

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4030960号
(P4030960)

(45) 発行日 平成20年1月9日(2008.1.9)

(24) 登録日 平成19年10月26日(2007.10.26)

(51) Int. Cl.		F I	
GO 1 B	9/02	(2006.01)	GO 1 B 9/02
GO 1 B	11/00	(2006.01)	GO 1 B 11/00 G
HO 1 L	21/027	(2006.01)	HO 1 L 21/30 5 1 5 F
			HO 1 L 21/30 5 1 5 G

請求項の数 27 (全 32 頁)

(21) 出願番号	特願2003-523931 (P2003-523931)	(73) 特許権者	598176743
(86) (22) 出願日	平成14年8月23日(2002.8.23)		ザイゴ コーポレーション
(65) 公表番号	特表2005-501242 (P2005-501242A)		ZYGO CORPORATION
(43) 公表日	平成17年1月13日(2005.1.13)		アメリカ合衆国 コネチカット州 064
(86) 国際出願番号	PCT/US2002/026932		55ミドルフィールド ローレル ブルック
(87) 国際公開番号	W02003/019111		ロード(番地なし)
(87) 国際公開日	平成15年3月6日(2003.3.6)	(74) 代理人	100068755
審査請求日	平成17年8月23日(2005.8.23)		弁理士 恩田 博宣
(31) 優先権主張番号	60/314,570	(74) 代理人	100105957
(32) 優先日	平成13年8月23日(2001.8.23)		弁理士 恩田 誠
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(72) 発明者	ヒル、ヘンリー エイ、
			アメリカ合衆国 85716 アリゾナ州
			タクソン エス. アベニダ デ パルマ
			ス 340

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 入力ビームの方向の動的干渉分光制御

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

干渉分光システムであって、

動作中、入力ビームを受け取り、該入力ビームを測定ビームおよび他のビームに分離し、該測定ビームを測定物体に向け、該測定物体から反射された後、該測定ビームを該他のビームと重ね合わせて、出力ビームを形成する干渉計と、

該入力ビームを該干渉計に向け、かつ該出力ビームと接触しないように配置されたビーム・ステアリング要素と、該ビーム・ステアリング要素を該干渉計に対して選択的に配向させる電子位置決めシステムとを有するビーム・ステアリング部品と、

前記位置決めシステムに結合され、動作中、該位置決めシステムに、該出力ビームから導出された情報に基づいて該ビーム・ステアリング要素を再配向させる制御回路とを備える干渉分光システム。

【請求項2】

前記制御回路が、動作中に前記出力ビームから導出された前記情報に基づいて前記測定物体の角度配向の変化を計算する信号プロセッサを備える、請求項1に記載のシステム。

【請求項3】

動作中、前記制御回路が、前記位置決めシステムに、前記測定物体の前記角度配向の変化に応答して前記ビーム・ステアリング要素を再配向させる、請求項1に記載のシステム。

【請求項4】

前記制御回路が、前記位置決めシステムに、前記測定ビームの方向または位置の変化に基

10

20

づいて前記ビーム・ステアリング要素を再配向させる、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 5】

前記干渉計が、前記測定ビームを前記測定物体に複数回接触するように向ける、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 6】

前記測定物体が、平面ミラーを備える、請求項 1 に記載の干渉分光システム。

【請求項 7】

動作中、前記ビーム・ステアリング部品が、前記測定ビームを前記平面ミラーの配向の範囲において前記平面ミラーに直交させる、請求項 6 に記載の干渉分光システム。

【請求項 8】

前記ビーム・ステアリング部品が、前記出力ビームにおける前記測定ビームと前記他のビームとの伝播方向の差を最小限に抑えるために、前記出力ビームの変化に応答して前記入力ビームの伝播方向を変化させる、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 9】

前記制御装置が、動作中に前記出力ビームにおける前記測定ビームと前記他のビームとの伝播方向の差に関係する干渉信号を生成する微分角変位干渉計を備える、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 10】

前記干渉信号が、前記出力ビームの前記測定ビームと前記他のビームとの第 1 面における伝播方向の差に関係する、請求項 9 に記載のシステム。

【請求項 11】

動作中、前記第 1 面に垂直な第 2 面における前記出力ビームの前記測定ビームと前記少なくとも 1 つの他のビームとの伝播方向の差に関係する干渉信号を生成する第 2 微分角変位干渉計を更に備える、請求項 10 に記載のシステム。

【請求項 12】

動作中、前記出力ビームから 2 次出力ビームを導出して、該 2 次出力ビームを前記微分角変位干渉計に向けるビーム・スプリッタを更に備える、請求項 9 に記載のシステム。

【請求項 13】

動作中、前記微分角変位干渉計が、前記 2 次出力ビームを第 1 成分および第 2 成分に分割して、該第 1 成分および該第 2 成分を第 1 経路および第 2 経路に沿って向け、該第 1 成分と該第 2 成分とを検出器において重ね合わせる、請求項 12 に記載の干渉分光システム。

【請求項 14】

動作中、前記重ね合わされた第 1 成分および第 2 成分により、前記検出器が、前記出力ビームの伝播方向に関係する干渉信号を生成する、請求項 13 に記載の干渉分光システム。

【請求項 15】

前記干渉信号が、前記測定物体の前記配向に関係する、請求項 9 に記載の干渉分光システム。

【請求項 16】

前記微分角変位干渉計が、エタロンを備え、該エタロンを通る前記 2 次出力ビームの透過が、前記出力ビームの伝播方向に関係する、請求項 9 に記載の干渉分光システム。

【請求項 17】

前記制御装置が、動作中に前記出力ビームの伝播方向に関係する干渉信号を生成する微分角度干渉計を更に備える、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 18】

前記干渉計が、単一経路干渉計である、請求項 1 に記載の干渉分光システム。

【請求項 19】

動作中に、光源が、前記入力ビームを前記ビーム・ステアリング部品に向けるように、前記ビーム・ステアリング部品に対して位置決めされた光源を更に備える、請求項 1 に記載の干渉分光システム。

【請求項 20】

10

20

30

40

50

前記干渉計から前記出力ビームを受け取るように位置決めされた検出器を更に備える、請求項 1 に記載の干渉分光システム。

【請求項 2 1】

集積回路をウエハの上に製造する際に使用されるリソグラフィ・システムであって、
ウエハを支持するステージと、
空間的にパターン化された放射を該ウエハの上に撮像するための照明システムと、
該撮像放射に対する該ステージの位置を調節するための位置決めシステムと、
該撮像放射に対する該ウエハの位置を監視するための請求項 1 に記載の前記干渉分光システムとを備えるリソグラフィ・システム。

【請求項 2 2】

集積回路をウエハの上に製造する際に使用されるリソグラフィ・システムであって、
ウエハを支持するステージと、
放射ソースと、マスクと、位置決めシステムと、レンズ部品と、請求項 1 に記載の前記干渉分光システムとを含む照明システムであって、動作中、該ソースが、空間的にパターン化された放射を生成するために、該マスクを通して放射を向け、該位置決めシステムが、該ソースからの該放射に対する該マスクの位置を調節し、該レンズ部品が、該空間的にパターン化された放射を該ウエハの上に撮像し、前記干渉分光システムが、該ソースの該放射に対する該マスクの位置を監視する前記照明システムとを備えるリソグラフィ・システム。

【請求項 2 3】

集積回路を製造するためのリソグラフィ・システムであって、
互いに関して可動である第 1 構成要素および第 2 構成要素と、該第 2 構成要素に固定された請求項 1 に記載の前記干渉分光システムとを備え、前記測定物体が、該第 1 構成要素に剛性的に固定され、動作中、前記干渉計が、該第 2 構成要素に対する該第 1 構成要素の位置を測定する、リソグラフィ・システム。

【請求項 2 4】

リソグラフィ・マスクを製造する際に使用されるビーム書込みシステムであって、
基板をパターン化するために、書込みビームを提供するソースと、
該基板を支持するステージと、
該書込みビームを該基板に送達するためのビーム方向付け部品と、
該ステージと該ビーム方向付け部品とを互いに関して位置決めする位置決めシステムと、
該ビーム方向付け部品に対する該ステージの位置を監視するための請求項 1 に記載の前記干渉分光システムとを備えるビーム書込みシステム。

【請求項 2 5】

干渉計に入る前に、ビーム・ステアリング要素と接触するように入力ビームを向け、
該向けられた入力ビームを測定ビームと少なくとも 1 つの他のビームとに分割し、
該測定ビームを前記測定物体から少なくとも 1 回反射されるように向け、
該反射測定ビームと該少なくとも 1 つの他のビームとを重ね合わせて、該ビーム・ステアリング要素に接触しない出力ビームを形成し、
該出力ビームから導出された情報に基づいて、該ビーム・ステアリング要素を電子的に再配向させることを備える方法。

【請求項 2 6】

リソグラフィ方法であって、
ウエハを空間的にパターン化された放射に露光させるように、リソグラフィ・システムの第 1 構成要素をリソグラフィ・システムの第 2 構成要素に対して位置決めし、
請求項 2 5 に記載の方法を使用して、該第 2 構成要素に対する、前記測定物体を含む該第 1 構成要素の位置を測定することを備えるリソグラフィ方法。

【請求項 2 7】

リソグラフィ・マスクを製造する際に使用されるビーム書込み方法であって、

基板をパターン化するために、書込みビームを基板に向け、
 該基板を該書込みビームに対して位置決めし、
 請求項 25 に記載の前記方法を使用して、該書込みビームに対する該基板の位置を測定
 することを備えるビーム書込み方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、リソグラフィ・スキャナまたはステップ・システムにおいてマスク・ステー
 ジまたはウエハ・ステージなどの測定物体の角変位および線形変位を測定する変位測定お
 よび分散干渉計などの干渉計に関する。

10

【背景技術】

【0002】

本出願は、内容を本願明細書に援用する 2001 年 8 月 23 日出願のヘンリー A . ヒ
 ル (Henry A . Hill) の仮特許出願第 60 / 314 , 570 号明細書「DYN
 AMIC INTERFEROMETER CONTROLLING DIRECTION
 OF INPUT BEAM」に対する優先権を主張する。

【0003】

変位測定干渉計は、光学干渉信号に基づいて、基準物体に対する測定物体の位置変化を
 監視する。干渉計は、測定物体から反射された測定ビームを、基準物体から反射された基
 準ビームと重ね合わせて、干渉させることによって、光学干渉信号を生成する。

20

【0004】

多くの応用分野では、測定ビームおよび基準ビームは、直交偏光および異なる周波数を
 有する。この異なる周波数は、たとえば、レーザ・ゼーマン分裂によって、音響光学変調
 によって生成することが可能であり、または、複屈折要素などを使用するレーザに内在す
 ることがある。直交偏光により、偏光ビーム分割器は、測定ビームおよび基準ビームをそ
 れぞれ測定物体および基準物体に向けて、反射測定ビームと反射基準ビームとを組み合わ
 せて、重なっている外出測定ビームおよび外出基準ビームを形成することが可能になる。
 重なり外出ビームは、後に偏光器を通過する出力ビームを形成する。

【0005】

偏光器は、外出測定ビームおよび外出基準ビームの偏光を混合して、混合ビームを形成
 する。混合ビームの外出測定ビーム成分と外出基準ビーム成分とは、互いに干渉し、した
 がって、混合ビームの強度は、外出基準ビームと外出基準ビームとの相対位相と共に変化
 する。検出器が、混合ビームの時間依存強度を測定して、その強度に比例する電気干渉信
 号を生成する。測定ビームおよび基準ビームが異なる周波数を有するので、電気干渉信号
 は、外出測定ビームおよび外出基準ビームの周波数の差に等しい周波数を有する「
 ヘテロダイン」信号を含む。測定経路長および基準経路長が、測定物体を含むステージを
 並進させることなどによって、互いに関して変化している場合、測定周波数は、 2
 $n p /$ に等しいドップラー・シフトを含む。は、測定物体と基準物体との相対速度
 v は、測定ビームおよび基準ビームの波長、 n は、光ビームが通過する空気または真空
 などの媒体の屈折率、 p は、基準物体および測定物体への通路の数である。測定物体の相
 対位置の変化は、測定干渉信号の位相の変化に対応し、 2 の位相変化は、 $2 \pi L / (n p)$
 の距離変化 L にほぼ等しい。 L は、測定物体を含むステージまでの距離変化およびステー
 ジからの距離変化など、往復の距離変化である。

30

40

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

残念ながら、この等価性は、常に正しいとは限らない。さらに、測定干渉信号の振幅は
 、変化することがある。可変振幅は、後に、測定位相変化の精度を低下させる可能性があ
 る。多くの干渉計は、「周期エラー」として知られるような非線形性を含む。周期エラー
 は、測定干渉信号の位相および / または強度に対する寄与として表すことが可能であり、

50

光路長 $p n L$ の変化に対する正弦波依存を有する。具体的には、位相の第 1 高調波周期エラーは、 $(2 p n L) / \lambda$ に対する正弦波依存を有し、位相の第 2 高調波周期エラーは、 $2(2 p n L) / \lambda$ に対する正弦波依存を有する。より高次の高調波周期エラーが存在することもある。

【 0 0 0 7 】

基準ビーム成分の波面および測定ビーム成分の波面が、波面エラーを有するとき、干渉計の出力ビームの基準ビーム成分と測定ビーム成分との間の横方向変位の変化によって生じるような「非周期性非線形性」も存在する。ビーム成分間の横方向変位は、「相対ビーム・シヤー (beam shear)」または「差分ビーム・シヤー」とも呼ばれる。相対ビーム・シヤーは、以下の理由により、非周期性、非線形性を生じる。

10

【 0 0 0 8 】

干渉計光学機器の不均一部分により、基準ビームおよび測定ビームにおいて波面エラーが生じることがある。基準ビームおよび測定ビームが、そのような不均一部分を通して互いに共線的に伝播するとき、結果的な波面エラーは同一であり、干渉信号への寄与は互いに打ち消しあう。しかし、より一般的には、出力ビームの基準ビーム成分および測定ビーム成分は、互いに横方向に変位している、すなわち、相対ビーム・シヤーを有する。そのようなビーム・シヤーにより、波面エラーは、出力ビームから導出される干渉信号にエラーを与える。

【 0 0 0 9 】

さらに、多くの干渉分光システムでは、相対ビーム・シヤーは、測定物体の位置または角度配向が変化する際に変化する。たとえば、相対ビーム・シヤーの変化は、平面ミラー測定物体の角度配向の変化によって導入されることがある。さらに、測定物体の角度配向が変化するにより、干渉信号において対応するエラーが生成される。

20

【 0 0 1 0 】

相対ビーム・シヤーおよび波面エラーの影響は、電気干渉信号を生成する目的で、成分の偏光状態に関して出力ビームの成分を混合して、混合出力ビームを検出するために使用される手順に依存する。混合出力ビームは、たとえば、混合ビームを検出器の上に集束させない検出器によって、混合出力ビームを検出器の上に集束されたビームとして検出することによって、または混合出力ビームを単一モードまたはマルチモード光ファイバの中に放出して、光ファイバによって伝達された混合出力ビームの一部を検出することによって、検出することが可能である。相対ビーム・シヤーおよび波面エラーの影響は、混合出力ビームを検出する手順においてビーム・ストップが使用される場合、ビーム・ストップの特性にも依存する。一般に、干渉信号のエラーは、光ファイバを使用して混合出力ビームを検出器に伝達するとき、複雑になる。

30

【 0 0 1 1 】

測定干渉信号の振幅の変化は、いくつかの機構の正味の結果であることがある。1つの機構は、たとえば測定物体の配向変化の結果である出力ビームの基準成分と相対成分との相対ビーム・シヤーである。

【 0 0 1 2 】

「相対ビーム・シヤー」の他に、ビーム全体の平均的な横方向位置の変化を表す「平均ビーム・シヤー」または「共通モード・シヤー」にも言及することがあることに留意されたい。たとえば、いくつかの干渉分光構成では、ビーム全体として (基準成分および測定成分の両方を含む)、測定物体の配向の変化に回答して、またはフォールド・ミラーの配向の変化に回答して、横方向位置に変化する可能性がある (「共通モード・ビーム・シヤー」)。

40

【 0 0 1 3 】

分散測定の応用分野では、光路長の測定は、 532 nm および 1064 nm など、複数の波長において実施され、距離測定干渉計の測定経路における気体の分散を測定するために使用される。分散測定は、距離測定干渉計によって測定した光路長を物理的な長さに変換する際に使用することが可能である。そのような変換は重要なことがあるが、その理由

50

は、測定物体までの物理的な距離が変化しない場合でも、気体の乱流によって、および/または測定アームにおける気体の平均密度の変化によって、測定光路長が変化することがあるからである。

【課題を解決するための手段】

【0014】

干渉計は、測定ビームを平面測定ミラーに対してほぼ直交させて維持し、かつ検出器への出力ビームの測定ビーム成分と基準ビーム成分との横方向ビーム・シヤアを最小限に抑えるように構成することが可能である。この干渉計は、測定平面ミラーの配向の変化に回答して入力ビームを向け直すために、動的ビーム・ステアリング要素を使用する。干渉計は、単一通路干渉計として構成することが可能である。干渉計は、平面ミラーの変位および配向変化を測定するように構成する、または平面ミラーの変位および配向変化を測定するための入力ビームが供給される単一通路干渉計の組合わせで構成することがさらに可能である。

10

【0015】

干渉計は、微分角変位干渉計および/または角変位干渉計と併用することが可能である。微分角変位干渉計は、干渉計を出る測定ビームおよび基準ビームの伝播方向の差を監視する。角変位干渉計は、外出測定ビームまたは外出基準ビームの伝播方向、あるいはこれらのビームの平均的な伝播方向を監視する。測定平面ミラーの配向が変化することにより、微分角変位干渉計および/または角変位干渉計において干渉信号の位相が変化することがある。したがって、これらの位相変化に回答して、動的要素を調整することがある。

20

【0016】

さらに、干渉計は、位置決めシステムの一部としてマイクロリソグラフィまたはビーム書込みツールに組み込むことが可能である。

1態様では、本発明は、動作中に、入力ビームを受け取り、入力ビームを測定ビームおよび他のビームに分離し、測定ビームを測定物体と接触するように向け、測定ビームが測定物体から反射された後、測定ビームを他のビームと重ね合わせて、出力ビームを形成する干渉計を含む干渉分光システムを特徴とする。干渉分光システムには、また、入力ビームを干渉計に向け、かつ出力ビームと接触しないように位置決めされたビーム・ステアリング要素を有するビーム・ステアリング部品と、ビーム・ステアリング要素を干渉計に対して選択的に配向させる電子位置決めシステムとが含まれる。干渉分光システムは、位置決めシステムに結合された制御回路をさらに含み、制御回路は、動作中、位置決めシステムに、出力ビームから導出された情報に基づいてビーム・ステアリング要素を再配向させる。

30

【0017】

干渉分光システムの実施態様は、以下の特徴の1つまたは複数を含むことが可能である。

制御回路は、信号プロセッサを含むことが可能である。信号プロセッサは、動作中、出力ビームから導出された情報に基づいて、測定物体の角度配向の変化を計算する。動作中、制御回路は、位置決めシステムに、測定物体の角度配向の変化に回答してビーム・ステアリング要素を再配向させることが可能である。代替として、または追加として、制御回路は、位置決めシステムに、測定ビームの方向または位置の変化に基づいてビーム・ステアリング要素を再配向させることが可能である。

40

【0018】

干渉計は、測定物体と1回または複数回接触するように、測定ビームを向けることが可能である。

いくつかの実施形態では、測定物体は、平面ミラーである。これらの実施形態では、ビーム・ステアリング部品は、平面ミラーの配向範囲について、測定ビームを平面ミラーに対して直交させることが可能である。

【0019】

ビーム・ステアリング部品は、出力ビームにおける測定ビームと他のビームとの伝播方

50

向の差を最小限に抑えるために、出力ビームの変化に応答して、入力ビームの伝播方向を変化させることが可能である。

【0020】

制御回路は、微分角変位干渉計を含むことが可能である。微分角変位干渉計は、動作中に、出力ビームにおける測定ビームと他のビームとの伝播方向の差に関する干渉信号を生成する。この干渉信号は、出力ビームの測定ビームと他のビームとの第1面における伝播方向の差に関することがある。いくつかの場合では、干渉信号は、測定物体の配向に関することがある。干渉分光システムは、第2微分角変位干渉計をも含むことが可能であり、第2微分角変位干渉計は、動作中に、第1面に垂直な第2面における出力ビームの測定ビームと少なくとも1つの他のビームとの伝播方向の差に関する干渉信号を生成する。

10

【0021】

微分角変位干渉計を含む実施形態では、干渉分光システムは、ビーム・スプリッタを含むことが可能である。ビーム・スプリッタは、動作中に、出力ビームから2次出力ビームを導出して、2次出力ビームを微分角変位干渉計に向ける。動作中、微分角変位干渉計は、2次出力ビームを第1成分および第2成分に分割して、第1成分および第2成分を第1経路および第2経路に沿って向け、第1成分と第2成分とを検出器において重ね合わせる。重ね合わされた第1成分および第2成分により、検出器は、出力ビームの伝播方向に関する干渉信号を生成することが可能である。微分角変位干渉計は、エタロンを含むことが可能であり、エタロンを通る2次出力ビームの透過は、出力ビームの伝播方向に関することがある。

20

【0022】

微分角変位干渉計に対する代替として、または微分角変位干渉計の他に、制御回路は、角変位干渉計を含むことが可能である。角変位干渉計は、動作中、出力ビームの伝播方向に関する干渉信号を生成する。

【0023】

干渉分光システムは、追加の要素を含むことが可能である。たとえば、該システムは、光源が、動作中、入力ビームをビーム・ステアリング部品に向けるように、ビーム・ステアリング部品に対して位置決めされた光源を含むことが可能である。他の例として、干渉分光システムは、干渉計の出力ビームを受け取るように位置決めされた検出器を含むことが可能である。

30

【0024】

上記の特徴のいずれかを含む干渉分光システムは、他のシステムに組み込むことが可能である。たとえば、干渉分光システムは、集積回路をウエハの上に製造する際に使用するリソグラフィ・システムに含むことが可能である。そのような干渉分光システムには、干渉分光システムに加えて、ウエハを支持するステージと、空間的にパターン化された放射をウエハの上に撮像するための照明システムと、撮像放射に対するステージの位置を調節する位置決めシステムとを含むことが可能である。干渉分光システムは、撮像放射に対するウエハの位置を監視するために使用される。

【0025】

40

集積回路をウエハの上に製造する際に使用するリソグラフィ・システムの他の例には、ウエハを搭載するステージと、放射ソース、マスク、位置決めシステム、レンズ部品、および干渉分光システムを含む照明システムとが含まれる。動作中、ソースは、空間的にパターン化された放射を生成するように、マスクを通して放射を向け、位置決めシステムは、ソースからの放射に対するマスクの位置を調節し、レンズ部品は、空間的にパターン化された放射をウエハの上に撮像し、干渉分光システムは、ソースからの放射に対するマスクの位置を監視する。

【0026】

集積回路を製造するリソグラフィ・システムの他の例には、第1構成要素および第2構成要素が含まれ、第1構成要素および第2構成要素は、互いに関して、および干渉分光シ

50

システムに対して可動である。干渉分光システムは、第2構成要素に固定され、測定物体は、第1構成要素に剛性に固定される。動作中、干渉分光システムは、第2構成要素に対する第1構成要素の位置を測定する。

【0027】

干渉分光システムは、リソグラフィ・マスクの製造に使用するビーム書込みシステムに包含することも可能である。そのようなシステムには、基板をパターン化するために書込みビームを提供するソースと、基板を支持するステージと、書込みビームを基板に送達するためのビーム方向付け部品と、ステージとビーム方向付け部品とを互いに関して位置決めする位置決めシステムと、ビーム方向付け部品に対するステージの位置を監視する干渉分光システムとを含むことが可能である。

10

【0028】

一般に、他の態様では、本発明は、干渉計に入る前にビーム・ステアリング要素と接触するように入力ビームを向け、向けられた入力ビームを測定ビームおよび少なくとも1つの他のビームに分割し、測定物体から少なくとも1回反射されるように、測定ビームを向け、反射測定ビームと少なくとも1つの他のビームとを重ね合わせて、ビーム・ステアリング要素に接触しない出力ビームを形成し、出力ビームから導出された情報に基づいて、ビーム・ステアリング要素を電子的に再配向させることを含む干渉分光法を特徴とする。

【0029】

上記で記述した特徴のいずれかを含む上述した干渉分光システムは、干渉分光法を実施するように適合させることが可能である。同様に、干渉分光法は、干渉分光システムの特徴のいずれかをさらに含むことが可能である。該方法は、リソグラフィおよび/またはビーム書込みシステムの動作の一部として実施することが可能である。たとえば、リソグラフィ法は、ウエハを空間的にパターン化された放射に露光させるために、リソグラフィ・システムの第2構成要素に対してリソグラフィ・システムの第1構成要素を位置決めし、干渉分光法を使用して、第2構成要素に対する第1構成要素の位置を測定することを含むことが可能である。この場合、第1構成要素は、測定物体を含む。他の例として、リソグラフィ・マスクの製造に使用するビーム書込み法は、基板をパターン化するために、書込みビームを基板に向け、基板を書込みビームに対して位置決めし、干渉分光法を使用して書込みビームに対する基板の位置を測定することを含むことが可能である。

20

【0030】

上記で記述した干渉分光システムおよび干渉分光法の実施形態は、多くの利点を含む。たとえば、該システムは、測定物体の配向の範囲にわたって、外出基準ビームおよび外出測定ビームを互いにほぼ平行に維持することが可能であり、測定物体への測定ビームの単一の通路のみでそれを実施することが可能である。単一通路システムにより、2重通路干渉計と比較して、ドップラー・シフトを有する電気干渉信号を処理するために必要な電子光学機器の帯域幅が低減される。さらに、単一通路システムにより、2重通路干渉計と比較して、干渉計内における偏光解消、散乱、および透過光学機器からの望ましくない偽反射の可能性が低減される。そのような影響は、電気干渉信号の測定位相において、周期エラーなどのエラーを導入することがある。

30

【0031】

さらに、該システムは、測定物体の角度配向または位置の変化によって生じる干渉計内における外出基準ビームと外出測定ビームとの横方向変位、または基準ビーム成分と測定ビーム成分との横方向変位を最小限に抑えることが可能である。その結果、混合された外出基準ビームおよび外出測定ビームから生成された電気干渉信号の平均振幅は、測定物体の角度配向および位置の変化にほぼ無関係とすることが可能である。さらに、該システムは、測定物体の角度配向または位置の変化によって生じる、偏光ビーム・スプリッタおよび方形波プレートなどの干渉計の透過光学機器を通る測定ビームおよび基準ビームの経路の変化を低減する。そのような透過光学機器は、表面の形態が不完全で、屈折率が局所的に変化することがある。したがって、測定物体と干渉計との距離が変化しない場合でも、そのような光学機器を通るビームの経路が変化することにより、干渉計によって測定され

40

50

た光路長が変化することがある。そのような負の効果は、透過光学機器がウエッジによって生成されるような分散特性を有する場合、複雑になることがある。

【0032】

他の定義がされていない限り、本明細書において使用されるすべての技術用語および科学用語は、本発明が属する技術分野の当業者によって一般的に理解されるものと同じ意味を有する。本明細書において記述する方法およびシステムと同様または等価な方法およびシステムを、本発明を実施または試験する際に使用することが可能であるが、適切な方法およびシステムについて以下で記述する。本明細書において記載するすべての刊行物、特許出願、特許、および他の参考文献を、本願明細書に援用する。相容れない場合は、定義を含めて、本明細書が統制する。さらに、該システム、方法、および例は、単なる例示であり、限定を意図していない。

10

【0033】

本発明の他の特徴および利点は、以下の詳細な記述および請求項から明らかになるであろう。

添付の図面を参照して、単に例として、本発明について以下でさらに記述する。

【0034】

様々な図面の同じ参照記号は、同じ要素を指す。

【発明を実施するための最良の形態】

【0035】

図1Aは、平面ミラー測定物体の変位の変化を測定および監視する、本発明の第1実施形態による装置および方法の概略的な形態を示す。この場合、干渉分光システムの測定ビームの伝播方向は、平面ミラーにほぼ直交し、干渉計システムにおいては、ビーム・シヤアはほぼ存在しない。測定物体の配向は、変化する可能性がある。第1実施形態の干渉計システムは、310で図1Aにおいて全体的に示す動的ビーム・ステアリング要素を有する偏光ヘテロダイン単一通路干渉計と、微分角変位干渉計350とからなる。第1実施形態は、ヘテロダイン・システムからなるが、本発明は、基準ビームおよび測定ビームが、あらゆるドップラー・シフトが導入される前には同じ周波数を有するホモダイン・システムにおいて使用するように容易に適合される。

20

【0036】

本発明の第1実施形態は、測定物体ミラー394の変位を測定し、測定ビーム328の伝播方向は、図1Aの面におけるミラー394の配向の変化に関係なく、ミラー394の反射表面に直交する。さらに、単一通路干渉計310および微分角変位干渉計350においては、基準ビームと測定ビームとのシヤアはほぼ存在しない。さらに、ミラー394における測定ビーム328のシヤアは、測定物体の配向の変化および干渉計と測定物体との距離について等価な条件に対し、平面ミラー測定物体では、2重通路平面ミラー干渉計の第2通路測定ビーム・シヤアの4分の1である。

30

【0037】

図1Aを参照すると、レーザなどのソース320は、様々な周波数変調装置および/またはレーザのいずれかとするのが可能である。たとえば、レーザは、当業者には既知の様々な従来の技術のいずれかにおいて安定したHe-Neレーザなどのガス・レーザとすることが可能である(たとえば、T.ベア(Baer)ら、「Frequency Stabilization of a 0.633 μm He-Ne-Longitudinal Zeeman Laser」、Applied Optics、19、3173~3177ページ(1980)、1975年6月10日発行のバーグワルド(Burgwald)他の米国特許第3,889,207号明細書、1972年5月9日発行のスタンストローム(Standstrom)他の米国特許第3,662,279号明細書参照)。

40

【0038】

代替として、レーザは、当業者には既知の様々な従来の技術において安定なダイオード・レーザ周波数とすることが可能である(たとえば、T.オオコシ(Okoshi)およ

50

びK.キクチ(Kikuchi)、「Frequency Stabilization of Semiconductor Lasers for Heterodyne-type Optical Communication Systems」、Electronic Letters、16、179~181ページ(1980)、S.ヤマグチ(Yamaqguchi)およびM.スズキ(Suzuki)、「Simultaneous Satbilization of the Frequency and Power of an AlGaAs Semiconductor Laser by Use of the Optogalvanic Effect of Krypton」、IEEE J. Quantum Electronics、QE-19、1514~1519ページ(1983)参照)。

10

【0039】

以下の技術の1つを使用することによって、2つの光周波数を生成することが可能である：(1)ゼーマン分裂レーザの使用(たとえば、1969年6月29日発行のバグリー(Bagley)他の米国特許第3,458,259号明細書、G.パウハウス(Bouwhuis)、「Interferometrie Mit Gaslasers」、Ned. T. Natuurk、34、225~232ページ(1968年8月)、1972年4月18日発行のバグリー(Bagley)他の米国特許第3,656,853号明細書、H.マツモト(Matsumoto)、「Recent interferometric measurements using stabilized lasers」、Precision Engineering、6(2)、87~94ページ(1984)参照)；(2)1対の音響光学ブラッグ・セルの使用(たとえば、Y.オオツカ(Ohtsuka)およびK.イトウ(Itoh)、「Two-frequency Laser interferometer for Small Displacement Measurements in a Low Frequency Range」、Applied Optics、18(2)219~224ページ(1979)、一般に所有されているN.マッシー(Massie)他、「Measuring Laser Flow Fields With a 64-Channel Heterodyne Interferometer」、Applied Optics、22(14)、2141~2151(1983)、一般に所有されているY.オオツカ(Ohtuska)およびM.ツボカワ(Tsubokawa)、「Dynamic Two-frequency Interferometry for Small Displacement Measurements」、Optics and Laser Technology、16、25~29ページ(1984)、マツモト(Matsumoto)、同書、1996年1月16日発行のP.ダークセン(Dirksen)他の米国特許第5,485,272号明細書、N.A.リザ(Riza)およびM.M.K.ハウラダー(Howlader)、「Acousto-optic system for the generation and control of tunable low-frequency signals」、Opt. Eng. 35(4)、920~925ページ(1996)、一般に所有、参照)；(3)単一音響光学ブラッグ・セルの使用(たとえば、1987年8月4日発行のG.E.ソマーグレン(Sommargren)の米国特許第4,684,828号明細書、1987年8月18日発行のG.E.ソマーグレン(Sommargren)の米国特許第4,687,958号明細書、P.ダークセン他、同書参照)；(4)乱雑偏光HeNeレーザの2つの縦方向モードの使用(たとえば、J.B.ファーガソン(Ferguson)およびR.H.モリス(Morris)、「Single Mode Collapse in 6328 HeNe Lasers」、Applied Optics、17(18)、2924~2929ページ(1978)、一般に所有参照)；(5)レーザに内在する複屈折要素などの使用(たとえば、V.エトホフ(Evtuhov)およびA.E.シーグマン(Siegman)、「A Twisted-Mode Technique for Obtaining Axially Uniform Energy Density in a Laser

20

30

40

50

Cavity」、Applied Optics、4(1)、142~143ページ(1965)参照);または本願明細書に援用する一般に所有されている(Henry A. ヒル(Hill)およびPeter de グルート(Groot)の米国特許第6,236,507 B1号明細書「Apparatus to Transform Two Non-Parallel Propagating Optical Beam Components into Two Orthogonally Polarized Beam Components」およびHenry A. ヒル(Hill)の米国特許第6,157,660号明細書「Apparatus for Generating Linearly-Orthogonally Polarized Light Beams」に記載されているシステムの使用。

10

【0040】

ビーム322のソース320に使用される専用装置は、ビーム322の直径および発散を決定する。ダイオード・レーザなどのいくつかのソースでは、それに続く要素に対して、適切な直径および発散を有するビーム322を提供するために、従来の顕微鏡対物レンズなど、従来のビーム成形光学機器を使用することが必要である可能性が高い。たとえば、ソースがHeNeレーザであるときは、ビーム成形光学機器は必要でない可能性がある。

【0041】

図1Aに示すように、ビーム322は、ミラー344によってビーム324として反射される。入力ビーム324は、動的ビーム・ステアリング要素372を備える干渉計310に入射して、動的ビーム・ステアリング要素372によってビーム326として反射される。ビーム326の測定ビーム成分は、測定ビーム328の成分として、偏光境界面236、偏光ビーム・スプリッタ374A、および方形波位相遅延プレート376Aによって順次透過される。測定ビーム328の戻り成分は、4分の1波位相遅延プレート376Aと、半波位相遅延プレート376Bと、偏光境界面236とからなる要素によって透過された後、ならびに偏光ビーム・スプリッタ374Aおよびミラー374Bによって反射された後、出力ビーム330の測定ビーム成分として、干渉計310を出る。4分の1波遅延プレート376Aは、位相遅延プレート376Aを通る2重通路を通過する際に測定ビームの偏光面を90度回転させるように配向される。半波位相遅延プレート376Bは、位相遅延プレート376Bを通る単一通路を通過する際に測定ビームの偏光面を90度

20

30

【0042】

ビーム326の基準ビーム成分は、出力ビーム330の基準ビーム成分として、偏光境界面336によって2回反射され、逆反射器240によって1回反射される。

出力ビーム330の第1部分は、第1出力ビーム334としてビーム・スプリッタ378Aによって反射される。出力ビーム330の第2部分は、第2出力ビーム336としてビーム・スプリッタ378Aによって透過される。第1出力ビーム334は、微分角変位干渉計350に入射し、第2出力ビーム336は、検出器346に入射する。

【0043】

分析装置378Aは、反射ビーム334および透過ビーム336において、ビーム330の基準ビーム成分と測定ビーム成分とを合成するように配向された偏光ビーム・スプリッタからなる。ビーム334の伝播方向は、実際には、図1Aの面に対して45度の角度にある。しかし、本発明の重要な特徴の記述を損なわずに、図1Aの第1実施形態の概略的な表示を簡単にするために、分析装置378Aの配向は、図1Aでは、図1Aの面でビーム334が反射するものとして示されている。

40

【0044】

干渉計310は、ビーム330の測定ビーム成分と基準ビーム成分との間に位相シフト ϕ_1 を導入し、したがって、ビーム330は、位相シフト・ビームである。同じ位相シフト ϕ_1 が、ビーム334および336の測定ビーム成分と基準ビーム成分との間に導入される。位相シフト ϕ_1 の大きさは、下式によれば、測定経路および基準経路の物理的な往

50

復距離 $2L_1$ の差に関係する。

【0045】

$$\theta_1 = 2k_1 L_1 n_1 \quad (1)$$

上式で、 n_1 は、測定経路における気体の屈折率の平均である。

出力ビーム 334 は、微分角変位干渉計 350 に入射する。微分角変位干渉計の例について、以下で詳細に記述する。微分角変位干渉計 350 は、出力ビーム 334 の測定ビーム成分と基準ビーム成分との相対的な位相シフト θ_2 を導入するために使用される微分角変位干渉計である。相対位相シフト θ_2 は、微分角変位干渉計 350 の配向によって画定される面における第 2 出力ビーム 334 の測定ビーム成分と基準ビーム成分との伝播方向の差 θ_1 に関係する。相対位相シフト θ_2 は、後に測定されて、サーボ制御システムにおいてエラー信号として使用され、サーボ制御信号は、角度 θ_1 がゼロにほぼ等しい値に維持されるように、動的ビーム・ステアリング要素 372 の配向を制御する。サーボ制御システムは、微分角変位干渉計によって測定された相対位相シフトから、測定物体の角度配向の変化を計算する信号プロセッサを有する制御回路を含む。記述した実施形態のエラー信号は、微分角変位干渉計から導出されるが、他の装置を使用して、エラー信号を生成することも可能である。たとえば、直角位相検出器または CCD カメラを使用して、出力ビームからエラー信号を生成することが可能である。

10

【0046】

出力ビーム 336 は、混合ビームであり、電気干渉信号またはヘテロダイン信号 348 を生成するために、検出器 346 によって検出される。検出器 346 は、量子光子検出器であることが好ましく、ヘテロダイン信号 348 は、ヘテロダイン位相 θ_1 を含む。ヘテロダイン信号 348 は、分析装置 354 に伝送される。分析装置 354 は、位相計を備え、位相計およびソース 320 からの基準位相を使用してヘテロダイン位相 θ_1 を獲得する。分析装置 354 は、式 (1) を使用してミラー 394 の変位の変化を計算するプロセッサを更に備える。

20

【0047】

分析装置 354 は、ソース 320 からの基準位相を使用して位相計によって、ヘテロダイン信号 353 から位相 ($\theta_1 + \theta_2$) を抽出するプロセッサを備える。分析装置 354 は、測定位相 ($\theta_1 + \theta_2$) と θ_1 との差から θ_2 を計算する。分析装置 354 は、次に、計算した θ_2 から角度差 θ_1 を計算する。測定角度差 θ_1 は、サーボ制御信号 382 を生成するために、信号 362 としてサーボ制御装置 380 に伝達される。サーボ制御信号 382 は、図 1 A の面において動的ビーム・ステアリング要素 372 の配向を制御する変換器 370 A および 370 B に伝送される。動的ビーム・ステアリング要素 372 のサーボ制御の効果は、物体ミラー 394 の配向が変化し、それに応じて測定ビーム 328 の方向が変化

30

する際に、

$$\theta_1 = 0 \quad (2)$$

を維持するように、要素 372 の配向をサーボ制御することである。条件 $\theta_1 = 0$ が満たされているとき、ビーム 328 の伝播方向は、物体ミラー 394 の反射表面に垂直である。

【0048】

本発明の第 2 実施形態は、第 1 実施形態の図 1 A によって概略的に示されるが、角度検出器 350 が、2 つの直交方向においてビームの伝播方向の変化を検出する角度検出器によって置き換えられる点異なる。第 2 実施形態は、平面ミラー 394 の線形変位を測定し、この場合、測定ビーム 328 の伝播方向は、図 1 A の面および図 1 の面に直交する面におけるミラー 394 の配向の変化とは無関係に、ミラー 394 の表面に直交する。単一通路干渉計 310 では、基準ビームと測定ビームとのシヤーはほぼ存在せず、微分角変位干渉計システムが、微分角変位干渉計 350 に置き換えられている。さらに、ミラー 394 における測定ビーム 328 のシヤーは、測定物体の配向の変化および干渉計と測定物体との距離に関して等価な条件に対し、平面ミラー測定物体においては、2 重通路平面ミラー干渉計の第 2 通路測定ビーム・シヤーの 4 分の 1 である。

40

50

【 0 0 4 9 】

出力ビーム 3 3 4 は、ビーム・スプリッタ部品 1 1 2 0 に入射して、ビーム 1 3 3 4 および 2 3 3 4 として透過される（図 1 B 参照）。ビーム・スプリッタ部品 1 1 2 0 は、非偏光ビーム・スプリッタ 1 0 1 6 と、プリズム 1 1 1 8 と、ロムボイド 1 0 1 8 とからなる。ロムボイド 1 0 1 8 は、図 1 B では 2 つの直角プリズムとして分離して示されており、非偏光ビーム・スプリッタ 1 0 1 6 によって透過されたビーム 3 3 4 の成分をビーム 1 3 3 4 として変換する。ロムボイド 1 0 1 8 は、入力ビームの偏光面を回転させず、したがって、ビーム 1 3 3 4 の偏光は、非偏光ビーム・スプリッタ 1 0 1 6 によって透過されたビームの偏光と同じである。さらに、ビーム 3 3 4 の対応する成分の伝播方向の変化から得られるビーム 1 3 3 4 の伝播方向の変化も同じである。

10

【 0 0 5 0 】

プリズム 1 1 1 8 は、入射ビームの伝播方向を 9 0 度変化させるように構成された 2 つの直角プリズムからなる（図 1 B 参照）。これにより、非偏光ビーム・スプリッタ 1 0 1 6 とプリズム 1 1 1 8 との組み合わせは、入力ビームの伝播方向の変化を 9 0 度変化させて、入力ビームの偏光面を 9 0 度回転させる。その結果、ビーム 3 3 4 および 1 0 0 9 によって画定される面に直交する入力ビームの偏光は、9 0 度回転され、出力ビーム 2 3 3 4 の偏光は、面に平行になる。さらに、面に直交する入力ビーム 3 3 4 の成分の角変位は、面に平行なビーム 2 3 3 4 の角変位をもたらす。

【 0 0 5 1 】

ビーム 1 3 3 4 および 2 3 3 4 は、図 1 C に示すように、微分角変位干渉計 1 3 5 0 および 2 3 5 0 に入射して、それぞれ出力ビーム 1 3 3 6 および 2 3 3 6 として、微分角変位干渉計 1 3 5 0 および 2 3 5 0 を出る。出力ビーム 1 3 3 6 および 2 3 3 6 は、検出器 1 3 4 6 および 2 3 4 6 によってそれぞれ検出されて、信号 1 3 5 3 および 2 3 5 3 をそれぞれ生成する。

20

【 0 0 5 2 】

干渉計 1 3 5 0 は、ビーム 1 3 3 6 の測定ビーム成分と基準ビーム成分との間に移動 θ_2 を導入する。同様に、干渉計 2 3 5 0 は、ビーム 2 3 3 6 の測定ビーム成分と基準ビーム成分との間に位相 θ_{20} を導入する。相対位相シフト θ_{20} は、 θ_1 によって表した面に直交する面における第 2 出力ビーム 3 3 4 の測定ビーム成分と基準ビーム成分との伝播方向の差 θ_{10} に関する。

30

【 0 0 5 3 】

したがって、ヘテロサイン信号 1 3 5 3 および 2 3 5 3 は、図 1 C の面に平行なビーム 3 3 4 の角変位と、図 1 C の面に直交するビーム 3 3 4 の角変位とに関する情報を含む。図 1 C の面は、図 1 A の面と共役である。

【 0 0 5 4 】

ヘテロサイン信号 1 3 5 3 の位相 ($\theta_1 + \theta_2$) および 2 3 5 3 の位相 ($\theta_1 + \theta_{20}$) は、ソース 3 2 0 からの基準位相を使用して、分析装置 3 5 4 の位相計によって測定される。分析装置 3 5 4 は、 θ_2 および θ_{20} をそれぞれ差 [$(\theta_1 + \theta_2) - \theta_1$] および [$(\theta_1 + \theta_{20}) - \theta_1$] として計算する。分析装置は、次に、計算した θ_2 および θ_{20} から角度差 θ_1 および θ_{10} をそれぞれ計算する。測定角度差 θ_1 および θ_{10} は、サーボ制御信号 3 8 2 を生成するために、信号 3 6 2 としてサーボ制御装置 3 8 0 に伝送される。サーボ制御信号 3 8 2 は、変換器 3 7 0 A、3 7 0 B および図 1 A には示されていない第 3 変換器に伝送され、これらの変換器は、図 1 A の面と図 1 A の面に直交する面とにおいて、動的ビーム・ステアリング要素 3 7 2 の配向を制御する。動的ビーム・ステアリング要素 3 7 2 のサーボ制御の作用は、物体ミラー 3 9 4 の配向が変化し、それに応じて測定ビーム 3 2 8 の伝播方向が変化する際に、

40

$$\theta_1 = 0, \quad (3)$$

$$\theta_{10} = 0$$

を維持するように、要素 3 7 2 の配向をサーボ制御することである。条件 $\theta_1 = 0$ および $\theta_{10} = 0$ が満たされているとき、ビーム 3 2 8 の伝播方向は、2 つの直交する面における

50

物体ミラー 394 の反射表面に垂直である。

【0055】

第2実施形態の残りの記述は、第1実施形態について与えた記述の対応する部分と同じである。

図2は、平面ミラー測定物体の面における変位および配向の変化を測定および監視する、本発明の第3実施形態による装置および方法の概略的な形態を示す。この場合、測定ビームの伝播方向は、平面ミラーにほぼ直交する。第3実施形態の干渉計システムは、310で図2において全体的に示す動的ビーム分割要素を有する偏光ヘテロダイン単一通路干渉計と、微分角変位干渉計350と、角変位干渉計358とからなる。

【0056】

本発明の第3実施形態は、第1実施形態の同じ符合の要素と同様の機能を実施する第1実施形態の多くの要素からなる。第3実施形態は、ある面におけるミラー394の線形変位およびミラー394の配向の変化を測定し、その面における測定ビーム328の伝播方向は、その面におけるミラー394の配向の変化とは関係なく、ミラー394の表面に直交する。さらに、単一通路干渉計310および角変位干渉計350および358には、基準ビームと測定ビームとのシヤアはほぼ存在しない。さらに、ミラー394における測定ビーム328のシヤアは、測定物体の配向の変化および干渉計と測定物体との距離に関して等価な条件に対し、平面ミラー測定物体では、2重通路平面ミラー干渉計の第2通路測定ビーム・シヤアの4分の1である。

【0057】

出力ビーム330の第1部分は、図2に示すように、非偏光ビーム・スプリッタ378Bによって第1出力ビーム332として反射される。出力ビーム330の第2部分は、非偏光ビーム・スプリッタ378Bによって透過され、出力ビーム330の第1部分は、分析装置378Aによって第2出力ビーム3334として反射される。非偏光ビーム・スプリッタ378Bによって透過された出力ビーム330の第2部分は、非偏光ビーム・スプリッタ378Aによって第3出力ビーム3336として透過される。第1出力ビーム332は、角変位干渉計358に入射し、第2出力ビーム3334は、微分角変位干渉計350に入射し、第3出力ビーム3336は、検出器346に入射する。

【0058】

第3出力ビーム3336の検出およびヘテロダイン異信号3348の生成の記述は、第1実施形態のビーム336の検出およびヘテロダイン信号348の生成についての記述の対応する部分と同じである。位相 ϕ_1 に対するヘテロダイン信号3348の処理の記述は、第1実施形態の ϕ_1 に対するヘテロダイン信号348の処理についての記述の対応する部分と同じである。

【0059】

出力ビーム3334の検出およびヘテロダイン信号3353の生成の記述は、第1実施形態のビーム334の検出およびヘテロダイン信号353の生成についての記述の対応する部分と同じである。位相 $(\phi_1 + \phi_2)$ に対する第2出力ビーム3334の処理の記述は、第1実施形態の位相 $(\phi_1 + \phi_2)$ に対してヘテロダイン信号353の処理についての記述の対応する部分と同じである。

【0060】

第1出力ビーム332は、角変位干渉計358に入射する。角変位干渉計358は、出力ビーム332の測定ビーム成分および基準ビーム成分の相対位相シフト ϕ_3 を導入するために使用される非微分型角変位干渉計である。相対位相シフト ϕ_3 は、図2の面における第1出力ビーム332の測定ビーム成分および基準ビーム成分の伝播方向の変化 ϕ_2 に関係する。角変位干渉計の例について、以下で詳細に記述する。

【0061】

微分角変位干渉計350および角変位干渉計358は、2つの角変位干渉計が、共通面におけるミラー394の配向の変化に感度を有するように、互いに関して配向される。

分析装置3354は、第1実施形態の分析装置354の分析装置およびプロセッサを備

10

20

30

40

50

える。分析装置 3354 は、ソース 220 から基準位相を使用して位相計によってヘテロサイン信号 360 から位相 ($\gamma_1 + \gamma_3$) を決定するプロセッサを備える。分析装置 3354 は、位相 γ_3 を差 [$(\gamma_1 + \gamma_3) - \gamma_1$] として計算し、次いで、位相 γ_3 の計算値から第 1 出力ビーム 332 の伝播方向における対応する変化 γ_1 を計算する。

【0062】

角度の変化 γ_1 および γ_3 に対応するミラー 394 の配向角度の変化 α_1 は、下式によって、角度 γ_1 および γ_3 に関係付けられる。

【0063】

【数 1】

$$\gamma_1 = \beta_1 + \frac{\alpha_1}{2} \quad (4)$$

10

分析装置 3354 は、式 (4) により角度 γ_1 を計算するプロセッサを備える。

【0064】

第 3 実施形態の残りの記述は、第 1 実施形態についての対応する記述と同じである。

平面ミラー測定物体の 2 つの直交する面における変位および配向の変化を測定および監視する本発明の第 4 実施形態について記述する。この場合、測定ビームの伝播方向は、平面ミラーにほぼ直交する。第 4 実施形態の干渉計システムは、第 2 微分角変位干渉計および第 2 角変位干渉計で増補された第 3 実施形態の干渉計システムを備える。第 2 微分角変位干渉計の記述は、第 2 実施形態の微分角変位干渉計についての記述の対応する部分と同じである。

20

【0065】

第 4 実施形態の残りの記述は、本発明の第 2 実施形態および第 3 実施形態についての記述の対応する部分と同じである。

測定平面ミラーの 1 つの面における変位および配向の変化を測定および監視する本発明の第 5 実施形態について記述する。第 5 実施形態は、第 1 実施形態の干渉計システムおよび単一通路干渉計を備える。第 1 実施形態の出力ビーム 330 の一部は、分割されて、まず逆反射器を透過し、次いで半波遅延プレートを透過して、単一通路干渉計の入力ビームを形成する。出力ビーム 330 の特性と、単一通路干渉計の入力ビームを形成する際に逆反射器を使用することのために、単一通路干渉計の測定ビームの伝播方向は、ミラー 394 の表面にほぼ垂直であり、ビーム 328 の伝播方向と同じである。

30

【0066】

単一通路干渉計は、単一通路干渉計の測定ビームと基準ビームとの間に位相 γ_6 を導入する。半波位相遅延プレートの結果、330 の基準ビーム成分は、単一通路干渉計の出力ビームの測定ビーム成分が導出される元となるビームであり、330 の測定ビーム成分は、単一通路干渉計の出力ビームの基準ビーム成分が導出される元となるビームである。したがって、単一通路干渉計の出力ビームの測定ビーム成分と基準測定ビームとの正味の位相差は、($\gamma_6 - \gamma_1$) に等しい。位相差 ($\gamma_6 - \gamma_1$) は、測定ビーム 328 と単一通路干渉計の測定ビームとの相対経路によって画定される面におけるミラー 394 の配向の変化にのみ感度がある。ミラー 394 の角度配向の変化は、位相差 ($\gamma_6 - \gamma_1$) と、測定ビーム 328 と単一通路干渉計の測定ビームとの空間分離の測定値とを使用して計算される。

40

【0067】

第 5 実施形態の残りの記述は、本発明の第 2 実施形態についての記述の対応する部分と同じである。

平面ミラー測定物体の 2 つの直交する面における変位および配向の変化を測定および監視する本発明の第 6 実施形態について記述する。第 6 実施形態は、第 2 実施形態の干渉計システムおよび 2 つの単一通路干渉計を備える。2 つの単一通路干渉計のうちの第 1 の単一通路干渉計の説明は、第 5 実施形態についての記述の対応する部分と同じである。第 1 単一通路干渉計への入力ビームの部分は、分割されて、2 つの単一通路干渉計の第 2 の単

50

一通路干渉計について入力ビームを形成する。出力ビーム 330 の特性と、2つの単一通路干渉計の第1の単一通路干渉計について入力ビームを形成する際に逆反射器を使用することのために、第2の単一通路干渉計の測定ビームの伝播方向は、ミラー 394 の表面にほぼ垂直である。

【0068】

第2の単一通路干渉計は、単一通路干渉計の測定ビームと基準ビームとの間に位相 γ を導入する。半波位相遅延プレートの結果、330の基準ビーム成分は、単一通路干渉計の出力ビームの測定ビーム成分が導出される元となるビームであり、330の測定ビーム成分は、単一通路干渉計の出力ビームの基準ビーム成分が導出される元となるビームである。したがって、第2の単一通路干渉計の出力ビームの測定ビーム成分と基準ビーム成分との正味の位相差は、 $(\gamma - \gamma_1)$ に等しい。位相差 $(\gamma - \gamma_1)$ は、ミラー 394 の測定ビーム 328 の相対経路によって画定される第2面におけるミラー 394 の配向の変化にのみ感度がある。第2面は、測定ビーム 328 と第1の単一通路干渉計の測定ビームとの相対経路によって画定される第1面に直交することが好ましい。第2面におけるミラー 394 の角度配向の変化は、位相差 $(\gamma - \gamma_1)$ と、測定ビーム 328 と第2の単一通路干渉計の測定ビームとの空間分離の測定値とを使用して計算される。

10

【0069】

第6実施形態の残りの記述は、第5実施形態についての記述の対応する部分と同じである。

本発明の実施形態は、ビーム・シヤアを最小限に抑える干渉計システムに少なくとも部分的に関する以下の一般に所有されている米国特許出願または特許のいずれかの特徴のいずれかをさらに含むことが可能である(2001年8月7日出願のHenry A. ヒル(Hill)の米国特許第6,271,923号明細書、Henry A. ヒル(Hill)によるPCT/US00/12097号に対応するPCT出願公開WO00/66969号パンフレット、Henry A. ヒル(Hill)他による米国特許第6,313,918号B1明細書、Henry A. ヒルによる2002年2月12日出願の仮出願第60/356,393号明細書「INTERFEROMETER WITH DYNAMIC BEAM STEERING ELEMENT REDIRECTING INPUT MEASUREMENT BEAM COMPONENT AND OUTPUT REFERENCE BEAM COMPONENT」、Henry A. ヒル(Hill)による2002年7月29日出願の米国特許出願第__号明細書「PASSIVE ZERO SHEAR INTERFEROMETERS」参照)。

20

30

【0070】

ここで、微分角変位干渉計および角変位干渉計の例について記述する。

微分角変位干渉計 10 を図 3 A に概略的に示す。入力ビーム 12 は、周波数の差 f_1 を有する2つの直交偏光成分からなる。入力ビーム 12 は、図 1 A に示す本発明の第1実施形態の出力ビーム 334 などに対応する。2つの直交偏光成分の偏光面は、図 3 A の面に対して 45° にある。入力ビーム 12 の2つの成分の伝播方向は、同じであるか、または互いに異なることが可能である。入力ビーム 12 は、ギャップ d を有する要素記号 30 によって一般的に示したエタロンに入射される。エタロンの内表面における入力ビーム 12 の第1成分および第2成分の入射角度は、それぞれ $\theta_{0,1}$ および $\theta_{0,2}$ である。角度 $\theta_{0,1}$ および $\theta_{0,2}$ は、エタロン 30 による入力ビーム 12 の第1成分および第2成分の透過が、 $\theta_{0,j} = 0$ 、 $j = 1, 2$ において可能な透過の最大を除いて、それぞれほぼ最大であるように選択される。第1実施形態では、角度差 $(\theta_{0,2} - \theta_{0,1}) \ll$ 対応する透過ピークの角度幅である。

40

【0071】

入力 12 の第1成分および第2成分は、出力ビーム 22 の第1直交偏光ビーム成分および第2直交偏光ビーム成分として透過される。出力ビーム 22 は、偏光器 36 によって透過されて、混合ビーム 26 を形成する。混合ビーム 26 は、レンズ 46 によって、検出器 58 の上の像スポットに集束される。像スポットを形成するビームは、好ましくは光電気

50

検出によって、電気干渉信号 28 (たとえば図 1 A のヘテロダイン信号 353 に対応する) として検出器 58 によって検出される。

【0072】

信号 28 は、入力ビーム 12 の第 1 成分の周波数と第 2 成分の周波数の差である f_1 に等しいヘテロダイン周波数と、ヘテロダイン位相 $\phi_{1,2}$ とを有するヘテロダイン信号である。ヘテロダイン位相 $\phi_{1,2}$ は、たとえば、第 1 実施形態の位相 ϕ_2 および第 2 実施形態の位相 ϕ_{20} に対応する。信号 28 は、たとえば分析装置 354 (図 1 A 参照) または他の適切な電子プロセッサによって処理される。

【0073】

レンズ 46 における非アポダイズ正方形開口の非限定的な例では、ヘテロダイン信号 28 の原因であるビーム 26 の成分について図 3 A の面の像スポットにおける強度プロファイル $I_{h,1}$ は、良好に近似して下式のように示される。

【0074】

【数 2】

$$I_{h,1} = \frac{C_{h,1} (1 - R_1)^2}{\left[(1 - R_1)^2 + 4R \sin^2 (\delta'_{1,2}/2) \right]} \times \text{sinc}^2 [kp_{1,2} (b/2)] \cos [\omega_1 t + (\phi_2 - \phi_1)] \quad (5)$$

10

20

上式では、

【0075】

【数 3】

$$\delta'_j = 2knd (p_j \tan \theta_{o,j} + \cos \theta_{o,j}) \quad , j = 1, 2, \quad (6)$$

$$p_j = \sin \theta_{o,j} + \sin \theta_{i,j} \quad , j = 1, 2, \quad (7)$$

$$\tan \phi_j = \frac{R_1 \sin \delta_j}{1 - R_1 \cos \delta_j} \quad , j = 1, 2, \quad (8)$$

30

である。

【0076】

$\phi'_{1,2} = (\phi'_2 + \phi'_1) / 2$ 、 $p_{1,2} = (p_2 + p_1) / 2$ であり、 b は、図 3 A の面のレンズ 46 における正方形開口の幅である。 $C_{h,1}$ は、比例定数、 R_1 は、エタロン 30 の内表面の強度反射率、 $\phi_1 = 2\pi f_1$ 、 k 、および n は、それぞれ、エタロン 30 のギャップにおける媒体の入力ビーム成分の波数および屈折率である。角度 $\theta_{o,1}$ および $\theta_{o,2}$ は、図 3 B により画定される。

40

【0077】

ヘテロダイン信号 28 は、像スポットにわたって $I_{h,1}$ の強度に比例する。透過ピークでは、すなわち q_j を通常 $\gg 1$ である整数として $\phi'_j = 2\pi q_j$ であり、かつ q_j を整数として $\phi_j = 2\pi q'_j$ であるとき、 $\phi_{o,1}$ および $\phi_{o,2}$ の変化に対するヘテロダイン位相 $\phi_{1,2}$ の感度は、以下のように表すことが可能である。

【0078】

【数4】

$$d\phi_{1,2} = -\frac{R_1}{(1-R_1)} 2knd \left[\sin\left(\frac{\theta_{o,2} + \theta_{o,1}}{2}\right) \right] (d\theta_{o,2} - d\theta_{o,1}) \quad (9)$$

本発明の範囲または精神から逸脱せずに、本発明の一般的な特性の表示の複雑さを低減するために、式(9)のより高次の項は、省略されている。

【0079】

ヘテロダイン位相 $\phi_{1,2} = \phi_2 - \phi_1$ は、ヒルベルト変換などの時間ベース位相分析手順を使用することにより獲得することが可能である。

$d = 4 \text{ mm}$ 、 $R_1 = 0.99$ 、 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 、 $n = 1.000$ 、および $[(\theta_{o,2} + \theta_{o,1}) / 2] = 0.0129 \text{ rad}$ のエタロン間隔では、 $\theta_{o,1}$ および $\theta_{o,2}$ の変化に対する位相 $\phi_{1,2}$ の感度は、以下ようになる。

【0080】

【数5】

$$d\phi_{1,2} = -1.01 \times 10^5 (d\theta_{o,2} - d\theta_{o,1}) \quad (10)$$

または、位相 $\phi_{1,2}$ の測定変化から $(d\theta_{o,2} - d\theta_{o,1})$ の推測値の感度について、以下のように表される。

【0081】

$$(d\theta_{o,2} - d\theta_{o,1}) = -0.99 \times 10^{-5} d\phi_{1,2} \quad (11)$$

第1実施形態では、角度差 $(d\theta_{o,2} - d\theta_{o,1})$ の測定は、光学差分法に基づくことが明らかである。この場合、第1ビーム成分と第2ビーム成分との測定位相差は、第1ビーム成分および第2ビーム成分の両方に共通な周波数シフトの作用について、1次まで感度がない。

【0082】

入力ビーム成分の伝播方向の相対変化を測定する精度の改善は、第1ビーム成分と第2ビーム成分との間で低周波数分割において動作させることによって獲得することが可能である。ある最終用途応用例において低周波数分割を使用する選択肢は、入力ビーム12の成分の相対伝播方向の変化を測定および監視するために使用するヘテロダイン信号28の位相において、1次入力ビーム周波数シフト効果が欠如している直接的な結果である。

【0083】

入力ビームの伝播方向の変化を測定および監視するために使用される電気干渉信号の位相は、記述したヘテロダイン技法を使用して、または周波数 $f_1 = 0$ であるときはホモダイン技法を使用して決定することが可能である。

【0084】

微分角変位干渉計10は、式(11)の $d\phi_{1,2}$ の係数の精確な知識がない場合、ゼロ検出器として使用することが可能である。式(11)の $d\phi_{1,2}$ の係数を校正した場合、対応する透過ピークの幅より小さい入力ビーム12の第1成分および第2成分の伝播方向の相対変化を監視するために第1実施形態を使用することが可能である。

【0085】

微分角変位干渉計10は、図4に概略的に示す角変位干渉計11を提供するように修正することが可能である。第2実施形態の装置は、第1実施形態の装置と同じ構成要素と、2つの複屈折プリズム40および42とを備える。複屈折プリズム40は、 $\theta_{o,1}$ および $\theta_{o,2}$ が、エタロン30の2つの異なる透過ピークに対応するように、入力ビーム12の第1成分と第2成分との間に角度を導入する。複屈折プリズム42は、入力ビーム12の

10

20

30

40

50

第1成分および第2成分に関連付けられる出力ビーム126の第1成分および第2成分が、それぞれほぼ平行な伝播方向を有するように、エタロン30からのビームを再び組み合わせる。たとえば、第2実施形態で $d_{0,2} = 0$ の場合、 $d_{0,1}$ の変化に対する位相 $\phi_{1,2}$ の感度は、 $d_{0,2} = 0$ として式(9)および(10)によって表される。同様に、位相 $\phi_{1,2}$ の測定値から $d_{0,1}$ について推測した値の感度は、 $d_{0,2} = 0$ として式(11)によって表される。

【0086】

したがって、式(7)の係数を較正した場合、第1実施形態を使用して、第2実施形態の装置の配向に関して、入力ビーム12の第1成分の伝播方向の変化を測定することが可能である。当業者には、第2実施形態が、入力ビーム12の第2成分の伝播方向の変化を測定するように、同様にうまく構成されていることが明らかになるであろう。

10

【0087】

角変位干渉計11の残りの記述は、微分角度測定干渉計10の対応する部分と同じである。

代替の角変位干渉計500を図5Aに概略的に示す。これは、2つの成分からなる光ビームの平均的な伝播方向の1面における角度測定を実施する。角変位干渉計500は、要素符合530で全体的に示すビーム・シェアリング部品と、分析装置540と、レンズ546と、検出器560と、電子プロセッサ570とからなる。入力ビーム512は、たとえば第1出力ビーム322(図2参照)に対応し、周波数の差 f_1 を有する2つの直交偏光光ビーム成分からなる。2つの直交偏光成分の偏光面は、それぞれ、図5Aの面に平行および直交する。

20

【0088】

ビーム・シェアリング部品530は、2つの直交偏光ビーム550、552間に、それぞれ横方向シヤ S_{51} を導入する(図5A参照)。空間的にずれている出力ビーム550および552のそれぞれの部分は、それぞれ成分554および556として分析装置によって透過される。分析装置540は、ビーム成分554および556が、両方とも、図5Aの面に対して45度に配向した共通面において偏光されるように配向される。

【0089】

次に、ビーム成分554および556は、レンズ546に入射する。レンズ546は、ビーム成分554および556を、好ましくは量子格子検出器によって検出される検出器560の上のスポットに集束させて、電気干渉信号562またはヘテロダイン信号 S_{51} を生成する。スポットは、ほぼ重なり合う。ヘテロダイン信号 S_{51} は、信号 S_{51} のヘテロダイン位相および図5Aの面におけるビーム512の対応する平均的な伝播方向を決定するために、電子プロセッサ570(図2の分析装置3354など)に伝送される。

30

【0090】

ビーム・シェアリング部品530は、偏光ビーム・スプリッタ532および538と、直角プリズム533および537と、切頭ポロ・プリズム535および536とからなる。図5Aの面において偏光されたビーム512の成分は偏光ビーム・スプリッタ532によって透過され、直角プリズム533によって反射され、切頭ポロ・プリズム536によって向け直されて、偏光ビーム・スプリッタ538によってビーム550として反射される。図5Aの面に直交して偏光されたビーム512の成分は、偏光ビーム・スプリッタ532によって反射され、切頭ポロ・プリズム535によって向け直され、直角プリズム537によって反射されて、偏光ビーム・スプリッタ538によってビーム552として透過される。

40

【0091】

ビーム・シェアリング部品530および分析装置540を通るビーム554および556のそれぞれのガラスの光路は、同じであることが好ましいことに留意されたい。角変位干渉計500の装置設計のこの特徴により、干渉計システムは、温度変化に対して高度に安定となる。

【0092】

50

ヘテロダイン信号 S_{51} は、以下のように示すことが可能である。

$$S_{51} = A_{51} \cos(\omega_{51} t + \phi_{51} + \phi_{51}) \quad (12)$$

上式で、

$$\omega_{51} = 2k_{51}n[d_{51}\cos\theta'_{51} + d_{52}\cos\theta'_{52} - d_{53}\cos\theta'_{53} - d_{54}\cos\theta'_{54}] \quad (13)$$

であり、 $\omega_{51} = 2\pi f_{51}$ 、 ϕ_{51} は、位相 ϕ_{51} とは関連性のない位相のずれ、 $k_{51} = 2\pi/\lambda_{51}$ 、 λ_{51} は、入力ビーム 512 の波長、 θ'_{51} および θ'_{52} は、それぞれ、直角プリズム 533 および偏光ビーム・スプリッタ 538 におけるビーム 550 の入射角（図 5 B 参照）、 θ'_{53} および θ'_{54} は、それぞれ、偏光ビーム・スプリッタ 532 および直角プリズム 537 におけるビーム 552 の入射角、 d_{51} 、 d_{52} 、 d_{53} 、および d_{54} は、図 5 B b において画定される。 ϕ_{51} は、たとえば第 3 実施形態の 3 に対応することに留意されたい。本発明の範囲および精神から逸脱せずに簡単な方式で本発明の特徴を実証するために、式 (13) では、ビーム・シェアリング部品 530 の光路のすべては、同じ屈折率を有することが想定されている。 $d_{51} = d_{53}$ 、 $d_{52} = d_{54}$ 、 $\theta'_{51} + \theta'_{52} = \pi/2$ 、および $\theta'_{53} + \theta'_{54} = \pi/2$ の非限定的な例では、式 (13) は、 ω_{51} についてより簡単な式になる。

【0093】

【数6】

$$\omega_{51} = 2^{1/2} k_{51} n \left[(d_{51} - d_{52}) \left[\cos(\theta'_{51} + \pi/4) + \cos(\theta'_{54} + \pi/4) \right] + (d_{51} + d_{52}) \left[\sin(\theta'_{51} + \pi/4) - \sin(\theta'_{54} + \pi/4) \right] \right] \quad (14)$$

横方向シャー S_{51} は、下式により、ビーム・シェアリング部品 530 の特性に関係付けられる。

【0094】

【数7】

$$S_{51} = 2 \left[(d_{51} \sin\theta'_{51} - d_{52} \sin\theta'_{52}) \sec\phi'_{51} \cos\phi_{51} + (d_{53} \sin\theta'_{53} - d_{54} \sin\theta'_{54}) \sec\phi'_{53} \cos\phi_{53} \right] \quad (15)$$

上式で、 θ'_{51} および θ'_{52} は、偏光ビーム・スプリッタ 532 の入射面におけるビーム 550 の入射角度および屈折角度であり、 θ'_{53} および θ'_{54} は、偏光ビーム・スプリッタ 532 の入射面におけるビーム 552 の入射角度および屈折角度である（図 5 B 参照）。非限定的な例では、以下のようになる。

【0095】

【数8】

$$S_{51} = 2^{1/2} \left\{ (d_{51} - d_{52}) \left[\sin(\theta'_{51} + \pi/2) \sec\phi'_{51} \cos\phi_{51} + \sin(\theta'_{54} + \pi/2) \sec\phi'_{53} \cos\phi_{53} \right] + (d_{51} + d_{52}) \left[\sin(\theta'_{51} - \pi/2) \sec\phi'_{51} \cos\phi_{51} - \sin(\theta'_{54} - \pi/2) \sec\phi'_{53} \cos\phi_{53} \right] \right\} \quad (16)$$

式 (15) および (16) によって S_{51} について与えられる式は、ビーム・シャーの生成に使用される 1 次機構を表す。しかし、入射角度依存位相シフトに関連するようなビーム・シャーを導入する他の機構が存在する（グース・ハンチエン (Gooss-Hanchen) 効果）。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 6 】

振幅 A_{51} は、 $|h(p_{51})|^2$ のフーリエ変換のフーリエ成分に対する良好な近似に比例する。すなわち、

【 0 0 9 7 】

【 数 9 】

$$A_{51} \propto \int |h(p_{51})|^2 \cos[4k_{51}p_{51}S_{51}] dp_{51} \tag{17}$$

10

であり、 $h(p_{51})$ は、レンズ 5 4 6 の瞳関数を乗算したレンズ 5 4 6 におけるビーム 5 5 4 または 5 5 6 の一方の振幅のフーリエ変換であり、

$$p_j = \sin \theta_{0,j} + \sin \theta_{i,j} \quad j = 51, 52, \dots \tag{18}$$

$\theta_{0,j}$ および $\theta_{i,j}$ の定義は、図 5 C に示されている。角度 $\theta_{0,j}$ および $\theta_{i,j}$ は、物体およびレンズ 5 4 6 の像空間におけるビーム j の基準光線の共役角である。 p_j の定義は、図 5 D に示されている。

【 0 0 9 8 】

式 (1 3) および (1 4) から、光ビームの方向変化の観点では、位相 ϕ_{51} の分解能は、長さ $2^{3/2}(d_{51} - d_{52})$ が長くなる際に増大することが明らかである。しかし、 $2^{3/2}(d_{51} - d_{52})$ について使用不能な範囲が、式 (1 7) によって示すように、 $|h(p_{51})|^2$ のフーリエ変換の空間周波数帯域幅によって画定される。

20

【 0 0 9 9 】

$2^{3/2}(d_{51} - d_{52})$ の最適値は、一般に、それぞれの瞳によって透過されたビームの特徴的な空間寸法の約半分 に等しい。たとえば、レンズ 5 4 6 におけるビーム 5 5 4 およびビーム 5 5 6 の両方について、矩形瞳の寸法が、図 5 A の面において b であり、ビーム 5 5 4 および 5 5 6 の振幅がそれぞれの瞳にわたって一様で場合について考慮する。この場合、 $|h(p_{51})|^2$ は、シンク関数の 2 乗すなわち $(\sin x / x)^2$ であり、 $|h(p_{51})|^2$ のフーリエ変換は、3 角関数 である。3 角関数 は、 $2^{3/2}(d_{51} - d_{52}) = 0$ について最大数 1 を有し、 $2^{3/2}(d_{51} - d_{52}) = b$ について 0 の値を有する。したがって、 $2^{3/2}(d_{51} - d_{52}) = b$ について振幅 $A_{51} = 0$ であり、光ビームの方向変化の観点における位相 ϕ_{51} の分解能は、 $2^{3/2}(d_{51} - d_{52}) = 0$ について 0 である。したがって、 $2^{3/2}(d_{51} - d_{52})$ の最適値は、この場合では、近似的に $b / 2$ である。 $2^{3/2}(d_{51} - d_{52})$ の実際の最適値は、たとえば、信号対雑音比に関して最適動作条件を確定するために使用される基準に依存する。ビーム 5 1 2 の成分がガウス型強度プロファイルを有する場合は、 $2^{3/2}(d_{51} - d_{52})$ の最適値は、 w を、ビーム 5 1 2 の強度がその中心のビーム 5 1 2 における強度の $1 / e$ に等しい値を有する半径として、ほぼ w である。

30

【 0 1 0 0 】

$2w = 5.0 \text{ mm}$ 、 $\theta_{51} = 45$ 度、および $w = 633 \text{ mm}$ であるガウス型強度プロファイルを有するビームの例では、微分形式で表された $d\phi_{51}$ および $d\phi_{53}$ の変化に対する位相 ϕ_{51} の感度は、下式によって与えられる。

40

【 0 1 0 1 】

【 数 1 0 】

$$\begin{aligned} d\phi_{51} &= k_{51}w \left[\frac{d\phi_{51} + d\phi_{53}}{2} \right] \\ &= -2.5 \times 10^4 \left[\frac{d\phi_{51} + d\phi_{53}}{2} \right] \end{aligned} \tag{19}$$

式 (1 9) から、角度変化 $d\theta_{51}$ および $d\theta_{53}$ に関する位相変化 $d\phi_{51}$ の感度は、屈折率

50

nに依存しないことが明らかであることに留意されたい。これは、第1実施形態の重要な特性である。具体的には、角度変化 d_{51} および d_{53} に関する位相 ϕ_{51} の変化の感度は、ビーム・シヤリング部品530の光学要素の屈折率の熱誘導変化に対し1次まで依存せず、かつビーム・シヤリング部品530の光学要素の熱膨張率にのみ依存する温度変化に対する感度を有する。ビーム・シヤリング部品530の要素の熱係数は、 0.5 ppm/ より小さくなるように選択することが可能である。同じ理由で、 ϕ_{51} のゼロ値も、ビーム・シヤリング部品530の温度変化に対して、対応する低い感度を呈する。

【0102】

第1実施形態によって対応することが可能である平均値 $[d_{51} + d_{53}] / 2$ の範囲を限定する2つの主な量は、差 $[d_{51} - d_{53}] / 2$ の大きさ、および検出器560の感度領域のサイズである。ヘテロダイン信号の振幅は、

【0103】

【数11】

$$wk_{51} \left[\frac{d\phi_{51} - d\phi_{53}}{2} \right] \approx 1.$$

であるとき、ほぼ2分の1に低減される。式(19)では省略されている d_{51} および d_{53} のより高次の項は、特定の最終用途応用例に必要な場合、式(13)から容易に決定することが可能である。

【0104】

ビーム・シヤリング部品530の第2実施形態を図5Eに概略的に示す。これは、2つのプリズム5330および5332と、偏光ビーム・スプリッタ境界面5340とを備える。入力ビーム512の第1成分は、偏光ビーム・スプリッタ境界面5340によって2回透過され、プリズム5330および5332の面によって反射されて、出力ビーム5350を形成する。入力ビーム512の第2成分は、偏光ビーム・スプリッタ境界面5340によって2回反射され、プリズム5330および5332の面によって反射されて、出力ビーム5352を形成する。

【0105】

2つのプリズム5330および5332ならびに偏光ビーム・スプリッタ境界面5340は、ビーム512の伝播方向と、ビーム5332および5352の伝播方向との関係に関して、ペンタ・プリズムと同じ特性を呈示する。プリズム5330および5332は、ビーム5350と5352との間にビーム・シヤ S_{53} を導入するように選択された相対サイズと同形であることが好ましい。屈折媒体の光路は、ビーム5350および5352についてほぼ同じである。ビーム5350および5352の残りの記述は、シヤ S_{51} をシヤ S_{53} に置き換えた第1実施形態のビーム550および552についての記述の対応する部分と同じである。図5Eの入力ビーム512の記述は、図5Aに示した角変位干渉計の入力ビーム512の記述と同じである。

【0106】

参照符合600と名称付けした微分角変位干渉計の他の例を図6に概略的に示す。これは、2成分光ビームの成分の伝播方向の差を1面において測定する。微分角変位干渉計600は、要素符合630によって全体的に示したビーム・シヤリング部品と、分析装置540と、レンズ546と、検出器560と、電子プロセッサ570とを備える。入力ビーム612の記述は、図5Aに示した入力ビーム512についての記述の対応する部分と同じである。

【0107】

ビーム・シヤリング部品630は、同じ機能を実施する角変位干渉計500のビーム・シヤリング部品530の要素と同じ要素符合を有する多くの要素からなる。ビーム・シヤリング部品630は、ペンタ・プリズム635および補償プレート636をさらに備える

10

20

30

40

50

。ペンタ・プリズム 635 は、ビーム 652 の光路において追加の反射を導入し、この追加の反射は、図 6 の面に対する法線に関するビーム 652 の像倒立をもたらす。像倒立には、伝播方向変換が関連付けられ、この場合、偏光ビーム・スプリッタ 532 によって反射された入力ビーム 612 の成分の伝播方向の変化が、図 6 の面におけるビーム 652 の伝播方向の反対の変化に変換される。補償プレート 636 の厚さは、ビーム・シヤリング部品 630 におけるビーム 650 および 652 のガラスの光路が同じであるように選択される。ビーム 650 および 652 の残りの記述は、角変位干渉計 500 に関してビーム 550 および 552 についての記述の対応する部分と同じである。

【0108】

微分角変位干渉計 600 によって測定される角度は、ペンタ・プリズム 635 の追加によって導入されたビーム 652 の像倒立の結果である、入力ビーム 612 の 2 つの成分の伝播方向の変化の差 $[d_{51} - d_{53}] / 2$ である。

【0109】

微分角変位干渉計 600 の残りの記述は、角変位干渉計 500 について与えた記述の対応する部分と同じである。

代替として、またはさらに、角度干渉計の他の形態（一般に所有されている 2001 年 4 月 26 日出願の Henry A. ヒル (Hill) の米国特許出願第 09/842,556 号明細書「DYNAMIC ANGLE MEASURING INTERFEROMETER」、2001 年 5 月 10 日出願の Henry A. ヒル (Hill) の米国特許出願第 09/852,369 号明細書「APPARATUS AND METHOD FOR INTERFEROMETRIC MEASUREMENTS OF ANGULAR ORIENTATION AND DISTANCE TO A PLANE MIRROR OBJECT」、2002 年 1 月 24 日出願の Henry A. ヒル (Hill) の仮特許出願第 60/351,496 号明細書「INTERFEROMETERS FOR MEASURING CHANGES IN OPTICAL BEAM DIRECTION」に記載)を、本発明の精神および範囲から逸脱せずに、上記で記述した実施形態に組み込むことが可能である。引用した 3 つの特許出願の内容は、本願明細書に援用されている。

【0110】

上記で記述した干渉計システムは、非常に精密な測定を提供する。そのようなシステムは、コンピュータ・チップなど、大規模集積回路を製造する際に使用されるリソグラフィ応用分野において特に有用であることがある。リソグラフィは、半導体製造産業では重要な技術推進力である。オーバーレイの改良は、100nm の線幅（設計基準寸法）まで、およびそれより下に下げる 5 つの最も困難な課題の 1 つである（たとえば、Semiconductor Industry Roadmap、82 ページ（1997）参照）。

【0111】

オーバーレイは、ウエハおよびレチクル（またはマスク）のステージを位置決めするために使用される距離測定干渉計の性能、すなわち正確さおよび精度に直接依存する。リソグラフィ・ツールは、\$50 ~ 100M / 年の製品を生産することが可能であるので、改良型性能距離測定干渉計の経済価値は膨大である。リソグラフィ・ツールの歩留まりが 1% 増大するたびに、集積回路製造業者にとって約 \$1M / 年の経済利益が得られ、リソグラフィ・ツールの販売業者にとっては、競争にかなり有利である。

【0112】

リソグラフィ・ツールの機能は、空間的にパターン化された放射をフォトレジスト被覆ウエハの上に向けることである。この過程には、ウエハのどの位置が、放射を受け取るかを決定すること（位置合わせ）と、放射をその位置においてフォトレジストに加えること（露光）とが含まれる。

【0113】

ウエハを適切に位置決めするために、ウエハは、専用センサによって測定することが可能である位置合わせマークをウエハの上を含む。位置合わせマークの測定位置は、ツール

10

20

30

40

50

内におけるウエハの位置を確定する。この情報は、ウエハ表面の望ましいパターン化の仕様と共に、空間的にパターン化された放射に対するウエハの位置合わせを誘導する。そのような情報に基づいて、フォトレジスト被覆ウエハを支持する並進可能ステージが、放射がウエハの正確な位置を露光させるように、ウエハを移動させる。

【 0 1 1 4 】

露光中、放射ソースが、パターン化されたレチクルを照明し、レチクルは、空間的にパターン化された放射を生成するように、放射を散乱させる。レチクルはマスクとも呼ばれ、これらの用語は、以下では区別なく使用される。リダクション・リソグラフィの場合では、リダクション・レンズが、散乱放射を収集して、レチクル・パターンのリダクション画像を形成する。代替として、プロキシミティ露光の場合では、散乱放射は、短い距離（通常ミクロンの大きさ）を伝播した後、ウエハに接触して、レチクル・パターンの1：1画像を作成する。放射は、レジストにおいて光化学過程を開始し、放射パターンをレジスト内の潜像に変換する。

10

【 0 1 1 5 】

干渉分光システムは、ウエハおよびレチクルの位置を制御し、かつレチクル像をウエハの上に登録する位置決め機構の重要な構成要素である。そのような干渉分光システムが上記で記述した特徴を含む場合、システムによって測定される距離の正確さは、距離測定に対するエラー寄与が最小限に抑えられるので、増大する。

【 0 1 1 6 】

一般に、露光システムとも呼ばれるリソグラフィ・システムには、通常、照明システムおよびウエハ位置決めシステムが含まれる。照明システムには、紫外線、可視光線、x線、電子、またはイオンの放射などの放射を提供する放射ソースと、パターンを放射に付与して、それにより空間的にパターン化された放射を生成するためのレチクルまたはマスクとが含まれる。さらに、リダクション・リソグラフィの場合では、照明システムは、空間的にパターン化された放射をウエハの上に撮像するためのレンズ部品を含むことが可能である。撮像放射は、ウエハの上に被覆されたレジストを露光させる。照明システムには、また、マスクを支持するマスク・ステージと、マスクを通して向けられた放射に対してマスク・ステージの位置を調節するための位置決めシステムとが含まれる。ウエハ位置決めシステムには、ウエハを支持するためのウエハ・ステージと、撮像放射に対してウエハ・ステージの位置を調節するための位置決めシステムとが含まれる。集積回路の製造は、複数の露光工程を含むことが可能である。リソグラフィに関する一般的な参考文献については、たとえば、本願明細書に援用するJ．R．シーツ（Sheats）およびB．W．スミス、*Micro lithography：Science and Technology*（マーセル・デッカー・インコーポレイテッド社（Marcel Dekker）[米国ニューヨーク所在] 1988）を参照されたい。

20

30

【 0 1 1 7 】

上記で記述した干渉分光システムを使用して、レンズ部品、放射ソース、または支持構造など、露光システムの他の構成要素に対するウエハ・ステージおよびマスク・ステージのそれぞれの位置を精確に測定することが可能である。そのような場合、干渉分光システムは、静止構造に取り付けることが可能であり、測定物体は、マスク・ステージおよびウエハ・ステージの一方など、可動要素に取り付けることが可能である。代替として、状況を逆にして、干渉分光システムを可動物体に取り付け、測定物体を静止物体に取り付けることが可能である。

40

【 0 1 1 8 】

より一般的には、そのような干渉分光システムを使用して、露光システムのあらゆる他の構成要素に対する露光システムのいずれか1つの構成要素の位置を測定することが可能である。露光システムにおいては、干渉分光システムは、構成要素の1つに取り付けられる、または構成要素の1つによって支持される、あるいは構成要素の他によって支持される。

【 0 1 1 9 】

50

干渉計システム 1126 を使用するリソグラフィ・スキャナ 1100 の例を図 7a に示す。干渉分光システムを使用して、露光システム内におけるウエハ（図示せず）の位置を精確に測定する。ここでは、ステージ 1122 を使用して、露光ステーションに対してウエハを位置決めし、支持する。スキャナ 1100 は、フレーム 1102 を含み、フレーム 1102 は、他の支持体構造およびそれらの構造の上において搭載された様々な構成要素を搭載する。露光ベース 1104 には、その上にレンズ・ハウジング 1106 が取り付けられ、レンズ・ハウジングの上には、レチクルまたはマスクを支持するために使用されるレチクルステージまたはマスク・ステージ 1116 が取り付けられる。マスクを露光ステーションに対して位置決めする位置決めシステムを、要素 1117 によって概略的に示す。位置決めシステム 1117 は、たとえば、圧電変換器要素および対応する制御電子機器を含むことが可能である。ここで記述する実施形態には含まれていないが、上記で記述した干渉分光システムの 1 つまたは複数を使用して、マスク・ステージならびにリソグラフィック構造を製造する過程において位置を精確に監視しなければならない他の可動要素の位置を精密に測定することが可能である（たとえば、シーツおよびスミス、Micro Lithography: Science and Technology 参照）。

10

【0120】

露光ベース 1104 の下には、ウエハ・ステージ 1122 を搭載する支持ベース 1113 が吊り下げられている。ステージ 1122 は、干渉分光システム 1126 によってステージ 1122 に向けられた測定ビーム 1154 を反射する平面ミラー 1128 を含む。干渉分光システム 1126 に対してステージ 1122 を位置決めする位置決めシステムを、要素 1119 によって概略的に示す。位置決めシステム 1119 は、たとえば、圧電変換器要素および対応する制御電子機器を含むことが可能である。測定ビームは、露光ベース 1104 の上に取り付けられている干渉分光システム 1126 に向けて後方反射される。干渉分光システム 1126 は、以前に記述した干渉分光システムの例のいずれかを含むことが可能である。

20

【0121】

動作中、UV レーザ（図示せず）からの紫外線（UV）ビームなどの放射ビーム 1110 は、ビーム成形光学機器部品 1112 を通過して、ミラー 1114 から反射された後、下方に進行する。その後、放射ビームは、マスク・ステージ 1116 に搭載されたマスク（図示せず）を通過する。マスク（図示せず）は、レンズ・ハウジング 1106 において搭載されたレンズ部品 1108 を介してウエハ・ステージ 1122 の上のウエハ（図示せず）の上に撮像される。ベース 1104 およびそれによって支持されている様々な構成要素は、ばね 1120 によって示したダンピング・システムによって、環境の変化から隔離される。

30

【0122】

リソグラフィ・スキャナの他の例では、以前に記述した干渉分光システムの 1 つまたは複数を使用して、例としてであるが非限定的に、ウエハ・ステージおよびレチクル（またはマスク）ステージに関連する複数軸に沿った距離および角度を測定することが可能である。また、UV レーザ・ビームではなく、x 線ビーム、電子ビーム、イオン・ビーム、および可視光ビームなどを含めて、他のビームを使用して、ウエハを露光させることが可能である。

40

【0123】

いくつかの実施形態では、リソグラフィ・スキャナは、当技術分野において列基準として知られるものを含むことが可能である。そのような実施形態では、干渉分光システム 1126 は、基準ビーム（図示せず）を外部基準経路に沿って向け、外部基準経路は、放射ビームを向けるレンズ・ハウジング 1106 などのある構造の上に取り付けられた基準ミラー（図示せず）と接触する。基準ミラーは、基準ビームを干渉分光システムに後方反射する。ステージ 1122 から反射された測定ビーム 1154 と、レンズ・ハウジング 1106 の上に取り付けられた基準ミラーから反射された基準ビームとを組み合わせたとき、干渉分光システム 1126 によって生成される干渉信号は、放射ビームに対するステージ

50

の位置変化を表す。さらに、他の実施形態では、干渉分光システム 1 1 2 6 は、スキャナ・システムのレチクル（またはマスク）・ステージ 1 1 1 6 または他の可動構成要素の位置変化を測定するように位置決めすることが可能である。最後に、干渉分光システムは、スキャナの他に、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・システムと共に同様の方式で使用することが可能である。

【 0 1 2 4 】

当技術分野では周知であるように、リソグラフィは、半導体装置を作成する製造方法の重要な一部である。そのような製造方法の工程が概述されている（たとえば、米国特許第 5, 4 8 3, 3 4 3 号明細書参照）。これらの工程について、図 7 b および 7 c に関して以下で記述する。図 7 b は、半導体チップ（IC または LSI など）、液晶パネル、または CCD など、半導体装置を製造する順序のフロー・チャートである。工程 1 1 5 1 は、半導体装置の回路を設計する設計過程である。工程 1 1 5 2 は、回路パターン設計に基づくマスクの製造過程である。工程 1 1 5 3 は、シリコンなどの材料を使用することによってウエハを製造する過程である。

10

【 0 1 2 5 】

工程 1 1 5 4 は、予備過程と呼ばれるウエハ過程であり、そのように準備されたマスクおよびウエハを使用することによって、リソグラフィにより、回路をウエハの上に形成する。十分な空間分解能でマスク上の回路パターンに対応する回路をウエハの上に形成するために、ウエハに対するリソグラフィ・ツールの干渉分光による位置決めが必要である。本明細書で記述する干渉分光法およびシステムは、ウエハ過程において使用されるリソグラフィの有効性を向上させるのに特に有用であり得る。

20

【 0 1 2 6 】

工程 1 1 5 5 は、工程 1 1 5 4 によって処理されたウエハが半導体チップに形成される事後過程と呼ばれる組立て工程である。この工程には、組立て（方形切断および結合）および実装（チップ封止）が含まれる。工程 1 1 5 6 は、検査工程であり、工程 1 1 5 5 によって作成された半導体装置の動作性の検査、耐久性の検査などが実施される。これらの過程により、半導体装置は完成し、出荷される（工程 1 1 5 7）。

【 0 1 2 7 】

図 7 c は、ウエハ過程の詳細を示すフロー・チャートである。工程 1 1 6 1 は、ウエハの表面を酸化させる酸化過程である。工程 1 1 6 2 は、絶縁膜をウエハ表面の上に形成する CVD 過程である。工程 1 1 6 3 は、蒸着によってウエハの上に電極を形成する電極形成過程である。工程 1 1 6 4 は、イオンをウエハに注入する注入過程である。工程 1 1 6 5 は、レジスト（感光材料）をウエハに加えるレジスト過程である。工程 1 1 6 6 は、露光（すなわちリソグラフィ）によって、上記で記述した露光装置により、マスクの回路パターンをウエハの上に印刷する露光過程である。再び、上記で記述したように、本明細書で記述する干渉分光システムおよび方法を使用することにより、そのようなリソグラフィ工程の精度および分解能は向上する。

30

【 0 1 2 8 】

工程 1 1 6 7 は、露光ウエハを成長させる成長過程である。工程 1 1 6 8 は、成長レジスト像以外の部分を除去するエッチング過程である。工程 1 1 6 9 は、エッチング過程を施された後にウエハ上に残留しているレジスト材料を分離するレジスト分離過程である。これらの過程を反復することによって、回路パターンがウエハの上に形成され、重ね合わされる。

40

【 0 1 2 9 】

上記で記述した干渉分光システムは、物体の相対位置を正確に測定する必要がある他の応用分野において使用することも可能である。たとえば、基板またはビームが移動する際に、レーザ、x 線、イオン、または電子ビームなどの書込みビームが、基板の上にパターンをマーキングする応用分野では、干渉分光システムを使用して、基板と書込みビームとの相対運動を測定することが可能である。

【 0 1 3 0 】

50

例として、ビーム書込みシステム 1200 の概略図を図 8 に示す。ソース 1210 が、書込みビーム 1212 を生成し、ビーム集束部品 1214 が、放射ビームを、可動ステージ 1218 によって支持された基板 1216 に向ける。ステージの相対位置を決定するために、干渉分光システム 1220 が、基準ビーム 1222 を、ビーム集束部品 1214 の上に取り付けられたミラー 1224 に向け、測定ビーム 1226 を、ステージ 1218 の上に取り付けられたミラー 1228 に向ける。基準ビームが、ビーム集束部品の上に取り付けられたミラーに接触するので、ビーム書込みシステムは、列基準を使用するシステムの例である。干渉分光システム 1220 は、以前に記述した干渉分光システムのいずれかとすることが可能である。干渉分光システムによって測定された位置の変化は、基板 1216 上における書込みビーム 1212 の相対位置の変化に対応する。干渉分光システム 1220 は、基板 1216 上に置ける書込みビーム 1212 の相対位置を表す測定信号 1232 を制御装置 1230 に送信する。制御装置 1230 は、出力信号 1234 を、ステージ 1218 を支持および位置決めするベース 1236 に送信する。さらに、書込みビームが、基板の選択位置においてのみ光物理的变化または光化学的变化を生じるのに十分な強度で基板 1216 に接触するように、書込みビーム 1212 の強度を変化させるために、または書込みビーム 1212 を遮断するために、制御装置 1230 は、信号 1238 をソース 1210 に送信する。

10

【0131】

さらに、いくつかの例では、制御装置 1230 は、ビーム集束部品 1214 に、たとえば信号 1244 を使用して、基板の領域にわたって書込みビームを走査させることが可能である。その結果、制御装置 1230 は、基板をパターン化するように、システムの他の要素を誘導する。パターン化は、通常、制御装置に記憶されている電子設計パターンに基づく。いくつかの応用例では、書込みビームは、基板の上に被覆されたレジストをパターン化し、他の応用例では、書込みビームは、基板をエッチングするなど、直接パターン化する。

20

【0132】

そのようなシステムの重要な応用例は、以前に記述したリソグラフィ方法において使用されるマスクおよびレチクルの製造である。たとえば、リソグラフィ・マスクを製造するために、電子ビームを使用して、クロミウム被覆ガラス基板をパターン化することが可能である。書込みビームが電子ビームであるような場合には、ビーム書込みシステムは、電子ビーム経路を真空中に封入する。また、書込みビームが電子ビームまたはイオン・ビームなどである場合には、ビーム集束部品は、真空下において帯電粒子を基板上に集束させ、向けるための四重極レンズなどの電場生成装置を含む。書込みビームが x 線、UV、または可視光線の放射などの放射ビームである他の場合には、ビーム集束部品は、放射を基板に集束させ、向けるための対応する光学機器を含む。

30

【0133】

本明細書において記述したような単一通路干渉計および 1 つまたは 2 つの角度干渉計で構成された本発明の実施形態を使用して、ウエハ・ステージの上に配置された物体ミラーの本来の特性を作成することが可能である。これらの実施形態の記述は、本発明に援用する（一般に所有されている 2001 年 5 月 10 日出願の Henry Allen ヒル (Hill) の米国特許出願第 09/853,114 号明細書「IN-SITU MIRROR CHARACTERIZATION」参照）を有する一般的に所有されている米国特許出願のステージ上物体ミラーの本来の特性において動的干渉計の使用について与えた記述の対応する部分と同じである。

40

【0134】

他の実施形態では、受動ゼロ・シヤード干渉計をウエハ・ステージの上に配置し、物体ミラーをウエハ・ステージから離して配置することが可能である。

本発明のいくつかの実施形態について記述してきた。それにもかかわらず、本発明の精神および範囲から逸脱せずに、様々な修正を実施することが可能であることが理解されるであろう。したがって、他の実施形態は、以下の請求項の範囲内にある。

50

【図面の簡単な説明】

【0135】

【図1A】本発明の第1実施形態および第2実施形態の概略図。

【図1B】本発明の第1実施形態および第2実施形態の概略図。

【図1C】本発明の第1実施形態および第2実施形態の概略図。

【図2】本発明の第3実施形態の概略図。

【図3A】微分角変位干渉計の概略図。

【図3B】微分角変位干渉計の概略図。

【図4】角変位干渉計の概略図。

【図5A】他の角変位干渉計の概略図。

【図5B】他の角変位干渉計の概略図。

【図5C】他の角変位干渉計の概略図。

【図5D】他の角変位干渉計の概略図。

【図5E】他の角変位干渉計の概略図。

【図6】他の微分角変位干渉計の概略図。

【図7A】本明細書において記述し、かつ集積回路を作成するために使用される干渉分光システムを含むリソグラフィ・システムの概略図。

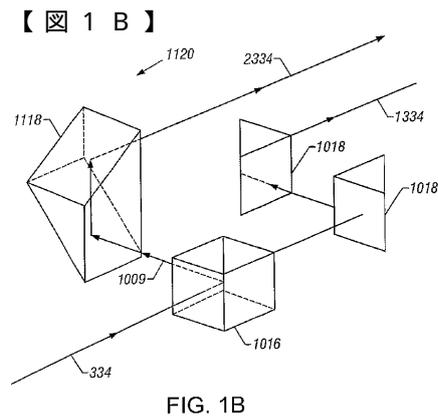
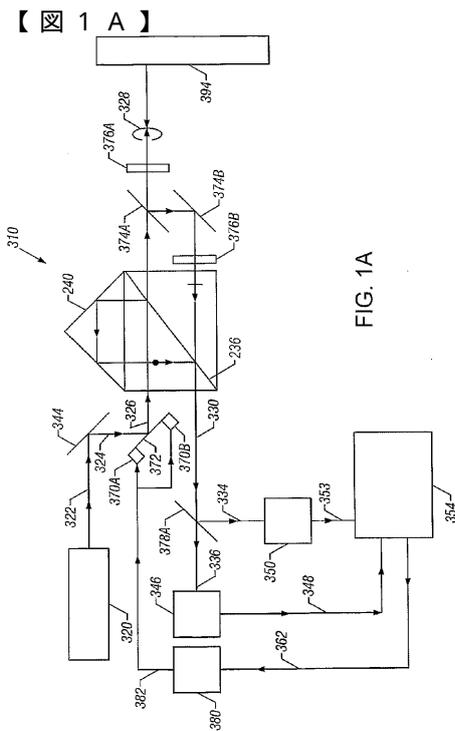
【図7B】集積回路を作成する工程を記述するフロー・チャート。

【図7C】集積回路を作成する工程を記述するフロー・チャート。

【図8】本明細書において記述する干渉分光システムを含むビーム書込みシステムの概略図。

10

20



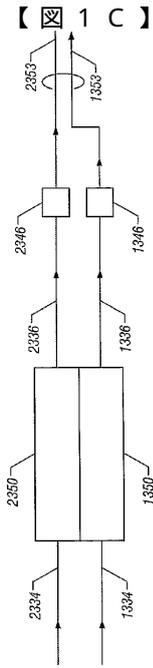


FIG. 1C

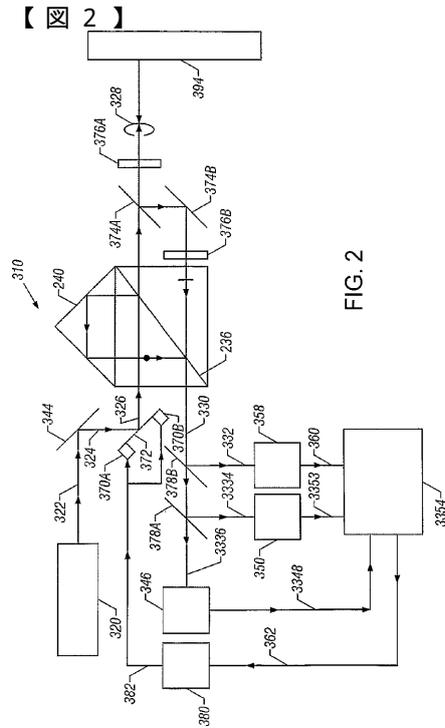


FIG. 2

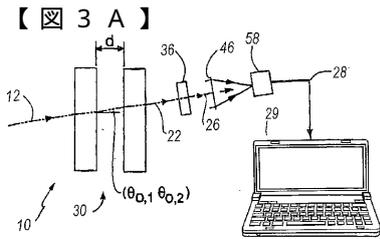


FIG. 3A

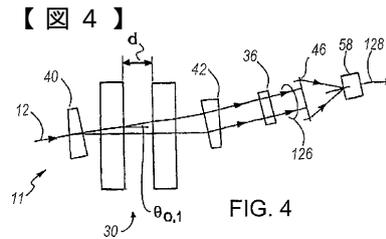


FIG. 4

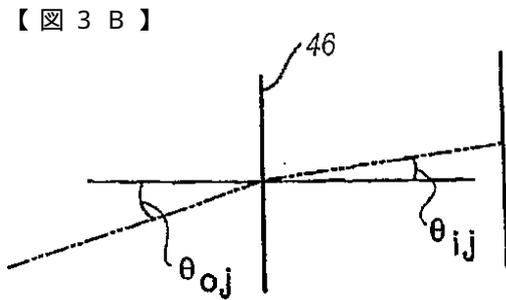


FIG. 3B

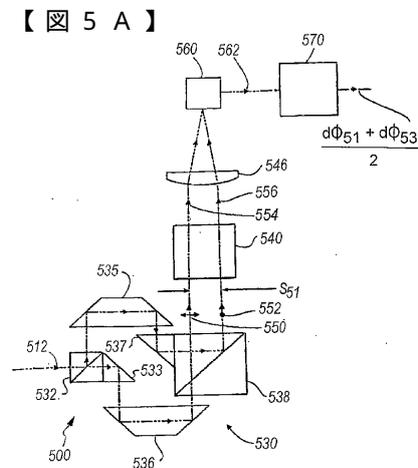


FIG. 5A

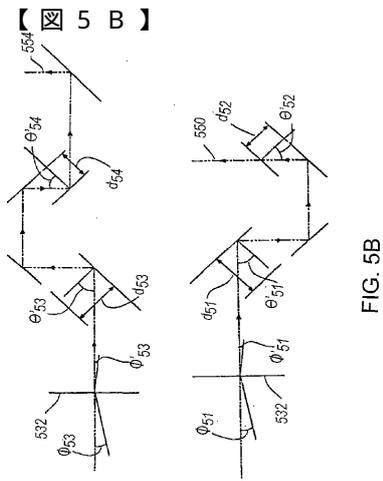


FIG. 5B

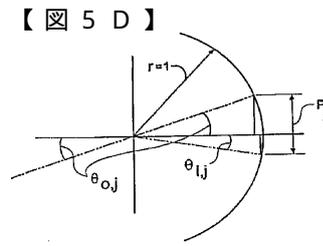


FIG. 5D

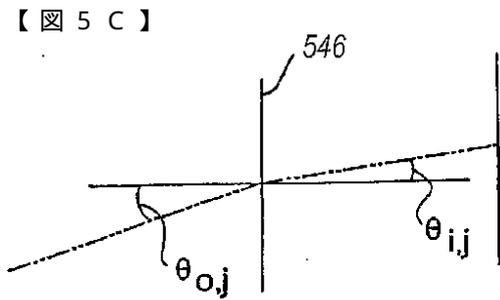


FIG. 5C

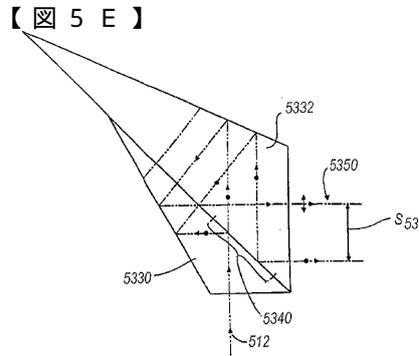


FIG. 5E

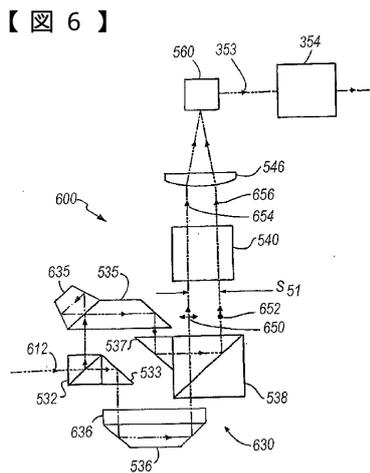


FIG. 6

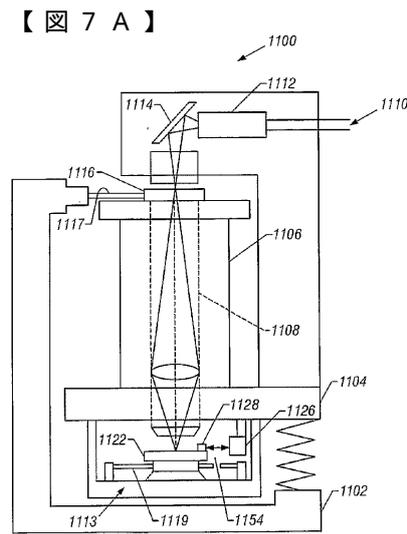


FIG. 7A

フロントページの続き

審査官 山下 雅人

(56)参考文献 国際公開第00/066969(WO, A1)
特開平05-087518(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B 9/00 - 11/30
H01L 21/027