

(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2004-198748
(P2004-198748A)

(43) 公開日 平成16年7月15日(2004.7.15)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
GO2B 19/00	GO2B 19/00	2H052
GO3F 7/20	GO3F 7/20 521	5F046
HO1L 21/027	HO1L 21/30 515D	

審査請求 未請求 請求項の数 18 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2002-367424 (P2002-367424)	(71) 出願人	000004112 株式会社ニコン 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号
(22) 出願日	平成14年12月19日 (2002.12.19)	(74) 代理人	100095256 弁理士 山口 孝雄
		(72) 発明者	豊田 光紀 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内
		Fターム(参考)	2H052 BA02 BA07 BA09 BA12 5F046 BA04 CB13

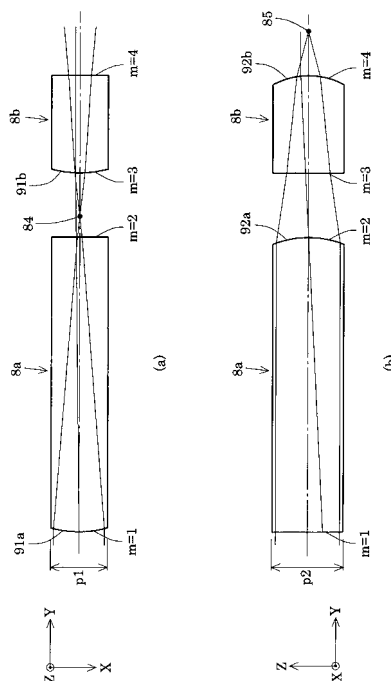
(54) 【発明の名称】 オプティカルインテグレータ、照明光学装置、露光装置および露光方法

(57) 【要約】

【課題】たとえばエッチング加工により一体的に形成される多数の微小屈折面の製造誤差が照度分布に与える影響を小さく抑える特性を有するオプティカルインテグレータ。

【解決手段】光の入射側から順に、一体的に形成された複数の第1微小光学面を有する第1光学部材(8a)と、複数の第1微小光学面と光学的に対応するように一体的に形成された複数の第2微小光学面を有する第2光学部材(8b)とを備えた波面分割型のオプティカルインテグレータ。第1光学部材と第2光学部材との合成系は、第2光学部材の射出面よりも所定距離だけ後側にZ方向に関する後側焦点(85)を有する。第1光学部材は、第1光学部材の射出面と第2光学部材の入射面との間の光路中にX方向に関する後側焦点(84)を有する。

【選択図】 図5



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光の入射側から順に、一体的に形成された複数の第 1 微小光学面を有する第 1 光学部材と、前記複数の第 1 微小光学面と光学的に対応するように一体的に形成された複数の第 2 微小光学面を有する第 2 光学部材とを備えた波面分割型のオプティカルインテグレータにおいて、

前記第 1 光学部材と前記第 2 光学部材との合成系は、前記第 2 光学部材の射出面よりも所定距離だけ後側に第 1 方向に関する後側焦点を有し、

前記第 1 光学部材は、前記第 1 光学部材の射出面と前記第 2 光学部材の入射面との間の光路中に前記第 1 方向とは異なる第 2 方向に関する後側焦点を有し、

前記第 1 方向および前記第 2 方向は、前記第 1 光学部材と前記第 2 光学部材との合成系の光軸に垂直な面内方向に設定されていることを特徴とするオプティカルインテグレータ。

10

【請求項 2】

前記第 1 光学部材は、前記第 1 光学部材の射出面と前記第 2 光学部材の入射面との中間面と前記第 1 光学部材の射出面との間の光路中に前記第 2 方向に関する後側焦点を有することを特徴とする請求項 1 に記載のオプティカルインテグレータ。

【請求項 3】

前記第 1 光学部材の射出面におけるエネルギー密度と前記第 2 光学部材の入射面におけるエネルギー密度とがほぼ同じに設定されていることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載のオプティカルインテグレータ。

20

【請求項 4】

前記第 1 方向に関する前記第 1 光学部材の屈折力 n_1 と前記第 1 方向に関する前記第 2 光学部材の屈折力 n_2 との屈折力比 $R_1 = n_1 / n_2$ と、前記第 2 方向に関する前記第 1 光学部材の屈折力 n_1' と前記第 2 方向に関する前記第 2 光学部材の屈折力 n_2' との屈折力比 $R_2 = n_1' / n_2'$ とは、

$$| (R_1 - 1)^3 | < 0.1$$

$$| (R_2 - 1)^3 | < 0.1$$

の条件を満足することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載のオプティカルインテグレータ。

【請求項 5】

前記第 1 方向と前記第 2 方向とがほぼ直交することを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載のオプティカルインテグレータ。

30

【請求項 6】

各微小光学面は、一方向にのみ曲率を有する曲面状に形成されていることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載のオプティカルインテグレータ。

【請求項 7】

前記第 1 光学部材を形成する光学材料の屈折率よりも前記第 2 光学部材を形成する光学材料の屈折率の方が大きく設定されていることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載のオプティカルインテグレータ。

【請求項 8】

前記第 1 光学部材を形成する光学材料の屈折率を n_a とし、前記第 2 光学部材を形成する光学材料の屈折率を n_b とするとき、

$$0.05 < n_b - n_a$$

の条件を満足することを特徴とする請求項 7 に記載のオプティカルインテグレータ。

40

【請求項 9】

前記第 1 光学部材および前記第 2 光学部材は、前記第 1 方向に関する屈折力と前記第 2 方向に関する屈折力とをそれぞれ有することを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか 1 項に記載のオプティカルインテグレータ。

【請求項 10】

300nm 以下の波長を有する光に対して用いられ、

50

前記第 1 光学部材を形成する光学材料は、石英ガラスまたは蛍石を含み、

前記第 2 光学部材を形成する光学材料は、酸化マグネシウム、ルビー、サファイア、結晶水晶、および石英ガラスのうちのいずれか 1 つの材料を含むことを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項に記載のオプティカルインテグレータ。

【請求項 1 1】

被照射面を照明する照明光学装置において、

請求項 1 乃至 1 0 のいずれか 1 項に記載のオプティカルインテグレータを備えていることを特徴とする照明光学装置。

【請求項 1 2】

前記オプティカルインテグレータと前記被照射面との間の光路中に配置されて、前記オプティカルインテグレータからの光を前記被照射面へ導くための導光光学系を備え、

前記第 1 方向に関する後側焦点と前記第 2 方向に関する後側焦点との軸上距離は、前記導光光学系の焦点距離の 5 % 以下であることを特徴とする請求項 1 1 に記載の照明光学装置。

【請求項 1 3】

請求項 1 1 または 1 2 に記載の照明光学装置と、前記被照射面に配置されたマスクのパターンを感光性基板に投影露光するための投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置。

【請求項 1 4】

前記照明光学装置は前記マスク上に矩形形状の照明領域を形成し、

前記矩形形状の照明領域の長辺方向は前記第 1 方向に光学的に対応し、前記矩形形状の照明領域の短辺方向は前記第 2 方向に光学的に対応することを特徴とする請求項 1 3 に記載の露光装置。

【請求項 1 5】

前記矩形形状の照明領域の短辺方向に沿って前記マスクおよび前記感光性基板を前記投影光学系に対して相対移動させることにより、前記マスクのパターンを前記感光性基板に投影露光することを特徴とする請求項 1 4 に記載の露光装置。

【請求項 1 6】

請求項 1 1 または 1 2 に記載の照明光学装置を介してマスクを照明し、照明された前記マスクに形成されたパターンの像を感光性基板上に投影露光することを特徴とする露光方法。

【請求項 1 7】

前記第 1 方向に光学的に対応する方向に沿って長辺を有し且つ前記第 2 方向に光学的に対応する方向に沿って短辺を有する矩形形状の照明領域を前記マスク上に形成することを特徴とする請求項 1 6 に記載の露光方法。

【請求項 1 8】

前記矩形形状の照明領域の短辺方向に沿って前記マスクおよび前記感光性基板を前記投影光学系に対して相対移動させることにより、前記マスクのパターンを前記感光性基板に投影露光することを特徴とする請求項 1 7 に記載の露光方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、オプティカルインテグレータ、照明光学装置、露光装置および露光方法に関し、特に半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等のマイクロデバイスをリソグラフィ工程で製造するための露光装置に好適な照明光学装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

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束がフライアイレンズに入射し、その後側焦点面に多数の光源からなる二次光源を形成する。二次光源からの光束は、フライアイレンズの後側焦点面の近傍に配置された開口絞りを介して制限された後、コ

10

20

30

40

50

ンデンサーレンズに入射する。開口絞りは、所望の照明条件（露光条件）に応じて、二次光源の形状または大きさを所望の形状または大きさに制限する。

【0003】

コンデンサーレンズにより集光された光束は、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。マスクのパターンを透過した光は、投影光学系を介してウェハ上に結像する。こうして、ウェハ上には、マスクパターンが投影露光（転写）される。なお、マスクに形成されたパターンは高集積化されており、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。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】

上述の構成を有する露光装置では、照度分布の均一性を高めるために、フライアイレンズを構成する微小レンズ要素の数をできるだけ多く設定することが必要である。また、開口絞りにおける光量損失を避けるために、所望の形状に近い形状を有する二次光源を形成することが必要である。このため、たとえばフライアイレンズを構成する微小レンズ要素のサイズを非常に小さく設定すること、すなわちマイクロフライアイレンズを用いることが考えられる。

【0005】

ここで、フライアイレンズは多数のレンズエレメントを縦横に且つ稠密に配列することにより構成されるのに対し、マイクロフライアイレンズは多数の微小屈折面を一体的に形成することにより構成される。すなわち、フライアイレンズは、単品で研磨した多数のレンズエレメントを組み合わせて稠密配列することにより構成されるのに対し、マイクロフライアイレンズは、たとえば平行平面ガラス板にMEMS技術（リソグラフィ＋エッチング等）を応用して多数の微小屈折面を形成することによって構成される。

【0006】

したがって、フライアイレンズの製造では、研磨加工したレンズエレメントの屈折面形状を検査し、規格を満たすレンズエレメントを選別し、高精度に形成された屈折面を有するレンズエレメントのみを用いて組み上げることができる。しかしながら、マイクロフライアイレンズでは、研磨加工に比して良質な面形状を得ることが難しいエッチング加工によりすべての微小屈折面を同時に製造することが求められるので、フライアイレンズに比して良品率がかなり低くなる。

【0007】

本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、たとえばエッチング加工により一体的に形成される多数の微小屈折面の製造誤差が照度分布に与える影響を小さく抑える特性を有するオプティカルインテグレータを提供することを目的とする。また、本発明は、微小屈折面の製造誤差が照度分布に与える影響が小さく抑えられたオプティカルインテグレータを用いて、所望の照明条件で被照射面を照明することのできる高性能な照明光学装置を提供することを目的とする。また、本発明は、所望の照明条件で被照射面を照明することのできる高性能な照明光学装置を用いて、良好な照明条件の下で良好な投影露光を行うことのできる露光装置および露光方法を提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】

前記課題を解決するために、本発明の第1形態では、光の入射側から順に、一体的に形成された複数の第1微小光学面を有する第1光学部材と、前記複数の第1微小光学面と光学的に対応するように一体的に形成された複数の第2微小光学面を有する第2光学部材とを備えた波面分割型のオプティカルインテグレータにおいて、

前記第1光学部材と前記第2光学部材との合成系は、前記第2光学部材の射出面よりも所定距離だけ後側に第1方向に関する後側焦点を有し、

前記第1光学部材は、前記第1光学部材の射出面と前記第2光学部材の入射面との間の光路中に前記第1方向とは異なる第2方向に関する後側焦点を有し、

前記第1方向および前記第2方向は、前記第1光学部材と前記第2光学部材との合成系の

10

20

30

40

50

光軸に垂直な面内方向に設定されていることを特徴とするオプティカルインテグレータを提供する。

【0009】

第1形態の好ましい態様によれば、前記第1光学部材は、前記第1光学部材の射出面と前記第2光学部材の入射面との中間面と前記第1光学部材の射出面との間の光路中に前記第2方向に関する後側焦点を有する。また、第1形態では、前記第1光学部材の射出面におけるエネルギー密度と前記第2光学部材の入射面におけるエネルギー密度とがほぼ同じに設定されていることが好ましい。

【0010】

また、第1形態の好ましい態様によれば、前記第1方向に関する前記第1光学部材の屈折力 n_{11} と前記第1方向に関する前記第2光学部材の屈折力 n_{12} との屈折力比 $r_1 = n_{11} / n_{12}$ と、前記第2方向に関する前記第1光学部材の屈折力 n_{21} と前記第2方向に関する前記第2光学部材の屈折力 n_{22} との屈折力比 $r_2 = n_{21} / n_{22}$ とは、 $| (r_1 - 1)^3 | < 0.1$, $| (r_2 - 1)^3 | < 0.1$ の条件を満足する。また、第1形態では、前記第1方向と前記第2方向とがほぼ直交することが好ましい。さらに、第1形態では、各微小光学面は、一方向にのみ曲率を有する曲面状に形成されていることが好ましい。

【0011】

さらに、第1形態の好ましい態様によれば、前記第1光学部材を形成する光学材料の屈折率よりも前記第2光学部材を形成する光学材料の屈折率の方が大きく設定されている。この場合、前記第1光学部材を形成する光学材料の屈折率を n_a とし、前記第2光学部材を形成する光学材料の屈折率を n_b とするとき、 $0.05 < n_b - n_a$ の条件を満足することが好ましい。また、第1形態では、300nm以下の波長を有する光に対して用いられ、前記第1光学部材を形成する光学材料は、石英ガラスまたは蛍石を含み、前記第2光学部材を形成する光学材料は、酸化マグネシウム、ルビー、サファイア、結晶水晶、および石英ガラスのうちのいずれか1つの材料を含むことが好ましい。また、第1形態の好ましい態様によれば、前記第1光学部材および前記第2光学部材は、前記第1方向に関する屈折力と前記第2方向に関する屈折力とをそれぞれ有する。

【0012】

本発明の第2形態では、被照射面を照明する照明光学装置において、第1形態のオプティカルインテグレータを備えていることを特徴とする照明光学装置を提供する。

【0013】

第2形態の好ましい態様によれば、前記オプティカルインテグレータと前記被照射面との間の光路中に配置されて、前記オプティカルインテグレータからの光を前記被照射面へ導くための導光光学系を備え、前記第1方向に関する後側焦点と前記第2方向に関する後側焦点との軸上距離は、前記導光光学系の焦点距離の5%以下である。

【0014】

本発明の第3形態では、第2形態の照明光学装置と、前記被照射面に配置されたマスクのパターンを感光性基板に投影露光するための投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置を提供する。

【0015】

第3形態の好ましい態様によれば、前記照明光学装置は前記マスク上に矩形の照明領域を形成し、前記矩形の照明領域の長辺方向は前記第1方向に光学的に対応し、前記矩形の照明領域の短辺方向は前記第2方向に光学的に対応する。この場合、前記矩形の照明領域の短辺方向に沿って前記マスクおよび前記感光性基板を前記投影光学系に対して相対移動させることにより、前記マスクのパターンを前記感光性基板に投影露光することが好ましい。

【0016】

本発明の第4形態では、第2形態の照明光学装置を介してマスクを照明し、照明された前記マスクに形成されたパターンを感光性基板上に投影露光することを特徴とする露光

方法を提供する。

【0017】

第4形態の好ましい態様によれば、前記第1方向に光学的に対応する方向に沿って長辺を有し且つ前記第2方向に光学的に対応する方向に沿って短辺を有する矩形の照明領域を前記マスク上に形成する。この場合、前記矩形の照明領域の短辺方向に沿って前記マスクおよび前記感光性基板を前記投影光学系に対して相対移動させることにより、前記マスクのパターンを前記感光性基板に投影露光することが好ましい。

【0018】

【発明の実施の形態】

図1は、本発明の基本的原理を説明する図である。図1を参照すると、光源Sから供給された光が、第1コンデンサー光学系C1を介して、マイクロフライアイレンズMFをケラー照明している。マイクロフライアイレンズMFは、光源S側から順に、第1部分系Aと第2部分系Bとを備えている。第1部分系Aには多数の第1微小屈折面が一体的に形成され、第2部分系Bには多数の第1微小屈折面と光学的に対応するように多数の第2微小屈折面が一体的に形成されている。

10

【0019】

したがって、マイクロフライアイレンズMFの各微小屈折面により波面分割された光は、第2コンデンサー光学系C2を介して、被照射面上の照野Iに達する。ここで、マイクロフライアイレンズMFの入射面(すなわち第1部分系Aの入射面)A1と照野Iとの間には、光学的な共役関係が成り立つ。したがって、入射面A1上において各微小屈折面に対応する領域の光強度分布が、照野Iの全体にそれぞれ拡大投影される。図1には1つの微小屈折面に対応する光線のみが模式的に示されているが、実際には多数の微小屈折面を介して照野Iの全体を重畳的に照明することにより、照野Iの全体に亘って照度分布の均一性が得られる。

20

【0020】

図1に示す照明系では、マイクロフライアイレンズMFの入射面A1と照野Iとの間に光学的な共役関係があるが、結像系P(マイクロフライアイレンズMF+第2コンデンサー光学系C2)の歪曲収差が変化すると、結像倍率が像高によって変化するため、照野Iにおける照度分布が変化することになる。たとえば、一色真幸著の「写真レンズの像面照度分布」(光学技術コンタクトVol.5, No.11, p10-14, 1967)によれば、光軸に対して回転対称な結像系Pの歪曲収差がD%変化すると、照野(結像系Pの像面)Iにおける照度が約4D%変化することが知られている。

30

【0021】

なお、結像系の収差(歪曲収差を含む)の評価法として、3次収差論による収差評価方法が知られている。3次収差論による収差の解析は、近似による誤差があるものの、解析的に計算を行うことができるので見通しが良いという利点がある。3次収差論による収差係数の導出法は、例えば松居吉哉著の「収差論」(日本オプトメカトロニクス協会, 1989)に詳しく記載されている。以下、3次収差論を用いて、マイクロフライアイレンズMFの微小屈折面の面形状が変化したときの、マイクロフライアイレンズMFの入射面A1と照野Iとの間に介在する結像系Pの歪曲収差の変化を考える。

40

【0022】

マイクロフライアイレンズMFにおける各微小屈折面の面形状は、光軸に垂直な方向の高さをyとし、屈折面の頂点における接平面から高さyにおける屈折面上の位置までの光軸に沿った距離(サグ量)をxとし、曲率をcとし、円錐係数をとするとき、以下の式(1)で表される。

$$x = (c \cdot y^2) / [1 + \{1 - (c + 1) c^2 \cdot y^2\}^{1/2}] \quad (1)$$

【0023】

3次収差論によれば、全ての収差係数は球面項と非球面項との和で表わすことができる。なお、マイクロフライアイレンズMFの製造時における面形状のばらつきは、上記(1)式における曲率cおよび円錐係数の変化として現れる。このとき、曲率cの変化は、照

50

明の大きさには影響するが、照明むらには実質的に影響しない。一方、円錐係数の変化は、収差係数の非球面項を変化させ、照明むらに影響を与える。

【0024】

前掲の松居吉哉著の「収差論」によれば、物体結像の歪曲収差係数の非球面項 V_{asp} は、一般に次式(2)で表される。式(2)において、 h_i は像近軸追跡値の光線高(物体(像)近軸光線を追跡したときの光線高)であり、 h_p は瞳近軸追跡値の光線高(瞳近軸光線を追跡したときの光線高)である。また、 γ は、次式(3)で表わされる係数である。

$$V_{asp} = h_i \cdot h_p^3 \cdot \gamma \quad (2)$$

$$= n \cdot c^3 \cdot \gamma \quad (3)$$

【0025】

ここで、 n は、微小屈折面の光入射側および光射出側における媒体の屈折率の差であって、微小屈折面の光射出側における媒体の屈折率 n_2 から微小屈折面の光入射側における媒体の屈折率 n_1 を差し引いた値($n_2 - n_1$)である。図2は、図1のマイクロフライアイレンズにおける光学的特性を説明する図である。図2では、マイクロフライアイレンズMFの屈折力(パワー)が P 、第1部分系Aの屈折力が a 、第2部分系Bの屈折力が b 、第1部分系Aと第2部分系Bとの間の空気換算面間隔が s で表わされている。

【0026】

したがって、マイクロフライアイレンズMFの屈折力を1に規格化し、第1部分系Aの屈折力 a と第2部分系Bの屈折力 b との屈折力比 a/b を γ とすると、次の式(4a)~(4d)に示す関係が成立する。

$$P = 1 \quad (4a)$$

$$a = \gamma \quad (4b)$$

$$b = 1/\gamma \quad (4c)$$

$$s = 1 \quad (4d)$$

【0027】

このときの近軸追跡値を、次の表(1)に示す。

【表1】

	像光線高 h_i	像換算傾角 α_i	瞳光線高 h_p	瞳換算傾角 α_p
第1部分系A	0	-1	-1	0
第2部分系B	1	-1	$\gamma - 1$	$-\gamma$

【0028】

表(1)、式(2)および式(3)を参照すると、第1部分系Aにおける歪曲収差係数の非球面項 V_{aspA} 、および第2部分系Bにおける歪曲収差係数の非球面項 V_{aspB} は、それぞれ次の式(5)および(6)で表わされる。

$$V_{aspA} = 0 \quad (5)$$

$$V_{aspB} = (1/\gamma - 1)^3 \cdot n \cdot c^3 \cdot \gamma \quad (6)$$

【0029】

式(5)および(6)を参照すると、マイクロフライアイレンズMFの微小屈折面の面形状のばらつき(すなわち円錐係数の変化)に起因する歪曲収差係数の非球面項の変化は、3次収差の範囲では第2部分系Bのみで発生することが分かる。次に、歪曲収差係数の非球面項の変化が照野Iにおける照度分布に与える影響を考える。第2部分系Bにおいて、曲率 c と屈折率差 n との間には、以下の式(7)に示す比例関係が成り立つ。

$$c = 1/n \quad (7)$$

【0030】

3次収差の範囲では、照野Iにおける照度分布は、像高の二乗に比例して変化する。像高は、マイクロフライアイレンズMFの射出側の開口数NAに比例する。したがって、式(5)~(7)より、マイクロフライアイレンズMFの微小屈折面の面形状の変化に起因する歪曲収差の変化、ひいては照野(像面)I上での照度分布の変化の感度は、以下の式

10

20

30

40

50

(8) で表わされる。

$$= (n - 1)^3 \cdot NA^2 / n^2 \quad (8)$$

【0031】

ちなみに、マイクロフライアイレンズMFが空気中に配置される場合、第2部分系Bを形成する光学材料の屈折率nとすれば、式(8)を次の式(8')に示すように変形することができる。

$$= (n - 1)^3 \cdot NA^2 / (n - 1)^2 \quad (8')$$

【0032】

こうして、パラメータの絶対値を小さくすることにより、マイクロフライアイレンズMFの微小屈折面の面形状のばらつきに起因する歪曲収差の変化を小さく抑えることができ、照野Iにおける照度分布が受ける影響を低減することができる。換言すれば、パラメータの絶対値を小さくすることにより、たとえばエッチング加工により一体的に形成される多数の微小屈折面の製造誤差が照度分布に与える影響を小さく抑える特性を有するマイクロフライアイレンズ(オプティカルインテグレータ)MFを実現することができる。

10

【0033】

ところで、式(8')を参照すると、マイクロフライアイレンズMFの微小屈折面の面形状のばらつきに起因する歪曲収差の変化を小さく抑えるためにパラメータの絶対値を小さくするには、屈折力比を1に近づければ良いことがわかる。しかしながら、単に屈折力比を1に近づけると、マイクロフライアイレンズMFの射出面(すなわち第2部分系Bの射出面)におけるエネルギー密度が増大し、ひいては光エネルギー照射により第2部分系Bが破損する危険性が増大し、部品寿命が短くなる。

20

【0034】

本発明では、具体的な実施形態を参照して後述するように、マイクロフライアイレンズMF(第1部分系Aと第2部分系Bとの合成系)が、第2部分系B(第2光学部材)の射出面よりも所定距離だけ後側に第1方向(光軸に垂直な面内において設定される所定の方向)に関する後側焦点を有する。また、第1部分系A(第1光学部材)が、第1部分系Aの射出面と第2部分系Bの入射面との間の光路中に第2方向(たとえば光軸に垂直な面内において第1方向と直交する方向)に関する後側焦点を有する。この場合、光軸を含む平面内において光軸対称な光学系であれば、前述の式(1)~(8')で述べた回転対称な光学系に関する議論と同様な議論が成立する。

30

【0035】

本発明では、上述の構成を採用することにより、マイクロフライアイレンズMFの微小屈折面の面形状のばらつきに起因する歪曲収差の変化を小さく抑えるために屈折力比を1に近づけても、マイクロフライアイレンズMFの射出面(すなわち第2部分系Bの射出面)を含む各光学面におけるエネルギー密度を小さく抑えることができ、ひいては光エネルギー照射による第2部分系Bや第1部分系Aの破損を回避して十分に長い部品寿命を確保することができる。

【0036】

また、式(8')を参照すると、パラメータの絶対値を小さくするには、第2部分系Bを形成する光学材料の屈折率nを大きくすれば良いことがわかる。ただし、光学材料の屈折率の増大に伴ってコストも増大し易いので、第2部分系Bのみに屈折率の高い光学材料を用いるのが現実的である。したがって、本発明では、第1部分系A(第1光学部材)を形成する光学材料の屈折率n_aよりも第2部分系B(第2光学部材)を形成する光学材料の屈折率n_bの方を大きく設定することが好ましい。

40

【0037】

この場合、本発明の効果を良好に発揮するには、屈折率n_aおよび屈折率n_bが0.05 n_b - n_aの条件を満足することが好ましい。具体的には、たとえば300nm以下の波長を有する光に対して、第1部分系Aを石英ガラスまたは蛍石で形成する場合、第2部分系Bを酸化マグネシウム、ルビー、サファイア、結晶水晶、または石英ガラスで形成することが好ましい。また、第1部分系Aを蛍石で形成する場合、第2部分系Bを石英ガラ

50

スで形成することが好ましい。

【0038】

本発明の実施形態を、添付図面に基づいて説明する。

図3は、本発明の実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。図3において、感光性基板であるウェハWの法線方向に沿ってZ軸を、ウェハ面内において図3の紙面に平行な方向にY軸を、ウェハ面内において図3の紙面に垂直な方向にX軸をそれぞれ設定している。なお、図3では、照明光学装置が輪帯照明を行うように設定されている。

【0039】

図3の露光装置は、露光光（照明光）を供給するための光源1として、たとえば248nmの波長の光を供給するKrFエキシマレーザー光源または193nmの波長の光を供給するArFエキシマレーザー光源を備えている。光源1からZ方向に沿って射出されたほぼ平行な光束は、X方向に沿って細長く伸びた矩形の断面を有し、一对のレンズ2aおよび2bからなるビームエキスパンダー2に入射する。各レンズ2aおよび2bは、図3の紙面内（YZ平面内）において負の屈折力および正の屈折力をそれぞれ有する。したがって、ビームエキスパンダー2に入射した光束は、図3の紙面内において拡大され、所定の矩形の断面を有する光束に整形される。

【0040】

整形光学系としてのビームエキスパンダー2を介したほぼ平行な光束は、折り曲げミラー3でY方向に偏向された後、回折光学素子4を介して、アフォーカルズームレンズ5に入射する。一般に、回折光学素子は、ガラス基板に露光光（照明光）の波長程度のピッチを有する段差を形成することによって構成され、入射ビームを所望の角度に回折する作用を有する。具体的には、回折光学素子4は、矩形の断面を有する平行光束が入射した場合に、そのファースフィールド（またはフラウンホーファー回折領域）に円形の光強度分布を形成する機能を有する。したがって、回折光学素子4を介した光束は、アフォーカルズームレンズ5の瞳位置に円形の光強度分布、すなわち円形の断面を有する光束を形成する。

【0041】

なお、回折光学素子4は、照明光路から退避可能に構成されている。アフォーカルズームレンズ5は、アフォーカル系（無焦点光学系）を維持しながら所定の範囲で倍率を連続的に変化させることができるように構成されている。アフォーカルズームレンズ5を介した光束は、輪帯照明用の回折光学素子6に入射する。アフォーカルズームレンズ5は、回折光学素子4の発散原点と回折光学素子6の回折面とを光学的にほぼ共役に結んでいる。そして、回折光学素子6の回折面またはその近傍の面の一点に集光する光束の開口数は、アフォーカルズームレンズ5の倍率に依存して変化する。

【0042】

輪帯照明用の回折光学素子6は、平行光束が入射した場合に、そのファースフィールドにリング状の光強度分布を形成する機能を有する。なお、回折光学素子6は、照明光路に対して挿脱自在に構成され、且つ4極照明用の回折光学素子60や円形照明用の回折光学素子61と切り換え可能に構成されている。回折光学素子6を介した光束は、ズームレンズ7に入射する。ズームレンズ7の後側焦点面の近傍には、光源側から順に第1フライアイ部材8aと第2フライアイ部材8bとからなるマイクロフライアイレンズ8の入射面（すなわち第1フライアイ部材8aの入射面）が位置決めされている。なお、マイクロフライアイレンズ8は入射光束に基づいて多数光源を形成する波面分割型のオプティカルインテグレートラとして機能するが、その詳細な構成および作用については後述する。

【0043】

上述したように、回折光学素子4を介してアフォーカルズームレンズ5の瞳位置に形成される円形の光強度分布からの光束は、アフォーカルズームレンズ5から射出された後、様々な角度成分を有する光束となって回折光学素子6に入射する。したがって、回折光学素子6を介した光束は、ズームレンズ7の後側焦点面に（ひいてはマイクロフライアイレ

10

20

30

40

50

ンズ 8 の入射面に)、たとえば光軸 AX を中心とした輪帯状の照野を形成する。

【0044】

マイクロフライアイレンズ 8 の入射面に形成される輪帯状の照野の外径は、ズームレンズ 7 の焦点距離に依存して変化する。このように、ズームレンズ 7 は、回折光学素子 6 とマイクロフライアイレンズ 8 の入射面とを実質的にフーリエ変換の関係に結んでいる。マイクロフライアイレンズ 8 に入射した光束は二次元的に分割され、その後側焦点面には入射光束によって形成される照野と同じ輪帯状の多数光源(以下、「二次光源」という)が形成される。

【0045】

マイクロフライアイレンズ 8 の後側焦点面に形成された輪帯状の二次光源からの光束は、コンデンサー光学系 9 の集光作用を受けた後、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。マスク M のパターンを透過した光束は、投影光学系 PL を介して、感光性基板であるウェハ 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 PL の光軸 AX と直交する平面(XY 平面)内においてウェハ 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 のパターンが逐次露光される。

10

【0046】

なお、一括露光では、いわゆるステップ・アンド・リピート方式にしたがって、ウェハの各露光領域に対してマスクパターンを一括的に露光する。この場合、マスク M 上での照明領域の形状は正方形に近い矩形となる。一方、スキャン露光では、いわゆるステップ・アンド・スキャン方式にしたがって、マスクおよびウェハを投影光学系に対して相対移動させながらウェハの各露光領域に対してマスクパターンをスキャン露光する。この場合、マスク M 上での照明領域の形状は短辺と長辺との比がたとえば 1 : 3 の矩形となる。

20

【0047】

本実施形態では、アフォーカルズームレンズ 5 の倍率が変化すると、輪帯状の二次光源の中心高さ(円形状の中心線の光軸 AX からの距離)が変化することなく、その幅(外径(直径)と内径(直径)との差の $1/2$)だけが変化する。すなわち、アフォーカルズームレンズ 5 の倍率を変化させることにより、輪帯状の二次光源の大きさ(外径)およびその形状(輪帯比:内径/外径)をとともに変更することができる。

【0048】

また、ズームレンズ 7 の焦点距離が変化すると、輪帯状の二次光源の輪帯比が変化することなく、中心高さおよびその幅がともに変更する。すなわち、ズームレンズ 7 の焦点距離を変化させることにより、輪帯状の二次光源の輪帯比を変更することなくその外径を変更することができる。以上より、本実施形態では、アフォーカルズームレンズ 5 の倍率とズームレンズ 7 の焦点距離とを適宜変化させることにより、輪帯状の二次光源の外径を変化させることなくその輪帯比だけを変更することができる。

30

【0049】

前述したように、回折光学素子 6 は、照明光路に対して挿脱自在に構成され、且つ 4 極照明用の回折光学素子 60 や円形照明用の回折光学素子 61 と切り換え可能に構成されている。以下、回折光学素子 6 に代えて回折光学素子 60 を照明光路中に設定することによって得られる 4 極照明について説明する。4 極照明用の回折光学素子 60 は、平行光束が入射した場合に、そのファーストフィールドに 4 点状の光強度分布を形成する機能を有する。したがって、回折光学素子 60 を介した光束は、マイクロフライアイレンズ 8 の入射面に、たとえば光軸 AX を中心とした 4 つの円形状の照野からなる 4 極状の照野を形成する。その結果、マイクロフライアイレンズ 8 の後側焦点面にも、その入射面に形成された照野と同じ 4 極状の二次光源が形成される。

40

【0050】

4 極照明においても輪帯照明の場合と同様に、アフォーカルズームレンズ 5 の倍率を変化させることにより、4 極状の二次光源の外径(4 つの円形状の面光源に外接する円の直径)および輪帯比(4 つの円形状の面光源に内接する円の直径 / 4 つの円形状の面光源に外

50

接する円の直径)をとともに変更することができる。また、ズームレンズ7の焦点距離を変化させることにより、4極状の二次光源の輪帯比を変更することなくその外径を変更することができる。その結果、アフォーカルズームレンズ5の倍率とズームレンズ7の焦点距離とを適宜変化させることにより、4極状の二次光源の外径を変化させることなくその輪帯比だけを変更することができる。

【0051】

次いで、回折光学素子4を照明光路から退避させるとともに、回折光学素子6または60に代えて円形照明用の回折光学素子61を照明光路中に設定することによって得られる円形照明について説明する。この場合、アフォーカルズームレンズ5には光軸AXに沿って矩形の断面を有する光束が入射する。アフォーカルズームレンズ5に入射した光束は、その倍率に応じて拡大または縮小され、矩形の断面を有する光束のまま光軸AXに沿ってアフォーカルズームレンズ5から射出され、回折光学素子61に入射する。

10

【0052】

ここで、円形照明用の回折光学素子61は、回折光学素子4と同様に、矩形の断面を有する平行光束が入射した場合に、ファーストフィールドに円形状の光強度分布を形成する機能を有する。したがって、回折光学素子61により形成された円形光束は、ズームレンズ7を介して、マイクロフライアイレンズ8の入射面において光軸AXを中心とした円形状の照野を形成する。その結果、マイクロフライアイレンズ8の後側焦点面にも、光軸AXを中心とした円形状の二次光源が形成される。この場合、アフォーカルズームレンズ5の倍率またはズームレンズ7の焦点距離を変化させることにより、円形状の二次光源の外径を適宜変更することができる。

20

【0053】

図4は、本実施形態にかかるマイクロフライアイレンズの全体構成を概略的に示す斜視図である。また、図5は、本実施形態にかかるマイクロフライアイレンズの作用を説明する図である。図4を参照すると、本実施形態のマイクロフライアイレンズ8は、光源側に配置された第1フライアイ部材8aとマスク側に配置された第2フライアイ部材8bとから構成されている。

【0054】

第1フライアイ部材8aの光源側の面および第2フライアイ部材8bの光源側の面には、X方向に沿って配列されたシリンドリカルレンズ群81aおよび81bがそれぞれピッチp1で形成されている。一方、第1フライアイ部材8aのマスク側の面および第2フライアイ部材8bのマスク側の面には、Z方向に沿って配列されたシリンドリカルレンズ群82aおよび82bがそれぞれピッチp2で形成されている。なお、図3では、図面の明瞭化のために、マイクロレンズアレイ8に形成されたシリンドリカルレンズの数を実際よりも非常に少なく表している。

30

【0055】

マイクロフライアイレンズ8のX方向に関する屈折作用(すなわちXY平面に関する屈折作用)に着目すると、光軸AXに沿って入射した平行光束は、第1フライアイ部材8aの光源側に形成されたシリンドリカルレンズ群81aによってX方向に沿ってピッチp1で波面分割される。そして、図5(a)に示すように、シリンドリカルレンズ群81aの微小屈折面91aに入射した平行光束は、微小屈折面91aで集光作用を受けた後、第1フライアイ部材8aの射出面と第2フライアイ部材8bの入射面との間の光路中においてX方向に関する第1フライアイ部材8aの後側焦点84に集光する。後側焦点84に一旦集光した発散光束は、第2フライアイ部材8bの光源側に形成されたシリンドリカルレンズ群82bにおいて微小屈折面91aに対応する微小屈折面92aで集光作用を受けた後、第2フライアイ部材8bから射出される。

40

【0056】

一方、マイクロフライアイレンズ8のZ方向に関する屈折作用(すなわちZY平面に関する屈折作用)に着目すると、光軸AXに沿って入射した平行光束は、第1フライアイ部材8aのマスク側に形成されたシリンドリカルレンズ群82aによってZ方向に沿ってピッ

50

チ p 2 で波面分割される。そして、図 5 (b) に示すように、シリンドリカルレンズ群 8 2 a の微小屈折面 9 2 a に入射した平行光束は、微小屈折面 9 2 a で集光作用を受けた後、第 2 フライアイ部材 8 b のマスク側に形成されたシリンドリカルレンズ群 8 2 b において微小屈折面 9 2 a に対応する微小屈折面 9 2 b で集光作用を受け、Z 方向に関するマイクロフライアイレンズ 8 の後側焦点 8 5 に集光する。

【 0 0 5 7 】

次の表 (2) に、本実施形態にかかるマイクロフライアイレンズ 8 の諸元の値を掲げる。表 (2) において、m は光源からの光学面の順序を表わす面番号を、 ϕ_x は X 方向に関する各光学面の屈折力 (パワー) を、 ϕ_z は Z 方向に関する各光学面の屈折力を、d は各光学面の軸上間隔すなわち面間隔を、n は使用光に対する屈折率を、 h_x は X 方向に関する各光学面での光線高を、 α_x は X 方向に関する各光学面での傾角 (当該面を通過した光線についての傾角) を、 h_z は Z 方向に関する各光学面での光線高を、 α_z は Z 方向に関する各光学面での傾角を、 E_x は X 方向に関する各光学面でのエネルギー密度比を、 E_z は Z 方向に関する各光学面でのエネルギー密度比を、E は各光学面でのエネルギー密度比をそれぞれ示している。

【 0 0 5 8 】

なお、エネルギー密度比 E_x 、 E_z および E は、第 1 面すなわち第 1 フライアイ部材 8 a の入射面 (マイクロフライアイレンズ 8 の入射面) におけるエネルギー密度を 1 に規格化したときの各光学面におけるエネルギー密度である。また、表 (2) において、 f_x は X 方向に関するマイクロフライアイレンズ 8 の焦点距離を、 f_z は Z 方向に関するマイクロフライアイレンズ 8 の焦点距離を、 d_x は X 方向に関するマイクロフライアイレンズ 8 のバックフォーカスを、 d_z は Z 方向に関するマイクロフライアイレンズ 8 のバックフォーカスをそれぞれ示している。

【 0 0 5 9 】

【表 2】

$$f_x = 2$$

$$f_z = 1$$

$$d_x = -0.85294$$

$$d_z = 0.333337$$

m	ϕ_x	ϕ_z	d	n	h_x	α_x
1	0.588235	0	2.25	1.5	1	0.588235
2	0	0.666663	0.5	1	0.117647	0.588235
3	0.5	0	0.75	1.5	-0.17647	0.5
4	0	1	—	1	-0.42647	0.5

m	h_z	α_z	E_x	E_z	E
1	1	0	1	1	1
2	1	0.666663439	8.49999	1	8.49999
3	0.666668	0.666663439	5.66667	1.499996	8.49999
4	0.333337	1	2.34483	2.999971	7.03442

【 0 0 6 0 】

したがって、本実施形態では、X方向に関する第1フライアイ部材8aの屈折力 n_{11} 、X方向に関する第2フライアイ部材8bの屈折力 n_{12} 、X方向に関する屈折力比 $r_1 = n_{11} / n_{12}$ 、Z方向に関する第1フライアイ部材8aの屈折力 n_{21} 、Z方向に関する第2フライアイ部材8bの屈折力 n_{22} 、およびZ方向に関する屈折力比 $r_2 = n_{21} / n_{22}$ 、X方向に関するパラメータのファクター $| (r_1 - 1)^3 |$ 、およびZ方向に関するパラメータのファクター $| (r_2 - 1)^3 |$ は、次の表(3)に示す通りになる。

【0061】

【表3】

$$n_{11} = 0.588235$$

$$n_{12} = 0.5$$

$$r_1 = n_{11} / n_{12} = 1.17647$$

$$n_{21} = 0.666663$$

$$n_{22} = 1$$

$$r_2 = n_{21} / n_{22} = 0.666663$$

$$| (r_1 - 1)^3 | = 0.0055$$

$$| (r_2 - 1)^3 | = 0.037038$$

【0062】

図6は、本実施形態の比較例にかかるマイクロフライアイレンズの作用を説明する図である。図6の比較例では、各光学面の軸上間隔すなわち面間隔 d 、使用光に対する屈折率 n 、X方向に関するマイクロフライアイレンズ(第1フライアイ部材108a + 第2フライアイ部材108b)の焦点距離 f_x 、Z方向に関するマイクロフライアイレンズの焦点距離 f_z を含む基本的なデータを図5の実施形態と同じに設定している。しかしながら、図6の比較例では、従来技術にしたがってマイクロフライアイレンズのX方向に関する後側焦点とZ方向に関する後側焦点とを第2フライアイ部材108bの射出面よりも所定距離だけ後側においてほぼ一致させている点が図5の実施形態と相違している。

【0063】

次の表(4)に、比較例にかかるマイクロフライアイレンズの諸元の値を掲げる。表(4)における表記は、表(2)の表記と同様である。

【0064】

【表4】

10

20

30

$$f_x = 2$$

$$f_z = 1$$

$$d_x = 0.485073$$

$$d_z = 0.48507$$

m	ϕ_x	ϕ_z	d	n	h_x	α_x	
1	0.253732	0	2.25	1.5	1	0.253732	10
2	0	0.51493	0.5	1	0.619402	0.253732	
3	0.5	0	0.75	1.5	0.492536	0.5	
4	0	1	—	1	0.242536	0.5	

m	h_z	α_z	E_x	E_z	E	
1	1	0	1	1	1	
2	1	0.514930153	1.61446	1	1.61446	20
3	0.742535	0.514930153	2.030307	1.346738	2.734292	
4	0.48507	1	4.123094	2.061559	8.5	

【0065】

したがって、図6の比較例では、X方向に関する第1フライアイ部材8aの屈折力 11 、X方向に関する第2フライアイ部材8bの屈折力 12 、X方向に関する屈折力比 $1 = 11 / 12$ 、Z方向に関する第1フライアイ部材8aの屈折力 21 、Z方向に関する第2フライアイ部材8bの屈折力 22 、およびZ方向に関する屈折力比 $2 = 21 / 22$ 、X方向に関するパラメータのファクター $| (1 - 1)^3 |$ 、およびZ方向に関するパラメータのファクター $| (2 - 1)^3 |$ は、次の表(5)に示す通りになる。

【0066】

【表5】

$$11 = 0.253732$$

$$12 = 0.5$$

$$1 = 11 / 12 = 0.507464$$

$$21 = 0.51493$$

$$22 = 1$$

$$2 = 21 / 22 = 0.51493$$

$$| (1 - 1)^3 | = 0.119485$$

$$| (2 - 1)^3 | = 0.114133$$

【0067】

以上のように、本実施形態では、マイクロフライアイレンズ8(第1フライアイ部材8aと第2フライアイ部材8bとの合成系)が、第2フライアイ部材8bの射出面よりも所定距離だけ後側にZ方向に関する後側焦点85を有する。また、第1フライアイ部材8aが、第1フライアイ部材8aの射出面と第2フライアイ部材8bの入射面との間の光路中にX方向に関する後側焦点84を有する。

【0068】

その結果、本実施形態では、第1フライアイ部材8aの射出面および第2フライアイ部材8bの入射面においてエネルギー密度比が $E = 8.5$ で最大値になっており、第2フライアイ

イ部材 8 b の射出面においてエネルギー密度比が $E = 7.0$ で最大値に近い値になっている。すなわち、本実施形態では、第 1 フライアイ部材 8 a の射出面と第 2 フライアイ部材 8 b の入射面と第 2 フライアイ部材 8 b の射出面とでエネルギー密度の負担がある程度均等化されている。

【0069】

これに対し、マイクロフライアイレンズの X 方向に関する後側焦点と Z 方向に関する後側焦点とがほぼ一致する比較例では、第 2 フライアイ部材 8 b の射出面においてエネルギー密度比が $E = 8.5$ で最大値になっており、他の光学面におけるエネルギー密度比は $E = 1 \sim 2.7$ 程度で最大値よりもかなり小さい値になっている。すなわち、比較例では、エネルギー密度の負担が第 2 フライアイ部材 8 b の射出面（マイクロフライアイレンズの射出面）

10

【0070】

また、エネルギー密度比の最大値が互いに等しくなるように設定された本実施形態と比較例とを比べると、本実施形態における X 方向に関するパラメータ のファクター $| (1 - 1) ^3 |$ は比較例における X 方向に関するパラメータ のファクター $| (1 - 1) ^3 |$ の約 $1/2.2$ になっており、本実施形態における Z 方向に関するパラメータ のファクター $| (2 - 1) ^3 |$ は比較例における Z 方向に関するパラメータ のファクター $| (2 - 1) ^3 |$ の約 $1/3$ になっている。

【0071】

したがって、パラメータ の他のファクター NA^2 および $(n - 1)^2$ が同じであれば、本実施形態では比較例に比して、マイクロフライアイレンズの微小屈折面の面形状のばらつきに起因する歪曲収差の変化を小さく抑えることができる。換言すれば、パラメータ の他のファクター NA^2 および $(n - 1)^2$ が同じ場合、比較例において本実施形態と同等に歪曲収差の変化を小さく抑えるために屈折力比 1 および 2 をさらに 1 に近づけると、第 2 フライアイ部材 8 b の射出面におけるエネルギー密度比が上述の最大値よりもさらに増大することになる。

20

【0072】

以上のように、本実施形態では、マイクロフライアイレンズ 8 の Z 方向に関する後側焦点と第 1 フライアイ部材 8 a の X 方向に関する後側焦点とについて上述の構成を採用することにより、マイクロフライアイレンズ 8 の微小屈折面の面形状のばらつきに起因する歪曲収差の変化を小さく抑えるためにパラメータ のファクター $| (1 - 1) ^3 |$ および $| (2 - 1) ^3 |$ を小さく設定しても（屈折力比 1 および 2 を 1 に近づけても）、マイクロフライアイレンズ 8 の射出面（すなわち第 2 フライアイ部材 8 b の射出面）を含む各光学面におけるエネルギー密度を小さく抑えることができ、ひいては光エネルギー照射による第 2 フライアイ部材 8 b および第 1 フライアイ部材 8 a の破損を回避して十分に長い部品寿命を確保することができる。

30

【0073】

なお、本実施形態において、第 1 フライアイ部材 8 a の射出面と第 2 フライアイ部材 8 b の入射面と第 2 フライアイ部材 8 b の射出面とでエネルギー密度の負担をできるだけ均等化してエネルギー密度の最大値を小さく抑えるには、第 1 フライアイ部材 8 a の射出面と第 2 フライアイ部材 8 b の入射面との中間面と第 1 フライアイ部材 8 a の射出面との間の光路中に第 1 フライアイ部材 8 a の X 方向に関する後側焦点 8 4 が存在するように構成すること、および第 1 フライアイ部材 8 a の射出面におけるエネルギー密度と第 2 フライアイ部材 8 b の入射面におけるエネルギー密度とをほぼ同じに設定することが好ましい。

40

【0074】

また、本実施形態において、マイクロフライアイレンズ 8 の微小屈折面の面形状のばらつきに起因する歪曲収差の変化を十分に小さく抑えるには、パラメータ のファクター $| (1 - 1) ^3 |$ および $| (2 - 1) ^3 |$ が次の条件式 (a) および (b) を満足することが好ましい。

$$| (1 - 1) ^3 | < 0.1 \quad (a)$$

50

$$| (2 - 1) ^ 3 | < 0 . 1 \quad (b)$$

【 0 0 7 5 】

なお、本実施形態においては、マイクロフライアイレンズ 8 に平行光束が入射したときの X 方向に関する集光点 (X 方向に関する光源形成点) 8 4 と Z 方向に関する集光点 (Z 方向に関する光源形成点) 8 5 とが異なるが、集光点が X 方向と Z 方向とで異なる構成がマスク M 上 (ひいてはウェハ W 上) での照度分布に与える影響を小さく抑えるために、第 1 フライアイ部材 8 a の X 方向に関する後側焦点 8 4 とマイクロフライアイレンズ 8 の Z 方向に関する後側焦点 8 5 との軸上距離を、マイクロフライアイレンズ 8 からの光をマスク M へ導くための導光光学系 (コンデンサー光学系 9) の焦点距離の 5 % 以下に設定することが好ましい。

10

【 0 0 7 6 】

ところで、スキャン露光型の露光装置の場合、マスク M 上には細長い矩形の照明領域が形成され、この矩形の照明領域の短辺方向すなわち走査方向に沿ってマスク M およびウェハ W を投影光学系 P L に対して相対移動させることにより、マスク M のパターンをウェハ W に投影露光することになる。この場合、マイクロフライアイレンズ 8 の射出側の開口数 N A を、走査方向よりも非走査方向 (照明領域の長辺方向) の方に大きく設定するのが通常である。したがって、矩形の照明領域の長辺方向がマイクロフライアイレンズ 8 における Z 方向に光学的に対応してマスク M 上において Y 方向に一致し、矩形の照明領域の短辺方向がマイクロフライアイレンズ 8 における X 方向に光学的に対応してマスク M 上において X 方向に一致するように設定することが好ましい。

20

【 0 0 7 7 】

なお、上述の実施形態では、各微小屈折面が円筒面状に形成されたマイクロフライアイレンズに対して本発明を適用している。しかしながら、これに限定されることなく、一般に各微小屈折面が一方向にのみ曲率を有する曲面状 (トーリック形状) に形成されたマイクロフライアイレンズに対して本発明を適用する変形例も可能である。

【 0 0 7 8 】

上述の実施形態にかかる露光装置では、照明光学装置によってマスク (レチクル) を照明し (照明工程) 、投影光学系を用いてマスクに形成された転写用のパターンを感光性基板に露光する (露光工程) ことにより、マイクロデバイス (半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等) を製造することができる。以下、上述の実施形態の露光装置を用いて感光性基板としてのウェハ等に所定の回路パターンを形成することによって、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法の一例につき図 7 のフローチャートを参照して説明する。

30

【 0 0 7 9 】

まず、図 7 のステップ 3 0 1 において、1 ロットのウェハ上に金属膜が蒸着される。次のステップ 3 0 2 において、その 1 ロットのウェハ上の金属膜上にフォトレジストが塗布される。その後、ステップ 3 0 3 において、上述の実施形態の露光装置を用いて、マスク上のパターンの像がその投影光学系を介して、その 1 ロットのウェハ上の各ショット領域に順次露光転写される。その後、ステップ 3 0 4 において、その 1 ロットのウェハ上のフォトレジストの現像が行われた後、ステップ 3 0 5 において、その 1 ロットのウェハ上でレジストパターンをマスクとしてエッチングを行うことによって、マスク上のパターンに対応する回路パターンが、各ウェハ上の各ショット領域に形成される。その後、更に上のレイヤの回路パターンの形成等を行うことによって、半導体素子等のデバイスが製造される。上述の半導体デバイス製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する半導体デバイスをスループット良く得ることができる。

40

【 0 0 8 0 】

また、上述の実施形態の露光装置では、プレート (ガラス基板) 上に所定のパターン (回路パターン、電極パターン等) を形成することによって、マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得ることもできる。以下、図 8 のフローチャートを参照して、このときの手法の一例につき説明する。図 8 において、パターン形成工程 4 0 1 では、上述の実施形態の

50

露光装置を用いてマスクのパターンを感光性基板（レジストが塗布されたガラス基板等）に転写露光する、所謂光リソグラフィ工程が実行される。この光リソグラフィ工程によって、感光性基板には多数の電極等を含む所定パターンが形成される。その後、露光された基板は、現像工程、エッチング工程、レジスト剥離工程等の各工程を経ることによって、基板上に所定のパターンが形成され、次のカラーフィルター形成工程402へ移行する。

【0081】

次に、カラーフィルター形成工程402では、R（Red）、G（Green）、B（Blue）に対応した3つのドットの組がマトリクス状に多数配列されたり、またはR、G、Bの3本のストライプのフィルターの組を複数水平走査線方向に配列したカラーフィルターを形成する。そして、カラーフィルター形成工程402の後に、セル組み立て工程403が実行される。セル組み立て工程403では、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板、およびカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルター等を用いて液晶パネル（液晶セル）を組み立てる。セル組み立て工程403では、例えば、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板とカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルターとの間に液晶を注入して、液晶パネル（液晶セル）を製造する。

10

【0082】

その後、モジュール組み立て工程404にて、組み立てられた液晶パネル（液晶セル）の表示動作を行わせる電気回路、バックライト等の各部品を取り付けて液晶表示素子として完成させる。上述の液晶表示素子の製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する液晶表示素子をスルーブット良く得ることができる。

20

【0083】

なお、上述の実施形態では、コンデンサー光学系9によって二次光源からの光を集光して重疊的にマスクMを照明している。しかしながら、これに限定されることなく、コンデンサー光学系9とマスクMとの間の光路中に、照明視野絞り（マスクブラインド）と、この照明視野絞りの像をマスクM上に形成するリレー光学系とを配置しても良い。この場合、コンデンサー光学系9は、二次光源からの光を集光して重疊的に照明視野絞りを照明することになり、リレー光学系は照明視野絞りの開口部（光透過部）の像をマスクM上に形成することになる。

30

【0084】

また、上述の実施形態では、露光光としてKrFエキシマレーザー光（波長：248nm）やArFエキシマレーザー光（波長：193nm）を用いているが、これに限定させることなく、たとえば300nm以下の波長を有する露光光に対して本発明を適用することもできる。さらに、上述の実施形態では、照明光学装置を備えた投影露光装置を例にとって本発明を説明したが、マスク以外の被照射面を照明するための一般的な照明光学装置に本発明を適用することができることは明らかである。

【0085】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明のオプティカルインテグレータでは、第1光学部材と第2光学部材との合成系が第2光学部材の射出面よりも所定距離だけ後側に第1方向に関する後側焦点を有し、第1光学部材が第1光学部材の射出面と第2光学部材の入射面との間の光路中に第2方向に関する後側焦点を有する。この構成に基づいて、オプティカルインテグレータの微小屈折面の面形状のばらつきに起因する歪曲収差の変化を小さく抑えるために第1光学部材と第2光学部材との屈折力比を1に近づけても、各光学面におけるエネルギー密度を小さく抑えることができ、ひいては光エネルギー照射による光学部材の破損を回避して十分に長い部品寿命を確保することができる。

40

【0086】

すなわち、本発明のオプティカルインテグレータでは、たとえばエッチング加工により一体的に形成される微小屈折面の面形状のばらつきに起因する歪曲収差の変化を小さく抑え

50

、ひいては被照射面における照度分布が受ける影響を低減することができる。したがって、本発明の照明光学装置では、微小屈折面の製造誤差が照度分布に与える影響が小さく抑えられたオプティカルインテグレータを用いて、所望の照明条件で被照射面を照明することができる。また、本発明の露光装置および露光方法では、所望の照明条件で被照射面を照明することのできる高性能な照明光学装置を用いて、良好な照明条件の下で良好な投影露光を行うことにより良好なデバイスを製造することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の基本的原理を説明する図である。

【図 2】図 1 のマイクロフライアイレンズにおける光学的特性を説明する図である。

【図 3】本発明の実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。 10

【図 4】本実施形態にかかるマイクロフライアイレンズの全体構成を概略的に示す斜視図である。

【図 5】本実施形態にかかるマイクロフライアイレンズの作用を説明する図である。

【図 6】本実施形態の比較例にかかるマイクロフライアイレンズの作用を説明する図である。

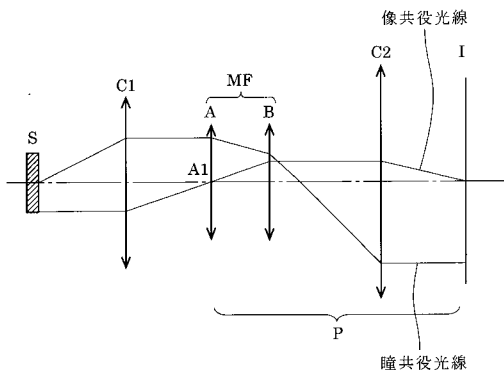
【図 7】マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法のフローチャートである。

【図 8】マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得る際の手法のフローチャートである。 20

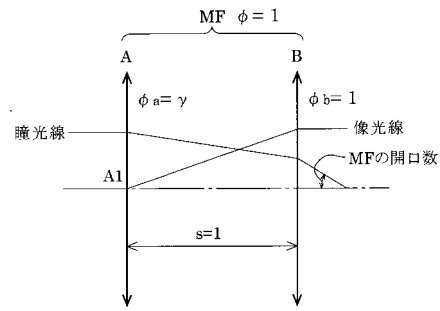
【符号の説明】

S, 1 光源
 C 1, C 2, 9 コンデンサー光学系
 M F, 8 マイクロフライアイレンズ
 4 回折光学素子
 5 アフォーカルズームレンズ
 6, 6 0, 6 1 回折光学素子
 7 ズームレンズ
 8 a 第 1 フライアイ部材
 8 b 第 2 フライアイ部材
 M マスク
 P L 投影光学系
 W ウェハ 30

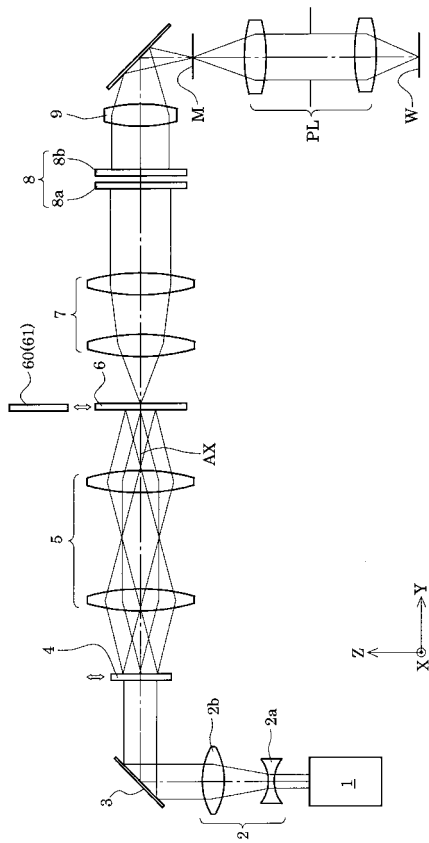
【 図 1 】



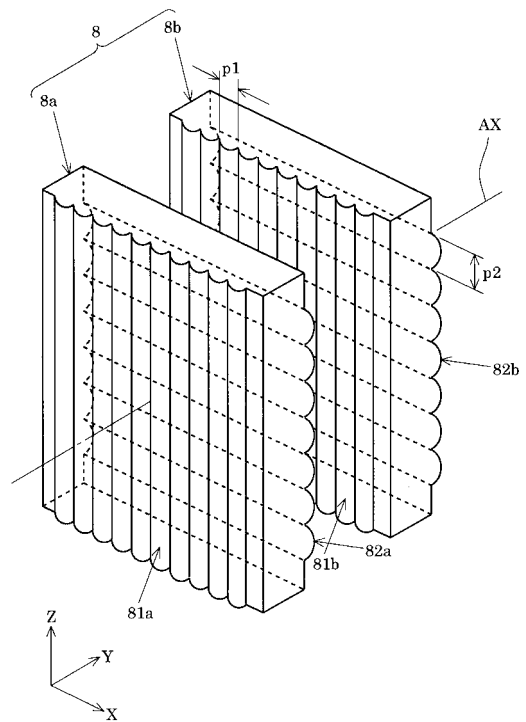
【 図 2 】



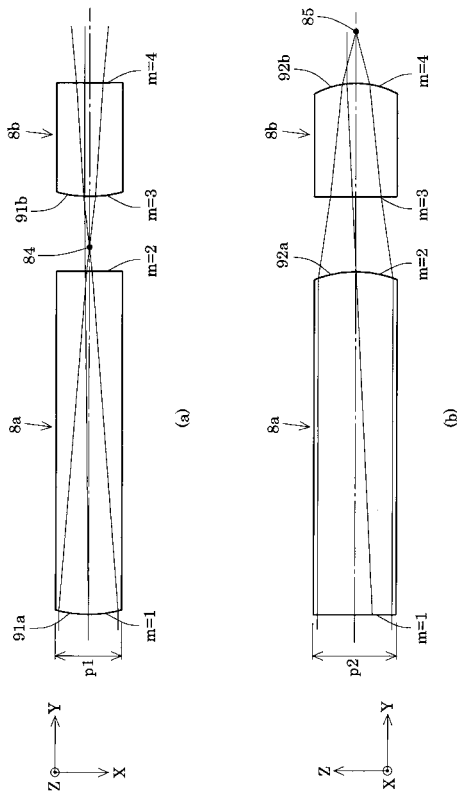
【 図 3 】



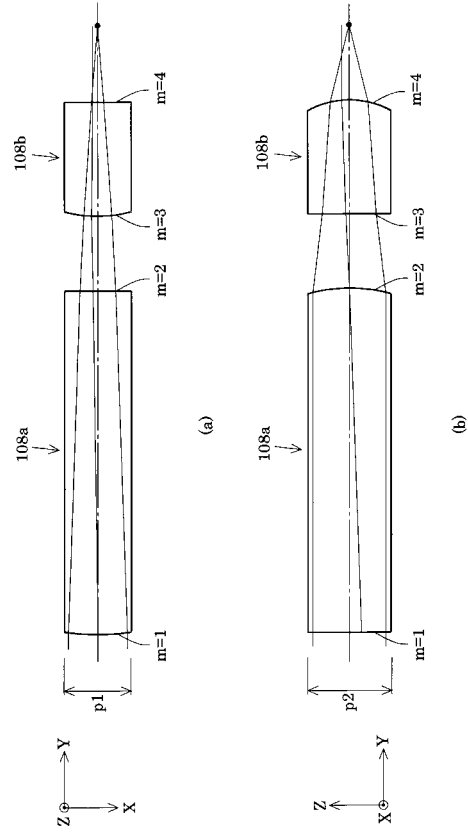
【 図 4 】



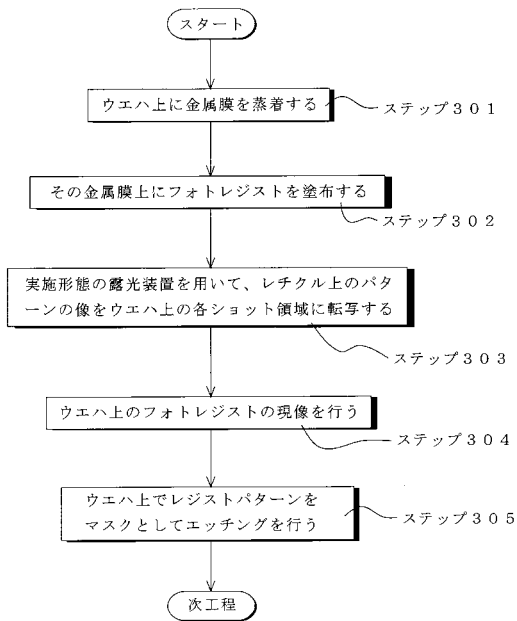
【図5】



【図6】



【図7】



【図8】

