

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6168187号
(P6168187)

(45) 発行日 平成29年7月26日(2017.7.26)

(24) 登録日 平成29年7月7日(2017.7.7)

(51) Int. Cl. F I
G03F 7/20 (2006.01) G O 3 F 7/20 5 O 1
G02B 17/08 (2006.01) G O 2 B 17/08 Z

請求項の数 14 (全 31 頁)

(21) 出願番号	特願2016-73847 (P2016-73847)	(73) 特許権者	000004112 株式会社ニコン 東京都港区港南二丁目15番3号
(22) 出願日	平成28年4月1日(2016.4.1)	(74) 代理人	100095256 弁理士 山口 孝雄
(62) 分割の表示	特願2013-520404 (P2013-520404) の分割	(72) 発明者	三宅 範夫 東京都千代田区有楽町一丁目12番1号 株式会社ニコン内
原出願日	平成23年11月25日(2011.11.25)	(72) 発明者	加藤 欣也 東京都千代田区有楽町一丁目12番1号 株式会社ニコン内
(65) 公開番号	特開2016-153904 (P2016-153904A)	審査官	赤尾 隼人
(43) 公開日	平成28年8月25日(2016.8.25)		
審査請求日	平成28年4月1日(2016.4.1)		
(31) 優先権主張番号	61/496,234		
(32) 優先日	平成23年6月13日(2011.6.13)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 照明光学系、露光装置、露光方法、およびデバイス製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

照明光で物体を照明する照明光学系であって、

前記物体が配置される所定面と実質的に光学的なフーリエ変換の関係となる瞳面又はその近傍に後側焦点面が配置されるフライアイレンズと、

前記フライアイレンズに対して入射側に配置され、複数のミラー要素を有する第1空間光変調器と、

前記第1空間光変調器と前記フライアイレンズとの間の光路に配置される第1光学系と

、
前記第1光学系と前記フライアイレンズとの間の光路に配置され、複数のミラー要素を有する第2空間光変調器と、

前記第1空間光変調器と前記フライアイレンズとの間の光路に配置される偏光素子と、
を備え、

前記第1、第2空間光変調器の少なくとも一方によって、前記瞳面での前記照明光の強度分布を変更可能、かつ前記照明光の少なくとも一部が前記瞳面で光軸から離れた軸外領域に分布する強度分布を形成可能であり、

前記偏光素子は、前記軸外領域を介して前記物体に照射される前記照明光の少なくとも一部を、S偏光を主成分とする偏光状態とするために、所定の一方向を偏光方向とする直線偏光を主成分とする偏光状態で前記偏光素子に入射する前記照明光の少なくとも一部が前記軸外領域において周方向を偏光方向とする直線偏光となるように前記照明光の偏光状

10

20

態を変換する。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の照明光学系において、

前記偏光素子は、前記瞳面と共役な位置又はその近傍に配置される。

【請求項 3】

請求項 1 又は 2 に記載の照明光学系において、

前記第 1 光学系は、前記第 1 空間光変調器の前記複数のミラー要素と前記第 2 空間光変調器の前記複数のミラー要素を実質的に共役な関係にする。

【請求項 4】

請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載の照明光学系において、

前記偏光素子は、前記第 1、第 2 空間光変調器の間の光路に配置され、

前記第 1 空間光変調器は、前記照明光が前記偏光素子の異なる領域に入射するように前記照明光を前記偏光素子に導く。

【請求項 5】

請求項 1 又は 2 に記載の照明光学系において、

前記第 1 光学系は、前記第 1 空間光変調器の前記複数のミラー要素と前記第 2 空間光変調器の前記複数のミラー要素を実質的に光学的なフーリエ変換の関係にする。

【請求項 6】

請求項 5 に記載の照明光学系において、

前記偏光素子は、前記第 2 空間光変調器と前記フライアイレンズの間の光路に配置され

、前記第 2 空間光変調器は、前記照明光が前記偏光素子の異なる領域に入射するように前記照明光を前記偏光素子に導く。

【請求項 7】

請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載の照明光学系において、

前記偏光素子は、旋光性を有する光学材料で形成されるとともに、光学軸が前記光軸と実質的に一致するように配置される。

【請求項 8】

請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載の照明光学系において、

前記第 1 空間光変調器に対して入射側に配置される第 2 光学系と、

前記第 2 空間光変調器と前記フライアイレンズとの間の光路に配置される第 3 光学系と、をさらに備え、

前記第 2、第 3 光学系はその光軸が実質的に平行となるように配置される。

【請求項 9】

請求項 8 に記載の照明光学系において、

前記第 3 光学系と前記フライアイレンズとの間の光路に配置される第 1 ミラーと、

前記フライアイレンズと前記所定面との間の光路に配置される第 2 ミラーと、

前記第 1、第 2 ミラーの間の光路に配置され、前記フライアイレンズを含む第 4 光学系と、をさらに備え、

前記第 4 光学系はその光軸が前記第 2、第 3 光学系の光軸と実質的に直交するように配置される。

【請求項 10】

照明光で基板を露光する露光装置であって、

前記照明光でマスクを照明する、請求項 1 ~ 9 のいずれか一項に記載の照明光学系と、前記マスクのパターン像を前記基板上に形成する投影光学系と、を備え、

前記照明光学系の瞳面と前記投影光学系の瞳面とは実質的に共役に配置される。

【請求項 11】

デバイス製造方法であって、

請求項 10 に記載の露光装置を用いて基板を露光することと、

前記露光された基板を現像することと、を含む。

10

20

30

40

50

【請求項 1 2】

マスクを介して照明光で基板を露光する露光方法であって、

前記マスクが配置される所定面と実質的に光学的なフーリエ変換の関係となる瞳面又はその近傍に後側焦点面が配置されるフライアイレンズを有する照明光学系を介して前記照明光で前記マスクを照明するために、前記フライアイレンズに対して入射側に配置され、それぞれ複数のミラー要素を有する第 1、第 2 空間光変調器の少なくとも一方によって、前記瞳面において前記照明光学系の光軸から離れた軸外領域に前記照明光の少なくとも一部が分布する強度分布を形成することと、前記第 1 空間光変調器を介して第 1 光学系を通る前記照明光は、前記第 2 空間光変調器を介して前記フライアイレンズを通過して前記瞳面に分布し、

10

前記軸外領域を介して前記マスクに照射される前記照明光の少なくとも一部を、S 偏光を主成分とする偏光状態とするために、所定の一方方向を偏光方向とする直線偏光を主成分とする偏光状態で前記第 1 空間光変調器と前記フライアイレンズとの間の光路に配置される偏光素子に入射する前記照明光の少なくとも一部が前記軸外領域において周方向を偏光方向とする直線偏光となるように、前記偏光素子によって前記照明光の偏光状態を変換することと、

瞳面が前記照明光学系の瞳面と実質的に共役に配置される投影光学系を介して、前記マスクのパターン像を前記基板上に形成することと、を含む。

【請求項 1 3】

請求項 1 2 に記載の露光方法において、

前記偏光素子は、前記瞳面と共役な位置又はその近傍に配置される。

20

【請求項 1 4】

デバイス製造方法であって、

請求項 1 2 又は 1 3 に記載の露光方法を用いて基板を露光することと、

前記露光された基板を現像することと、を含む。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、照明光学系、露光装置、およびデバイス製造方法に関する。

【背景技術】

30

【0002】

この種の典型的な露光装置においては、光源から射出された光が、オプティカルインテグレートとしてのフライアイレンズを介して、多数の光源からなる実質的な面光源としての二次光源（一般には照明瞳における所定の光強度分布）を形成する。以下、照明瞳での光強度分布を、「瞳強度分布」という。また、照明瞳とは、照明瞳と被照射面（露光装置の場合にはマスクまたはウェハ）との間の光学系の作用によって、被照射面が照明瞳のフーリエ変換面となるような位置として定義される。

【0003】

二次光源からの光は、コンデンサー光学系により集光された後、所定のパターンが形成されたマスクを重畳的に照明する。マスクを透過した光は投影光学系を介してウェハ上に結像し、ウェハ上にはマスクパターンが投影露光（転写）される。マスクに形成されたパターンは微細化されており、この微細パターンをウェハ上に正確に転写するにはウェハ上において均一な照度分布を得ることが不可欠である。

40

【0004】

従来、フライアイレンズの直後に配置された波長板付きの開口絞りの作用により、フライアイレンズの後側焦点面またはその近傍の照明瞳に輪帯状または複数極状の二次光源（瞳強度分布）を形成し、この二次光源を通過する光束がその周方向を偏光方向とする直線偏光状態（以下、略して「周方向偏光状態」という）になるように設定する技術が提案されている（例えば、特許文献 1 を参照）。

【先行技術文献】

50

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特許第3246615号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

様々な形態の微細パターンを忠実に転写するのに適した照明条件を実現するために、瞳強度分布の形状（大きさを含む広い概念）および偏光状態の変更に関する自由度の向上が望まれている。しかしながら、特許文献1に記載された従来技術では、波長板付きの開口絞りを交換しない限り、瞳強度分布の形状や偏光状態を変化させることができなかった。

10

【0007】

本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、偏光状態の変更に関して高い自由度を有する照明光学系を提供することを目的とする。また、本発明は、偏光状態の変更に関して高い自由度を有する照明光学系を用いて、適切な照明条件のもとで微細パターンを感光性基板に正確に転写することのできる露光装置およびデバイス製造方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

第1形態では、光源からの光により被照射面を照明する照明光学系において、
第1面に配列されて個別に制御される複数の光学要素を有する第1空間光変調器と、
前記第1面よりも前記被照射面側の光路中に配置されて、前記照明光学系の光軸を横切る面内の第1領域を通過する第1光束に、前記横切る面内における前記第1領域とは異なる第2領域を通過する第2光束とは異なる偏光状態の変化を与える偏光部材と、
前記第1面よりも前記被照射面側の前記光路中または前記第1面よりも前記光源側の光路中の第2面に配列されて個別に制御される複数の光学要素を有し、前記照明光学系の照明瞳に光強度分布を可変的に形成する第2空間光変調器とを備えていることを特徴とする照明光学系を提供する。

20

【0009】

第2形態では、所定のパターンを照明するための第1形態の照明光学系を備え、前記所定のパターンを感光性基板に露光することを特徴とする露光装置を提供する。

30

【0010】

第3形態では、第2形態の露光装置を用いて、前記所定のパターンを前記感光性基板に露光することと、

前記所定のパターンが転写された前記感光性基板を現像し、前記所定のパターンに対応する形状のマスク層を前記感光性基板の表面に形成することと、

前記マスク層を介して前記感光性基板の表面を加工することと、を含むことを特徴とするデバイス製造方法を提供する。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】実施形態にかかる露光装置の構成を概略的に示す図である。

40

【図2】瞳形成用の空間光変調器の構成および作用を説明する図である。

【図3】空間光変調器の要部の部分斜視図である。

【図4】偏光仕分け用の空間光変調器の構成および作用を説明する図である。

【図5】実施形態の偏光部材の構成を概略的に示す図である。

【図6】偏光仕分け用の空間光変調器の有効反射領域が5つの部分領域に仮想的に分割される様子を示す図である。

【図7】瞳形成用の空間光変調器の有効反射領域が5つの部分領域に仮想的に分割される様子を示す図である。

【図8】8極状で周方向偏光状態の瞳強度分布に中央極の面光源が追加された9極状の瞳強度分布を示す図である。

50

【図 9】輪帯状で周方向偏光状態の瞳強度分布を示す図である。

【図 10】8極状で径方向偏光状態の瞳強度分布に中央極の面光源が追加された9極状の瞳強度分布を示す図である。

【図 11】第1変形例にかかる偏光部材の構成を概略的に示す図である。

【図 12】16分割タイプの輪帯状で周方向偏光状態の瞳強度分布を示す図である。

【図 13】第2変形例にかかる偏光部材の構成を概略的に示す図である。

【図 14】第3変形例にかかる偏光部材の構成を概略的に示す図である。

【図 15】第4変形例にかかる偏光部材の構成を概略的に示す図である。

【図 16】偏光仕分け用の空間光変調器と偏光部材と瞳形成用の空間光変調器との配置関係にかかる第1変形例を示す図である。

10

【図 17】偏光仕分け用の空間光変調器と偏光部材と瞳形成用の空間光変調器との配置関係にかかる第2変形例を示す図である。

【図 18】半導体デバイスの製造工程を示すフローチャートである。

【図 19】液晶表示素子等の液晶デバイスの製造工程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】

【0012】

以下、実施形態を添付図面に基づいて説明する。図1は、実施形態にかかる露光装置の構成を概略的に示す図である。図1において、感光性基板であるウェハWの転写面（露光面）の法線方向に沿ってZ軸を、ウェハWの転写面内において図1の紙面に平行な方向にY軸を、ウェハWの転写面内において図1の紙面に垂直な方向にX軸をそれぞれ設定している。

20

【0013】

図1を参照すると、本実施形態の露光装置では、光源LSから露光光（照明光）が供給される。光源LSとして、たとえば193nmの波長の光を供給するArFエキシマレーザ光源や、248nmの波長の光を供給するKrFエキシマレーザ光源などを用いることができる。光源LSから+Z方向に射出された光は、ビーム送光部1を介して、偏光仕分け用の空間光変調器2に入射する。空間光変調器2を経て斜め方向に射出された光は、前側レンズ群3aと後側レンズ群3bとからなる再結像光学系3を介して、瞳形成用の空間光変調器4に入射する。

【0014】

30

再結像光学系3の瞳位置またはその近傍には、偏光部材5が配置されている。ビーム送光部1は、光源LSからの入射光束を適切な大きさおよび形状の断面を有する光束に変換しつつ空間光変調器2, 4へ導くとともに、空間光変調器2, 4に入射する光束の位置変動および角度変動をアクティブに補正する機能を有する。なお、ビーム送光部1は、光源LSからの入射光束を適切な大きさおよび形状の断面を有する光束に変換しない構成であってもよい。

【0015】

空間光変調器2, 4は、後述するように、所定面内に配列されて個別に制御される複数のミラー要素と、制御系CRからの制御信号に基づいて複数のミラー要素の姿勢を個別に制御駆動する駆動部とを有する。偏光部材5は、並列的に配置されて偏光作用の互いに異なる複数の1/2波長板を有する。空間光変調器2, 4および偏光部材5の構成および作用については後述する。

40

【0016】

空間光変調器4から+Z方向に射出された光は、リレー光学系6の前側レンズ群6aを介して、リレー光学系6の瞳面6cに入射する。前側レンズ群6aは、その前側焦点位置が空間光変調器4の複数のミラー要素の配列面（以下、「空間光変調器の配列面」という）の位置とほぼ一致し且つその後側焦点位置が瞳面6cの位置とほぼ一致するように設定されている。空間光変調器4を経た光は、後述するように、複数のミラー要素の姿勢に応じた光強度分布を瞳面6cに可変的に形成する。瞳面6cに光強度分布を形成した光は、リレー光学系6の後側レンズ群6bを介して、リレー光学系7に入射する。

50

【 0 0 1 7 】

リレー光学系 7 を経た光は、光路折曲げミラー M R 1 により + Y 方向に反射され、マイクロフライアイレンズ (またはフライアイレンズ) 8 に入射する。後側レンズ群 6 b およびリレー光学系 7 は、瞳面 6 c とマイクロフライアイレンズ 8 の入射面とを光学的に共役に設定している。したがって、空間光変調器 4 を経た光は、瞳面 6 c と光学的に共役な位置に配置されたマイクロフライアイレンズ 8 の入射面に、瞳面 6 c に形成された光強度分布に対応した光強度分布を形成する。

【 0 0 1 8 】

マイクロフライアイレンズ 8 は、たとえば縦横に且つ稠密に配列された多数の正屈折力を有する微小レンズからなる光学素子であり、平行平板にエッチング処理を施して微小レンズ群を形成することによって構成されている。マイクロフライアイレンズでは、互いに隔絶されたレンズエレメントからなるフライアイレンズとは異なり、多数の微小レンズ (微小屈折面) が互いに隔絶されることなく一体的に形成されている。しかしながら、レンズ要素が縦横に配置されている点でマイクロフライアイレンズはフライアイレンズと同じ波面分割型のオプティカルインテグレータである。

10

【 0 0 1 9 】

マイクロフライアイレンズ 8 における単位波面分割面としての矩形状の微小屈折面は、マスク M 上において形成すべき照野の形状 (ひいてはウェハ W 上において形成すべき露光領域の形状) と相似な矩形状である。なお、マイクロフライアイレンズ 8 として、例えばシリンドリカルマイクロフライアイレンズを用いることもできる。シリンドリカルマイクロフライアイレンズの構成および作用は、例えば米国特許第 6 9 1 3 3 7 3 号明細書に開示されている。

20

【 0 0 2 0 】

マイクロフライアイレンズ 8 に入射した光束は多数の微小レンズにより二次元的に分割され、その後側焦点面またはその近傍の照明瞳には、入射面に形成される光強度分布とほぼ同じ光強度分布を有する二次光源 (多数の小光源からなる実質的な面光源: 瞳強度分布) が形成される。マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳に形成された二次光源からの光束は、コンデンサー光学系 9 を介して、マスクブラインド 1 0 を重畳的に照明する。

【 0 0 2 1 】

こうして、照明視野絞りとしてのマスクブラインド 1 0 には、マイクロフライアイレンズ 8 の矩形状の微小屈折面の形状と焦点距離とに応じた矩形状の照野が形成される。なお、マイクロフライアイレンズ 8 の後側焦点面またはその近傍に、すなわち後述する投影光学系 P L の入射瞳面と光学的にほぼ共役な位置に、二次光源に対応した形状の開口部 (光透過部) を有する照明開口絞りを配置してもよい。

30

【 0 0 2 2 】

マスクブラインド 1 0 の矩形状の開口部 (光透過部) を介した光束は、結像光学系 1 1 の集光作用を受け、且つ結像光学系 1 1 の光路中に配置されたミラー M R 2 により - Z 方向へ反射された後、所定のパターンが形成されたマスク M を重畳的に照明する。すなわち、結像光学系 1 1 は、マスクブラインド 1 0 の矩形状開口部の像をマスク M 上に形成することになる。

40

【 0 0 2 3 】

マスクステージ M S 上に保持されたマスク M を透過した光束は、投影光学系 P L を介して、ウェハステージ W S 上に保持されたウェハ (感光性基板) W 上にマスクパターンの像を形成する。こうして、投影光学系 P L の光軸 A X と直交する平面 (X Y 平面) 内においてウェハステージ W S を二次元的に駆動制御しながら、ひいてはウェハ W を二次元的に駆動制御しながら一括露光またはスキャン露光を行うことにより、ウェハ W の各露光領域にはマスク M のパターンが順次露光される。スキャン露光を行う際には、たとえば Y 方向に沿って、投影光学系 P L の倍率に応じた速度比でマスクステージ M S とウェハステージ W S とを駆動すればよい。

【 0 0 2 4 】

50

本実施形態の露光装置は、照明光学系(1~11)を介した光に基づいて照明光学系の射出瞳面における瞳強度分布を計測する第1瞳強度分布計測部DTrと、投影光学系PLを介した光に基づいて投影光学系PLの瞳面(投影光学系PLの射出瞳面)における瞳強度分布を計測する第2瞳強度分布計測部DTwと、第1および第2瞳強度分布計測部DTr, DTwのうちの少なくとも一方の計測結果に基づいて空間光変調器2, 4を制御し且つ露光装置の動作を統括的に制御する制御系CRとを備えている。

【0025】

第1瞳強度分布計測部DTrは、例えば照明光学系の射出瞳位置と光学的に共役な位置に配置された光電変換面を有する撮像部を備え、照明光学系による被照射面上の各点に関する瞳強度分布(各点に入射する光が照明光学系の射出瞳位置に形成する瞳強度分布)をモニターする。また、第2瞳強度分布計測部DTwは、例えば投影光学系PLの瞳位置と光学的に共役な位置に配置された光電変換面を有する撮像部を備え、投影光学系PLの像面の各点に関する瞳強度分布(各点に入射する光が投影光学系PLの瞳位置に形成する瞳強度分布)をモニターする。

10

【0026】

第1および第2瞳強度分布計測部DTr, DTwの詳細な構成および作用については、例えば米国特許公開第2008/0030707号明細書を参照することができる。また、瞳強度分布計測部として、米国特許公開第2010/0020302号公報の開示を参照することもできる。

【0027】

本実施形態では、マイクロフライアイレンズ8により形成される二次光源を光源として、照明光学系の被照射面に配置されるマスクM(ひいてはウェハW)をケラー照明する。このため、二次光源が形成される位置は投影光学系PLの開口絞りASの位置と光学的に共役であり、二次光源の形成面を照明光学系の照明瞳面と呼ぶことができる。また、この二次光源の形成面の像を照明光学系の射出瞳面と呼ぶことができる。典型的には、照明瞳面に対して被照射面(マスクMが配置される面、または投影光学系PLを含めて照明光学系と考える場合にはウェハWが配置される面)が光学的なフーリエ変換面となる。なお、瞳強度分布とは、照明光学系の照明瞳面または当該照明瞳面と光学的に共役な面における光強度分布(輝度分布)である。

20

【0028】

マイクロフライアイレンズ8による波面分割数が比較的大きい場合、マイクロフライアイレンズ8の入射面に形成される大局的な光強度分布と、二次光源全体の大局的な光強度分布(瞳強度分布)とが高い相関を示す。このため、マイクロフライアイレンズ8の入射面および当該入射面と光学的に共役な面における光強度分布についても瞳強度分布と称することができる。図1の構成において、リレー光学系6, 7、およびマイクロフライアイレンズ8は、空間光変調器4を経た光束に基づいてマイクロフライアイレンズ8の直後の照明瞳に瞳強度分布を形成する手段を構成している。

30

【0029】

瞳形成用の空間光変調器4は、図2に示すように、所定面内に配列された複数のミラー要素4aと、複数のミラー要素4aを保持する基盤4bと、基盤4bに接続されたケーブル(不図示)を介して複数のミラー要素4aの姿勢を個別に制御駆動する駆動部4cとを備えている。空間光変調器4では、制御系CRからの指令に基づいて作動する駆動部4cの作用により、複数のミラー要素4aの姿勢がそれぞれ変化し、各ミラー要素4aがそれぞれ所定の向きに設定される。

40

【0030】

空間光変調器4は、図3に示すように、二次元的に配列された複数の微小なミラー要素4aを備え、入射した光に対して、その入射位置に応じた空間的な変調を可変的に付与して射出する。説明および図示を簡単にするために、図2および図3では空間光変調器4が4×4=16個のミラー要素4aを備える構成例を示しているが、実際には16個よりもはるかに多数のミラー要素4aを備えている。

50

【 0 0 3 1 】

図 2 を参照すると、空間光変調器 2 に入射する光線群のうち、光線 L 1 は複数のミラー要素 4 a のうちのミラー要素 S E a に、光線 L 2 はミラー要素 S E a とは異なるミラー要素 S E b にそれぞれ入射する。同様に、光線 L 3 はミラー要素 S E a , S E b とは異なるミラー要素 S E c に、光線 L 4 はミラー要素 S E a ~ S E c とは異なるミラー要素 S E d にそれぞれ入射する。ミラー要素 S E a ~ S E d は、その位置に応じて設定された空間的な変調を光 L 1 ~ L 4 に与える。

【 0 0 3 2 】

空間光変調器 4 では、すべてのミラー要素 4 a の反射面が 1 つの平面に沿って設定された基準状態において、空間光変調器 2 と 4 との間の光路の光軸 A X と平行な方向に沿って入射した光線が、空間光変調器 4 で反射された後に、空間光変調器 4 とリレー光学系 6 との間の光路の光軸 A X と平行な方向に進むように構成されている。また、上述したように、空間光変調器 4 の配列面は、リレー光学系 6 の前側レンズ群 6 a の前側焦点位置またはその近傍に位置決めされている。

10

【 0 0 3 3 】

したがって、空間光変調器 4 の複数のミラー要素 S E a ~ S E d によって反射されて所定の角度分布が与えられた光は、リレー光学系 6 の瞳面 6 c に所定の光強度分布 S P 1 ~ S P 4 を形成し、ひいてはマイクロフライアイレンズ 8 の入射面に光強度分布 S P 1 ~ S P 4 に対応した光強度分布を形成する。すなわち、前側レンズ群 6 a は、空間光変調器 4 の複数のミラー要素 S E a ~ S E d が射出光に与える角度を、空間光変調器 4 のファーフ

20

【 0 0 3 4 】

空間光変調器 4 は、図 3 に示すように、平面状の反射面を上面にした状態で 1 つの平面に沿って規則的に且つ二次元的に配列された多数の微小な反射素子であるミラー要素 4 a を含む可動マルチミラーである。各ミラー要素 4 a は可動であり、その反射面の傾き、すなわち反射面の傾斜角および傾斜方向は、制御系 C R からの制御信号に基づいて作動する駆動部 4 c の作用により独立に制御される。各ミラー要素 4 a は、その反射面に平行な二方向であって互いに直交する二方向を回転軸として、所望の回転角度だけ連続的或いは離散的に回転することができる。すなわち、各ミラー要素 4 a の反射面の傾斜を二次元的に制御することが可能である。

30

【 0 0 3 5 】

各ミラー要素 4 a の反射面を離散的に回転させる場合、回転角を複数の状態（例えば、 \dots 、 -2.5 度、 -2.0 度、 \dots 、 0 度、 $+0.5$ 度、 \dots 、 $+2.5$ 度、 \dots ）で切り換え制御するのが良い。図 3 には外形が正方形のミラー要素 4 a を示しているが、ミラー要素 4 a の外形形状は正方形に限定されない。ただし、光利用効率の観点から、ミラー要素 4 a の隙間が少なくなるように配列可能な形状（最密充填可能な形状）とすることができる。また、光利用効率の観点から、隣り合う 2 つのミラー要素 4 a の間隔を必要最小限に抑えることができる。

40

【 0 0 3 6 】

本実施形態では、空間光変調器 4 として、たとえば二次元的に配列された複数のミラー要素 4 a の向きを連続的にそれぞれ変化させる空間光変調器を用いている。このような空間光変調器として、たとえば欧州特許公開第 7 7 9 5 3 0 号公報、米国特許第 5, 8 6 7, 3 0 2 号公報、米国特許第 6, 4 8 0, 3 2 0 号公報、米国特許第 6, 6 0 0, 5 9 1 号公報、米国特許第 6, 7 3 3, 1 4 4 号公報、米国特許第 6, 9 0 0, 9 1 5 号公報、米国特許第 7, 0 9 5, 5 4 6 号公報、米国特許第 7, 2 9 5, 7 2 6 号公報、米国特許第 7, 4 2 4, 3 3 0 号公報、米国特許第 7, 5 6 7, 3 7 5 号公報、米国特許公開第 2 0 0 8 / 0 3 0 9 9 0 1 号公報、国際特許公開第 W O 2 0 1 0 / 0 3 7 4 7 6 号パンフレット、国際特許公開

50

第W O 2 0 1 0 / 0 4 0 5 0 6号パンフレット並びに特開2 0 0 6 - 1 1 3 4 3 7号公報に開示される空間光変調器を用いることができる。なお、二次元的に配列された複数のミラー要素4 aの向きを離散的に複数の段階を持つように制御してもよい。

【0037】

空間光変調器4では、制御系C Rからの制御信号に応じて作動する駆動部4 cの作用により、複数のミラー要素4 aの姿勢がそれぞれ変化し、各ミラー要素4 aがそれぞれ所定の向きに設定される。空間光変調器4の複数のミラー要素4 aによりそれぞれ所定の角度で反射された光は、マイクロフライアイレンズ8の直後の照明瞳に、所望の瞳強度分布を形成する。さらに、マイクロフライアイレンズ8の直後の照明瞳と光学的に共役な別の照明瞳の位置、すなわち結像光学系1 1の瞳位置および投影光学系P Lの瞳位置（開口絞りA Sが配置されている位置）にも、所望の瞳強度分布が形成される。

10

【0038】

このように、瞳形成用の空間光変調器4は、マイクロフライアイレンズ8の直後の照明瞳に瞳強度分布を可変的に形成する機能を有する。リレー光学系6および7は、空間光変調器4の複数のミラー要素4 aがそのファーストフィールドに形成するファーストフィールドパターンを、マイクロフライアイレンズ8の直後の照明瞳と共役な位置（マイクロフライアイレンズ8の入射面またはその近傍）に結像させる分布形成光学系を構成している。この分布形成光学系は、空間光変調器4からの射出光束の角度方向の分布を、分布形成光学系からの射出光束の断面における位置分布に変換する。

【0039】

20

偏光仕分け用の空間光変調器2は、瞳形成用の空間光変調器4と同様の構成を有するが、空間光変調器4と異なる作用（機能）を有する。以下、空間光変調器4と重複する説明を省略し、空間光変調器4とは異なる点に着目して空間光変調器2を説明する。換言すれば、空間光変調器2の構成に関して特に言及しない点については、空間光変調器4の構成と同様である。

【0040】

空間光変調器2は、図4に示すように、所定面内に配列された複数のミラー要素2 aと、複数のミラー要素2 aを保持する基盤2 bと、基盤2 bに接続されたケーブル（不図示）を介して複数のミラー要素2 aの姿勢を個別に制御駆動する駆動部2 cとを備えている。図4では、空間光変調器2と対比させて空間光変調器4の説明を容易に理解できるように、光軸A Xを図4中の鉛直方向に一致させた状態で空間光変調器2から偏光部材5までの構成を図示している。

30

【0041】

空間光変調器2では、制御系C Rからの指令に基づいて作動する駆動部2 cの作用により、複数のミラー要素2 aの姿勢がそれぞれ変化し、各ミラー要素2 aがそれぞれ所定の向きに設定される。空間光変調器2は、図3に示すように、二次元的に配列された複数の微小なミラー要素2 aを備え、入射した光に対して、その入射位置に応じた空間的な変調を可変的に付与して射出する。

【0042】

図4を参照すると、空間光変調器2に入射する光線群のうち、光線L 1 1は複数のミラー要素2 aのうちミラー要素S E eに、光線L 1 2はミラー要素S E eとは異なるミラー要素S E fにそれぞれ入射する。同様に、光線L 1 3はミラー要素S E e、S E fとは異なるミラー要素S E gに、光線L 1 4はミラー要素S E e ~ S E gとは異なるミラー要素S E hにそれぞれ入射する。ミラー要素S E e ~ S E hは、その位置に応じて設定された空間的な変調を光L 1 1 ~ L 1 4に与える。

40

【0043】

空間光変調器2では、すべてのミラー要素2 aの反射面が1つの平面に沿って設定された基準状態において、ビーム送光部1と空間光変調器2との間の光路の光軸A Xと平行な方向に沿って入射した光線が、空間光変調器2で反射された後に、空間光変調器2と4との間の光路の光軸A Xと平行な方向に進むように構成されている。上述したように、偏光

50

部材 5 は、空間光変調器 2 の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある位置またはその近傍に位置決めされている。

【 0 0 4 4 】

したがって、再結像光学系 3 の前側レンズ群 3 a は、空間光変調器 2 の複数のミラー要素 $S E e \sim S E h$ が射出光に与える角度を、空間光変調器 2 のファーフールドである偏光部材 5 の入射面上での位置に変換する。このように、偏光仕分け用の空間光変調器 2 は、その入射面の任意の領域に入射した光を、リレー光学系としての前側レンズ群 3 a を介して偏光部材 5 の入射面上の所望の領域へ可変的に導く機能を有する。

【 0 0 4 5 】

偏光部材 5 は、図 5 に示すように、光路中に並列的に配置された 8 つの $1 / 2$ 波長板 5 1 a , 5 1 b , 5 1 c , 5 1 d と、1 つのデポライザ (非偏光化素子) 5 1 e とを備えている。一例として、 $1 / 2$ 波長板 5 1 a ~ 5 1 d およびデポライザ 5 1 e は、光軸 A X と直交する単一の平面に沿って配置されている。図 5 では、説明の理解を容易するために、偏光部材 5 の入射面において X 方向と平行な方向に x 方向を設定し、偏光部材 5 の入射面において x 方向と直交する方向に z 方向を設定している。

【 0 0 4 6 】

図 5 に示す設置状態において、一对の $1 / 2$ 波長板 5 1 a は、x 方向に偏光方向を有する直線偏光 (以下、「x 方向直線偏光」という) の光が入射した場合、x 方向を 90 度回転させた方向、すなわち z 方向に偏光方向を有する z 方向直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。一对の $1 / 2$ 波長板 5 1 b は、x 方向直線偏光の光が入射した場合、その偏光方向を変化させることなく x 偏光直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。

【 0 0 4 7 】

一对の $1 / 2$ 波長板 5 1 c は、x 方向直線偏光の光が入射した場合、x 方向を図 5 中時計廻りに $+ 45$ 度回転させた方向、すなわち $+ 45$ 度斜め方向に偏光方向を有する直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。一对の $1 / 2$ 波長板 5 1 d は、x 方向直線偏光の光が入射した場合、x 方向を図 5 中時計廻りに $- 45$ 度 (あるいは $+ 135$ 度) 回転させた方向、すなわち $- 45$ 度斜め方向に偏光方向を有する直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。

【 0 0 4 8 】

瞳形成用の空間光変調器 4 の配列面は、再結像光学系 3 を介して、偏光仕分け用の空間光変調器 2 の配列面と光学的に共役な位置またはその近傍にある。したがって、空間光変調器 4 への入射光束の性状は、空間光変調器 2 への入射光束の性状に対応している。以下、説明の理解を容易にするために、空間光変調器 2 には矩形形状の断面を有する X 方向直線偏光の平行光束が入射するものとする。すなわち、偏光部材 5 には、x 方向直線偏光の光が入射する。空間光変調器 4 には、矩形形状の断面を有する平行光束が入射する。

【 0 0 4 9 】

本実施形態では、図 6 に示すように、偏光仕分け用の空間光変調器 2 の有効反射領域 R 2 が、5 つの部分領域 R 2 a , R 2 b , R 2 c , R 2 d , R 2 e に仮想的に分割される。5 つの部分領域 R 2 a ~ R 2 e に対応して、図 7 に示すように、瞳形成用の空間光変調器 4 の有効反射領域 R 4 は、5 つの部分領域 R 4 a , R 4 b , R 4 c , R 4 d , R 4 e に仮想的に分割される。なお、空間光変調器 2 , 4 の有効反射領域の仮想的な分割のやり方については、様々な形態が可能である。

【 0 0 5 0 】

空間光変調器 2 の部分領域 R 2 a に入射した X 方向直線偏光の光は、偏光部材 5 の一对の $1 / 2$ 波長板 5 1 a へ導かれ、 $1 / 2$ 波長板 5 1 a を介して z 方向直線偏光の光になり、空間光変調器 4 の部分領域 R 4 a に達する。空間光変調器 2 の部分領域 R 2 b に入射した X 方向直線偏光の光は、偏光部材 5 の一对の $1 / 2$ 波長板 5 1 b へ導かれ、 $1 / 2$ 波長板 5 1 b を介して偏光方向が変化することなく x 方向直線偏光の状態、空間光変調器 4 の部分領域 R 4 b に達する。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 1 】

空間光変調器 2 の部分領域 R 2 c に入射した X 方向直線偏光の光は、偏光部材 5 の一对の 1 / 2 波長板 5 1 c へ導かれ、1 / 2 波長板 5 1 c を介して + 4 5 度斜め方向に偏光方向を有する + 4 5 度斜め方向直線偏光の光になり、空間光変調器 4 の部分領域 R 4 c に達する。空間光変調器 2 の部分領域 R 2 d に入射した X 方向直線偏光の光は、偏光部材 5 の一对の 1 / 2 波長板 5 1 d へ導かれ、1 / 2 波長板 5 1 d を介して - 4 5 度斜め方向に偏光方向を有する - 4 5 度斜め方向直線偏光の光になり、空間光変調器 4 の部分領域 R 4 d に達する。

【 0 0 5 2 】

空間光変調器 2 の部分領域 R 2 e に入射した X 方向直線偏光の光は、偏光部材 5 のデポラライザ 5 1 e へ導かれ、デポラライザ 5 1 e を介して非偏光状態の光になり、空間光変調器 4 の部分領域 R 4 e に達する。空間光変調器 4 の駆動部 4 c は、図 8 に示すように、部分領域 R 4 a に位置する第 1 ミラー要素群 S 4 a を経た光がマイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳面上の一对の瞳領域 R 1 1 a , R 1 1 b へ導かれるように、第 1 ミラー要素群 S 4 a に属する複数のミラー要素 4 a の姿勢をそれぞれ制御する。一对の瞳領域 R 1 1 a , R 1 1 b は、例えば光軸 A X を挟んで X 方向に間隔を隔てた領域である。

10

【 0 0 5 3 】

駆動部 4 c は、部分領域 R 4 b に位置する第 2 ミラー要素群 S 4 b を経た光が照明瞳面上の一对の瞳領域 R 1 2 a , R 1 2 b へ導かれるように、第 2 ミラー要素群 S 4 b に属する複数のミラー要素 4 a の姿勢をそれぞれ制御する。一对の瞳領域 R 1 2 a , R 1 2 b は、例えば光軸 A X を挟んで Z 方向に間隔を隔てた領域である。駆動部 4 c は、部分領域 R 4 c に位置する第 3 ミラー要素群 S 4 c を経た光が照明瞳面上の一对の瞳領域 R 1 3 a , R 1 3 b へ導かれるように、第 3 ミラー要素群 S 4 c に属する複数のミラー要素 4 a の姿勢をそれぞれ制御する。一对の瞳領域 R 1 3 a , R 1 3 b は、例えば光軸 A X を挟んで + X 方向および + Z 方向と 4 5 度をなす方向に間隔を隔てた領域である。

20

【 0 0 5 4 】

駆動部 4 c は、部分領域 R 4 d に位置する第 4 ミラー要素群 S 4 d を経た光が照明瞳面上の一对の瞳領域 R 1 4 a , R 1 4 b へ導かれるように、第 4 ミラー要素群 S 4 d に属する複数のミラー要素 4 a の姿勢をそれぞれ制御する。一对の瞳領域 R 1 4 a , R 1 4 b は、例えば光軸 A X を挟んで - X 方向および + Z 方向と 4 5 度をなす方向に間隔を隔てた領域である。駆動部 4 c は、部分領域 R 4 e に位置する第 5 ミラー要素群 S 4 e を経た光が照明瞳面上の単一の瞳領域 R 1 5 へ導かれるように、第 5 ミラー要素群 S 4 e に属する複数のミラー要素 4 a の姿勢をそれぞれ制御する。瞳領域 R 1 5 は、例えば光軸 A X を含む領域である。

30

【 0 0 5 5 】

こうして、空間光変調器 4 は、矩形状の断面を有する平行光束に基づいて、マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳に、例えば 9 つの円形状の実質的な面光源 P 1 1 a , P 1 1 b ; P 1 2 a , P 1 2 b ; P 1 3 a , P 1 3 b ; P 1 4 a , P 1 4 b ; P 1 5 からなる 9 極状の瞳強度分布 2 1 を形成する。瞳領域 R 1 1 a , R 1 1 b を占める面光源 P 1 1 a , P 1 1 b を形成する光は、1 / 2 波長板 5 1 a を経ているので、Z 方向直線偏光 (図 5 における z 方向直線偏光に対応) である。

40

【 0 0 5 6 】

瞳領域 R 1 2 a , R 1 2 b を占める面光源 P 1 2 a , P 1 2 b を形成する光は、1 / 2 波長板 5 1 b を経ているので、X 方向直線偏光 (図 5 における x 方向直線偏光に対応) である。瞳領域 R 1 3 a , R 1 3 b を占める面光源 P 1 3 a , P 1 3 b を形成する光は、1 / 2 波長板 5 1 c を経ているので、図 8 の紙面において X 方向を時計廻りに + 4 5 度回転させた方向に偏光方向を有する + 4 5 度斜め方向直線偏光 (図 5 における + 4 5 度斜め方向直線偏光に対応) である。

【 0 0 5 7 】

瞳領域 R 1 4 a , R 1 4 b を占める面光源 P 1 4 a , P 1 4 b を形成する光は、1 / 2

50

波長板 5 1 d を経ているので、図 8 の紙面において X 方向を時計廻りに - 4 5 度回転させた方向に偏光方向を有する - 4 5 度斜め方向直線偏光（図 5 における - 4 5 度斜め方向直線偏光に対応）である。瞳領域 R 1 5 を占める面光源 P 1 5 を形成する光は、デポラライザ 5 1 e を経ているので、非偏光状態である。

【 0 0 5 8 】

こうして、偏光仕分け用の空間光変調器 2 と偏光部材 5 と瞳形成用の空間光変調器 4 との協働作用により、マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳には、8 極状で周方向偏光状態の瞳強度分布に中央極の面光源 P 1 5 が追加された 8 極状の瞳強度分布 2 1 が形成される。さらに、マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳と光学的に共役な別の照明瞳の位置、すなわち結像光学系 1 1 の瞳位置および投影光学系 P L の瞳位置（開口絞り A S が配置されている位置）にも、瞳強度分布 2 1 に対応する 9 極状の瞳強度分布が形成される。

10

【 0 0 5 9 】

なお、図示を省略するが、空間光変調器 2 の部分領域 R 2 e に入射した光をデポラライザ 5 1 e へ導くことなく 1 / 2 波長板 5 1 a ~ 5 1 d へ導くとともに、空間光変調器 4 の部分領域 R 4 e に入射した光を瞳領域 R 1 1 a , R 1 1 b ; R 1 2 a , R 1 2 b ; R 1 3 a , R 1 3 b ; R 1 4 a , R 1 4 b へ導くことにより、図 8 の 9 極状の瞳強度分布 2 1 から中央極の面光源 P 1 5 を除いて得られる 8 極状で周方向偏光状態の瞳強度分布を形成することができる。あるいは、デポラライザ 5 1 e および空間光変調器 4 の第 5 ミラー要素群 S 4 e を経た光が照明瞳の形成に寄与しないように、例えば照明光路の外部へ導くこと

20

【 0 0 6 0 】

一般に、周方向偏光状態の輪帯状や複数極状（4 極状、8 極状など）の瞳強度分布に基づく周方向偏光照明では、最終的な被照射面としてのウェハ W に照射される光が s 偏光を主成分とする偏光状態になる。ここで、s 偏光とは、入射面に対して垂直な方向に偏光方向を有する直線偏光（入射面に垂直な方向に電気ベクトルが振動している偏光）のことである。入射面とは、光が媒質の境界面（被照射面：ウェハ W の表面）に達したときに、その点での境界面の法線と光の入射方向とを含む面として定義される。その結果、周方向偏光照明では、投影光学系の光学性能（焦点深度など）の向上を図ることができ、ウェハ（感光性基板）上において高いコントラストのマスクパターン像を得ることができる。

30

【 0 0 6 1 】

本実施形態では、姿勢が個別に制御される多数のミラー要素 4 a を有する瞳形成用の空間光変調器 4 を用いているので、瞳強度分布の形状（大きさを含む広い概念）の変更に関する自由度は高い。一例として、制御系 C R からの指令にしたがって空間光変調器 4 を制御するだけで、図 9 に示すように、マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳に輪帯状で周方向偏光状態の瞳強度分布 2 2 を形成することができる。

【 0 0 6 2 】

図 9 に示す例では、1 / 2 波長板 5 1 a および第 1 ミラー要素群 S 4 a を経た光が、照明瞳面において光軸 A X を挟んで X 方向に間隔を隔てた一対の円弧状の瞳領域 R 2 1 a , R 2 1 b へ導かれて、実質的な面光源 P 2 1 a , P 2 1 b を形成する。1 / 2 波長板 5 1 b および第 2 ミラー要素群 S 4 b を経た光は、光軸 A X を挟んで Z 方向に間隔を隔てた一対の円弧状の瞳領域 R 2 2 a , R 2 2 b へ導かれて、実質的な面光源 P 2 2 a , P 2 2 b を形成する。1 / 2 波長板 5 1 c および第 3 ミラー要素群 S 4 c を経た光は、光軸 A X を挟んで + X 方向および + Z 方向と 4 5 度をなす方向に間隔を隔てた一対の円弧状の瞳領域 R 2 3 a , R 2 3 b へ導かれて、実質的な面光源 P 2 3 a , P 2 3 b を形成する。

40

【 0 0 6 3 】

1 / 2 波長板 5 1 d および第 4 ミラー要素群 S 4 d を経た光は、光軸 A X を挟んで - X 方向および + Z 方向と 4 5 度をなす方向に間隔を隔てた一対の円弧状の瞳領域 R 2 4 a , R 2 4 b へ導かれて、実質的な面光源 P 2 4 a , P 2 4 b を形成する。デポラライザ 5 1 e および第 5 ミラー要素群 S 4 e を経た光は、例えば照明光路の外部へ導かれて、照明瞳

50

の形成に寄与しない。こうして、例えば8つの円弧状の実質的な面光源 P 2 1 a , P 2 1 b ; P 2 2 a , P 2 2 b ; P 2 3 a , P 2 3 b ; P 2 4 a , P 2 4 b からなる輪帯状で周方向偏光状態の瞳強度分布 2 2 が形成される。

【 0 0 6 4 】

なお、空間光変調器 2 の部分領域 R 2 e に入射した光をデポライザ 5 1 e へ導くことなく 1 / 2 波長板 5 1 a ~ 5 1 d へ導くとともに、空間光変調器 4 の部分領域 R 4 e に入射した光を瞳領域 R 2 1 a , R 2 1 b ; R 2 2 a , R 2 2 b ; R 2 3 a , R 2 3 b ; R 2 4 a , R 2 4 b へ導くことにより、照明瞳の形成に寄与させることもできる。また、図示を省略するが、空間光変調器 2 の部分領域 R 2 e に入射した光を、デポライザ 5 1 e を介して照明瞳において光軸 A X を含む中央瞳領域へ導くことにより、輪帯状で周方向偏光状態の瞳強度分布 2 2 に図 8 の中央極の面光源 P 1 5 を追加して得られる変形輪帯状の瞳強度分布を形成することもできる。

10

【 0 0 6 5 】

また、本実施形態では、姿勢が個別に制御される多数のミラー要素 2 a を有する偏光仕分け用の空間光変調器 2 を用いているので、瞳強度分布の偏光状態の変更に関する自由度は高い。一例として、制御系 C R からの指令にしたがって空間光変調器 2 を制御するだけで、図 1 0 に示すように、マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳に 8 極状で径方向偏光状態の瞳強度分布に中央極の面光源 P 3 5 を追加して得られる 9 極状の瞳強度分布 2 3 を形成することができる。

【 0 0 6 6 】

20

図 1 0 に示す例では、空間光変調器 2 の部分領域 R 2 a からの光が、偏光部材 5 の 1 / 2 波長板 5 1 b および空間光変調器 4 の第 1 ミラー要素群 S 4 a を経て、照明瞳面において光軸 A X を挟んで X 方向に間隔を隔てた一对の瞳領域 R 3 1 a , R 3 1 b へ導かれて、実質的な面光源 P 3 1 a , P 3 1 b を形成する。空間光変調器 2 の部分領域 R 2 b からの光は、1 / 2 波長板 5 1 a および第 2 ミラー要素群 S 4 b を経て、照明瞳面において光軸 A X を挟んで Z 方向に間隔を隔てた一对の瞳領域 R 3 2 a , R 3 2 b へ導かれて、実質的な面光源 P 3 2 a , P 3 2 b を形成する。

【 0 0 6 7 】

空間光変調器 2 の部分領域 R 2 c からの光は、1 / 2 波長板 5 1 d および第 3 ミラー要素群 S 4 c を経て、照明瞳面において光軸 A X を挟んで - X 方向および + Z 方向と 4 5 度をなす方向に間隔を隔てた一对の瞳領域 R 3 3 a , R 3 3 b へ導かれて、実質的な面光源 P 3 3 a , P 3 3 b を形成する。空間光変調器 2 の部分領域 R 2 d からの光は、1 / 2 波長板 5 1 c および第 4 ミラー要素群 S 4 d を経て、照明瞳面において光軸 A X を挟んで + X 方向および + Z 方向と 4 5 度をなす方向に間隔を隔てた一对の瞳領域 R 3 4 a , R 3 4 b へ導かれて、実質的な面光源 P 3 4 a , P 3 4 b を形成する。

30

【 0 0 6 8 】

空間光変調器 2 の部分領域 R 2 e からの光は、デポライザ 5 1 e および第 5 ミラー要素群 S 4 e を経て、照明瞳面において光軸 A X を含む中央瞳領域 R 3 5 へ導かれて、実質的な面光源 P 3 5 を形成する。こうして、例えば8つの円形状の実質的な面光源 P 3 1 a , P 3 1 b ; P 3 2 a , P 3 2 b ; P 3 3 a , P 3 3 b ; P 3 4 a , P 3 4 b からなる 8 極状で径方向偏光状態の瞳強度分布に中央極の面光源 P 3 5 が追加された 9 極状の瞳強度分布 2 3 が形成される。

40

【 0 0 6 9 】

なお、図示を省略するが、空間光変調器 2 の部分領域 R 2 e に入射した光をデポライザ 5 1 e へ導くことなく 1 / 2 波長板 5 1 a ~ 5 1 d へ導くとともに、空間光変調器 4 の部分領域 R 4 e に入射した光を瞳領域 R 3 1 a , R 3 1 b ; R 3 2 a , R 3 2 b ; R 3 3 a , R 3 3 b ; R 3 4 a , R 3 4 b へ導くことにより、図 1 0 の 9 極状の瞳強度分布 2 3 から中央極の面光源 P 3 5 を除いて得られる 8 極状で径方向偏光状態の瞳強度分布を形成することができる。あるいは、デポライザ 5 1 e および空間光変調器 4 の第 5 ミラー要素群 S 4 e を経た光が照明瞳の形成に寄与しないように、例えば照明光路の外部へ導くこ

50

とにより、同じく 8 極状で径方向偏光状態の瞳強度分布を形成することができる。

【 0 0 7 0 】

また、図示を省略するが、制御系 C R からの指令にしたがって空間光変調器 4 を制御することにより、マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳に輪帯状で径方向偏光状態の瞳強度分布を形成したり、輪帯状で径方向偏光状態の瞳強度分布に中央極の面光源を追加して得られる変形輪帯状の瞳強度分布を形成したりすることができる。

【 0 0 7 1 】

一般に、径方向偏光状態の輪帯状や複数極状の瞳強度分布に基づく径方向偏光照明では、最終的な被照射面としてのウェハ W に照射される光が p 偏光を主成分とする偏光状態になる。ここで、p 偏光とは、上述のように定義される入射面に対して平行な方向に偏光方向を有する直線偏光（入射面に平行な方向に電気ベクトルが振動している偏光）のことである。その結果、径方向偏光照明では、ウェハ W に塗布されたレジストにおける光の反射率を小さく抑えて、ウェハ（感光性基板）上において良好なマスクパターン像を得ることができる。

10

【 0 0 7 2 】

以上のように、本実施形態では、姿勢が個別に制御される多数のミラー要素 4 a を有する瞳形成用の空間光変調器 4 を用いているので、瞳強度分布の形状（大きさを含む広い概念）の変更に関する自由度は高く、様々な形態を有する輪帯状または複数極状の瞳強度分布を形成することができる。また、姿勢が個別に制御される多数のミラー要素 2 a を有し且つ空間光変調器 4 と光学的に共役な位置に配置された偏光仕分け用の空間光変調器 2 と、空間光変調器 2 と光学的にフーリエ変換の関係にある位置に並列的に配置されて偏光変換特性の互いに異なる複数の波長板 5 1 a ~ 5 1 e を有する偏光部材 5 とを用いているので、瞳強度分布を構成する各瞳領域の偏光状態の変更に関する自由度は高く、様々な偏光状態の瞳強度分布を形成することができる。

20

【 0 0 7 3 】

すなわち、本実施形態の照明光学系（1 ~ 1 1）では、光学部材の交換を伴うことなく、マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳に形成される瞳強度分布の形状および偏光状態の変更に関して高い自由度を実現することができる。本実施形態の露光装置（1 ~ W S）では、瞳強度分布の形状および偏光状態の変更に関して高い自由度を有する照明光学系（1 ~ 1 1）を用いて、転写すべきマスク M のパターンの特性にに応じて実現された適切な照明条件のもとで、微細パターンをウェハ W に正確に転写することができる。

30

【 0 0 7 4 】

上述の実施形態において、制御系 C R は、たとえば、C P U（中央演算処理装置）、R O M（リード・オンリ・メモリ）、R A M（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）等から構成することができる。また、制御系 C R には、例えばハードディスクから成る記憶装置、キーボード、マウス等のポインティングデバイス等を含む入力装置、C R T ディスプレイ（又は液晶ディスプレイ）等の表示装置、及び C D（compact disc）、D V D（digital versatile disc）、M O（magneto-optical disc）あるいは F D（flexible disc）等の情報記憶媒体のドライブ装置が、外付けで接続されていてもよい。

40

【 0 0 7 5 】

本実施形態では、記憶装置には、投影光学系 P L によってウェハ W 上に投影される投影像の結像状態が最適（例えば収差又は線幅が許容範囲内）となる瞳強度分布（照明光源形状）に関する情報、これに対応する照明光学系、特に空間光変調器 2、4 のミラー要素の制御情報等を格納してもよい。ドライブ装置には、後述する瞳強度分布の設定を行うためのプログラム等が格納された情報記憶媒体（以下の説明では便宜上 C D - R O M とする）がセットされていてもよい。なお、これらのプログラムは記憶装置にインストールされていてもよい。制御系 C R は、適宜、これらのプログラムをメモリ上に読み出す。

【 0 0 7 6 】

制御系 C R は、たとえば以下の手順で、空間光変調器 2、4 を制御することができる。

50

なお、以下の説明に際して、実施形態の露光装置は、図8に示す瞳強度分布21を形成するものとする。瞳強度分布は、たとえば瞳面を格子状に複数の区画に分割し、それぞれの区画の光強度および偏光状態を用いて数値として表現した形式（広義のビットマップ形式）で表現することができる。ここで、空間光変調器4のミラー要素数をN個とし、瞳強度分布の分割された区画数をM個とすると、個々のミラー要素により反射されるN本の光線を適当に組み合わせてM個の区画に導く、換言すれば、M個の区画により構成されるM個の輝点上でN本の光線を適当に重ね合わせることで、瞳強度分布（二次光源）が形成（設定）される。

【0077】

まず、制御部CRは、目標となる瞳強度分布21に関する情報を記憶装置から読み出す。次に、読み出された瞳強度分布21に関する情報から、偏光状態ごとの強度分布を形成するのに、それぞれ何本の光線が必要なのかを算出する。そして、制御部CRは、空間光変調器4の複数のミラー要素4aを、それぞれ所要数のミラー要素からなる5つのミラー要素群S4a, S4b, S4c, S4d, S4eに仮想的に分割し、それぞれのミラー要素群S4a~S4eが位置する部分領域R4a~R4eを設定する。その結果、空間光変調器2において、空間光変調器4の部分領域R4a~R4eに対応する部分領域R2a~R2eが設定される。

10

【0078】

制御部CRは、空間光変調器2の部分領域R2aに位置するミラー要素2aを駆動して、部分領域R2aからの光が偏光部材5の一对の1/2波長板51aに向かうように設定する。同様に、部分領域R2b, R2c, R2dに位置するミラー要素2aを駆動して、部分領域R2b, R2c, R2dからの光が一对の1/2波長板51b, 51c, 51dに向かうように設定する。さらに、部分領域R2eに位置するミラー要素2aを駆動して、部分領域R2eからの光がデポラライザ51eに向かうように設定する。

20

【0079】

また、制御部CRは、空間光変調器4の第1ミラー要素群S4aのミラー要素4aを駆動して、第1ミラー要素群S4aからの光が面光源P11a, P11bに向かうように設定する。同様に、空間光変調器4のミラー要素群S4b, S4c, S4d, S4eのミラー要素4aを駆動して、ミラー要素群S4b, S4c, S4d, S4eからの光が面光源P12a, P12b; P13a, P13b; P14a, P14b; P15に向かうように設定する。

30

【0080】

また、上述の実施形態において、制御部CRは、第1および第2瞳強度分布計測部DTr, DTwのうちの少なくとも一方の計測結果に基づいて、照明光学系または投影光学系の射出瞳面における瞳強度分布を所要の分布とするために空間光変調器2, 4のうちの少なくとも一方を制御している。

【0081】

ここで、上述の実施形態において、第1および第2瞳強度分布計測部DTr, DTwに加えて、照明光学系による被照射面上の各点に関する瞳偏光状態の分布（各点に入射する光が照明光学系の射出瞳位置に形成する偏光状態ごとの瞳強度分布）や、投影光学系PLの像面の各点に関する瞳偏光状態分布（各点に入射する光が投影光学系PLの瞳位置に形成する偏光状態ごとの瞳強度分布）をモニターする瞳偏光状態分布計測部を設けてもよい。

40

【0082】

制御部CRは、瞳偏光状態分布計測部の計測結果に基づいて、照明光学系または投影光学系の射出瞳面における瞳偏光状態の分布を所要の分布とするために空間光変調器2, 4のうちの少なくとも一方を制御してもよい。このような瞳偏光状態分布計測部の構成び作用については、例えば米国特許出願公開第2007/0146676号明細書や第2007/0188730号明細書を参照することができる。

【0083】

50

なお、上述の実施形態では、偏光部材 5 が、8 つの（4 種類の）1 / 2 波長板 5 1 a ~ 5 1 d とデポライザ 5 1 e とにより構成され、再結像光学系 3 の瞳位置またはその近傍に並列配置されている。しかしながら、これに限定されることなく、偏光部材の具体的な構成、すなわち偏光部材を形成する 1 つまたは複数の偏光要素の種別、偏光変換特性、数、外形、配置などについて、様々な変形例が可能である。

【 0 0 8 4 】

一例として、図 1 1 に示すように、光路中に並列配置された互いに偏光変換特性の異なる 8 つの 1 / 2 波長板 5 2 a , 5 2 b , 5 2 c , 5 2 d , 5 2 e , 5 2 f , 5 2 g , 5 2 h により偏光部材 5 A を構成することもできる。偏光部材 5 A は、図 1 1 に示す設置状態において、例えば光軸 A X を中心とする円形状の外形を有し、光軸 A X から円の径方向に延びる線分によって分割された 8 つの扇形状の領域に対応して、光学軸の向きが互いに異なる 8 つの 1 / 2 波長板 5 2 a ~ 5 2 h が配置されている。

10

【 0 0 8 5 】

図 1 1 では、1 / 2 波長板 5 2 a , 5 2 b が全体の 1 / 4 の面積を占め、1 / 2 波長板 5 2 c , 5 2 d が全体の 1 / 8 の面積を占め、1 / 2 波長板 5 2 e ~ 5 2 h が全体の 1 / 1 6 の面積を占めている。1 / 2 波長板 5 2 a は、x 方向直線偏光の光が入射した場合、z 方向直線偏光の光を射出するように光学軸の向きが設定されている。1 / 2 波長板 5 2 b は、x 方向直線偏光の光が入射した場合、その偏光方向を変化させることなく x 偏光直線偏光の光を射出するように光学軸の向きが設定されている。

【 0 0 8 6 】

1 / 2 波長板 5 2 c は、x 方向直線偏光の光が入射した場合、x 方向を図 1 1 中時計回りに + 4 5 度回転させた方向、すなわち + 4 5 度斜め方向に偏光方向を有する + 4 5 度斜め方向直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。1 / 2 波長板 5 2 d は、x 方向直線偏光の光が入射した場合、- 4 5 度（あるいは + 1 3 5 度）斜め方向直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。

20

【 0 0 8 7 】

1 / 2 波長板 5 2 e は、x 方向直線偏光の光が入射した場合、+ 2 2 . 5 度斜め方向直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。1 / 2 波長板 5 2 f は、x 方向直線偏光の光が入射した場合、+ 6 7 . 5 度斜め方向直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。1 / 2 波長板 5 2 g は、- 2 2 . 5 度（あるいは + 1 1 2 . 5 度）斜め方向直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。1 / 2 波長板 5 2 h は、- 6 7 . 5 度（あるいは + 1 5 7 . 5 度）斜め方向直線偏光の光を射出するように、光学軸の向きが設定されている。

30

【 0 0 8 8 】

図 1 1 に示す変形例では、空間光変調器 2 , 4 の有効反射領域が 8 つの部分領域に仮想的に分割され、空間光変調器 2 , 4 と偏光部材 5 A との協働作用により、図 1 2 に示すような輪帯状の瞳強度分布 2 4 が形成される。すなわち、空間光変調器 2 の第 1 部分領域からの光は、1 / 2 波長板 5 2 a および空間光変調器 4 の第 1 部分領域を経て、照明瞳面において光軸 A X を挟んで X 方向に間隔を隔てた一対の円弧状の瞳領域 R 4 1 a , R 4 1 b へ導かれて、実質的な面光源 P 4 1 a , P 4 1 b を形成する。

40

【 0 0 8 9 】

空間光変調器 2 の第 2 部分領域からの光は、1 / 2 波長板 5 2 b および空間光変調器 4 の第 2 部分領域を経て、照明瞳面において光軸 A X を挟んで Z 方向に間隔を隔てた一対の円弧状の瞳領域 R 4 2 a , R 4 2 b へ導かれて、実質的な面光源 P 4 2 a , P 4 2 b を形成する。空間光変調器 2 の第 3 部分領域からの光は、1 / 2 波長板 5 2 c および空間光変調器 4 の第 3 部分領域を経て、照明瞳面において光軸 A X を挟んで + X 方向および + Z 方向と 4 5 度をなす方向に間隔を隔てた一対の円弧状の瞳領域 R 4 3 a , R 4 3 b へ導かれて、実質的な面光源 P 4 3 a , P 4 3 b を形成する。

【 0 0 9 0 】

空間光変調器 2 の第 4 部分領域からの光は、1 / 2 波長板 5 2 d および空間光変調器 4

50

の第4部分領域を経て、照明瞳面において光軸AXを挟んで - X方向および + Z方向と45度をなす方向に間隔を隔てた一対の円弧状の瞳領域R44a, R44bへ導かれて、実質的な面光源P44a, P44bを形成する。空間光変調器2の第5部分領域からの光は、1/2波長板52eおよび空間光変調器4の第5部分領域を経て、照明瞳面において瞳領域R42aとR43aとの間の円弧状の瞳領域R45aおよび瞳領域R42bとR43bとの間の円弧状の瞳領域R45bへ導かれて、実質的な面光源P45aおよびP45bを形成する。

【0091】

空間光変調器2の第6部分領域からの光は、1/2波長板52fおよび空間光変調器4の第6部分領域を経て、照明瞳面において瞳領域R41bとR43aとの間の円弧状の瞳領域R46aおよび瞳領域R41aとR43bとの間の円弧状の瞳領域R46bへ導かれて、実質的な面光源P46aおよびP46bを形成する。空間光変調器2の第7部分領域からの光は、1/2波長板52gおよび空間光変調器4の第7部分領域を経て、照明瞳面において瞳領域R42aとR44aとの間の円弧状の瞳領域R47aおよび瞳領域R42bとR44bとの間の円弧状の瞳領域R47bへ導かれて、実質的な面光源P47aおよびP47bを形成する。

10

【0092】

空間光変調器2の第8部分領域からの光は、1/2波長板52hおよび空間光変調器4の第8部分領域を経て、照明瞳面において瞳領域R41aとR44aとの間の円弧状の瞳領域R48aおよび瞳領域R41bとR44bとの間の円弧状の瞳領域R48bへ導かれて、実質的な面光源P48aおよびP48bを形成する。こうして、16分割タイプの輪帯状で周方向偏光状態の瞳強度分布24が形成される。

20

【0093】

偏光部材5Aを用いる変形例では、空間光変調器4を制御するだけで、マイクロフライアイレンズ8の直後の照明瞳に16極状で周方向偏光状態の瞳強度分布を形成することができる。また、空間光変調器2を制御することにより、マイクロフライアイレンズ8の直後の照明瞳に、輪帯状で径方向偏光状態の瞳強度分布を形成したり、16極状で径方向偏光状態の瞳強度分布を形成したりすることができる。

【0094】

具体的に、径方向偏光状態の瞳強度分布の形成に際して、空間光変調器2の第1部分領域からの光を1/2波長板52bへ導き、第2部分領域からの光を1/2波長板52aへ導き、第3部分領域からの光を1/2波長板52dへ導き、第4部分領域からの光を1/2波長板52cへ導く。同様に、空間光変調器2の第5部分領域からの光を1/2波長板52hへ導き、第6部分領域からの光を1/2波長板52gへ導き、第7部分領域からの光を1/2波長板52fへ導き、第8部分領域からの光を1/2波長板52eへ導く。

30

【0095】

また、偏光部材5Aを用いる変形例では、空間光変調器2, 4を制御することにより、輪帯状または16極状の瞳強度分布に対して、実質的に非偏光状態の中央極の面光源を追加することもできる。中央極の面光源の形成に際して、空間光変調器4の第1～第8部分領域からの光の一部は、マイクロフライアイレンズ8の直後の照明瞳において光軸AXを含む中央瞳領域で重畳される。その結果、中央極の面光源は、様々な直線偏光成分を含む実質的な非偏光状態になる。

40

【0096】

ところで、偏光部材5Aでは、縦偏光および横偏光を生成する使用頻度の比較的高い1/2波長板52a, 52bに対して比較的大きな入射面積を付与し、45度の斜め偏光を生成する平均的な使用頻度の1/2波長板52c, 52dに対して平均的な入射面積を付与し、その他の使用頻度の比較的低い1/2波長板52e～52hに対して比較的小さな入射面積を付与している。その結果、偏光部材5Aでは光照射による局所的な損傷の発生を抑えることができ、ひいては偏光部材5Aの耐久性の向上を図ることができる。

【0097】

50

また、別の例として、図13に示すように、例えばx方向に沿って厚さが連続的（線形状、曲線状、あるいは階段状）に変化したくさび状の形態を有する波長板53aと、波長板53aと補完的なくさび状の形態を有し波長板53aによる光の偏向作用を補償するための補正板53bとにより偏光部材5Bを構成することもできる。図13の偏光部材5Bを用いる変形例では、例えば輪帯状または複数極状の瞳強度分布における各瞳領域の偏光状態を、所望の直線偏光状態、所望の楕円偏光状態（円偏光状態を含む）、または実質的な非偏光状態に設定することができる。

【0098】

なお、図5の実施形態、図11の変形例、および図13の変形例では、波長板を用いて偏光部材5、5A、5Bを構成している。しかしながら、波長板に限定されることなく、例えば旋光素子を用いて偏光部材を構成することもできる。一例として、図14に示すように、8つの旋光素子54a、54b、54c、54dと1つのデポライザ54eとにより、図5の実施形態にかかる偏光部材5と同じ機能を有する偏光部材5Cを構成することができる。

10

【0099】

旋光素子54a～54dは、平行平板の形態を有し、旋光性を有する光学材料である結晶材料、例えば水晶により形成されている。旋光素子54a～54dの入射面（ひいては射出面）は光軸AXと直交し、その結晶光学軸は光軸AXの方向とほぼ一致（すなわち入射光の進行方向とほぼ一致）している。旋光素子54a～54dは、互いに異なる厚さを有し、ひいては互いに異なる偏光変換特性を有する。具体的に、旋光素子54a～54dは、図5の偏光部材5における1/2波長板51a～51dと同じ偏光変換特性を有する。

20

【0100】

すなわち、旋光素子54aは、x方向直線偏光の光が入射した場合、z方向直線偏光の光を射出するように、光軸方向の厚さが設定されている。旋光素子54bは、x方向直線偏光の光が入射した場合、その偏光方向を変化させることなくx偏光直線偏光の光を射出するように厚さが設定されている。旋光素子54cは、x方向直線偏光の光が入射した場合、+45度斜め方向直線偏光の光を射出するように厚さが設定されている。旋光素子54dは、x方向直線偏光の光が入射した場合、-45度斜め方向直線偏光の光を射出するように厚さが設定されている。

30

【0101】

同様に、図示を省略するが、偏光変換特性の互いに異なる8つの旋光素子を用いて、図11の変形例にかかる偏光部材5Aと同じ機能を有する偏光部材を構成することができる。また、図15に示すように、図13の偏光部材5Bにおける波長板53aを、例えば同じ形態の旋光素子55aで置換することにより偏光部材5Dを構成することができる。図15に示す偏光部材5Dを用いる変形例では、例えば輪帯状または複数極状の瞳強度分布における各瞳領域の偏光状態を、所望の直線偏光状態または実質的な非偏光状態に設定することができる。

【0102】

一般に、偏光部材は、照明光学系の光軸を横切る面内の第1領域を通過する第1光束に、第1領域とは異なる第2領域を通過する第2光束とは異なる偏光状態の変化を与えることが重要である。したがって、偏光部材では、偏光変換特性の互いに異なる複数のくさび状の波長板を光路中に並列的に配置しても良いし、偏光変換特性の互いに異なる複数のくさび状の旋光素子を光路中に並列的に配置しても良い。波長板と旋光素子とを混在させて偏光部材を構成しても良い。上述の各種の偏光部材から選択された複数種類の偏光部材を光路に沿って直列的に配置しても良い。各偏光部材を光路中に固定的に配置しても良いし、各偏光部材を移動可能または回転可能に構成しても良いし、各偏光部材を交換可能に構成しても良い。

40

【0103】

なお、上述の説明では、瞳形成用の空間光変調器4の配列面は、偏光仕分け用の空間光

50

変調器 2 の配列面と光学的に共役な位置またはその近傍に配置されている。偏光部材 5 は、再結像光学系 3 の瞳位置またはその近傍、すなわち偏光仕分け用の空間光変調器 2 の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある位置またはその近傍に配置されている。しかしながら、これに限定されることなく、瞳形成用の空間光変調器の配列面を、偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と光学的に共役な空間、または偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある空間に配置することができる。再結像光学系の瞳空間に偏光部材を配置することができる。偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある空間に、偏光部材を配置することができる。

【 0 1 0 4 】

偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と「光学的に共役な空間」とは、偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と光学的に共役な共役位置の前側に隣接するパワーを有する光学素子と当該共役位置の後側に隣接するパワーを有する光学素子との間の空間である。再結像光学系の「瞳空間」とは、再結像光学系の瞳位置の前側に隣接するパワーを有する光学素子と当該瞳位置の後側に隣接するパワーを有する光学素子との間の空間である。

10

【 0 1 0 5 】

偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と「光学的にフーリエ変換の関係にある空間」とは、偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にあるフーリエ変換面の前側に隣接するパワーを有する光学素子と当該フーリエ変換面の後側に隣接するパワーを有する光学素子との間の空間である。「光学的に共役な空間」、「瞳空間」および「光学的にフーリエ変換の関係にある空間」内には、パワーを持たない平行平板や平面鏡が存在していても良い。

20

【 0 1 0 6 】

したがって、偏光仕分け用の空間光変調器と偏光部材と瞳形成用の空間光変調器との配置関係について、様々な変形例が可能である。一例として、偏光仕分け用の空間光変調器よりも被照射面側において偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある空間に、偏光部材および瞳形成用の空間光変調器を配置する構成も可能である。

【 0 1 0 7 】

具体的に、図 1 6 に示す変形例では、偏光仕分け用の空間光変調器 2 よりもマスク側（被照射面側）の光路中に、空間光変調器 2 の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある位置を形成するリレー光学系 3 c が配置されている。リレー光学系 3 c と瞳形成用の空間光変調器 4 との間の光路中に、偏光部材 5（5 A ~ 5 D）が配置されている。空間光変調器 4 の配列面は、リレー光学系 3 c によって形成される空間光変調器 2 の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある位置またはその近傍に設定されている。

30

【 0 1 0 8 】

図 1 6 では、偏光仕分け用の空間光変調器 2 からマイクロフライアイレンズ 8 までの光路を示しているが、それ以外の構成は図 1 と同様である。別の表現をすれば、図 1 6 における空間光変調器 2 と 4 との間の構成だけが、図 1 の構成と異なっている。図 1 6 の構成においても図 1 の構成と同様に、リレー光学系 6 および 7 は、空間光変調器 4 の複数のミラー要素 4 a がそのファーストフィールドに形成するファーストフィールドパターンを、マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳と共役な位置（マイクロフライアイレンズ 8 の入射面またはその近傍）に結像させる分布形成光学系を構成している。

40

【 0 1 0 9 】

図 1 6 の変形例では、リレー光学系 3 c が、空間光変調器 2 の複数のミラー要素 2 a が射出光に与える角度を、空間光変調器 2 のファーストフィールドである偏光部材 5（5 A ~ 5 D）の入射面上での位置、および空間光変調器 4 の配列面（複数のミラー要素 4 a の入射面）上での位置に変換する。その結果、図 1 6 の変形例においても、偏光仕分け用の空間光変調器 2 と偏光部材 5（5 A ~ 5 D）と瞳形成用の空間光変調器 4 との協働作用により、所望の形状および偏光状態を有する瞳強度分布を形成することができる。

【 0 1 1 0 】

50

また、別の例として、偏光仕分け用の空間光変調器よりも光源側において偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある空間に瞳形成用の空間光変調器を配置し、偏光仕分け用の空間光変調器よりも被照射面側において偏光仕分け用の空間光変調器の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある空間に偏光部材を配置する構成も可能である。

【 0 1 1 1 】

具体的に、図 1 7 に示す変形例では、瞳形成用の空間光変調器 4 よりもマスク側（被照射面側）の光路中に、空間光変調器 4 の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある位置を形成するリレー光学系 3 d が配置されている。偏光仕分け用の空間光変調器 2 の配列面は、リレー光学系 3 d によって形成される空間光変調器 4 の配列面と光学的にフーリエ変換の関係にある位置またはその近傍に設定されている。空間光変調器 2 とマイクロフライアイレンズ 8 との間の光路中には、一对の結像光学系 1 2 および 1 3 が配置されている。

10

【 0 1 1 2 】

第 1 結像光学系 1 2 は、前側レンズ群 1 2 a と後側レンズ群 1 2 b とからなり、空間光変調器 2 の配列面と光学的に共役な面 1 4 を形成する。第 2 結像光学系 1 3 は、前側レンズ群 1 3 a と後側レンズ群 1 3 b とからなり、共役面 1 4 と光学的に共役な面を、マイクロフライアイレンズ 8 の入射面またはその近傍に形成する。第 1 結像光学系 1 2 の瞳空間、例えば前側レンズ群 1 2 a と後側レンズ群 1 2 b との間の瞳位置またはその近傍に、偏光部材 5（5 A ~ 5 D）が配置されている。

20

【 0 1 1 3 】

図 1 7 では、瞳形成用の空間光変調器 4 からマイクロフライアイレンズ 8 までの光路を示しているが、それ以外の構成は図 1 と同様である。マイクロフライアイレンズ 8 との関係に着目すると、図 1 7 における第 2 結像光学系 1 3 の後側レンズ群 1 3 b は図 1 におけるリレー光学系 7 に対応し、図 1 7 における第 2 結像光学系 1 3 の前側レンズ群 1 3 a および第 1 結像光学系 1 2 の後側レンズ群 1 2 b は図 1 におけるリレー光学系 6 の後側レンズ群 6 b および前側レンズ群 6 a に対応し、図 1 7 における瞳面 6 c は共役面 1 4 に対応している。

【 0 1 1 4 】

図 1 7 の構成において、リレー光学系 3 d、第 1 結像光学系 1 2 および第 2 結像光学系 1 3 は、空間光変調器 4 の複数のミラー要素 4 a がそのファーストフィールドに形成するファーストフィールドパターンを、マイクロフライアイレンズ 8 の直後の照明瞳と共役な位置（マイクロフライアイレンズ 8 の入射面またはその近傍）に結像させる分布形成光学系を構成している。

30

【 0 1 1 5 】

図 1 7 の変形例では、第 1 結像光学系 1 2 の前側レンズ群 1 2 a が、空間光変調器 2 の複数のミラー要素 2 a が射出光に与える角度を、空間光変調器 2 のファーストフィールドである偏光部材 5（5 A ~ 5 D）の入射面上での位置に変換する。また、リレー光学系 3 d が、空間光変調器 4 の複数のミラー要素 4 a が射出光に与える角度を、空間光変調器 4 のファーストフィールドである空間光変調器 2 の配列面（複数のミラー要素 2 a の入射面）上での位置に変換する。その結果、図 1 7 の変形例においても、偏光仕分け用の空間光変調器 2 と偏光部材 5（5 A ~ 5 D）と瞳形成用の空間光変調器 4 との協働作用により、所望の形状および偏光状態を有する瞳強度分布を形成することができる。

40

【 0 1 1 6 】

上述の実施形態では、二次元的に配列されて個別に制御される複数のミラー要素を有する空間光変調器 2, 4 として、二次元的に配列された複数の反射面の向き（角度：傾き）を個別に制御可能な空間光変調器を用いている。しかしながら、これに限定されことなく、たとえば二次元的に配列された複数の反射面の高さ（位置）を個別に制御可能な空間光変調器を用いることもできる。このような空間光変調器としては、たとえば米国特許第 5, 312, 513 号公報、並びに米国特許第 6, 885, 493 号公報の図 1 d に開示される空間光変調器を用いることができる。これらの空間光変調器では、二次元的な高さ

50

分布を形成することで回折面と同様の作用を入射光に与えることができる。なお、上述した二次元的に配列された複数の反射面を持つ空間光変調器を、たとえば米国特許第6,891,655号公報や、米国特許公開第2005/0095749号公報の開示に従って変形しても良い。

【0117】

上述の実施形態では、空間光変調器2,4が所定面内で二次元的に配列された複数のミラー要素2a,4aを備えているが、これに限定されることなく、所定面内に配列されて個別に制御される複数の透過光学要素を備えた透過型の空間光変調器を用いることもできる。

【0118】

また、上述の実施形態では、瞳形成用の空間光変調器として1つの空間光変調器を用いたが、複数の瞳形成用の空間光変調器を用いることも可能である。複数の瞳形成用の空間光変調器を用いた露光装置向けの照明光学系として、例えば米国特許出願公開第2009/0109417号明細書および米国特許出願公開第2009/0128886号明細書に開示される照明光学系を採用することができる。

【0119】

上述の実施形態では、マスクの代わりに、所定の電子データに基づいて所定パターンを形成する可変パターン形成装置を用いることができる。なお、可変パターン形成装置としては、たとえば所定の電子データに基づいて駆動される複数の反射素子を含む空間光変調素子を用いることができる。空間光変調素子を用いた露光装置は、たとえば米国特許公開第2007/0296936号公報に開示されている。また、上述のような非発光型の反射型空間光変調器以外に、透過型空間光変調器を用いても良く、自発光型の画像表示素子を用いても良い。

【0120】

上述の実施形態の露光装置は、本願特許請求の範囲に挙げられた各構成要素を含む各種サブシステムを、所定の機械的精度、電気的精度、光学的精度を保つように、組み立てることで製造される。これら各種精度を確保するために、この組み立ての前後には、各種光学系については光学的精度を達成するための調整、各種機械系については機械的精度を達成するための調整、各種電気系については電気的精度を達成するための調整が行われる。各種サブシステムから露光装置への組み立て工程は、各種サブシステム相互の、機械的接続、電気回路の配線接続、気圧回路の配管接続等が含まれる。この各種サブシステムから露光装置への組み立て工程の前に、各サブシステム個々の組み立て工程があることはいうまでもない。各種サブシステムの露光装置への組み立て工程が終了したら、総合調整が行われ、露光装置全体としての各種精度が確保される。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っても良い。

【0121】

次に、上述の実施形態にかかる露光装置を用いたデバイス製造方法について説明する。図18は、半導体デバイスの製造工程を示すフローチャートである。図18に示すように、半導体デバイスの製造工程では、半導体デバイスの基板となるウェハWに金属膜を蒸着し(ステップS40)、この蒸着した金属膜上に感光性材料であるフォトレジストを塗布する(ステップS42)。つづいて、上述の実施形態の投影露光装置を用い、マスク(レチクル)Mに形成されたパターンをウェハW上の各ショット領域に転写し(ステップS44:露光工程)、この転写が終了したウェハWの現像、つまりパターンが転写されたフォトレジストの現像を行う(ステップS46:現像工程)。

【0122】

その後、ステップS46によってウェハWの表面に生成されたレジストパターンをマスクとし、ウェハWの表面に対してエッチング等の加工を行う(ステップS48:加工工程)。ここで、レジストパターンとは、上述の実施形態の投影露光装置によって転写されたパターンに対応する形状の凹凸が生成されたフォトレジスト層であって、その凹部がフォトレジスト層を貫通しているものである。ステップS48では、このレジストパターンを

10

20

30

40

50

介してウェハWの表面の加工を行う。ステップS48で行われる加工には、例えばウェハWの表面のエッチングまたは金属膜等の成膜の少なくとも一方が含まれる。なお、ステップS44では、上述の実施形態の投影露光装置は、フォトレジストが塗布されたウェハWを感光性基板としてパターンの転写を行う。

【0123】

図19は、液晶表示素子等の液晶デバイスの製造工程を示すフローチャートである。図19に示すように、液晶デバイスの製造工程では、パターン形成工程(ステップS50)、カラーフィルタ形成工程(ステップS52)、セル組立工程(ステップS54)およびモジュール組立工程(ステップS56)を順次行う。ステップS50のパターン形成工程では、プレートPとしてフォトレジストが塗布されたガラス基板上に、上述の実施形態の投影露光装置を用いて回路パターンおよび電極パターン等の所定のパターンを形成する。このパターン形成工程には、上述の実施形態の投影露光装置を用いてフォトレジスト層にパターンを転写する露光工程と、パターンが転写されたプレートPの現像、つまりガラス基板上のフォトレジスト層の現像を行い、パターンに対応する形状のフォトレジスト層を生成する現像工程と、この現像されたフォトレジスト層を介してガラス基板の表面を加工する加工工程とが含まれている。

10

【0124】

ステップS52のカラーフィルタ形成工程では、R(Red)、G(Green)、B(Blue)に対応する3つのドットの組をマトリクス状に多数配列するか、またはR、G、Bの3本のストライプのフィルタの組を水平走査方向に複数配列したカラーフィルタを形成する。ステップS54のセル組立工程では、ステップS50によって所定パターンが形成されたガラス基板と、ステップS52によって形成されたカラーフィルタとを用いて液晶パネル(液晶セル)を組み立てる。具体的には、例えばガラス基板とカラーフィルタとの間に液晶を注入することで液晶パネルを形成する。ステップS56のモジュール組立工程では、ステップS54によって組み立てられた液晶パネルに対し、この液晶パネルの表示動作を行わせる電気回路およびバックライト等の各種部品を取り付ける。

20

【0125】

また、本発明は、半導体デバイス製造用の露光装置への適用に限定されることなく、例えば、角型のガラスプレートに形成される液晶表示素子、若しくはプラズマディスプレイ等のディスプレイ装置用の露光装置や、撮像素子(CCD等)、マイクロマシーン、薄膜磁気ヘッド、及びDNAチップ等の各種デバイスを製造するための露光装置にも広く適用できる。更に、本発明は、各種デバイスのマスクパターンが形成されたマスク(フォトマスク、レチクル等)をフォトリソグラフィ工程を用いて製造する際の、露光工程(露光装置)にも適用することができる。

30

【0126】

なお、上述の実施形態では、露光光としてArFエキシマレーザー光(波長:193nm)やKrFエキシマレーザー光(波長:248nm)を用いているが、これに限定されることなく、他の適当なレーザー光源、たとえば波長157nmのレーザー光を供給するF₂レーザー光源、Ar₂レーザー(出力波長126nm)、Kr₂レーザー(出力波長146nm)などのパルスレーザー光源、g線(波長436nm)、YAGレーザーの高調波発生装置や、i線(波長365nm)などの輝線を発する超高圧水銀ランプなどに対して本発明を適用することもできる。

40

【0127】

また、例えば米国特許第7,023,610号明細書に開示されているように、真空紫外光としてDFB半導体レーザー又はファイバーレーザーから発振される赤外域、又は可視域の単一波長レーザー光を、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)がドーピング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。

【0128】

また、上述の実施形態において、投影光学系と感光性基板との間の光路中を1.1より

50

も大きな屈折率を有する媒体（典型的には液体）で満たす手法、所謂液浸法を適用しても良い。この場合、投影光学系と感光性基板との間の光路中に液体を満たす手法としては、国際公開第W099/49504号パンフレットに開示されているような局所的に液体を満たす手法や、特開平6-124873号公報に開示されているような露光対象の基板を保持したステージを液槽の中で移動させる手法や、特開平10-303114号公報に開示されているようなステージ上に所定深さの液体槽を形成し、その中に基板を保持する手法などを採用することができる。また、これに限らず、例えば欧州特許出願公開第1420298号明細書、国際公開第2004/055803号、米国特許第6,952,253号明細書などに開示される手法も適用することができる。ここでは、国際公開第W099/49504号パンフレット、特開平6-124873号公報、特開平10-303114号公報、欧州特許出願公開第1420298号、国際公開第2004/055803号および米国特許第6,952,253号の教示を参照として援用する。

10

【0129】

また、上述の実施形態において、露光装置の投影光学系は縮小系のみならず等倍及び拡大系のいずれでも良いし、投影光学系は屈折系のみならず、反射系及び反射屈折系のいずれでも良いし、この投影像は倒立像及び正立像のいずれでも良い。

【0130】

また、例えば国際公開第2001/035168号に開示されているように、干渉縞をウェハW上に形成することによって、ウェハW上にライン・アンド・スペースパターンを形成する露光装置（リソグラフィシステム）に適用することができる。

20

【0131】

さらに、例えば米国特許第6,611,316号明細書に開示されているように、2つのレチクルパターンを、投影光学系を介してウェハ上で合成し、1回のスキャン露光によってウェハ上の1つのショット領域をほぼ同時に二重露光する露光装置に適用することができる。

【0132】

なお、上記実施形態でパターンを形成すべき物体（エネルギービームが照射される露光対象の物体）はウェハに限られるものでなく、ガラスプレート、セラミック基板、フィルム部材、あるいはマスクブランクスなど他の物体でも良い。

【0133】

また、上述の実施形態では、露光装置においてマスク（またはウェハ）を照明する照明光学系に対して本発明を適用しているが、これに限定されることなく、マスク（またはウェハ）以外の被照射面を照明する一般的な照明光学系に対して本発明を適用することもできる。

30

【0134】

「35U.S.C. § 112」を満足するために必要とされる詳細において本特許出願において説明しかつ例示した「表題」の実施形態の特定の態様は、上述の実施形態の態様のあらゆる上述の目的、及び上述の実施形態の態様により又はその目的のあらゆる他の理由で又はその目的のために解決すべき問題を完全に達成することができるが、請求した内容の上述の実施形態のここで説明した態様は、請求した内容によって広く考察された内容を単に例示しかつ代表することは、当業者によって理解されるものとする。実施形態のここで説明しかつ主張する態様の範囲は、本明細書の教示内容に基づいて当業者に現在明らかであると考えられるか又は明らかになると考えられる他の実施形態を漏れなく包含するものである。本発明の「表題」の範囲は、単独にかつ完全に特許請求の範囲によってのみ限定され、いかなるものも特許請求の範囲の詳細説明を超えるものではない。単数形でのこのような請求項における要素への言及は、解釈において、明示的に説明していない限り、このような要素が「1つ及び1つのみ」であることを意味するように意図しておらず、かつ意味しないものとし、「1つ又はそれよりも多い」を意味する意図とし、かつ意味するものとする。当業者に公知か又は後で公知になる実施形態の上述の態様の要素のいずれかに対する全ての構造的及び機能的均等物は、引用により本明細書に明示的に組み込まれ

40

50

ると共に、特許請求の範囲によって包含されるように意図されている。本明細書及び／又は本出願の請求項に使用され、かつ本明細書及び／又は本出願の請求項に明示的に意味を与えられたあらゆる用語は、このような用語に関するあらゆる辞書上の意味又は他の一般的に使用される意味によらず、その意味を有するものとする。実施形態のいずれかの態様として本明細書で説明した装置又は方法は、それが特許請求の範囲によって包含されるように本出願において開示する実施形態の態様によって解決するように求められる各及び全て問題に対処することを意図しておらず、また必要でもない。本発明の開示内容におけるいかなる要素、構成要素、又は方法段階も、その要素、構成要素、又は方法段階が特許請求の範囲において明示的に詳細に説明されているか否かに関係なく、一般大衆に捧げられることを意図したものではない。特許請求の範囲におけるいかなる請求項の要素も、その要素が「～のための手段」という語句を使用して明示的に列挙されるか又は方法の請求項の場合にはその要素が「作用」ではなく「段階」として列挙されていない限り、「35 U.S.C. § 112」第6項の規定に基づいて解釈されないものとする。

10

【0135】

米国の特許法の準拠において、本出願人は、本出願の明細書に添付されたあらゆるそれぞれの請求項、一部の 경우에는 1つの請求項だけにおいて説明した各発明の少なくとも1つの権能付与的かつ作用する実施形態を開示したことが当業者によって理解されるであろう。本出願人は、開示内容の実施形態の態様／特徴／要素、開示内容の実施形態の作用、又は開示内容の実施形態の機能を定義し、及び／又は開示内容の実施形態の態様／特徴／要素のあらゆる他の定義を説明する際に、随時又は本出願を通して、定義的な動詞（例えば、「is」、「are」、「does」、「has」、又は「include」など）、及び／又は他の定義的な動詞（例えば、「生成する」、「引き起こす」、「サンプリングする」、「読み取る」、又は「知らせる」など）、及び／又は動名詞（例えば、「生成すること」、「使用すること」、「取ること」、「保つこと」、「製造すること」、「判断すること」、「測定すること」、又は「計算すること」など）を使用した。あらゆるこのような定義的語又は語句などが、本明細書で開示する1つ又はそれよりも多くの実施形態のいずれかの態様／特徴／要素、すなわち、あらゆる特徴、要素、システム、サブシステム、処理、又はアルゴリズムの段階、特定の材料などを説明するのに使用されている場合は、常に、本出願人が発明しかつ請求したものに關する本発明の範囲を解釈するために、以下の制限的語句、すなわち、「例示的に」、「例えば」、「一例として」、「例示的に単に」、「例示的にのみ」などの1つ又はそれよりも多く又は全てが先行し、及び／又は語句「することができる」、「する可能性がある」、「かもしれない」、及び「することができるであろう」などのいずれかが1つ又はそれよりも多く又は全てを含むと読むべきである。全てのこのような特徴、要素、段階、及び材料などは、たとえ特許法の要件の準拠において本出願人が特許請求した内容の実施形態又はいずれかの実施形態のあらゆるそのような態様／特徴／要素の単一の権能付与的な実施例だけを開示したとしても、1つ又はそれよりも多くの開示した実施形態の単に可能な態様として説明されており、いずれかの実施形態のいずれかが1つ又はそれよりも多くの態様／特徴／要素の唯一の可能な実施、及び／又は特許請求した内容の唯一の可能な実施形態として説明していないと考えるべきである。本出願又は本出願の実施において、特許請求の範囲のあらゆる開示する実施形態又はあらゆる特定の本発明の開示する実施形態の特定の態様／特徴／要素が、特許請求の範囲の内容又はあらゆるそのような特許請求の範囲に説明されるあらゆる態様／特徴／要素を実行する1つ及び唯一の方法になると本出願人が考えていることを明示的かつ具体的に特に示さない限り、本出願人は、本特許出願の特許請求の範囲の内容のあらゆる開示する実施形態のあらゆる開示した態様／特徴／要素又は実施形態全体のあらゆる説明が、特許請求の範囲の内容又はそのあらゆる態様／特徴／要素を実行するそのような1つ及び唯一の方法であり、従って、特許請求の範囲の内容の他の可能な実施例と共にあらゆるそのような開示した実施例を包含するのに十分に広範囲にわたるものであるあらゆる特許請求の範囲をこのような開示した実施形態のそのような態様／特徴／要素又はそのような開示した実施形態に限定するように解釈されることを意図していない。本出願人は、1つ又は複数の親請求項

20

30

40

50

に説明した特許請求の範囲の内容又は直接又は間接的に従属する請求項のあらゆる態様／特徴／要素、段階のようなあらゆる詳細と共にいずれかの請求項に従属する従属請求項を有するあらゆる請求項は、親請求項の説明事項が、他の実施例と共に従属請求項内に更なる詳細を包含するのに十分に広範囲にわたるものであること、及び更なる詳細が、あらゆるこのような親請求項で請求する態様／特徴／要素を実行し、従って従属請求項の更なる詳細を親請求項に取り込むことによって含むあらゆるこのような親請求項のより幅広い態様／特徴／要素の範囲をいかなる点においても制限するいずれかの従属請求項に説明されるいずれかのこのような態様／特徴／要素の更なる詳細に限られる唯一の方法ではないことを意味するように解釈されるべきであることを具体的、明示的、かつ明解に意図するものである。

10

【符号の説明】

【 0 1 3 6 】

L S 光源

1 ビーム送光部

2 , 4 空間光変調器

3 再結像光学系

5 , 5 A ~ 5 D 偏光部材

5 1 a ~ 5 1 d 1 / 2 波長板

5 1 e デポラライザ

6 , 7 リレー光学系

8 マイクロフライアイレンズ

9 コンデンサー光学系

1 0 マスクブラインド

1 1 結像光学系

D T r , D T w 瞳強度分布計測部

C R 制御系

M マスク

M S マスクステージ

P L 投影光学系

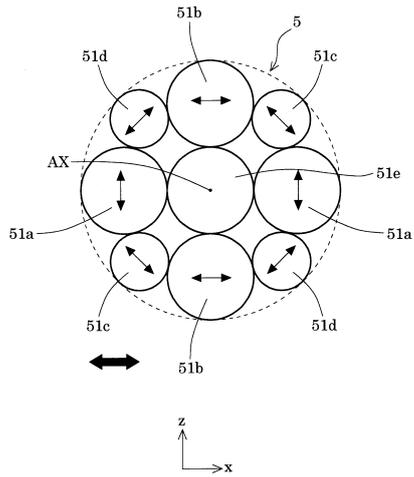
W ウェハ

W S ウェハステージ

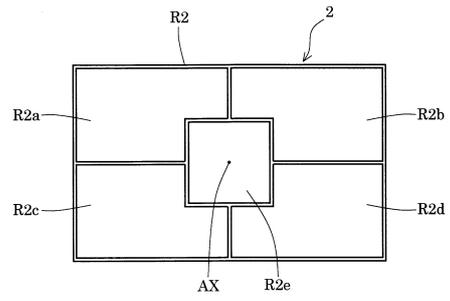
20

30

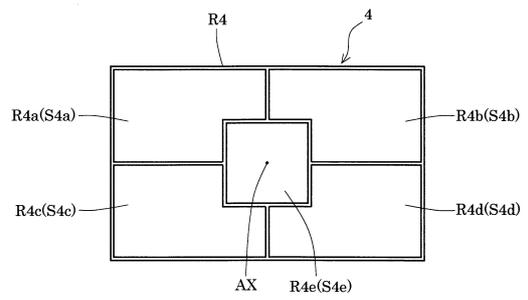
【 図 5 】



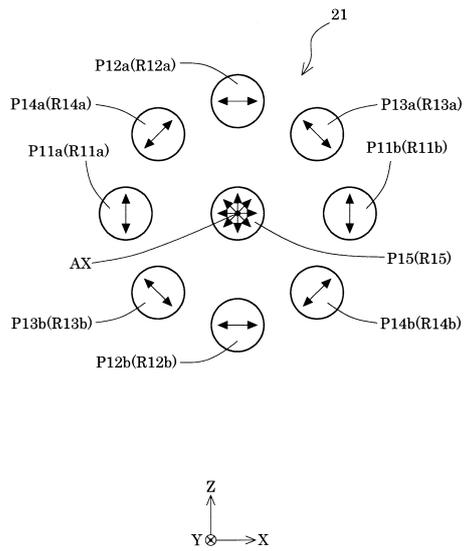
【 図 6 】



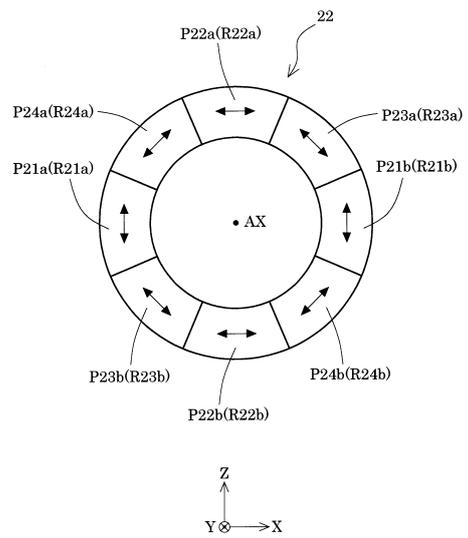
【 図 7 】



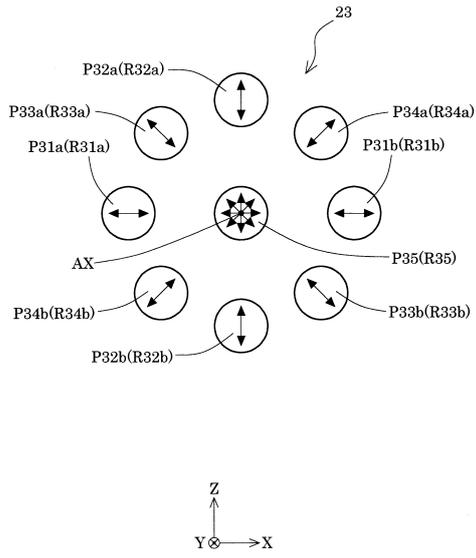
【 図 8 】



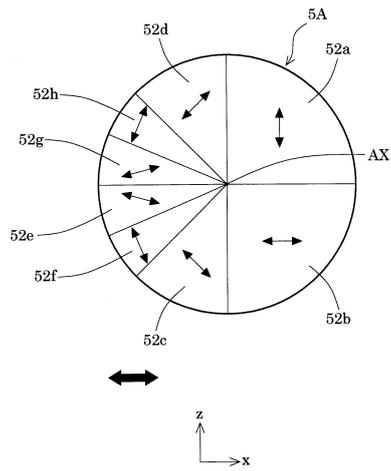
【 図 9 】



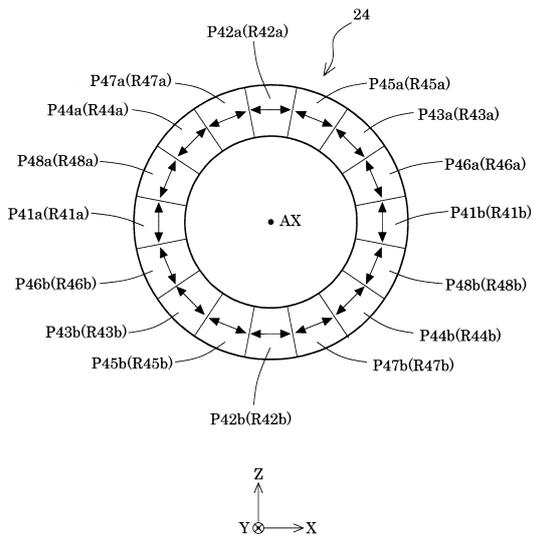
【 図 1 0 】



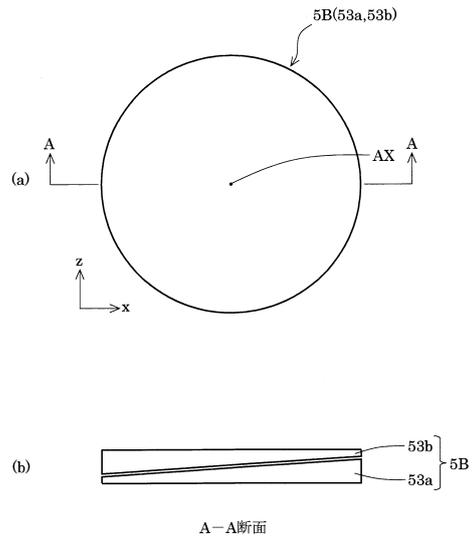
【 図 1 1 】



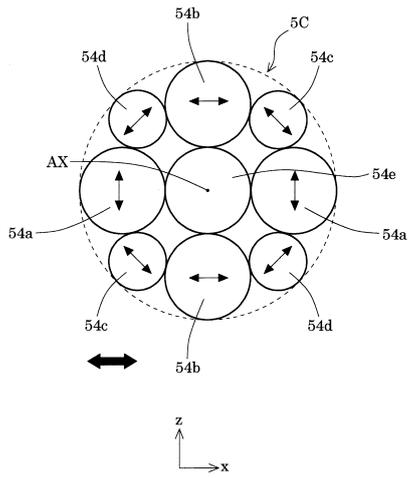
【 図 1 2 】



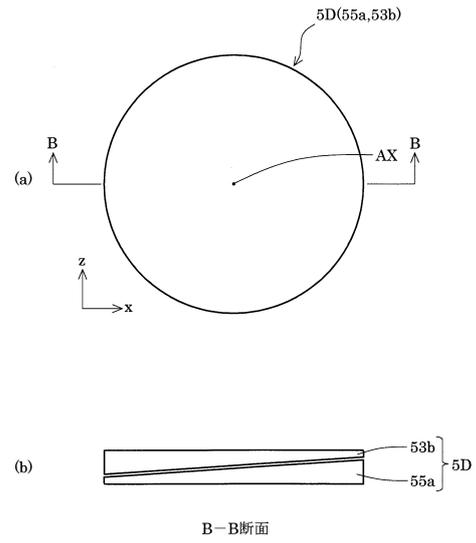
【 図 1 3 】



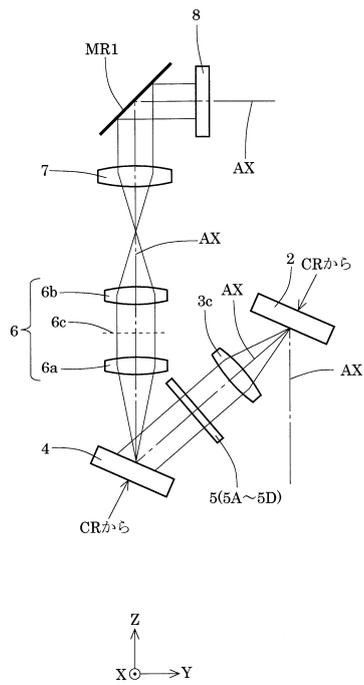
【図14】



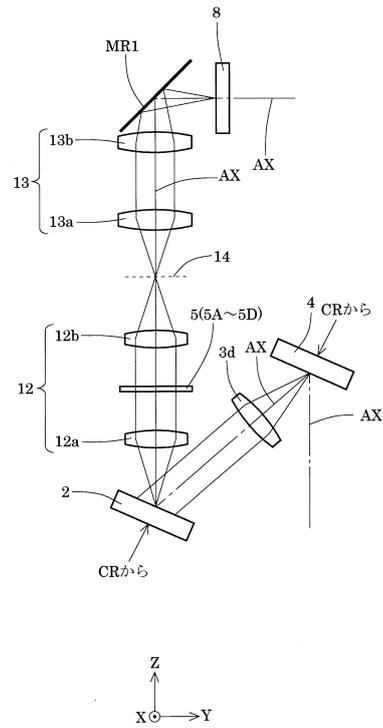
【図15】



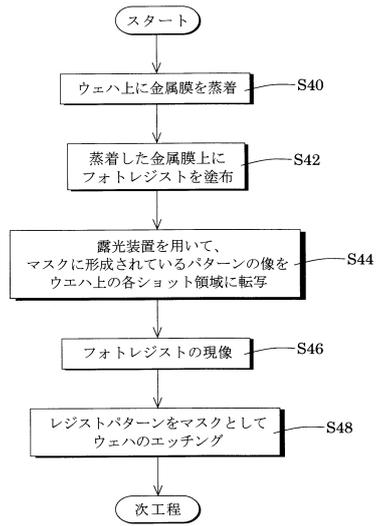
【図16】



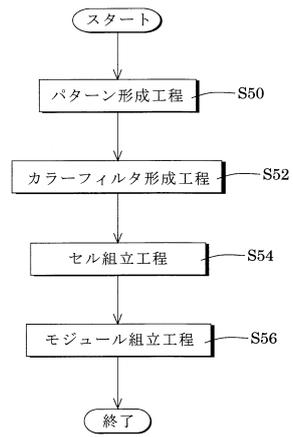
【図17】



【図18】



【図19】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特表2013-530526(JP,A)
国際公開第2011/147658(WO,A1)
特開2010-087389(JP,A)
特開2010-272640(JP,A)
特開2011-114041(JP,A)
特開2009-105396(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/027
G03F 7/00-7/24