

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4255918号  
(P4255918)

(45) 発行日 平成21年4月22日(2009.4.22)

(24) 登録日 平成21年2月6日(2009.2.6)

(51) Int.Cl.	F I	
HO 1 L 21/027 (2006.01)	HO 1 L 21/30	5 2 9
GO 1 M 11/00 (2006.01)	HO 1 L 21/30	5 1 4 E
GO 2 B 26/08 (2006.01)	GO 1 M 11/00	T
GO 3 F 7/20 (2006.01)	GO 2 B 26/08	E
	GO 3 F 7/20	5 2 1

請求項の数 18 (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2005-24275 (P2005-24275)  
 (22) 出願日 平成17年1月31日(2005.1.31)  
 (65) 公開番号 特開2005-223328 (P2005-223328A)  
 (43) 公開日 平成17年8月18日(2005.8.18)  
 審査請求日 平成17年1月31日(2005.1.31)  
 (31) 優先権主張番号 10/765948  
 (32) 優先日 平成16年1月29日(2004.1.29)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

前置審査

(73) 特許権者 503195263  
 エーエスエムエル ホールディング エヌ  
 . ブイ.  
 オランダ国 ヴェルトホーフェン 550  
 4 ディー アール, デ ラン 6501  
 (74) 代理人 100105924  
 弁理士 森下 賢樹  
 (72) 発明者 アザト エム ラティポフ  
 アメリカ合衆国 コネティカット ダンバ  
 リー ブライトン ストリート 18  
 (72) 発明者 シャーマン ケイ プルトニー  
 アメリカ合衆国 コネティカット ウィル  
 トン スプルー ス ドライヴ 24

審査官 植木 隆和

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 空間光変調器を校正するためのシステム及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

所定の電圧値を有する電圧を空間光変調器 ( S L M ) のピクセルに印加して、該ピクセルを動かし、

動かしたピクセルからの光を反射し、

反射光をアポダイズされた瞳を介して光学系内に通し、

半平面ナイフエッジを用いて、アポダイズされた瞳においてピクセル回折パターンの 0 次ローブを片側のみから一度に遮断し、

アポダイズされた瞳を通過した後の光から像を捕捉し、

前記像と前記電圧値とを相関させて結果信号を生成し、

前記結果信号を用いて前記ピクセルを校正することを特徴とする方法。

【請求項 2】

さらに、アポダイズされた瞳を用いて前記ピクセルの各々を個別に分解する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

さらに、電荷結合装置 ( C C D ) アレイを用いて前記捕捉ステップを実行する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記ピクセルの各々の像を前記 C C D アレイ内の 1 つのセルを用いて捕捉する、請求項 3 に記載の方法。

## 【請求項 5】

前記ピクセルの各々の像を前記 CCD アレイ内の 1 つより多くのセルを用いて捕捉する、請求項 3 に記載の方法。

## 【請求項 6】

さらに、複数の所望の角度を通して前記ピクセルを傾斜させ、  
前記所望の角度の各々に関して前記捕捉ステップを実行する、請求項 1 に記載の方法。

## 【請求項 7】

さらに、一連の角度を通して前記ピクセルを傾斜させ、  
前記一連の角度の各角度において前記捕捉ステップを実行し、  
補間を使用して、前記ピクセルを所望の角度まで動かす電圧値を決定する、請求項 1 に記載の方法。 10

## 【請求項 8】

さらに、環状アポダイゼーションパターン及び半平面アポダイゼーションパターンのうちの一方を用いて、アポダイズされた瞳を形成する、請求項 1 に記載の方法。

## 【請求項 9】

さらに、透過率と位相のうちの少なくとも一方に変化が存在するように、半平面アポダイゼーションパターン、剪断格子アポダイゼーションパターン、及びアルゴリズムから導出されるアポダイゼーションパターンのうちの 1 つを用いて、アポダイズされた瞳を形成する、請求項 1 に記載の方法。

## 【請求項 10】

さらに、光学系としてリソグラフィツールの投影光学装置を使用する、請求項 1 に記載の方法。 20

## 【請求項 11】

所定の電圧値を有する電圧を空間光変調器 (SLM) 内のピクセルに印加して該ピクセルを動かすための手段と、  
光学系内において瞳をアポダイズするよう構成された半平面ナイフエッジであって、アポダイズされた瞳においてピクセル回折パターンの 0 次ローブを片側のみから一度に遮断する半平面ナイフエッジと、  
前記 SLM で反射され、前記半平面ナイフエッジを通過した光から像を捕捉するための手段と、 30  
前記像と前記電圧値とを相関させて結果信号を生成するための手段と、  
前記結果信号を用いて前記ピクセルを校正するための手段とを有する、ことを特徴とするシステム。

## 【請求項 12】

前記捕捉手段は電荷結合装置 (CCD) アレイを有している、請求項 11 に記載のシステム。

## 【請求項 13】

前記ピクセルの各々の像が前記 CCD アレイ内の 1 つのセルを用いて測定される、請求項 12 に記載のシステム。

## 【請求項 14】

前記ピクセルの各々の像が前記 CCD アレイ内の 1 つより多くのセルを用いて測定される、請求項 12 に記載のシステム。 40

## 【請求項 15】

透過率と位相のうちの少なくとも一方に変化が存在するように、瞳をアポダイズする剪断格子アポダイゼーションパターン、アルゴリズムから導出されるアポダイゼーションパターン、環状アポダイゼーションパターン、および半平面アポダイゼーションパターンのうちの 1 つを有している、請求項 11 に記載のシステム。

## 【請求項 16】

前記電圧印加手段は、複数の所望の角度を通して前記ピクセルの各々を動かす、  
前記相関手段は、前記所望の角度の各々に対して結果信号を決定する、請求項 11 に記 50

載のシステム。

【請求項 17】

前記電圧印加手段は、一連の角度を通して前記ピクセルの各々を動かし、  
前記捕捉手段は、前記一連の角度の各角度において像を捕捉し、  
前記相関手段は、補間を用いて所望の角度に対する結果信号を決定する、請求項 11 に記載のシステム。

【請求項 18】

前記光学系はリソグラフィツールの投影光学装置を有している、請求項 11 に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

本発明は反射ピクセルを有する空間光変調器を較正する方法、より詳細にはマスクレスリソグラフィシステムにおいて使用される反射空間光変調器を較正する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

空間光変調器 (SLM) (例えば、デジタルミラー装置 (DMD)、液晶ディスプレイ (LCD)、格子光弁 (GLV) など) は、オブジェクトをパターン成形する又はパターンを投影する多くの異なる環境、例えば、リソグラフィ (例えば、マスクレスリソグラフィ)、テレビ、バイオメディカルシステム、バイオテクノロジーシステムなどで使用されている。SLM はアクティブデバイス (又はピクセル) の  $n \times m$  (ここで  $n$  及び  $m$  は 1 に等しいかそれよりも大きな整数である) アレイ (例えば、DMD もしくは GLV 上のミラーのアレイ又は LCD 上の反射性 / 透過性デバイスのアレイ) を有する活性領域を有している。各アクティブデバイスは、1 つ又は複数の離散的状态を通してアクティブデバイスを ON と OFF との間で動かす (例えば、傾斜、回転、旋回など) ように個別に制御される。例えば、アクティブデバイスが DMD 又は GLV 上のミラーである場合、各ミラーは二進位置又は多数位置の間で回転又は曲がるように個別に制御される。

20

【0003】

図 1、2、及び 3 には、SLM アレイを照明することにより、パターン化された光を形成し、SLM からサブストレートの方向に向ける従来のシステム 100、200、及び 300 がそれぞれ示されている。周知のように、照明光学装置と SLM 光学装置は 1 つ又は複数の光学素子 (例えば、レンズ、ミラーなど) を有することができる。

30

【0004】

上で論じたように、SLM の用途、又は SLM のアレイの用途はマスクレスリソグラフィにある。リソグラフィはサブストレートの表面に模様を形成するために使用される。この種のサブストレートはフラットパネルディスプレイ (例えば、液晶ディスプレイ)、回路基板、種々の集積回路などの製造において使用されるサブストレートを含んでよい。このような用途に頻繁に使用される基板は半導体ウェーハ又はガラスサブストレートである。この記述は図解目的のために半導体ウェーハの観点から為されるが、当業者にはこの記述が当業者に周知の他のタイプのサブストレートにも適用されることが理解されるであろう。

40

【0005】

リソグラフィの最中に、ウェーハステージに配置されたウェーハは、SLM 又は SLM のアレイにより形成された像 (例えば、パターン) で露光される。像はリソグラフィ機器内に配置された露光光学装置によりウェーハの表面に投影される。フォトリソグラフィでは露光光学装置が使用されるが、個々の用途に応じて異なるタイプの露光機器を使用してもよい。例えば、エキシマーレーザ、x 線、イオン、電子、又は光子リソグラフィは、当業者には周知のように、それぞれ異なる露光機器を必要とすることがある。フォトリソグラフィの具体的な例はここでは図解目的のみで論じられる。

【0006】

50

投影された像はウェーハの表面に堆積させた層（例えばフォトレジスト）の特性に変化をもたらす。この変化は露光中にウェーハに投影される像における模様に対応している。露光に続いて、パターン成形された層を作り出すために層をプロセス加工してもよい。パターンは露光中にウェーハに投影された模様に対応している。つぎに、このパターン成形された層は、導電層、半導体層、又は絶縁層のようなウェーハ内の基礎構造層の露光部分を除去又はさらにプロセス加工するために使用される。このプロセスは、ウェーハの表面に又は種々の層に所望の模様が形成されるまで、他のステップとともに繰り返される。

【 0 0 0 7 】

ステップアンドスキャン技術は狭い結像スロットを有する投影光学系との組合せで機能する。ウェーハ全体をSLMにより形成された像で一度に露光するのではなく、個々のフィールドが1つずつウェーハ上でスキャンされる。これは、結像スロットがスキャン中にフィールドを横切って移動するようにウェーハを動かし、SLM上のアクティブデバイスを制御することによって為される。ウェーハステージはその際、SLM上のアクティブデバイスにより形成されたパターンの複数のコピーがウェーハ表面全体にわたって露光されるように、フィールド露光の間に逐次移動しなければならない。このようにして、ウェーハに投影される像の質が最大化される。

【 0 0 0 8 】

パターン成形が正確であることを保証するためには、アクティブデバイスの制御が正確でなければならない。精度はアクティブデバイスの較正に基づいている。1つの方法はSLMピクセルを個別に較正するが、これはピクセルに印加された所定の電圧から生じる各ピクセルの傾斜を測定する能力を必要とする。しかし、他のすべてのピクセルをターンオフすることによってピクセルを1つずつ見ることは、較正の時間的コストが極端に高くなるので望ましくない。

【 0 0 0 9 】

別の較正方法は、各ピクセルを分解するために、リソグラフィツールの投影光学装置を用いてSLMアレイのすべてのピクセルをCCDアレイ上に結像することに基づいている。各ピクセルからの反射光はほとんどピクセルの幾何学的像の境界内に集中する。このようなアプローチの問題は、ピクセルを分解する投影光学装置によって形成される傾斜マイクロミラーピクセルの像がピクセルミラーの傾斜に依存しない（又は非常に弱く依存する）ことである。傾斜ミラーピクセルの変調は、投影光学装置の入射口から傾斜ミラーピクセルに当たる一部の光をこの傾斜ミラーピクセルが偏向させるという事実に基づいている。したがって、この変調は投影光学装置のオブジェクトサイズ開口数（NA）に依存する。SLMの像をサブストレート上に投影するために使用される結像投影光学装置は、ピクセルからの0次回折ローブの断片をサンプリングする（したがって、ピクセルは印刷中に結像される場合には低分解である）。ピクセルを分解する較正投影光学装置は、ピクセルからの多くの回折ローブを捕捉しなければならない。それゆえ、関心傾斜角度の範囲内でピクセルを傾斜させてもピクセルの分解像の有効な変調にはならない。個々の傾斜ミラーピクセルの分解、及び傾斜に依存する分解像の（強い）変調は両方とも較正にとって必要であるが、これらの性質は上で説明したように互いに排他的である。

【 発明の開示 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 1 0 】

それゆえ本発明の課題は、SLM内の個々のすべてのピクセルを実質的に同時に較正することができ、しかもピクセルの像を十分に分解することができ、また各像がピクセルの動き（例えば、傾斜、旋回、回転など）にともなって強く変調されるようにすることのできるシステム及び方法を提供することである。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 1 】

上記課題は、所定の電圧値を有する電圧を空間光変調器のピクセルに印加して、該ピクセルを動かし、動かしたピクセルからの光を反射し、反射光をアボダイズされた瞳を介し

10

20

30

40

50

て光学系内に通し、アポダイズされた瞳を通過した後の光から像を捕捉し、前記像と前記電圧値とを相関させて結果信号を生成し、前記結果信号を用いて前記ピクセルを較正することを特徴とする方法により解決される。

【0012】

同様に、上記課題は、所定の電圧値を有する電圧を空間光変調器内のピクセルに印加して該ピクセルを動かすための手段と、光学系内の瞳にアポダイゼーションを施すための手段と、前記SLMで反射され、前記アポダイゼーション手段を通過した光から像を捕捉するための手段と、前記像と前記電圧値とを相関させて結果信号を生成するための手段と、前記結果信号を用いて前記ピクセルを較正するための手段とを有することを特徴とするシステムにより解決される。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

本発明の実施形態は少なくとも以下のステップを有する空間光変調器(SLM)の較正方法を提供する。所定の電圧値を有する電圧を空間光変調器(SLM)のピクセルに印加して、ピクセルを動かす(例えば、傾斜、回転、旋回など)ステップ。動かしたピクセルからの光を反射するステップ。反射光をアポダイズされた瞳を介して光学系内に通すステップ。アポダイズされた瞳を通過した後の光から像を捕捉するステップ。前記像と前記電圧値とを相関させて結果信号を生成するステップ。前記結果信号を用いて前記ピクセルを較正するステップ。

【0014】

20

本発明の他の実施形態はSLMを較正するためのシステムを提供する。このシステムは、所定の電圧値を有する電圧を空間光変調器(SLM)内のピクセルに印加して該ピクセルを動かすための手段と、光学系内の瞳にアポダイゼーションを施すための手段と、前記SLMで反射され、前記アポダイゼーション手段を通過した光から像を捕捉するための手段と、前記像と前記電圧値とを相関させて結果信号を生成するための手段と、前記結果信号を用いて前記ピクセルを較正するための手段を有している。

【0015】

本発明のさらなる実施形態、特徴、及び利点、ならびに本発明の種々の実施形態の構造及び動作は、添付した図面を参照して以下で詳細に説明される。

【0016】

30

添付した図面は、本明細書に取り込まれ、本明細書の一部を成しており、発明の説明とともに本発明を図解し、さらには本発明の原理を説明し、当業者が本発明を製造及び使用することができるようにするのに有用である。

【実施例】

【0017】

概観

添付図面を参照して本発明を説明する。図中、同じ参照番号は同一又は機能的に類似した要素を指す。加えて、参照番号の左端の数字はその参照番号が最初に現れた図を識別するものである。

【0018】

40

特定の構成及び配置が論じられるが、これは図解目的のために過ぎないことが理解されなければならない。当業者には、本発明の意図及び範囲から逸脱することなく他の構成及び配置を使用しうることが理解されるだろう。当業者にとっては、本発明が他の様々な用尾においても使用しうることが明らかである。

【0019】

本発明の実施形態は、ピクセル(例えば、ミラー)のアレイを備えた反射SLMとアポダイズされた瞳を備えた投影光学系とを有する方法及びシステムを提供する。較正動作中、SLMのミラーは、様々な角度を通してこれらのミラーを連続的又は逐次的に動かす(例えば、運動は傾斜、旋回、回転などであってよい。以降、すべて「動かす」と呼ぶ)ために変化する電圧値を受け取る。これらの運動中に各ピクセルから反射してきた光が、そ

50

それぞれの角度における各ピクセルに対する個々の像を形成する。光はつぎにアポダイズされた瞳を通過し、検出器（例えば、CCDアレイ）の1つ又は複数の区画（例えば、ピクセル）で受け取られる。それぞれの角度において各ピクセルで受け取られる光の強さは、その角度までピクセルを傾斜するためにピクセルが受け取った電圧値と相関している。この相関が結果信号を生成する。結果信号は、SLMの通常動作の前に、また場合によっては通常動作中に、制御装置によってSLMの1回又は複数回の較正に使用される。

#### 【0020】

##### DMD SLMの例

図4には、DMD SLM 402の一部における一連のミラー400の透視図を示している。SLM 402はシステム100, 200, 又は300のいずれにおいても使用することができる。DMDをSLM 402として使用する場合、DMDは、例えば2048×512のアレイに配置された16×16 $\mu\text{m}^2$ の傾斜ミラー400を含むことができる。他のサイズのアレイを使用することも可能であり、または本発明の範囲内で考えられることであることが理解されなければならない。さらに、この説明を読む当業者には明らかなように、SLMのアレイも使用しうる。SLMの関心ピクセル400は、回路（図示せず）を介して各マイクロミラー400に印加される電圧に応じて傾斜を変えることのできる各々のマイクロミラー400によって静電的に駆動される。例えば、回路はトランジスタ（図示せず）を用いて制御される容量性結合（図示せず）を有することができる。この例では、典型的なピクセルはキャパシタ内の平行プレートが制御されるのと似たやり方で制御される。言い換えると、静電気力を用いたミラー400の傾斜を制御するために、容量性結合が使用される。ミラー400は、回路内のプレート（図示せず）及び隣接するミラー400にエネルギーが印加されているか又は印加されていないかに基づいて支持体404の周りを傾斜する（例えば、回転する、動く等）。動きは二進（例えば、ON及びOFF）又は複数の角度にわたってもよい。リソグラフィや同様の環境では、複数の角度の使用はパターン成形される模様をグレースケールを強めることができる。

#### 【0021】

それぞれのピクセル400で機械的特性及びジオメトリが異なるため、回路を介して各ピクセルに印加される電圧とその結果生じる傾斜との間の依存性はピクセル400が異なれば異なる。さらに、主要な変形作用（傾斜）に加えて、反射性のピクセル表面408は曲がる。反射性表面408の変形は傾斜に比べればピクセルの像に対する影響が格段に小さい。この変形（様々な非平面性）は、ピクセルのサイズをより小さくする、ピクセルミラーをより厚くする、ピクセル材料を改善する、及びピクセルミラーの「ヒンジ」のデザインを改善することで著しく減少させることができる。像の質を保証するためには、ピクセル400を個別に較正する必要がある。この較正は通常はSLM 402を含んだシステムの動作前に行われるが、場合によっては、時間が経つにつれて生じるピクセル400の機械的特性の変化を考慮するため、及び欠陥のあるピクセルを検出するために、SLM 402を含んだシステムの動作中にフィールド内で周期的に行われる。

#### 【0022】

##### DMD SLMの較正方法の例

図5には、本発明の1つの実施形態による方法500を記述したフローチャートが示されている。方法500は以下で説明するシステムのうちの1つ又は複数により実行することができるが、このセクションではシステム600（図6）及び要素システム600が方法500を実行するシステムの一例として使用される。

#### 【0023】

ステップ502では、空間光変調器（SLM）内のピクセルに電圧が印加され、ピクセルが動かされる。ステップ504では、動かされたピクセルから光が反射される。ステップ506では、反射光がアポダイズされた瞳を介して光学系内に通される。ステップ508では、アポダイズされた瞳を通過した後の光から像が捕捉される。ステップ510では、像と電圧値とを相関させて結果信号が生成される。ステップ512では、結果信号を用いてピクセルを較正する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 2 4 】

実際のマイクロミラーは剛体として傾斜する訳ではない。したがって、ピクセルの像に対する主要な影響はマイクロミラーの「平均傾斜」からのものである。傾斜したミラーのカーブ及び非平面性はミラーのサイズよりも小さい。したがって、主にミラーからの高次回折に影響を与える。その一方で、結像投影光学系によるピクセルの像は主に0次回折の形状と傾斜の関数としてのその変位とに依存している。方法500は主影響（傾斜）の較正を可能にする。

## 【 0 0 2 5 】

（傾斜後の）ピクセル表面の残留変形は16 μmのアルミニウムピクセルに関してはピクセルの像に著しく影響しうるが、より小さく（例えば8 μm）より厚いピクセルを使用してもよいことが認識されなければならない。これらのより小さくてより厚いピクセルは傾斜の際の変形がより少ない。したがって、ピクセルの変形に起因する較正の誤差がより小さい。

10

## 【 0 0 2 6 】

上記の記述はピクセルの実際の傾斜が相互に完全に平行な傾斜軸を中心として行われることを仮定していることを理解されたい。しかし、いくつかのSLMピクセルミラーのミラーピクセルは、僅かに非平行な傾斜軸を中心として傾斜することもある。上記較正手順を2回実行する、すなわち、1回は上述のように、つぎには90°回転させたアポダイゼーションパターンで実行することで、すべてのミラーのx傾斜及びy傾斜双方の依存性の較正に方法500を使用することができる。

20

## 【 0 0 2 7 】

方法500は求められた較正結果に応じて付加的なステップを有してもよいことを理解されたい。

## 【 0 0 2 8 】

傾斜 - 電圧較正曲線を得るために使用される1つの例では、付加的なステップは、（1）さまざまな電圧をSLM602（図6）のすべてのピクセルに同時に印加し、較正投影光学系608（図6）から得られた像を検出器604（図6）により測定すること；（2）特定の分解されたピクセルに対応する像の部分を使用して、この個々のピクセルの傾斜の印加電圧に対する依存性を見ること；及び（3）解析的に又は実験的に導出することのできる、この傾斜に対するピクセル像輝度の依存性の知識を使用することを含んでいてよい。

30

## 【 0 0 2 9 】

別の例では、各ピクセルを規定の傾斜角度で傾斜させる一連の電圧が決定される。1つの実施形態では、各ピクセルに関して傾斜 - 電圧較正曲線が得られ、規定の傾斜角度の値に対して補間が行われる。このような補間を行うためには、システム600は規定の傾斜値の近傍において傾斜 - 電圧較正曲線を決定するだけでよい。別の実施形態では、各ピクセルに対して反復が行われる。ピクセルからの像は十分に分解されているため、これらの反復は値を急速に収束させるために各ピクセルについて個別に行ってよい。

## 【 0 0 3 0 】

SLMを較正するためのシステム

40

図6には、本発明の1つの実施形態によるシステム600が示されている。システム600はシステム100、200、もしくは300のいずれの内部にも、又は現在知られているもしくは将来に開発されるSLMを用いた他のいずれのシステムの内部にも置くことができる。システム600はSLM602、検出器604、投影光学系内のアポダイズされた瞳領域606、及び制御系610を含むことができる。各ピクセル（例えば、ミラー、反射性表面など）（図示せず）から反射した各々の光ビーム612は投影光学系608を通して方向付けられる。アポダイズされた瞳606の使用により変化させられた光ビーム614は検出器604において検出される。

## 【 0 0 3 1 】

較正中に、個々のピクセルを1つ又は複数の所望の角度まで傾斜又は動かすために使用

50

される1つ又は複数の電圧値に相当する1つ又は複数の値616が、後でより詳細に説明するように、制御系610に送信される。また、所望の角度における各々のピクセルに相応した光ビーム614の像データ618(例えば、輝度値など)も、後でより詳細に説明するように、制御系610に送信される。各々のピクセルと各々の角度に関して各電圧値616を像データ618と関連させ索引付けした後、制御系610は、後でより詳細に説明するように、システム600の動作中に各ピクセルを制御する制御信号620を生成する。

#### 【0032】

システム600は、検出器604(例えば、電荷結合装置(CCD)、相補形金属酸化物デバイス(CMOS)など)を用いてSLM602(例えば、DMD SLM402、  
10  
または場合によってはGLV SLM)のすべてのピクセルを結像させることによって、実質的に同時に各SLMピクセルを個別に較正するために使用することができる。

#### 【0033】

通常動作が開始する前また場合によっては通常動作中の所望のいずれの期間においても行うことのできる較正サイクルの最中に、ピクセルの像は投影光学系608のアポダイズされた瞳606を介して個別に分解される。各ピクセルを傾斜させるために使用される電圧値616と各ピクセルの像の輝度値618は制御系610で受信され、制御系610は各ピクセルに関するこれら2つのデータ値を関連させ、そこから結果信号730を生成する。結果信号730は通常動作中にミラーを較正するため、ならびにミラーを正確に傾斜  
20  
又は動かすために使用される。アポダイズされた瞳606を使用することにより、後でより詳細に説明するように、各ピクセルの像の輝度値618がDMD SLM602の各ミラーの傾斜角度(すなわち、電圧値616)に強く依存するようにすることができる。

#### 【0034】

図7には、本発明の1つの実施形態による制御系610のブロック図が示されている。制御系610は関連装置724、結果信号記憶部726、及び制御装置728を有している。選択的に、信号616及び/又は618の記憶が要求される場合には、像データ記憶部720及び電圧値記憶部722も制御系610に含まれる。記憶装置720、722、及び/又は724(及び/又は以下で論じる726)は、現在知られている又は将来開発される索引付きデータの記憶に使用しうる任意のハードウェア又はソフトウェア記憶装置を用いて実施することができる。また、制御系610は、この記載を読んだ当業者には明  
30  
らかなように、ハードウェア、ソフトウェア、又はファームウェアで実施することもできる。

#### 【0035】

1つの実施形態では、像データ記憶装置720は複数の像輝度データ値618を受信及び索引付けし、電圧値記憶装置722は複数の電圧値616を受信及び索引付けする。例えば、SLM602のミラー(ピクセル)は1つ又は複数の電圧値616の印加によって増分的に又は連続的に傾斜させることができ、これにより像輝度データ値618が検出器604から生成される。各ピクセルの各々の傾斜角度(例えば、各電圧値616)に関して、像輝度データ値618が生成され記憶される。

#### 【0036】

40  
関連装置724は、各ピクセルに対する各々の傾斜角度に関して、各電圧値616又は索引付き電圧値616'(以下では両方に対して616だけを使用する)を各ピクセルに対する各々の傾斜角度によって生じた各々の像輝度データ値618又は索引付き像輝度データ値618'と関連させ、各相関に関して結果信号730を生成する。この相関演算は、像データ記憶部720及び/又は電圧値記憶部722が制御系610内に含まれているか否かには関係なく行われる。

#### 【0037】

1つ又は複数の結果信号730が結果信号記憶部726に記憶され、索引付けされる。制御装置728はSLM602の通常動作中に索引付き結果信号732を取り出して、所望の光パターンのための各ピクセルの較正及び位置決め  
50  
に使用される制御信号620を生

成する。較正時に記憶されなかったピクセルに対する傾斜角度が要求された場合、この所望の角度に対する正しい電圧を求めるために補間法を使用することができる。例えば、この記載を読んだ当業者には明らかなように、所望の角度に対するデータを計算するために2つの既知の角度に対するデータを調べる補間アルゴリズムを使用することができる。

【0038】

アポダイゼーションとは、さまざまな透過率又はさまざまな位相を有するオブジェクトを導入することにより投影光学系608(図10に最もよく示されている)の瞳606を変化させる1つの方法である。正規透過率及び/又は位相を変化させるアポダイゼーションを瞳に導入した場合、このアポダイゼーションはピクセルミラーの傾斜によるピクセル分解像の変調が可能となるように選択することができる。入射瞳アポダイゼーション関数に対する主な要件は次の通りである：(1)アポダイゼーション関数は相応するピクセルミラーの傾斜に対するピクセル像輝度の強い依存性を生じさせなければならない、また(2)アポダイゼーション関数は較正投影光学系608の分解能力を著しく低下させてはならない。またアポダイゼーション関数がフィールドを著しく歪ないことも望まれる。以下はこれらの要件を満たす模範的なアポダイゼーションパターンの例であるが、これを網羅的なリストとして解釈してはならない。現在知られている又は将来開発される他のアポダイゼーションパターンも本発明の範囲内で使用可能であることを理解されたい。

【0039】

模範的なパターンは次の通りである：(1)ピクセル回折パターンの0次ローブ部分を遮断する環状アポダイゼーション；(2)半平面又は片刃アポダイゼーション関数(ナイフエッジ)；(3)剪断格子又は回折格子アポダイゼーション関数；(4)SLM較正にシアリング干渉計を使用することができるようにする像平面内のフィールドの剪断は、剪断格子以外の当業者に周知の多くの物理的構成を利用して達成することができる(例えば、ビーム分割器、特別なプリズム又ミラーを使用することができる)；(5)例えば、本明細書に全体的に参照文献として取り込まれた米国特許出願明細書通し番号10/765,947「シアリング干渉法を用いてマイクロミラー空間光変調器アレイをピストン運動させるシステム及び方法」(現在では、2005年1月25日交付のアメリカ合衆国特許第6,847,461号)に記載されているような横シアリング干渉計；(6)(入射瞳アポダイゼーション関数に対する主な要件に基づいた)条件付き最適化問題の数値計算法、解析的、又はアドホックな解から得られる、透過率及び位相の両方の変化を含むことのできるより一般的なアポダイゼーション、又はアポダイゼーション機能は位相変化のみを含む(例えば、位相剪断格子、又は で位相が替わるエッジ)。

【0040】

1つの例では：

アポダイズされた瞳領域：

$$U(P) = a(f_x) \cdot \text{sinc}(L \cdot (f_x + 2 / \alpha_1))$$

ここで、 $\alpha_1$  は傾斜角度であり、 $-NA / f_x$   $NA / f_x$  である。

像輝度：

$$I^{(i)}(x, \alpha_1) = |FT(U(P))|^2$$

傾斜角度 =  $\alpha_1$  の場合の分解：

【0041】

【数1】

$$R(a) = \frac{\int_{-L/2}^{L/2} I^{(i)}(x, \alpha_1) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} I^{(i)}(x, \alpha_1) dx}$$

傾斜角度 =  $\alpha_1$  の近傍までの傾斜に対する感度  $y$  (絶対値)：

【0042】

10

20

30

40

## 【数 2】

$$S(a) = \left| \frac{d}{d\alpha} \int_{-L/2}^{L/2} I^{(i)}(x, \alpha_i) dx \right|$$

汎関数  $R(a)$  及び  $S(a)$  の値ができるだけ大きくなるようなアポダイゼーション関数  $|a(f_x)| \leq 1$  を求めたい。これらの要件から生じるいくつかの最適化問題は以下を含む：

1.  $c_1 \cdot R(a) + c_2 \cdot S(a) \rightarrow \max$  となるような  $|a(f_x)| \leq 1$  を求める。
2. 条件  $R(a) \leq 1 - c$  のもとで  $S(a) \rightarrow \max$  となるような  $|a(f_x)| \leq 1$  を求める。
3. 条件  $S(a) \leq c$  のもとで  $R(a) \rightarrow \max$  となるような  $|a(f_x)| \leq 1$  を求める。

10

## 【0043】

剪断格子アポダイゼーションパターンを使用する場合、この目的で SLM 602 を校正するためにシアリング干渉計の原理の変更を適用してよい。剪断格子は、像平面内のフィールドを剪断するように瞳 606 の中に配置されなければならない。ピクセル像内にその結果として生じるフリンジを分析すれば、ピクセル傾斜を示すことができる。

## 【0044】

1つの選択肢は、ピクセル幅の整数倍で像を剪断するように剪断作用を選定することである。そうすれば、各ピクセルの分解像は隣接するピクセルの像と重なり、その結果として生じるフリンジのインターフェログラムを読むことでピクセルの真の変調状態について判断することができる。このように、このアプローチは互いに干渉し合うピクセルに基づいている。

20

## 【0045】

別の選択肢は次の通りである。個々のピクセルが十分に分解されるように SLM を結像する。剪断格子は（像平面内において）ピクセル幅の分数（例えば、 $1/4$ ）で剪断するように投影光学系 608 の瞳 606 内に導入される。それにより、各ピクセルの像の中心近くには、剪断作用のほとんどがこのピクセル内のフィールドに加えられる（隣りとの干渉がない）エリア（ピクセル幅の  $1/2$  の広さ）が存在する。このエリア内では、ピクセルミラー傾斜の固定値に対する輝度は（傾斜により生じる線形の位相変化のゆえに）ほぼ一定であり、 $\cos(A \cdot \text{tilt})$  に比例する（ここで、 $A$  はある既知の定数であり、 $\text{tilt}$  はこのピクセルの傾斜である）。

30

## 【0046】

投影光学系 608 内のフレア又はコヒーレント照明で観測されるスペックルの効果を低減するためには、部分コヒーレントな照明が必要とされることがある。部分コヒーレントな照明は瞳内でアポダイゼーションにより生じる変調を低減する。これに対しては、周期的な瞳アポダイゼーションパターン（例えば、剪断格子）の特定のケースでは、この記載を読んだ当業者には明らかなように、（シアリング干渉計におけるロンキー格子の一致対の使用と同様に）アポダイゼーションパターンの周期に合った周期を有する格子によって変調された分散光源から部分コヒーレント照明を供給することによって対抗することができる。

40

## 【0047】

ピクセルが十分に分解されておらず、ピクセル間にまだいくらか干渉が存在する場合には、較正アルゴリズムを用いてこの干渉を説明することが可能である。したがって、較正は「グローバル」である。ピクセルは分解され、ピクセル間の干渉は小さくされうるので、干渉はピクセルが完全に分解されているという仮定でなされた最初の推測に対する反復補正として説明することができる。ピクセル間の干渉が弱いときには、生じる問題は健全なものであり、反復は急速に収束する。

## 【0048】

50

例えば、SLM内に較正すべきN個のピクセルがあるとする。各ピクセルはそれに印加される電圧によって駆動される。各ピクセルに対応するノ印加される電圧のベクトル  $V = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_N]^T$  を考える。この電圧はSLMピクセルミラー  $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_N]^T$  の傾斜に対応している。SLMの像はさらにCCDアレイ指示値  $D = [D_1 \ D_2 \ \dots \ D_N]^T$  の集合を生じるCCDアレイにおいて得られる。ここで、各値は相応するピクセルの幾何学的像により占有されたエリア上での測定の結果である。各ピクセルに関して、このピクセルに印加される電圧と結果として生じるピクセルミラーの傾斜  $\theta_i = \theta_i(V_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$  との間の依存性を調べたい。

【0049】

第1の例では、十分に分解されたピクセルがあり、反復の必要はない。このケースでは、各ピクセルに関するCCDアレイ指示値はこのピクセルの傾斜にしか依存せず： $D_i = D_i(\theta_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ 、この依存性は前もって知られている。それは、例えば、空中像シミュレーションから又は解析的に得られる。この依存性は一般に（局所的又は大域的に）反転させることができ、傾斜角度のCCD指示値に対する依存性が生じる： $\theta_i = \theta_i(D_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ 。この後者の依存性は各ピクセルの傾斜を印加電圧の関数として求めるのに使用される。

【0050】

第2の例では、あまり十分に分解されていないピクセルがあり、反復アルゴリズムが必要とされる。このケースでは、各ピクセルについて測定された値はこのピクセル及びその隣接ピクセルの傾斜に依存している： $D_i = D_i(\theta_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ 。各ピクセルミラーの傾斜の、このミラーに印加された電圧に対する依存性を調べるために、各ピクセルに同一の電圧を印加する。これらの均一な電圧に対してCCDアレイ指示値が測定され、各ピクセルミラーの傾斜を求めるために（以下で説明する）反復が行われる。つぎに、この電圧の値が変更され、すべての電圧値に関して各ピクセルミラーの傾斜が求められる。

【0051】

印加された各電圧  $V = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_N]^T$ （例えば、 $V = V_1 = V_2 = \dots = V_N$ ）に関して、相応する傾斜に対する或る程度妥当な初期推測  $\theta^{(0)}$  が評価され、その結果として生じるCCDアレイ指示値  $(D = [D_1 \ D_2 \ \dots \ D_N]^T)$  が測定される。空中像シミュレーションを用いれば、傾斜  $D^{(0)} = D(\theta^{(0)})$  に対する初期推測とヤコビ行列  $J(\theta^{(0)}) = D'(\theta^{(0)})$ （1階微分行列又は感度行列としても知られる）とから生じるCCDアレイ指示値を計算することができる。空中像シミュレーションから得られるこれらの量を用いて、初期推測に対する線形化された補正を計算し、次の（第1）反復を得る：

$$\theta^{(1)} = \theta^{(0)} + (J(\theta^{(0)}))^{-1} (D - D(\theta^{(0)}))$$

この反復は収束まで繰り返すことができる：

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + (J(\theta^{(k)}))^{-1} (D - D(\theta^{(k)}))$$

ここで、各反復に関して、 $D(\theta^{(k)})$  と  $J(\theta^{(k)})$  は空中像シミュレーションを用いて再計算しなければならない。これらの反復は完全にシミュレーションを介して行われ、（ハードウェア上での）物理的な反復はまったく不要である。

【0052】

反復の収束後には、印加電圧に応じた各ピクセルの傾斜を内容とする  $\theta^{(final)}$  が得られる。

【0053】

言い換えると、ピクセルがあまり十分に分解されていない場合には、隣接ピクセル間の干渉を分解するために反復を使用することができる。提案された方法はできるだけ分解能を良くすることに基づいているため、隣接ピクセル間の干渉は比較的小さな作用でなくてはならず、上記反復は急速に収束しなければならない。

【0054】

アポダイゼーションパターンに応じて、較正アルゴリズムはある範囲内の傾斜角度に対してはより良い精度を有することがある（較正のスイートスポット）。瞳内のアポダイゼ

10

20

30

40

50

ーションパターンを現在の傾斜に対応した距離だけシフトさせることによってこのスイートスポットを拡張して、現在の傾斜がつねにスイートスポットの近くにあるようにすることが可能である。これを実現する別の方法はアポダイゼーションパターンを変えずに、照明を傾斜させて、アポダイゼーションパターンに対して瞳内のフィールドがこのスイートスポット内に留まるようにすることである。

**【 0 0 5 5 】**

別の実施形態においては、シアリング干渉法において使用される位相ステップングに類似した技法を一般的なアポダイゼーションパターン（例えば、ナイフエッジ、又は（半）環状アポダイゼーションなど）で得られた像に適用することができる。すなわち、すべてのミラーの指令された傾斜の各々の値に対して複数の測定値を出さなければならない。各測定において、アポダイゼーションパターンはある一定の距離でシフトされる。各ピクセルに関して、これらの測定はシフトパラメータに対する測定された輝度の依存性を結果として示す。この依存性からは、ピクセルの傾斜を単一の測定の場合よりも良い精度で計算することができる。

10

**【 0 0 5 6 】**

例えば、参照されたシアリング干渉法では、剪断格子は格子線に対して垂直な方向においてある一定のステップで1つの格子ピッチだけシフトさせることができる。このような格子位置の各々に関して、シアリングインターフェログラムが測定される。このようなプロセス（位相ステップングと呼ばれる）の結果はインターフェログラムの族である。波面収差を求めるために単一のシアリングインターフェログラムを分析する代わりに、位相ステップング法は位相を段階的に変化させて測定したインターフェログラムの族を対象としている。位相を段階的に変化させたインターフェログラムは格子からの高次回折により生じた干渉の分離を可能にし、またフィールド内のどの点にも複数の測定値があるので測定の精度を上げる。

20

**【 0 0 5 7 】**

一般的パターンのシフトの距離については、距離は使用される特定のパターンに依存する。例えば、格子はその周期だけしかシフトさせることはできない。というのも、周期以上にシフトさせれば、測定が反復されるからである。非周期的パターンに関しては、瞳アポダイゼーションパターンは（瞳内で）任意の大きさであってよいが、これらのシフトがピクセル像にできるだけ強い変化を生じさせるようにパターンをシフトさせることが好ましい。例えば、ナイフエッジが使用されている場合、ことによっては好ましいナイフエッジのシフトの1つの規模は、ナイフエッジが瞳内の回折パターンの0次ローブの現在の最大位置と回折パターン内の最初のゼロの現在位置との間でシフトするようなものである。

30

**【 0 0 5 8 】**

さらに別の実施形態では、干渉はピクセルを部分ずつ較正することによって減少させることができる。例えば、チェス盤パターンは始めに白ピクセルを較正し、つぎに黒ピクセルを較正するために使用することができる。別の例は、アポダイゼーションパターンが1次元（1D）である場合である。このケースでは、ピクセル像縁部の1つの集合が（垂直又は水平に）十分に分解される。また別の例では、較正の際のピクセル間干渉作用を低減するために、始めは偶列に対して、つぎに奇列に対して較正を行ってもよい。

40

**【 0 0 5 9 】**

較正の際のピクセル間干渉の影響を減少させる別の方法としては、ピクセル像内の縁部付近に除外区域を設けることが挙げられる。結果として、各ピクセルに関して、像の中心に近くの輝度だけが測定され、その一方で（隣接ピクセルによって影響される）縁部付近の輝度は無視される。いくつかのアポダイゼーションパターンに対しては、除外区域はピクセル縁部の内のいくつかの付近にのみ適用するだけでよい。例えば、ピクセルミラーがY軸を中心として傾斜し、またアポダイゼーションがY軸に平行な線を有する剪断格子である場合、X軸に平行なピクセル像の縁部は十分に分解されるが、Y軸に平行な縁部の付近では比較的大きなスマアが生じる。したがって、比較的広い除外区域がY縁部の付近に適用されなければならない。

50

## 【 0 0 6 0 】

さらに別の実施形態としては、較正光学系及び光源エンベロープ内でマイケルソン干渉計を用いて、分解されたピクセルに対して参照波を供給することが挙げられる。

## 【 0 0 6 1 】

変化するピクセル傾斜に対するさまざまな位置での輝度

図 8 から 1 0 の記載全体を通して、投影光学系によって十分に分解された又は分解されていないピクセルの像（例えば、光の強さ）は、像のうちのどれくらいの部分が検出器面におけるピクセルの幾何学的像（幾何学的サイズ）の中に入るかによって決定される。十分に分解されたとは、ピクセルからの像が実質的に完全に幾何学的像の内部に入るため、隣接ピクセルからの像が実質的にまったく重ならない（干渉しない）ことを意味している。また、ピクセルからの像の十分な変調は、ピクセルが別の角度にあるときに検出器面に形成される像に比べて、ピクセルが既定角度にあるときに検出器面に形成される像が明確に区別されるという結果をもたらす。検出器面における像の輝度に分散があることが望ましい。各図には 1 つのピクセルしか示されていないが、このことは S L M 6 0 2 のすべてのピクセルについて当てはまるということが理解されなければならない。

10

## 【 0 0 6 2 】

図 8 には、投影光学系の瞳面における輝度のグラフ 8 0 2 と、検出器面における輝度のグラフ 8 0 4 が示されている。これらのグラフ 8 0 2 及び 8 0 4 は、S L M ピクセル 8 0 1 からの像が投影光学系（図示せず）によって分解されていないが、像の変調は投影光学系によって考慮されている場合を描写している。

20

## 【 0 0 6 3 】

グラフ 8 0 2 において、実線 8 0 6 はピクセル 8 0 1 の既定位置の輝度であり、破線 8 0 8 は所望の角度まで傾斜又は動かされたときのピクセル 8 0 1 の輝度である。線 8 1 0 は投影光学系によって捕捉された瞳の一部（ $+/-1$  開口数（NA））を表している。光の変調は傾斜の最中に線 8 0 6 と 8 0 8 の間で変化する輝度値によって示されている。

## 【 0 0 6 4 】

グラフ 8 0 4 において、実線 8 1 2 はピクセル 8 0 1 の既定位置の輝度であり、破線 8 1 4 は所望の角度で傾斜しているときのピクセル 8 0 1 の輝度である。分解の欠如は、各曲線が垂直線 8 1 6 の間にあるものとして描かれたピクセル 8 0 1 の幾何学的像のサイズをどれだけ超えているかによって示される。したがって、投影光学系はピクセル 8 0 1 によって形成される像のごく僅かな部分しか捕捉しないので、分解は存在しない。

30

## 【 0 0 6 5 】

図 9 には、投影光学系の瞳面における輝度のグラフ 9 0 2 と、検出器面における輝度のグラフ 9 0 4 が示されている。これらのグラフ 9 0 2 及び 9 0 4 は、S L M ピクセル 8 0 1 からの像が投影光学系（図示せず）によって十分に分解されているが、像の変調は投影光学系によって考慮されていない場合が描写している。したがって、ピクセル 9 0 1 からの像は十分に分解されているが、この像はピクセル 9 0 1 の動きには敏感でない。

## 【 0 0 6 6 】

グラフ 9 0 2 において、実線 9 0 6 はピクセル 9 0 1 が既定位置にあるときのピクセル 9 0 1 からの像の輝度であり、破線 9 0 8 はピクセル 9 0 1 が所望の角度まで傾斜又は動かされたときのピクセル 9 0 1 の像の輝度である。線 9 1 0 は投影光学系によって捕捉された瞳の一部（ $+/-1$  開口数（NA））を表しており、この瞳の一部はピクセル 9 0 1 の完全な分解を考慮して図 8 の場合よりも大きい。ピクセル 9 0 1 の傾斜角度が変化する間に投影光学系を通過する光の量が非常に少ないため、変調は存在しない（例えば、線 9 0 6 と 9 0 8 に対して同じ輝度値が得られる）。

40

## 【 0 0 6 7 】

グラフ 9 0 4 において、実線 9 1 2 はピクセル 9 0 1 が既定位置にあるときのピクセル 9 0 1 の像の輝度であり、破線 9 1 4 はピクセル 9 0 1 が所望の角度で傾斜しているときのピクセル 9 0 1 の像の輝度である。ピクセル 9 0 1 の幾何学的像は垂直線 9 1 6 の間にあるものとして示されている。2 つの線 9 1 2 と 9 1 4 とがあるが、変調が欠如している

50

ため、これらの線はグラフ 904 においては重なり合う。

【0068】

このように、図 8 では、投影光学系は変調を考慮しているが、各ピクセル 801 に対して低い分解を与えているのに対して、図 9 では、投影光学系は十分に分解されたピクセル像を考慮しているが、変調はほとんど考慮していない。対照的に、本発明のシステム 600 はアポダイズされた瞳 606 を有する投影光学系 608 を使用しており、このアポダイズされた瞳は、上述のように及び図 10 に関連して以下で説明されるように、十分に分解されたピクセル像と各ピクセル像の変調との両方を考慮することができる。

【0069】

図 10 には、本発明の 1 つの実施形態に従って、ピクセル 1001 の直下にある面にピクセル 1001 によって形成された像の輝度のグラフ 1002、アポダイズされた瞳（例えば、アポダイズされた瞳 606 の 1 つの例）、アポダイズされた瞳面におけるピクセル 1001 からの像の輝度のグラフ 1020、及び、検出器面におけるピクセル 1001 からの像の輝度変化のグラフ 1004 が示されている。

【0070】

グラフ 1002 において、実線 1006 はピクセル 1001 が既定位置にあるときのピクセル 1001 からの像の輝度であり、破線 1008 はピクセル 1001 が所望の角度まで傾斜又は動かされたときのピクセル 1001 の像の輝度である。線 1010 は投影光学系 608（図示せず）によって捕捉された瞳の一部（ $+/-1$  開口数（NA））を表しており、この瞳の一部はピクセル 901 の完全な分解を考慮して図 9 の場合と同様のサイズである。

【0071】

グラフ 1020 において、アポダイズされた瞳 606 を通過する像の結果は示されていない。基本的に、既定ピクセル位置線 1022 と傾斜ピクセル位置線 1024 とに対応する像の半分は、線 1006 及び 1008 に比べると、アポダイズされた瞳 606 によって遮断される。このことはグラフ 1004 に結果として表れている。グラフ 1004 では、ピクセル 1001 の幾何学的像が、垂直線 1016、ピクセル 1001 の既定位置に対する像の輝度を表す実線 1012、及び、所望の角度で傾斜したピクセル 1001 の像の輝度を表す破線 1014 の間にあることが示されている。したがって、線 1012 及び 1014 は完全に線 1016 の間に入るので、各ピクセル 1001 からの像の各々は十分に分解される。線 1012 と 1014 は異なる輝度値を有しているため、ピクセル 1001 のさまざまな傾斜角度での像は互いに対して変調されている。

【0072】

個々のピクセルが十分に分解されていれば、相応するピクセルミラーからの反射光の大部分はこのピクセルの像のエリア内に集中する。したがって、1 つの実施形態では、検出器 604 の 1 つのセクション（例えば、1 つの CCD セル）を用いて各ピクセル像を受け取ることができる。しかしながら、他の実施形態では、各ピクセル像が検出器 604 の 1 つより多くのセクション（例えば、複数の CCD ピクセル）によって受け取られてもよい。このケースでは、ピクセル像内での輝度の分布も測定することができる。この輝度の分布は付加的な情報を提供し、この付加的な情報に基づいて、精度の改善された較正アルゴリズムを設計することが可能である。

【0073】

入射瞳アポダイゼーションの代わりに又はそれに加えて、特別な照明モードを使用すれば、個々のピクセルを十分に分解する較正投影光学系 608 により結像されたピクセルを傾斜させることによって、傾斜によって変調するピクセル像が得られることが保証される。

【0074】

図 11 には、瞳面におけるピクセル 1101 から像の輝度のグラフ 1120 と、光ビーム 1100 が図示された方向でピクセル 1101 に入射する場合の検出器面におけるピクセル 1101 からの像の輝度値の変化のグラフ 1104 とが示されている。これらのグラ

10

20

30

40

50

フ 1 1 0 4 及び 1 1 2 0 は、S L M ピクセル 1 1 0 1 が投影光学系（図示せず）により十分に分解されているが、像の変調は投影光学系により考慮されていない場合を描写している。したがって、ピクセル 1 1 0 1 からの像は十分に分解されているが、この像はピクセル 1 1 0 1 の動きには敏感でない。

【 0 0 7 5 】

グラフ 1 1 2 0 において、実線 1 1 1 2 はピクセル 1 1 0 1 が既定位置にあるときのピクセル 1 1 0 1 の像の輝度であり、破線 8 1 4 はピクセル 1 1 0 1 を所望の角度まで傾斜させたときのピクセル 1 1 0 1 の像の輝度である。ピクセル 1 1 0 1 の傾斜角度が変化する間に投影光学系を通過する光の量が非常に少ないため、変調は存在しない（例えば、線 1 1 2 2 と 1 1 2 4 に対して同じ輝度値が得られる）。

10

【 0 0 7 6 】

グラフ 1 1 0 4 において、実線 1 1 1 2 はピクセル 1 1 0 1 が既定位置にあるときに形成される像の輝度であり、破線 1 1 1 4 はピクセル 1 1 0 1 が所望の角度で傾斜しているときに形成される像の輝度である。ピクセル 1 1 0 1 の幾何学的像は垂直線 1 1 1 6 の間にあるものとして示されている。2つの線 1 1 1 2 と 1 1 1 4 があるが、変調が欠如するため、これらの線はグラフ 1 1 0 4 においては重なり合う。

【 0 0 7 7 】

図 1 2 には、本発明の 1 つの実施形態に従って、瞳面におけるピクセル 1 2 0 1 からの像の輝度のグラフ 1 2 2 0 と、光ビーム 1 2 0 0 が図示された方向でピクセル 1 2 0 1 に入射するときの検出器面におけるピクセル 1 2 0 1 の像の輝度の変化のグラフ 1 2 0 4 と

20

が示されている。照明ビーム 1 2 0 0 は、ピクセル 1 2 0 1 からの 0 次回折パターンを較正投影光学系 6 0 8 の入射瞳の縁部にシフトさせる角度でピクセル 1 2 0 1 に当たるコヒーレントな平面波であってよい（ $\theta = 1$  のオフアクシスモノポールケーラー照明）。

【 0 0 7 8 】

グラフ 1 2 2 0 には、ピクセル 1 2 0 1 にある角度で当たる入射光 1 2 0 0 によって瞳内に形成された像の結果が示されている。基本的に、既定ピクセル位置線 1 2 2 2 と傾斜ピクセル位置線 1 2 2 4 とに対応する像の半分は、入射光 1 2 0 0 の入射角のゆえに形成されない。このことはグラフ 1 2 0 4 に結果として表れている。グラフ 1 2 0 4 では、ピクセル 1 2 0 1 の幾何学的像が、垂直線 1 2 1 6、ピクセル 1 2 0 1 の既定位置に対する像の輝度を表す実線 1 2 1 2、及び、所望の角度で傾斜したピクセル 1 2 0 1 の像の輝度を表す破線 1 2 1 4 の間にあることが示されている。したがって、線 1 2 1 2 及び 1 2 1 4 は完全に線 1 2 1 6 の間に入るので、各ピクセル 1 2 0 1 からの像の各々は十分に分解される。線 1 2 1 2 と 1 2 1 4 は異なる輝度値を有しているため、ピクセル 1 2 0 1 のさまざまな傾斜角度での像は互いに対して変調されている。この実施形態では、瞳のアボグアイゼーションは不要である。

30

【 0 0 7 9 】

適用例

マスクレスリソグラフィシステムの例では、個々のピクセルを分解し、それらを個別に及び同時に較正することで、リソグラフの模様印刷における精度の向上が見込まれる。これは個々のピクセルの各々が十分に分解されるようにすることにより為される。このことは、ピクセルからの反射光の大部分がサブストレート上のピクセルの像のエリア内に集中することを意味する。各ピクセル像の輝度を正確に集中させることで、隣接ピクセルの輝度との重なり（例えば、ピクセル間の干渉）が減少し、このことが隣接する模様又は模様の縁部のスミアリングを減少させる。したがって、これは従来の較正スキームを克服することができる。従来の較正機構では、ピクセルのグループが分解されるが、個々のピクセルは分解されず、グループ内の 1 つ又は 2 つのピクセルが誤って較正される余地を残していた。1 つ又は 2 つのピクセルしか誤って較正されないとしても、模様の縁部が著しく粗くなることもあり、それにより模様が所望の操作に対する許容範囲を超えてしまうことが起こりうる。

40

【 0 0 8 0 】

50

## 結論

上では本発明のさまざまな実施形態を説明したが、これらの実施形態は例示のためだけに提示されたものであり、限定のためではないことが理解されなければならない。本発明の精神及び範囲を逸脱することなく形状及び細部にさまざまな変更を行うことができることは当業者には明らかである。したがって、本発明の幅及び範囲は上記のいずれの例示の実施形態によっても限定されるべきでなく、以下の請求項及びそれと同等のものに従ってのみ定義されるべきものである。

### 【図面の簡単な説明】

【0081】

【図1】サブストレートをパターン成形するためにSLMアレイを照明する従来のシステムを示す。 10

【0082】

【図2】サブストレートをパターン成形するためにSLMアレイを照明する従来のシステムを示す。

【0083】

【図3】サブストレートをパターン成形するためにSLMアレイを照明する従来のシステムを示す。

【0084】

【図4】本発明の実施形態によるDMD SLMの1つのセクションのミラーの透視図を示す。 20

【0085】

【図5】本発明の実施形態によるSLM較正方法を描写したフローチャートを示す。

【0086】

【図6】本発明の実施形態によるシステムを示す。

【0087】

【図7】図6のシステム内の制御系のブロック図を示す。

【0088】

【図8】本発明に従って、SLMを出た光の強さのグラフと検出器における像の輝度のグラフを示す。

【0089】

【図9】本発明に従って、SLMを出た光の強さのグラフと検出器における像の輝度のグラフを示す。 30

【0090】

【図10】本発明にしたがって、SLMを出た光の強さのグラフ、アポダイズされた瞳、アポダイズされた瞳内での輝度のグラフ、及び、検出器における像の輝度の変化のグラフを示す。

【0091】

【図11】瞳における輝度のグラフと検出器における像の輝度の変化のグラフを示す。

【0092】

【図12】本発明に従って、瞳における輝度のグラフと、検出器における像の輝度の変化のグラフを示す。 40

### 【符号の説明】

【0093】

100 従来のシステム

200 従来のシステム

300 従来のシステム

400 ミラー

402 DMD SLM

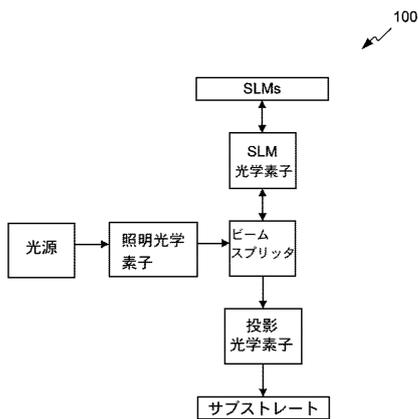
404 支持体

408 反射性ピクセル表面 50

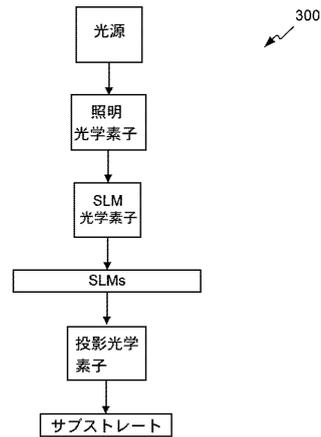
5 0 0	本発明による方法	
6 0 0	本発明によるシステム	
6 0 2	S L M	
6 0 4	検出器	
6 0 6	アボダイズされた瞳	
6 0 8	較正投影光学系	
6 1 0	制御系	
6 1 2	光ビーム	
6 1 4	光ビーム	
6 1 6	電圧値	10
6 1 8	像データ	
6 2 0	制御信号	
7 2 0	像データ記憶部	
7 2 2	電圧値記憶部	
7 2 4	相関装置	
7 2 6	結果信号記憶部	
7 2 8	制御装置	
7 3 0	結果信号	
7 3 2	索引付き結果信号	
8 0 1	S L Mピクセル	20
8 0 2	投影光学系の瞳面における輝度のグラフ	
8 0 4	検出器面における輝度のグラフ	
8 0 6	ピクセル8 0 1の既定位置の輝度	
8 0 8	所望の角度まで傾斜又は動かされたときのピクセル8 0 1の輝度	
8 1 2	ピクセル8 0 1の既定位置の輝度	
8 1 4	所望の角度で傾斜しているときのピクセル8 0 1の輝度	
8 1 6	垂直線	
9 0 1	ピクセル	
9 0 2	投影光学系の瞳面における輝度のグラフ	
9 0 4	検出器面における輝度のグラフ	30
9 0 6	既定位置にあるときのピクセル9 0 1からの像の輝度	
9 0 8	所望の角度まで傾斜又は動かされたときのピクセル9 0 1の像の輝度	
9 1 0	投影光学系によって捕捉された瞳の一部	
9 1 2	既定位置にあるときのピクセル9 0 1の像の輝度	
9 1 4	所望の角度で傾斜しているときのピクセル9 0 1の像の輝度	
9 1 6	垂直線	
1 0 0 1	ピクセル	
1 0 0 2	ピクセル1 0 0 1の直下にある面にピクセル1 0 0 1によって形成された像の輝度のグラフ	
1 0 0 4	検出器面におけるピクセル1 0 0 1からの像の輝度変化のグラフ	40
1 0 0 6	既定位置にあるときのピクセル1 0 0 1からの像の輝度	
1 0 0 8	所望の角度まで傾斜又は動かされたときのピクセル1 0 0 1の像の輝度	
1 0 1 0	投影光学系によって捕捉された瞳の一部	
1 0 1 2	ピクセル1 0 0 1の既定位置に対する像の輝度	
1 0 1 4	所望の角度で傾斜したピクセル1 0 0 1の像の輝度	
1 0 1 6	垂直線	
1 0 2 2	既定ピクセル位置線	
1 0 2 4	傾斜ピクセル位置線	
1 1 0 0	光ビーム	
1 1 0 1	ピクセル	50

- 1 1 0 4 光ビーム 1 1 0 0 が図示された方向でピクセル 1 1 0 1 に入射する場合の検出器面におけるピクセル 1 1 0 1 からの像の輝度値の変化のグラフ
- 1 1 1 2 既定位置にあるときのピクセル 1 1 0 1 の像の輝度
- 1 1 1 4 所望の角度で傾斜しているときに形成される像の輝度
- 1 1 1 6 垂直線
- 1 1 2 0 瞳面におけるピクセル 1 1 0 1 から像の輝度のグラフ
- 1 2 0 0 光ビーム
- 1 2 0 1 ピクセル
- 1 2 0 4 光ビーム 1 2 0 0 が図示された方向でピクセル 1 2 0 1 に入射するときの検出器面におけるピクセル 1 2 0 1 の像の輝度の変化のグラフ
- 1 2 1 2 ピクセル 1 2 0 1 の既定位置に対する像の輝度
- 1 2 1 4 所望の角度で傾斜したピクセル 1 2 0 1 の像の輝度
- 1 2 1 6 垂直線
- 1 2 2 0 瞳面におけるピクセル 1 2 0 1 からの像の輝度のグラフ
- 1 2 2 2 既定ピクセル位置線
- 1 2 2 4 傾斜ピクセル位置線

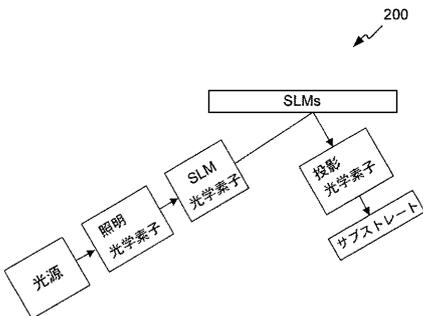
【 図 1 】



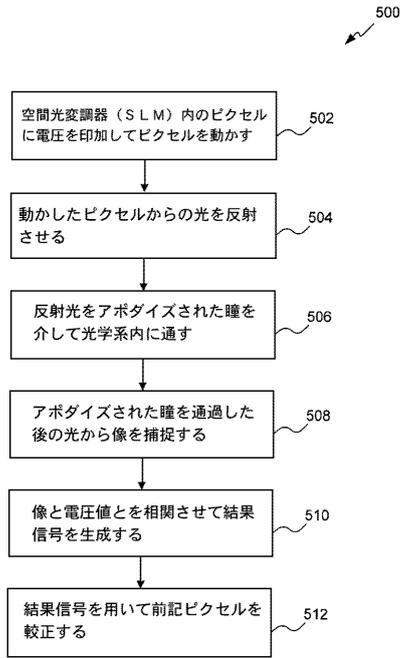
【 図 3 】



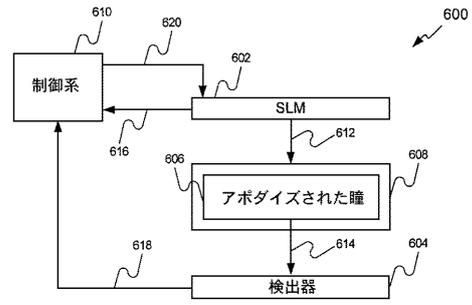
【 図 2 】



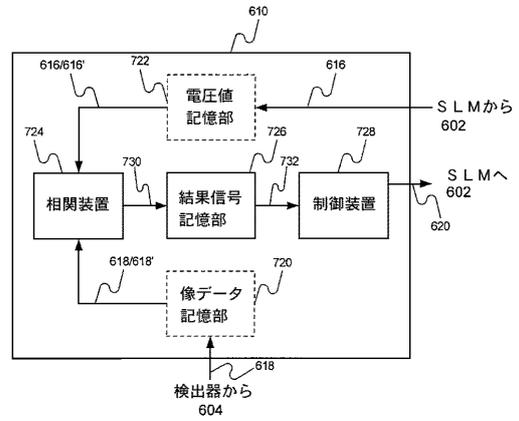
【図5】



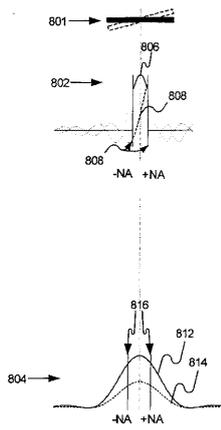
【図6】



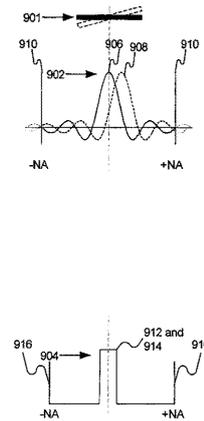
【図7】



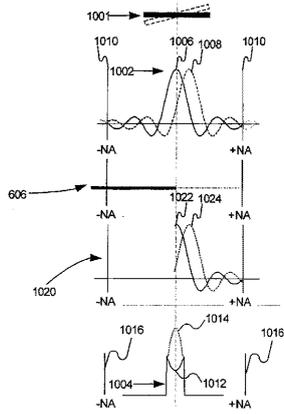
【図8】



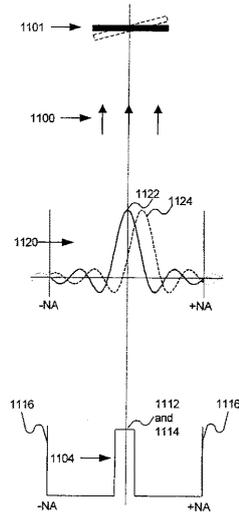
【図9】



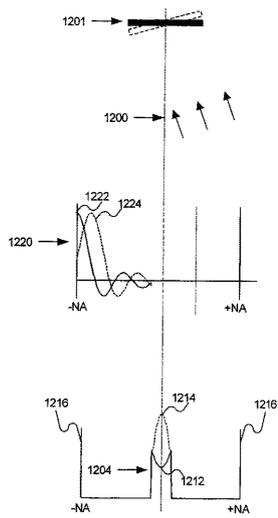
【 10 】



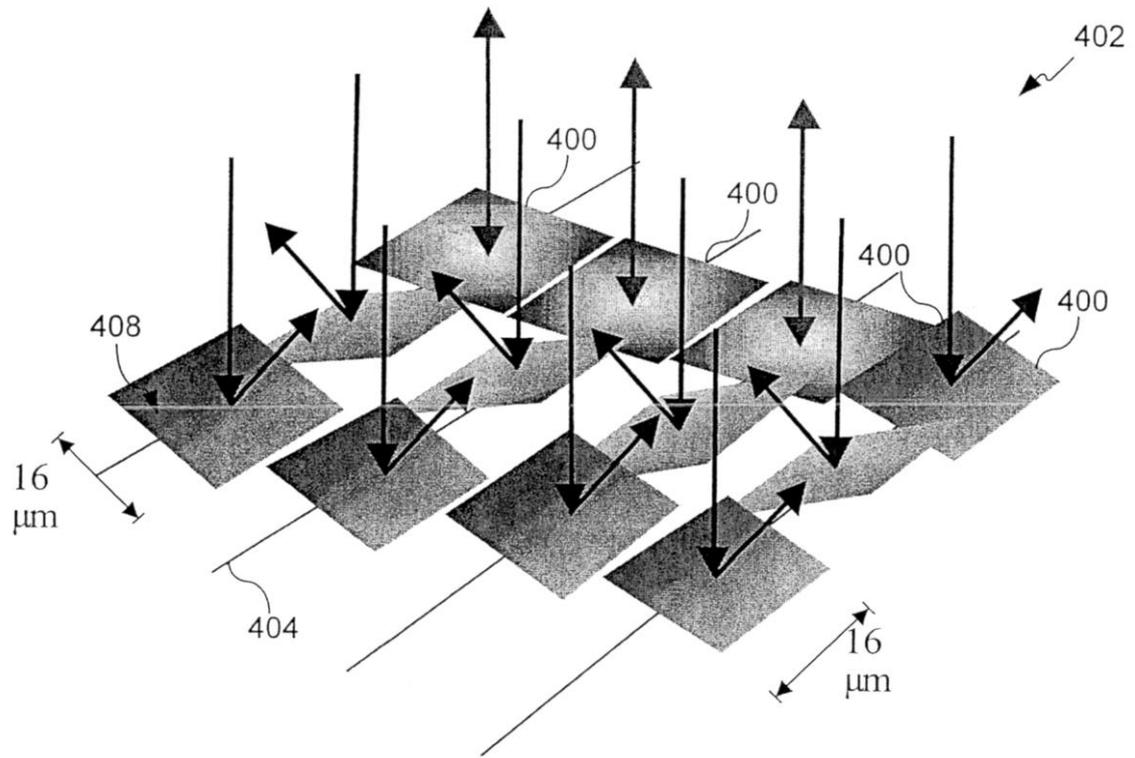
【 11 】



【 12 】



【 図 4 】



---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2002-372790(JP,A)  
特開平06-186504(JP,A)  
米国特許出願公開第2003/0137659(US,A1)  
国際公開第03/040830(WO,A1)  
国際公開第03/046665(WO,A1)  
特表2001-500628(JP,A)  
特開2002-367900(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L	21/027
G03F	7/20
G01M	11/00
G02B	26/08