

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-3590

(P2017-3590A)

(43) 公開日 平成29年1月5日(2017.1.5)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G O 1 B 11/00 (2006.01)	G O 1 B 11/00 G	2 F 0 6 4
G O 1 B 11/26 (2006.01)	G O 1 B 11/26 G	2 F 0 6 5
G O 1 B 11/24 (2006.01)	G O 1 B 11/24 D	
G O 1 B 9/02 (2006.01)	G O 1 B 9/02	

審査請求 有 請求項の数 24 O L 外国語出願 (全 38 頁)

(21) 出願番号	特願2016-117155 (P2016-117155)	(71) 出願人	502400304
(22) 出願日	平成28年6月13日 (2016. 6. 13)		ウルトラテック インク
(31) 優先権主張番号	62/175, 492		アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5
(32) 優先日	平成27年6月15日 (2015. 6. 15)		1 3 4 サンノゼ ザンカーロード 3 0
(33) 優先権主張国	米国 (US)		5 0
		(74) 代理人	100136319
			弁理士 北原 宏修
		(74) 代理人	100147706
			弁理士 多田 裕司
		(74) 代理人	100148275
			弁理士 山内 聡
		(74) 代理人	100142745
			弁理士 伊藤 世子

最終頁に続く

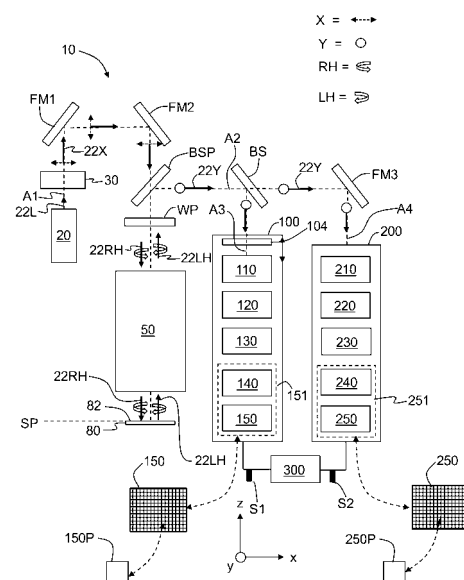
(54) 【発明の名称】 偏光系コヒーレント勾配検知システムおよび方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】鏡面反射表面の少なくとも一つの表面形状特性を測定するための偏光系コヒーレント勾配検知システムおよび方法を提供する。

【解決手段】試料表面 8 2 から第 1 の回転偏光レーザ光線 2 2 R H を反射して、表面形状情報を有する第 2 の回転偏光レーザ光線 2 2 L H を形成し、線形偏光反射レーザ光線 2 2 Y に変換し、線形偏光反射レーザ光線の第 1 の部分および第 2 の部分を、第 1 の中継アセンブリ 1 0 0 および第 2 の中継アセンブリ 2 0 0 へそれぞれ向ける。第 1 の中継アセンブリおよび第 2 の中継アセンブリは、軸上で離間した回折格子対 1 1 0、2 1 0 をそれぞれ使用し、回折格子対は、第 1 の画像センサ 1 5 0 および第 2 の画像センサ 2 5 0 のそれぞれにおいて、第 1 の干渉パターンおよび第 2 の干渉パターンをそれぞれ生成し、第 1 の画像センサおよび第 2 の画像センサからの第 1 の信号 S 1 および第 2 の信号 S 2 は、処理され、表面形状特性を決定する。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

鏡面反射面の少なくとも一つの形状に基づく特性を測定する方法であって、
第 1 の回転偏光を有するコリメートレーザ光線を試料表面へ向けることと、
前記試料表面から前記コリメートレーザ光線を反射させて、第 2 の回転偏光を有し、かつ、前記鏡面反射面の形状情報を含む反射レーザ光線を形成することと、
前記第 2 の回転偏光を有する反射レーザ光線を、線形偏光反射レーザ光線に変換することと、
前記線形偏光反射レーザ光線の第 1 の部分を、軸上で離間した第 1 の回折格子対であって、第 1 の方向を有し、2 つの第 1 の回折成分を形成する第 1 の回折格子対へ向け、前記 2 つの第 1 の回折成分を組み合わせて、第 1 の画像センサ上で第 1 の干渉パターンを形成することと、
前記線形偏光反射レーザ光線の第 2 の部分を、軸上で離間した第 2 の回折格子対であって、前記第 1 の方向に直交する第 2 の方向を有し、2 つの第 2 の回折成分を形成する第 2 の回折格子対へ向け、前記 2 つの第 2 の回折成分を組み合わせて、第 2 の画像センサ上で第 2 の干渉パターンを形成することと、
前記第 1 の干渉パターンおよび前記第 2 の干渉パターンを処理し、前記鏡面反射面の少なくとも一つの形状に基づく特性を決定することと
を備える方法。

10

【請求項 2】

20

前記線形偏光反射レーザ光線の第 1 の部分および第 2 の部分に向けることは、ビームスプリッタを使用して、前記線形偏光反射レーザ光線の第 1 の部分および第 2 の部分を、第 1 および第 2 の中継アセンブリへそれぞれ送ることを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記線形偏光された反射レーザ光線の第 1 の部分および第 2 の部分は、実質的に同じ強度を有する、請求項 1 または 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記コリメートレーザ光線に向けることは、レーザ源から初期レーザ光線を生成し、前記初期レーザ光線を第 1 の光線拡大器に通過させて、第 1 の拡大レーザ光線を形成し、その後光線拡大光学システムを通過させて、第 2 の拡大レーザ光線を形成することを含む、請求項 1 から 3 の何れか 1 項に記載の方法。

30

【請求項 5】

前記初期レーザ光線および前記第 1 の拡大レーザ光線は線形偏光され、前記第 1 の拡大レーザ光線を、 $1/4$ 波長遅延板に通して、回転偏光コリメートレーザ光線を形成することを含む、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

前記第 2 の回転偏光を有する反射レーザ光線を、線形偏光反射レーザ光線に変換することは、前記反射レーザ光線を、前記 $1/4$ 波長遅延板に通すことを含む、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

40

前記 2 つの第 1 の回折成分を組み合わせることは、前記 2 つの第 1 の回折成分を、第 1 の中継レンズシステムを用いて第 1 のフーリエ開口部に通すことを含む、

前記 2 つの第 2 の回折成分を組み合わせることは、前記 2 つの第 2 の回折成分を、第 2 の中継レンズシステムを用いて第 2 のフーリエ開口部に通すことを含む、
請求項 1 から 6 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 8】

第 1 の回転偏光を有する前記コリメートレーザ光線は、 300 mm と 450 mm との間の径を有する、請求項 1 から 7 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 9】

前記コリメートレーザ光線は、ヘリウム - ネオンレーザによって放射された初期レーザ

50

光線から形成される、請求項 1 から 8 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 10】

軸上で離間した第 1 および第 2 の回折格子対は、それぞれ位相格子で構成される、請求項 1 から 9 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 11】

前記線形偏光反射レーザ光線の第 1 の部分の第 1 の倍率を制御することと、前記線形偏光反射レーザ光線の第 2 の部分の第 2 の倍率を制御することを含み、これにより、前記第 1 の画像センサに形成された前記第 1 の干渉パターンは、前記第 2 の画像センサに形成された前記第 2 の干渉パターンと同じ大きさを有する、請求項 1 から 10 の何れか 1 項に記載の方法。

10

【請求項 12】

前記第 1 の画像センサは、第 1 の画素を有するとともに、第 1 のカメラレンズと組み合わされて第 1 のカメラを形成し、

前記第 2 の画像センサは、第 2 の画素を有するとともに、第 2 のカメラレンズと組み合わされて第 2 のカメラを形成し、

前記第 1 のカメラと前記第 2 のカメラのそれぞれは、多軸位置制御機能を有し、前記試料表面と、前記第 1 の画像センサの第 1 の画素および第 2 の画像センサの第 2 の画素との間で、表面对センサの画素マッチングを実行する、請求項 1 から 11 の何れか 1 項に記載の方法。

20

【請求項 13】

前記少なくとも一つの形状に基づく特性は、前記試料表面における 2 つの位置間の高低差、傾斜、および曲率を含む、請求項 1 から 12 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 14】

前記 2 つの第 1 の回折成分を、調整可能な大きさおよび調整可能な軸位置を有する第 1 の可調開口部へ向けることと、

前記 2 つの第 2 の回折成分を、調整可能な大きさおよび調整可能な軸位置を有する第 2 の可調開口部へ向けることと、

前記第 1 および第 2 の可調開口部の大きさおよび軸位置の少なくとも一つを調整して、2 つの第 1 の回折次数以外の回折次数、および、2 つの第 2 の回折次数以外の回折次数をそれぞれ遮断すること

30

をさらに備える、請求項 1 から 13 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 15】

鏡面反射表面を有する試料の少なくとも一つの形状に基づく特性を測定するシステムであって、

レーザ源と、偏光ビームスプリッタと、波長板と、光線拡大光学システムと、ビームスプリッタと、第 1 の中継アセンブリと、第 2 の中継アセンブリと、プロセッサとを含み、

前記レーザ源は、第 1 の線形偏光レーザ光線を放射し、

前記偏光ビームスプリッタは、前記第 1 の線形偏光レーザ光線を通過させるように配置され、

前記波長板は、前記偏光ビームスプリッタを通過した前記第 1 の線形偏光レーザ光線を通過させるように配置され、第 1 の回転偏光レーザ光線を形成し、

40

前記光線拡大光学システムは、前記第 1 の回転偏光レーザ光線を受光し、この第 1 の回転偏光レーザ光線を試料表面に向け、反射レーザ光線を形成し、前記反射レーザ光線は、第 2 の回転偏光を有し、前記試料表面に関する形状情報を含み、ここで、前記反射レーザ光線は、前記光線拡大光学システムを出射し、前記波長板を通過するとともに、前記偏光ビームスプリッタから反射し、第 2 の線形偏光レーザ光線を形成し、

前記ビームスプリッタは、前記第 2 の線形偏光レーザ光線の第 1 の部分および第 2 の部分をそれぞれ通過させて、反射し、

前記第 1 の中継アセンブリは、前記第 2 の線形偏光レーザ光線の第 1 の部分を受光し、軸上で離間した第 1 の回折格子対へ向け、前記第 1 の回折格子対は、第 1 の方向を有し、

50

2つの第1の回折成分を形成し、ここで、前記2つの第1の回折成分は組み合わせられ、第1の画像センサ上で第1の干渉パターンを形成し、

前記第2の中継アセンブリは、前記第2の線形偏光レーザ光線の第2の部分を受光し、軸上で離間した第2の回折格子対へ向け、前記第2の回折格子対は、第2の方向を有し、2つの第2の回折成分を形成し、ここで、前記2つの第2の回折成分は組み合わせられ、第2の画像センサ上で第2の干渉パターンを形成し、

前記プロセッサは、前記第1干渉パターンおよび前記第2の干渉パターンを処理するように構成され、前記鏡面反射面を有する試料の少なくとも一つの形状に基づく特性を決定する、

システム。

10

【請求項16】

前記少なくとも一つの形状に基づく特性は、前記試料表面における2つの位置間の高低差、傾斜、および曲率を含む、請求項15に記載のシステム。

【請求項17】

前記試料表面は径を有し、前記光線拡大光学システムは、前記第1の回転偏光レーザ光線を拡大し、拡大されたレーザ光線の径が、前記試料表面の径以上の径を有するように構成される、請求項15または16に記載のシステム。

【請求項18】

軸上で離間した前記第1の回折格子対および前記第2の回折格子対は、ホログラフィー回折格子によってそれぞれ形成されている、請求項15から17の何れか1項に記載のシステム。

20

【請求項19】

前記第1の中継アセンブリおよび前記第2の中継アセンブリは、可変倍率をそれぞれ有する、請求項15から18の何れか1項に記載のシステム。

【請求項20】

前記第1の中継アセンブリは補償板を含む、請求項15から19の何れか1項に記載のシステム。

【請求項21】

光線拡大器をさらに備え、前記光線拡大器は、前記レーザ源と前記偏光ビームスプリッタとの間に動作可能に配置され、第1の線形偏光レーザ光線を拡大するように構成される、請求項15から20の何れか1項に記載のシステム。

30

【請求項22】

前記ビームスプリッタは、50:50ビームスプリッタである、請求項15から21の何れか1項に記載のシステム。

【請求項23】

第1のカメラレンズと、第2のカメラレンズとをさらに備え、

前記第1のカメラレンズは、前記第1の画像センサとともに第1のカメラを規定し、前記第1の画像センサは、第1の画素を有し、

前記第2のカメラレンズは、前記第2の画像センサとともに第2のカメラを規定し、前記第2の画像センサは、第2の画素を有し、

40

前記第1のカメラと前記第2のカメラのそれぞれは、多軸位置制御機能を有し、前記試料表面と、前記第1の画像センサの第1の画素および第2の画像センサの第2の画素との間で、表面对センサの画素マッチングを実行する、

請求項15から22の何れか1項に記載のシステム。

【請求項24】

第1の可調開口部と、第2の可調開口部とをさらに備え、

前記第1の可調開口部は、前記第1の中継アセンブリにおいて、前記第1の画像センサと、軸上で離間した前記第1の回折格子対との間に配置され、前記第1の可調開口部は、調整可能な大きさおよび調整可能な軸位置を有し、

前記第2の可調開口部は、前記第2の中継アセンブリにおいて、前記第2の画像センサ

50

と、軸上で離間した前記第 2 の回折格子対との間に配置され、前記第 2 の可調開口部は、調整可能な大きさおよび調整可能な軸位置を有する、請求項 15 から 23 の何れか 1 項に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、光学干渉に関し、具体的には、コヒーレント勾配検知に関し、より具体的には、偏光系コヒーレント勾配検知システムおよび方法に関する。

【0002】

10

本明細書中で言及されたあらゆる刊行物または特許文献の全体的な開示は、参照により組み込まれる。特許文献には、米国特許第 3,829,219 号、米国特許第 5,526,116 号、および米国特許第 6,031,611 号が含まれる。刊行物には、M. P. Rimmer らによる「可変のせん断を有する側方せん断干渉測定装置を用いた大収差の評価」(App. Opt., Vol. 14, No. 1, 第 142 - 150 頁、1975 年 1 月)、および Schreiber らによる「連続した 2 つのロンチ位相勾配系側方せん断干渉測定装置」(App. Opt., Vol. 36, No. 22, 第 5321 - 5324 頁、1997 年 8 月)が含まれる。

【背景技術】

【0003】

20

コヒーレント勾配検知 (CGS) は、表面の形状に基づく一つ以上の特性 (例えば、高さ、傾斜、および曲率) を測定するために使用される干渉法である。CGS 法は、光学プローブとしてコリメートコヒーレント光線を使用し、本質的にあらゆる材料で形成された鏡面反射面を示す形状情報を得る。鏡面反射面が平坦ではないとき、反射プローブ光線の波面は歪む。これにより、反射プローブ光線は、測定下での表面形状に関連付けられた光路差または位相変化を獲得する。

【0004】

互いに離間した 2 つの回折格子は、反射プローブ光線の光路中に配置され、測定により歪み波面を操作する。第 1 の回折格子は、反射プローブ光線を回折し、異なる次数の回折成分に空間的に分離する。第 2 の回折格子は、第 1 の回折格子によって形成された各回折成分をさらに回折させる。第 2 の回折格子に対して配置された光学要素 (例えば、レンズ) は、第 1 の回折格子によって形成された 2 つの異なる回折成分を回折させることによって、第 2 の回折格子によって形成された 2 つの任意の回折成分を組み合わせる。2 つの任意の回折成分は、互いに干渉し、干渉パターンを形成する。この 2 つの回折格子による回折は、2 つの任意の回折成分間で相対的な空間変位を生じさせる。この空間変位は、せん断距離と呼ばれる。干渉パターンは、反射面での 2 つの位置間の個々の高低差を抽出することを可能にする情報を含んでいる。この 2 つの位置は、せん断距離によって分離される。これらの高低差は、局所表面勾配として解釈され得る。そして、局所表面勾配はさらに処理され、数値積分法によるトポグラフィ情報または数値微分法による曲率情報を得ることができる。

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

現在の CGS システムが発展しているにもかかわらず、CGS システムに対し、試料表面のより改良された測定法を提供することへの要望が高まってきている。この要望には、より幅広い測定応用に関してより高い測定機能を提供するために、測定ノイズを減少させること、解像度をより高めることなどが含まれる。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本開示の一局面は、鏡面反射面の少なくとも一つの形状に基づく特性を測定する方法で

50

ある。この方法は、第 1 の回転偏光を有するコリメートレーザ光線を試料表面へ向けることと、前記試料表面から前記コリメートレーザ光線を反射させて、第 2 の回転偏光を有し、かつ、前記鏡面反射面の形状情報を含む反射レーザ光線を形成することと、前記第 2 の回転偏光を有する反射レーザ光線を、線形偏光反射レーザ光線に変換することと、前記線形偏光反射レーザ光線の第 1 の部分を、軸上で離間した第 1 の回折格子対であって、第 1 の方向を有し、2 つの第 1 の回折成分を形成する第 1 の回折格子対へ向け、前記 2 つの第 1 の回折成分を組み合わせて、第 1 の画像センサ上で第 1 の干渉パターンを形成することと、前記線形偏光反射レーザ光線の第 2 の部分を、軸上で離間した第 2 の回折格子対であって、前記第 1 の方向に直交する第 2 の方向を有し、2 つの第 2 の回折成分を形成する第 2 の回折格子対へ向け、前記 2 つの第 2 の回折成分を組み合わせて、第 2 の画像センサ上で第 2 の干渉パターンを形成することと、前記第 1 の干渉パターンおよび前記第 2 の干渉パターンを処理し、前記鏡面反射面の少なくとも一つの形状に基づく特性を決定することとを備える。

10

【0007】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記線形偏光反射レーザ光線の第 1 の部分および第 2 の部分に向けることは、ビームスプリッタを使用して、前記線形偏光反射レーザ光線の第 1 の部分および第 2 の部分を、第 1 および第 2 の中継アセンブリへそれぞれ送信することを含む。

【0008】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記線形偏光反射レーザ光線の第 1 の部分および第 2 の部分は、実質的に同じ強度を有する。

20

【0009】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記コリメートレーザ光線に向けることは、レーザ源から初期レーザ光線を生成し、前記初期レーザ光線を第 1 の光線拡大器に通過させて、第 1 の拡大レーザ光線を形成し、その後光線拡大光学システムを通過させて、第 2 の拡大レーザ光線を形成することを含む。

【0010】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記初期レーザ光線および前記第 1 の拡大レーザ光線は線形偏光され、前記第 1 の拡大レーザ光線を、 $1/4$ 波長遅延板に通して、回転偏光コリメートレーザ光線を形成することを含む。

30

【0011】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記第 2 の回転偏光を有する反射レーザ光線を、線形偏光反射レーザ光線に変換することは、前記反射レーザ光線を、前記 $1/4$ 波長遅延板に通すことを含む。

【0012】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記 2 つの第 1 の回折成分を組み合わせることは、前記 2 つの第 1 の回折成分を、第 1 の中継レンズシステムを用いて第 1 のフーリエ開口部に通すことを含み、前記 2 つの第 2 の回折成分を組み合わせることは、前記 2 つの第 2 の回折成分を、第 2 の中継レンズシステムを用いて第 2 のフーリエ開口部に通すことを含む。

40

【0013】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、第 1 の回転偏光を有する前記コリメートレーザ光線は、 300 mm と 450 mm との間の径を有する。

【0014】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記コリメートレーザ光線は、ヘリウム - ネオンレーザによって放射された初期レーザ光線から形成される。

【0015】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、軸上で離間した第 1 および第 2 の回折格子対は、それぞれ位相格子で構成される。

【0016】

50

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記線形偏光反射レーザ光線の第1の部分の第1の倍率を制御することと、前記線形偏光反射レーザ光線の第2の部分の第2の倍率を制御することを含み、これにより、前記第1の画像センサに形成された前記第1の干渉パターンは、前記第2の画像センサに形成された前記第2の干渉パターンと同じ大きさを有する。

【0017】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記第1の画像センサは、第1の画素を有するとともに、第1のカメラレンズと組み合わせられて第1のカメラを形成し、前記第2の画像センサは、第2の画素を有するとともに、第2のカメラレンズと組み合わせられて第2のカメラを形成し、前記第1のカメラと前記第2のカメラのそれぞれは、多軸位置制御機能

10

【0018】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記少なくとも一つの形状に基づく特性は、前記試料表面における2つの位置間の高低差、傾斜、および曲率を含む。

【0019】

本開示の他の局面は、上述の方法であって、前記2つの第1の回折成分を、調整可能な大きさおよび調整可能な軸位置を有する第1の可調開口部へ向けることと、前記2つの第2の回折成分を、調整可能な大きさおよび調整可能な軸位置を有する第2の可調開口部へ向けることと、前記第1および第2の可調開口部の大きさおよび軸位置の少なくとも一つを調整して、2つの第1の回折次数以外の回折次数、および、2つの第2の回折次数以外の回折次数をそれぞれ遮断（ブロック）することをさらに備える。

20

【0020】

本開示の他の局面は、鏡面反射表面を有する試料の少なくとも一つの形状に基づく特性を測定するシステムである。このシステムは、レーザ源と、偏光ビームスプリッタと、波長板と、光線拡大光学システムと、ビームスプリッタと、第1の中継アセンブリと、第2の中継アセンブリと、プロセッサとを含む。レーザ源は、第1の線形偏光レーザ光線を放射する。偏光ビームスプリッタは、前記第1の線形偏光レーザ光線を通過させるように配置される。波長板は、前記偏光ビームスプリッタを通過した前記第1の線形偏光レーザ光線を送信するように配置され、第1の回転偏光レーザ光線を形成する。光線拡大光学システムは、前記第1の回転偏光レーザ光線を受光し、この第1の回転偏光レーザ光線を試料表面に向け、反射レーザ光線を形成する。反射レーザ光線は、第2の回転偏光を有し、前記試料表面に関する形状情報を含む。ここで、前記反射レーザ光線は、前記光線拡大光学システムを出射し、前記波長板を通過する。また、前記反射レーザ光線は、前記偏光ビームスプリッタから反射し、第2の線形偏光レーザ光線を形成する。ビームスプリッタは、前記第2の線形偏光レーザ光線の第1の部分および第2の部分をそれぞれ通過させて、反射する。第1の中継アセンブリは、第2の線形偏光されたレーザ光線の第1の部分を受光し、軸上で離間した第1の回折格子対へ向ける。第1の回折格子対は、第1の方向を有し、2つの第1の回折成分を形成する。ここで、前記2つの第1の回折成分は組み合わせられ、第1の画像センサ上で第1の干渉パターンを形成する。第2の中継アセンブリは、前記第2の線形偏光レーザ光線の第2の部分を受光し、軸上で離間した第2の回折格子対へ向ける。第2の回折格子対は、第2の方向を有し、2つの第2の回折成分を形成する。ここで、前記2つの第2の回折成分は組み合わせられ、第2の画像センサ上で第2の干渉パターンを形成する。プロセッサは、前記第1干渉パターンおよび前記第2の干渉パターンを処理するように構成され、前記鏡面反射面を有する試料の少なくとも一つの形状に基づく特性を決定する。

30

40

【0021】

本開示の他の局面は、上述のシステムであり、前記少なくとも一つの形状に基づく特性は、前記試料表面における2つの位置間の高低差、傾斜、および曲率を含む。

【0022】

50

本開示の他の局面は、上述のシステムであって、前記試料表面は径を有し、前記光線拡大光学システムは、前記第 1 の回折格子対の回折格子対を拡大し、拡大された回折格子対の径が、前記試料表面の径以上の径を有するように構成される。

【0023】

本開示の他の局面は、上述のシステムであって、軸上で離間した前記第 1 の回折格子対および前記第 2 の回折格子対は、ホログラフィー回折格子によってそれぞれ形成されている。

【0024】

本開示の他の局面は、上述のシステムであって、前記第 1 の中継アセンブリおよび前記第 2 の中継アセンブリは、可変倍率をそれぞれ有する。

10

【0025】

本開示の他の局面は、上述のシステムであって、前記第 1 の中継アセンブリは、補償ビームスプリッタを含む。

【0026】

本開示の他の局面は、上述のシステムであって、光線拡大器をさらに備える。光線拡大器は、前記レーザ源と前記偏光ビームスプリッタとの間に動作可能に配置され、第 1 の線形偏光レーザ光線を拡大するように構成される。

【0027】

本開示の他の局面は、上述のシステムであって、前記ビームスプリッタは、50 : 50 ビームスプリッタである。

20

【0028】

本開示の他の局面は、上述のシステムであって、第 1 のカメラレンズと、第 2 のカメラレンズとをさらに備える。第 1 のカメラレンズは、前記第 1 の画像センサとともに第 1 のカメラを規定する。前記第 1 の画像センサは、第 1 の画素を有する。第 2 のカメラレンズは、前記第 2 の画像センサとともに第 2 のカメラを規定する。前記第 2 の画像センサは、第 2 の画素を有する。前記第 1 のカメラと前記第 2 のカメラのそれぞれは、多軸位置制御機能を有し、前記試料表面と、前記第 1 の画像センサの第 1 の画素および第 2 の画像センサの第 2 の画素との間で、表面对センサの画素マッチング（適合）を実行する。

【0029】

本開示の他の局面は、上述のシステムであって、第 1 の可調開口部と、第 2 の可調開口部とをさらに備える。第 1 の可調開口部は、前記第 1 の中継アセンブリにおいて、前記第 1 の画像センサと、軸上で離間した前記第 1 の回折格子対との間に配置される。第 1 の可調開口部は、調整可能な大きさおよび調整可能な軸位置を有する。第 2 の可調開口部は、前記第 2 の中継アセンブリにおいて、前記第 2 の画像センサと、軸上で離間した前記第 2 の回折格子対との間に配置される。第 2 の可調開口部は、調整可能な大きさおよび調整可能な軸位置を有する。

30

【0030】

さらなる特徴点及び利点は、以下の詳細な説明に明記される。また、それらの一部は詳細な説明の記載内容から当業者にとって直ちに明白となるか、詳細な説明、特許請求の範囲、添付図面に記載された実施形態を実施することによって認識されるであろう。上記の概要及び下記の詳細な説明に関する記載は、単なる例示であって、特許請求の範囲に記載されている本発明の本質及び特徴を理解するための概略または枠組みを提供するものであることを理解すべきである。

40

【図面の簡単な説明】

【0031】

添付図面は、さらなる理解を提供するために含まれており、本明細書の一部を構成すると共に本明細書の一部に組み込まれる。図面は、1 または複数の実施形態を示しており、詳細な説明と共に種々の実施形態の原理や動作を説明する役割を担う。このように、本開示は、添付図面と共に以下に示す詳細な説明からより完全に理解されることになるであろう。

50

【図 1】図 1 は、本開示による偏光系 C G S システムの一例の模式図である。

【図 2】図 2 は、図 1 に示す偏光系 C G S システムの一例の光学模式図である。

【図 3】図 3 は、図 2 に示す偏光系 C G S システムの 3 次元キャド (C A D) 図面である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 3 2 】

以降、本開示の様々な実施形態、および、添付の図面に示される複数の例について詳述する。可能な限り、同一または類似の部分の図では、同一または類似の参照番号および参照符号が用いられる。図面には決まった縮尺がなく、当業者であれば、図面は本発明の主要な部分を説明するために簡略化されていることに気づくであろう。

10

【 0 0 3 3 】

下記の特許請求の範囲の記載は、発明の詳細な説明に組み込まれると共にその一部を構成する。

【 0 0 3 4 】

いくつかの図面において、参考のためにデカルト座標が描かれているが、これは方向および配置位置を限定するものではない。

【 0 0 3 5 】

図 1 は、本開示による偏光系 C G S システム (「システム」) 1 0 の一例の模式図である。システム 1 0 は、レーザ源 2 0 を含む。レーザ源 2 0 は、例として、 「 X 」 偏光を示す破線の双方向矢印で示すように、第 1 の光軸 A 1 に沿って線形偏光レーザ光線 2 2 L を出射する。システム 1 0 は、光線拡大器 3 0 、 2 つの折り返しミラー F M 1 および F M 2 、および偏光ビームスプリッタ B S P を含む。偏光ビームスプリッタ B S P は、第 2 の光軸 A 2 を規定する。システム 1 0 は、第 1 の光軸 A 1 に沿って、波長板 W P 、および光線拡大光学システム 5 0 を含む。光線拡大光学システム 5 0 は、試料 8 0 に隣接して配置される。試料 8 0 は、測定対象となる形状を持つ表面 8 2 を有する。一例では、試料 8 0 の表面 8 2 は、鏡面反射表面である。また一例では、上記形状は、例えば、単純な放物線形状の曲面だけでなく、比較的複雑な形状を有し得る。一例では、システム 1 0 は、測定される試料 8 0 の表面 8 2 の少なくとも一つの形状に基づく特性を測定する。形状に基づく特性は、例えば、2 つの位置の高低差、一つ以上の位置における傾斜、および曲率などである。

20

30

【 0 0 3 6 】

またシステム 1 0 は、第 2 の光軸 A 2 に沿って第 2 のビームスプリッタ B S を含む。第 2 のビームスプリッタ B S は、第 3 の光軸 A 3 を規定する。第 3 の光軸 A 3 は、第 1 の中継アセンブリ 1 0 0 に存在する。折り返しミラー F M 3 も、第 2 の光軸 A 2 に沿って存在し、第 4 の光軸 A 4 を規定する。第 4 の光軸 A 4 は、第 2 の中継アセンブリ 2 0 0 に存在する。第 1 の中継アセンブリ 1 0 0 および第 2 の中継アセンブリ 2 0 0 は、第 1 の干渉計アームおよび第 2 の干渉計アームを規定する。第 1 の中継アセンブリ 1 0 0 および第 2 の中継アセンブリ 2 0 0 により、x 方向および y 方向 (または、より一般的には、任意の 2 つの方向) における表面形状情報を同時に収集することができる。これにより、より高度な測定スループットおよび単純化されたシステムが実現される。このシステムにおいては、単一アームの先行のシステムと比較して、移動部材の個数が減少または削減される。第 1 の中継アセンブリ 1 0 0 および第 2 の中継アセンブリ 2 0 0 のそれぞれは、対応するデータセットを生成する。このデータセットは、試料 8 0 の表面 8 2 の一つ以上の形状に基づくパラメータを決定するために使用される。2 つの完全なデータセットは、冗長性をもたらす (すなわち、表面形状復元が過剰決定される) 。これにより、例えば、 「 悪い (粗悪な) 」 画素を切り捨てる、あるいは、 「 悪い (粗悪な) 」 画素の重みを減少させることによって、測定信頼性の改善および誤差の最小化が可能となる。

40

【 0 0 3 7 】

図 2 は、図 1 のシステム 1 0 のより詳細な光学模式図である。また、図 3 は、システム 1 0 の 3 次元キャド (C A D) 図面である。一例の光線拡大光学システム 5 0 は、第 1 の

50

光軸 A 1 に沿って順に、複レンズ 5 2、正メニスカスレンズ 5 4、および平凸レンズ 5 6 を含む。第 1 の中継アセンブリ 1 0 0 は、第 3 の光軸 A 3 に沿って、補償板 1 0 4、第 1 の回折格子対 1 1 0 (x 軸に平行なせん断距離) および第 1 の中継レンズシステム 1 2 0、第 1 のフーリエ環状開口部 1 3 0、第 1 のカメラレンズ 1 4 0、並びに、第 1 の画像センサ 1 5 0 を含む。第 1 の画像センサ 1 5 0 は、第 1 の画素 1 5 0 P を含む (図 1 における左端の拡大挿入図参照)。第 1 のカメラレンズ 1 4 0 および第 1 の画像センサ 1 5 0 は、第 1 のカメラ 1 5 1 を規定する。

【0038】

第 2 の中継アセンブリ 2 0 0 は、第 4 の光軸 A 4 に沿って、第 2 の回折格子対 2 1 0 (y 軸に平行なせん断距離)、第 2 の中継レンズシステム 2 2 0、第 2 のフーリエ環状開口部 2 3 0、第 2 のカメラレンズ 2 4 0、並びに、第 2 の画像センサ 2 5 0 を含む。第 2 の画像センサ 2 5 0 は、第 2 の画素 2 5 0 P を含む (図 1 における右端の拡大挿入図参照)。第 2 のカメラレンズ 2 4 0 および第 2 の画像センサ 2 5 0 は、第 2 のカメラ 2 5 1 を規定する。

【0039】

第 1 の画像センサ 1 5 0 および第 2 の画像センサ 2 5 0 は、プロセッサ 3 0 0 に電氣的に接続されている。

【0040】

システム 1 0 の動作の一例では、レーザ源 2 0 は、線形偏光レーザ光線 2 2 L を出射する。線形偏光レーザ光線 2 2 L は、比較的小さな (例えば、1 mm) の初期レーザ径を有する。線形偏光レーザ光線 2 2 L は、光線拡大器 3 0 によって受光される。光線拡大器 3 0 は、例えば 5 0 倍 (5 0 ×) から 2 0 0 倍 (2 0 0 ×) の間、具体的には約 8 0 mm の径にまで、線形偏光レーザ光線 2 2 L を拡大する。折り返しミラー F M 1 および F M 2 は、偏光ビームスプリッタ B S P を通る線形偏光レーザ光線 2 2 X を、波長板 W P へ向ける。偏光ビームスプリッタ B S P は偏光しており、線形偏光レーザ光線 2 2 X の強度を最大化するように配列され、送信中にレーザ光線 2 2 X を通過させる。一方、背面で反射された未使用のレーザ光線の強度を最小化する。波長板 W P は、結晶石英の 1 / 4 波長遅延板で構成される。波長板 W P によって、線形偏光レーザ光線 2 2 X から回転偏光レーザ光線 2 2 R H が形成される。回転偏光レーザ光線 2 2 R H は、例えば、右偏波レーザ光線である。この回転偏光されたレーザ光線 2 2 R H は、左偏波レーザ光線として形成されてもよい。

【0041】

右偏波レーザ光線 2 2 R H は、光線拡大光学システム 5 0 に入射する。光線拡大光学システム 5 0 は、右偏波レーザ光線 2 2 R H を受光し、右偏波レーザ光線 2 2 R H の大きさを拡大するように構成される。一例では、光線拡大量は、4 倍であり、例えば、8 0 mm 径から 3 2 0 mm 径に拡大される。拡大された右偏波光線 2 2 R H は、実質的なコリメートレーザ光線として試料 8 0 の表面 8 2 に入射する。試料 8 0 の表面 8 2 は、試料面 S P に存在する。ここで、光線拡大量は、試料 8 0 の大きさに基づいて選択されることに着目すべきである。したがって、4 5 0 mm 径のウエハの場合は、光線拡大器 3 0 および光線拡大光学システム 5 0 に関して異なる光線拡大量が用いられる。これにより、任意のサイズ (例えば、任意の径) を有する右偏波レーザ光線 2 2 R H が得られる。

【0042】

コリメート右偏波レーザ光線 2 2 R H は、試料 8 0 の表面 8 2 から反射し、その回転偏光が左回りに反転される。これにより、左偏波レーザ光線 2 2 L H が規定される。左偏波レーザ光線 2 2 L H は、ウエハ表面歪み $2 X' (x, y) \& 2 Y' (x, y)$ 傾斜分配の 2 倍の 3 次元歪み $2 \cdot \Delta Z (x, y)$ に等しい反射波面誤差を有する。左偏波レーザ光線 2 2 L H は、光線拡大光学システム 5 0 を通って戻り、波長板 W P を通過する。波長板 W P は、左偏波レーザ光線 2 2 L H を変換して、Y 方向への線形偏光を持たせる。すなわち、線形偏光レーザ光線 2 2 Y を形成する。線形偏光レーザ光線 2 2 Y は、8 倍のウエハ表面傾斜分配 (すなわち、 $8 X' (x, y)$ および $8 Y' (x, y)$) を有する 4 倍に減少

10

20

30

40

50

された（１／４に減少した）レーザ光線（例えば、８０mm径の光線）として、光線拡大光学システム５０の入射端を出射する。

【００４３】

線形偏光レーザ光線２２Ｙは、その後、偏光ビームスプリッタＢＳＰに誘導され、第１の中継アセンブリ１００および第２の中継アセンブリ２００へ導かれる。偏光ビームスプリッタＢＳＰは、第２のビームスプリッタＢＳに入射する、線形偏光反射レーザ光線２２Ｙを最大化するように配列される。第２のビームスプリッタＢＳは、光の一部を透過させ、光の一部を反射する。第２のビームスプリッタＢＳは、例えば、５０：５０ビームスプリッタである。したがって、線形偏光レーザ光線２２Ｙの半分は、第３の光軸Ａ３に沿って進み、第１の中継アセンブリ１００を通るように向けられる。一方、線形偏光レーザ光線２２Ｙの他の半分は、折り返しミラーＦＭ３によって方向付けられ、第２の中継アセンブリ２００の方へ向けられる。ここで、偏光ビームスプリッタＢＳＰは、偏光ビームスプリッタであることに着目すべきである。偏光ビームスプリッタは、それぞれの偏光において１００％に近い偏光効率で、Ｘ偏光光およびＹ偏光光を反射する。これにより、レーザ光線強度が実際に分割される光路中の唯一の位置は、第２のビームスプリッタＢＳの位置となる。そのため、第１の中継アセンブリ１００および第２の中継アセンブリ２００は、それぞれ比較的小さな光学損失を差し引いて、システム１０を通して進むレーザ光線の実質的に半分の光を受光する。この光学損失は、（例えば、光線拡大光学システム５０におけるレンズ要素表面などの）種々の光学界面における反射に起因して発生する。

10

20

【００４４】

線形偏光レーザ光線２２Ｙの一部は、第１の中継アセンブリ１００を進む。そして、線形偏光レーザ光線２２Ｙの一部は、補償板１０４を通過する。補償板１０４は、余剰の光路を相殺する。この余剰の光路は、線形偏光レーザ光線２２Ｙが第２のビームスプリッタＢＳを通過して第２の中継アセンブリ２００に到達するとき、もたらされる。補償板１０４に加えて、第１の中継アセンブリ１００および第２の中継アセンブリ２００は、物理学的に配置される。これにより、第２のビームスプリッタＢＳと第１の中継アセンブリ１００の第１の回折格子対１１０との間の光学距離の総量、および、第２のビームスプリッタＢＳと第２の中継アセンブリ２００の第２の回折格子対２１０との間の光学距離の総量は、同一となる。線形偏光レーザ光線２２Ｙは、補償板１０４を通過し、その後第１の回折格子対１１０に到達する。一例では、第１の回折格子対１１０は、様々な距離に離間し、かつ平行なロンチ格子対または回折格子対である。線形偏光レーザ光線２２Ｙは、第１の回折格子対１１０によって、異なる相対強度で、種々の次数：０次、±１次、±２次などに回折される。

30

40

【００４５】

回折格子対１１０から出射する光には、興味の対象となる２つの光線成分が存在する。それは、第１の回折格子対１１０からの０次成分および＋１次成分と、第２の回折格子対２１０からの＋１次成分および０次成分である。回折格子対１１０および２１０における２つの回折による回折次数の異なる組合せが混合されて、干渉を発生させることに着目すべきである。実際には、より低い回折次数の使用が最も望ましい。これらの２つの光線成分は、格子空間周波数および第１の回折格子対１１０間の軸分離（Ｚ距離）に比例した量によって、「Ｘ方向」（平面図において左右方向）に側方せん断される。回折された光線成分のこれらの「対」およびその他の「対」は、第１の中継レンズシステム１２０に入射し、第１のフーリエ環状開口板１３０の周辺で焦点合わせされる。第１の中継レンズシステム１２０および第１のフーリエ環状開口板１３０は、光軸を規定する。光軸は、所望の回折次数の回折角に平行になるように位置合わせされている。第１のフーリエ環状開口板１３０の中心孔（すなわち、有効口径）の大きさは、調整可能である。そして、中心孔の大きさは、回折された光線成分の不必要な全ての組合せを処断するように選択される。これにより、直列回折格子対から、所望のせん断された１次光線成分ＢＡ１およびＢＢ１の組合せのみが、通過する。

【００４６】

50

第 1 のフーリエ環状開口板 130 の最適な z 位置および大きさ（有効口径）は、試料 80 の表面 82 の全体形状に非常に依存し得る。完全に平坦な物体では、望ましい回折次数は、最小直径位置であって、第 1 の中継レンズシステム 120 のフーリエ面における不要な次数から最も離れた位置にあるであろう。公称の凸（下方に湾曲した）物体では、最小径の平面は、第 1 のカメラ 151 に近づくようにシフトするであろう。これに対して、公称の凹（上方に湾曲した）物体では、最小径の平面は、フーリエ面に対して試料 80 側へ近づくようにシフトするであろう。開口軸位置および開口直径の自動調整は、物体形状の範囲を最大化する。この物体形状の範囲は、システム 10 で測定することができる。

【0047】

せん断回折された光線成分 BA1 および BB1 は、第 1 のカメラ 140 によって、画素化された（デジタルの）第 1 の画像センサ 150（CCD、CMOS など）に対して焦点合わせされる。第 1 の画像センサ 150 では、各光線成分は、その同等物（カウンターパート）と干渉し、第 1 の画像センサ 150 上に空間強度分布（干渉縞）が形成される。第 1 の中継レンズシステム 120 および第 1 のカメラレンズ 140 は、試料面 SP が第 1 の画像センサ 150 と共役するが、約 20 倍（ $20\times$ ）に縮小され、例えば、約 15 mm の光線径を有するように構成される。より一般的には、縮小倍率は、第 1 の画像センサ 150 における画像の大きさを最大化するように選択される。実際には、10 倍（ $10\times$ ）から 40 倍（ $40\times$ ）の縮小倍率が一般的である。明暗それぞれの縞は、X 方向のせん断における 8 倍のウエハ傾斜に相当する地点である。したがって、明縞は、等化位相 $N \cdot \pi \cdot \lambda$ （すなわち、建設的干渉）のせん断回折された光線成分 BA1 および BB1 に相当し、各暗縞は、等化位相 $N \cdot \pi \cdot \lambda / 2$ （すなわち、相殺的干渉）の成分に相当する。

【0048】

同様に、線形偏光レーザ光線 22Y の一部は、第 2 の中継アセンブリ 200 を進む。そして、線形偏光レーザ光線 22Y の一部は、第 2 の回折格子対 210 を通過する。一例では、第 2 の回折格子対 210 は、様々な距離に離間し、かつ平行なロンチ格子または回折格子である。この格子は、局所光軸 A3 の周りを 90 度回転し、第 1 の中継アセンブリ 100 における第 1 の回折格子対 110 に直交している。第 2 の中継アセンブリ 200 内を進む線形偏光レーザ光線 22Y は、種々の次数：0 次、 ± 1 次、 ± 2 次などに回折される。第 1 の格子対 110 および第 2 の格子対 210 から出射する光には、興味の対象となる 2 つの光線成分が存在する。それは、第 1 の格子対からの 0 次成分および $+1$ 次成分と、第 2 の格子対からの $+1$ 次成分および 0 次成分である。これらの 2 つの光線成分は、ここで、格子空間周波数および第 2 の回折格子対 210 間の軸分離（Z 距離）に比例した量によって、「Y 方向」（平面図において前後方向）に側方せん断される。回折された光線成分 BA2 および BB2 のこれらの「対」およびその他の「対」は、第 2 の中継レンズシステム 220 に入射し、第 2 のフーリエ環状開口板 230 の周辺で焦点合わせされる。

【0049】

第 2 のフーリエ環状開口板 230 の大きさおよび位置は、調整可能である。これにより、回折された光線成分の不必要な全ての対が遮断されるように構成することができる。そして、直列回折格子対 210 から、せん断された 1 次光線成分のせん断回折された光線成分 BA2 および BB2 の所望の対のみが、送られる。0 次、 -1 次および -1 次、0 次の回折次数も使用可能であり、一般的に、あらゆる奇数次の回折次数も使用可能であることにも着目すべきである。

【0050】

第 1 のフーリエ環状開口板 130 と同様に、第 2 のフーリエ環状開口板 230 の最適な z 位置および大きさ（有効口径）は、試料 80 の表面 82 の全体形状に非常に依存し得る。

【0051】

せん断回折された光線成分 BA2 および BB2 は、第 2 のカメラ 240 によって、画素化された（デジタルの）第 2 の画像センサ 250（CCD、CMOS など）に対して焦点合わせされる。第 2 の画像センサ 250 では、せん断回折された光線成分 BA2、BB2

は、その同等物（カウンターパート）と干渉し、第2の画像センサ250上に空間強度分布（干渉縞）を形成する。第2の中継レンズシステム220および第2のカメラレンズ240は、試料面SPが第2の画像センサ250と共役するが、約20倍（ $20\times$ ）に縮小されるように構成される。これにより、一例では、せん断回折された光線成分BA2、BB2は、約15mmの光線径を有する。第1の中継アセンブリ100に関連して上述したように、縮小倍率は、第2の画像センサ250における画像の大きさを最大化するように選択される。第1の回折格子対100および第2の回折格子対200を形成する格子分離の微調整を行って、2つの中継アセンブリ100および200のせん断距離を適合させることができることに着目すべきである。

【0052】

明暗それぞれの縞は、Y方向のせん断における8倍のウエハ傾斜に相当する地点である。したがって、明縞は、等化位相 $N \cdot \pi \cdot \lambda$ （すなわち、建設的干渉）のせん断光線成分に相当し、各暗縞は、等化位相 $N \cdot \pi \cdot \lambda / 2$ （すなわち、相殺的干渉）の成分に相当する。

【0053】

一例では、第1の中継アセンブリ100および第2の中継アセンブリ200のそれぞれは、これらの性能を許容し、せん断距離および物体対センサの倍率と適合されるように構成される。したがって、例えば、第1の回折格子対100および第2の回折格子対200は、z軸に平行な軸調整可能に構成することができる。これにより、それぞれの回折格子対110、210に関するせん断距離を、せん断距離に比例した格子分離で制御することができる。さらに、一例では、第1の中継アセンブリ100および第2の中継アセンブリ200のそれぞれは、倍率調整を含む。倍率調整は、物体対センサ倍率の微調整を可能にする。ここで、「微調整」とは、レンズ位置制御の分解能が、対物面82の画像上の特徴を認識できる程度の解像度と比較して大きいことを意味する（例えば、1画素）。

【0054】

一例では、カメラ151および251は、多軸の位置制御とともに構成される。多軸の位置制御は、表面对センサ画素適合（マッチング）を可能にする。すなわち、対物面82における位置マッピングを、第1の画像センサ150上の第1の画素150Pおよび第2の画像センサ250上の第2の画素250Pの同一の位置とそれぞれ適合させることを可能にする。一例では、第1の中継アセンブリ100および第2の中継アセンブリ200における倍率調整は、第1の中継レンズシステム120および第2の中継レンズシステム220のそれぞれにおける少なくとも一つの可動要素、あるいは、第1のカメラレンズ140および第2のカメラレンズ240のそれぞれにおいて、行われる。

【0055】

第1の画像センサ150および第2の画像センサ250は、第1のセンサ信号S1および第2のセンサ信号S2をそれぞれ生成する。第1のセンサ信号S1および第2のセンサ信号S2は、プロセッサ300に送信され、プロセッサ300で処理される。そして、プロセッサ300は、試料80の表面82の一つ以上の形状に基づく特性を決定する。

【0056】

システム10において偏光光学を使用することによって、非偏光光学を使用する場合と比較して、4倍（ $4\times$ ）の光学損失量を減少させることができる。これにより、より強度の高いセンサ信号S1およびS2が得られる。これらのセンサ信号によって、結果的に、より良好な試料表面測定（例えば、誤差の減少）およびより高度な測定解像度が実現される。解像度は、デジタルイメージセンサにおいては、画素に対する光子の個数に依存する。システム10の構成により、例えば、迷光などの、その他の不都合な光学的効果も減少させることができる。また、システム10の構成により、干渉光線成分（BA1、BB1およびBA2、BB2）における強度の平衡化も可能となる。また、レーザ光線スループットが改善されることによって、レーザ源20からのガウスビーム22Xの中央の比較的平坦な（すなわち、均一な）部分を使用することができ、光線の端部を除去しつつ、光線均一性を改善することができる。このようにして、表面形状測定の実施に必要とされる強

10

20

30

40

50

度に実質的な悪影響を与えることなく、照射の均一性を改善することができる。さらに、システム 10 において利用可能な強度を最大化することによって、第 1 の画像センサ 150 および第 2 の画像センサ 250 での露光時間を短くすることができる。これにより、振動（例えば、試料の振動）によるぶれを減少させることができる。2 アームシステム 10 において光透過性がより高くなることで、レーザ源 20 に関して、より低出力、およびそれに伴うより安定したレーザを実現することができる。

【0057】

一例では、回折格子対 110 および 210 は、ホログラフィックに基づく 2 成分光学系を備える。それにより、0 および +1 次のエネルギー比が、平衡化された相対強度を有するように設計されることができる。そのため、不要な奇数および偶数の回折次数強度を最小化することができ、ゴースト光線の回折縞 / 干渉縞を除去 / 最小化し、縞コントラストを改善することができる。これにより、より高い信号対ノイズ比 (SN 比) が得られる。これは、効率の低い暗線 / 空間ロンチ格子の代替となる。暗線 / 空間ロンチ格子では、入射レーザ光線の 50 % が、各格子の棒 (バー) によって「遮断」(吸収) される。別の方法では、各ロンチ格子対によって 25 % 未満の透過率となる。回折位相格子 (D i f f r a c t i v e P h a s e G r a t i n g) は、各回折次数に関して (限界において) 100 % の効率となり得る。この効率は、2 成分光学系、コンピュータ合成 (厚膜) ホログラフィック (C G H)、または、規定化 / プレーズ化された格子溝形状を用いて、どのように設計されるかに依存する。これらの方法の全ては、一旦「マスター」が作成されると、コストの低い方法で複製することができる。ホログラフィー格子の複製処理は、格子の面内寸法の全体にわたってより一層均一であり、棒 (バー) - 空間タイプの格子と比較して、格子から格子へと複製しやすい。例えば、ホログラフィー格子は、ブレ (r u n - o u t)、または、格子対格子倍率についての問題を有さない。そのため、12.7 ミクロン (公称) の有効ピッチを有する格子に関して、ホログラフィー格子は、10 nm 未満のオーダーで一致する一方、棒 (バー) - 空間格子は、50 nm から 100 nm までのオーダーで変化する。

【0058】

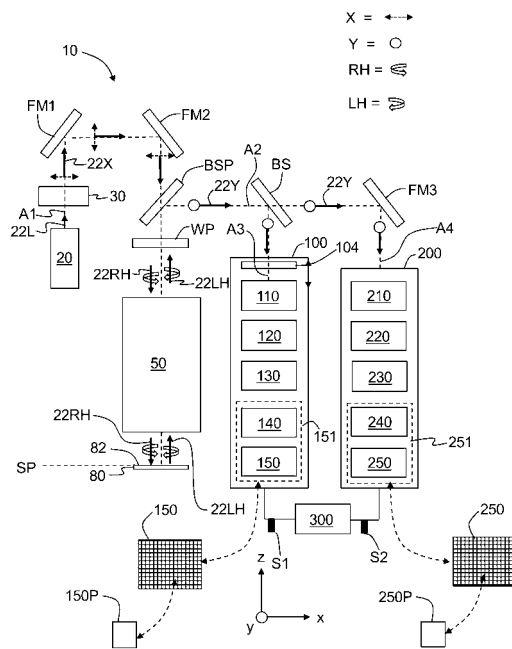
当業者には明白であるが、添付される特許請求の範囲で規定された本開示の精神または範囲から逸脱することなく、本明細書中に記載された本開示の好ましい実施形態に対して様々な変更を加えることができる。したがって、本開示は、添付の特許請求の範囲及びその均等範囲内で行われる本開示の修正及び変更を包含する。

10

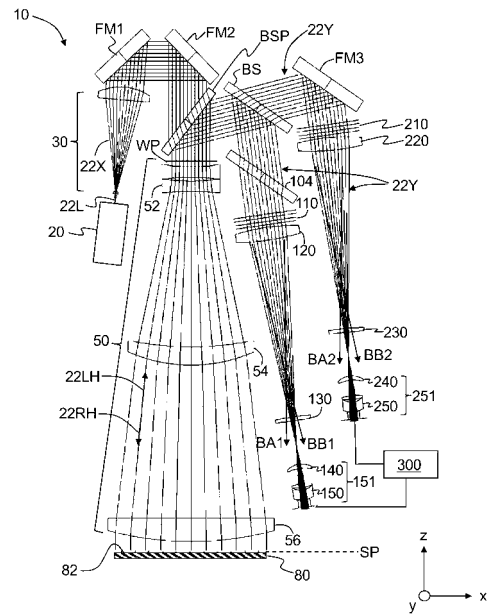
20

30

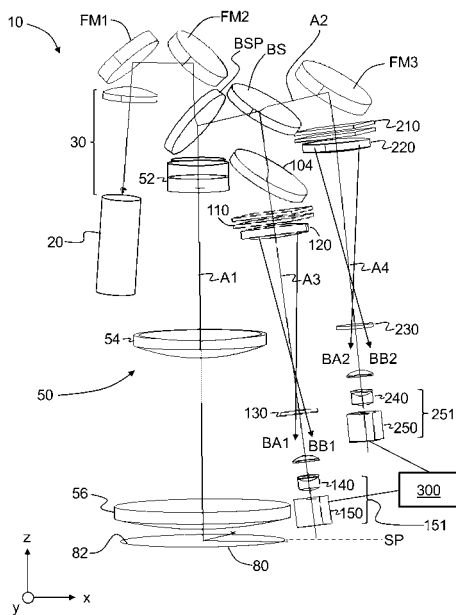
【 図 1 】



【 図 2 】



【 図 3 】



フロントページの続き

(72)発明者 スタイツ、ジー、デビッド

アメリカ合衆国 フロリダ州 3 3 7 0 4 セント ピーターズバーグ 2 6 番アベニューN 1
4 4 6

F ターム(参考) 2F064 AA01 AA06 AA09 BB03 FF01 GG11 GG21 GG38 GG44 HH08
2F065 AA01 AA24 AA31 AA45 AA46 BB25 FF04 FF49 FF51 GG04
GG05 HH03 JJ26 LL04 LL36 LL42 QQ13 QQ24 QQ25 QQ31

【 外国語明細書 】

**POLARIZATION-BASED COHERENT GRADIENT
SENSING SYSTEMS AND METHODS****FIELD**

[0001] The present disclosure relates to optical interferometry, and in particular to coherent gradient sensing, and more particularly relates to polarization-based coherent gradient sensing systems and methods.

[0002] The entire disclosure of any publication or patent document mentioned herein is incorporated by reference, including U.S. Patents No. 3,829,219 and 5,526,116 and 6,031,611, and the publications by M. P. Rimmer et al., "Evaluation of large aberrations using lateral-shear interferometer having a variable shear," App. Opt., Vol. 14, No. 1, pp. 142-150, January 1975, and by Schreiber et al., "Lateral shearing interferometer based on two Ronchi phase gratings in series," App. Opt., Vol. 36, No. 22, pp. 5321-5324, August 1997.

BACKGROUND

[0003] Coherent gradient sensing (CGS) is an interferometric technique used to measure one or more shape-based properties (e.g., height, slope and curvature) of a surface. The CGS techniques utilize a collimated coherent optical beam as an optical probe to obtain shape information indicative of a specularly reflective surface formed of essentially any material. When the specularly reflective surface is not flat, the wavefront of the reflected probe beam is distorted and thereby the reflected probe beam acquires an optical path difference or phase change associated with the shape of the surface under measurement.

[0004] Two gratings spaced relative to each other are placed in the path of the reflected probe beam to manipulate the distorted wavefront for measurement. A first grating diffracts the reflected probe beam to spatially separate diffraction components of different orders. A second grating further diffracts each diffraction component produced by the first grating. An optical element (e.g., a lens) positioned relative to the second grating combines two selected diffraction components produced by the second grating by diffracting two different diffraction components produced by the first grating. The two selected diffraction components interfere with each other to produce an interference pattern. The diffraction by the two gratings effects a relative spatial displacement between the two selected diffraction components, referred to as the shearing distance. The interference patterns

contain information that allows extraction of the discrete height differences between two locations on the reflective surface that are separated by the shearing distance. These height differences can be interpreted as local surface gradient, which in turn, can be further processed to obtain topography information through numerical integration or curvature information through numerical differentiation.

[0005] Despite the success of existing CGS systems, there is an increasing demand for CGS systems to provide improved measurements of a sample surface, including less measurement noise and greater resolution, in order to provide greater measurement functionality over a wider range of measurement applications.

SUMMARY

[0006] An aspect of the disclosure is a method of measuring at least one shape-based property of a specularly reflective surface. The method includes: directing a collimated laser beam having a first circular polarization to a sample surface; reflecting the collimated laser beam from the sample surface to form a reflected laser beam having a second circular polarization and that includes shape information of the specularly reflective surface; converting the reflected laser beam having the second circular polarization to a linearly polarized reflected laser beam; directing a first portion of the linearly polarized reflected laser beam to a first pair of axially spaced apart gratings having a first orientation and forming two first diffraction components, and combining the two first diffraction components to form a first interference pattern on a first image sensor; directing a second portion of the linearly polarized reflected laser beam to a second pair of axially spaced apart gratings having a second orientation orthogonal to the first orientation and forming two second diffraction components and combining the two second diffraction components to form a second interference pattern on a second image sensor; and processing the first and second interference patterns to determine the at least one shape-based property of the specularly reflective surface.

[0007] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein directing the first and second portions of the linearly polarized reflected laser beam includes using a beam splitter to send the first and second portions of the linearly polarized reflected laser beam to respective first and second relay assemblies.

[0008] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein the first and second portions of the linearly polarized reflected laser beam have substantially the same intensity.

[0009] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein directing the collimated laser beam includes generating an initial laser beam from a laser source and passing the initial laser beam through a first beam expander to form a first expanded laser beam and then through a beam expanding optical system to form a second expanded laser beam.

[0010] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein the initial laser beam and the first expanded laser beam are linearly polarized and including passing the first expanded laser beam through a quarter-wave retardation plate to form a circularly polarized collimated laser beam.

[0011] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein converting the reflected laser beam having the second circular polarization to the linearly polarized reflected laser beam includes passing the reflected laser beam through the quarter-wave retardation plate.

[0012] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein combining the two first diffraction components includes passing the two first diffraction components through a first Fourier aperture using a first relay lens system, and wherein combining the two second diffraction components includes passing the two second diffraction components through a second Fourier aperture using a second relay lens system.

[0013] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein the collimated laser beam having a first circular polarization has a diameter of between 300 mm and 450 mm.

[0014] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein the collimated laser beam is formed from an initial laser beam emitted by a helium-neon laser.

[0015] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein the first and second pairs of axially spaced apart gratings each consist of phase gratings.

[0016] Another aspect of the disclosure is the method as described above, further including controlling a first magnification of the first portion of the linearly polarized reflected laser beam and controlling a second magnification of the second portion of the linearly polarized reflected laser beam so that the first interference pattern formed on the first image sensor has a same size as the second interference pattern formed on the second image sensor.

[0017] Another aspect of the disclosure is the method as described above, where the first image sensor has first pixels and is combined with first camera lens to form a first camera, wherein the second image sensor has second pixels and is combined with a second camera lens to form a second camera, and wherein each of the first and second cameras has multi-axis position control to perform surface-to-sensor pixel matching between the sample surface and the first and second pixels of the first and second image sensors.

[0018] Another aspect of the disclosure is the method as described above, wherein the at least one shape-based property includes a height difference between two locations on the sample surface, a slope and a curvature.

[0019] Another aspect of the disclosure is the method as described above, and further including: directing the two first diffraction components through a first adjustable aperture having an adjustable size and adjustable axial position; directing the two second diffraction components through a second adjustable aperture having an adjustable size and adjustable axial position; and adjusting at least one of the size and axial position of the first and second adjustable apertures to block diffraction orders other than two first diffraction orders and two second diffraction orders, respectively.

[0020] Another aspect of the disclosure is a system for measuring at least one shape-based property of a sample having a surface that is specularly reflective. The system includes: a laser source that emits a first linearly polarized laser beam; a polarizing beam splitter arranged to transmit the first linearly polarized laser beam; a waveplate arranged to transmit the first linearly polarized laser beam transmitted by the polarizing beam splitter to form a first circularly polarized laser beam; a beam expanding optical system that receives and directs the first circularly polarized laser beam to the surface of sample to form a reflected laser beam having a second circular polarization and that includes shape

information about the surface of sample, wherein the reflected laser beam exits the beam expanding optical system, passes through the waveplate and that reflects from the polarizing beam splitter to form a second linearly polarized laser beam; a beam splitter arranged to pass and reflect respective first and second portions of the second linearly polarized laser beam; a first relay assembly arranged to receive and direct the first portion of the second linearly polarized laser beam to a first pair of axially spaced apart gratings having a first orientation and that form two first diffraction components, wherein the two first diffraction components are combined to form a first interference pattern on a first image sensor; a second relay assembly arranged to receive and direct the second portion of the second linearly polarized laser beam to a second pair of axially spaced apart gratings having a second orientation to form two second diffraction components, wherein the two second diffraction components are combined to form a second interference pattern on a second image sensor; and a processor configured to process the first and second interference patterns to determine the at least one shape-based property of the sample having the surface that is specularly reflective.

[0021] Another aspect of the disclosure is the system as described above, wherein the at least one shape-based property includes a height difference between two locations on the surface of sample, a slope and a curvature.

[0022] Another aspect of the disclosure is the system as described above, wherein the surface of sample has a diameter and wherein the beam-expanding optical system is configured to expand the first circularly polarized laser beam to have a diameter equal to or greater than the diameter of the surface of sample.

[0023] Another aspect of the disclosure is the system as described above, wherein the first and second pairs of axially spaced apart gratings are each formed by holographic gratings.

[0024] Another aspect of the disclosure is the system as described above, wherein the first and second relay assemblies each have an adjustable magnification.

[0025] Another aspect of the disclosure is the system as described above, wherein the first relay assembly includes a compensating beam splitter.

[0026] Another aspect of the disclosure is the system as described above, further including a beam expander operably arranged between the laser source and the polarizing beam splitter and that is configured to expand the first linearly polarized laser beam.

[0027] Another aspect of the disclosure is the system as described above, wherein the beam splitter is a 50:50 beam splitter.

[0028] Another aspect of the disclosure is the system as described above, further including: a first camera lens that in combination with the first image sensor defines a first camera, wherein the first image sensor has first pixels; a second camera lens that in combination with the second image sensor defines a second camera, wherein the second image sensor has second pixels; wherein each of the first and second cameras has multi-axis position control to perform surface-to-sensor pixel matching between the surface of sample and the first and second pixels of the first and second image sensors.

[0029] Another aspect of the disclosure is the system as described above, further including: a first adjustable aperture operably arranged in the first relay assembly between the first image sensor and the first pair of axially spaced apart gratings, the first adjustable aperture having an adjustable size and an adjustable axial position; and a second adjustable aperture operably arranged in the second relay assembly between the second image sensor and the second pair of axially spaced apart grating, the second adjustable aperture having an adjustable size and an adjustable axial position.

[0030] Additional features and advantages are set forth in the Detailed Description that follows, and in part will be readily apparent to those skilled in the art from the description or recognized by practicing the embodiments as described in the written description and claims hereof, as well as the appended drawings. It is to be understood that both the foregoing general description and the following Detailed Description are merely exemplary, and are intended to provide an overview or framework to understand the nature and character of the claims.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

[0031] The accompanying drawings are included to provide a further understanding, and are incorporated in and constitute a part of this specification. The drawings illustrate one or more embodiment(s), and together with the Detailed Description serve to explain principles and operation of the various embodiments. As such, the disclosure will become more fully understood from the following Detailed Description, taken in conjunction with the accompanying Figures, in which:

[0032] FIG. 1 is a schematic diagram of an example polarization-based CGS system according to the disclosure;

[0033] FIG. 2 is an example optical diagram of the polarization-based CGS system of FIG. 1; and

[0034] FIG. 3 is a 3D CAD-based view of the polarization-based CGS system of FIG. 2.

DETAILED DESCRIPTION

[0035] Reference is now made in detail to various embodiments of the disclosure, examples of which are illustrated in the accompanying drawings. Whenever possible, the same or like reference numbers and symbols are used throughout the drawings to refer to the same or like parts. The drawings are not necessarily to scale, and one skilled in the art will recognize where the drawings have been simplified to illustrate the key aspects of the disclosure.

[0036] The claims as set forth below are incorporated into and constitute part of this Detailed Description.

[0037] Cartesian coordinates are shown in some of the Figures for the sake of reference and are not intended to be limiting as to direction or orientation.

[0038] FIG. 1 is a schematic diagram of an example polarization-based CGS system (“system”) 10 according to the disclosure. The system 10 includes a laser source 20 that emits along a first optical axis A1 a linearly polarized laser beam 22L, with the dashed-line double arrow indicating an “X” polarization by way of example. The system 10 includes a beam expander 30, two fold mirrors FM1 and FM2 and a polarizing beam splitter BSP, which defines a second optical axis A2. The system 10 also includes along the first optical axis A1 a waveplate WP and a beam expanding optical system 50, which is located adjacent a sample

80 that has a surface 82 with a shape to be measured. In an example, the surface 82 of sample 80 is a specularly reflective surface. Also in an example, the shape can be relatively complex, e.g., beyond a simple parabolic type of curvature. In an example, the system 10 measures at least one shape-based property of the surface 82 of sample 80 being measured, such as the height difference between two locations, slope at one or more locations, and a curvature.

[0039] The system 10 also includes along the second optical axis A2 a second beam splitter BS that defines a third optical axis A3 along which resides a first relay assembly 100. A fold mirror FM3 also resides along the second optical axis A2 and defines a fourth optical axis A4 along which resides a second relay assembly 200. The first and second relay assemblies 100 and 200 define first and second interferometer arms and allow for collecting surface-shape information in the x-direction and the y-direction (or more generally, any two directions) simultaneously. This in turn leads to higher measurement throughput and a simplified system wherein the number of moving parts is reduced or eliminated as compared to the single-arm prior art system. Each of the first and second relay assemblies 100 and 200 generates a corresponding data set, and the data sets are used to determine one or more shape-based parameter of the surface 82 of sample 80. Two complete data sets provides redundancy (i.e., the surface shape reconstruction is overdetermined), which allows for improved measurement confidence and error minimization, e.g., by discarding or giving less weight to “bad” pixels.

[0040] FIG. 2 is a more detailed optical diagram of the system 10 of FIG. 1, while FIG. 3 is a 3D CAD-based view of the system 10. An example beam expanding optical system 50 includes, in order along the first optical axis A1, a doublet lens 52, a positive meniscus lens 54 and a plano-convex lens 56. The first relay assembly 100 includes along the third optical axis A3 a compensating plate 104, a first grating pair 110 (shearing distance parallel to x-axis) and a first relay lens system 120, a first Fourier annular aperture plate 130, a first camera lens 140 and a first image sensor 150 that includes first pixels 150P (see leftmost close-up insets in FIG. 1). The first camera lens 140 and first image sensor 150 define a first camera 151.

[0041] The second relay assembly 200 includes along the fourth optical axis A4 a second grating pair 210 (shearing distance parallel to y-axis), a second relay lens system 220, a

second Fourier aperture plate 230, a second camera lens 240 and a second image sensor 250 that includes second pixels 250 (see rightmost close-up insets in FIG. 1). The second camera lens 240 and second image sensor 250 define a second camera 251.

[0042] The first and second image sensors 150 and 250 are electrically connected to a processor 300.

[0043] In an example of the operation of system 10, laser source 20 emits a linearly polarized laser beam 22L, which has a relatively small (e.g., 1 mm) initial diameter. The linearly polarized laser beam 22L is received by the beam expander 30, which expands the linearly polarized laser beam 22L by between, for example, 50X and 200X, e.g., to about 80 mm diameter. The fold mirrors FM1 and FM2 serve to direct the linearly polarized laser beam 22X through the polarizing beam splitter BSP and to the waveplate WP. The polarizing beam splitter BSP is polarizing and aligned to maximize the intensity of the linearly polarized laser beam 22X to passing through it in transmission, while minimizing the intensity of the unused laser beam reflected off the back surface. The waveplate WP comprises a crystal quartz quarter-wave retardation plate that serves to turn the linearly polarized laser beam 22X to form a circularly polarized laser beam 22RH, e.g., a right-hand polarized laser beam. This circularly polarized laser beam 22RH could also be formed as a left-hand polarized beam.

[0044] The right-hand polarized laser beam 22RH enters the beam expanding optical system 50, which is configured to receive and expand the size of right-hand polarized laser beam 22RH. In an example, the amount of beam expansion is 4X, e.g., from an 80 mm diameter beam to a 320 mm diameter beam. The expanded right-hand polarized laser beam 22RH is incident upon the surface 82 of sample 80 as a substantially collimated laser beam. The surface 82 of sample 80 resides in a sample plane SP. Note that the beam expansions are selected based on the size of sample 80. Thus, for a 450 mm diameter wafer, different beam expansion amounts for the beam expander 30 and beam expanding optical system 50 can be used to achieve the right-hand polarized laser beam 22RH having a select size (e.g., select diameter).

[0045] The collimated right-hand polarized laser beam 22RH reflects from the surface 82 of sample 80 and reverses its circular polarization to be left-handed, thereby defining a left-

hand polarized laser beam 22LH. The left-hand polarized laser beam 22LH acquires a reflected wave-front error equal to twice the 3D-deformation $2\bullet\Delta Z(x,y)$ of the wafer surface deformation $2X'(x,y)$ & $2Y'(x,y)$ slope distribution. The left-hand polarized laser beam 22LH travels back through the beam expanding optical system 50 and through the waveplate WP, which converts the left-hand polarized laser beam 22LH to have a linear polarization in the Y-direction, i.e., forms a linearly polarized laser beam 22Y. The linearly polarized laser beam 22Y exits the input end of beam expanding optical system 50 as a 4X reduced (e.g., 80 mm diameter beam) with eight-times the wafer surface slope distribution, i.e., $8X'(x,y)$ and $8Y'(x,y)$.

[0046] The linearly polarized laser beam 22Y is then steered off the polarizing beam splitter BSP, toward the first and second relay assemblies 100 and 200. The polarizing beam splitter BSP is aligned to maximize the reflected linearly polarized laser beam 22Y incident upon the second beam splitter BS, which is partially transmitting/partially reflecting, e.g., 50:50 beam splitter. Thus, half of the linearly polarized laser beam 22Y is directed to travel down the third optical axis A3 and through the first relay assembly 100 while the other half is directed by the fold mirror FM3 to travel down the second relay assembly 200. Note that the polarizing beam splitter BSP is a polarizing beam splitter that reflects X-polarized and Y-polarized light with nearly 100% efficiency for each polarization. Thus, the only location in the optical path where the laser beam intensity is actually divided is at the second beam splitter BS, so that the first and second relay assemblies 100 and 200 each receive substantially half of the laser beam traveling through system 10, minus the relatively small optical losses that occur due to reflections at the various upstream optical interfaces (e.g., at lens element surfaces in the beam expanding optical system 50, etc.).

[0047] The portion of linearly polarized laser beam 22Y that travels through the first relay assembly 100 passes through the compensation plate 104, which compensates for the extra optical path that the linearly polarized laser beam 22Y acquires when passing through the second beam splitter BS to reach the second relay assembly 200. In addition to the compensation plate 104, the first and second relay assemblies 100 and 200 are physically positioned such that the total optical distance between the second beam splitter BS and first and second grating pairs 110 and 210 of the first and second relay assemblies 100 and 200 is identical. The linearly polarized laser beam 22Y passes through the compensation plate 104

and then reaches the first grating pair 110. In an example, the first grating pair 110 comprises a pair of variably spaced and parallel Ronchi or diffraction gratings. The linearly polarized laser beam 22Y is diffracted by the first grating pair 110 into several orders: 0th; $\pm 1^{\text{st}}$; $\pm 2^{\text{nd}}$; etc. at different relative intensities.

[0048] Exiting from the grating pair 110 there are two beam components of interest: the 0th and +1st order components from the first grating pair 110 and +1st and 0th order from the second grating pair 210. It should be noted that different combinations of diffraction orders from the two gratings in the grating pair 110 and 210 can be combined to generate interference; in practice, the use of lower diffraction orders is most desirable. These two beam components are laterally sheared in the “X-direction” (left-right on the plane of view) by an amount proportional to grating spatial frequency and the axial separation (Z-distance) between the first grating pair 110. These and other “pairs” of diffracted beam components enter a first relay lens system 120 and are focused in the vicinity of first Fourier annular aperture plate 130. The first relay lens system 120 and first Fourier annular aperture plate 130 define an optic axis that is aligned parallel to the diffraction angle of desired diffraction orders. The size of central hole (i.e., the clear aperture) of the first Fourier annular aperture plate 130 is adjustable and is selected to block all unwanted pairs of diffracted beam components so only a desired pair of sheared 1st order beam components BA1 and BB1 from tandem pair of gratings is transmitted.

[0049] The optimal z-position and size (clear aperture) of the first Fourier annular aperture plate 130 may vary depending on the overall shape of the surface 82 of sample 80. For a perfectly flat object, the desired diffraction order will be at minimum diameter and maximum separation from the unwanted orders at the Fourier plane of the first relay lens system 120. For nominally convex (curved down) objects, the plane of minimum diameter will shift closer to the first camera 151, whereas for nominally concave objects (curved up) the plane of minimum diameter will shift closer to the sample 80 relative to the Fourier plane. Automated adjustment of the aperture axial position and diameter maximizes the range of object shapes that can be measured with the system 10.

[0050] The sheared diffracted beam components BA1 and BB1 are focused by the first camera lens 140 to pixelated (digital) first image sensor 150 (CCD, CMOS, etc.), where each beam component interferes with its counterpart to produce a spatial intensity distribution

(interference fringes) on the first image sensor 150. The first relay lens system 120 and first camera lens 140 are configured such that the sample plane SP is conjugate to the first image sensor 150 but de-magnified by approximately 20X, e.g., with a beam diameter of about 15 mm. More generally, the demagnification is selected to maximize the size of the image on the first image sensor 150. In practice the demagnifications of 10x to 40x are typical. Each bright and dark fringe is the locus of points corresponding to eight-times the slope of the wafer in the X-direction of shear such that the bright fringe corresponds to the sheared diffracted beam components BA1 and BB1 of equal phase $N*\pi*\lambda$ (i.e., constructive interference) and each dark fringe corresponds to components of equal phase $N*\pi*\lambda/2$ (i.e., destructive interference).

[0051] Likewise, the portion of linearly polarized laser beam 22Y that passes through the second relay assembly 200 passes through the second grating pair 210, which in an example are variably spaced and parallel Ronchi or diffraction gratings. The gratings are rotated about the local optic axis A3 by 90° so as to be orthogonal to the first grating pair 110 in the first relay assembly 100. The linearly polarized laser beam 22Y traveling in the second relay assembly 200 diffracts into several orders: 0th; ±1st; ±2nd; etc. Exiting from the first and second grating pairs 110 and 210 there are two beam components of interest: 0th and +1st order from the first grating and +1st and 0th order from the second grating. These two beam components are now laterally sheared in the “Y-direction” (in-out of the plane of view) by an amount proportional to grating spatial frequency and the axial separation (Z-distance) between the second grating pair 210. These and other “pairs” of diffracted beam components BA2 and BB2 enter a second relay lens system 220 and are focused in the vicinity of second Fourier annular aperture plate 230.

[0052] The size and position of second Fourier annular aperture plate 230 are adjustable so that it can be configured to block all unwanted pairs of diffracted beam components so only a desired pair of sheared diffracted beam components BA2 and BB2 of sheared 1st order beam components from the tandem grating pair 210 is transmitted. It is noted that the 0, -1 and -1, 0 diffraction orders can also be used, and in general any odd order can be used.

[0053] As with the first Fourier annular aperture plate 130, the optimal z-position and size (clear aperture) of the second Fourier annular aperture plate 230 may vary depending on the overall shape of the surface 82 of sample 80.

[0054] The sheared diffracted beam components BA2 and BB2 are also focused by a second camera lens 240 to a pixelated (digital) second image sensor 250 (CCD, CMOS, etc.), where each of the sheared diffracted beam component BA2, BB2 interferes with its counterpart to produce a spatial intensity distribution (interference fringes) on the second image sensor 250. The second relay lens system 220 and the second camera lens 240 are configured such that the sample plane SP is conjugate to the second image sensor 250 but de-magnified approximately 20X so that in an example the sheared diffracted component beam BA2, BB2 has a diameter of about 15mm. As noted above in connection with the first relay assembly 100, the demagnification is selected to maximize the size of the image on the second image sensor 250. It is also noted that minor adjustments to the separation of the gratings that make up the first and second grating pairs 110 and 210 can be performed to match the shearing distance of the two relay assemblies 100 and 200.

[0055] Each bright and dark fringe is the locus of points corresponding to eight-times the slope of the wafer in the Y-direction of shear such that the bright fringe corresponds to sheared beam components of equal phase $N \cdot \pi \cdot \lambda$ (i.e., constructive interference) and each dark fringe corresponds to components of equal phase $N \cdot \pi \cdot \lambda / 2$ (i.e., destructive interference).

[0056] In an example, each of the first and second relay assemblies 100 and 200 is configured to allow their performance to be matched with respect to shearing distance and object-to-sensor magnification. Thus, for example, first and second grating pairs 110 and 210 can be made axial adjustable parallel to the z-axis, which allows control of the shearing distance associated with each grating pair 110, 210 with the grating separation proportional to the shearing distance. Further, in an example, each of first and second relay assemblies 100 and 200 includes magnification adjustment that allows for fine-control of the object-to-sensor magnification. Here, "fine control" means that the resolution of the lens position control is large as compared to what can be resolved with respect to a feature in the image of object surface 82 (e.g., 1 pixel).

[0057] In an example, the cameras 151 and 251 are configured with multi-axis position control that enables surface-to-sensor pixel matching, i.e., matching a mapping of a position on the object surface 82 to same positions of first and second pixels 150P and 250P on the first and second image sensors 150 and 250, respectively. In an example, the magnification adjustment in the first and second relay assemblies 100 and 200 is provided by at least one movable element in each of first and second relay lens systems 120 and 220 or in each of the first and second camera lens 140 and 240.

[0058] The first and second image sensors 150 and 250 respectively generate first and second sensor signals S1 and S2 that are sent to and processed by a processor 300 to determine one or more shape-based properties of the surface 82 of sample 80.

[0059] The use of polarizing optics in system 10 reduces the amount of optical loss by 4X as compared to using non-polarizing optics. This results in a stronger sensor signals S1 and S2, which in turn results in a better sample surface measurement (e.g., less noise), and higher measurement resolution, which depends on the number of photons per pixel in a digital image sensor. The configuration of system 10 also allows for reduction of other adverse optical effects, such as stray light, and also allows for balancing the intensity in the interfering beam components (BA1, BB1 and BA2, BB2). The improved laser beam throughput also allows for the use of the center and relatively flat (i.e., uniform) part of the Gaussian beam 22X from the laser source 20 to improve beam uniformity, while discarding the tails of the beam. In this way, illumination uniformity can be improved while not substantially adversely affecting the intensity needed to perform surface shape measurements. Further, maximizing the available intensity in the system 10 allows for shorter exposure times at the first and second image sensors 150 and 250, which reduces blurring due to vibrations (e.g., sample vibrations). The higher optical transmission of the two-armed system 10 also allows for lower-power and thus more stable lasers for the laser source 20.

[0060] In an example, the grating pairs 110 and 210 can comprise binary-optics, ruled or holographic-based whereby the energy ratios in the zero and +1 orders can be designed to have balanced relative intensities such that unwanted odd and even diffraction order intensities could be minimized to prevent/minimize ghost-beam diffraction/interference-fringes and improves fringe contrast, which provides a higher signal-to-noise ratio. This in

lieu of less efficient black-bar/open-space Ronchi gratings, where 50% of incident laser beam is “blocked” (absorbed) by the bars of each grating. Otherwise, < 25% transmission results for each pair of Ronchi gratings. Diffractive Phase Gratings can be 100% efficient (in the limit) for each diffracted order, depending on how they are designed using binary-optics or computer generated (thick-film) holographic (CGH) or ruled/blazed grating groove geometries; all of which can be replicated by low-cost methods once “masters” are created. The replication process for holographic gratings is much more uniform across the in-plane dimensions of the grating and repeatable from grating-to-grating as compared to bar-space types of grating. For example, holographic gratings do not have issues with run-out or grating-to-grating magnification. So for gratings that have an effective pitch of 12.7 microns (nominally), the holographic gratings are consistent on the order of < 10nm whereas bar-space gratings vary on the order of 50 to 100nm.

[0061] It will be apparent to those skilled in the art that various modifications to the preferred embodiments of the disclosure as described herein can be made without departing from the spirit or scope of the disclosure as defined in the appended claims. Thus, the disclosure covers the modifications and variations provided they come within the scope of the appended claims and the equivalents thereto.

What is claimed is:

1. A method of measuring at least one shape-based property of a specularly reflective surface, comprising:
 - directing a collimated laser beam having a first circular polarization to a sample surface;
 - reflecting the collimated laser beam from the sample surface to form a reflected laser beam having a second circular polarization and that includes shape information of the specularly reflective surface;
 - converting the reflected laser beam having the second circular polarization to a linearly polarized reflected laser beam;
 - directing a first portion of the linearly polarized reflected laser beam to a first pair of axially spaced apart gratings having a first orientation and forming two first diffraction components, and combining the two first diffraction components to form a first interference pattern on a first image sensor;
 - directing a second portion of the linearly polarized reflected laser beam to a second pair of axially spaced apart gratings having a second orientation orthogonal to the first orientation and forming two second diffraction components and combining the two second diffraction components to form a second interference pattern on a second image sensor;
 - and
 - processing the first and second interference patterns to determine the at least one shape-based property of the specularly reflective surface.
2. The method according to claim 1, wherein directing the first and second portions of the linearly polarized reflected laser beam includes using a beam splitter to send the first and second portions of the linearly polarized reflected laser beam to respective first and second relay assemblies.
3. The method according to claim 1 or 2, wherein the first and second portions of the linearly polarized reflected laser beam have substantially the same intensity.

4. The method according to any of claims 1 through 3, wherein directing the collimated laser beam includes generating an initial laser beam from a laser source and passing the initial laser beam through a first beam expander to form a first expanded laser beam and then through a beam expanding optical system to form a second expanded laser beam.
5. The method according to claim 4, wherein the initial laser beam and the first expanded laser beam are linearly polarized and including passing the first expanded laser beam through a quarter-wave retardation plate to form a circularly polarized collimated laser beam.
6. The method according to claim 5, wherein converting the reflected laser beam having the second circular polarization to the linearly polarized reflected laser beam includes passing the reflected laser beam through the quarter-wave retardation plate.
7. The method according to any of claims 1 through 6, wherein combining the two first diffraction components includes passing the two first diffraction components through a first Fourier aperture using a first relay lens system, and wherein combining the two second diffraction components includes passing the two second diffraction components through a second Fourier aperture using a second relay lens system.
8. The method according to any of claims 1 through 7, wherein the collimated laser beam having a first circular polarization has a diameter of between 300 mm and 450 mm.
9. The method according to any of claims 1 through 8, wherein the collimated laser beam is formed from an initial laser beam emitted by a helium-neon laser.
10. The method according to any of claims 1 through 9, wherein the first and the second pairs of axially spaced apart gratings each consist of phase gratings.
11. The method according to any of claims 1 through 10, further comprising controlling a first magnification of the first portion of the linearly polarized reflected laser beam and controlling a second magnification of the second portion of the linearly polarized reflected

laser beam so that the first interference pattern formed on the first image sensor has a same size as the second interference pattern formed on the second image sensor.

12. The method according to any of claims 1 through 11, where the first image sensor has first pixels and is combined with a first camera lens to form a first camera, wherein the second image sensor has second pixels and is combined with a second camera lens to form a second camera, and wherein each of the first and second cameras has multi-axis position control to perform surface-to-sensor pixel matching between the sample surface and the first and second pixels of the first and second image sensors.

13. The method according to any of claims 1 through 12, wherein the at least one shape-based property includes a height difference between two locations on the sample surface, a slope and a curvature.

14. The method according to any of claims 1 through 13, further comprising:
directing the two first diffraction components through a first adjustable aperture having an adjustable size and adjustable axial position;
directing the two second diffraction components through a second adjustable aperture having an adjustable size and adjustable axial position; and
adjusting at least one of the size and axial position of the first and second adjustable apertures to block diffraction orders other than two first diffraction orders and two second diffraction orders, respectively.

15. A system for measuring at least one shape-based property of a sample having a surface that is specularly reflective, comprising:
a laser source that emits a first linearly polarized laser beam;
a polarizing beam splitter arranged to transmit the first linearly polarized laser beam;
a waveplate arranged to transmit the first linearly polarized laser beam transmitted by the polarizing beam splitter to form a first circularly polarized laser beam;
a beam expanding optical system that receives and directs the first circularly polarized laser beam to the surface of sample to form a reflected laser beam having a second circular polarization and that includes shape information about the surface of

sample, wherein the reflected laser beam exits the beam expanding optical system, passes through the waveplate and that reflects from the polarizing beam splitter to form a second linearly polarized laser beam;

a beam splitter arranged to pass and reflect respective first and second portions of the second linearly polarized laser beam;

a first relay assembly arranged to receive and direct the first portion of the second linearly polarized laser beam to a first pair of axially spaced apart gratings having a first orientation and that form two first diffraction components, wherein the two first diffraction components are combined to form a first interference pattern on a first image sensor;

a second relay assembly arranged to receive and direct the second portion of the second linearly polarized laser beam to a second pair of axially spaced apart gratings having a second orientation to form two second diffraction components, wherein the two second diffraction components are combined to form a second interference pattern on a second image sensor; and

a processor configured to process the first and second interference patterns to determine the at least one shape-based property of the sample having the surface that is specularly reflective.

16. The system according to claim 15, wherein the at least one shape-based property includes a height difference between two locations on the surface of sample, a slope and a curvature.

17. The system according to claim 15 or 16, wherein the surface of sample has a diameter and wherein the beam-expanding optical system is configured to expand the first circularly polarized laser beam to have a diameter equal to or greater than the diameter of the surface of sample.

18. The system according to any of claims 15 through 17, wherein the first and second pairs of axially spaced apart gratings are each formed by holographic gratings.

19. The system according to any of claims 15 through 18, wherein the first and second relay assemblies each have an adjustable magnification.

20. The system according to any of claims 15 through 19, wherein the first relay assembly includes a compensating plate.
21. The system according to any of claims 15 through 20, further comprising a beam expander operably arranged between the laser source and the polarizing beam splitter and that is configured to expand the first linearly polarized laser beam.
22. The system according to any of claims 15 through 21, wherein the beam splitter is a 50:50 beam splitter.
23. The system according to any of claims 15 through 22, further comprising:
a first camera lens that in combination with the first image sensor defines a first camera, wherein the first image sensor has first pixels;
a second camera lens that in combination with the second image sensor defines a second camera, wherein the second image sensor has second pixels;
wherein each of the first and second cameras has multi-axis position control to perform surface-to-sensor pixel matching between the surface of sample and the first and second pixels of the first and second image sensors.
24. The system according to any of claims 15 through 23, further comprising:
a first adjustable aperture operably arranged in the first relay assembly between the first image sensor and the first pair of axially spaced apart gratings, the first adjustable aperture having an adjustable size and an adjustable axial position; and
a second adjustable aperture operably arranged in the second relay assembly between the second image sensor and the second pair of axially spaced apart grating, the second adjustable aperture having an adjustable size and an adjustable axial position.

ABSTRACT

Polarization-based coherent gradient-sensing systems and methods for measuring at least one surface-shape property of a specularly reflective surface are disclosed. The method includes: reflecting a first circularly polarized laser beam from a sample surface to form a second circularly polarized laser beam that contains surface-shape information; converting the second circularly polarized laser beam to a linearly polarized reflected laser beam; directing respective first and second portions of the linearly polarized reflected laser beam to first and second relay assemblies that constitute first and second interferometer arms. The first and second relay assemblies each use a pair of axially spaced-apart gratings to generate respective first and second interference patterns at respective first and second image sensors. Respective first and second signals from the first and second image sensors are processed to determine the at least one surface-shape property.

Representative drawing : Fig. 1

