

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5890531号
(P5890531)

(45) 発行日 平成28年3月22日(2016.3.22)

(24) 登録日 平成28年2月26日(2016.2.26)

(51) Int.Cl.

F 1

G 0 1 D 5/38 (2006.01)

G 0 1 D 5/38

A

G 0 1 B 9/02 (2006.01)

G 0 1 B 9/02

G 0 1 D 5/347 (2006.01)

G 0 1 D 5/347

1 1 O U

請求項の数 34 (全 33 頁)

(21) 出願番号 特願2014-541271 (P2014-541271)
 (86) (22) 出願日 平成24年11月8日 (2012.11.8)
 (65) 公表番号 特表2014-535061 (P2014-535061A)
 (43) 公表日 平成26年12月25日 (2014.12.25)
 (86) 國際出願番号 PCT/US2012/064211
 (87) 國際公開番号 WO2013/070957
 (87) 國際公開日 平成25年5月16日 (2013.5.16)
 審査請求日 平成26年9月12日 (2014.9.12)
 (31) 優先権主張番号 61/557,776
 (32) 優先日 平成23年11月9日 (2011.11.9)
 (33) 優先権主張国 米国(US)
 (31) 優先権主張番号 61/557,755
 (32) 優先日 平成23年11月9日 (2011.11.9)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 598176743
 ザイゴ コーポレーション
 Z Y G O C O R P O R A T I O N
 アメリカ合衆国 コネチカット州 064
 55ミドルフィールド ローレル ブルッ
 ク ロード (番地なし)
 (74) 代理人 100105957
 弁理士 恩田 誠
 (74) 代理人 100068755
 弁理士 恩田 博宣
 (74) 代理人 100142907
 弁理士 本田 淳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】干渉方式エンコーダシステムのための小型エンコーダヘッド

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

エンコーダシステムであって、
 エンコーダスケールと、

光を前記エンコーダスケールへと方向付けて複数の2回回折測定ビームを生成し、前記複数の2回回折測定ビームの各々を、対応する参照ビームと合成して複数の出力ビームを形成するように構成されたエンコーダヘッドであって、

前記エンコーダヘッドは複数のファセットを有するモノリシック光学部品を含み、
 前記複数のファセットが、

複数の1回回折測定ビームを前記エンコーダスケールの表面から受け取り、

前記複数の1回回折測定ビームを前記エンコーダスケールの前記表面に戻すべく方向転換させるように構成され、

前記エンコーダスケールが、前記1回回折測定ビームの経路内に位置付けられて、前記2回回折測定ビームを生成し、

前記2回回折測定ビームは、前記エンコーダスケールに対するリトロウ条件を満たさない、前記エンコーダヘッドと、

複数の検出素子であって、各検出器が対応する出力ビームを検出するように位置付けられた、前記複数の検出素子と、

電子プロセッサであって、

前記検出素子の各々からの干渉信号を受け取ることであって、各干渉信号が、前記2

10

20

回回折測定ビームのうちの1つと前記対応する参照ビームとの間の光路差に関する位相を含む、前記干渉信号を受け取ること、

各干渉信号に関する前記位相に基づいて、前記エンコーダスケールの自由度に関する情報を判定することを実行するように構成された前記電子プロセッサとを備える、エンコーダシステム。

【請求項2】

前記モノリシック光学部品が立方体の形状を有する、請求項1に記載のエンコーダシステム。

【請求項3】

前記モノリシック光学部品が直方体の形状を有する、請求項1に記載のエンコーダシステム。 10

【請求項4】

前記モノリシック光学部品が、非回折測定ビームを受け取り、前記2回回折測定ビームを発するように配置された第一のファセットを含み、

前記第一のファセットが、前記第一のファセットに垂直な方向に伝播する放射を透過させ、前記第一のファセットに対して傾斜角度で入射する放射を反射する、請求項1に記載のエンコーダシステム。

【請求項5】

前記モノリシック光学部品が、1回回折測定ビームまたは2回回折測定ビームを前記エンコーダスケールから受け取るように配置された第二のファセットを含み。 20

前記第二のファセットが、前記第二のファセットに垂直な方向に伝播する放射を透過させる、請求項4に記載のエンコーダシステム。

【請求項6】

前記第二のファセットが、前記第一のファセットの正面に、前記第一のファセットと対向するように配置される、請求項5に記載のエンコーダシステム。

【請求項7】

前記第二のファセットが、前記第一のファセットに対して垂直に配置される、請求項5に記載のエンコーダシステム。

【請求項8】

前記第二のファセットが、

30

前記第二のファセットに対して第一の傾斜角度範囲で前記第二のファセットに入射する放射を反射し、

前記第二のファセットに対して第二の異なる傾斜角度範囲で前記第二のファセットに入射する放射を透過させるように構成される、請求項7に記載のエンコーダシステム。

【請求項9】

前記モノリシック光学部品の側面ファセットが、前記側面ファセットに対して傾斜角度で入射する放射を反射する、請求項4に記載のエンコーダシステム。

【請求項10】

前記エンコーダスケールが1D格子または2D格子を含み、

前記1D格子または2D格子が、第一の方向に沿って延びる溝で構成される、請求項1に記載のエンコーダシステム。 40

【請求項11】

前記モノリシック光学部品の側面ファセットを含む平面が、前記第一の方向に対して傾斜角度に向けられる、請求項10に記載のエンコーダシステム。

【請求項12】

前記モノリシック光学部品が正六角柱プリズムである、請求項1に記載のエンコーダシステム。

【請求項13】

前記エンコーダヘッドが、非回折測定ビームを第一のビーム経路に沿って前記エンコーダスケールへと方向付けるように構成され、 50

前記非回折測定ビームの前記第一のビーム経路が、前記モノリシック光学部品の外側にある、請求項1に記載のエンコーダシステム。

【請求項14】

前記エンコーダスケールが、前記モノリシック光学部品に対して、入射ビームを第二のビーム経路に沿って回折させるように位置付けられ、

回折された入射ビームの前記第二のビーム経路が、前記モノリシック光学部品の外側にある、請求項13に記載のエンコーダシステム。

【請求項15】

前記入射ビームが、前記1回回折測定ビームのうちの1つを含む、請求項14に記載のエンコーダシステム。

10

【請求項16】

前記モノリシック光学部品が正五角柱プリズムを含む、請求項1に記載のエンコーダシステム。

【請求項17】

前記1回回折測定ビームが、

前記エンコーダスケールからの正の回折次数から得られる第一の1回回折測定ビームと

、前記エンコーダスケールからの負の回折次数から得られる第二の1回回折測定ビームとを含む、請求項1に記載のエンコーダシステム。

【請求項18】

前記第一の1回回折測定ビームと第二の1回回折測定ビームが、第一の平面に沿った正と負の回折次数から取得され、

前記1回回折測定ビームが、第二の直交する方向に沿って、それぞれ前記エンコーダスケールからの正の次数と負の次数の回折から取得される第三の1回回折測定ビームと第四の1回回折測定ビームをさらに含む、請求項17に記載のエンコーダシステム。

20

【請求項19】

入力ビームを受け取り、前記入力ビームから、(1)各2回回折測定ビームのための前記対応する参照ビームと、(2)入射測定ビームとを取得するように構成された複数の光学素子をさらに備える、請求項1に記載のエンコーダシステム。

【請求項20】

前記複数の光学素子が、

複数のビームスプリッタと、

再帰性反射体とを含む、請求項19に記載のエンコーダシステム。

30

【請求項21】

前記モノリシック光学部品が、

入力ビームを受け取り、

前記入力ビームから、(1)各2回回折測定ビームのための前記対応する参照ビームと、(2)入射測定ビームとを取得するように構成される、請求項1に記載のエンコーダシステム。

【請求項22】

前記モノリシック光学部品がビーム分離ファセットを含み、

前記ビーム分離ファセットが、

前記入力ビームを、前記入力ビームの偏光と、前記ビーム分離ファセットに関する指定の入射角に基づいて分離し、

前記指定の入射角以外の入射角で前記ビーム分離ファセットに入射したビームを反射するように構成される、請求項21に記載のエンコーダシステム。

40

【請求項23】

前記モノリシック光学部品から前記参照ビームを受け取り、回折参照ビームを前記モノリシック光学部品へと方向転換させるように位置付けられた参照格子をさらに備える、請求項22に記載のエンコーダシステム。

50

【請求項 2 4】

システムであって、

移動可能ステージと、請求項 1 に記載の前記エンコーダシステムとを備え、

前記エンコーダシステムまたは被測定物の何れかが、前記移動可能ステージに取り付けられる、システム。

【請求項 2 5】

リソグラフィシステムであって、

請求項 1 に記載のエンコーダシステムと、

移動可能ステージであって、前記エンコーダシステムまたは被測定物の何れかが取り付けられる移動可能ステージと、

10

前記エンコーダシステムに連結された照明システムであって、前記照明システムは、放射源を含み、前記放射源が、前記リソグラフィシステムの動作中に前記エンコーダシステムに放射を方向付ける、前記照明システムと、

前記リソグラフィシステムの動作中に、前記エンコーダシステムから出力ビームを検出する検出器と、

前記電子プロセッサに連結され、前記エンコーダシステムの変位に関する情報に基づいてステージの位置を調節するように構成された位置決めシステムとを備える、リソグラフィシステム。

【請求項 2 6】

エンコーダスケールと共に使用するためのエンコーダヘッドであって、

20

前記エンコーダヘッドが、複数の 2 回回折測定ビームの各々を、対応する参照ビームと合成して複数の出力ビームを形成するように構成され、

前記エンコーダヘッドが、複数のファセットを有するモノリシック光学部品を含み、

前記複数のファセットが、

i) 前記エンコーダスケールの表面から複数の 1 回回折測定ビームを受け取り、

i i) 前記複数の 1 回回折測定ビームを、前記エンコーダスケールの前記表面に向かって戻すべく方向転換させるように構成され、

前記エンコーダスケールが、1 回回折ビームの経路内に位置付けられて、前記 2 回回折測定ビームを生成し、

前記 2 回回折測定ビームは、前記エンコーダスケールに対するリトロウ条件を満たさない、エンコーダヘッド。

30

【請求項 2 7】

前記モノリシック光学部品の第一の縁辺と前記モノリシック光学部品の反対側の第二の縁辺が、平行から約 10° より小さい角度だけそれている、請求項 1 に記載のエンコーダシステム。

【請求項 2 8】

前記複数の 1 回回折測定ビームは、単一の非回折測定ビームから取得される、請求項 1 に記載のエンコーダシステム。

【請求項 2 9】

前記複数の 1 回回折測定ビームは、単一の非回折測定ビームから取得される、請求項 2 6 に記載のエンコーダヘッド。

40

【請求項 3 0】

前記複数の 1 回回折測定ビームは、前記エンコーダスケールに対するリトロウ条件を満たさない、請求項 1 に記載のエンコーダシステム。

【請求項 3 1】

前記複数の 1 回回折測定ビームは、前記エンコーダスケールに対するリトロウ条件を満たさない、請求項 2 6 に記載のエンコーダヘッド。

【請求項 3 2】

前記第一のファセットは、前記第一のファセットに対して垂直な方向に伝搬する放射の少なくとも 75 % を透過させ、前記第一のファセットに対して傾斜角度で入射する放射の

50

少なくとも 75 % を反射する、請求項 4 に記載のエンコーダシステム。

【請求項 3 3】

前記第二のファセットは、前記第二のファセットに対して垂直な方向に伝搬する放射の少なくとも 75 % を透過させる、請求項 5 に記載のエンコーダシステム。

【請求項 3 4】

前記モノリシック光学部品の側面ファセットは、前記側面ファセットに対して傾斜角度で入射する放射の少なくとも 75 % を反射する、請求項 9 に記載のエンコーダシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

ある場合において、干渉方式の測定システムは、光干渉信号に基づいて被測定物の相対位置の変化をモニタする。例えば、干渉計は、被測定物から反射された測定ビームを、「参照ビーム」と呼ばれることがある第二のビームと重ね合わせて、干渉させることによって光干渉信号を発生させ、この測定ビームと参照ビームは共通の光源から得られる。被測定物の相対位置の変化は、測定された光干渉信号の位相の変化に対応する。

【背景技術】

【0002】

20

このような干渉方式測定システムの一例が干渉方式エンコーダシステムであり、エンコーダスケールと呼ばれる測定目盛りを追跡することによって、物体の移動を評価する。一般に、干渉方式エンコーダシステムはエンコーダスケールとエンコーダヘッドを含む。エンコーダヘッドは、干渉計を含むアセンブリである。干渉計は測定ビームをエンコーダスケールへと向かわせ、エンコーダスケールで光が回折する。干渉計は回折した測定ビームを参照ビームと合成して、物体の位置に関係する位相を含む出力ビームを形成する。エンコーダシステムは、リソグラフィの用途で、リソグラフィツール内の移動可能ステージの移動をモニタするために広く用いられている。エンコーダシステムは、それが大気ゆらぎの影響を比較的受けにくいことから、このような用途において有益となりうる。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0003】

30

本願は、小型エンコーダヘッドに関する。本発明の様々な態様は以下のとおりまとめられる。

一般に、第一の態様において、本願の主題は、エンコーダスケールとともに使用するためのエンコーダヘッドに具体化することができ、エンコーダヘッドは、複数の2回回折測定ビームの各々を対応する参照ビームと合成して複数の出力ビームを形成するように構成され、エンコーダヘッドは、複数のファセットを有するモノリシック光学部品を含み、複数のファセットは、i) 複数の1回回折測定ビームをエンコーダスケールの表面から受け取り、ii) 複数の1回回折測定ビームをエンコーダスケールの表面に戻すべく方向転換させるように構成され、エンコーダスケールは、1回回折測定ビームの経路内に位置付けられて、2回回折測定ビームを生成する。

【0004】

40

他の態様において、本願の主題はエンコーダシステムに具体化することができ、エンコーダシステムはエンコーダスケールと、エンコーダヘッドとを含み、エンコーダヘッドは、複数の2回回折測定ビームの各々を対応する参照ビームと合成して複数の出力ビームを形成するように構成され、エンコーダヘッドは、複数のファセットを有するモノリシック光学部品を含み、複数のファセットは、複数の1回回折測定ビームをエンコーダスケールの表面から受け取り、複数の1回回折測定ビームをエンコーダスケールの表面に戻すべく方向転換させるように配置され、エンコーダスケールは、1回回折測定ビームの経路内に位置付けられて、2回回折測定ビームを生成する。エンコーダシステムは、出力ビームを検出するように位置付けられた複数の検出素子と、電子プロセッサとをさらに含むことができ、電子プロセッサは、検出素子の各々からの干渉信号であって、2回回折測定ビーム

50

のうちの 1 つとそれに対応する参照ビームの間の光路差に関する位相を含むような干渉信号を受け取り、各干渉信号に関する位相に基づいて、エンコーダスケールの自由度に関する情報を判定するように構成される。

【 0 0 0 5 】

システムの実装形態は、以下の特徴および／または他の様の特徴の 1 つまたは複数を含むことができる。例えば、モノリシック光学部品は立方体の形状をとることができる。いくつかの実装形態において、モノリシック光学部品は直方体の形状をとる。

【 0 0 0 6 】

いくつかの実装形態において、モノリシック光学部品は、非回折測定ビームを受け取り、2 回回折測定ビームを発するように構成された第一のファセットを含む。第一のファセットは、第一のファセットに垂直な方向に伝播する放射は実質的に透過させ、第一のファセットに対して傾斜角度で入射する放射は実質的に反射することができる。モノリシック光学部品は、1 回回折または 2 回回折測定ビームをエンコーダスケールから受け取るよう構成された第二のファセットを含むことができる。第二のファセットは、第二のファセットに垂直な方向に伝播する放射は実質的に透過させることができる。第二のファセットは、第一のファセットの向かいに、第一のファセットと対向するように配置することができる。

【 0 0 0 7 】

あるいは、第二のファセットは、第一のファセットに対して垂直に配置することができる。第二のファセットは、第二のファセットに対して第一の傾斜角度範囲で第二のファセットに入射する放射を反射し、第二のファセットに対して第二の異なる傾斜角度範囲で第二のファセットに入射する放射を透過させるように構成できる。

【 0 0 0 8 】

いくつかの実装形態において、モノリシック光学部品の側面ファセットは、その側面ファセットに対して傾斜角度で入射する放射を実質的に反射する。

いくつかの実装形態において、エンコーダスケールは 1 D または 2 D 格子を含む。格子は、第一の方向に沿って延びる溝で構成することができる。ある場合において、モノリシック光学部品の側面ファセットを含む平面は、第一の方向に対して傾斜角度に向けることができる。

【 0 0 0 9 】

いくつかの実装形態において、モノリシック光学部品は正六角柱プリズムまたは正五角形柱プリズムを含むことができる。

特定の実装形態において、エンコーダヘッドは、非回折測定ビームを第一のビーム経路に沿ってエンコーダスケールへと方向付けるように構成することができ、非回折測定ビームの第一のビーム経路はモノリシック光学部品の外側にある。エンコーダスケールは、モノリシック光学部品に対して、入射ビームを第二のビーム経路に沿って回折させるように位置付けることができ、回折入射ビームの第二のビーム経路はモノリシック光学部品の外側にある。

【 0 0 1 0 】

いくつかの実装形態において、1 回回折測定ビームは、エンコーダスケールからの正の回折次数から得られる第一の 1 回回折測定ビームと、エンコーダスケールからの負の回折次数から得られる第二の 1 回回折測定ビームを含む。第一と第二の 1 回回折測定ビームは、第一の平面内で正と負の回折次数を含むことができる。1 回回折測定ビームは、第一の平面に垂直な第二の平面内でのエンコーダスケールからのそれぞれ正の回折次数と負の回折次数を含む、第三と第四の 1 回回折測定ビームをさらに含むことができる。

【 0 0 1 1 】

いくつかの実装形態において、システムは、入力ビームを受け取り、この入力ビームから、(1) 各 2 回回折測定ビームのための対応する参照ビームと、(2) 入射測定ビームとを取得するように構成された複数の光学素子をさらに含む。複数の光学素子は、複数のビームスプリッタと再帰性反射体を含むことができる。

10

20

30

40

50

【0012】

いくつかの実装形態において、モノリシック光学部品は、入力ビームを受け取り、この入力ビームから、(1)各2回回折測定ビームのための対応する参照ビームと、(2)入射測定ビームと、を得るように構成される。モノリシック光学部品はビーム分離ファセットを含むことができ、ビーム分離ファセットは入力ビームを、入力ビームの偏光と、ビーム分離ファセットに関する指定の入射角に基づいて分離し、指定の入射角以外の入射角でビーム分離ファセットに入射した光を反射するように構成される。システムは、モノリシック光学部品から参照ビームを受け取り、回折参照ビームをモノリシック光学部品へと方向転換するように位置付けられた参照格子をさらに含むことができる。

【0013】

他の態様において、本願の主題はシステムに具体化することができ、システムは、移動可能ステージと、エンコーダシステムとを含み、エンコーダシステムまたは被測定物の何れかが移動可能ステージに取り付けられる。エンコーダシステムは、エンコーダスケールとエンコーダヘッドを含むことができ、エンコーダヘッドは、複数の2回回折測定ビームの各々の2回回折測定ビームを対応する参照ビームと合成して複数の出力ビームを形成するように構成される。いくつかの実装形態において、エンコーダヘッドは、複数のファセットを有するモノリシック光学部品を含み、複数のファセットは、エンコーダスケールの表面から複数の1回回折測定ビームを受け取り、複数の1回回折測定ビームをエンコーダスケールの表面へと戻すべく方向転換せざるよう配置される。いくつかの実装形態において、エンコーダスケールは、1回回折測定ビームの経路内に位置付けられて、2回回折測定ビームを生成する。エンコーダシステムは、出力ビームを検出するように位置付けられた複数の検出素子と、検出素子の各々から干渉信号を受け取るよう構成された電子プロセッサとをさらに含むことができ、各干渉信号は、2回回折測定ビームの1つと対応する参照ビームの間の光路差に関する位相を含む。電子プロセッサは、各干渉信号に関する位相に基づいて、エンコーダスケールの自由度に関する情報を判定するようにさらに構成できる。

【0014】

他の態様において、本願の主題はリソグラフィシステムに具体化することができ、これは、エンコーダシステムと、移動可能ステージであって、エンコーダシステムまたは被測定物の何れかが取り付けられる移動可能ステージと、エンコーダシステムに連結された照明システムと、リソグラフィシステムの動作中にエンコーダシステムからの出力ビームを検出する検出器と、電子プロセッサに連結され、エンコーダスケールの変位に関する情報に基づいて、ステージの位置を調節するよう構成された位置決めシステムとを含む。照明システムは放射源を含むことができ、リソグラフィシステムの動作中、この放射源は放射をエンコーダシステムへと向ける。エンコーダシステムは、エンコーダスケールと、複数の2回回折測定ビームの各々を対応する参照ビームと合成して複数の出力ビームを生成するよう構成されたエンコーダヘッドとを含むことができる。エンコーダヘッドは、複数のファセットを有するモノリシック光学部品を含むことができ、複数のファセットは、エンコーダスケールの表面から複数の1回回折測定ビームを受け取り、複数の1回回折測定ビームをエンコーダスケールの表面へと戻すべく方向転換せざるよう配置される。エンコーダスケールは、1回回折測定ビームの経路内に位置付けられて、2回回折測定ビームを生成することができる。エンコーダシステムは、出力ビームを検出するように位置付けられた複数の検出素子と、電子プロセッサとをさらに含むことができ、電子プロセッサは、検出素子の各々からの干渉信号であって、2回回折測定ビームの1つと対応する参照ビームの間の光路差に関する位相を含むような干渉信号を受け取り、各干渉信号の位相に基づいて、エンコーダスケールの自由度に関する情報を判定するよう構成される。

【0015】

本明細書で開示される主題の様々な態様の利点としては、例えば、干渉方式エンコーダシステムに、位置測定に必要な光学素子および/または別々のエンコーダヘッドの数が少なくて済むという点を挙げることができる。他の利点には、例えば、干渉方式エンコーダ

10

20

30

40

50

システムおよび／またはエンコーダヘッドのための低成本および／または単純な設計が含まれる。

【0016】

1つまたは複数の実施形態の詳細が添付の図面と以下の説明に示される。その他の特徴と利点は説明、図面および特許請求の範囲から明らかとなるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】一例としての干渉方式エンコーダシステムの概略図である。

【図2A】一例としての光学部品の断面の概略図である。

【図2B】図2Aに示される光学部品の三次元（3D）概略図である。 10

【図2C】一例としての光学部品の3D概略図である。

【図3A】一例としてのモノリシック光学部品の3D概略図である。

【図3B】一例としてのモノリシック光学部品の3D概略図である。

【図4A】一例としての光学部品の断面の概略図である。

【図4B】図4Aに示される光学部品の3D概略図である。

【図5】例としての光学部品の3D概略図である。

【図6】例としての光学部品の3D概略図である。

【図7】例としての光学部品の3D概略図である。

【図8】一例としての干渉方式エンコーダヘッドの概略図である。

【図9】一例としての干渉方式エンコーダヘッドの概略図である。 20

【図10】一例としての干渉方式エンコーダヘッドの3D概略図である。

【図11】一例としての干渉方式エンコーダヘッドの概略図である。

【図12】一例としての干渉方式エンコーダヘッドの概略図である。

【図13】干渉方式エンコーダヘッドの望ましくない出力ビームから望ましい出力ビームを分離するための光学素子の使用例を示す概略図である。

【図14】一例としてのリソグラフィツールの概略図である。

【図15A】半導体装置の製造シーケンスのフローチャートである。

【図15B】ウェハプロセスの詳細を示すフローチャートである。

【図16A】透過型および反射型格子のパッチを使用するエンコーダヘッドの一例を示す概略図である。 30

【図16B】透過型および反射型格子のパッチを使用するエンコーダヘッドの一例を示す概略図である。

【図16C】図16Bに示されるエンコーダヘッドの3D概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

図1を参照すると、干渉方式エンコーダシステム100は、光源モジュール120（例えば、レーザを含む）と、光学アセンブリ110と、被測定物101と、検出器モジュール130（例えば、偏光子と光検出器）と、電子プロセッサ150とを含む。一般に、光源モジュール120は光源を含み、また、ビーム成形光学系（例えば、光コリメート光学系）、導光部品（例えば、光ファイバ導波路）、および／または偏光制御光学系（例えば、偏光子および／または波長板）等の他の部品も含むことができる。光学アセンブリ110の各種の実施形態を以下に説明する。いくつかの実装形態において、光学アセンブリはまた、「エンコーダヘッド」と呼ばれることがある。デカルト座標系が参照のために示されており、Y方向（図示せず）はページの中に向かって延びる。 40

【0019】

被測定物101は、Z軸に沿って光学アセンブリ110からある名目上の距離（nominal distance）に位置付けられる。多くの用途において、例えばエンコーダシステムがリソグラフィツール内のウェハステージまたはレチクルステージの位置をモニタするために使用される場合、被測定物101は、光学アセンブリ110に対してxおよび／またはy方向に移動され、その一方で、z軸については名目上（nominally）、光学アセンブリから 50

一定の距離が保たれる。この一定の距離は比較的小さくすることができる（例えば、数センチメートルまたはそれより小さい）。しかしながら、このような用途では、被測定物の位置は一般に、名目上一定の距離から少量だけ変化し、デカルト座標系内の被測定物の相対的向きも少量だけ変化する可能性がある。動作中、エンコーダシステム 100 は、光学アセンブリ 110 に関する被測定物 101 のこれらの自由度のうちの 1 つまたは複数を、 x 軸に関する被測定物 101 の位置を含め、さらには y 軸および / または z 軸に関する、および / またはピッチとヨーの角方位に関する被測定物 101 の位置を含めて、モニタする。

【 0 0 2 0 】

被測定物 101 の位置をモニタするために、光源モジュール 120 は入力ビーム 122 を光学アセンブリ 110 へと方向付ける。光学アセンブリ 110 は、入力ビーム 122 から測定ビーム 112 を得て、測定ビーム 112 を被測定物 101 へと方向付ける。光学アセンブリ 110 はまた、入力ビーム 122 から参照ビーム（図示せず）も得て、参照ビームを測定ビームとは異なる経路に沿って方向付ける。例えば、光学アセンブリ 110 は、入力ビーム 122 を測定ビーム 112 と参照ビームに分離するビームスプリッタを含むことができる。測定および参照ビームは、直交偏光（例えば、直交直線偏光）を有することができる。

【 0 0 2 1 】

被測定物 101 はエンコーダスケール（encoder scale）105 を含み、エンコーダスケール 105 は、例えば測定ビームをエンコーダヘッドから 1 つまたは複数の回折次数に回折させる測定目盛りである。一般に、エンコーダスケールは多種多様な回折構造を含むことができ、例えば格子またはホログラフ回折構造がある。格子の例には、正弦格子、矩形格子、または鋸歯状格子が含まれる。格子は、ピッチが一定の周期的構造によってだけでなく、より複雑な周期的構造（例えば、チャープ格子）によって特徴付けることができる。一般に、エンコーダスケールは、測定ビームを複数の平面へと回折させることができる。例えば、エンコーダスケールは、測定ビームを x - z および y - z 平面内での回折次数に回折させる二次元格子とすることができます。エンコーダスケールは、 x - y 平面内と、被測定物 101 の移動範囲に対応する距離にわたって延びる。

【 0 0 2 2 】

この実施形態において、エンコーダスケール 105 は、その格子線がページの平面に対して垂直に延び、図 1 に示すようなデカルト座標系の y 軸に平行に延びるような格子である。格子線は x 軸に沿って周期的である。エンコーダスケール 105 の格子面は x - y 平面に対応し、エンコーダスケールは測定ビーム 112 を y - z 平面内の 1 つまたは複数の回折次数に回折させる。

【 0 0 2 3 】

測定ビームのこれらの回折次数（例えば、+1 または -1 次回折）のうちの少なくとも 1 つ（ビーム 114 として示される）は光学アセンブリ 110 に戻り、ここで光学素子を使って回折測定ビームが参照ビームと合成されて、出力ビーム 132 が形成される。あるいは、アセンブリ 110 の中の光学素子を使って、回折測定ビームがエンコーダスケールに戻るように方向転換されて、2 回目の回折が行われてから、参照ビームと合成される。

【 0 0 2 4 】

出力ビーム 132 は、測定ビームと参照ビームの間の光路長の差に関する位相情報を含む。光学アセンブリ 110 は、出力ビーム 132 を検出器モジュール 130 へと方向付け、検出器モジュール 130 が出力ビームを検出して、検出された出力ビームに応答して信号を電子プロセッサ 150 に送信する。電子プロセッサ 150 は、信号を受信して分析し、光学アセンブリ 110 に関する被測定物 101 の 1 つまたは複数の自由度に関する情報を判定する。検出された出力ビームに基づいて 1 つまたは複数の自由度に関する情報を判定する例示的な技術の一例を、米国特許第 8,300,233 号明細書に見つけることができ、その全体を参照によって本願に援用する。

【 0 0 2 5 】

10

20

30

40

50

特定の実施形態において、測定および参照ビームに小さい周波数の差（例えば、 $k \text{ Hz}$ ~ $M \text{ Hz}$ 範囲の差）があり、この周波数の差に概して対応する周波数の関心対象（*interest*）の干渉信号が生成される。この周波数は以下、「ヘテロダイン」周波数と互換的に言及される。被測定物の相対位置の変化に関する情報は、このヘテロダイン周波数での干渉信号の位相に概して対応する。信号処理技術を使って、この位相を抽出できる。一般に、移動可能な被測定物によって、この位相項は時間変化する。この点で、被測定物の運動の一次時間微分により、干渉信号の周波数がヘテロダイン周波数からある量だけシフトし、このことを本明細書では「ドップラー」シフト（Doppler shift）と呼ぶ。

【0026】

測定および参照ビームの異なる周波数は、例えばレーザのゼーマン分離によって、音響光学変調によって、2種類の異なるレーザモードを使用するか、または複屈折素子を使用してレーザ内部で、およびその他の技術によって生成できる。直交偏光により、偏光ビームスプリッタが測定および参照ビームを異なる経路に沿って方向付け、これらを合成して出力ビームを形成でき、出力ビームはその後、偏光子を通過して直交偏光成分と混ざり合うため、これらが干渉できる。標的の移動がなければ、干渉信号はヘテロダイン周波数で振動し、これはちょうど2つの成分の光周波数の差である。標的の移動があれば、このヘテロダイン周波数は、よく知られたドップラーの関係を通じた標的速度に関する変化を生じさせる。したがって、ヘテロダイン周波数の変化をモニタすることによって、光学センブリに関する標的の移動をモニタできる。

【0027】

後述の実施形態において、「入力ビーム」とは概して、光源モジュールから発せられるビームを指す。ヘテロダイン検出の場合、入力ビームは上述のように、若干異なる周波数を有する成分を含む。

【0028】

特定の実施形態において、干渉計システムはリトロウでは動作しないように設計される。例えば、一般に、測定ビームはある入射角で被測定物101に入射し、1回回折測定ビーム（once-diffracted measurement beam）がリトロウ条件（Littrow condition）を満たさない。リトロウ条件とは、格子等の回折構造の、その回折構造が回折ビームを光源に向けて戻すような、入射ビームに関する方位を指す。換言すれば、エンコーダシステム100において、1回回折測定ビームは、1回回折測定ビームがエンコーダスケールで回折する前に測定ビームと共に線状ではないため、リトロウ条件を満たさない。

【0029】

エンコーダスケール105は図1において、1方向に周期的な構造として描かれているが、より一般的には、被測定物は測定ビームを適当に回折する異なる様々な回折構造を含むことができる。いくつかの実施形態において、被測定物は2方向（例えば、 x および y 軸に沿って）に周期的である回折構造（例えば、エンコーダスケール）を含むことができ、測定ビームを2つの直交平面内のビームに回折させる。一般に、エンコーダスケールの回折構造と光源モジュールは、エンコーダシステムがそのシステムの形状面の制約（geometrical constraints）内で、対応する参照ビームと合成されたときに1つまたは複数の検出可能な干渉信号を確立するのに十分な強度の1つまたは複数の回折測定ビームを提供するように選択される。いくつかの実施形態において、光源モジュールは、400nm ~ 1,600nmの範囲の波長を有する入力ビームを供給する。例えば、入力ビームは約633nmまたは約980nmの波長を有することができる。留意すべき点として、一般に、ヘテロダイン光源の周波数分割の結果、入力ビームの2つの成分の波長間の差が非常にわずかのみとなり、そのため、入力ビームが厳密に単色でなくても、依然として入力ビームを1つの波長で特徴付けることが現実的である。いくつかの実施形態において、光源モジュールはガスレーザ（例えば、HeNeレーザ）、レーザダイオードまたはその他のソリッドステートレーザ源、発光ダイオード、またはスペクトル帯域幅変調用フィルタの有無を問わないハロゲンランプ等の熱源を含むことができる。

【0030】

10

20

30

40

50

一般に、回折構造（例えば格子ピッチ）は、入力ビームの波長と光学アセンブリの配置および測定に使用される回折次数に応じて変えることができる。いくつかの実装形態において、回折構造は、約1～約20の範囲のピッチを有する格子であり、¹⁰は光源の波長である。格子のピッチは約0.5μm～約10μmとすることができる。干渉方式光学エンコーダシステムと動作の別の実装形態が米国特許第8,300,233号明細書に記載されており、その全体を参照によって本願に援用する。

【0031】

上述のように、被測定物は入射測定ビームを、1つまたは複数の平面（例えば、2つの直交する平面）内のビームへと回折させる。これらの回折ビームは、例えば、正の回折次数からのビームと、負の回折次数からのビームを含む可能性がある。いくつかの実装形態において、回折ビームが対応する参照ビームと合成されて複数の出力ビームを生成し、ビームをエンコーダスケールに供給し、1回回折ビーム（once-diffracted beam）をエンコーダスケールから受け取り、1回回折ビームをエンコーダスケールに向けて方向転換させ、2回目の回折が行われるようにし、2回回折ビーム（twice-diffracted beam）を受けるために複数の部品が使用される。このようなシステムは、回折ビームの各々を受け取り、方向転換するのに必要な部品の数によって、配置が複雑となり、構成および製造コストが高くなる可能性がある。

【0032】

システムを低コスト化し、システム設計を簡略化し、光エネルギーの使用を効率化するために、回折測定ビームを受け取り、且つ方向転換せるように使用される複数の部品を、実質的に再帰反射させるような光学表面の2つ以上の組み合わせを有するモノリシック光学部品に置き換えることができる。いくつかの実装形態において、1回回折ビームがモノリシック光学部品に入り、モノリシック光学部品の表面および/またはファセットによって回折格子に戻るように方向転換され、回折格子において2つ以上の2回回折ビームが生成される。いくつかの実装形態において、モノリシック光学部品の表面および/またはファセット（facet）は、入力ビームから測定ビームを取得して、測定ビームをエンコーダスケールに向かって方向転換させて、1回回折測定ビームを取得するように構成される。²⁰ 2回回折ビームは、相互に、または対応する参照ビームによって干渉され、出力ビームを生成することができ、出力ビームが検出器によって記録される。その後、検出器から得られた干渉信号を使って、干渉信号からの位相情報に基づいて格子位置に関する位置情報を判定できる。N次元でのエンコーダスケールの位置の変化を測定するためには、少なくともN個の測定ビームが必要である。複数の別々の入力ビームを必要とし、複数の別々の入力ビームから各入力ビームのための1つの回折次数が検出される構成と比較して、本明細書で開示されるシステムは、1つの入力ビームを使って、異なる回折次数を得ることができ、それゆえ光源を効率的に利用できる。それゆえ、いくつかの実装形態において、測定を行うのに必要な電力を節減できる。あるいは、いくつかの実装形態において、位置測定をより低ノイズで行うことができる。³⁰

【0033】

同様に、いくつかの実装形態において、モノリシック光学部品の表面および/またはファセットは、参照格子からの1回回折および/または2回回折参照ビームを受け取り、方向転換せのように構成される。ある場合において、モノリシック光学部品の表面および/またはファセットは、入力ビームからの回折の前に、参照ビームを取得するように構成される。

【0034】

本開示の目的上、モノリシック光学部品とは、単独の連続部品を構成する1つまたは複数の光学素子を含む光学装置を意味すると理解する。いくつかの実装形態において、単独部品は接合部または継ぎ目なく形成することができる。いくつかの実装形態において、単独部品は、その部品の少なくとも一部を通って延びるファセットを含むことができ、このファセットは、2つの別々の光学素子を一体に融合または接着させて単独の連続部品にすることによって（例えば、光学接着剤を使用する）形成される。例えば、単独部品は偏光

10

20

30

40

50

ビームスプリッタを含むことができ、そのビームスプリッタ本体から延びるファセットが、直交偏光からなる入射ビームを、入力ビームの異なる偏光に基づいて異なる方向に伝播する2つの別々のビームへと分離する。

【0035】

単独のモノリシック光学部品を使って、回折測定および/または参照ビームを受け取り、方向転換させることができるが、モノリシック光学部品が1つまたは複数のビームステアリング、ビーム分離および/またはビーム合成部品と一緒に配置されて、N次元でのエンコーダスケールの相対位置変化を測定するためのコンパクトな光学装置を提供する実装形態もまた可能である。

【0036】

光学エンコーダヘッドのための最小主義の光学構成 (minimalistic optical design) で利用できるのは、複数の再帰性反射素子であり、複数の再帰性反射素子は任意の単独の立方形、直方体 (長方形の表面を有する六面体)、直角プリズム (例えば、45°、45°、90°の内包角または30°、60°、90°の内包角を有するプリズム) または、光学的表面の複数の再帰反射させるような組み合わせを有する他の任意のモノリシック部品を備える。本明細書で開示する実施形態は、それぞれ1Dまたは2D格子の2つまたは4つの回折次数を捕捉し、評価するために使用でき、それゆえ、捕捉するのが2つまたは4つの回折次数より少ない構成と比較して、効率を改善することができる。これに加えて、本明細書に記載の実施形態の各々は、ホモダインおよびヘテロダイン光源の何れにも使用できる。

10

【0037】

一例としての実施形態において、4つの回折測定ビームを、単独のモノリシックガラスキューブとエンコーダスケール (例えば、2D回折格子) を使って制御できる。入力測定ビームをガラスキューブ (glass cube) に供給すると、入力測定ビームがキューブを通過して、非リトロウ角 (non-littrow angle) でエンコーダスケールに衝突し、少なくとも4つの1次回折次数 (例えば、第一の平面内の+1次と-1次および直交する第二の平面内での+1次と-1次) に分割される。4つの回折ビームはキューブにもう一度入り、キューブの角のうちの4つの角の付近で再帰反射され、エンコーダスケールに戻り、エンコーダスケールにおいてビームは再び非リトロウ角で回折され、回折されたビームのうちの4つのビームが空間的に分離され、初期入力ビームと反対方向に伝播する。2回回折ビームはキューブを通過して、1つまたは複数の参照ビームと干渉できる状態となる。上記の配置によって4つの位相測定結果が提供され、したがって、エンコーダヘッドまたはエンコーダスケールの位置が3つの次元すべてにおいて幾つかの冗長性を伴って計算できる。

20

【0038】

図2Aは、上述の例示的な実施形態と同様の、干渉方式エンコーダシステムのエンコーダヘッドに使用するための一例としてのモノリシック光学部品200の断面の概略図である。光学部品200は、エンコーダスケール105から複数の1回回折ビームを受け取り、これらの1回回折ビームをエンコーダスケールに戻すべく方向転換せざる構成される。見やすくするために、干渉方式エンコーダシステムの他の部品は図から省かれている。光学部品200は、上面ファセット202と、下面ファセット204と、4つの側面ファセット206を有するモノリシックキューブを含む。エンコーダスケール105は、2D格子を含む。

30

【0039】

干渉方式エンコーダシステムの動作中、光源から取得される測定ビーム201は、光学部品200の上面ファセット202に入射し、この時、測定ビーム201はファセット202の表面に対して垂直である。測定ビーム201は、上面ファセット202と下面ファセット204を通過して、エンコーダスケール105に非リトロウ角で至る。エンコーダスケール105の回折特性によって、測定ビーム201は複数の回折次数に回折される。回折ビームは例えば、エンコーダスケールの正の回折次数から取得される1つまたは複数の第一のビームと、エンコーダスケール105からの負の回折次数から取得される1つま

40

50

たは複数の第二のビームに対応する。例えば、エンコーダスケール 105 は測定ビーム 201 を、X-Y 平面内で伝播する 2 つのビーム（例えば、+1 次回折と -1 次回折）と Y-Z 平面内で伝播する 2 つのビーム（例えば、+1 次回折と -1 次回折）に回折される。

【0040】

1 回回折ビーム 203 は光学部品 200 に戻り、ビームは下面ファセット 204 から再び光学部品 200 に入る。1 回回折ビーム 203 は次に、光学部品 200 の側面ファセット 206 と上面ファセット 202 によって反射され、下面ファセット 204 に戻される。1 回回折ビーム 203 は下面ファセット 204 を通過してエンコーダスケール 105 に向かい、エンコーダスケール 105 によって測定ビームは非リトロウ条件で 2 回目の回折を行う。2 回回折ビーム 205 は次に、光学部品 200 に向かって、入射ビーム 201 の方向と実質的に反対の方向に戻る。光学部品 200 を通過した後、2 回回折ビーム 205 の各々は対応する参照ビーム（明確にするために省かれている）と合成されて、対応する出力ビームを形成し、出力ビームが検出モジュール（例えば、偏光子と光検出器）によって受け取られる。検出器に連結された電子プロセッサが各検出器からの干渉信号を分析して、エンコーダスケールおよび／またはエンコーダヘッドの相対位置に関する位相情報を抽出する。

【0041】

図 2A に示される例において、上面ファセット 202 は、ファセット 202 の表面に対して垂直に入射する放射を透過させ、その一方で、ファセットの表面に対して傾斜角度でファセット 202 の表面に入射する放射は反射するように構成される。上面ファセット 202 のこの特性は、ファセット上の多層コーティング（例えば、異なる薄膜材料の複数の交互の層）を使って確立することができる。多層スタック内の各層の厚さと組成を操作することによって、反射特性を特定の入射角に合わせることができる。すなわち、コーティングは、垂直入射放射である放射に対しては反射防止特性を有し、ファセット 202 の表面に対して 1 つまたは複数の傾斜角度で入射する放射に対しては高い反射率を有するように最適化することができる。例えば、上面ファセット 202 に衝突するすべての傾斜ビームがファセット表面に対して同じ入射角を有する場合、ある入射角と波長での多層コーティングの層厚を、その傾斜ビームについては反射性の四分の一波長スタックと同様の挙動を示し、また垂直入射光については、透過性の半波長スタックと同様の挙動を示すように構成できる。表面反射の角度依存性は、様々な層間界面からの反射間の光路長の差が変化することによる。

【0042】

垂直入射ビームの透過を最大化するように構成されたコーティング（coating）の場合、このコーティングの入射ビーム角度許容範囲は垂直から最大約 + / - 10° とすることができます。傾斜ビーム（すなわち、入射面に対して非垂直かつ非平行のビーム）の反射率を最大化するように構成されたコーティングの場合、このコーティングの入射ビーム角度許容範囲は、所望の角度から約 + / - 2° ~ 約 + / - 5° とすることができます。特定の角度での入射ビームを実質的に透過させるコーティングの場合、コーティングは、入射ビームの少なくとも 75%（例えば、少なくとも 80%、少なくとも 85%、少なくとも 90%、少なくとも 95%、少なくとも 98%、または少なくとも 99%）を透過させることができます。ある特定の角度の入射ビームを実質的に反射させるコーティングの場合、このコーティングは指定の角度での入射ビームの少なくとも 75%（例えば、少なくとも 80%、少なくとも 85%、少なくとも 90%、少なくとも 95%、少なくとも 98%、または少なくとも 99%）を反射することができる。このようなコーティングのための材料としては、たとえば硫化亜鉛、二酸化チタン、フッ化マグネシウム、および／または二酸化シリコンを含めることができます。垂直ビームは約 1.2% のみ、および 27.82° での傾斜ビームは 95.2% を BK7 ガラス内で反射させる多層コーティングの一例は ABCBCB CBA のスタックであり、A は 57 nm のフッ化マグネシウム層、B は 942 nm の硫化亜鉛層、C は 1149 nm のフッ化マグネシウム層である。このような多層フィルムの設計方法に関するその他の指針は、例えば、E. Hecht 著、「光学 (Opt

10

20

30

40

50

ics)」第4版、アディソン・ウェズリー(Addison Wesley)、2003年に記載され、その内容の全体を参照によって本願に援用する。多層コーティングはまた、他の実施形態の中でも使用でき、これには以下の例が含まれる。

【0043】

上面ファセット202と異なり、下面ファセット204は、下面ファセットの表面に対して垂直または斜めの入射放射を透過させるように構成される。いくつかの実装形態において、下面ファセット204から透過を促進するために、ファセット204は広い入射角用の多層コーティングを含むように構成される。あるいは、下面ファセット204は、特定の入射角度(例えば、垂直入射およびある1つの傾斜角度での入射)と特定の波長または波長範囲について最適化された多層コーティングを含むように構成することができる。側面ファセット206は、全内部反射によって元来反射性(naturally reflective)を有する(すなわち、部品200の外側の領域は部品200の内側の領域より屈折率が低い)。しかしながら、側面ファセット206もまた、高反射性のコーティングを含むように構成できる。

【0044】

図2Bと図2Cは、図2Aに示される光学部品200の三次元(3D)概略図である。図2Bと図2Cに示されるように、光学部品200は、側面ファセット206の下縁辺(bottom edge)がエンコーダスケール105の縁辺(edge)と整合しないような向きとされる。この例において、エンコーダスケール105は、図に示されているエンコーダスケール105の部分の少なくとも2つの縁辺と平行な方向に沿って延びる溝の集合で構成された格子を含む。光学部品200を回転させて、側面ファセット206の下縁辺がエンコーダスケールの縁辺に対して傾斜角度となり、それゆえ溝が延びる方向に対して斜めになるようにすると、1回回折ビームを確実に、おおまかに光学部品200の角に向かって伝播させることができ、光学部品200の角によって再帰反射が起こる。図2Bは、エンコーダの格子線に対して光学部品200を回転できる角度の、より一般的なケースを示しているが、図2Cでは角度がちょうど45°である。すなわち、1回回折ビーム203は、下面ファセット204を通過した後、側面ファセット206同士の交差部により形成される縁辺に向かって伝播する。その結果、各種のビーム間で偏光特性とビーム経路のある程度の対称性を保つことができる。

【0045】

いくつかの実施形態において、光学部品は、1回回折ビームが側面ファセット同士の交差部によって形成される縁辺上に衝突するのを防止し、その一方で、少なくともいくつかの1回回折ビームがそのような縁辺に入射するのを防止するように構成できる。図3Aは、回折ビームが側面ファセット306の交差部によって形成される縁辺に衝突するのを防止する、一例としてのモノリシック光学部品300の3D概略図である。この効果を実現するために、光学部品300は、エンコーダスケール105の格子方向(すなわち、格子の長尺状の部分が延びる方向)に対して45°に向けられた直方体となるように構成されている。図3Bは、格子方向に対して30°回転させて、1回回折ビームがファセット縁辺に当たるのを防止した立方体の3D概略図である。

【0046】

明瞭にするために、干渉方式システムのその他の部品と参照ビームは図3では省かれている。図2の光学部品200と同様に、光学部品300はガラスで形成でき、異なるファセット上に多層コーティングを含めて、指定角度での入射放射の透過を増大させ、および/または別の指定角度での入射放射の反射を増大させるようにすることができる。いくつかの実装形態において、部品300または部品200はあるいは、ファセット表面に入射するビーム間の空間分離を広げるように構成することができる。次いで、分離された各ビームを、光学部品300または200の異なる領域に向かって(例えば、光学部品300または200のファセットまたは側面に向かって)方向付けることができる。物理的な分離によって、分離された各ビームが入射するファセットまたは面に、そのビームのための対応する局所的な反射性または透過性コーティングを含めることが可能となる。ビーム間

10

20

30

40

50

の空間分離を広げることによって、光学部品上に形成される局所的な反射防止／透過性コーティングの間隔もさらに大きくすることができ、それゆえ、異なるコーティングを相互に近接させて製造する複雑さが軽減する。局所的コーティングの形成を可能にするようなビーム間の間隔を取得するためには、各種のパラメータを調節でき、例えばこれには光学部品のアスペクト比、エンコーダスケール 105 と光学部品 300 または 200 の間の距離、エンコーダスケール 105 の格子の溝間のピッチ、および／またはエンコーダスケール 105 の、光学部品に関する格子方向の回転が含まれる。

【0047】

いくつかの実施形態において、測定ビームを、エンコーダスケール 105 を含む平面に平行な方向に沿って供給し、検出することが有利である。図 4A は、エンコーダスケール 105 を含む平面に平行な方向に沿って伝播する測定ビーム 401 を受け取り、測定ビーム 401 をエンコーダスケールに向かって方向転換させ、エンコーダスケール 105 を含む平面に平行な方向に沿って複数の 2 回回折測定ビーム 405 を出力するための一例による光学部品 400 の断面の概略図である。光学部品 400 の形状は、モノリシック三角プリズムに対応する。明瞭にするために、図 4A では干渉方式システムのその他の光学素子が省かれており、1 つの 2 回回折ビームだけが示されている。しかしながら、光学部品 400 は複数の 2 回回折ビームを方向転換させることができ、この 2 回回折ビームは、エンコーダスケール 105 からの正の回折次数から得られる 1 つまたは複数の第一のビームと、エンコーダスケール 105 からの負の回折次数から取得される 1 つまたは複数の第二のビームを含む。図 4 に示されるように、エンコーダスケール 105 に入射する測定ビームは、リトロウ条件を満たさない。

【0048】

光学部品 400 は、測定ビームの波長に対して実質的に透明な何れの適当な材料（例えば、可視波長範囲の光の場合はガラス）で形成することもでき、入射測定ビーム 401 を受け取り、2 回回折測定ビーム 405 を透過させるための第一のファセット 402 を含む。第一のファセット 402 はまた、ファセット表面に対して傾斜角度で入射した放射を反射するように構成された薄膜多層コーティング（図示せず）を含むことができる。第二のファセット 404 は、入射角に応じて入射放射の透過または反射を可能にするように構成された薄膜多層コーティングを含むことができる。例えば、図 4A に示されるように、第二のファセット 404 は、第二のファセット 404 の表面に垂直、および第一の傾斜角度で入射する放射の透過を最大限にする薄膜多層コーティング（図示せず）を含んでいてもよい。しかしながら、第二のファセット 404 は、第一とは異なる第二の傾斜角度でファセット表面に入射する放射を反射し、このことは多層コーティングまたは全内部反射現象の何れかによって可能となる。第三のファセット 406 は、その表面への何れかの角度での放射を実質的に反射するように構成された薄膜コーティング（図示せず）を含む。例えば、第三のファセット 406 の薄膜コーティングは、銀または金の薄膜層を含むことができる。

【0049】

図 4B は光学部品 400 の 3D 概略図である。いくつかの実装形態において、部品 400 はエンコーダスケール 105 の格子方向に対して回転される。例えば、側面ファセット 406 とファセット 404 の交差部によって形成される部品 400 の下縁辺は、格子の溝方向に非平行に（例えば、溝の長尺状の部分が延長する方向と非平行に）なるように回転させることができる。光学部品 400 を溝に対して非平行に回転させることによって、いくつかの実装形態において、確実に 1 回回折ビームをおおまかに光学部品 400 の角に向かって伝播させることができる。

【0050】

いくつかの実施形態において、モノリシック光学部品は、一次元（1D）パターン、例えば 1D 格子を有するエンコーダスケールと共に機能するように構成できる。図 5 は、干渉方式エンコーダシステムのエンコーダヘッドに使用される光学部品 500 の 3D 概略図であり、光学部品 500 は、1D 格子を有するエンコーダスケール 105 から複数の 1 回

10

20

30

40

50

回折ビームを受け取り、この1回回折ビームをエンコーダスケール105に戻すべく方向転換するように配置される。図5に示される実装形態において、部品500が受け取る1回回折ビーム503は、同一平面に沿った正と負両方の回折次数から取得されるビームを含む。光学部品500はモノリシック正六角柱プリズムであり、測定ビームの波長に対して実質的に透過性の材料（例えば、可視波長範囲の測定ビームの場合はガラス）で形成できる。基本的に、図5に示されるプリズムの形状は、測定ビーム（入射測定ビームと1回および2回回折測定ビームを含む）により通過される、および／または測定ビームを反射する直方体プリズムの平面によって画定され、測定ビームによって通過されない、または測定ビームを反射しない直方体の部分は取り除かれている。

【0051】

10

図2～5に示される例において、入射測定ビームと2回回折ビームは、モノリシック光学部品の中を通って進む。しかしながら、いくつかの実施形態において、これらのビームは、光学部品の中を伝播せずにエンコーダスケール105へ伝播し、エンコーダスケール105から伝播してもよい。図6は、入射測定ビーム601と2回回折測定ビームのどちらも部品600の中を伝播しない光学部品600の3D概略図である。明瞭にするために、干渉方式エンコーダシステムの他の部品と参照ビームは省かれている。

【0052】

図6に示されるように、入射測定ビーム601は、部品600の外のエンコーダスケール105に向かって伝播する。エンコーダスケール105での各測定ビームの回折から取得される1回回折ビームは次に、部品600の中に伝播し、部品600において1回回折ビームは、部品600のファセットでの反射によってエンコーダスケール105に戻るように方向転換され、リトロウ条件を満たさずに、2回目の回折が行われる。2回回折ビーム605は次に、光学部品600を通過せずに、入射測定ビーム601に実質的に平行で反対の方向に伝播する。図6に示される部品600のように、入射および2回回折ビームがモノリシック光学部品を通過しない構成の利点は、光学部品のうち、反射のためだけに使用される1つまたは複数の表面を、高い反射率を有するように構成できる点である。これらの表面にビームを通過させる必要がないため、これらの表面は、高い反射率のコーティングを有するように形成でき、それゆえ、光を反射する効率が向上する。反射光の量を増大させると、最終的に光検出器モジュールで検出される信号が改善される可能性がある。

20

【0053】

30

いくつかの実施形態において、透過性／反射性ファセットを有するモノリシック光学部品は、直方体または直角プリズムの形状から外れる。後述の光学部品700はそのような部品の一例である。ある場合において、このような他の形状はまた、位相差情報の抽出にも使用できる。すなわち、光学部品は、複数の測定ビームを相互に干渉させるように構成でき、それゆえ、光源から別の参照ビームを取得する必要がなくなる。次いで、エンコーダ位置情報は干渉ビームの位相に基づき、この位相は測定ビーム間の光路差（OPD:optical path difference）に関係する。

【0054】

40

図7は、一例としてのモノリシック光学部品700の3D概略図であり、モノリシック光学部品700は、複数の測定ビームを合成させ、干渉させて出力ビームを生成し、出力ビームから位相情報、およびそれゆえエンコーダスケールに関する位置情報を抽出できるように構成されている。明瞭にするために、図7では干渉方式システムの他の部品は省かれている。この例では、光学部品700は正五角柱プリズムに対応する形状を有し、ガラスで形成できる。

【0055】

動作中、上面ファセット702の表面に垂直な方向に沿って伝播する入射測定ビーム701は、部品700の上面ファセット702と下面ファセット704を通って進む。入射ビーム701は、リトロウ条件を満足せずに第一の位置720でエンコーダスケール（回折格子線を含む）によって回折され、入射測定ビーム701の異なる回折次数に対応する

50

複数の回折ビームを生成する。例えば、エンコーダスケールは、測定ビーム 701 を回折させて、第一の平面内で伝播する 2 つのビームと、第二の直交平面内を伝播する 2 つのビームとする。明瞭にするために、第一の位置 720 で生成された回折ビームのうちの 2 つだけが示されており、1 回回折ビームの各々は異なる平面内で伝播する。1 回回折ビームは光学部品 700 のファセットによって方向転換され、方向変換された 1 回回折ビームは両方とも、エンコーダスケールの第二の位置 730 に入射し、この第二の位置 730 は第一の位置とは異なる。第二の位置 730 において、1 回回折測定ビームは、リトロウ条件を満たさず、再び回折されて、2 回回折ビーム 705 が、入射測定ビーム 701 の方向に平行で反対の方向に沿って伝播する。2 回回折ビーム 705 はまた、2 回回折ビーム 705 が干渉方式システムの検出器モジュール（図示せず）に到達すると干渉するよう同一直線上にある。干渉する 2 回回折ビーム 705 を受け取ると、検出器モジュールは電子干渉信号を生成できる。検出器モジュールに接続された電子プロセッサは、干渉信号を分析して位相情報を抽出し、位相情報をエンコーダヘッド（すなわち、モノリシック光学部品）に関するエンコーダスケールの位置を判定できる。10

【0056】

モノリシック光学部品を利用する干渉方式エンコーダシステムの各種の実施形態が可能である。例えば、いくつかの実施形態において、干渉方式エンコーダシステムは、ビーム分離部品（例えば、偏光および無偏光ビームスプリッタ）と、ビームステアリング部品（beam steering component）（例えば、ミラー、レンズ、プリズム、再帰性反射体）、および／または偏光制御部品をモノリシック光学部品の他に含むことができる。追加のビーム分離素子および／またはビームステアリング素子は、指定された位置で一定数の参照ビームを提供し、一定数の参照ビームはモノリシック光学部品を使って得られた回折測定ビームと合成される。例えば、いくつかの実施形態において、ビーム合成部品を使って、1 つまたは複数の 2 回回折測定ビームをそれぞれ 1 つまたは複数の参照ビームと合成することができ、これらの合成ビームは検出器モジュールで干渉する。いくつかの実施形態において、ビーム分離部品および／またはビームステアリング部品は、測定および参照ビームが、初期のソース入力ビームの角度アライメントの不良があったとしても、相互に平行なままであるように配置できる。いくつかの実施形態において、エンコーダスケールの他の 1 つまたは複数の回折格子を使って、参照ビームをモノリシック光学部品に戻るよう回折させることができる。追加の格子の使用によって、いくつかの実装形態において、コンパクトな干渉方式エンコーダシステムの構成を提供でき、このことは、格子が一般に、1 つのビームから複数のビームを生成するための非常に空間効率の高い手段であるからである（例えば、図 9 参照）。20

【0057】

本明細書に開示されるビーム分離合成部品（beam-splitting combining component）はまた、例えば、偏光または無偏光ビーム分離プリズム等のビーム分離素子を含むことができる。その他のビーム分離素子もまた使用でき、例えば、ハーフミラーまたはダイクロイックミラープリズム等がある。本明細書に開示されるビームステアリング部品には、再帰性反射体、例えばコーナキューブリフレクタ、および／またはプリズム、例えば直角三角柱プリズム等が含まれる。本明細書に開示される偏光状態変更素子の例には、線形偏光子、四分の一波長板、二分の一波長板が含まれるが、これらに限定されない。30

【0058】

図 8 は、2 回回折測定ビームを取得するために、モノリシック光学部品のほかにビームステアリング部品およびビーム合成部品を含む干渉方式エンコーダシステムのある実施形態を示す。特に、図 8 は、干渉方式エンコーダヘッド 810 の断面図の概略図であり、干渉方式エンコーダヘッド 810 は、エンコーダスケールから複数の回折ビームを受け取るためのモノリシック光学部品 800 と、第一のビームスプリッタ／コンバイナ部品 812 と、第二のビーム分離部品 814 と、第三のビーム分離部品 816 と、再帰性反射体 818 とを含む。いくつかの実装形態において、エンコーダヘッドはまた、偏光制御部品 820（例えば、四分の一波長板（QWP:quarter wave-plate）、二分の一波長板、または偏光

10

20

30

40

50

回転子)も含む。

【0059】

特定の実施形態において、ビームの偏光状態は一般に、ビームが格子によって2回回折され、空気ガラス界面を複数回通過させられ、モノリシック光学部品または干渉計システム内のその他の光学素子のコーティングされていない表面、およびコーティングされた表面からの複数回内部反射された後に、概して橢円形であってもよい。ある場合において、このように偏光状態を変化させることによって、最終的に、検出器モジュールに到達する光が少なくなることを考え、干渉計システム全体の効率が低下すること、および/または位置検出の精度が低下することがありうる。偏光制御部品820等の偏光素子をエンコーダヘッド装置に追加し、偏光状態の変化を補償するように位置付けることができる。補償素子は、モノリシック光学部品(例えば、直方体または直角プリズム)とエンコーダスケール(および/または参照格子)の間、および/または再帰性反射体の一部である表面上に設置できる。例えば、図8に示されるように、エンコーダヘッド810は、ビーム分離部品812の第一の表面上の第一のQWP 820aと、ビームスプリッタ812の第二の表面上の第二のQWP 820bを含む。第一のQWP 820aは、ビーム分離部品812と再帰性反射体818の間に配置され、これに対して、第二のQWP 820bはビーム分離部品812とモノリシック光学部品800の間に配置される。

【0060】

エンコーダヘッド810を利用する干渉方式エンコーダシステムの動作中、入力ビーム825は光源から第三のビーム分離部品816に供給される。第三のビームスプリッタ816は入射ビーム825を測定ビーム(実線)と参照ビーム(破線)に分離する。例えば、ビームスプリッタ816は偏光ビームスプリッタを含むことができ、偏光ビームスプリッタは、直交偏光ビーム成分(例えば、sおよびp偏光ビーム成分)で構成される入力ビームを、参照ビームと測定ビームの偏光の違いに基づいて、参照および測定ビームに分離する。参照ビームと測定ビームはどちらも、第二のビーム分離部品814を通過する。

【0061】

測定ビームは、第一のビーム分離部品812を変更せずに、第二のビーム分離部品814を通過し、測定ビームはその後、ビーム分離界面においてモノリシック光学部品800とエンコーダスケール105に向かって方向転換される。光学部品800を使用すると、測定ビームは非リトロウ角で複数回回折されて、2つ以上の2回回折測定ビームを生成する。

【0062】

これに対して、参照ビームは第二のビーム分離部品814のビーム分離界面と相互作用して、2つの別々の参照ビームに分けられる。部品814により生成された参照ビームはどちらも第一のビーム分離部品812を通過し、再帰性反射体818に向かってはほとんど、またはまったく反射されない。再帰性反射体818は各参照ビームを第一のビーム分離部品812に向かって戻すように方向転換させ、第一のビーム分離部品812によって各参照ビームは対応する2回回折測定ビームと合成されて、別々の出力ビーム807、809を生成する。図8に示されるように、2つの出力ビーム807、809は第一のビーム分離部品812から出る。エンコーダスケール105が2D格子を含む場合、図8に示されるエンコーダヘッド装置を使って追加の出力ビームを生成してもよく、追加の出力ビームは図の平面から出る方向に伝播する。この場合、追加の参照ビームを作るために追加のビーム分離素子も使用しなければならないであろう。図8に示される構成の利点は、初期の入力ビームに角度アラインメントの不良があったとしても、各出力ビームの中で測定および参照ビームが相互に平行のままである点である。このことは、測定ビーム、そして参照ビームが、部品800と部品818の各々によって再帰反射されるからであり、その結果、すべての出力ビーム角度が入力ビーム角度と同じ量だけ変化することになる。

【0063】

図9は、モノリシック光学部品900と参照格子950を含む、一例としての干渉方式エンコーダヘッド910の概略図である。光学部品900は、例えば、光源から供給され

た入力ビーム 925 から測定ビーム 901 と参照ビーム 911 を取得するように構成された偏光ビーム分離部品を含むことができ、入力ビーム 925 は直交偏光ビーム成分からなる。測定ビーム 901 は、ビーム分離界面 902 から反射されると、エンコーダスケール 105 へと伝播し、ビーム 901 はエンコーダスケール 105 の第一の位置 903 において、非リトロウ角度で、複数の回折次数（例えば、+1 次、-1 次回折）に回折される。明瞭にするために、図 9 の第一の位置 903 には、1 つの回折ビームだけが示されている。

【0064】

複数の1回回折測定ビーム（例えば、901'）は次に、モノリシック光学部品 900 へと戻るように伝播する。光学部品 900 では、1回回折測定ビームが部品 900 の中央ファセット 902 および1つまたは複数の側面ファセットで反射されて、その後、1回回折測定ビームは、第二の位置 904 において非リトロウ条件で、およびエンコーダスケール 105 に対して傾斜角度でエンコーダスケール 105 に戻るように方向転換されるようになる。測定ビームに対して、エンコーダスケールに到達すると、複数の回折次数に2回目の回折が行われる。ここでも、明瞭にするために、図 9 では第二の位置 904 に1つの回折ビームだけが示されている。2回回折測定ビーム（例えば、901'') は光学部品 900 に戻るように伝播し、その後、中央ファセット 902 により反射されて、入力ビーム 925 の方向と平行で反対の方向に沿って伝播する。

【0065】

中央ファセット 902 はまた、参照ビーム 911 を取得するように使用される。参照ビーム 911（図 9 の破線）は部品 900 を通って参照格子 950 へと伝播し、参照ビームは、参照格子 950 の第一の位置 906 において、非リトロウ角で複数の回折次数（例えば、+1 次、-1 次回折）に回折される。明瞭にするために、図 9 の参照格子 950 の位置 906 には、1 つの回折ビーム 911' だけが示されている。1回回折参照ビームの1つまたは複数は部品 900 に戻る。光学部品 900 では、1回回折参照ビームが部品 900 の中央ファセット 902 および1つまたは複数の側面ファセットで反射され、その後、1回回折測定ビームは、第二の位置 907 において非リトロウ角で参照格子 950 に戻るように方向転換される。

【0066】

測定ビームには、反射格子 950 の第二の位置 907 で1つまたは複数の回折次数（例えば、+1 次、-1 次回折）に2回目の回折が行われる。ここでも、明瞭にするために、図 9 では1つの2回回折参照ビーム 911'' だけが示されている。各2回回折参照ビームは次いで、ビーム分離部品 900 を通って伝播し、対応する2回回折測定ビームと合成されて対応する出力ビームが形成される。出力ビームは次に、検出器モジュール（図示せず）によって受け取られ、図 9 では例示的な出力ビームがビーム 960 として示されている。部品のファセットで参照ビームおよび測定ビームが確実に適正に反射または透過されるようにするために、ファセットは、指定の入射角での入射放射を反射および/または透過させるための多層コーティングを含むように構成できる。図 9 に示される例において、中央ファセット 902 は、ファセット 902 の表面に対して 45° で入射する放射についてはビームスプリッタとして機能し、他の角度の入射放射は反射するように構成される。2つのブロックの BK7 ガラス間のビーム分離面において、（界面の法線に対して）45° のビームは 3.2 % のみ、20° のビームは 96.8 % を反射する多層コーティングの一例は、ABCBCBCBA のスタックであり、A は 78 nm のフッ化マグネシウム層、B は 756 nm の硫化亜鉛層、C は 365 nm のフッ化マグネシウム層である。

【0067】

図 10 は、参照格子を使用できるエンコーダヘッドの他の実施形態を示す。特に、図 10 は干渉方式エンコーダヘッド 1010 の一例を示す 3D 概略図であり、干渉方式エンコーダヘッド 1010 はビームスプリッタ 1002 と、参照格子 1050 と、測定ブロック 1060 と、参照ブロック 1070 とを含む。測定ブロック 1060 と参照ブロック 1070 は、直角三角柱プリズム等の光学素子を含み、ビームスプリッタ 1002 に、例えば

10

20

30

40

50

光学接着剤を使って固定される。ビームスプリッタ 1002 は、例えば無偏光ビームスプリッタまたは偏光ビームスプリッタを含むことができる。測定ブロック 1060 は、測定ビームをエンコーダスケール 105 に向けて方向付け、エンコーダスケール 105 から 1 回回折および 2 回回折測定ビームを受け取るように位置付けられる。参照ブロック 1070 は、参照ビームを参照格子 1050 に向かって送り、参照格子 1050 から 1 回回折および 2 回回折参照ビームを受け取るように同様に位置付けられる。ビームスプリッタ 1002 は、光源（図示せず）からの直交偏光ビーム成分を有する入力ビーム 1001 を受け取り、入力ビーム 1001 を参照ビームと測定ビームの両方に分離する。参照ビームと測定ビームは次に、ビームスプリッタ 1002 によって、それぞれ参照ブロック 1070 と測定ブロック 1060 に向けて方向転換される。ビームスプリッタ 1002 はまた、2 回回折参照ビームと 2 回参照測定ビームを合成して 4 つの別々の出力ビーム 1007 にするように構成され、4 つの別々の出力ビーム 1007 は検出器モジュールに送信されて、4 つの別々の出力ビーム 1007 から干渉信号が取得され、エンコーダスケールおよび／またはエンコーダヘッドの相対位置が（例えば、干渉信号からの位相情報に基づいて）判定される。
10

【0068】

図 11 は、参照格子を含むエンコーダヘッドの他の実施形態の一例である。特に、図 1 1 は、干渉方式エンコーダヘッド 1110 の断面図を示す概略図であり、干渉方式エンコーダヘッド 1110 は、測定ブロック 1160（例えば、直方体）と、参照ブロック 1170（例えば、直方体）と、偏光ビームスプリッタ 1102 と、参照格子 1150 と、2 つの四分の一波長板（QWP）1180 とを含む。
20

【0069】

エンコーダヘッド 1110 の動作は、図 10 に示されるエンコーダヘッド 1010 の動作と同様である。すなわち、ビームスプリッタ 1102 は、直交偏光成分を有する入力ビーム 1125 を受け取り、入力ビーム 1125 を参照ビーム（破線）と測定ビーム（実線）に分離し、その後、参照ビームと測定ビームはそれぞれ参照ブロック 1170 と測定ブロック 1160 に向けて伝播する。

【0070】

始めに、測定ビームは測定ブロック 1160 と QWP 1180 を通過し、ほとんど、またはまったく反射されず、エンコーダスケール 105 によって非リトロウ角で 1 つまたは複数の回折次数（例えば、+1 次、-1 次回折）に回折される。1 回回折測定ビームは測定ブロック 1160 に戻り、1 回回折測定ビームは測定ブロック 1160 の側面ファセットで反射されてエンコーダスケール 105 に戻る。上述の他の実施形態のように、測定ブロック 1160 は、入射角に基づいて 1 回回折測定ビームを反射するように構成された局所的な薄膜コーティングを含むことができる。1 回回折測定ビームは、エンコーダスケール 105 に戻り、エンコーダスケール 105 でビームについて、非リトロウ角で 1 つまたは複数の回折次数への 2 回目の回折が行われる。2 回回折測定ビームの少なくともいくつかは、入射測定ビームに平行な方向に沿って測定ブロック 1160 に戻るように伝播する。
30

【0071】

同様に、入射参照ビームは参照ブロック 1170 と QWP 1180 を通過し、ほとんど、またはまったく反射されず、参照格子 1150 によって 1 つまたは複数の回折次数（例えば、+1 次、-1 次回折）に回折される。1 回回折参照ビームは参照ブロック 1170 に戻り、ブロック 1170 の側面ファセットで反射されて、参照格子 1150 に戻る。上述の他の実施形態において、参照ブロック 1170 は、入射角に基づいて 1 回回折参照ビームを反射するように構成された局所的薄膜多層コーティングを含むことができる。1 回回折参照ビームは参照格子 1150 に戻り、参照格子 1150 でそのビームについて、1 つまたは複数の回折次数への 2 回目の回折が行われる。2 回回折参照ビームの少なくともいくつかは、入射参照ビームに平行な方向に沿って、参照ブロック 1170 に戻るように伝播する。2 回回折参照ビームと 2 回回折測定ビームは次に、ビームスプリッタ 110 40

2 の中で合成されて、出力ビーム 1107 を形成し、出力ビーム 1107 は測定ビームと参照ビームとの間の光路長の差に関する位相情報を含む。検出器モジュールと電子プロセッサ（図示せず）を使って、エンコーダスケール 105 および / またはエンコーダヘッド 1110 の 1 つまたは複数の相対的自由度に関する情報を計算できる。

【0072】

測定ブロック 1160 と参照ブロック 1170 は、確実に 2 回回折参照ビームと 2 回回折測定ビームがビームスプリッタ 1102 の中で合成された時に重複するように、同一に配置される（すなわち、ビームスプリッタ 1102 から同じ距離であり、各格子から同じ距離である）必要はない。例えば、いくつかの実装形態において、参照ブロック 1170 と参照格子 1150 の間の距離は、測定ブロック 1160 とエンコーダスケール 105 との間の距離と異なるようにすることができる。いくつかの実装形態において、エンコーダスケール 105 上の格子ピッチは、参照格子 1150 上のピッチと異なるようにすることができる。いくつかの実装形態において、測定ブロック 1160 の寸法を参照ブロック 1170 の寸法と異なるようにすることができる。例えば、参照格子 1150 を参照ブロック 1170 と接触させるか、または少なくとも非常に近接させることによって、ゆらぎの影響を極小化することが好ましいこともある。入力ビームと出力ビームとの間のオフセットを測定経路内と同じにするために、参照ブロック 1170 の寸法および / または格子ピッチは、測定経路内で使用されるものとは異なるようにするべきである。これに加えて、図 11 に示される構成では、出力ビーム 1107 を入力ビーム 1125 とは異なる方向に沿って誘導することによって、ビーム供給とビームピックアップを空間的に分離している。

【0073】

上述の実施形態の中で述べたように、モノリシック光学部品のある表面はビームを透過させるように構成するべきであり、その一方で、モノリシック光学部品の他の表面はビームを反射するように構成するべきである。光学部品の 1 つの表面は、この表面に薄膜多層コーティングを設けることによって、1 つまたは複数の角度の入射ビームを反射することも透過させることもできる。

【0074】

いくつかの実施形態において、モノリシック光学部品（例えば、立方体、直方体および直角プリズム）は、完璧な幾何学的形状から角度がわずかにずれた状態で形成できる。角度のずれの結果として対称性が失われることが、スプリアス反射（spurious reflection）に関連するエンコーダスケール位置の検出におけるエラーの低減に役立つ。すなわち、スプリアス反射は測定ビームから異なる経路をたどる傾向があり、それゆえ、検出された干渉信号を誤変調させない。例えば、本来は対称のモノリシック光学部品の両側の縁辺は、製造公差を条件として、相互に、および / またはエンコーダスケールの平面に対し平行である状態から、例えば 0° より大きいが約 10° より小さい（例えば、約 0.5°、約 1°、約 5°、または約 7°）わずかな量だけずらすことができる。このようなケースの 1 つが、図 12 に概略的に示されており、図中、エンコーダスケールに面するガラス製モノリシック光学部品 1210 の表面 1211 が、エンコーダスケール 105 に対してある量、例えば 1° だけ意図的に傾斜されている。実線は、測定ビームと 2 つの回折事象の意図された経路を示す。これに対して、破線は意図されないスプリアスピームを示し、スプリアスピームはまずゼロ次回折で回折され、傾斜した表面 1211 で反射され、一次回折で回折され、再帰反射を含め、ガラス製モノリシック光学部品 1210 内の意図された測定経路をおおまかにたどってから、最終的に格子で 3 回目の回折が行われる。スプリアスピームの方向と位置は所望のビームの方向と位置とは異なるため、本来は検出器におけるスプリアスピームの存在によって発生しうる測定エラーを実質的に減らすことができる。これに対して、ガラス製モノリシック光学部品の下面がエンコーダスケールに対して平行であると、スプリアスピームは所望の測定ビームと同じ角度および同じ位置となり、これによって位置測定にさらにエラーが生じるであろう。

【0075】

10

20

30

40

50

いくつかの実施形態において、エンコーダヘッドは、エンコーダヘッド光学系内で測定および参照ビームを相互に小さい分離角を持たせて伝播させるように構成される。例えば、1つまたは複数の偏光光学部品を測定および参照ビームのビーム経路内に含めることによって、測定および参照ビーム間に小さい分離角（例えば、約0.05 mrad ~ 20 mradの間）を与えることができる。測定および参照ビーム間に小さい分離角を持たせることによって、これらのビームを、その偏光のほかにその伝播角度によっても区別でき、その結果、エンコーダヘッド内の偏光の混合に関する周期的なエラーの大きさが縮小される。このことは図13に示され、ボックス1310はモノリシック光学部品および/またはビーム分離光学素子および再帰性反射光学素子を含むエンコーダヘッドを示す。それぞれ参照および測定ビームとなるように意図される2つの入力ビーム1301、1302は相互に直交偏光であり、小さな角度だけ分離される。エンコーダヘッドからの出力ビーム1303、1304は依然として同じ分離角を有し、相互に直交偏光であるが、エンコーダヘッド内の偏光子の漏出の可能性によって、方向または偏光の何れかにおいて、所望の出力ビーム1303、1304とは異なる、また別の意図されない出力ビーム1305、1306（すなわち、ゴーストビーム）がありうる。複屈折ビームコンバイナ（birefringent beam combiner）1320は、意図された出力ビーム1303、1304を方向転換できるため、ビーム1303、1304は平行であり、これに対して、意図されないビーム1305、1306はビームコンバイナ1320によって実質的に異なる方向に沿って偏向される。それゆえ、所望の出力ビーム1303、1304は検出器モジュール130（例えば、光検出器と偏光子を含む）に同じ角度で到達でき、その一方で、望まれないビームは、より強力な所望のビームに関する角度によって、検出器モジュール130に到達しないか、または干渉縞のコントラストが実質的に低下することにつながる。したがって、検出器に望まれないビームが存在することによる測定エラーを排除できる。

【0076】

一般に、上述の分析方法の何れも、検出された干渉信号から位相情報とエンコーダスケールの自由度情報の判定を含め、コンピュータハードウェアまたはソフトウェア、またはこれら両方の組み合わせで実装できる。例えば、いくつかの実施形態において、電子プロセッサ150をコンピュータに設置して、1つまたは複数のエンコーダシステムに接続し、エンコーダシステムからの信号の分析を実行するように構成できる。分析は、本明細書に記載される方法に従って、標準的なプログラミング技術を使ってコンピュータプログラムの中に実装できる。プログラムコードを入力データ（例えば、干渉位相情報）に適用し、本明細書に記載された機能を実行して出力情報（例えば、自由度情報）を生成する。出力情報は、表示モニタ等の1つまたは複数の出力装置に適用する。各プログラムは、高級手続型またはオブジェクト指向プログラミング言語で実装して、コンピュータシステムと通信してもよい。しかしながら、プログラムは、希望に応じて、アセンブリまたはマシン言語でも実装できる。何れの場合も、言語はコンパイル型またはインタプリタ型言語とすることができる。さらに、プログラムは、その目的のために予めプログラムされた専用の集積回路上で実行できる。

【0077】

このようなコンピュータプログラムの各々は好ましくは、汎用または特殊用途用のプログラム可能コンピュータによって読み出可能な記憶媒体または装置（例えば、ROMまたは磁気ディスク）に保存して、そのコンピュータを、記憶媒体または装置をそのコンピュータが読み出すと、本明細書に記載された手順を実行するように構成または動作させる。コンピュータプログラムはまた、プログラム実行中にキャッシュまたはメインメモリの中に格納できる。分析方法もまた、コンピュータプログラムを備えて構成されたコンピュータ読み出可能記憶媒体として実装でき、そのように構成された記憶可能媒体は、コンピュータに特定の、予め決められた方法で本明細書に記載された機能を実行させる。

リソグラフィツールへの応用

リソグラフィツールは、コンピュータチップなどの大規模集積回路の製造に使用されるリソグラフィ用途で特に有益である。リソグラフィは、半導体製造業にとって鍵となるテ

クノロジーの牽引役である。オーバレイの改善は、22 nm またはそれ以下のライン幅（デザインルール）の実現に向けた5大難題の1つであり、例えば、国際半導体技術ロードマップ（International Technology Roadmap for Semiconductors）p. 58～59（2009年）を参照のこと。

【0078】

オーバレイは、ウェハおよびレチクル（またはマスク）ステージの位置決めに使用される計測システムの性能、すなわち精度と精密さに直接依存する。リソグラフィツールの年間生産額は50～500百万ドルに上ることがあり、計測システムの改良の経済的価値は大きい。リソグラフィツールによる生産量が1%増大するごとに、集積回路メーカーにとって年間約1百万ドルの経済的利益がもたらされ、リソグラフィツールのサプライヤの競争優位が大幅に高まる。10

【0079】

リソグラフィツールの機能は、空間的にパターニングされた放射を、フォトレジスタコーティングを有するウェハに向けることである。このプロセスには、ウェハのどの位置が放射を受けるかを判定すること（アラインメント）と、その位置のフォトレジストに放射を当てる（露光）が関わる。

【0080】

露光中、放射源はパターニングされたレチクルを照射し、これが放射を散乱させて、空間的にパターニングされた放射を生成する。レチクルはまた、マスクとも呼ばれ、これらの用語は以下、互換的に使用される。縮小投影リソグラフィの場合、縮小投影用レンズは散乱放射を集光して、レチクルパターンの縮小像を形成する。あるいは、近接プリントイングの場合、散乱放射が短い距離だけ（通常、マイクロメートルのオーダ）伝播し、それからウェハと接触してレチクルパターンの1:1の像を生成する。放射によってレジスト内の光化学プロセスが始まり、光化学プロセスによって放射パターンをレジスト内の潜像へと変換する。20

【0081】

ウェハを適正に位置決めするために、ウェハはウェハ表面にアラインメントマークを含み、アラインメントマークを専用のセンサによって測定できる。測定されたアラインメントマークの位置がツール内のウェハの位置を定義する。この情報は、ウェハ表面の所望のパターニングの仕様と共に、空間的にパターニングされた放射に関するウェハのアラインメントを案内する。このような情報に基づいて、フォトレジストコーティングされたウェハを支持する並進運動可能なステージがウェハを移動させて、放射がそのウェハの正しい位置を露光させるようにする。特定のリソグラフィツール、例えばリソグラフィスキーナにおいては、マスクもまた、露光中にウェハと一緒に移動される並進運動可能なステージ上に設置される。30

【0082】

前述のものなどのエンコーダシステムは、ウェハとレチクルの位置を制御し、レチクル像をウェハ上で位置合わせする位置決め機構の重要な部品である。このようなエンコーダシステムが上述の特徴を含んでいれば、そのシステムによって測定される距離の精度が向上し、および／または、オフラインメンテナンスをせずに保持される期間が長くなり得、その結果、生産量の増大とツールのダウントIME削減によってスループットが向上する。40

【0083】

一般に、リソグラフィツールは、露光システムとも呼ばれ、通常、照明システムとウェハ位置決めシステムを含む。照明システムは、紫外線、可視線、X線、電子またはイオン放射等の放射を供給する放射源と、放射にパターンを与えるようなレチクルまたはマスクを含み、それによって空間的にパターニングされた放射が生成される。これに加えて、縮小投影リソグラフィの場合、照明システムは空間的にパターニングされた放射をウェハに結像させるためのレンズアセンブリを含むことができる。結像した放射は、ウェハに被覆されたレジストを露光させる。照明システムはまた、マスクを支持するマスクステージと、マスクステージの、マスクを通じて方向付けられる放射に関する位置を調節するための50

位置決めシステムと、含む。ウェハ位置決めシステムは、ウェハを支持するウェハステージと、結像した放射に関するウェハステージの位置を調節するための位置決めシステムとを含む。集積回路の製造には複数の露光ステップが含まれ得る。リソグラフィに関する一般的な参考資料としては、例えば、J. R. シーツ (J.R. Sheats) と B. W. スミス (B. W. Smith) 著、マイクロリソグラフィ：サイエンス・アンド・テクノロジー (Microlithography: Science and Technology) (マーセル・デッカ・インコーポレーテッド (Marcel Dekker, Inc.) ニューヨーク、1998年) を参照されたい。その内容は参照によって本願に援用される。

【0084】

上述のエンコーダシステムは、露光システムの他の部品、例えばレンズアセンブリ、放射源または支持構造に関するウェハステージとマスクステージの各々の位置を正確に測定するために使用できる。このような場合、エンコーダシステムの光学アセンブリを静止構造に取り付けることができ、エンコーダスケールをマスクおよびウェハステージのうちの1つ等の移動可能な要素に取り付けることができる。あるいは、この状況は逆転でき、光学アセンブリを移動可能な物体に取り付け、エンコーダスケールを静止物体に取り付けることができる。

【0085】

より一般的には、このようなエンコーダシステムは、露光システムの中の何れか1つの構成部品の、露光システムの中の他の何れかの構成部品に関する位置の測定にも使用でき、その際、光学アセンブリはそれらの部品のうちの一方に取り付けられるか、それによって支持され、エンコーダスケールがそれらの部品のもう一方に取り付けられるか、それによって支持される。

【0086】

干渉方式システム1426を用いたリソグラフィツール1400の一例が図14に示されている。エンコーダシステムは、露光システム内のウェハ(図示せず)の位置を正確に測定するために使用される。ここで、ステージ1422は、ウェハを露光ステーションに対して位置決めし、支持するように使用される。スキャナ1400はフレーム1402を含み、フレーム1402はその他の支持構造と、これらの支持構造の上に担持される各種の部品を担持する。露光ベース1404はその上面でレンズ筐体1406に取り付けられ、レンズ筐体1406上に、レクチルまたはマスクを支持するように使用されるレチクルまたはマスクステージ1416が取り付けられる。露光ステーションに対してマスクを位置決めするための位置決めシステムは、要素1417によって概略的に示されている。位置決めシステム1417は、例えば、圧電トランスデューサ素子とこれに対応する制御用電子機器を含むことができる。あるいは、ここに説明されている実施形態には示されていないが、上記のエンコーダシステムの1つまたは複数を使って、その位置をリソグラフ構造の製造プロセス中に正確にモニタする必要のあるマスクステージおよびその他の移動可能な要素の位置を正確に測定することもできる(上述のシーツ(Sheats)とスミス(Smith)著、マイクロリソグラフィ：サイエンス・アンド・テクノロジー(Microlithography: Science and Technology)参照)。

【0087】

露光ベース1404の下には支持ベース1413が懸下され、支持ベース1413がウェハステージ1422を担持する。ステージ1422は、測定ビーム1454が光学アセンブリ1426によってステージへと回折されるようにする被測定物1428を含む。ステージ1422を光学アセンブリ1426に対して位置決めするための位置決めシステムが要素1419によって概略的に示されている。位置決めシステム1419は、例えば、圧電トランスデューサ素子とそれに対応する制御電子部品を含むことができる。被測定物は測定ビームの反射を回折させて、露光ベース1404に取り付けられた光学アセンブリへと戻す。エンコーダシステムは、前述の実施形態の何れとすることもできる。

【0088】

動作中、放射ビーム1410、例えば、紫外線(UV)レーザ(図示せず)からのUV

10

20

30

40

50

ビームはビーム成形光学系アセンブリ 1412 を通過して、ミラー 1414 で反射された後に下方に進む。その後、放射ビームは、マスクステージ 1416 によって担持されるマスク（図示せず）を通過する。マスク（図示せず）は、レンズ筐体 1406 によって担持されるレンズアセンブリ 1408 を通じて、ウェハステージ 1422 上のウェハ（図示せず）上に結像される。ベース 1404 とそれによって支持される各種の部品は、ばね 1420 として描かれている減衰システムによって環境振動から隔離される。

【0089】

いくつかの実施形態において、前述のエンコーダシステムの 1 つまたは複数を使って、例えば、これらに限定されないが、ウェハおよびレチクル（マスク）ステージに関連する複数の軸と角度に沿った変位を測定できる。また、UV レーザビームではなく、他のビームを使ってウェハを露光させることもでき、例えば、X 線ビーム、電子ビーム、イオンビーム、可視光線等がある。

10

【0090】

特定の実施形態において、光学アセンブリ 1426 は、レチクル（またはマスク）ステージ 1416 または、スキャナシステム等のその他の移動可能部品の位置の変化を測定するように位置付けることができる。最後に、エンコーダシステムは、スキャナに加えて、またはスキャナの代わりにステッパを含むリソグラフィシステムにも同様の方法で使用できる。

【0091】

当業界でよく知られているように、リソグラフィは、半導体装置を製作するための製造方法の重要な部分である。例えば、米国特許第 5,483,343 号明細書にはこのような製造方法のステップの概略が記載されている。これらのステップを、図 15A と 15B を参照しながら以下に説明する。図 15A は、半導体チップ（例えば、IC または LSI）、液晶パネルまたは CCD 等の半導体装置の製造シーケンスのフローチャートである。ステップ 1951 は、半導体装置の回路を設計する設計プロセスである。ステップ 1952 は、回路パターン設計に基づいてマスクを製造するプロセスである。ステップ 1953 は、シリコン等の材料を使用することによってウェハを製造するプロセスである。

20

【0092】

ステップ 1954 は、前工程と呼ばれるウェハプロセスであり、ここではそのように準備されたマスクとウェハを使って、回路がリソグラフィを通じてウェハ上に形成される。ウェハ上に、十分な空間分解能でマスク上のこれらのパターンに対応する回路を形成するために、リソグラフィツールのウェハに関する、干渉方式による位置決めが必要である。本明細書に記載される干渉方式の方法とシステムは特に、ウェハプロセスで使用されるリソグラフィの有効性の改善にとって有益となりうる。

30

【0093】

ステップ 1955 はアセンブリステップであり、これは後工程と呼ばれ、ステップ 1954 で加工されたウェハが半導体チップへと形成される。このステップは、アセンブリ（ダイシングとボンディング）とパッケージング（チップ封入）を含む。ステップ 1956 は検査ステップであり、検査ステップで、ステップ 1955 により生産された半導体装置の動作性のチェック、耐久性のチェック等が実行される。これらの工程により、半導体装置が完成し、出荷される（ステップ 1957）。

40

【0094】

図 15B は、ウェハプロセスの詳細を示すフローチャートである。ステップ 1961 は、ウェハ表面を酸化するための酸化プロセスである。ステップ 1962 は、ウェハ表面上に絶縁膜を形成するための CVD プロセスである。ステップ 1963 は、蒸着によってウェハ上に電極を形成する電極形成プロセスである。ステップ 1964 は、ウェハにイオンを打ち込むためのイオン打ち込みプロセスである。ステップ 1965 は、レジスト（感光材料）をウェハに塗布するためのレジストプロセスである。ステップ 1966 は、上述の露光装置を使って、露光（すなわち、リソグラフィ）を通じてマスクの回路パターンをウェハに印刷するための露光プロセスである。露光プロセスでも、上述のように、本明細書

50

に記載される干渉方式システムと方法の使用によって、このようなリソグラフィステップの精度と分解能が改善される。

【0095】

ステップ1967は、露光されたウェハを現像するための現像プロセスである。ステップ1968は、現像されたレジスト像以外の部分を取り除くためのエッティングプロセスである。ステップ1969は、エッティングプロセス実行後にウェハ上に残っているレジスト材料を分離するためのレジスト分離プロセスである。これらのプロセスを繰り返すによって、ウェハ上に回路パターンが形成され、重ね合される。

【0096】

上述のエンコーダシステムはまた、物体の相対位置を正確に測定する必要のある他の用途にも使用できる。例えば、レーザ、X線、イオン、または電子ビーム等の書き込みビームがパターンを基板上に、基板またはビームの何れかを移動させながらマーキングするような用途において、エンコーダシステムを使って基板と書き込みビームの相対移動を測定できる。

10

【0097】

多数の実施形態が説明された。それでもなお、当然のことながら、様々な変更を加えることができる。例えば、いくつかの実施形態において、モノリシック光学部品は、この部品と一緒に形成された別のビームステアリング素子（例えば、格子および／または屈折ウェッジ）を含み、このビームステアリング素子によって、ビームをより望ましい位置へと方向付けるための柔軟性がさらに高まる。あるいは、またはこれに加えて、モノリシック光学部品と一緒に形成された他のビームステアリング素子により、干渉方式エンコーダシステムがエンコーダスケールの位置の変動の影響を本来的により受けにくくなるようなビーム形状が可能となりうる。

20

【0098】

図16は、モノリシック光学部品と一緒に形成された透過および反射格子のパッチを使用して、エンコーダスケール位置の変動の影響をより受けにくくなるビーム形状を提供するエンコーダヘッドの例を示す。

【0099】

図16Aは、モノリシック光学部品1610a（例えば、直方体）によって二次元（2D）エンコーダスケール（例えば、2D格子）105に向けて案内される、最大4つの測定ビームのうちの1つの測定ビーム1601だけのビーム経路を示す断面の概略図である。ビーム1601は、エンコーダスケール105での回折後に、部品1610に再び入り、部品1610aの2つの側面ファセットと上面ファットで再帰反射されてから、部品1610aの中に一緒に形成された透過格子1605のパッチ(patch)に到達する。格子1605は、1回回折ビームを略直角でエンコーダスケール105へと方向転換させる。測定ビームについて、エンコーダスケール105からの2回目の回折が行われる。2回回折測定ビームは、例えば1回回折ビームと同じ回折次数（例えば、+1次回折）とることができ、透過格子パッチ1605によって初期の入射ビームと反対の方向に沿って（ビーム1611）方向転換される。

30

【0100】

図16Bは、図16Aと同様のエンコーダヘッドの構成であり、モノリシック光学部品1610b（例えば、直方体）の上面ファセット上の反射格子1606が、1回回折測定ビームの再帰反射を提供し、それによって1回回折測定ビームはエンコーダスケール105へと方向付けられる。図16Bに示されるように、反射格子1606は透過格子1605から横方向にずらされ、ビーム経路を変更せずに、1回回折測定ビームは部品1610bの下面ファセットを通過できる。2回回折ビームはその後、透過格子1605によって入射測定ビーム1601に平行で、入射測定ビーム1601と反対方向の経路に沿って（例えば、ビーム1611）方向転換される。

40

【0101】

図16Cは、図16Bに示されるエンコーダの3D図であり、ここでも1つの測定ビー

50

ム経路のみが示されている。図 16 C に示されるように、部品 1610b の縁辺は、エンコーダ格子の溝と平行に向けられていない。この構成によって、回折ビームは部品 1610b の 2 つの側面ファセットおよび上面ファセットの交差部に入射することができる。

【0102】

その他の実施形態も特許請求の範囲の範囲内である。

【図 1】

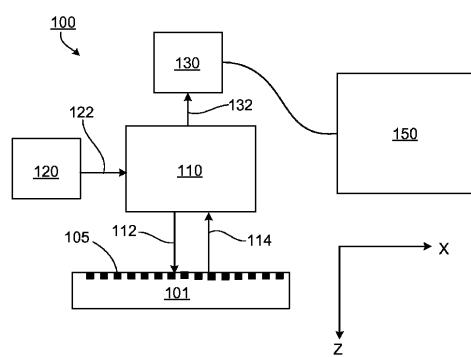


FIG. 1

【図 2 A】

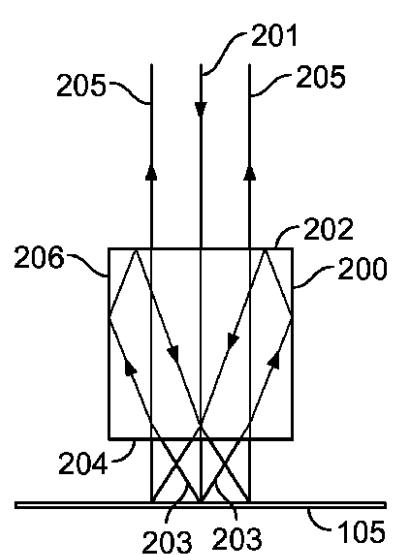


FIG. 2A

【図 2 B】

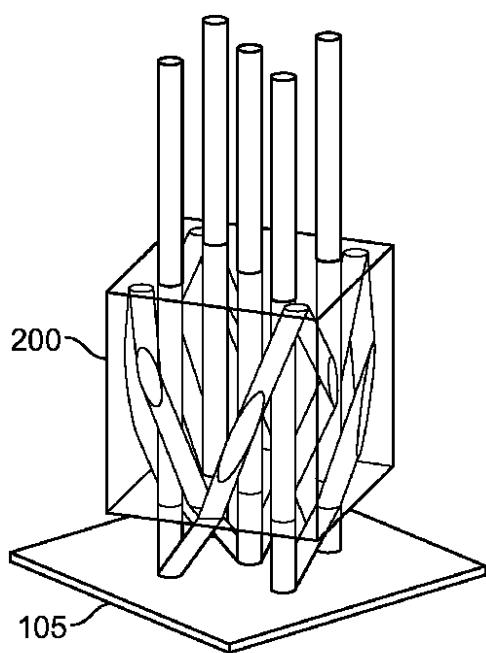


FIG. 2B

【図 2 C】

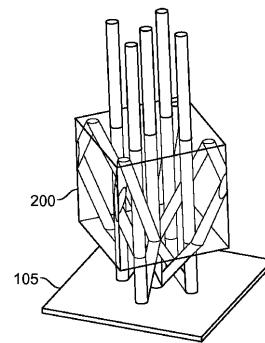


FIG. 2C

【図 3 A】

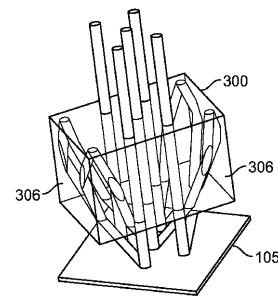


FIG. 3A

【図 3 B】

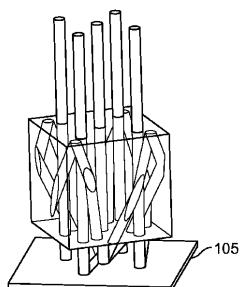


FIG. 3B

【図 4 A】

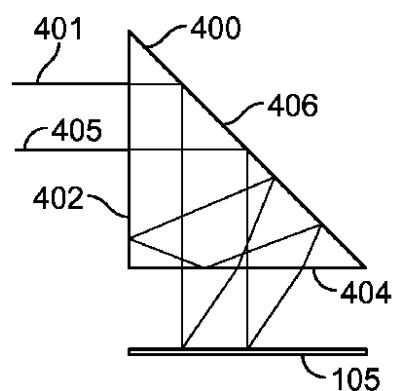


FIG. 4A

【図 4 B】

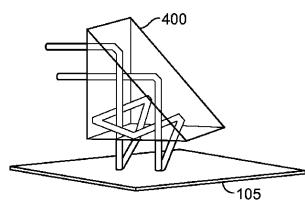


FIG. 4B

【図5】

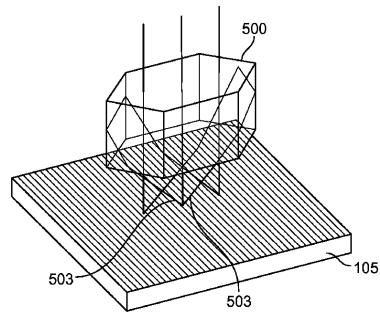


FIG. 5

【図7】

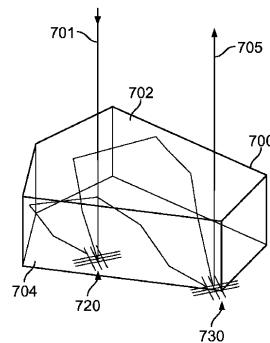


FIG. 7

【図6】

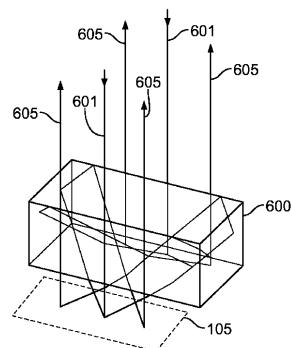


FIG. 6

【図8】

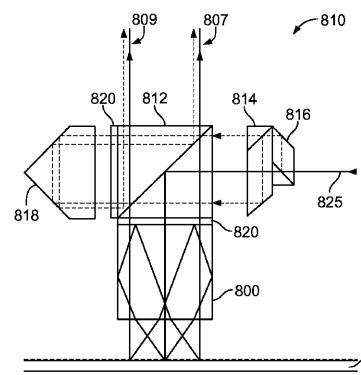


FIG. 8

【図9】

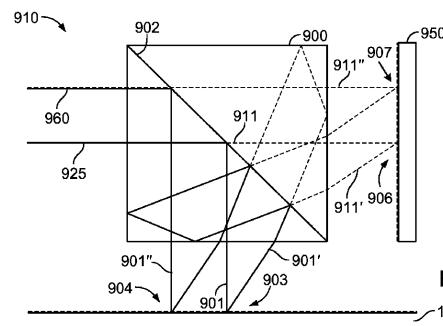


FIG. 9

【図11】

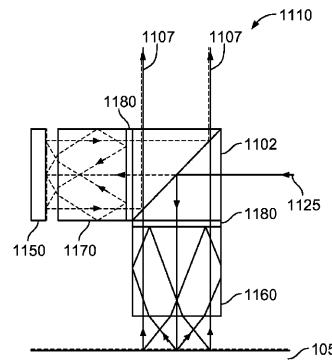


FIG. 11

【図10】

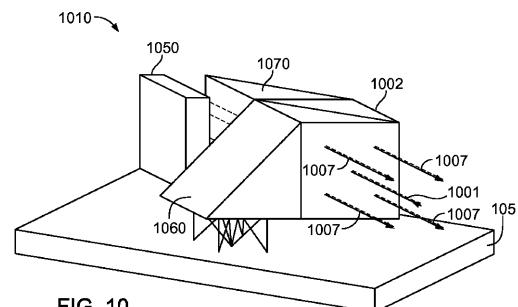


FIG. 10

【図 1 2】

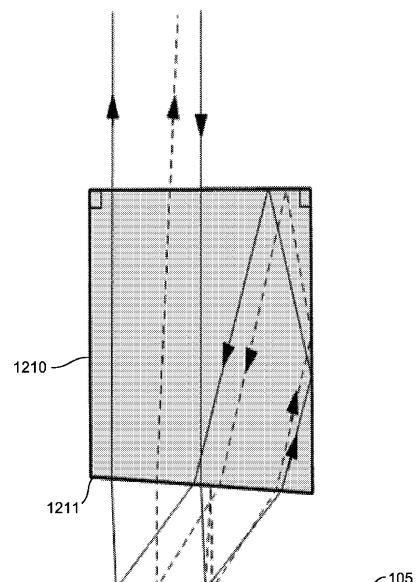


FIG. 12

【図 1 4】

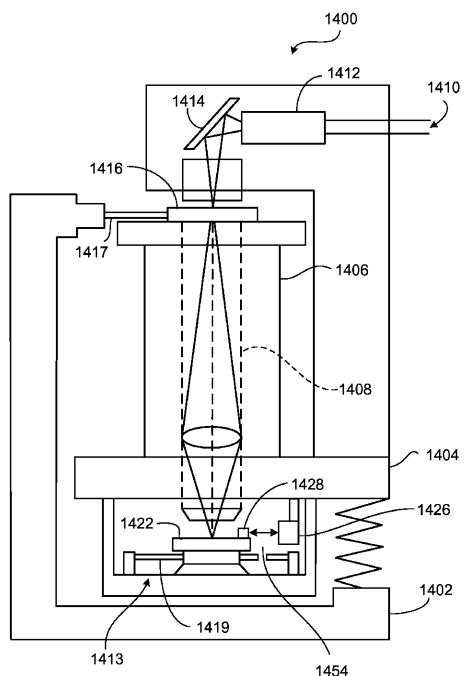


FIG. 14

【図 1 6 A】

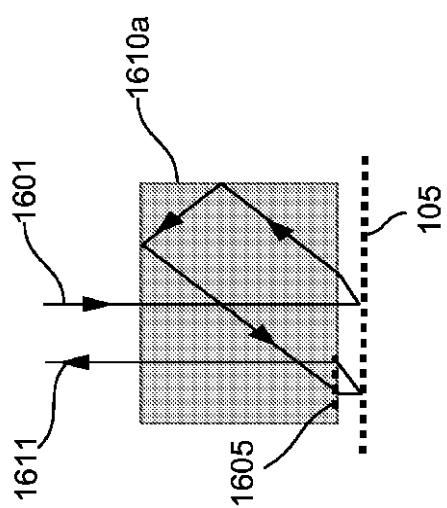


FIG. 16A

【図 1 6 C】

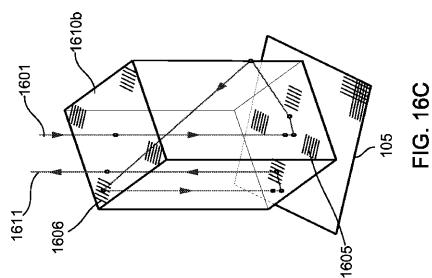


FIG. 16C

【図 1 6 B】

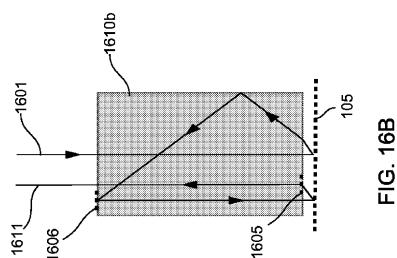
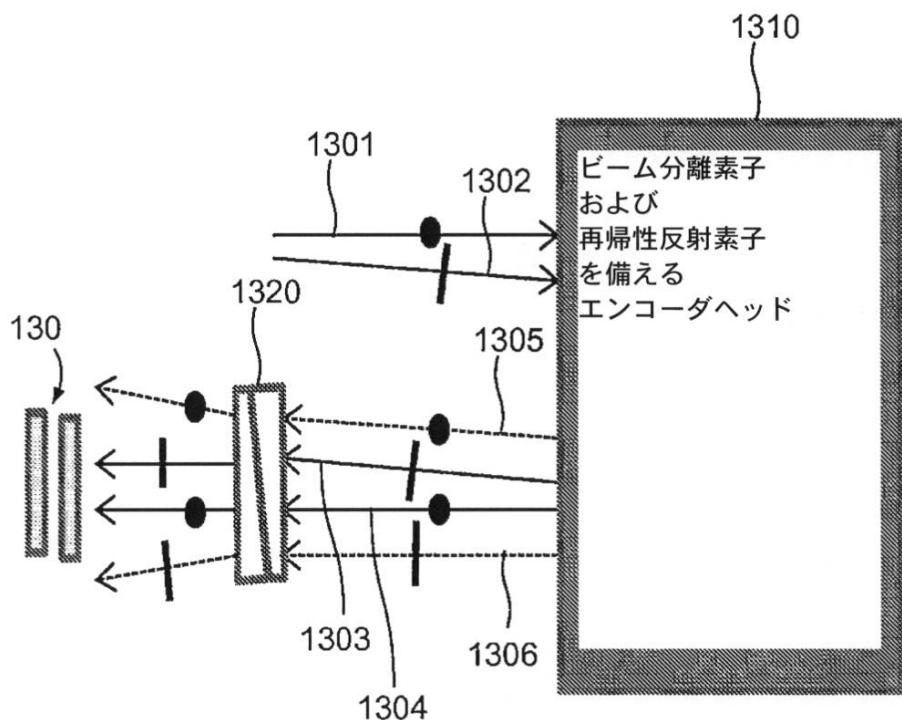
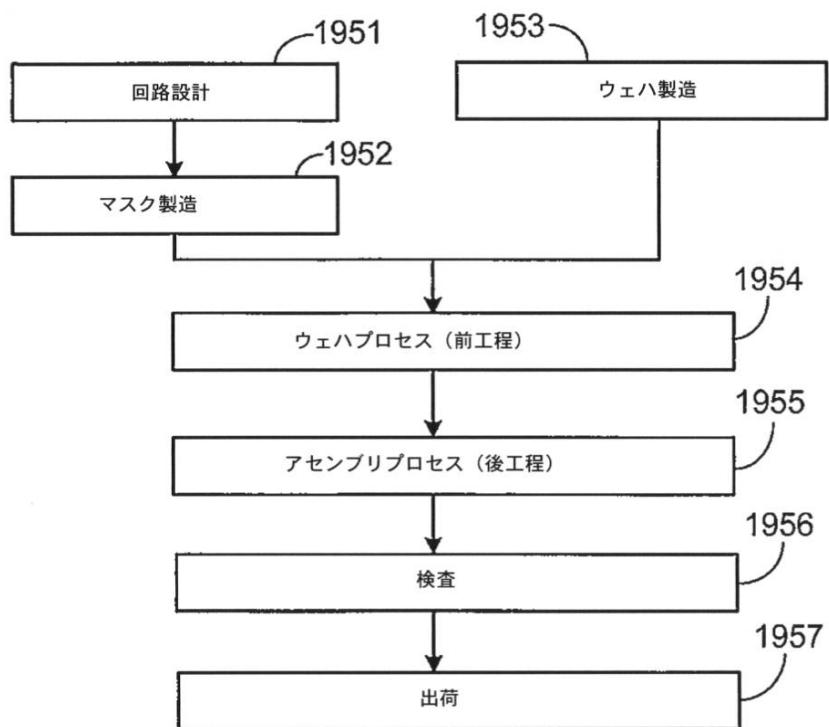


FIG. 16B

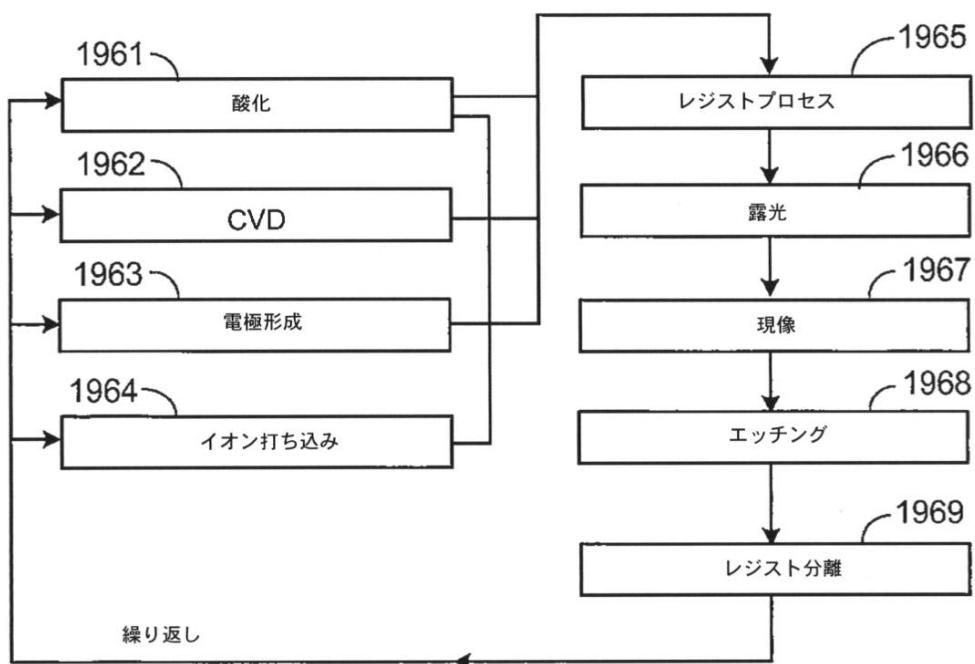
【図13】



【図15A】



【図15B】



フロントページの続き

(72)発明者 リーゼナー、ヤン

アメリカ合衆国 06457 コネチカット州 ミドルタウン メープル シェード ロード 2
10

審査官 吉田 久

(56)参考文献 特開2007-10659 (JP, A)

特開2007-171206 (JP, A)

国際公開第2011/126610 (WO, A2)

特開2010-38654 (JP, A)

特表2008-503745 (JP, A)

特開2008-249456 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01D 5/26 - 5/38

G01B 9/00 - 9/029