

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6643466号

(P6643466)

(45) 発行日 令和2年2月12日(2020.2.12)

(24) 登録日 令和2年1月8日(2020.1.8)

(51) Int.Cl.	F I				
G03F 7/20	(2006.01)	G03F 7/20	502		
G03F 1/84	(2012.01)	G03F 7/20	503		
G02B 19/00	(2006.01)	G03F 1/84			
G01N 21/956	(2006.01)	G02B 19/00			
G01N 21/84	(2006.01)	G01N 21/956	A		
請求項の数 34 (全 37 頁) 最終頁に続く					

(21) 出願番号	特願2018-515432 (P2018-515432)	(73) 特許権者	503263355
(86) (22) 出願日	平成27年9月23日 (2015.9.23)		カール・ツァイス・エスエムティー・ゲー
(65) 公表番号	特表2018-531412 (P2018-531412A)		ムベーパー
(43) 公表日	平成30年10月25日 (2018.10.25)		ドイツ連邦共和国、73447 オーバー
(86) 国際出願番号	PCT/EP2015/071826		コッヘン、ルドルフ・エーバー・シュトラ
(87) 国際公開番号	W02017/050360		ーセ 2
(87) 国際公開日	平成29年3月30日 (2017.3.30)	(74) 代理人	100094569
審査請求日	平成30年5月23日 (2018.5.23)		弁理士 田中 伸一郎
		(74) 代理人	100088694
			弁理士 弟子丸 健
		(74) 代理人	100067013
			弁理士 大塚 文昭
		(74) 代理人	100086771
			弁理士 西島 孝喜
最終頁に続く			

(54) 【発明の名称】 マイクロリソグラフィ投影装置を動作させる方法およびそのような装置の照明システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

マイクロリソグラフィ投影装置の照明システムを動作させる方法であって、

a) 変調平面 (57) 内に配置された複数のマイクロミラー (56) によって形成される変調面 (222) を有する空間光変調器 (52) を提供するステップであり、各マイクロミラーは、マイクロミラーごとに個々に変更することができる向きを有するミラー面 (224-1-1~224-4-9) を備える、提供するステップと、

b) 前記マイクロミラーのうちの少なくとも1つについて、前記ミラー面に関連する少なくとも1つのパラメータを測定するステップと、

c) 前記ミラー面の前記向きを、ステップb) において測定されている前記少なくとも1つのパラメータに応じて制御するステップと、

d) 前記変調面 (222) 上に光パターンを生成するステップと、

e) 前記光パターンの像を、前記変調平面 (57) に対して光学的に共役であるラスト視野平面 (84) 内に配置された複数の光入射ファセット (75) を有する光学インテグレート (60) の前記ラスト視野平面 (84) 上に形成するステップと、

f) マスク (16) 上で前記光入射ファセット (75) の像を重ね合わせるステップとを含む、方法。

【請求項 2】

マイクロリソグラフィ投影装置の照明システムを動作させる方法であって、

a) 変調平面 (57) 内に配置された複数のマイクロミラー (56) によって形成される

10

20

変調面（２２２）を有する空間光変調器（５２）を提供するステップであり、各マイクロミラーは、マイクロミラーごとに個々に変更することができる向きを有するミラー面（２２４－１－１～２２４－４－９）を備える、提供するステップと、
b) 前記マイクロミラーのうちの少なくとも１つについて、前記ミラー面に関連する少なくとも１つのパラメータを測定するステップと、
c) 前記ミラー面の前記向きを、ステップb)において測定されている前記少なくとも１つのパラメータに応じて制御するステップと、
d) 前記変調面（２２２）上に光パターンを生成するステップと、
e) 前記変調平面（５７）に対して光学的に共役である視野平面（８４）上に前記光パターンの像を形成するステップとを含む、方法。

10

【請求項３】

前記少なくとも１つのパラメータは、前記ミラー面（２２４－１－１～２２４－４－９）の位置および前記ミラー面の向きからなる群から選択される、請求項１又は２に記載の方法。

【請求項４】

ステップb)は、マスク平面（８８）、または、前記マスク平面に光学的に共役な平面内の少なくとも１つの視野点において、角度放射照度分布を測定するステップを含む、請求項１から３までのいずれか１項に記載の方法。

【請求項５】

前記少なくとも１つのパラメータが前記ミラー面（２２４－１－１～２２４－４－９）の前記向きであり、前記マスク平面（８８）、または、前記マスク平面に光学的に共役な前記平面内の複数の視野点において、前記角度放射照度分布が測定される、請求項４に記載の方法。

20

【請求項６】

前記角度放射照度分布は、前記複数の視野点において同時に測定される、請求項５に記載の方法。

【請求項７】

前記複数の視野点と関連付けられる位置に、複数の位置解決光センサ（２０８a、２０８b）が配置されており、各光センサは、関連する前記視野点の前記角度放射照度分布を測定する、請求項６に記載の方法。

30

【請求項８】

ステップb)は、前記マスク平面（８８）、または、前記マスク平面に光学的に共役な平面内の少なくとも１つの視野点において、放射照度を測定するステップを含む、請求項１から７までのいずれか１項に記載の方法。

【請求項９】

前記少なくとも１つのパラメータが前記ミラー面（２２４－１－１～２２４－４－９）の前記向きであり、前記マスク平面（８８）、または、前記マスク平面に光学的に共役な平面内の複数の視野点において、前記放射照度が測定される、請求項８に記載の方法。

【請求項１０】

前記放射照度は、前記複数の視野点において同時に測定される、請求項９に記載の方法。

40

【請求項１１】

前記複数の視野点に、複数の光センサ（２０４a、２０４b）が配置されており、各光センサは、関連する前記視野点において前記放射照度を測定する、請求項１０に記載の方法。

【請求項１２】

ステップb)は、前記ミラー面（２２４－１－１～２２４－４－９）の形状、前記光入射ファセット（７５）に対する前記変調面（２２２）の空間配置、および、前記光入射ファセット（７５）の形状に基づいて、前記少なくとも１つのパラメータを計算するステッ

50

プを含む、請求項 1 から 1 1 までのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 1 3】

ステップ b) の間、隣接するミラー面が前記マスク (1 6) 上で光を重ね合わせないように、前記ミラー面 (2 2 4 - 1 - 1 ~ 2 2 4 - 4 - 9) の前記向きが制御される、請求項 1 から 1 2 までのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 1 4】

ステップ b) の間、前記空間光変調器に対して固定して配置されているマーカ点 (1 6 0 a、1 6 0 b、1 6 0 c ; 1 6 6 a、1 6 6 b、1 6 6 c) の位置が検出される、請求項 1 から 1 3 までのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 1 5】

前記空間光変調器 (5 2) は少なくとも 2 つの変調器ユニット (5 2 a、5 2 b、5 2 c) を備え、各変調器ユニットは、複数のマイクロミラー (5 6) を備え、少なくとも 1 つのマーカ点 (1 6 0 a、1 6 0 b、1 6 0 c) を支持する、請求項 1 4 に記載の方法。

【請求項 1 6】

前記マーカ点は、投影光 (P L) が衝突しない、前記変調器ユニット (5 2 a、5 2 b、5 2 c) の後ろ側に配置される、請求項 1 5 に記載の方法。

【請求項 1 7】

前記マーカ点 (1 6 6 a、1 6 6 b、1 6 6 c) は、前記光学インテグレータ (6 0) に対して固定して配置されている位置解決光検出器 (1 6 8 a、1 6 8 b、1 6 8 c) 上に結像される、請求項 1 4 から 1 6 までのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 1 8】

前記マーカ点 (1 6 6 a、1 6 6 b、1 6 6 c) は、前記光学インテグレータ (6 0) 上に前記光パターンの前記像を形成する結像光学系 (5 8) によって前記光検出器 (1 6 8 a、1 6 8 b、1 6 8 c) 上に結像される、請求項 1 7 に記載の方法。

【請求項 1 9】

前記変調面 (2 2 2) は、前記マイクロミラー (5 6) または前記マイクロミラー間の構造によって反射または散乱された光を検出するカメラ (1 7 1) によって観測される、請求項 1 から 1 8 までのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 2 0】

ステップ c) は、ステップ b) において前記ミラー面が側方に変位していることが測定された場合に、制御パターンを側方にシフトするステップを含む、請求項 1 から 1 9 までのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 2 1】

前記照明システムは更に複数のミラー (4 0) を含むミラーアレイ (3 8) を含む瞳形成ユニット (3 6) を含み、

前記方法が、前記瞳形成ユニット (3 6) のミラーによって生成される偏向角を変化させることによって可変である位置において前記変調平面 (5 7) 上のスポット (9 4) を照明するステップをさらに含む、請求項 1 から 2 0 までのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 2 2】

マイクロリソグラフィ投影装置の照明システムであって、
 a) 変調平面 (5 7) 内に配置された複数のマイクロミラー (5 6) によって形成される変調面 (2 2 2) を有する空間光変調器 (5 2) であり、各マイクロミラーは、マイクロミラーごとに個々に変更することができる向きを有するミラー面 (2 2 4 - 1 - 1 ~ 2 2 4 - 4 - 9) を備える、空間光変調器 (5 2) と、
 b) 前記マイクロミラーのうちの少なくとも 1 つについて、前記ミラー面に関連する少なくとも 1 つのパラメータを測定するように構成されている測定デバイス (1 5 0 ; 2 0 0) と、
 c) 前記測定デバイスによって測定された前記少なくとも 1 つのパラメータに応じて、前記マイクロミラー (5 6) の向きを制御するように構成されている制御ユニット (9 0) と、

10

20

30

40

50

d) 前記変調平面(57)に対して光学的に共役であるラスト視野平面(84)内に配置された複数の光入射ファセット(75)を有する光学インテグレータ(60)と、

e) 前記ラスト視野平面(84)上に前記変調面(222)の像を形成するように構成されている結像光学系(58)と

を備える、照明システム。

【請求項23】

マイクロリソグラフィ投影装置の照明システムであって、

a) 変調平面(57)内に配置された複数のマイクロミラー(56)によって形成される変調面(222)を有する空間光変調器(52)であり、各マイクロミラーは、マイクロミラーごとに個々に変更することができる向きを有するミラー面(224-1-1~224-4-9)を備える、空間光変調器(52)と、

b) 前記マイクロミラーのうちの少なくとも1つについて、前記ミラー面に関連する少なくとも1つのパラメータを測定するように構成されている測定デバイス(150; 200)と、

c) 前記測定デバイスによって測定された前記少なくとも1つのパラメータに応じて、前記マイクロミラー(56)の向きを制御するように構成されている制御ユニット(90)と、

d) 前記変調平面(57)に対して光学的に共役である視野平面(84)上に前記変調面(222)の像を形成するように構成されている結像光学系(58)と

を備える、照明システム。

【請求項24】

前記測定デバイス(200)は、マスク平面(88)、または、前記マスク平面に光学的に共役な平面内の少なくとも1つの視野点において、角度放射照度分布を測定するように構成されている瞳測定ユニット(202a、202b)を備える、請求項22または23に記載の照明システム。

【請求項25】

前記瞳測定ユニット(202a、202b)は、前記マスク平面(88)、または、前記マスク平面に光学的に共役な平面内の複数の視野点において同時に、前記角度放射照度分布を測定するように構成されている、請求項24に記載の照明システム。

【請求項26】

前記瞳測定ユニット(202a、202b)は、前記複数の視野点と関連付けられる位置に配置されている複数の位置解決光センサ(218a、218b)を備え、各光センサは、関連する前記視野点の前記角度放射照度分布を測定する、請求項24または25に記載の照明システム。

【請求項27】

前記測定デバイス(200)は、前記マスク平面(88)、または、前記マスク平面に光学的に共役な平面内の少なくとも1つの視野点において、放射照度を測定するように構成されている放射照度測定ユニット(204a、204b)を備える、請求項22から26までのいずれか1項に記載の照明システム。

【請求項28】

前記少なくとも1つのパラメータが前記ミラー面(224-1-1~224-4-9)の前記向きであり、前記放射照度測定ユニット(204a、204b)は、前記マスク平面(88)、または、前記マスク平面に光学的に共役な前記平面内の複数の視野点において同時に、前記放射照度を測定するように構成されている、請求項27に記載の照明システム。

【請求項29】

前記放射照度測定ユニット(204a、204b)は、前記複数の視野点に配置されている複数の光センサ(234a、234b)を含み、各光センサは、関連する前記視野点において前記放射照度を測定するように構成されている、請求項28に記載の照明システム。

10

20

30

40

50

【請求項 3 0】

前記制御ユニット(90)は、前記ミラー面(224-1-1~224-4-9)の形状、前記光入射ファセット(75)に対する前記変調面(222)の空間配置、および、前記光入射ファセットの形状に基づいて、前記少なくとも1つのパラメータを計算するように構成されている、請求項22から29までのいずれか1項に記載の照明システム。

【請求項 3 1】

前記測定デバイス(150)は、前記空間光変調器(52)に対して固定して配置されているマーカ点(160a、160b、160c; 166a、166b、166c)と、前記マーカ点の位置を検出するように構成されている検出器(162; 168a、168b、168c)とを備える、請求項22から30までのいずれか1項に記載の照明システム。

10

【請求項 3 2】

前記検出器は、前記結像光学系(58)が、位置解決光検出器(168a、168b、168c)上に前記マーカ点(166a、166b、166c)の像を形成するように、前記光学インテグレータ(60)に対して固定して配置される前記位置解決光検出器である、請求項31に記載の照明システム。

【請求項 3 3】

前記測定デバイスは、前記変調面(222)を観測し、前記マイクロミラー(56)または前記マイクロミラー間の構造によって反射または散乱された光を検出するように構成されているカメラ(171)を備える、請求項22から32までのいずれか1項に記載の照明システム。

20

【請求項 3 4】

複数のミラー(40)を含むミラーアレイ(38)を含む瞳形成ユニット(36)を更に含み、

前記瞳形成ユニット(36)の前記ミラーアレイ(38)の各ミラーについて、前記ミラーが、前記ミラーによって生成される偏向角を変化させることによって可変である位置において前記変調平面(57)上のスポット(94)を照明するよう構成された、請求項22から33までのいずれか1項に記載の照明システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

30

【0001】

本発明は、概してマイクロリソグラフィの分野に関し、特に、投影露光装置またはマスク検査装置において使用される照明システムに関する。本発明は、特に、そのようなシステムによって、角度放射照度分布(すなわち、照明設定)を視野に応じて変更することができることに関する。

【背景技術】

【0002】

マイクロリソグラフィ(フォトリソグラフィまたは単にリソグラフィとも称される)は、集積回路、液晶ディスプレイおよび他の微細構造デバイスを作製するための技術である。マイクロリソグラフィの工程は、エッチングの工程とともに、基板、例えば、シリコンウェハ上に形成されている薄膜スタック内にフィーチャをパターンニングするために使用される。作製の各層において、ウェハは最初に、遠紫外線(DUV)または真空紫外線(VUV)のような放射に感受性のある材料であるフォトレジストでコーティングされる。次に、上部にフォトレジストを有するウェハは、投影露光装置内において投影光で露光される。装置は、パターンを含むマスクをフォトレジスト上に投影し、それによって、フォトレジストは、マスクパターンによって決定される特定の箇所においてのみ露光される。露光後、フォトレジストは現像されて、マスクパターンに対応する像が生成される。その後、エッチング工程によって、パターンがウェハ上の薄膜スタックへと転写される。最後に、フォトレジストが除去される。異なるマスクを用いてこの工程を繰り返すことによって、多層微細構造構成要素がもたらされる。

40

50

投影露光装置は、一般的に、光源と、光源によって生成される投影光でマスクを照明する照明システムと、マスクを整列させる (aligning) ためのマスクステージと、投影対物部 (projection objective) と、フォトリジストをコーティングされたウェハを整列させる (aligning) ためのウェハアラインメントステージ (wafer alignment stage) とを含む。照明システムは、例えば、矩形または湾曲したスリットの形状を有し得る、マスク上の視野を照明する。

【0003】

現行の投影露光装置においては、2つの異なるタイプの装置の間で区別することができる。1つのタイプにおいては、ウェハ上の各標的部分は、1度にマスクパターン全体を標的部分上に露光することによって照射される。そのような装置は一般的に、ウェハステップと称される。一般的にステップアンドスキャン装置またはスキャナと称される他方のタイプの装置においては、同時に動作方向に平行または逆平行に基板を動かしながら、走査方向に沿った投影ビームの下でマスクパターンを漸進的に走査することによって、各標的部分が照射される。ウェハの速度とマスクの速度との比は、投影対物部の倍率に等しく、これは通常1よりも小さく、例えば1:4である。

「マスク」(またはレチクル)という用語は、パターンング手段として広範に解釈されるべきであることを理解されたい。一般的に使用されるマスクは、不透明または反射性パターンを含み、例えば、バイナリ、レベンソン型位相シフト (alternating phase - shift)、ハーフトーン型位相シフト (attenuated phase - shift) または様々なハイブリッドマスクタイプのものであり得る。しかしながら、例えば、プログラム可能ミラーまたはLCDアレイとして実現されるマスクのような、アクティブマスクもある。

【0004】

微細構造デバイスを製造するための技術が進歩するにつれて、照明システムに対する要求がますます増大している。理想的には、照明システムは、マスク上の照明視野の各点を、良好に規定された放射照度および角度放射照度分布を有する投影光によって照明する。角度放射照度分布という用語は、マスク平面内の特定の点に向かって収束する光束の全光エネルギーが、光束を構成する光線の様々な方向の間でどのように分配されるかを表す。

マスクに衝突する投影光の角度放射照度分布は通常、フォトリジスト上に投影すべきパターンの種類に合わせて適合される。多くの場合、最適な角度放射照度分布は、パターン内に含まれるフィーチャのサイズ、向きおよびピッチに応じて決まる。最も一般的に使用されている投影光の角度放射照度分布は、従来型、環状、二重極、および四重極照明設定と称される。これらの用語は、照明システムの瞳平面内の放射照度分布を表す。環状照明設定では、例えば、瞳平面内で環状領域のみが照明される。したがって、投影光の角度放射照度分布には小さな角度範囲しか存在せず、すべての光線が同様の角度で斜めにマスク上に衝突する。

【0005】

所望の照明設定を達成するようにマスク平面内の投影光の角度放射照度分布を修正するために、様々な手段が当技術分野で知られている。最も単純な事例では、1つまたは複数の開口を備える絞り (stop) (絞り (diaphragm)) が、照明システムの瞳平面内に位置決めされる。瞳平面内の位置は、マスク平面のようなフリーエ関連視野平面内の角度に転換されるため、瞳平面内の開口のサイズ、形状および位置が、マスク平面内の角度放射照度分布を決定づける。しかしながら、照明設定を何か変更するには、絞りを交換する必要がある。これによって、開口のサイズ、形状または位置がわずかに異なる非常に多数の絞りが必要になるため、照明設定を微調整するのは困難になる。さらに、絞りを使用することによって、必然的に光損失がもたらされ、したがって、装置のスループットが低下する。

それゆえ、多くの一般的な照明システムは、瞳平面の照明を、少なくとも一定程度まで連続的に変更することを可能にする調整可能要素を備える。多くの場合、これらのシステムは、瞳平面において所望の空間放射照度分布を生成するために、交換可能な回折光学素

10

20

30

40

50

子を使用する。拡大光学素子および一対のアキシコン素子が回折光学素子と瞳平面との間に設けられている場合、この空間放射照度分布をある程度まで調整することが可能である。

【0006】

近年、瞳平面を照明するミラーアレイを使用することが提案されている。欧州特許出願公開第1 2 6 2 8 3 6号から知られる照明システムでは、ミラーアレイは、1000個を超える微小ミラーを備える微小電気機械システム(MEMS)として実現される。各ミラーは、互いに垂直な2つの異なる平面内で傾斜させることができる。したがって、そのようなミラーデバイスに入射する放射は、半球のほぼ任意の所望の方向に反射させることができる。各ミラーは、ミラーを傾斜させることによって自由に移動可能であるスポットを、瞳平面内に生成する。

10

同様の照明システムが、米国特許出願公開第2006/0087634号、米国特許第7,061,582号、国際公開第2005/026843号および国際公開第2010/006687号から知られている。

【0007】

さらに上述したように、通常、少なくとも走査積分後に、放射照度および角度放射照度分布が同じマスク上のすべての点を照明することが望ましい。マスク上の点が異なる放射照度で照明される場合、これは通常、ウェハレベルでの限界寸法(CD)の望ましくない変動をもたらす。例えば、放射照度変動の存在下では、感光性上のマスク上の均一なラインの像も、その長さに沿って放射照度変動を有する場合がある。レジストの露光閾値は固定であるため、そのような放射照度変動は、ラインの像によって画定される構造の幅変動に直接転換される。

20

【0008】

角度放射照度分布が、マスク上の照明視野にわたって不意に変動する場合、これも、感光面上に生成される像の品質に悪影響を及ぼす。例えば、角度放射照度分布が完全に平衡されていない、すなわち、マスクポイント上の片側から、反対側よりも多くの光が衝突する場合、感光面上の共役像点は、感光面が完全に投影対物部の焦平面(focal plane)上にあるのではない場合、側方にシフトされる。

以下のいくつかの手法において、角度放射照度分布を視野に応じて修正することができる方法が記載されている。

30

【0009】

国際公開第2012/100791号は、照明システムの瞳平面内に所望の空間放射照度分布を生成するためにミラーアレイが使用される照明システムを開示している。瞳平面に近接して、複数の光入射ファセットを有するフライアイ光学インテグレータが配置されている。光入射ファセットの像が、マスク上で重ね合わされる(superimposed)。ミラーアレイによって生成される光スポットは、光入射ファセットの総面積よりも少なくとも5分の1である面積を有する。これによって、光入射ファセット上に可変の光パターンを生成し、したがって、照明視野の異なる部分では異なる角度放射照度分布を生成することが可能になる。例えば、照明視野の一部ではX二重極の、および、照明視野の別の部分ではY二重極の照明設定を生成することができる。

40

【0010】

国際公開第2012/028158号は、フライアイ光学インテグレータの光入射ファセット上の放射照度分布が、光学インテグレータの前に配置されている複数の変調器ユニットを用いることによって修正される照明システムを開示している。各変調器ユニットは、光入射ファセットのうちの1つと関連付けられ、光を遮断することなく、関連する光入射ファセット上の空間および/または角度放射照度分布を可変に再分布させる。このように、例えば、異なる半導体デバイスと関連付けられる単一のダイ上の2つ以上の異なる部分を、異なる照明設定で照明することが可能である。

【0011】

国際公開第2015/074746号は、フライアイ光学インテグレータの光入射ファ

50

セット上の放射照度分布が、光入射ファセット上にデジタルミラーデバイス（DMD）を結像（i m a g i n g）することによって修正される手法を開示している。この手法は、上述した国際公開第2012/100791から既知である照明システムにおいてそうであるように、アナログマイクロミラーアレイを用いて非常に小さい光スポットを生成する必要がないため、有利である。照明視野にわたる角度放射照度分布が完全に均一になる（すなわち、視野とは無関係になる）ように、角度放射照度分布の視野依存性が調整される。また、時として、角度放射照度分布の視野依存性を意図的に導入することが望ましい場合があることも、言及しておく。これは、例えば、投影対物部またはマスクが視野依存特性を有する場合に好都合であり得る。マスクに関する限り、そのような視野依存特性は通常、フィーチャが異なる向きまたは寸法を有する結果である。そのような視野依存特性からもたらされる悪影響は、角度放射照度分布の視野依存性を選択的に導入することによって、首尾よく低減することができる。

10

しかしながら、前述の国際公開第2015/074746号から既知である照明システムによって生成される角度放射照度分布は、デジタルミラーデバイスが正確に制御されていても、しばしば予測される標的分布からわずかに逸脱することが分かっている。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

本発明の目的は、デジタルミラーデバイスまたは別の空間光変調器を用いることによって、角度放射照度分布をマスクレベルで確実に予測可能に修正することを可能にする、マイクロリソグラフィ投影装置を動作させる方法を提供することである。

20

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明によれば、この目的は、デジタルミラーデバイス（DMD）などの空間光変調器が提供されるステップa）を含む方法によって達成される。空間光変調器は、複数のマイクロミラーによって形成される変調面を有する。各マイクロミラーは、マイクロミラーごとに個々に変更することができる向きを有するミラー面を備える。ステップb）において、ミラー面に関連する少なくとも1つのパラメータが、マイクロミラーのうちの少なくとも1つについて測定される。ステップc）において、ミラー面の向きが、ステップb）において測定されている少なくとも1つのパラメータに応じて制御される。その後、ステップd）において、変調面上に光パターンが生成され、ステップe）において、複数の光入射ファセットを有する光学インテグレート上に上記光パターンの像が形成され、最後のステップf）においてマスク上で光入射ファセットの像が重ね合わされる。

30

【0014】

本発明は、一方における現実の角度放射照度分布と、所望の標的放射照度分布との間に観測されることがある小さい逸脱が、主に、マイクロミラーのミラー面に関連する特定のパラメータが指定の値内にもはやないことに起因するという概念に基づく。この文脈において最も重要なパラメータは、ミラー面の位置および向きである。「位置」という用語は、この文脈においては、ミラー面が傾けられるときに動かない傾斜軸のような要素のデカルト座標を示すものとする。ミラー面の向きとは、傾斜軸に対するミラー面の傾斜角度を示す。マイクロミラーが2つの傾斜軸を有する場合、向きは、それに応じて2つの傾斜角度によって画定される。

40

【0015】

ミラー面が指定の位置にない場合、または、指定の向きでない場合、角度放射照度分布が影響を受けることは明らかである。しかしながら、空間光変調器は通常、照明システムのハウジング内に固定して配置されており、同じことが、変調面の像が形成される光学インテグレートにも当てはまるため、ミラー面と光学インテグレートとの間の相対位置も固定されるはずである。しかしながら、光入射ファセットおよびミラー面の寸法がごく小さいものである結果として、空間光変調器および/または光学インテグレートのドリフト運動がたとえ極度に小さくても、これはマスクレベルで角度放射照度分布を補償するのに十

50

分であることが分かっている。例えば、空間光変調器と光学インテグレータは両方とも、たとえ小さいにしても衝突する投影光の一部を吸収するため、そのようなドリフト運動は、熱的効果によって引き起こされる場合がある。それゆえ、これらの構成要素は、照明システムが長期間にわたって動作させる場合に、温度が上昇する。

同様の考慮事項が、ミラー面の向きにも当てはまる。ミラー面の総数は $10^6 \sim 10^8$ の範囲内であり得るが、ただ1つのミラー面の不具合であっても、マスクレベルにおける角度放射照度分布に顕著な影響を及ぼす場合があることが分かっている。

ミラー面に関連し、ステップb)において測定され得る別のパラメータはミラー面の反射率である。反射率は、照明システムの動作中に、高エネルギーの投影光によって引き起こされる反射性コーティングの材料劣化の結果として低減する場合がある。

10

【0016】

本発明によれば、ミラー面に関連し、位置、向き、または、ステップb)において測定される別のパラメータが、照明システムの通常動作中にマイクロミラーの向きが制御されるときに、考慮に入れられる。例えば、ステップb)において、ミラー面が側方に変位していることが測定された場合、ステップc)は、制御パターンを側方にシフトするステップを含むことができる。これは、例えば、「オン」および「オフ」状態の特定の三次元パターンが、1つまたは2つの方向に沿ってマイクロミラー1つ分（またはさらには2つ分以上）だけ、単純にシフトされることを含んでもよい。その後、一方における空間光変調器と他方における光学インテグレータとの間の相対位置の変化を、マイクロミラーの制御を修正することによって補償することができる。

20

特定のマイクロミラーが故障し、それによってその向きをそれ以上変更することができない場合、または、反射ミラー面が劣化し、それによって、反射される投影光が予測されるよりも少ない場合、これは、同じ視野点を照明する他のマイクロミラーの制御を適切に変更することによって、部分的に補償することができる。

以下において、ミラー面に関連する少なくとも1つのパラメータを効率的に測定することができる種々の手法が説明される。

【0017】

照明システム内で利用可能なスペースは制限されていることが多いため、1つの手法は、少なくとも1つのパラメータを、ミラー面上で直接的に測定するのではなく、マスクレベルにおいてミラー面によって生成される効果のみを測定することである。このとき、必要な測定デバイスは、ミラー面から遠隔して、照明システムの外側から容易にアクセス可能であるマスクまたはウェハ平面のような位置に配置することができる。

30

【0018】

この「遠隔」手法の特定の一実施形態によれば、ステップb)は、少なくとも、マスク平面、または、マスク平面に光学的に共役な平面内の少なくとも1つの視野点において、角度放射照度分布を測定するステップを含む。通常、多数のマイクロミラーが、マスク平面または別の視野平面内の特定の視野点の照明に寄与する。そこから光が少なくとも1つの視野点に衝突する方向の測定値に基づいて、その後、これらのマイクロミラーの位置および向きを計算することができる。このように、例えば、1つの視野点における単一の測定値によって、空間光変調器に関連する位置情報を得ることが可能である。

40

すべてのミラー面の向きが決定されるべきである場合、角度放射照度分布は、マスク平面、または、マスク平面に光学的に共役な平面内の複数の視野点において測定される必要がある。これは、マイクロミラーの一部のみが単一の視野点の照明に寄与するためであり、すべてのマイクロミラーについて向きが決定されるべきである場合、それに応じて多数の測定が、マスクレベルで実施される必要がある。これは時間がかかる工程であるため、角度放射照度分布は、複数の視野点において同時に測定されることが好ましい。

この目的のために、複数の位置解決光センサ (position resolving light sensors) を、複数の視野点と関連付けられる位置に配置することができる。各光センサは、関連する視野点の角度放射照度分布を測定する。

【0019】

50

ミラー面に関連する少なくとも1つのパラメータを測定するための同様の「遠隔」手法は、少なくとも、マスク平面、または、マスク平面に光学的に共役な平面内の少なくとも1つの視野点において、放射照度を測定することである。この手法は、マスク平面内の各視野点を、多数の異なるマイクロミラーから照明することができることを利用する。マイクロミラーは個々に制御することができるため、所与の時点において、1つのマイクロミラーのみが特定の視野点を照明するように、マイクロミラーを制御することが可能である。このように、マイクロミラーの向きに関する情報を容易に得ることができる。

ミラー面の位置を、照明される視野点の位置から計算することもできる。ミラー面が側方に変位している場合、マスク平面内のその像も、側方に変位する。

少なくとも、ミラー面の向きを測定するために、多数の測定が実施される必要がある。

それゆえ、複数の視野点において同時に放射照度を測定することが好ましい。この目的のために、複数の光センサが、複数の視野点に配置され得る。各光センサは、関連する視野点における放射照度を測定する。

【0020】

視野平面において放射照度または角度放射照度分布を測定することによる少なくとも1つのパラメータの遠隔測定は通常、ミラー面の形状、光入射ファセットに対する変調面の空間配置、および、光入射ファセットの形状に基づいて少なくとも1つのパラメータを計算するステップを必要とする。また、例えば、空間光変調器と、測定が実施される視野平面との間の光路内にあるすべての光学素子によって生成される光学的効果のような他の量も、考慮に入れる必要がある場合がある。

主に、回折および収差の結果として、マスク平面（または別の視野平面）上の隣接するマイクロミラーの像は、ある程度まで重なり合う場合がある。そのような重複は、1つまたは複数の視野点における放射照度または角度放射照度分布の測定値を損なう場合がある。

【0021】

そのような悪影響を低減するために、ミラー面は、隣接するミラー面がマスク上で光を重ね合わせないように制御することができる。例えば、測定中に変調面で生成される光パターンにおいて、「オン」状態にあるマイクロミラーを、「オフ」状態にあるマイクロミラーによって完全に包囲することができる。また、チェス盤状の光パターンは、視野平面内の隣接するミラー面の像の重複と関連付けられる任意の悪影響を大幅に低減する。

少なくとも1つのパラメータを測定するための別の手法は、空間光変調器に対して固定して配置されるマーカ点の位置を検出することを含む。この手法は、空間光変調器がドリフトする可能性がより高い一方で、照明システムの動作中に、光学インテグレータの位置は通常、非常に安定して維持することができるという知見に基づく。

【0022】

マーカ点は、空間光変調器の直上で、可能な限りマイクロミラーの近くに配置されることが好ましい。しかしながら、原則として、マーカ点を、空間光変調器の任意のドリフト運動がマーカ点に精密に伝達されるように、空間光変調器に堅固に接続されている支持構造上で、空間光変調器からさらに遠くに配置することも可能である。

マーカ点は、従来の位置検出器を用いることによってその位置を良好に検出することができる任意の要素または構造によって形成されてもよい。例えば、マーカ点は、干渉計測システムの測定光ビームが方向付けられ得る小さい反射面領域によって実現されてもよい。マーカ点はまた、レーザダイオード、または、測定光ビームを放出する別の発光素子によって形成されてもよい。

【0023】

この目的のために十分に大きい複数のマイクロミラーを備える空間光変調器を製造することは困難であるため、空間光変調器を、より容易に製造することができる2つ以上の変調器ユニットに分割することを想定してもよい。その場合、変調器ユニットは、変調器ユニットのうちの1つの隣接するマイクロミラー間の距離よりも大きい間隙によって分離される。光学インテグレータ上で、各変調器ユニットの活性領域の像をともにスティッチン

グする (s t i c h e s) スティッチング光学素子 (s t i t c h i n g o p t i c s) を設けることができる。スティッチング光学素子に関するさらなる詳細は、米国特許出願公開第 2 0 1 5 / 1 0 1 4 6 1 8 3 号に見出すことができる。

【 0 0 2 4 】

変調器ユニットが互いに分離される場合、変調器ユニットは、変調器ユニットの相対配置が照明システムの動作中に変化するように、異なる相対運動を実施することができる。たとえば変調器ユニットが共通の堅固な支持構造に取り付けられている場合であっても、支持構造が熱膨張する結果として、変調器ユニットの相対配置が変化する場合がある。これらの場合、各変調器ユニットに少なくとも1つのマーカ点を設けることが有利であり得る。このとき、変調器ユニット間の相対ドリフト運動を検出し、マイクロミラーの制御中に考慮に入れることができるように、各変調器ユニットの位置を個々に検出することができる。

10

マーカ点は、投影光が衝突しない、変調器ユニットの後ろ側に配置されることが好ましい。このとき、マーカ点の検出が投影光の変調と干渉する危険性はない。

マーカ点の位置を検出する特定の手法は、光学インテグレータに対して固定して配置される位置解決光検出器 (p o s i t i o n r e s o l v i n g l i g h t d e t e c t o r) 上でマーカ点を結像することである。この像は、光学インテグレータ上の光パターンの像も形成する結像光学系によって生成されることが好ましい。マーカ点はマイクロミラーの外部にあるため、光パターンの像とマーカ点の像とは重なり合わず、したがって、マーカ点の位置の測定は、投影光の変調とは干渉し得ない。また、この構成において、マーカ点は、例えば、測定光ビームを放出する反射面領域または光源によって形成されてもよい。

20

【 0 0 2 5 】

マーカ点が空間光変調器の直上に配置されない場合、マーカ点は、空間光変調器の支持構造上に固定されてもよい。同様に、位置解決光検出器が光学インテグレータの直上に配置されない場合、これは、光学インテグレータの支持構造上に固定されてもよい。支持構造は、光学インテグレータ、および、特に、空間光変調器の任意のドリフト運動が、それぞれ位置解決光検出器またはマーカ点に完全に伝達されるように、可能な限り堅固であるべきである。

少なくとも1つのパラメータを測定する別の手法は、マイクロミラーまたはマイクロミラー間の構造によって反射または散乱された光を検出するカメラによって、変調面を観測することである。原則として、光学インテグレータ上で光パターンの像を形成する、投影光および結像光学系の少なくとも一部を、そのような測定にも使用することは可能である。

30

【 0 0 2 6 】

しかしながら、変調面は、測定光、および、感光面上でマスクを結像するのに使用される投影光によって照明されることが好ましい。測定光および投影光の波長は、重なり合わない。カメラは、測定光の光路内に、ただし、投影光の光路の外部に配置される。これによって、ステップ b) における少なくとも1つのパラメータの測定が、投影光の変調と干渉しないことが保証される。測定光は、ミラー面の可能な向きのうちの少なくとも1つにおいて、測定光がカメラに向けられるように、変調面に向けられる必要がある。

40

【 0 0 2 7 】

ミラー面の向き、およびまた位置を検出するために、散乱した測定光を使用することもできる。その場合、ミラー面の位置または向きが変化する結果として、カメラの像平面内の放射照度が変化するように、散乱光の角度放射照度分布は異方性である必要がある。ミラー面の位置および/または向きを測定するために、隣接するミラー面間の間隙から反射した光を使用することすら可能である。これは、ミラー面の向きおよび位置が、マイクロミラー間の構造によって反射または散乱した光も変化させることに起因する。

そのような測定のために、異なる方向からの測定光を、空間光変調器の変調器面上に方向付けることが有利であり得る。

50

個々のマイクロミラーの像をカメラによって解像することができない場合、空間光変調器の位置はさらに、カメラを用いることによって検出することができる。その場合、マイクロミラー群から現れた測定光で十分であり得る。

マイクロミラーの向きを測定するための最も単純な手法は、共通の支持体上でマイクロミラーの下または間に配置されるオンボード電子センサに依拠することである。しかしながら、そのようなセンサでは、ミラー面の向きしか検出することができない。

【0028】

本発明は、複数のマイクロミラーによって形成される変調面を有する空間光変調器を備えるマイクロリソグラフィ投影装置の照明システムをも対象とする。各マイクロミラーは、マイクロミラーごとに個々に変更することができる向きを有するミラー面を備える。測定デバイスは、マイクロミラーのうちの少なくとも1つについて、ミラー面に関連する少なくとも1つのパラメータを測定するように構成されている。制御ユニットが、測定デバイスによって測定された少なくとも1つのパラメータに応じて、マイクロミラーの向きを制御するように構成されている。結像光学系が、例えば、複数の光入射ファセットを有する光学インテグレータのラスト視野平面のような、任意の視野平面上に、変調面の像を形成するように構成されている。

少なくとも1つのパラメータは、ミラー面の位置およびミラー面の向きからなる群から選択することができる。

【0029】

測定デバイスは、少なくとも、マスク平面、または、マスク平面に光学的に共役な平面内の少なくとも1つの視野点において、角度放射照度分布を測定するように構成されている。瞳測定ユニットを含むことができる。瞳測定ユニットは、マスク平面、または、マスク平面に光学的に共役な平面内の複数の視野点において、同時に角度放射照度分布を測定するように構成することができる。

その場合、瞳測定ユニットは、複数の視野点と関連付けられる位置に配置される複数の位置解決光センサを含むことができる。各光センサは、関連する視野点の角度放射照度分布を測定する。

測定デバイスは、代替的に、少なくとも、マスク平面、または、マスク平面に光学的に共役な平面内の少なくとも1つの視野点において、放射照度を測定するように構成されている放射照度測定ユニットを含むことができる。

少なくとも1つのパラメータがミラー面の向きである場合、放射照度測定ユニットは、マスク平面、または、マスク平面に光学的に共役な平面内の複数の視野点において、同時に放射照度を測定するように構成することができる。

放射照度測定ユニットは、複数の視野点に配置される複数の光センサを含むことができる。各光センサは、関連する視野点における放射照度を測定するように構成することができる。

制御ユニットは、ミラー面の形状、光入射ファセットに対する変調面の空間配置、および、光入射ファセットの形状に基づいて少なくとも1つのパラメータを計算するように構成することができる。

制御ユニットは、隣接するマイクロミラーがマスク上で光を重ね合わせないように、マイクロミラーの向きを制御するように構成することができる。

測定デバイスは、空間光変調器に対して固定して配置されるマーカ点と、マーカ点の位置を検出するように構成されている検出器とを備えることができる。

空間光変調器は、互いに分離されている少なくとも2つの変調器ユニットを備えることができる。各変調器ユニットは、複数のマイクロミラーを備え、少なくとも1つのマーカ点をサポートすることができる。

マーカ点は、投影光が衝突しない、変調器ユニットの後ろ側に配置することができる。

変調器ユニットは、変調器ユニットのうちの1つの隣接するマイクロミラー間の距離よりも大きい間隙によって分離することができる。

検出器は、結像光学系が、位置解決光検出器上にマーカの像を形成するように、光学イ

10

20

30

40

50

ンテグレートに対して固定して配置される位置解決光検出器であってもよい。

マーカ点は、測定光ビームを放出するように構成することができる。

マーカ点は、空間光変調器の支持構造上に固定されてもよい。位置解決光検出器は、光学インテグレート支持構造上に固定されてもよい。

測定デバイスは、変調面を観測し、マイクロミラーまたはマイクロミラー間の構造によって反射または散乱された光を検出するように構成されているカメラを備えることができる。

【0030】

測定デバイスは、変調面を照明するように構成されている測定光源を備えることができる。測定光、および、感光面内でマスクを結像するために使用される投影光の波長は、重なり合わない。カメラは、測定光の光路内に、ただし、投影光の光路の外部に配置されてもよい。

【0031】

空間光変調器は、第1の反射性または透過性ビーム偏向素子の第1のビーム偏向領域を含む瞳形成ユニットによって照明することができる。各ビーム偏向素子は、ビーム偏向素子によって生成される偏向角を変化させることによって可変である位置において、空間光変調器上のスポットを照明する。

【0032】

本発明はまた、空間光変調器が提供されるステップa)を含む、マイクロリソグラフィ投影装置の照明システムを動作させる方法をも対象とする。空間光変調器は、複数のマイクロミラーによって形成される変調面を有する。各マイクロミラーは、マイクロミラーごとに個々に変更することができる向きを有するミラー面を備える。ステップb)において、ミラー面に関連する少なくとも1つのパラメータが、マイクロミラーのうちの少なくとも1つについて測定される。ステップc)において、ミラー面の向きが、ステップb)において測定されている少なくとも1つのパラメータに応じて制御される。その後、ステップd)において変調面上に光パターンが生成され、ステップe)において、光パターンの像が視野平面上に形成される。

定義

「光」という用語は、本明細書においては、特定の可視光、UV、DUV、VUVおよびEUV光ならびにX線における任意の電磁放射を示すために使用される。

「光線」という用語は、本明細書においては、その伝播経路を線によって記述することができる光を示すために使用される。

「光束」という用語は、本明細書においては、視野平面内で共通の起源を有する複数の光線を示すために使用される。

「光ビーム」という用語は、本明細書においては、特定のレンズまたは別の光学素子を通過するすべての光を示すために使用される。

【0033】

「位置」という用語は、本明細書においては、三次元空間におけるボディの基準点の位置を示すために使用される。位置は通常、3つのデカルトまたは極座標のセットによって示される。それゆえ、向きおよび位置は、三次元空間におけるボディの配置を完全に記述する。

「面(surface)」という用語は、本明細書においては、三次元空間における任意の平面(plane)または曲面(curved surface)を示すために使用される。面は、ボディの一部であってもよく、または、視野もしくは瞳平面の場合に通常そうであるように、ボディから完全に分離していてもよい。

「視野平面」という用語は、本明細書においては、マスク平面、または、マスク平面に光学的に共役な任意の他の平面を示すために使用される。

【0034】

「瞳平面(pupil plane)」という用語は、視野平面に対してフーリエ関係が(少なくともおおよそ)確立される平面である。一般に、マスク平面内で複数の異なる

10

20

30

40

50

点を通過する周辺光線が瞳平面内で交差し、主光線が光軸に交差する。当該技術分野において使用される場合、「瞳平面」という用語は、事実上、数学的意味での平面ではなく、わずかに湾曲しており、そのため厳密に言えば、瞳面（瞳表面：p u p i l s u r f a c e）と称されるべきである場合にも使用される。

「均一」という用語は、本明細書においては、位置に依存しない特性を示すために使用される。

「光学ラスタ素子」という用語は、本明細書においては、他の同一のまたは同様の光学ラスタ素子とともに、各光学ラスタ素子が複数の隣接する光チャネルのうちの1つと関連付けられるように配置される、例えば、レンズ、プリズムまたは回折光学素子のような任意の光学素子を示すために使用される。

10

「光学インテグレータ」という用語は、本明細書においては、積 $NA \cdot a$ を増大させる光学系を示すために使用され、 NA は開口数であり、 a は照明視野面積である。

「集光装置（condenser）」という用語は、本明細書においては、2つの平面、例えば、視野平面および瞳平面の間にフーリエ関係を（少なくともおおよそ）確立する光学素子または光学系を示すために使用される。

【0035】

「共役平面」という用語は、本明細書においては、それらの間に結像関係が確立される平面を示す。共役平面の概念に関するより多くの情報は、論文 E. Delano entitled: "First-order Design and the

【数1】

20

y, \bar{y}

Diagram", Applied Optics, 1963, vol. 2, no. 12, pages 1251 - 1256 に記載されている。

「視野依存性」という用語は、本明細書においては、視野平面内の位置からの、ある物理量の任意の機能的依存性を示すために使用される。

【0036】

「角度放射照度分布」という用語は、本明細書においては、光束を構成する光線の角度に応じて、光束の放射照度がどれだけ変化するかを示すために使用される。通常、角度放射照度分布は、関数 $I_a(\quad, \quad)$ によって記述することができ、 \quad, \quad は光線の方向を記述する角座標である。角度放射照度分布が、異なる視野点において変化するような視野依存特性を有する場合、 I_a は、視野座標の関数でもある、すなわち、 $I_a = I_a(\quad, \quad, x, y)$ となる。角度放射照度分布の視野依存特性は、 x, y における $I_a(\quad, \quad, x, y)$ のテイラー（Taylor）（または別の適切な）展開の展開係数 a_{ij} のセットによって記述することができる。

30

【0037】

「放射照度（irradiance）」という用語は、本明細書においては、特定の視野点において測定することができる合計放射照度を示すために使用される。放射照度は、すべての角度 \quad, \quad にわたって積分することによって、角度放射照度分布から推定することができる。放射照度は通常、視野依存性をも有し、それによって、 $I_s = I_s(x, y)$ となり、 x, y は視野点の空間座標である。放射照度の視野依存性はまた、空間放射照度分布とも称される。走査型の投影装置において、ある視野点における光照射量は、放射照度を経時的に積分することによって得られる。

40

本発明の様々な特徴および利点は、添付の図面とともに取り上げられる以下の詳細な説明を参照することによって、より明瞭に理解することができる。

【図面の簡単な説明】

【0038】

【図1】本発明の一実施形態による投影露光装置の概略斜視図である。

【図2a】マスク上の角度放射照度分布の局所的変動を示す、図1に示す投影露光装置に

50

よって投影されるべきマスクの拡大斜視図である。

【図 2 b】異なるマスクパターンに対して適合されている異なる角度放射照度分布を示す、図 2 a と同様の拡大斜視図である。

【図 3】図 1 に示す装置の一部である照明システムを通る子午断面図である。

【図 4】図 3 に示されている照明システム内に含まれている第 1 のミラーアレイの斜視図である。

【図 5】図 3 に示されている照明システム内に含まれている第 2 のミラーアレイの斜視図である。

【図 6】図 3 に示されている照明システム内に含まれている光学インテグレータの斜視図である。

10

【図 7】図 4 および図 5 に示す第 1 のミラーアレイおよび第 2 のミラーアレイを通る概略子午断面図である。

【図 8】図 5 に示されているものであるが、2 つの極によって照明されている第 2 のミラーアレイの斜視図である。

【図 9】図 6 に示されているものであるが、2 つの極によって照明されている光学インテグレータの斜視図である。

【図 10】ミラーアレイ、集光装置および光学ラスタ素子アレイのみが示されている、照明システムの一部を通る概略子午断面図である。

【図 11】図 11 a は、図 3 に示す第 2 のミラーアレイの上面図であり、図 11 b は、図 3 に示す光学インテグレータの上面図である。

20

【図 12】光学インテグレータの光入射ファセット上の放射照度分布を示す図である。

【図 13】図 12 に示す光入射ファセットによって生成される X 方向に沿った走査積分放射照度分布を示すグラフ図である。

【図 14】光学インテグレータの光入射ファセット上の別の放射照度分布を示す図である。

【図 15】図 14 に示す光入射ファセットによって生成される X 方向に沿った走査積分放射照度分布を示すグラフ図である。

【図 16】照明システムのマスク平面内の瞳（すなわち、角度放射照度分布）を測定する 2 つの瞳測定ユニットを示す、図 3 からの拡大断面図である。

【図 17】異なる視野位置における瞳測定値が、どのようにミラー面の位置および向きに関する情報を与えるかを示す図である。

30

【図 18 a】図 16 に示す瞳測定ユニットを用いることによって、ミラー面の向きをどのように決定することができるかを示す図である。

【図 18 b】図 16 に示す瞳測定ユニットを用いることによって、ミラー面の向きをどのように決定することができるかを示す図である。

【図 19】マスク平面内の放射照度を測定する 2 つの放射照度センサを示す、図 3 からの拡大断面図である。

【図 20】異なる視野位置における放射照度測定値が、どのようにミラー面の位置および向きに関する情報を与えるかを示す図である。

【図 21 a】図 19 に示す放射照度測定ユニットを用いることによって、ミラー面の向きをどのように決定することができるかを示す図である。

40

【図 21 b】図 19 に示す放射照度測定ユニットを用いることによって、ミラー面の向きをどのように決定することができるかを示す図である。

【図 21 c】図 19 に示す放射照度測定ユニットを用いることによって、ミラー面の向きをどのように決定することができるかを示す図である。

【図 21 d】図 19 に示す放射照度測定ユニットを用いることによって、ミラー面の向きをどのように決定することができるかを示す図である。

【図 22】3 つの変調器ユニットの間の相対位置を測定するためにマーカ点の位置が使用される、一実施形態による測定デバイスを通る概略断面図である。

【図 23】光学インテグレータ上に位置する検出器上で空間光変調器上のマーカ点が結像

50

される、一実施形態による測定デバイスの概略斜視図である。

【図 2 4】マイクロミラーまたはマイクロミラー間の構造から反射または散乱されている測定光をカメラが検出する、一実施形態による測定デバイスの概略斜視図である。

【図 2 5 a】空間光変調器のマイクロミラーアレイの、図 1 1 a と同様の上面図である。

【図 2 5 b】照明視野 1 4 における放射照度分布を示す図である。

【図 2 6 a】空間光変調器のドリフト運動後の、図 2 5 a と同様の上面図である。

【図 2 6 b】照明視野 1 4 に対するドリフト運動の効果を示す図である。

【図 2 7】本発明による方法の流れ図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 3 9 】

10

I .

投影露光装置の一般構造

図 1 は、本発明による投影露光装置 1 0 の高度に簡略化した斜視図である。装置 1 0 は、例えばエキシマレーザとして実現されてもよい光源 1 1 を備える。この実施形態における光源 1 1 は、193 nm の中心波長を有する投影光を生成する。例えば 157 nm または 248 nm のような他の波長も想定される。

【 0 0 4 0 】

装置 1 0 は、下記にさらに詳細に説明するように、光源 1 1 によって与えられる投影光を調整する照明システム 1 2 をさらに備える。照明システム 1 2 から現れる投影光は、マスク 1 6 上の照明視野 1 4 を照明する。マスク 1 6 は、図 1 においては細い線として概略的に示されている複数の小さいフィーチャ 1 9 によって形成されるパターン 1 8 を含む。この実施形態では、照明視野 1 4 は、矩形の形状を有する。しかしながら、例えば環部分のような、他の形状の照明視野 1 4 も企図される。

20

レンズ L 1 ~ L 6 を含む投影対物部 2 0 が、照明視野 1 4 内のパターン 1 8 を、基板 2 4 によって支持されている、例えばフォトレジストのような感光層 2 2 上に結像する。シリコンウェハによって形成されてもよい基板 2 4 は、感光層 2 2 の上面が投影対物部 2 0 の像平面内に精密に位置するように、ウェハステージ（図示せず）上に配置される。マスク 1 6 は、マスクステージ（図示せず）によって投影対物部 2 0 の物体平面内に位置決めされる。投影対物部は $M < 1$ である倍率を有するため、照明視野 1 4 内のパターン 1 8 の縮小像 1 8' が、感光層 2 2 上に投影される。

30

投影中、マスク 1 6 および基板 2 4 は、図 1 に示す Y 方向に対応する走査方向に沿って動く。照明視野 1 4 はその後、照明視野 1 4 よりも大きいパターン化領域を連続的に結像することができるように、マスク 1 6 にわたって走査する。基板 2 4 の速度とマスク 1 6 の速度との間の比は、投影対物部 2 0 の倍率に等しい。投影対物部 2 0 が像を反転しない場合（ $M > 0$ ）、マスク 1 6 および基板 2 4 は、図 1 において矢印 A 1 および A 2 によって示すように、同じ方向に沿って動く。しかしながら、本発明はまた、マスク 1 6 および基板 2 4 がマスクの投影中に動かないステップツールにおいて使用されてもよい。

【 0 0 4 1 】

II .

視野依存性角度放射照度分布

40

図 2 a は、別の例示的なパターン 1 8 を含むマスク 1 6 の拡大斜視図である。単純にするために、パターン 1 8 は均一である、すなわち、Y 方向に沿って延伸し、同じ距離だけ離間されている同一のフィーチャ 1 9 のみを含むと仮定される。これらのフィーチャ 1 9 は、X 二重極照明設定によって感光層 2 2 上に最良に結像されるとさらに仮定される。

3 つの例示的な光束の 1 つと関連付けられる出射瞳 2 6 a が、円によって表されている。光束は、走査サイクル中の第 1 の時点において、照明視野 1 4 の特定の X 位置に位置する視野点に向かって収束する。出射瞳 2 6 a において、X 方向に沿って離間されている 2 つの極 2 7 a および 2 7 a' は、投影光 PL がそこからこの視野点に向かって伝播する方向を表す。各極 2 7 a、2 7 a' に集中する光エネルギーは等しいと仮定される。したがって、+ X 方向から衝突する投影光は、- X 方向から衝突する投影光 PL と同じエネルギ

50

ーを有する。フィーチャ 19 はパターン 18 にわたって均一に分布すると仮定されるため、この X 二重極照明設定は、マスク 16 上の各視野点において生成されるはずである。

【0042】

26b によって示される別の出射瞳は、走査サイクルの後の時点において、照明視野 14 の別の X 位置に位置する視野点に向かって収束する光束と関連付けられる。各極 27b、27' に集中する光エネルギーはここでも等しい。しかしながら、理想的な極 27a との比較によって明らかになるように、極 27b はわずかに変位している。これは、視野点と同じ量の投影光 PL を受け取るが、投影光 PL がそこから視野点上に衝突する方向は、感光層 22 上にフィーチャ 19 を結像するには理想的ではないことを意味する。

【0043】

26c によって示されるさらなる出射瞳は、走査サイクルのまた後の時点においてまた別の X 位置に位置する照明視野 14 内の点と関連付けられる。ここで、投影光 PL がそこから視野点に衝突する方向は、ここでもフィーチャ 19 を結像するのに理想的であると仮定される。それゆえ、極 27c、27c' は理想的な位置を有し、したがって、これらの極 27c、27c' と関連付けられる光円錐も、理想的な出射瞳 26a と関連付けられる円錐と同じ円錐角および向きを有する。しかしながら、図 2a において異なる灰色陰影によって表されているように、極 27c、27c' は平衡されていない、すなわち、極 27c、27c' に集中する光エネルギーは互いに異なる。したがって、+X 方向から衝突する投影光 PL は、-X 方向から衝突する投影光 PL よりも少ないエネルギーを有する。

上記から、出射瞳 26a によって表される理想的な角度放射照度分布は、照明視野 14 内の各 X 位置において得られるものではないことが明らかになる。それゆえ、角度放射照度分布は視野依存である、すなわち、異なる視野点においては、角度放射照度分布は異なる。

【0044】

視野依存は X 方向に沿って発生し得るだけでなく、照明視野 14 内で Y 方向に沿っても発生し得る。このとき、マスク 16 上の 1 つの点は、走査サイクル中に照明視野 14 を通過する間に、異なる角度放射照度分布を受ける。Y 方向（すなわち、走査方向）に沿った視野依存が発生する場合、特定の視野点に対する合計の効果は、複数の異なる角度放射照度分布を積分することによって得られることを考慮に入れる必要がある。

現実の角度放射照度分布には、理想的なものからの多種多様なさらなる視野依存の逸脱が存在する。例えば、いくつかの視野点と関連付けられる出射瞳内の極は、変形する場合があり、不鮮明になる場合があり、または、所望の不均一な放射照度分布を有しない場合がある。

【0045】

理想的な角度放射照度分布からの視野依存の逸脱が発生する場合、これは一般的に、感光層 22 上に形成されるパターン像の品質に悪影響を及ぼす。特に、装置 10 を用いることによって生成される構造の寸法は、不意に変化する場合があり、これによって、これらの構造を含むデバイスの機能が損なわれる場合がある。それゆえ、一般的に、照明視野 14 における照明設定の任意の視野依存をなくすことが望ましい。この目的のために、照明システム 12 は、角度放射照度分布に視野に応じて影響を与えることが可能である必要がある。角度放射照度分布の望ましくない視野依存を引き起こす原因のいくつかは、非常に急速に変化する場合があるため、通常、視野依存も非常に迅速に変化させる必要がある、これは時として単一走査サイクル内でさえある。

【0046】

しかしながら、場合によっては、角度放射照度分布の視野依存を意図的に導入することが望ましい。これは、例えば、投影対物部 20 またはマスク 16 が、感光層 22 上のパターン 18 の像に影響を与える視野依存特性を有する場合に顕著であり得る。例えば、製造公差、経年劣化現象または不均一な温度分布の結果として、投影対物部 20 の結像特性の変動が発生する場合がある。マスク 16 の視野依存は、例えば、フィーチャの向きまたは寸法が異なる結果として発生することが多い。

10

20

30

40

50

これは、図 2 a と同様のマスク 16 の拡大斜視図である図 2 b に示されている。単純にするために、マスク 16 上のパターン 18 は、走査方向 Y に沿って互いに縦列に配置されている 3 つの第 1 の同一のパターン領域 181 a、181 b、181 c を含むと仮定される。第 1 のパターン領域 181 a、181 b、181 c のフィーチャ 19 は、走査方向 Y に沿って延伸する直線であるとさらに仮定される。

【0047】

パターン 18 は、3 つの同一の第 2 のパターン領域 182 a、182 b、182 c をさらに含み、これらは、同じく走査方向 Y に沿って互いに縦列に配置されているが、第 1 のパターン領域 181 a、181 b、181 c および第 2 のパターン領域 182 a、182 b、182 c が共通の X 座標を有しないように、第 1 のパターン領域 181 a、181 b、181 c から側方に変位されている。第 2 のパターン領域 182 a、182 b、182 c は、X 方向に沿って延伸するフィーチャ 19 と、Y 方向に沿って延伸するフィーチャ 19 とを含む。

【0048】

マスク 16 は、2 つの異なるダイが同時に露光され、エッチングのような同じ後続の製造ステップを受ける製造ステップに使用されると仮定される。ダイは、投影対物部 20 の像視野内で互いに隣接して位置決めされ得るように、十分に小さい。1 つの全走査サイクル内で、第 1 のパターン領域 181 a、181 b、181 c と関連付けられる第 1 のタイプの 3 つのダイ、および、第 2 のパターン領域 182 a、182 b、182 c と関連付けられる第 2 のタイプの 3 つのダイを露光することができる。その後、走査方向が反転され、または、マスク 16 が一切照明することなくその元の位置に戻され、さらなる走査サイクルが実施される。このように、2 列の異なるダイを、基板 24 上で同時に露光することができる。

【0049】

一般的に、最適な像品質が望ましい場合、異なるパターンは、マスクレベルにおいて異なる角度放射照度分布を必要とする。この実施形態において、X 方向に沿って延伸するフィーチャ 19 は、X 二重極照明設定によって感光層 22 上に最良に結像されると仮定される。図 2 b において、第 1 のパターン領域のうちの 1 つに位置する視野点に向かって収束する光束と関連付けられる瞳 261 が、破線の円によって示されている。瞳 261 において、X 方向に沿って離間されている 2 つの極 271 および 271' は、光がそこからこの視野点に向かって伝播する方向を表す。パターンは第 1 のパターン領域 181 a、181 b、181 c にわたって均一であると仮定されるため、したがって、この X 二重極照明設定が、第 1 のパターン領域 181 a、181 b、181 c 内の各視野点において生成される必要がある。

第 2 のパターン領域 182 a、182 b、182 c 内のフィーチャ 19 については、従来の照明設定が最良の結像品質をもたらすと仮定される。図 2 b は、第 2 のパターン領域 182 a、182 b、182 c のうちの 1 つの中の視野点に向かって収束する光束と関連付けられる瞳 262 内で照明される中心極 272 を示す。ここでも、この従来の照明設定が、第 2 のパターン領域 182 a、182 b、182 c 内の各視野点において生成されるはずである。

これは、照明システム 12 が、2 つの異なる照明設定を同時に、かつ、照明視野 14 内で隣り合って生成することが可能でなければならないことを意味する。

以下において、ほぼ任意の視野依存性を有する角度放射照度分布を生成することが可能な照明システム 12 の設計が、図 3 ~ 図 15 を参照しながらより詳細に説明される。

【0050】

III.

照明システムの一般構造

図 3 は、図 1 に示す照明システム 12 を通る子午断面である。明瞭にするために、図 3 の図解は、相当簡略化されており、原寸に比例しない。これは特に、種々の光学ユニットが、1 つまたは非常に少数の光学素子のみによって表されることを意味する。現実には、

これらのユニットは、相当より多くのレンズおよび他の光学素子を含み得る。

図示されている実施形態において、光源 11 によって放出される投影光 PL は、拡大され、ほぼコリメートされた光ビーム 34 を出力するビーム拡大ユニット 32 に入射する。この目的のために、ビーム拡大ユニット 32 は、例えば、いくつかのレンズを含むことができ、または、ミラー装置として実現することができる。

【0051】

投影光ビーム 34 はその後、後続の平面内で可変空間放射照度分布を生成するために使用される瞳形成ユニット 36 に入射する。この目的のために、瞳形成ユニット 36 は、アクチュエータを用いることによって 2 つの直交する軸を中心として個々に傾けることができる非常に小さいミラー 40 からなる第 1 のミラーアレイ 38 を備える。図 4 は、2 つの平行な光ビーム 42、44 が、光ビーム 42、44 が衝突するミラー 40 の傾斜角度に応じて異なる方向へとどのように反射されるかを示す第 1 のミラーアレイ 38 の斜視図である。図 3 および図 4 において、第 1 のミラーアレイ 38 は 6 × 6 個のミラー 40 のみを備えるが、現実には、第 1 のミラーアレイ 38 は、数百またはさらには数千個のミラー 40 を備えてもよい。

【0052】

瞳形成ユニット 36 は、両方とも照明システム 12 の光軸 OA に対して傾斜している第 1 の平坦面 48 a および第 2 の平坦面 48 b を有するプリズム 46 をさらに備える。これらの傾斜面 48 a、48 b において、衝突する光は、内部全反射によって反射される。第 1 の表面 48 a は、衝突する光を第 1 のミラーアレイ 38 のミラー 40 に向けて反射し、第 2 の表面 48 b は、ミラー 40 から反射される光を、プリズム 46 の出射面 49 に向けて方向付ける。したがって、出射面 49 から現れる光の角度放射照度分布は、第 1 のミラーアレイ 38 のミラー 40 を個々に傾けることによって変化することができる。瞳形成ユニット 36 に関するさらなる詳細は、米国特許出願公開第 2009/0116093 号から収集することができる。

【0053】

瞳形成ユニット 36 によって生成される角度放射照度分布は、第 1 の集光装置 50 を用いることによって、空間放射照度分布に変換される。他の実施形態においては省かれてもよい集光装置 50 は、衝突する光を空間的に解像されるように反射するように構成されているデジタル空間光変調器 52 に向けて、衝突する光を方向付ける。この目的のために、デジタル空間光変調器 52 は、変調平面 57 内に配置されており、図 3 の拡大断面 C および図 5 の拡大断面 C' に最もよく見られるマイクロミラー 56 からなる第 2 のミラーアレイ 54 を備える。しかしながら、第 1 のミラーアレイ 38 のミラー 40 とは対照的に、第 2 のミラーアレイ 54 の各マイクロミラー 56 は、2 つのみの安定した動作状態、すなわち、衝突する光を、第 1 の対物部 (o b j e c t i v e) 58 を介して光学インテグレータ 60 に向けて方向付ける「オン」状態、および、衝突を吸光面 62 に向けて方向付ける「オフ」状態のみを有する。

第 2 のミラーアレイ 54 は、例えば、プロジェクタにおいて一般的に使用されているような、デジタルミラーデバイス (D M D) として実現されてもよい。そのようなデバイスは、2 つの動作状態の間で 1 秒あたり 多数千回 (many thousands times) 切り換えることができる最大数百万個のマイクロミラーを備えることができる。

【0054】

瞳形成ユニット 36 と同様に、空間光変調器 52 は、光軸 OA に垂直に配置されている入射面 65 と、両方とも照明システム 12 の光軸 OA に対して傾斜している第 1 の平坦面 66 a および第 2 の平坦面 66 b を有するプリズム 64 をさらに備える。これらの傾斜面 66 a、66 b において、衝突する光は、内部全反射によって反射される。第 1 の表面 66 a は、衝突する光を第 2 のミラーアレイ 54 のマイクロミラー 56 に向けて反射し、第 2 の表面 66 b は、マイクロミラー 56 から反射される光を、プリズム 64 の表面 68 に向けて方向付ける。

第 2 のミラーアレイ 54 のすべてのマイクロミラー 56 がそれらの「オン」状態にある

場合、第2のミラーアレイ54は実質的に、平面ビーム折り返しミラーの効果を有する。しかしながら、1つまたは複数のマイクロミラー56がそれらの「オフ」状態に切り換えられる場合、変調平面57から現れる光の空間放射照度分布は修正される。これは、下記にさらにより詳細に説明するように(IV項参照)、マスク16上の角度放射照度分布の視野依存修正をもたらすように使用することができる。

【0055】

上記ですでに言及したように、プリズム64から現れる光は、第1の対物部58を通過し、光学インテグレータ60に衝突する。第1の対物部58を通過する光はほぼコリメートされているため、第1の対物部58は非常に低い開口数(例えば0.01またはさらにはそれ未満)を有することができ、したがって、少数の小さい球面レンズを用いて実現することができる。第1の対物部58は、空間光変調器52の変調平面57を、光学インテグレータ60上に結像する。

【0056】

光学インテグレータ60は、図示されている実施形態では、光学ラスタ素子74の第1のアレイ70および第2のアレイ72を備える。図6は、2つのアレイ70、72の斜視図である。各アレイ70、72は、支持プレートの各側に、それぞれX方向およびY方向に沿って延伸する円柱レンズの並列アレイを含む。2つの円柱レンズが交差するボリュームが、光学ラスタ素子74を形成する。したがって、各光学ラスタ素子74は、円筒形に湾曲した表面を有するマイクロレンズと考えることができる。円柱レンズを使用することは、光学ラスタ素子74の屈折力がX方向およびY方向に沿って異なるべきである事例において特に有利である。光学インテグレータ60上での二乗放射照度分布(square irradiance distribution)が、通常そうであるようにスリット状照明視野14へと変換されるべきである場合に、異なる屈折力が必要である。空間光変調器52に向いている光学ラスタ素子74の表面は、以下において、光入射ファセット75として参照される。

【0057】

第1のアレイ70および第2のアレイ72の光学ラスタ素子74はそれぞれ、第1のアレイ70の光学ラスタ素子74が第2のアレイ72の1つの光学ラスタ素子74と1対1対応で関連付けられるように、互いに列を成して配置される。互いに関連付けられる2つのラスタ素子74は、共通の軸に沿って整列され(aligned)、光チャネルを画定する。光学インテグレータ60内で、1つの光チャネル内を伝播する光ビームは他方の光チャネル内を伝播する光ビームと交差せず、重なり合わない。したがって、光学ラスタ素子74と関連付けられる光チャネルは、互いに光学的に分離される。

この実施形態において、照明システム12の瞳平面76は、第2のアレイ72の後ろに位置するが、これは等価にその前に配置されてもよい。第2の集光装置78は、瞳平面76と、調整可能視野絞り82が配置される視野絞り平面80との間にフーリエ関係を確立する。

視野絞り平面80は、光学インテグレータ60の光入射ファセット75内にまたはそれに近接して位置するラスタ視野平面84に光学的に共役である。これは、ラスタ視野平面84内の各光入射ファセット75が、第2のアレイ72の関連する光学ラスタ素子74および第2の集光装置78によって、視野絞り平面80全体の上に結像されることを意味する。すべての光チャネル内の光入射ファセット75上の放射照度分布の像は、視野絞り平面80内に重ね合わされ、その結果、マスク16の照明は非常に均一になる。マスク16の均一な照明を説明する別の方法は、瞳平面76内の各光チャネルによって生成される放射照度分布に基づく。この放射照度分布は、補助光源として参照されることが多い。すべての補助光源は、共通して、異なる方向からの投影光によって視野絞り平面80を照明する。補助光源が「暗い」場合、この特定の光源と関連付けられる方向の(小さい)範囲からの光はマスク16に衝突しない。したがって、瞳平面76内に形成される補助光源を単純にオンおよびオフに切り換えることによって、マスク16上の所望の角度放射照度分布を設定することが可能である。これは、瞳形成ユニット36を用いることによって光学イ

10

20

30

40

50

ンテグレータ 60 上の放射照度分布を変更することによって達成される。

【0058】

視野絞り平面 80 は、第 2 の対物部 86 によって、マスク 16 がマスクステージ（図示せず）を用いることによって配置されているマスク平面 88 上へと結像される。

調整可能視野絞り 82 もまた、マスク平面 88 上に結像され、少なくとも、走査方向 Y に沿って延伸する照明視野 14 の短側面を画定する。

瞳形成ユニット 36 および空間光変調器 52 は制御ユニット 90 に接続され、制御ユニット 90 は、パーソナルコンピュータとして示されているシステム制御部 92 全体に接続される。制御ユニット 90 は、マスク平面 88 内の角度放射照度分布が意図した視野依存性を有するように、瞳形成ユニット 36 のミラー 40 および空間光変調器 52 のマイクロミラー 56 を制御するように構成されている。以下の I V 項において、照明システム 12 の機能および制御を説明する。

10

【0059】

照明システムは、第 2 のミラーアレイ 54 の位置およびそのマイクロミラー 56 の向きを測定するように構成されている測定デバイス 200 をさらに備える。図示されている実施形態において、測定デバイス 200 は、第 1 の接続構造 203 によって堅固に接続されており、マスク平面 88 内の 2 つの異なる視野点において角度放射照度分布を同時に測定するように構成されている 2 つの瞳測定ユニット 202 a、202 b を含む。

付加的に、または好ましくは代替的に、測定デバイス 200 は、同じく第 2 の接続構造 205 によって堅固に接続されており、マスク平面 88 内の 2 つの異なる視野点において放射照度を同時に測定するように構成されている 2 つの放射照度測定ユニット 204 a、204 b を含む。

20

瞳測定ユニット 202 a、202 b および放射照度測定ユニット 204 a、204 b の機能は、図 16 ~ 図 21 を参照しながら下記により詳細に説明する。

【0060】

I V .

照明システムの機能および制御

1 . 瞳形成

図 7 は、瞳形成ユニット 36 が空間光変調器 52 のマイクロミラー 56 上で放射照度分布をどのように生成するかを概略的に示す。単純にするために、プリズム 46、64 は図示されていない。

30

【0061】

第 1 のミラーアレイ 38 の各ミラー 40 は、それぞれのミラー 40 によって生成される偏向角を変化させることによって可変である位置において、空間光変調器 52 の変調平面 57 上のスポット 94 を照明するように構成されている。したがって、スポット 94 は、ミラー 40 をそれらの傾斜軸を中心として傾けることによって、変調平面 57 にわたって自由に動かすことができる。このように、変調平面 57 上で多種多様な異なる放射照度分布を生成することが可能である。スポット 94 はまた、95 に示すように、部分的にまたは完全に重なり合ってもよい。このときまた、勾配のある放射照度分布が生成されてもよい。

40

図 8 は、空間光変調器 52 内に含まれる第 2 のマイクロミラーアレイ 54 の、図 5 と同様の斜視図である。ここで、瞳形成ユニット 36 が、各々が 6 x 6 個のマイクロミラー 56 にわたって正確に延伸する 2 つの方形の (square) 極 27 からなる第 2 のミラーアレイ 54 上の放射照度分布を生成したと仮定する。極 27 は、X 方向に沿って点対称に配置される。

【0062】

対物部 58 は、図 9 に示すように、この放射照度分布の像を、光学インテグレータ 60 の光入射ファセット 75 上に形成する。ここで、すべてのマイクロミラー 56 が「オン」状態にあり、それによって、第 2 のミラーアレイ 54 上に形成されている放射照度分布が、光学インテグレータ 60 の光入射ファセット 75 上に同一に（対物部 58 の拡大に起因

50

する可能性のあるスケーリングは別として)再生されると仮定される。光入射ファセット 75 上に示されている規則的な格子 (grid) は、マイクロミラー 56 の境界線の像を表すが、この像は極 27 の外部では見られず、図 9 においては例示のみの理由で示されている。

2. 視野依存性

光入射ファセット 75 はラスト視野平面 84 内に位置するため、光入射ファセット 75 上の放射照度分布は、第 2 のアレイ 72 の光学ラスト素子 74 および第 2 の集光装置 78 を介して、視野絞り平面 80 上に結像される。

これについてはこれより、図 3 からの原寸に比例しない拡大断面図である図 10 を参照しながら説明する。ここでは、光学インテグレート 60 の 2 対の光学ラスト素子 74、第 2 の集光装置 78 および中間視野絞り平面 80 のみが概略的に示されている。

【0063】

単一の光チャネルと関連付けられている 2 つの光学ラスト素子 74 は、以下においては第 1 のマイクロレンズ 101 および第 2 のマイクロレンズ 102 として参照される。マイクロレンズ 101、102 は、視野および瞳ハニカムレンズとして参照されることがある。特定の光チャネルと関連付けられるマイクロレンズ 101、102 の各対は、瞳平面 76 内に補助光源 106 を生成する。図 10 の上半分において、それぞれ実線、点線および破線によって示されている収束する光束 L1a、L2a および L3a は、第 1 のマイクロレンズ 101 の光入射ファセット 75 の異なる点に衝突すると仮定される。2 つのマイクロレンズ 101、102 および集光装置 78 を通過した後、各光束 L1a、L2a および L3a は、それぞれ焦点 F1、F2 および F3 に収束する。図 10 の上半分から、交線が光入射ファセット 75 に衝突する点と、これらの光線が視野絞り平面 80 (または任意の他の共役な視野平面) を通過する点とは、光学的に共役であることが明らかになる。

【0064】

図 10 の下半分は、コリメート光束 L1b、L2b および L3b は、第 1 のマイクロレンズ 101 の光入射ファセット 75 の異なる領域に衝突する事例を示す。光学インテグレート 60 に衝突する光は通常、実質的にコリメートされているため、これはより現実的な事例である。光束 L1b、L2b および L3b は、第 2 のマイクロレンズ 102 内に位置する共通の焦点 F において合焦し、その後、視野絞り平面 80 を通過して、ここで再びコリメートされる。ここでも、光学的に共役である結果として、光束 L1b、L2b および L3b が光入射ファセット 75 に衝突する領域は、視野絞り平面 80 内で照明される領域に対応することが分かる。当然のことながら、これらの考慮事項は、マイクロレンズ 101、102 が X 方向と Y 方向の両方に沿って屈折力を有する場合には、X 方向と Y 方向とについて別個に適用される。

【0065】

それゆえ、光入射ファセット 75 上の各点は、中間視野絞り平面 80 (および、したがってマスク 16 上の照明視野 14) 内の共役な点に直接対応する。光入射ファセット 75 上の点上の放射照度に選択的に影響を与えることが可能である場合、したがって、照明システムの光軸 OA に対する光入射ファセット 75 の位置に依存する方向から照明視野 14 内の共役な点に衝突する光線の放射照度に影響を与えることが可能である。光軸 OA から光入射ファセット 75 の間の距離が大きくなるほど、上記光線がマスク 16 上の点に衝突する角度は大きくなる。

【0066】

3. 光入射ファセット上の放射照度の修正

照明システム 12 において、空間光変調器 52 は、光入射ファセット 75 上の点上での放射照度を修正するために使用される。図 9 において、各極 27 は、マイクロミラー 56 の像である複数の小さい領域にわたって延在することが分かる。マイクロミラーが「オフ」状態にされた場合、光入射ファセット 75 上の共役な領域は照明されなくなり、したがって、特定の光入射ファセット 75 と関連付けられる方向の (小さい) 範囲からマスク上の共役な領域に投影光は衝突しない。

これについては、それぞれ空間光変調器 5 2 のマイクロミラー 5 6 および光学インテグレート 6 0 の光入射ファセット 7 5 の上面図である図 1 1 a および図 1 1 b を参照しながらより詳細に説明する。

【 0 0 6 7 】

第 2 のミラーアレイ 5 4 上の太い点線は、その変調平面 5 7 を、各々が 3×3 個のマイクロミラー 5 6 を含む複数の対物領域 1 1 0 に分割する。対物部 5 8 が、光学インテグレート 6 0 上に各対物領域 1 1 0 の像を形成する。この像は、以下において像領域 1 1 0 ' として参照される。各像領域 1 1 0 ' は光入射ファセット 7 5 と完全に一致する、すなわち、像領域 1 1 0 ' は光入射ファセット 7 5 と同じ形状、サイズおよび向きを有し、光入射ファセットと完全に重なり合う。各対物領域 1 1 0 は 3×3 個のマイクロミラー 5 6 を含むため、像領域 1 1 0 ' も、マイクロミラー 5 6 の 3×3 個の像 5 6 ' を含む。

10

【 0 0 6 8 】

図 1 1 a において、瞳形成ユニット 3 6 によって投影光で完全に照明される 8 つの対物領域 1 1 0 が存在する。これら 8 つの対物領域 1 1 0 は、2 つの極 2 7 を形成する。これらの対物領域 1 1 0 のうちのいくつかにおいて、黒い方形として表されている 1 つ、2 つまたはそれ以上のマイクロミラー 5 6 d は、衝突する投影光が対物部 5 8 に向けてではなく、吸光面 6 2 に向けて方向付けられる「オフ」状態にあるように、制御ユニット 9 0 によって制御されていることが分かる。したがって、マイクロミラーを「オン」および「オフ」状態の間で切り換えることによって、図 1 1 b に示すように、投影光が光入射ファセット 7 5 上の像領域 1 1 0 ' 内で対応する領域に衝突することを可変に妨げることが可能である。

20

これら領域は、以下においてダークスポット 5 6 d ' として参照される。

【 0 0 6 9 】

図 1 0 を参照して上記で説明したように、光入射ファセット 7 5 上の放射照度分布は、視野絞り平面 8 0 上に結像される。図 1 2 の上部に示すように、光入射ファセット 7 5 が 1 つまたは複数のダークスポット 5 6 d ' を含む場合、関連する光チャネルによってマスク平面 8 8 内で生成される放射照度分布も、特定の X 位置においてダークスポットを有することになる。マスク上のある点が照明視野 1 4 を通過する場合、したがって、合計走査積分放射照度は、図 1 3 のグラフに示すように、照明視野 1 4 内の点の X 位置に依存する。照明視野 1 4 の中央の点は、ダークスポットを通過しないため、最も高い走査積分放射照度を受け、照明視野 1 4 の長手方向端部にある点は、異なる程度まで低減される合計放射照度を受ける。したがって、マスク 1 6 上の角度放射照度分布、およびまた、空間放射照度分布の視野依存性は、空間光変調器 5 2 の 1 つまたは複数のマイクロミラー 5 6 を選択的に「オン」状態から「オフ」状態にすることによって、修正することができる。

30

上記において、光入射ファセット 7 5 のうちの 1 つに結像される各対物領域 1 1 0 は、 3×3 個のみのマイクロミラー 5 6 を含むと仮定されている。したがって、角度放射照度分布の視野依存性を修正するために使用することができる交差走査方向 X に沿った解像度は、相対的に粗い。各対物領域 1 1 0 内のマイクロミラー 5 6 の数が増加すると、この解像度は改善することができる。

図 1 4 は、 20×20 個のマイクロミラー 5 6 が各対物領域 1 1 0 内に含まれている実施形態についての、光入射ファセット 7 5 のうちの 1 つの上面図を示す。このとき、図 1 5 に示すグラフに例示されているように、X 方向に沿ったより複雑な走査積分放射照度分布を、マスク 1 6 上で達成することができる。

40

【 0 0 7 0 】

V .

マイクロミラーの位置および向きの測定

照明システム 1 2 が角度放射照度分布を視野に応じて生成することができることは、図 1 1 a および図 1 1 b に示すように、第 2 のミラーアレイ 5 4 を光学インテグレート 6 0 上に正確に結像することに大きく依存する。上記でさらに示したように、像領域 1 1 0 ' は、光学インテグレート 6 0 の正確に 1 つの光入射ファセット 7 5 をカバーする必要がある

50

る。そうでなければ、マスク平面 8 8 内で得られる角度放射照度分布の視野依存性は、意図されるものから大きく逸脱してしまう。例えば、マイクロミラー 5 6 が意図されるものではなく、隣接する光入射ファセット 7 5 上に結像された場合、これは最終的に、照明視野 1 4 の反対側に結像されることになる。したがって、像領域 1 1 0 ' のわずかなシフトが、照明視野 1 4 の非常に離れた部分への光エネルギーのシフトに転換される場合がある。

【 0 0 7 1 】

デジタル空間光変調器 5 2 の第 2 のミラーアレイ 5 4 が、照明システム 1 2 の動作中に、光学インテグレータ 6 0 に対するわずかなドリフト運動を行う場合、図 1 1 a および図 1 1 b に示す適切な結像は通常、かく乱される。例えば、図 1 1 a に示すミラーアレイ 5 4 全体が、1 つのマイクロミラー 5 6 の幅に等しいと仮定される距離 d (図 1 1 a 参照) だけ + X 方向に沿ってドリフトした場合、ミラーアレイ 5 4 上で照明される極 2 7 は、1 つまたは複数の「誤った」マイクロミラー 5 6、例えば、「オフ」状態にあるマイクロミラーをカバーすることになる。

同様の考慮事項が、マイクロミラー 5 6 が衝突する反射光を所望の方向へと反射しない場合にも当てはまる。これは、例えば、マイクロミラー 5 6 が傾斜位置の 1 つにおいて動かないでいる (*s t u c k*) 場合、または、ミラー面を形成するその反射性コーティングが高エネルギー投影光によって損傷した場合に起こり得る。

以下において、マイクロミラー 5 6 の位置および / または向きを効率的に測定することができる種々の手法を説明する。

【 0 0 7 2 】

1 . 瞳測定

図 1 6 は、照明システム 1 2 の底部からの拡大概略断面図である。照明システム 1 2 は、マスク 1 6 が取り除かれており、図 3 に示す測定デバイス 2 0 0 の 2 つの瞳測定ユニット 2 0 2 a、2 0 2 b が、駆動装置 (図示せず) を用いることによって測定位置へと動かされている測定状態において示されている。

各瞳測定ユニット 2 0 2 a、2 0 2 b は、中央ピンホール 2 1 2 a、2 1 2 b を有する絞り 2 1 0 a、2 1 0 b によって形成されるカバーを有するハウジング 2 0 8 a、2 0 8 b を備える。ピンホール 2 1 2 a、2 1 2 b は、照明システム 1 2 のマスク平面 8 8 内に正確に配置されている。

【 0 0 7 3 】

各ハウジング 2 0 8 a、2 0 8 b は、マスク平面 8 8 と一致する焦平面を有する集光装置 2 1 4 a、2 1 4 b を含む。したがって、ピンホール 2 1 2 a、2 1 2 b を通ってハウジング 2 0 8 a、2 0 8 b に入る光は、コリメート光、すなわち、瞳測定ユニット 2 0 2 a、2 0 2 b の光軸 2 1 6 a、2 1 6 b に平行に伝播する光として、集光装置 2 1 4 a、2 1 4 b を出る。

コリメート光は、例えば、CCD チップとして形成されてもよい位置解決光センサ 2 1 8 a、2 1 8 b に衝突する。

マスク平面 8 8 における投影光線 2 2 0 a、2 2 0 b の入射角は、位置解決光センサ 2 1 8 a、2 1 8 b のフーリエ関係平面内の位置へと転換されるため、光センサは、ピンホール 2 1 2 a、2 1 2 b の位置における投影光線 2 2 0 a、2 2 0 b の角度放射照度分布を効果的に検出する。

【 0 0 7 4 】

位置解決光センサ 2 1 8 a、2 1 8 b は、位置解決光センサ 2 1 8 a、2 1 8 の平面内で測定される空間放射照度分布からマスク平面 8 8 内の投影光線 2 2 0 a、2 2 0 b の角度放射照度分布を計算する制御ユニット 9 0 (図 3 参照) に接続されている。2 つの瞳測定ユニット 2 0 2 a、2 0 2 b が設けられるため、同時に 2 つの異なる視野位置においてマスク平面 8 8 内の角度放射照度分布を測定することが可能である。接続構造 2 0 3 によって接続される 2 つの瞳測定ユニット 2 0 2 a、2 0 2 b をマスク平面 8 8 に平行に正確に配置することによって、多数の異なる視野点において角度放射照度分布を短時間で迅速

に測定することが可能である。当然のことながら、それに応じて多数の測定を同時に実施することができるように、3つ以上、例えば、9つの瞳測定ユニットを組み合わせることもできる。これによって、1つの光入射ファセット75上に完全に結像される各1つの対物領域110内のマイクロミラー56の数に等しい数の視野点において角度放射照度分布を測定するのに必要な時間が低減する。

以下において、図17および図18を参照しながら、瞳測定ユニット202a、202bを使用して、マイクロミラー56のミラー面の位置および向きを測定することができる方法を説明する。

【0075】

図17は、左手側に、例示のために3本の線によって区切られている空間光変調器52の4つの対物領域110-1~110-4を示している。第1の対物領域110-1は、3×3個のミラー面224-1-1~224-1-9を含み、第2の対物領域110-2は3×3個のミラー面224-2-1~224-2-9を含み、以下同様である。ここで、マイクロミラー56は、すべてのミラー面224によって形成される変調面222内にチェス盤状の光パターンが生成されるように制御されると仮定される。各対物領域110-1~110-4内に生成される光パターンは、光学インテグレート60の1つの光入射ファセット75上に結像される。単純にするために、光入射ファセット75の総数は4だけであると仮定されるが、現実にはこの数は、例えば $10^2 \sim 10^6$ と、はるかにより大きくなり得る。

【0076】

図17の右手側においては、照明視野14（ここでは方形形状を有すると仮定される）が概略的に示されている。各対物領域110は、1つの光入射ファセット75上に結像される3×3個のミラー面224を含み、後者はその後、照明視野14全体に結像されるため、9つの像領域226-1~226-9が、照明視野14内に形成される。光入射ファセット75の像がマスク平面88内で重なり合うため、各像領域226-1~226-9において、4つのミラー面の像が重なり合う。例えば、第1の像領域226-1において、ミラー面224-1-1、224-2-1、224-3-1および224-4-1の像が重なり合う。同様に、各対物領域110-1~110-4のミラー面224-1-2、224-2-2、224-3-2および224-4-2のみが、第2の像領域226-2の照明に寄与し、以下同様である。

図17の中央部分において、それぞれ像領域226-1および226-2内にある点に収束する光束の瞳P1およびP2が、概略的に示されている。各光束の瞳は、空間光変調器52によって生成される光学インテグレート60上の放射照度分布によって決定される。光学インテグレート60上の放射照度分布は、図17の左手側に示すチェス盤状パターンの像である。

【0077】

図17の左手側で、第1の像領域226-1上に結像される4つのミラー面224-1-1、224-2-1、224-3-1および224-4-1から、2つのミラー面224-1-1および224-4-1が、黒色によって「オフ」状態にあり、2つのミラー面224-2-1および224-3-1が、白色によって「オン」状態にあることが分かる。したがって、そこから破線で示されている矢印が始まっている2つのミラー面224-2-1および224-3-1のみが、事実上第1の像領域226-1を照明している。第1の像領域226-1を形成する光束の瞳P1において、光学インテグレート60上のこれら2つの照明されるミラー面224-2-1および224-3-1の像を見ることができる。

【0078】

したがって、瞳測定ユニット202a、202bのうちの1つが照明システム12の下に位置決めされ、それによって、そのピンホール212a、212bが第1の像領域226-1内にある場合、その位置解決光センサ218a、218bは、図17の中央部分に示す瞳P1に対応する放射照度分布を検出する。当然のことながら、瞳P1内の白色の線

10

20

30

40

50

が、ここで例示のために示されているが、現実には、ミラー面 224 - 2 - 1 および 224 - 3 - 1 の像である 2つの照明領域 224 - 2 - 1' および 224 - 3 - 1' を除いて、瞳 P1 は完全に暗くなる。

【0079】

ミラーアレイ 54 全体のドリフト運動の結果として変調面 222 が側方に変位される場合、位置解決光センサ 202 a または 202 b によって測定される瞳 P1 内で、照明領域 224 - 2 - 1' および 224 - 3 - 1' も変位される。それゆえ、位置解決光センサ 218 a、218 b 上で検出される照明領域 224 - 2 - 1' および 224 - 3 - 1' の位置に基づいて、空間光変調器 52 のミラー面 224 が位置する場所を計算することが可能である。この計算において、他の量、特に、ミラー面 224 の形状、光入射ファセット 75 に対する変調面 222 の空間配置、および、光入射ファセット 75 の形状を、通常、考慮に入れる必要がある。

10

隣接するミラー面 224 間のドリフト運動は、重大である程度まで発生する可能性は低いため、通常、マスク平面 88 内の 1つの視野点においてのみ放射照度分布を測定すれば十分である。単一の対物領域 110 - 1 ~ 110 - 4 内のミラー面 224 間でドリフト運動が発生する場合、多数の視野点において角度放射照度分布の測定を実施する必要があると得る。

第2の像領域 226 - 2 内の点に収束する光束と関連付けられる瞳 P2 も、図 17 の中央部分に示されている。ここではミラー面 224 - 1 - 2 および 224 - 4 - 2 のみが第2の像領域 226 - 2 の照明に寄与しているため、照明領域 224 - 1 - 2' および 224 - 4 - 2' の位置が変化していることが分かる。必要とされる場合、9個すべての像領域 226 - 1 ~ 226 - 9 と関連付けられる瞳を、このように測定することができる。

20

【0080】

像領域 226 - ~ 226 - 9 の照明に寄与するミラー面 224 が所望の向きを有するかどうかを測定することも可能である。例えば、ミラー面 224 - 2 - 1 が、「オフ」状態において動かないでいる (stuck) と仮定される場合、この面は暗くなり、それに応じて、第1の瞳 P1 内の照明領域 224 - 2 - 1' が見つからなくなる。したがって、第1の像領域 226 - 1 内の 1つの視野点において角度放射照度分布を測定することによって、第1の像領域 226 - 1 上に結像される 4つすべてのミラー面 224 - 1 - 1、224 - 2 - 1、224 - 3 - 1 および 224 - 4 - 1 の位置だけでなく、向きをも測定することが可能である。すべてのミラー面 224 の向きが測定されるべきである場合、9個すべての像領域 226 - 1 ~ 226 - 9 について角度放射照度分布を実施する必要がある。

30

図 17 から、変調面 222 上で瞳形成ユニット 36 によって生成されるチェス盤状の放射照度分布が有利である理由も明らかになる。たとえ光学インテグレータ 60 上の個々のミラー面 224 の像が回折および収差に起因して不鮮明になったとしても、照明領域 224 - 2 - 1'、224 - 3 - 1'、224 - 1 - 2' および 224 - 4 - 2' は依然として、それらが位置解決光センサ 218 a、218 b によって適切かつ正確に検出することができることを保証する距離だけ、互いに離間されている。

【0081】

当然のことながら、他の光パターンも、変調面 222 上に形成されてもよい。たとえ変調面 222 のすべてのミラー面が「オン」状態にあるとしても、瞳 P1、P2 内の照明領域が重なり合うことはあり得ず、ただし、図 18 a に示すように、これらの領域の間の距離がいくらかより小さくなり得る。このとき、各瞳 P1、P2 内には、2つだけでなく、4つの照明領域 224 - 1 - 1'、224 - 2 - 1'、224 - 3 - 1'、224 - 4 - 1' および 224 - 1 - 2'、224 - 2 - 2'、224 - 3 - 2'、224 - 4 - 2' が存在する。

40

【0082】

図 18 b においては、1つのミラー面 224 - 4 - 2 が損傷を受けていると仮定される。これは、第2の像領域 226 - 2 内の視野点における角度放射照度分布を測定することによって検出することができる。この視野点と関連付けられ、位置解決光センサ 218 a

50

、218bによって測定される瞳P2において、これは、損傷を受けたミラー面224-4-2が結像される、領域224-4-2'における黒色スポットによって検出することができる。

2. 視野測定

照明視野14内の1つまたは複数の点における角度放射照度分布の測定の代わりに、または、それに加えて、放射照度のみが測定されてもよい。

図19は、図16と同じ、照明システム12の底部からの拡大概略断面図である。しかしながら、ここでは、2つの瞳測定ユニット202a、202bが待機位置にされており、図3を参照して簡潔に上述した2つの放射照度測定ユニット204a、204bが、ここではそれらの測定位置にある。

10

【0083】

各放射照度測定ユニット204a、204bは、小さいピンホール232a、232bを含む絞り230a、230bを含むハウジング229a、229bを備える。各放射照度測定ユニット204a、204bは、ピンホール232a、232bを通過した光の放射照度を測定する光センサ234a、234bをさらに備える。光センサ234a、234bは、位置解決ではなく、したがって、すべての入射角についての放射照度を積分する。それゆえ、各光センサ234a、234bは、ピンホール232a、232bの位置においてマスク平面88内の合計放射照度を検出する。

図20は、放射照度測定ユニット204a、204bを用いることによって、空間光変調器52と光学インテグレータ60との間の相対ドリフト運動をどのように測定することができるかを示す。空間光変調器52は、像領域226-1、226-5および226-8からなる照明ストライプ240が照明視野14内に生成されるように制御されることが想定される。これは、4つすべての対物領域110-1~110-4の中央列内のミラー面224が「オン」状態にあり、他のすべてのミラー面224が「オフ」状態にあることを必要とする。

20

【0084】

ストライプ240の位置は、放射照度測定ユニット204a、204bを用いることによって正確に測定される。空間光変調器52と光学インテグレータ60との間の相対位置が変化すると、マスク平面88内のストライプ240の位置も、それに応じて変化する。それゆえ、放射照度測定ユニット204a、204bを用いることによってマスク平面88内の光パターンを測定することによって、空間光変調器52と光学インテグレータ60との間の相対位置の変化を計算することが可能である。

30

1つの対物領域のマイクロミラーのみが「オン」状態にある場合、対物領域110-1~110-4の間の相対ドリフト運動を測定することが可能である。

【0085】

放射照度測定ユニット204a、204bはまた、ミラー面224の向きを測定するために使用することもできる。これは、左手側に、変調面222上に生成される光パターンを示し、右手側に、放射照度測定ユニット204a、204bによって測定されるマスク平面88内の放射照度分布を示す図21a~図21dに示されている。

図21aにおいては、特定の放射照度分布が、対物領域110-1上に、したがって、対物領域110-1が結像される光入射ファセット75上にどのように生成されるかが示されている。他のすべての光入射ファセット75は示されていない。

40

それゆえ、照明視野14内で測定される放射照度分布は、図21aの右手側に示す光パターンに直接対応する。

測定は、以下のように実施することができる。

放射照度測定ユニット204a、204bのうちの1つが、そのピンホール232a、232bが第1の像領域226-1内にあるように位置決めされる。図21bに示すように、ミラー面224-1-1が「オン」状態にされ、他のすべてのミラー面が「オフ」状態にされる。ミラー面224-1-1が適切に機能している場合、放射照度測定ユニット204aは完全な放射照度を検出する。傾斜角が正確でない場合、または、反射性コーテ

50

イングが損傷を受けている場合、低減した量の投影光のみが放射照度測定ユニット 204 a、204 に衝突する。

このとき、ミラー面 224 - 1 - 1 も「オフ」状態になる。ここでは、図 21 c に示すように、放射照度測定ユニット 204 a、204 b によって放射照度は検出されないはずである。

【0086】

次のステップにおいて、隣接する対物領域 110 - 2 からのミラー面 224 - 2 - 1 が「オン」状態にされる。ミラー面 224 - 2 - 1 も第 1 の像領域 226 - 1 上に結像されるため、依然として以前と同じ位置にある放射照度測定ユニット 204 a、204 はここで、完全な放射照度を検出するはずである。このとき、ミラー面 224 - 2 - 1 は「オフ」状態になり、放射照度測定ユニット 204 a、204 b は光を検出しないはずである。

10

【0087】

これらのステップは、第 1 の像領域 226 - 1 上に結像される 4 つすべてのミラー面 224 の向きが測定されるまで反復される。その後、放射照度測定ユニット 204 a、204 b は、第 2 の像領域 226 - 2 内の次の測定点に移動する。ここで、第 2 の像領域 226 - 1 2 上に結像される 4 つのミラー面 224 - 1 - 2、224 - 2 - 2、224 - 3 - 2 および 224 - 4 - 2 が連続して、「オフ」状態から「オン」状態にされる。ミラー面 224 の切り換えは非常に高速であるため、各像領域 226 - 1 ~ 226 - 9 の測定は、非常に迅速に完了することができる。合計で、放射照度測定ユニット 204 a、204 b は N = 9 回変位される必要があり、N は、1 つの光入射ファセット 75 上に結像されるミラー面 224 の数である。測定デバイスは 2 つの放射照度測定ユニット 204 a、204 b を備えるため、測定時間は約 50 % 低減することができる。

20

3. マーカ点

空間光変調器 52 のミラーアレイ 54 の絶対位置を測定するための別の手法は、空間光変調器 52 または空間光変調器 52 に堅固に固定される構造の直上に固定して配置される 1 つまたは複数のマーカ点を使用することを含む。

【0088】

a) マイクロミラーアレイの裏側のマーカ点

図 22 は、3 つの変調器ユニット 52 a、52 b および 52 c を備える空間光変調器 52 の一実施形態を通る概略断面図である。各変調器ユニット 52 a、52 b、52 c は、デジタルマイクロミラーアレイ 54 a、54 b、54 c を支持する支持体 152 a、152 b、152 c を備える。マイクロミラーアレイ 54 a、54 b、54 c は、マイクロミラー 56 が「オン」位置にあるか、または、「オフ」位置にあるかに応じて、2 つの異なる方向、すなわち、投影光が光学インテグレート 60 に向かって進行する第 1 の方向、および、投影光が吸光面 62 に向かって進行する第 2 の方向に向かって衝突する投影光 PL を偏向させるように構成されている。

30

【0089】

たとえば支持プレート 152 a、152 b、152 c が共通の支持構造（図示せず）に接続されているとしても、支持プレート 152 a、152 b、152 c は、照明システム 12 の動作中にわずかなドリフト運動を行う場合がある。これらのドリフト運動は、照明システム 12 内に含まれる要素の熱膨張によって引き起こされ得る。さらに上記で説明したように、そのようなドリフト運動は、対抗策がとられない場合、角度放射照度分布の視野依存性を深刻に損なう場合がある。

40

それゆえ、照明システム 12 は、図示されている実施形態において、支持プレート 152 a、152 b、152 c の裏側、すなわち、マイクロミラーアレイ 54 a、54 b、54 c の反対の側に固定して配置されている、3 対のマーカ点 160 a、160 b、160 c を備える測定デバイス 150 を備える。測定デバイス 150 は、マーカ点 160 a、160 b、160 c の位置を正確に検出するように構成されている検出器 162 をさらに備える。この目的のために使用することができる多種多様な測定規原理が存在する。例えば、検出器 162 は、マーカ点 160 a、160 b、160 c から反射される光ビームを放

50

出することができ、距離情報が、反射光の波長または位相に符号化される。位置測定システムはそれ自体、当該技術分野において既知であるため、ここではさらに詳細には説明しない。

【0090】

各マーカ点160a、160b、160cの位置を測定することによって、検出器162は、マイクロミラーアレイ54a、54b、54cが固定して取り付けられている支持プレート152a、152b、152cの最もわずかなドリフト運動でさえ、正確に検出することができる。このように、マイクロミラーアレイ54a、54b、54cのマイクロミラー56の位置を共通に測定することができる。

【0091】

b) 正面側のマーカ点

図23は、共通基板164がその正面側で複数のマイクロミラーアレイ54-1~54-9および3つのマーカ点166a~166cを支持する実施形態を概略的に示す。マーカ点166a~166cは、レーザダイオードまたは同様の発光素子によって形成され、測定デバイス150の一部である。後者は、投影光が衝突する円形領域169の外部で光学インテグレータ60の正面に取り付けられている3つの位置解決光検出器168a、168b、168cをさらに備える。

3つのマーカ点166a、166b、166cの構成は、空間光変調器52のマイクロミラーアレイ54-1~54-9とともに、第1の対物部58によって、マーカ点166a、166b、166cの像がそれぞれ位置解決光検出器168a、168b、168c内にあるように、光学インテグレータ60上に結像される。

【0092】

わずかなドリフト運動の結果として空間光変調器52の基板164と光学インテグレータ60との間の相対位置が変化すると、マーカ点166a、166b、166cの像は、位置解決光検出器168a、168b、168cにわたって動く。位置解決光検出器168a、168b、168c上のマーカ点166a、166b、166cの像の位置変化を慎重に分析することによって、6自由度すべてにおける基板164の任意の運動を測定することが可能である。

4. 反射および散乱光の測定

図24は、マイクロミラー56の位置、およびまた、向きを測定するための異なる手法を示す。この手法によれば、投影光からは区別され、空間光変調器52から反射または散乱されている測定光が検出される。

図23に示す実施形態と同様に、空間光変調器52は、間隙によって離間されており、変調面222を画定する9つのマイクロミラーアレイ54-1~54-9を支持する基板164を備える。後者は、第1の対物部58によって光学インテグレータ60上に結像される。灰色の点線は、最初に空間光変調器52に衝突し、その後、マイクロミラー56が「オン」状態になることによって第1の対物部58および光学インテグレータ60に向けて反射される投影光PLを表す。

【0093】

測定デバイス150は、この実施形態において、測定光MLを空間光変調器52上に方向付ける測定光源170を備える。測定光MLは、「オン」であるマイクロミラー56、または、「オフ」状態にあるマイクロミラー56のいずれかから、空間光変調器52の変調面222を観測するように構成されているカメラ171に向けて反射される。カメラ171は、マイクロミラー56、または、マイクロミラー56間の間隙内の構造によって反射または散乱された光を検出する。カメラ171は、対物部172と、変調面222の像が形成される位置解決光検出器174とを備える。

測定光MLが光学インテグレータ60に達するのを回避するために、投影光PLは基本的にXZ平面に平行に、空間光変調器52に衝突し、一方で、測定光MLは基本的に直交するYZ平面に平行に、空間光変調器52に衝突する。

位置解決光検出器174上のマイクロミラー56の像の位置から、マイクロミラー56

10

20

30

40

50

を支持する基板 164 がドリフトとしたか否かを検出し、また、ドリフト運動の量を定量的に決定することが可能である。隣接するマイクロミラーアレイ 54 間の相対ドリフト運動を検出することさえ可能である。

【0094】

カメラ 171 はまた、マイクロミラー 56 のミラー面の向きを検出することもできる。測定光 ML は、「オン」または「オフ」のいずれかの位置にあるマイクロミラー 56 によってカメラ 171 に向けて反射されることが好ましい。たとえ測定光 ML がミラー面のいずれかの向きにおいてカメラ 171 に向けて直に反射されない場合であっても、位置解決光検出器 172 は、マイクロミラー 56、または、ミラー面間で基板 164 上に配置されている構造によって散乱されている光の一部を検出することができる。

10

測定光 ML によって異なる方向から空間光変調器を照明することを想定することもできる。例えば、測定光源 170 は、空間光変調器 52 周りを誘導され得るように、湾曲したレール上に固定されてもよく、または、複数の測定光源 170 が、空間光変調器 52 に対して異なる位置に配置されてもよい。

【0095】

5. ドリフト運動の補償

上記において、空間光変調器 52 および光学インテグレータ 60 の間の相対ドリフト運動を測定することができる方法を詳細に説明してきた。以下において、空間光変調器 52 の制御を、測定ドリフト運動と関連付けられる悪影響を補償するために修正することができる方法を説明する。

20

図 25a は、空間光変調器 52 のマイクロミラーアレイ 54 の変調面 222 の、図 11a と同様の概略上面図である。ここで、図 25b に示すように、照明視野 14 内の像領域 226-4 が、極 27' からよりも少ない光を極 27 から受け取るように、マイクロミラー 56d は「オフ」状態にあるべきであると仮定される。

図 26a および図 26b は、熱ドリフト運動の結果としてマイクロミラーアレイ 54 が +X 方向に沿って距離 d だけ変位された後の同じ状況を示している。距離 d はここでも、1 つのマイクロミラー 56 の幅に等しいと仮定される。

【0096】

絶対的な意味での極 27、27' の位置は変化しないが、マイクロミラーアレイ 54 に対しては、極 27、27' は、-X 方向に向かって 1 つのマイクロミラー 56 の幅だけシフトする。光学インテグレータ 60 上の結像はマイクロミラーアレイ 54 のシフトによって影響を受けないため、マイクロミラー 56 の複数の異なるグループが、光入射ファセット 75 上に結像される。格子 G は、マイクロミラーアレイ 54 上の対物領域 110 の境界線を表す。ここで、「オフ」状態にあるマイクロミラーアレイ 56d が対物領域 110 内で中心にあることが分かる。その結果として、極 27' からよりも少ない投影光が極 27 から受け取られる照明視野 14 内の位置が、図 26b に示すように、像領域 226-5 に変化している。光学インテグレータ 60 に対する極 27a、27b の位置は変化していないため、それ以外で角度放射照度分布は影響を受けない。

30

【0097】

図 26a から、視野依存性の不用意な変化がどのように補償され得るかが明らかになる。マイクロミラー 56d ではなく、-X 方向に沿ってマイクロミラー 56d に隣接する次のマイクロミラーであるマイクロミラー 56d' が「オフ」状態にされるように、マイクロミラーアレイ 54 を制御することだけが必要である。このとき、同じ状況が、図 25a および 25b に示すように得られる。

40

【0098】

この単純な例は、空間光変調器 52 と光学インテグレータ 60 との間のほぼ任意の相対ドリフト運動を、空間光変調器 52 のマイクロミラー 56 を適切に制御することによって補償することができることを実証している。たとえ空間光変調器 52 が距離 d またはその整数倍だけ変位されていない場合であっても、通常、マイクロミラー 56 の制御を修正することによって、ドリフト運動と関連付けられる悪影響を最小限まで低減することが可能

50

である。

【 0 0 9 9 】

V I .

E U V

上記において、本発明を、V U V 投影光を使用する投影露光装置 1 0 を参照して説明してきた。しかしながら、上記で概説した概念を、E U V 投影装置において使用することも可能である。

国際公開第 2 0 0 9 / 1 0 0 8 5 6 号は、放射照度および角度放射照度分布の所望の視野依存性をもたらすことを可能にする E U V 照明システムを記載している。また、その場合、所望の視野依存性を達成するためには、小さいミラーが個々に制御される必要がある

10

。

V I I .

重要な方法ステップ

ここで、本発明の重要な方法ステップを、図 2 7 に示す流れ図を参照しながら要約する

。

第 1 のステップ S 1 において、複数のマイクロミラーによって形成される変調面を備える空間光変調器が提供される。各マイクロミラーは、マイクロミラーごとに個々に変更することができる向きを有するミラー面を備える。

第 2 のステップ S 2 において、ミラー面に関連する少なくとも 1 つのパラメータが測定される。

20

第 3 のステップ S 3 において、マイクロミラーの向きが、少なくとも 1 つのパラメータに応じて制御される。

第 4 のステップ S 4 において、変調面上の光パターンが生成される。

第 5 のステップ S 5 において、光パターンの像が、複数の光入射ファセットを有する光学インテグレータ上に形成される。

第 6 のステップ S 6 において、光入射ファセットの像が、マスク上で重ね合わせられる

。

【図 1】

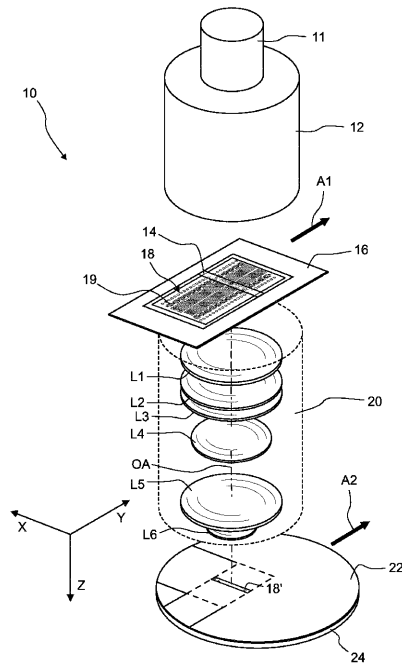


Fig.1

【図 2 a】

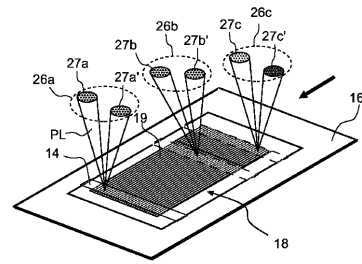


Fig. 2a

【図 2 b】

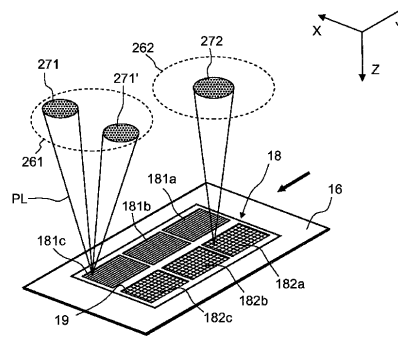


Fig. 2b

【図 3】

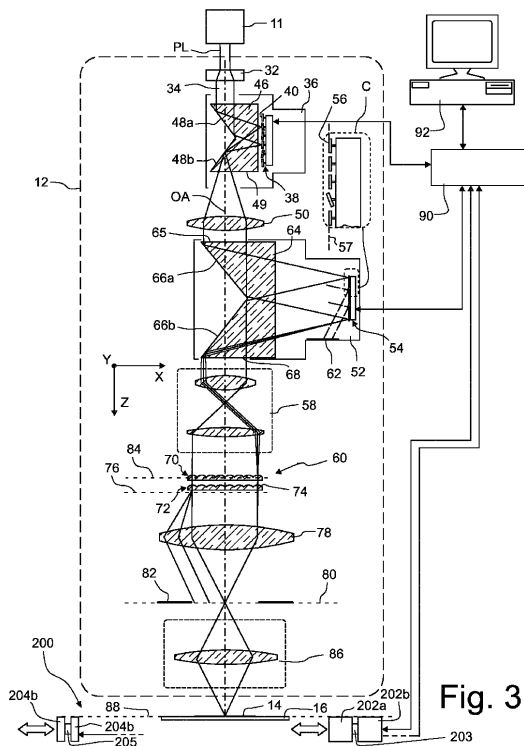


Fig. 3

【図 4】

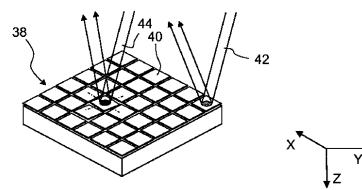


Fig. 4

【図 5】

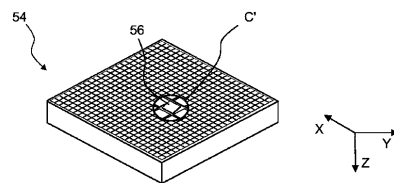


Fig. 5

【図 6】

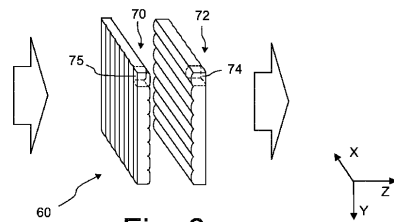
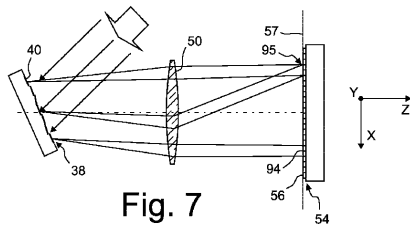
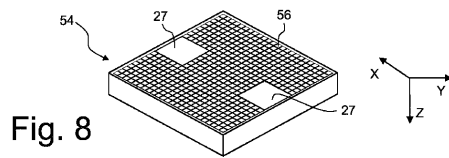


Fig. 6

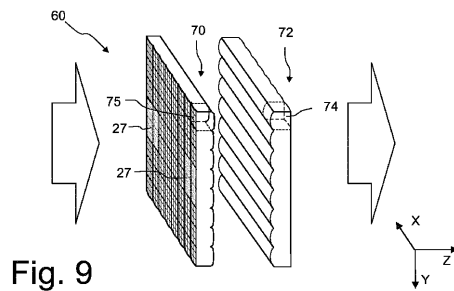
【図 7】



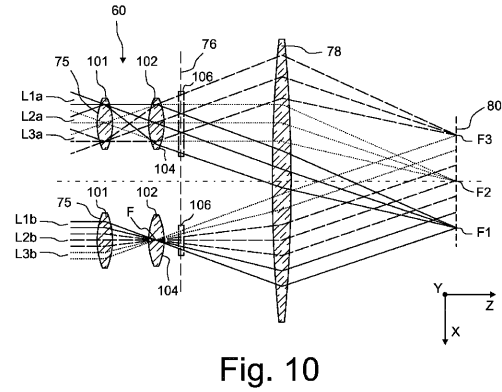
【図 8】



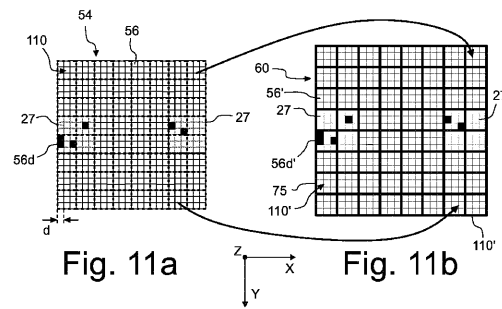
【図 9】



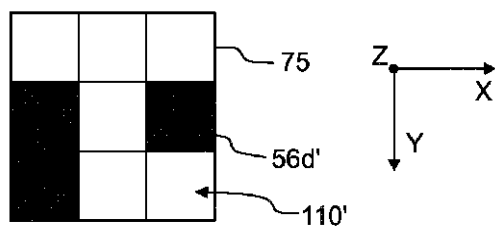
【図 10】



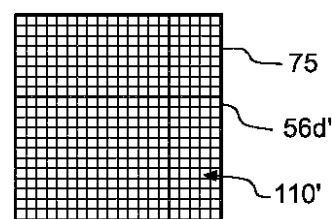
【図 11 a - 11 b】



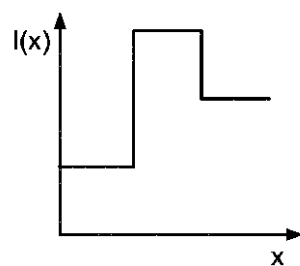
【図 12】



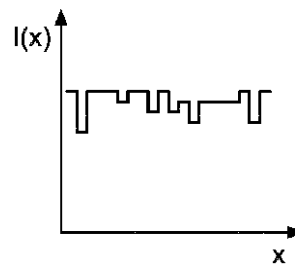
【図 14】



【図 13】



【図 15】



【図 16】

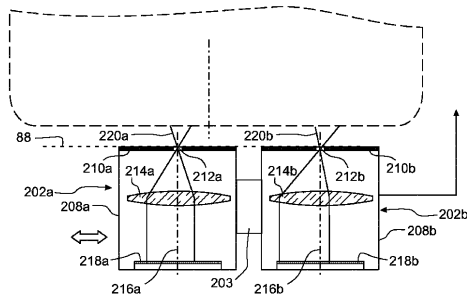


Fig. 16

【図 17】

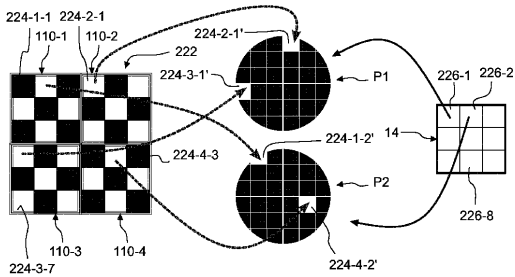


Fig. 17

【図 18 a】

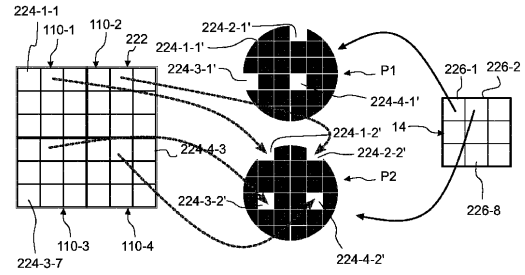


Fig. 18a

【図 18 b】

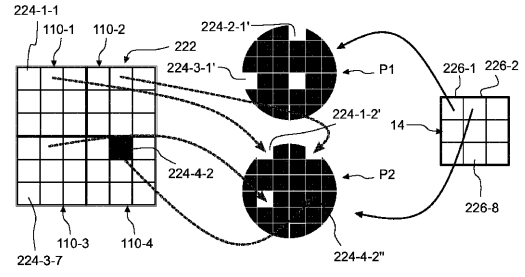


Fig. 18b

【図 19】

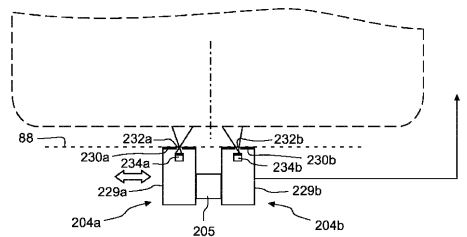


Fig. 19

【図 20】

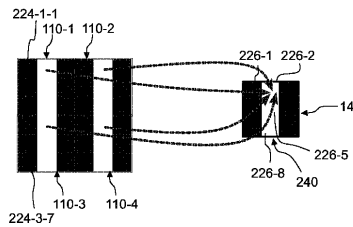


Fig. 20

【図 21 a】

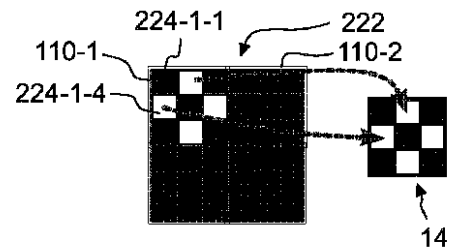


Fig. 21a

【図 2 1 b】

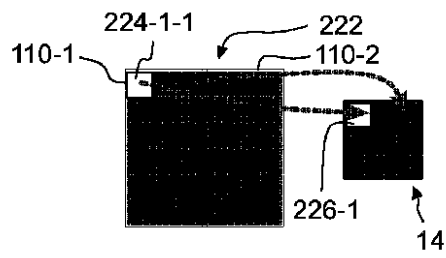


Fig. 21b

【図 2 1 c】

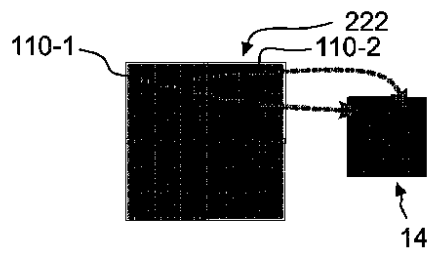


Fig. 21c

【図 2 1 d】

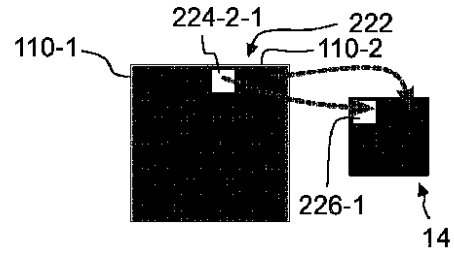


Fig. 21d

【図 2 2】

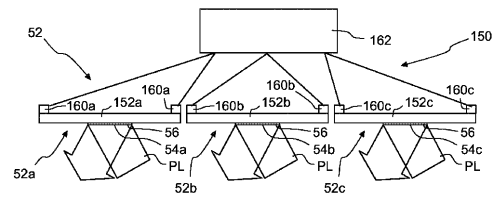


Fig. 22

【図 2 3】

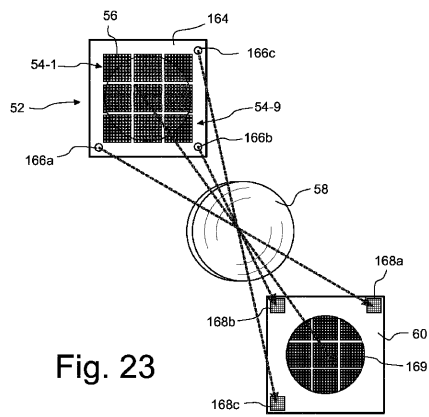


Fig. 23

【図 2 4】

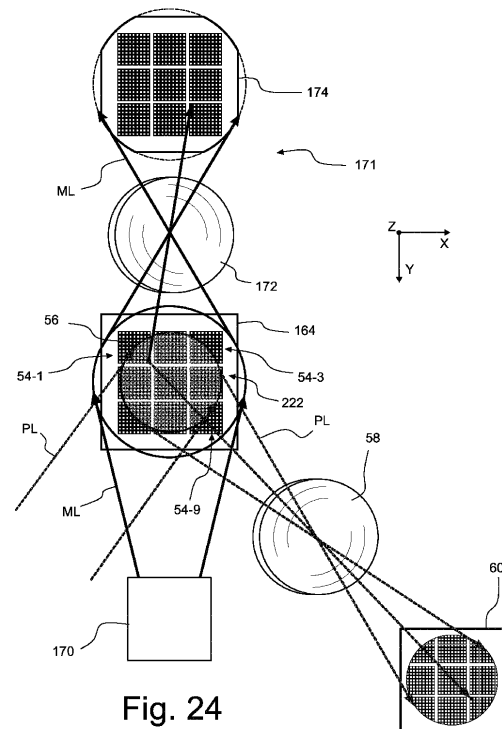


Fig. 24

【図 25 a - 26 b】

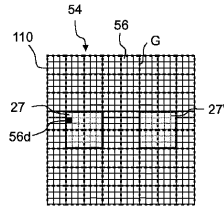


Fig. 25a

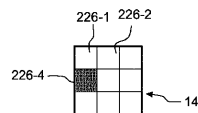


Fig. 25b

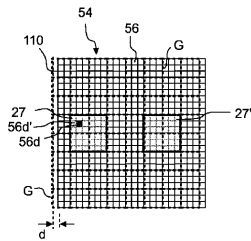


Fig. 26a

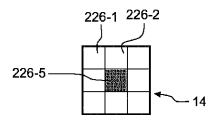


Fig. 26b

【図 27】

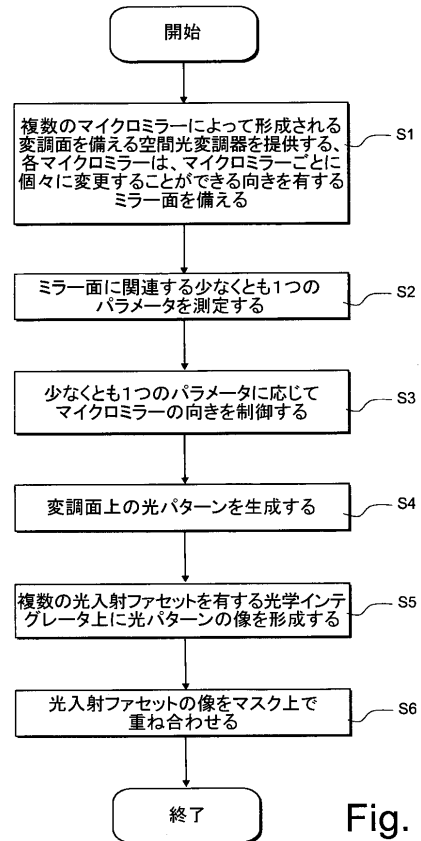


Fig. 27

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
G 0 1 N 21/84 E

(74)代理人 100109070
弁理士 須田 洋之

(74)代理人 100120525
弁理士 近藤 直樹

(74)代理人 100139712
弁理士 那須 威夫

(74)代理人 100158469
弁理士 大浦 博司

(72)発明者 デギュンター マルクス
ドイツ連邦共和国 6 1 1 9 7 フロールシュタット イン デン ラッヘゲルテン 4 0

(72)発明者 アイゼンメンゲル ヨハネス
ドイツ連邦共和国 8 9 0 7 5 ウルム フィルホフシュトラッセ 1 4 / 6

(72)発明者 ヒルト シュテファニ
ドイツ連邦共和国 7 3 4 3 0 アーレン ガルテンシュトラッセ 1 1 1

(72)発明者 コルプ トマス
ドイツ連邦共和国 7 3 5 2 5 シュヴェービッシュ グミュント ヨーゼフシュトラッセ 1 7

(72)発明者 シュレゼナー フランク
ドイツ連邦共和国 8 9 5 4 7 ゲルシュテッテン フックスヴェーク 2 4

(72)発明者 マウル マンフレート
ドイツ連邦共和国 7 3 4 3 4 アーレン エルヒヴェーク 2 9

審査官 長谷 潮

(56)参考文献 特開 2 0 1 5 - 1 1 1 6 7 2 (J P , A)
特開 2 0 1 5 - 0 0 5 6 7 6 (J P , A)
特開 2 0 0 5 - 3 1 1 0 8 4 (J P , A)
国際公開第 2 0 1 2 / 1 6 9 0 9 0 (W O , A 1)
国際公開第 2 0 0 9 / 0 6 0 7 4 4 (W O , A 1)
特開平 0 7 - 2 2 0 9 8 9 (J P , A)
特開 2 0 1 0 - 1 5 3 4 1 3 (J P , A)
特開 2 0 0 2 - 3 7 2 7 9 0 (J P , A)
特開 2 0 0 9 - 1 1 7 6 7 1 (J P , A)
特開 2 0 1 5 - 1 1 1 6 7 3 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B名)

G 0 3 F 7 / 2 0 - 7 / 2 4
H 0 1 L 2 1 / 0 2 7
G 0 3 F 1 / 0 0 - 1 / 8 6
G 0 1 N 2 1 / 8 4
G 0 1 N 2 1 / 9 5 6
G 0 2 B 1 9 / 0 0