場合に図 10 (A) ~ (D) の位相パターン MP42 ~ MP49 を用いて、他のシフト量に関しては式 (8B) によってシフト量を計算する位相パターンを用いた場合の実際のシフト量 (nm) を現している。従って、直線 C5T に対する折れ線 C5R の差分がシフト量の誤差 e_{r2} となる。誤差 e_{r2} は、ターゲットシフト量が 2 nm のときに 0.3 nm で最大になっているが、この誤差 e_{r2} は、整数 $N1$, $N2$ 及び $n1$, $n2$ の値を調整しない場合の図 9 (A) の誤差 e_{r1} に比べるとかなり小さくなっている。従って、この第 1 変形例によれば、目標とするパターンをより高精度に形成できる。

【0082】

次に、上記の実施形態の図 7 (A) の位相パターン MP3 を用いて形成した L & S パターンの空間像の強度分布をシミュレーションによって計算した結果を図 11 (A) に示す。図 11 (A) において、横軸は像面の Y 座標 (nm) であり、曲線 C6 は、L & S パターンの強度 INT (相対値) の 10 個のピーク (明線) を示し、折れ線 CD は、その曲線 C6 に対してある閾値を設定してレジストパターンを形成したときの目標値に対する線幅 CD (critical dimension) の誤差 (nm) を現している。曲線 C6 から L & S パターンの空間像のピーク強度のばらつきがあることが分かり、折れ線 CD から線幅の誤差のばらつきが 2 nm 程度生じていることが分かる。

【0083】

そこで、本実施形態の第 2 変形例では、L & S パターンの空間像のピーク強度 (明線の強度) のばらつきを低減するために、空間光変調器 28 の複数のミラー要素 30 のアレイの位相分布を図 12 の位相パターン MP5 に設定する。図 12 において図 7 (A) に対応する部分には同一の符号を付してその詳細な説明を省略する。図 12 の位相パターン MP5 は、各部分パターン SP1A ~ SP5A 中の第 1 パターン領域 37E (又は 37C) 内に、X 方向に投影光学系 PL で解像されないピッチ (ここではピッチ 5 px 又は 6 px) で配列された複数のミラー要素 30A を位相 0 に設定し、第 2 パターン領域 37D (又は 37F) 内に、X 方向に投影光学系 PL で解像されないピッチ (ここではピッチ 6 px 又

10

20

30

40

50

は $5 \mu\text{m}$) で配列された複数のミラー要素 30D を位相 に設定したものである。なお、第 1 パターン領域 37E (又は 37C) 内でミラー要素 30A 以外のミラー要素 30 の位相は に設定され、第 2 パターン領域 37D (又は 37F) 内でミラー要素 30D 以外のミラー要素 30 の位相は 0 に設定されている。この場合、第 1 パターン領域 37E (又は 37C) 内のミラー要素 30A のピッチ、及び第 2 パターン領域 37D (又は 37F) 内のミラー要素 30D のピッチは、その部分の空間像の強度分布のピークレベルが互いにほぼ等しくなるように設定してもよい。

【 0084 】

図 12 の位相パターン MP5 を用いて形成した L & S パターンの空間像の強度分布をシミュレーションによって計算した結果を図 11 (B) に示す。図 11 (B) において、横軸は像面の Y 座標 (nm) であり、曲線 C7 は、L & S パターンの強度 INT (相対値) の 10 個のピーク (明線) を示し、折れ線 CD は、その曲線 C7 に対してある閾値を設定してレジストパターンを形成したときの目標値に対する線幅の誤差 (nm) を現している。曲線 C7 から L & S パターンの空間像のピーク強度のばらつきが低減されたことが分かり、図 11 (B) の折れ線 CD から線幅の誤差のばらつきが 0.5 nm 程度に減少していることが分かる。

10

【 0085 】

このようにこの第 2 変形例の露光装置 EX の変調制御部 48 による空間光変調器 28 の駆動方法は、Y 方向 (第 1 方向) に離れて配置されるとともにそれぞれ X 方向 (第 2 方向) に伸びた第 1 パターン領域 37E 及び第 2 パターン領域 37D のうち、第 1 パターン領域 37E 内で X 方向に投影光学系 PL で解像されないピッチ ($5 \mu\text{m}$) で配列された複数のミラー要素 30A を位相 0 (第 1 の状態) に設定し、第 1 パターン領域 37E 内の他のミラー要素 30 を位相 に設定し、第 2 パターン領域 37D 内の少なくとも一部 (ミラー要素 30D 以外) のミラー要素 30 を位相 0 に設定している。

20

【 0086 】

この変形例によれば、第 1 パターン領域 37E 内に投影光学系 PL で解像されないピッチで他のミラー要素 30 と位相が異なるミラー要素 30A を配置しているため、その第 1 パターン領域 37E に対応する部分の空間像のピークレベルを調整することができる。従って、最終的に形成されるラインパターンの線幅等を最適化できる。さらに、そのミラー要素 30A を例えば第 1 パターン領域 37E の端部に配置することによって、最終的に形成されるラインパターンの線幅等をミラー要素 30 の像の幅よりも微細な精度で制御できる。

30

【 0087 】

この空間光変調器 28 の駆動方法も、露光用パターンの生成方法でもある。ここで、空間光変調器 28 の複数のミラー要素 30 (光学要素) のアレイは、グリッド状に配列された複数の区画と見なすことができ、第 1 の状態 (位相 0) および第 2 の状態 (位相) に設定された空間光変調器 28 の複数のミラー要素 30 (区画) の配列は、露光用パターンとみなすことができる。

【 0088 】

次に、上記の実施形態では、ウエハ W を連続的に移動してウエハ W を走査露光している。その他に、図 3 (B) に示すように、ウエハ W の各ショット領域 (例えば SA21) を Y 方向に複数の部分領域 SB1 ~ SB5 等に分割し、投影光学系 PL の露光領域 26B に部分領域 SB1 等が達したときに、照明光 IL を所定パルス数だけ発光させて、空間光変調器 28 のミラー要素 30 のアレイからの反射光で部分領域 SB1 等を露光してもよい。この後、ウエハ W を Y 方向にステップ移動させて、次の部分領域 SB2 等が露光領域 26B に達してから、同様に部分領域 SB2 等に露光が行われる。この方式は実質的にステップ・アンド・リピート方式であるが、部分領域 SB1 ~ SB5 等には互いに異なるパターンが露光される。

40

【 0089 】

次に、上記の実施形態の空間光変調器 28 のミラー要素 30 は平行移動して照明光 IL

50

の位相を第1の位相又は第2の位相だけ変化させている。しかしながら、例えば図1において、空間光変調器28の代わりに、例えば米国特許第5,312,513号明細書、又は米国特許第6,885,493号明細書に開示されているように、傾斜角が可変の複数のミラー要素(反射要素)のアレイを有する空間光変調器を使用してもよい。

【0090】

このような傾斜角可変方式の空間光変調器を使用する場合、ミラー要素の第1の状態は、照明光学系ILSからの照明光を投影光学系PLに導く状態(明部となる状態)であり、ミラー要素の第2の状態は、照明光学系ILSからの照明光を投影光学系PLに入射させない状態(暗部となる状態)である。この場合にも、ミラー要素のアレイにおいて、第1領域と第2領域との例えばX方向に伸びる境界領域で、投影光学系PLの解像限界よりも微細なピッチで配列される複数のミラー要素の状態を第1の状態又は第2の状態に設定することによって、Y方向にミラー要素の像の幅よりも微細な位置精度又は形状精度でパターンを形成できる。

10

また、複数のミラー要素の傾斜角と照明光ILの位相との両方を変化させる空間光変調器を用いても良い。この場合、複数のミラー要素は、複数のミラー要素が配列されている面の法線方向に平行移動すると共に、複数のミラー要素の反射面の当該法線に対する傾斜角が変更されるように傾斜する。

【0091】

次に、上記の実施形態では、物体側に非テレセントリックの投影光学系PLを用いている。それ以外に、図13の第3変形例の露光装置EXAで示すように、物体側及び像面側に両側テレセントリックの投影光学系PLAを用いることも可能である。図13において、露光装置EXAは、光源(不図示)と、この光源からのレーザ光を用いてS偏光の照明光ILをほぼ+Y方向に発生する照明光学系ILSAと、照明光ILを+Z方向に反射する偏光ビームスプリッタ51と、偏光ビームスプリッタ51からの照明光ILを円偏光に変換する1/4波長板52と、円偏光の照明光ILを-Z方向又はそれ以外の方向に反射する多数の傾斜角可変のミラー要素56の2次元のアレイと、これらのアレイを支持するベース部材58とを有する空間光変調器54と、ミラー要素56で反射されてから、1/4波長板52及び偏光ビームスプリッタ51を透過した照明光ILを受光してウエハWの表面の露光領域26Bに空間像(パターン)を投影する投影光学系PLAと、を備えている。照明光学系ILSAは、図1の照明光学系ILSからミラー8B,8Cを除いた光学系である。ミラー要素56のうちで、第1の状態(反射光を投影光学系PLに入射させる状態)のミラー要素56Pと、第2の状態(反射光を投影光学系PLに入射させない状態)のミラー要素56Nとの組み合わせによってウエハW上にマスクレス方式でパターンを形成できる。

20

30

【0092】

この第3変形例においても、ミラー要素56のアレイで、第1領域と第2領域との例えばX方向に伸びる境界領域で、投影光学系PLの解像限界よりも微細なピッチで配列される複数のミラー要素56の状態を第1の状態又は第2の状態に設定することによって、Y方向にミラー要素56の像の幅(ピッチ)よりも微細な位置精度又は形状精度でパターンを形成できる。この第3変形例の露光装置EXAによれば、両側テレセントリックの投影光学系PLAを使用できるため、露光装置の構成が簡素化できる。

40

【0093】

また、この第3変形例において、空間光変調器54として図1の位相可変型の空間光変調器28を使用することも可能である。

なお、照明光ILの利用効率が1/2に低下してもよい場合には、偏光ビームスプリッタ51の代わりに通常のビームスプリッタを使用し、1/4波長板52を省略してもよい。この場合には、偏光照明が使用できる。

【0094】

また、図1の波面分割型のインテグレータであるマイクロレンズアレイ16に代えて、内面反射型のオプティカル・インテグレータとしてのロッド型インテグレータを用いるこ

50

ともできる。

また、電子デバイス（又はマイクロデバイス）を製造する場合、電子デバイスは、図 14 に示すように、電子デバイスの機能・性能設計を行うステップ 221、この設計ステップに基づいたマスクのパターンデータを上記の実施形態の露光装置 EX, EXA の主制御系に記憶するステップ 222、デバイスの基材である基板（ウエハ）を製造してレジストを塗布するステップ 223、前述した露光装置 EX, EXA（又は露光方法）により空間光変調器 28 で生成される位相分布（又は空間光変調器 54 で生成される強度分布）の空間像を基板（感応基板）に露光する工程、露光した基板を現像する工程、現像した基板の加熱（キュア）及びエッチング工程などを含む基板処理ステップ 224、デバイス組み立てステップ（ダイシング工程、ボンディング工程、パッケージ工程などの加工プロセスを含む）225、並びに検査ステップ 226 等を経て製造される。

10

【0095】

このデバイスの製造方法は、上記の実施形態の露光装置（又は露光方法）を用いてウエハ W を露光する工程と、露光されたウエハ W を処理する工程（ステップ 224）とを含んでいる。従って、微細な回路パターンを備える電子デバイスを高精度に製造できる。

また、本発明は、半導体デバイスの製造プロセスへの適用に限定されることなく、例えば、液晶表示素子、プラズマディスプレイ等の製造プロセスや、撮像素子（CMOS 型、CCD 等）、マイクロマシーン、MEMS (Microelectromechanical Systems: 微小電気機械システム)、薄膜磁気ヘッド、及び DNA チップ等の各種デバイス（電子デバイス）の製造プロセスにも広く適用できる。

20

【0096】

なお、本発明は上述の実施形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の構成を取り得る。

また、本願に記載した上記公報、各国際公開パンフレット、米国特許、又は米国特許出願公開明細書における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。また、明細書、特許請求の範囲、図面、及び要約を含む 2012 年 1 月 18 日付け提出の日本国特許出願第 2012-007727 号の全ての開示内容は、そっくりそのまま引用して本願に組み込まれている。

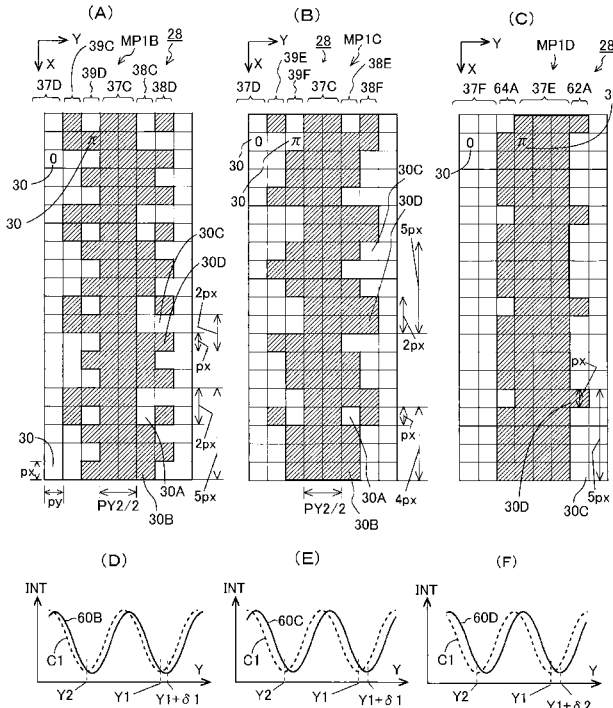
【符号の説明】

【0097】

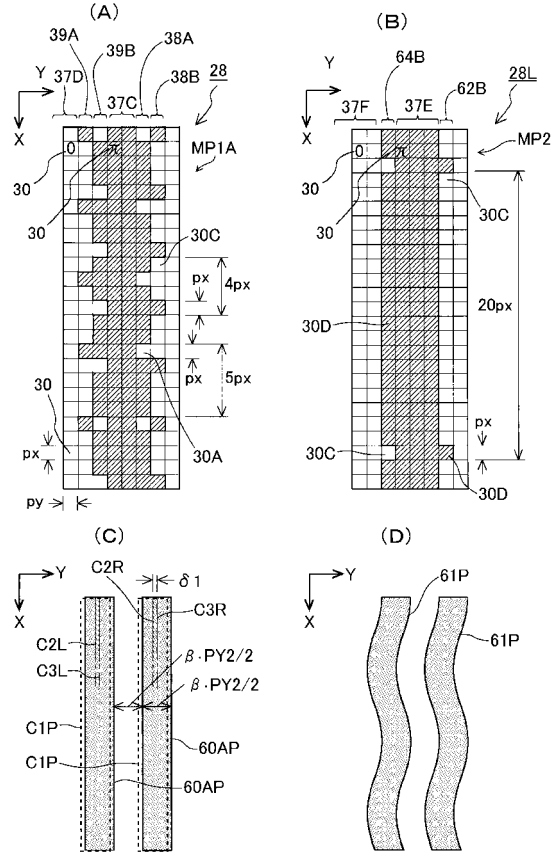
EX, EXA ... 露光装置、ILS, ILSA ... 照明光学系、PL, PLA ... 投影光学系、W ... ウエハ、28 ... 空間光変調器、30 ... ミラー要素、30A, 30C ... 位相 0 のミラー要素、30B, 30D ... 位相 のミラー要素、37C ... 第 1 パターン領域、37D ... 第 2 パターン領域、38A ... 第 1 境界領域、38B ... 第 2 境界領域、39A ... 第 3 境界領域、39A, 39B ... 第 4 境界領域、48 ... 変調制御部

30

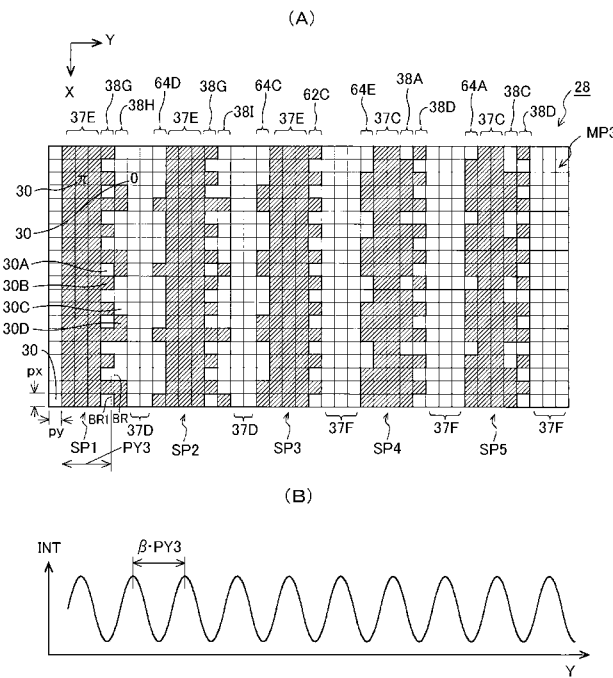
【図5】



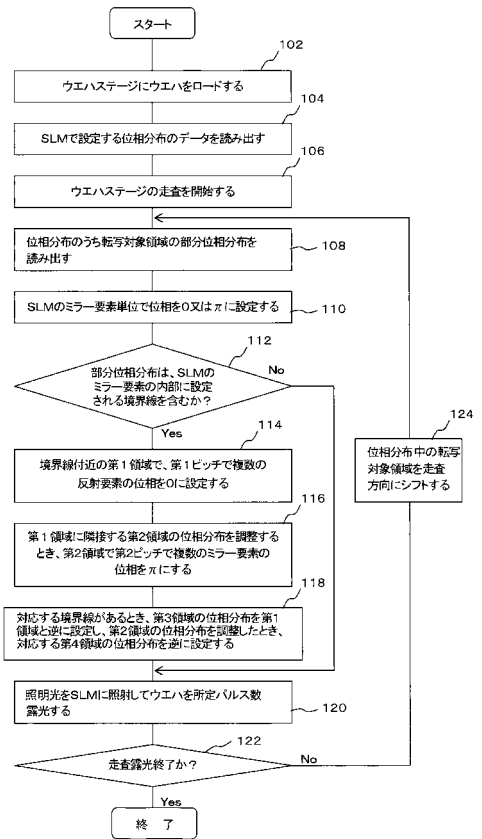
【図6】



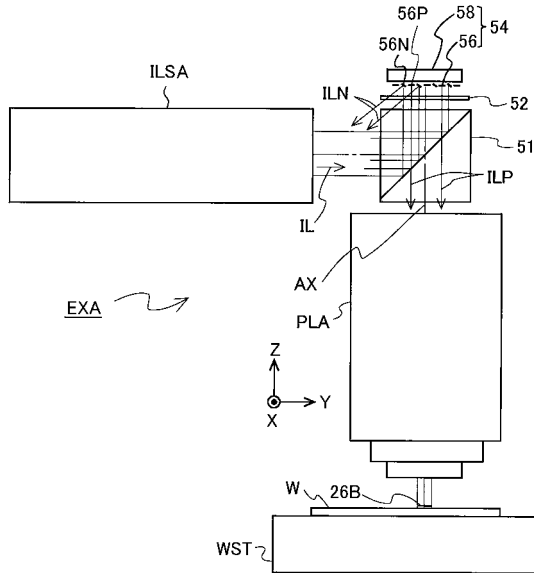
【図7】



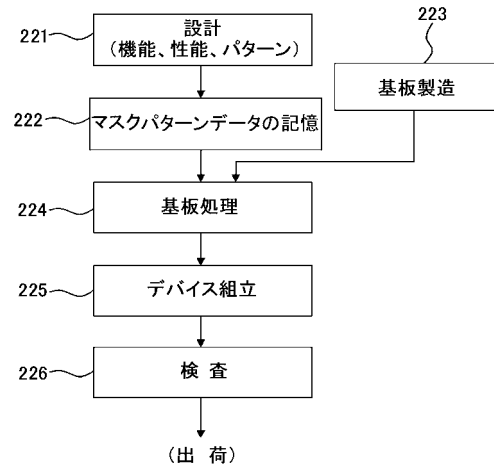
【図8】



【図 1 3】



【図 1 4】



【手続補正書】

【提出日】平成29年5月31日(2017.5.31)

【手続補正 2】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数の光学要素を介した露光光を用いて物体を露光する露光方法であって、
前記複数の光学要素のうち、第 1 領域内の光学要素を第 1 の状態に設定して第 1 の位相の露光光を射出することと、

前記複数の光学要素のうち、前記第 1 領域の第 1 方向の側に位置する第 2 領域内の光学要素を前記第 1 の状態と異なる第 2 の状態に設定して、前記第 1 の位相と異なる第 2 の位相の露光光を射出することと、

前記複数の光学要素のうち、前記第 1 領域と前記第 2 領域との間の第 3 領域内の複数の光学要素のうちの第 1 部分を前記第 1 の状態に設定して前記第 1 の位相の露光光を射出すると共に、前記第 1 部分の前記第 1 方向と交差する第 2 方向の側に位置する光学要素の第 2 部分を前記第 2 の状態に設定して前記第 2 の位相の露光光を射出することとを含む露光方法。

【請求項 2】

前記第 1 領域と前記第 2 領域との間の第 3 領域内において、前記第 1 部分の光学要素は前記第 2 方向に沿って複数存在する請求項 1 に記載の露光方法。

【請求項 3】

複数の前記第 1 部分の間に前記第 2 部分が位置する請求項 2 に記載の露光方法。

【請求項 4】

投影光学系を介した前記複数の光学要素からの露光光を前記物体に照射することを含む、請求項 2 又は 3 に記載の露光方法。

【請求項 5】

前記第 2 部分の光学要素は前記第 2 方向に沿って複数存在し、

前記露光光の波長を、前記投影光学系の物体側開口数を NA とするとき、複数の前記第 1 部分または複数の前記第 2 部分のピッチは、 λ / NA よりも小さい請求項 4 に記載の露光方法。

【請求項 6】

前記第 2 方向と対応する方向に周期性を持つラインアンドスペースパターンを露光する、請求項 4 又は 5 に記載の露光方法。

【請求項 7】

前記複数の光学要素は、前記第 1 方向に第 1 ピッチで配置され且つ前記第 2 方向に第 2 ピッチで配置される請求項 6 に記載の露光方法。

【請求項 8】

前記ラインアンドスペースパターンは、前記第 1 ピッチに前記投影光学系の倍率を乗じた値とは異なるピッチを有する、請求項 7 に記載の露光方法。

【請求項 9】

前記複数の光学要素のうち少なくとも 1 つは、前記投影光学系によって解像されない大きさである、請求項 4 乃至 8 の何れか一項に記載の露光方法。

【請求項 10】

請求項 1 乃至 9 のいずれか一項に記載の露光方法を用いて基板上に感光層のパターンを形成することと、

前記パターンが形成された前記基板を処理することと、を含むデバイス製造方法。

【請求項 11】

露光光で物体を露光する露光装置において、

前記露光光の光路中に配置される複数の光学要素を有する空間光変調器と、

前記空間光変調器の前記複数の光学要素を駆動して第 1 の状態又は第 2 の状態にする制御部と、を備え、

前記制御部は、

前記複数の光学要素のうち、第 1 領域内の光学要素から第 1 の位相の露光光が射出されるように前記第 1 領域内の前記光学要素を前記第 1 の状態に設定し、前記複数の光学要素のうち、前記第 1 領域の第 1 方向の側に位置する第 2 領域内の光学要素から前記第 1 の位相と異なる第 2 の位相の露光光が射出されるように前記第 2 領域内の前記光学要素を前記第 1 の状態と異なる前記第 2 の状態に設定し、前記第 1 領域と前記第 2 領域との間の第 3 領域内の前記複数の光学要素のうちの第 1 部分を前記第 1 の状態に設定し、前記第 3 領域内において前記第 1 部分の前記第 1 方向と交差する第 2 方向の側に位置する光学要素の第 2 部分を前記第 2 の状態に設定する露光装置。

【請求項 12】

前記複数の光学要素からの露光光を前記物体に照射する投影光学系をさらに備える、請求項 11 に記載の露光装置。

【請求項 13】

前記第 1 領域と前記第 2 領域との間の第 3 領域内において、前記第 1 部分の光学要素は前記第 2 方向に沿って複数存在する請求項 12 に記載の露光装置。

【請求項 14】

前記第 2 部分の光学要素は前記第 2 方向に沿って複数存在し、

前記露光光の波長を、前記投影光学系の物体側開口数を NA とするとき、複数の前記第 1 部分または複数の前記第 2 部分のピッチは、 λ / NA よりも小さい請求項 13 に記載の露光装置。

【請求項 15】

前記第 2 方向と対応する方向に周期性を持つラインアンドスペースパターンを露光する、請求項 1 2 乃至 1 4 の何れか一項に記載の露光装置。

【請求項 1 6】

前記空間光変調器の前記複数の光学要素は、前記第 1 方向に第 1 ピッチで配置され且つ前記第 2 方向に第 2 ピッチで配置される請求項 1 5 に記載の露光装置。

【請求項 1 7】

前記ラインアンドスペースパターンは、前記第 1 ピッチに前記投影光学系の倍率を乗じた値とは異なるピッチを有する、請求項 1 6 に記載の露光装置。

【請求項 1 8】

前記複数の光学要素のうち少なくとも 1 つは、前記投影光学系によって解像されない大きさである、請求項 1 2 乃至 1 7 の何れか一項に記載の露光装置。

【請求項 1 9】

請求項 1 1 乃至 1 8 のいずれか一項に記載の露光装置を用いて基板上に感光層のパターンを形成することと、

前記パターンが形成された前記基板を処理することと、を含むデバイス製造方法。

【手続補正 3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0 0 0 8

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0 0 0 8】

本発明の露光方法は、複数の光学要素を介した露光光を用いて物体を露光する露光方法であって、その複数の光学要素のうち、第 1 領域内の光学要素を第 1 の状態に設定して第 1 の位相の露光光を射出することと、その複数の光学要素のうち、その第 1 領域の第 1 方向の側に位置する第 2 領域内の光学要素をその第 1 の状態と異なる第 2 の状態に設定して、その第 1 の位相と異なる第 2 の位相の露光光を射出することと、その複数の光学要素のうち、その第 1 領域とその第 2 領域との間の第 3 領域内の複数の光学要素のうちの第 1 部分をその第 1 の状態に設定してその第 1 の位相の露光光を射出すると共に、その第 1 部分のその第 1 方向と交差する第 2 方向の側に位置する光学要素の第 2 部分をその第 2 の状態に設定してその第 2 の位相の露光光を射出することとを含むものである。

また、本発明の露光装置は、露光光で物体を露光する露光装置において、その露光光の光路中に配置される複数の光学要素を有する空間光変調器と、その空間光変調器のその複数の光学要素を駆動して第 1 の状態又は第 2 の状態にする制御部と、を備え、その制御部は、その複数の光学要素のうち、第 1 領域内の光学要素から第 1 の位相の露光光が射出されるようにその第 1 領域内のその光学要素をその第 1 の状態に設定し、その複数の光学要素のうち、その第 1 領域の第 1 方向の側に位置する第 2 領域内の光学要素からその第 1 の位相と異なる第 2 の位相の露光光が射出されるようにその第 2 領域内のその光学要素をその第 1 の状態と異なる第 2 の状態に設定し、その第 1 領域とその第 2 領域との間の第 3 領域内のその複数の光学要素のうちの第 1 部分をその第 1 の状態に設定し、その第 3 領域内においてその第 1 部分のその第 1 方向と交差する第 2 方向の側に位置する光学要素の第 2 部分をその第 2 の状態に設定するものである。

また、本発明の第 1 の態様によれば、それぞれ光を投影光学系に導くことが可能な複数の光学要素のアレイを有する第 1 の空間光変調器の駆動方法が提供される。この駆動方法は、第 1 方向に隣接して配置されるとともにそれぞれその第 1 方向に交差する第 2 方向に伸びた第 1 領域及び第 2 領域のうち、その第 1 領域内でその第 2 方向にその投影光学系で解像されない第 1 のピッチで配列されたその複数の光学要素を第 1 の状態に設定し、その第 1 領域内の他の光学要素をその第 1 の状態と異なる第 2 の状態に設定し、その第 2 領域内でその第 2 方向にその投影光学系で解像されない第 2 のピッチで配列されたその複数の光学要素をその第 2 の状態に設定し、その第 2 領域内の他の光学要素をその第 1 の状態に設定するものである。