

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7581351号
(P7581351)

(45)発行日 令和6年11月12日(2024.11.12)

(24)登録日 令和6年11月1日(2024.11.1)

(51)国際特許分類		F I	
G 0 3 F	7/20 (2006.01)	G 0 3 F	7/20 5 0 1
B 2 9 C	64/135 (2017.01)	B 2 9 C	64/135
B 2 9 C	64/393 (2017.01)	B 2 9 C	64/393
B 2 9 C	64/291 (2017.01)	B 2 9 C	64/291
B 3 3 Y	10/00 (2015.01)	B 3 3 Y	10/00
請求項の数 26 (全41頁) 最終頁に続く			
(21)出願番号	特願2022-536660(P2022-536660)	(73)特許権者	522235250
(86)(22)出願日	令和2年12月14日(2020.12.14)		フォトシンセティック・ペー・フェー
(65)公表番号	特表2023-505910(P2023-505910 A)		オランダ・1 0 9 8・イクスヘー・アム
(43)公表日	令和5年2月13日(2023.2.13)		ステルダム・サイエンス・パーク・1 2
(86)国際出願番号	PCT/EP2020/086056	(74)代理人	3
(87)国際公開番号	WO2021/116501		100108453
(87)国際公開日	令和3年6月17日(2021.6.17)	(74)代理人	弁理士 村山 靖彦
審査請求日	令和5年12月6日(2023.12.6)		100110364
(31)優先権主張番号	2024460	(74)代理人	弁理士 実広 信哉
(32)優先日	令和1年12月13日(2019.12.13)		100133400
(33)優先権主張国・地域又は機関	オランダ(NL)	(74)代理人	弁理士 阿部 達彦
		(72)発明者	アレキサンダー・コステンコ
			オランダ・1 0 9 8・イクスヘー・アム
			ステルダム・サイエンス・パーク・1 2
			3・フォトシンセティック・ペー・フェー
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 体積マイクロリソグラフィ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

体積マイクロリソグラフィの方法であって、
3 Dターゲット構造のデータ表現を受信するステップと、
感光媒体のある体積またはビルド体積内に複数の平面を決定するステップであって、前記複数の平面の各平面が、前記ビルド体積内の複数の深度のそれぞれの深度に関連付けられ、前記複数の深度が露光システムの光軸に沿って画定され、各平面が前記露光システムの焦点面の可能な位置に対応し、前記複数の深度における深度が互いに異なり、前記感光媒体が、前記感光媒体内の化学反応を開始するための活性化化合物であって、前記活性化化合物は、第1の波長の光によって活性化可能である、活性化化合物、および前記化学反応を阻害するための阻害化合物であって、前記阻害化合物は好ましくは、前記第1の波長とは異なる第2の波長の光によって活性化可能である、阻害化合物を含む、ステップと、
前記3 Dターゲット構造の形状、好ましくは前記感光媒体の特性および／または前記露光システムの仕様に基づいて、露光画像のシーケンスを算出するステップであって、前記露光画像のシーケンスの各露光画像が前記複数の平面の一平面に関連付けられ、各露光画像が、好ましくは強度変調光である前記第1の波長の光、および／または前記第2の波長の光を含む、ステップと、
前記複数の平面の少なくとも一部に基づいて、前記露光システムを制御して、前記露光システムの前記焦点面を、前記それぞれの平面に関連付けられた前記ビルド体積内の前記深度に配置し、前記それぞれの平面に関連付けられた前記露光画像によって前記ビルド体

積を照明するステップと、を含む方法。

【請求項 2】

前記感光媒体は、フォトレジスト、好ましくは光重合型フォトレジスト、光架橋フォトレジスト、または光分解フォトレジストを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記露光システムを制御して前記露光システムの前記焦点面を配置する前記ステップは、前記露光システムが前記露光システムの焦点距離を適応させ、ならびに／または前記露光システムに対して前記ビルド体積を移動させるステップを含む、請求項 1 または 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記露光システムを制御して前記それぞれの平面に関連付けられた前記露光画像によって前記ビルド体積を照明するステップは、

第 1 および／または第 2 の光源を制御して前記第 1 および／または第 2 の波長の光を生成し、空間光変調器を制御して前記露光画像に従って前記光を変調するステップと、

制御可能なディスプレイを制御して前記第 1 および／または第 2 の波長の光を前記露光画像に従ったパターンで生成するステップと、を含む、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 5】

好ましくは化学蒸着もしくは物理蒸着またはスパッタリングを使用して前記構造を最終オブジェクトに転写するステップをさらに含む、請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 6】

前記ビルド体積を複数のブロックに分割するステップであって、前記複数のブロックにおける各ブロックが前記露光システムの視野以下の横方向距離を有する、ステップと、

前記ビルド体積をブロックの寸法に従って前記横方向距離の 1 つまたは複数の方向に沿って前記露光システムに対して移動させるステップと、をさらに含む、

露光画像のシーケンスを算出する前記ステップは、前記複数のブロックの各ブロックについて露光画像のシーケンスを算出するステップをさらに含む、請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7】

前記 3D ターゲット構造は、複数の同一の点状、線状、またはシート状構造を備え、露光画像のシーケンスを算出する前記ステップは、前記点状、線状、またはシート状構造に従って前記化学反応を開始するためのカーネルを決定するステップであって、前記カーネルが好ましくは、前記第 1 の波長の光を符号化する 1 つまたは複数の画素と前記第 2 の波長の光を符号化する 1 つまたは複数の画素のパターンを含む、ステップと、前記露光画像のうちの 1 つまたは複数内で前記カーネルを繰り返すステップとを含む、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 8】

露光画像のシーケンス S_0 を算出する前記ステップは、感光媒体、好ましくは減衰感光媒体に投影される露光画像のシーケンスに起因する化学反応速度を予測するためのモデル M に基づいて露光画像のシーケンスを算出するステップを含み、好ましくは、前記算出するステップは、 $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解くステップを含み、この場合、 M^{-1} は M の逆行列であり、 $P_0(x, y, z)$ は、空間座標 $\{x, y, z\}$ を有する前記ビルド体積内のある位置におけるターゲット化学反応速度である、請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 9】

M は線形伝搬モデルと線形重合モデルの組合せであり、 $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解くステップは、 M の明示的な逆行列を算出するステップを含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

10

20

30

40

50

$S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解く前記ステップは、近似解 S_0 を反復的に算出するステップを含み、前記算出するステップは、前記ターゲット化学反応速度 P_0 と前記露光画像のシーケンス S_0 によって前記ビルド体積を照明することに起因して実現される化学反応速度 $P(S_0)$ との差を最小限に抑えるステップを含み、または $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解く前記ステップは、好ましくは畳み込みに基づいて M または M^{-1} の近似値を判定することを含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 11】

露光画像の光を検出するステップであって、前記光が、前記感光媒体と相互作用しており、好ましくは、前記光が前記感光媒体を透過するかまたは前記光が前記媒体によって反射もしくは散乱されるかまたは前記光が前記感光媒体によって再放出される、ステップと、前記検出された光を使用して前記感光媒体の光学特性を判定するステップと、をさらに含む、請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 12】

前記判定された光学特性と予測された光学特性との差に基づいて露光画像の前記算出されたシーケンスを更新するステップをさらに含む、請求項 11 に記載の方法。

【請求項 13】

露光画像のシーケンスを算出する前記ステップは、前記複数の平面の各平面について複数の露光画像を算出するステップであって、各露光画像が、複数の対物レンズの異なる対物レンズまたは前記ビルド体積に対して複数の位置の間を移動するように構成された対物レンズの異なる位置に関連付けられ、前記 1 つまたは複数の対物レンズが、前記ビルド体積を照明するように構成され、好ましくは、前記複数の対物レンズがそれぞれ前記複数の位置にあり、前記 1 つまたは複数の対物レンズの各々の開口数よりも大きい有効開口数を得るように構成される、ステップを含む、請求項 1 から 12 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 14】

体積マイクロリソグラフィシステム用の計算モジュールであって、計算モジュールによって具現化されるプログラムの少なくとも一部を有するコンピュータ可読記憶媒体と、プロセッサ、好ましくは前記コンピュータ可読記憶媒体に結合されたマイクロプロセッサとを備え、前記プロセッサが、コンピュータ可読記憶コードを実行することに応答して、実行可能な動作を実行するように構成される、計算モジュールにおいて、前記実行可能な動作は、

3D ターゲット構造のデータ表現を受信する動作と、

感光媒体のある体積またはビルド体積内に複数の平面を決定する動作であって、前記複数の平面の各平面が、前記ビルド体積内の複数の深度のそれぞれの深度に関連付けられ、前記複数の深度が、露光システムの光軸に沿って画定され、各平面が前記露光システムの焦点面の可能な位置に対応し、前記複数の深度における深度が互いに異なり、前記感光媒体が、前記感光媒体内で化学反応を開始するための活性化化合物であって、前記活性化化合物は、第 1 の波長の光によって活性化可能である、活性化化合物、および前記化学反応を阻害するための阻害化合物であって、前記阻害化合物は好ましくは、前記第 1 の波長とは異なる第 2 の波長の光によって活性化可能である、阻害化合物を含む、動作と、

前記 3D ターゲット構造の形状、ならびに好ましくは、前記感光媒体の特性および／または前記露光システムの仕様に基づいて、露光画像のシーケンスを算出する動作であって、前記露光画像のシーケンスの各露光画像が、前記複数の平面の一平面に関連付けられ、各露光画像が、好ましくは強度変調光である前記第 1 の波長の光、および／または前記第 2 の波長の光を含む、動作と、を含む計算モジュール。

【請求項 15】

前記 3D ターゲット構造は、複数の同一の点状、線状、またはシート状構造を備え、

露光画像のシーケンスを算出する前記動作は、前記点状、線状、またはシート状構造用のカーネルを決定する動作であって、前記カーネルが好ましくは、前記第 1 の波長の光を符号化する 1 つまたは複数の画素と前記第 2 の波長の光を符号化する 1 つまたは複数の画素を含むパターンである、動作と、各露光画像内および／または複数の前記露光画像内で

前記カーネルを繰り返す動作とを含む、請求項 14 に記載の計算モジュール。

【請求項 16】

露光画像のシーケンス S_0 を算出する前記動作は、減衰感光媒体内の露光画像のシーケンスに起因する化学反応速度を予測するためのモデル M に基づいて露光画像のシーケンスを算出し、好ましくは $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解く動作を含み、この場合、 M^{-1} は M の逆行列であり、 $P_0(x, y, z)$ は、空間座標 $\{x, y, z\}$ を有する前記ビルド体積内のある位置におけるターゲット化学反応速度である、請求項 14 に記載の計算モジュール。

【請求項 17】

M は線形伝搬モデルと線形重合モデルの組合せであり、 $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解く動作は、 M の明示的な逆行列を算出する動作を含む、請求項 16 に記載の計算モジュール。

【請求項 18】

$S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解く前記動作は、近似解 S_0 を反復的に算出する動作を含み、前記算出する動作は、前記ターゲット化学反応速度 P_0 と前記露光画像の前記シーケンス S_0 によって前記ビルド体積を照明することに起因して実現される化学反応速度 $P(S_0)$ との差を最小限に抑える動作を含み、または $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解く前記動作は、好ましくは畳み込みに基づいて M または M^{-1} の近似値を判定することを含む、請求項 16 に記載の計算モジュール。

【請求項 19】

体積マイクロリソグラフィ用の露光システムであって、
ビルド体積を保持するためのホルダであって、前記ビルド体積が感光媒体を含み、前記感光媒体が、前記感光媒体内の化学反応を開始するための活性化化合物であって、前記活性化化合物は、第 1 の波長の光によって活性化可能である、活性化化合物、および前記化学反応を阻害するための阻害化合物であって、好ましくは前記阻害化合物が、前記第 1 の波長とは異なる第 2 の波長の光によって活性化可能である、阻害化合物を含む、ホルダと、
光学機器であって、前記光学機器の光軸に平行な方向における前記ビルド体積の厚さと比較して薄い焦点深度を有する焦点面を形成するように構成された光学機器と、
前記ビルド体積に対する前記焦点面の位置に応じて前記第 1 の波長の露光画像を生成するための第 1 の画像形成モジュールと、
前記ビルド体積に対して前記焦点面の前記位置に応じて前記第 2 の波長の照明を生成するための第 2 の画像形成モジュールと、
前記第 1 および／または第 2 の波長の露光画像のシーケンスを定義する情報を受信するように構成されたプロセッサであって、前記露光画像のシーケンスの各露光画像が、前記光学機器の光軸に沿って前記ビルド体積内の深度に関連付けられるプロセッサと、を備え、各露光画像について、前記プロセッサが、
前記光学機器および／または前記ホルダを制御して光学系の前記焦点面を前記それぞれの露光画像に関連付けられた前記ビルド体積内の前記深度に配置し、
前記第 1 および／または第 2 の画像形成モジュールを制御して前記それぞれの露光画像によって前記ビルド体積を照明する、露光システム。

【請求項 20】

前記光学機器は、動的に調整可能な焦点距離を有する焦点面を形成するように構成された調整可能な光学機器であり、および／または前記ホルダは、前記光学機器に対して前記光軸に平行な方向に移動可能であるように構成される、請求項 19 に記載の露光システム。

【請求項 21】

前記第 1 の波長の露光画像を生成するための追加の画像形成モジュールであって、前記第 1 の画像形成モジュールが前記ビルド体積を照明する方向とは異なる方向から前記ビルド体積を照明するように構成された追加の画像形成モジュールをさらに備える、請求項 19 または 20 に記載の露光システム。

【請求項 22】

前記光学機器は、複数の対物レンズであって、前記対物レンズの各々の開口数よりも大きい有効開口数を別々に形成するように構成された対物レンズを備え、

前記露光画像のシーケンスは、同じ深度に関連付けられた前記複数の対物レンズの各々についての露光画像を含み、前記プロセッサは、前記それぞれの対物レンズに前記それぞれの露光画像を与えるように構成される、請求項 19 から 21 のいずれか一項に記載の露光システム。

【請求項 23】

前記光学機器は、対物レンズであって、前記ビルド体積に対して複数の位置の間を移動して前記対物レンズの開口数よりも大きい有効開口数を形成するように構成された対物レンズを備え、

前記露光画像のシーケンスは、同じ深度に関連付けられた前記対物レンズの複数の位置についての露光画像を含み、前記プロセッサは、前記対物レンズがそれぞれの位置に配置されたときに前記それぞれの露光画像を与えるように構成される、請求項 19 から 21 のいずれか一項に記載の露光システム。

【請求項 24】

露光システム用の制御モジュールであって、

第 1 および／または第 2 の波長の露光画像のシーケンスを定義する情報を受信するように構成されたプロセッサであって、前記露光画像のシーケンスの各露光画像が、光学機器の光軸に沿ってビルド体積内の深度に関連付けられるプロセッサを備え、各露光画像について、前記プロセッサが、

前記光学機器および／またはホルダを制御して光学系の焦点面を前記それぞれの露光画像に関連付けられた前記ビルド体積内の前記深度に配置し、

第 1 および／または第 2 の画像形成モジュールを制御して前記それぞれの露光画像によって前記ビルド体積を照明する、制御モジュール。

【請求項 25】

少なくとも 1 つのソフトウェアコード部を含むコンピュータプログラムもしくは一連のコンピュータプログラム、または少なくとも 1 つのソフトウェアコード部を記憶するコンピュータプログラム製品であって、前記ソフトウェアコード部が、コンピュータシステム上で実行されるときに請求項 1 から 13 のいずれか一項に記載の方法を実行するように構成される、コンピュータプログラムもしくは一連のコンピュータプログラム、またはコンピュータプログラム製品。

【請求項 26】

少なくとも 1 つのソフトウェアコード部を記憶する非一時的コンピュータ可読記憶媒体であって、前記ソフトウェアコード部が、コンピュータによって実行または処理されるときに少なくとも請求項 1 から 13 のいずれか一項に記載の方法を実行するように構成される、コンピュータ可読記憶媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、体積マイクロリソグラフィに関し、詳細には、限定はしないが、体積マイクロリソグラフィ用の方法およびシステム、ならびにそのような方法を使用するコンピュータプログラム製品に関する。

【背景技術】

【0002】

従来のフォトリソグラフィ技法では、光マスクを使用して平面形状の感光層の一部をある波長の放射光に露光させて感光層に光重合 2D 構造を形成する。このような技法は、2D 構造の高速実現を可能にし、この場合、解像度は回折限界によって限定される。光誘起非活性化による解像拡張 (RAPID) および光阻害超解像 (PINSR) などの高解像技法を使用して解像度をサブ回折限界まで高める場合がある。このような高解像度マスクレス技法は、光阻害剤を含む感光層をそれぞれに異なる波長の 2 つのレーザ光線に局所的

10

20

30

40

50

に露光させることを含む。1つのレーザ光線は、光重合を活性化し、他方のレーザ光線は、光重合を抑制する阻害剤を活性化する。このようにして、露光領域の外側での望ましくない光重合を抑制することができる。高解像度2D構造を実現することができるが、レーザ光線を使用した直接露光は本来低速である。さらに、このような2Dフォトリソグラフィ技法を用いて、各層を順次重ね合わせるように形成することによって浅い3D構造が実現される場合がある。そのようなプロセスは面倒であり、各層を慎重に位置合わせする必要がある、それによって解像度が影響を受けることがある。

【0003】

現在、3D構造を感光媒体内に直接実現するのを可能にするステレオリソグラフィ（SLA）および多光子フォトリソグラフィなどのマスクレス3Dフォトリソグラフィ技法が開発されている。これらの技法は、集束されるレーザ光線を使用して、一般にビルド体積と呼ばれる媒体の体積内で局所重合プロセスを開始する。これらの3Dフォトリソグラフィ技法は、マイクロ流体デバイス、マイクロオプティクス、および他の3次元マイクロスケールシステムおよびIC技術などのMEMSシステムのような分野において多数の潜在的な用途を有するが、現在の技法は依然として解像度および速度に関して欠点を有する。詳細には、解像度は、放射光が吸収され、連鎖成長が拡散し伝搬することに起因して、所望のゾーンの外側の重合によって影響を受ける。

【0004】

米国特許第4575330号明細書は、液体重合型媒体を含む容器内に位置する平面プラットフォームを備えるSLAリソグラフィシステムについて説明している。液体重合型媒体は、ある波長、通常UVにおいて高い吸光度を有する。プラットフォームは、媒体の表面の真下の高さに配置され、それによって、光重合型媒体の薄い表面層がプラットフォーム上に形成される。UVレーザ光線は、薄い表面層の一部を局所的に露光させるように制御され、それによって、プラットフォーム上に構造化された重合層が形成される。重合層が形成された後、この場合も、重合層の上方に光重合型媒体の薄い表面層が形成されるようにプラットフォームの高さが低くなる。このようにして、層ごとに3D構造を製造することができる。しかし、層ごとに製造すると3D構造の製造速度が著しく限定される。この技法は、表面粗さおよび機械的異方性などの他の不要な効果の影響も受ける。薄膜表面層を形成するための機械的に制御可能で高度に安定したプラットフォームが必要であることに起因してこのプロセスはさらに複雑になる。

【0005】

同様に、米国特許出願公開第2005/0254035号明細書では、特別に設計された感光媒体において多光子吸収プロセスを使用する多光子リソグラフィシステム（直接レーザリソグラフィシステムとも呼ばれる）であって、感光媒体がスペクトルの近赤外線（NIR）領域において高い吸光度を有する多光子リソグラフィシステムについて説明している。光重合反応は、短時間のうちに光開始剤分子によって吸収された複数の光子と相互作用が生じたときにのみ開始される。この技法は、感光媒体のビルド体積内の任意の位置における光重合を可能にする。このようにして、3Dナノ構造およびマイクロ構造を製造することができる。この技法は、媒体内のある位置を露光させるための高強度集束パルス生成するレーザ光源を正確に制御する必要がある。小さいディテールを有する構造を実現することができるが、この技法は低速であり、非常に小さい3Dマイクロ構造およびナノ構造に限定される。

【0006】

したがって、上記の点から、公知のマスクレス3Dフォトリソグラフィ技法は、速度が不十分になり、解像度が不十分になっており、ならびに／または大量生産向けにスケールアップできなくなっている。したがって、当技術分野では、好ましくは平面形状感光媒体において高解像度3D構造の高速実現を可能にする改良された方法およびシステムが必要である。詳細には、場合によっては平面形状の感光媒体における3D構造のスケールアップ可能な高速実現を可能にする高解像度、好ましくはミクロンまたはサブミクロン解像度のフォトリソグラフィ技法が必要である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【文献】米国特許第4575330号明細書

【文献】米国特許出願公開第2005／0254035号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

本発明の課題は、従来技術において公知の欠点のうちの少なくとも1つを軽減または解消することである。詳細には、本開示における実施形態の目的は、マイクロスケールデバイス
10
を高速に3次元製造するための方法を提供することである。この開示の実施形態は、
フォトリソグラフィにおいて実現できる複雑さと比較して印刷可能な構造の複雑さを高めるのを可能にする。詳細には、本出願で説明する実施形態の方法およびシステムは、（デジタル）投影システム、好ましくはマスキレス投影システムによって、高解像度任意形状
20
3次元構造を高速に形成するのを可能にし、マスキレス投影システムは、感光媒体内の一連の深度に集束される1つまたは複数の波長の光を含む露光画像のシーケンスに感光媒体を露光させるように構成される。したがって、露光システムは、深度の範囲に対応する一連の焦点面を画定する。深度の範囲内の各焦点面に到達するために、光は感光媒体の少なくとも一部内を伝搬してもよい。好ましくは、このシステムは、動的に調整可能な焦点距離を有する光学素子を備え、焦点面を、感光媒体内を高速に移動させるのを可能にする。
20
実際、共焦点顕微鏡法向けに開発された撮像システムが、このような製造方法を促進するためのいくつかの変更を加えて使用されてもよい。さらに、重合反応を能動的に終了または阻害するのを可能にする技法は、新規の微細加工技法の定義を拡張するのに適した方法を提供する。このシステムは、そのような方法を実行するためのコンピュータを含んでもよい。

【課題を解決するための手段】

【0009】

一態様では、本発明は、ポリマー3Dターゲット構造などの3Dターゲット構造を感光媒体内に形成するための体積マイクロリソグラフィの方法に関してもよい。この方法は、3Dターゲット構造のデータ表現を受信するステップと、感光媒体のある体積またはビルド
30
体積内に複数の平面を決定するステップであって、複数の平面の各平面が、ビルド体積内の複数の深度のそれぞれの深度に関連付けられ、複数の深度が露光システムの光軸に沿って画定される、ステップとを含んでもよい。平面は、露光システムの焦点面の可能な位置に対応してもよい。好ましくは、複数の深度における各深度は互いに異なる。感光媒体は、感光媒体内の化学反応を開始するための活性化化合物を含んでもよく、活性化化合物は、第1の波長の光によって活性化可能である。一実施形態では、感光媒体は、感光媒体内の化学反応を阻害するための阻害化合物をさらに含んでもよく、阻害化合物は、第1の波長とは異なる第2の波長の光によって活性化可能である。この方法は、3Dターゲット構造の形状、好ましくは感光媒体の特性および／または露光システムの仕様に基づいて、露光画像のシーケンスを算出するステップであって、露光画像のシーケンスの各露光画像
40
がビルド体積内の複数の平面の一平面に関連付けられる、ステップをさらに含んでもよい。各露光画像は、第1の波長の光および／または第2の波長の光に関連付けられてもよい。一実施形態では、光は強度変調光であってもよい。この方法は、露光システムを制御して、複数の平面の少なくとも一部に基づいて、露光システムの焦点面をそれぞれの平面に関連付けられたビルド体積内の深度に配置し、それぞれの平面に関連付けられた露光画像によってビルド体積を照明するステップをさらに備えてもよい。

【0010】

感光媒体の特性は、光学特性および化学特性を含んでもよい。光学特性は、吸光、屈折、または散乱および場合によっては媒体の光に対する反応のうちの1つまたは複数を含んでもよい。化学特性は、化学反応速度に依存する光強度を含んでもよい。算出するステッ
50

ブは、一般に、点拡がり関数、光学伝達関数、またはインパルス応答として表される露光システムの光学仕様に基づいてもよく、この光学仕様は、ビルド体積内部の光伝搬の形状を決定する。露光システムの光学仕様は、焦点深度、空間解像度、および（光源）光強度のうちの1つまたは複数を含んでもよい。

【0011】

体積マイクロリソグラフィに使用される技法および機器は共焦点顕微鏡法に使用される技法および機器と同様である場合があるので、体積マイクロリソグラフィは共焦点リソグラフィと呼ばれることもある。

【0012】

一実施形態では、ビルド体積内の複数の平面の各々が露光システムの光軸に垂直または実質的に垂直に向けられてもよい。

10

【0013】

一実施形態では、3Dターゲット構造は、基本的に平面形状の3D構造、すなわち、1つの次元、一般的には露光システムの光軸（たとえば、z軸）の方向における次元において、他の2つの次元、一般的には左右の次元（すなわち、光軸に垂直な平面、たとえばx-y平面における次元）よりも実質的に小さいオブジェクトに関係付けられてもよい。そのような3D構造は、たとえば、微小電気機械システム（MEMS）、マイクロ流体システム、電池および太陽光発電を含む多数の用途において使用されてもよい。3Dターゲット構造は最終オブジェクトのポジティブ画像またはネガティブ画像であってもよい。たとえば、最終オブジェクトは、構造自体とすることができ、または3Dターゲット構造によって形成された空き空間に異なる材料を充填することによって形成されてもよく、3Dターゲット構造は基本的に型として働く。構造を3Dターゲット構造から最終オブジェクトに転写することは、物理蒸着もしくは化学蒸着、スパッタリング、成形、または電気メッキなどの様々な公知の技法を使用して実現することができる。

20

【0014】

露光システムは焦点深度を画定してもよい。好ましくは、焦点深度は、ビルド体積の厚さと比較して小さい。ビルド体積は、露光システムの光軸に平行な方向に厚さを有してもよく、光軸に垂直な方向に横方向距離を有してもよい。

【0015】

露光画像のシーケンスにおけるある露光画像は、3Dターゲット構造と露光画像のシーケンスにおける他の露光画像の両方に依存し、通常、露光画像のシーケンス全体に依存してもよい。

30

【0016】

第1の波長の露光画像は、活性化露光画像であってもよく、第2の波長の露光画像は阻害露光画像であってもよい。したがって、ビルド体積を露光画像のシーケンスによって照明するステップは、ビルド体積をそれぞれの平面に関連付けられた活性化露光画像および／または阻害露光画像によって照明するステップを含んでもよい。ある深度に関連付けられた第1の波長の露光画像による照明と同じ深度に関連付けられた第2の波長の露光画像による照明は、露光システムにおける適切な光学機器および／もしくは適切な画像形成モジュールを使用して同時に実行されてもよく、または別々に実行されてもよい。

40

【0017】

一実施形態では、感光媒体は、第1および第2の波長の光に対して実質的に透過的である。実際、このことは、第1および第2の波長の光が、それぞれ化学反応を開始、阻害するのに十分な強度で光学機器から最も離れたビルド体積の層に到達し得ることを意味する場合がある。したがって、ビルド体積全体が、ほぼ瞬時に照明されるか、または少なくともほぼ並行に照明される場合がある。したがって、この方法は、従来の3D印刷またはステオリソグラフィのように3D構造が層ごとに形成される方法よりもずっと高速である。

【0018】

この方法のさらなる利点は、超解像効果が得られる場合があり、したがって、露光システムの解像度よりも高い解像度を有するオブジェクトが形成されることである。露光シス

50

テムの解像度は、システムの回折限界またはその他の限界によって限定される場合がある。そのような超解像効果は、たとえば、光阻害超解像リソグラフィまたは超解像（共焦点）顕微鏡法の分野から知られている。このような効果は、第1の波長の光と第2の波長の光の相互作用によって得られてもよい。（光学）露光システムの限定された解像度、たとえば、露光システムのインパルス応答または点拡がり関数が、露光画像のシーケンスの算出の基礎となる数学モデルにおいて考慮される場合、このような超解像効果は追加の効果なしに得られる場合がある。

【0019】

したがって、露光システムの焦点面を露光システムの変更にすることによって光学的に感光媒体のビルド体積内で移動させてもよく、またはビルド体積全体を光学系に対して移動させることによってビルド体積内で移動させてもよい。このようにして、従来のステレオリソグラフィシステムにおいて行われるように、各層が、次の層が形成される前に硬化されるのを待つ必要なしに3D構造全体が形成される場合がある。露光画像の光は、焦点面上に集束されるが、ビルド体積全体を照明する。したがって、ビルド体積内の一平面についての露光画像の決定は、対応する深度において構築すべきオブジェクトの形状だけでなく、光学系のインパルス応答にも依存し、他の平面および露光画像におけるオブジェクトの形状は、（少なくとも）隣接する平面について算出される。

【0020】

本出願では、リソグラフィは、光硬化性樹脂またはフォトレジストなどの感光媒体を1つもしくは複数の露光画像または光パターンによって照明することによって2次元または3次元構造を形成するための方法を指す場合がある。場合によっては、このプロセスは、構造の現像、物理蒸着、成形、またはエッチングなどのパターンまたは構造転写ステップを含んでもよい。

【0021】

本出願では、「光」は任意の波長の電磁放射を指すことがあり、詳細には可視スペクトル、近赤外線、中赤外線、または遠赤外線スペクトル、および近紫外線、中紫外線、または遠紫外線スペクトルにおける電磁放射を指す場合がある。

【0022】

一実施形態では、感光媒体は、フォトレジストを含み、好ましくは高コントラストフォトレジストを含む。フォトレジストは、光重合型フォトレジスト、光分解フォトレジスト、光架橋フォトレジスト、または任意の他の種類の適切なフォトレジストであってもよい。感光媒体は、固体媒体、ゲル状媒体、または液体媒体であってもよい。たとえば、フォトレジストは、2つの波長によって制御される光架橋フォトレジストであってもよく、第1の波長は、結合の形成を刺激してもよく、第2の波長は、形成を減速させるか、または場合によってはすでに形成された結合を破壊してもよい。フォトレジストは、光分解フォトレジストとすることもでき、その場合、第1の波長は、化学結合を除去してもよく、第2の波長は、結合の除去を減速させるか、または場合によっては結合の再形成を刺激してもよい。

【0023】

一実施形態では、感光媒体は、光重合型媒体である。光重合型媒体は、第1の波長において活性化可能な光開始剤を含んでもよい。光重合型媒体は、第2の波長において活性化可能な光阻害剤を含んでもよい。光重合型媒体は、照明のそれぞれの異なる波長に反応する種を含んでもよい。放射光の2つ以上の異なる波長によって照明されたときに化学反応を開始させ、同時に化学反応を阻害するかまたは終了させる種が含まれてもよい。光重合型媒体は、たとえば、フリーラジカル重合、カチオン重合、アニオン重合、または酸触媒重合、または任意の他の適切な種類の反応に基づく場合がある様々な種類の化学システムを含んでもよい。光重合型媒体は、ある期間にわたってある強度の放射光に露光されたときに重合反応に参与する化学種を生成する場合がある光開始剤成分を含んでもよい。反応速度は、数あるパラメータの中で、光開始剤の濃度、光開始剤の量子収量、および光開始剤によって吸収される照明エネルギーの量に依存する場合がある。特定の波長の照明に対

10

20

30

40

50

する光開始剤感度を向上させるために、光増感剤が使用されてもよい。

【0024】

一実施形態では、ビルド体積に対して焦点面を移動させるステップは、焦点距離を動的に適応させるステップを含んでもよい。この目的のために、露光システムは、動的に調整可能な焦点距離を有する対物レンズを含んでもよい。これによって、たとえば、空間光変調器によって生成された露光画像または照明画像をビルド体積内のそれぞれに異なる深度に位置する一連の焦点面内に高速に集束させることが可能になる。一実施形態では、このことは、たとえば高速ピエゾフォーカスシステム（PIFOC）または液体動的焦点レンズを使用して実現されてもよい。これらは、共焦点顕微鏡法に使用される要素であってもよい。

10

【0025】

一実施形態では、ビルド体積に対して焦点面を移動させるステップは、露光システムに対してビルド体積を保持するホルダを好ましくは露光システムの光軸に平行な方向に移動させるステップを含む。そのようなシステムは、比較的単純な光学機器を有してもよい。システムは、たとえば、ステッピングモータを使用する、好ましくはサブミクロン位置決め精度を有するモータ駆動段を備えてもよい。

【0026】

一実施形態では、光重合反応の阻害が、第2の波長の光による照明を介して制御されずに、体積のあらゆる部分において概ね一定の割合で光重合を阻害する薬剤に関連付けられるシステムにおいて共焦点または体積マイクロリソグラフィ方法が使用されてもよい。そのような「単一波長」方法は有利には、いわゆる高コントラストフォトレジストと組み合わせることができる。高コントラストフォトレジストは累積光強度により急激に反応し、たとえば、固体-液体界面または重合-非重合界面のより鮮明な境界を実現するのを可能にする

20

【0027】

一実施形態では、露光システムは、画像形成モジュールを備えてもよく、画像形成モジュールは、光源と、空間光変調器とを備えてもよく、または制御可能なディスプレイを備えてもよい。一実施形態では、露光システムを制御してそれぞれの平面に関連付けられた露光画像によってビルド体積を照明するステップは、第1および／または第2の光源を制御して第1および／または第2の波長の光を生成し、空間光変調器を制御して露光画像に従って光を変調するステップを含んでもよい。露光システムを制御してそれぞれの平面に関連付けられた露光画像によってビルド体積を照明するステップはまた、制御可能なディスプレイを制御して第1および／または第2の波長の光を露光画像に従ったパターンで生成するステップを含んでもよい。パターンは、（2次元）空間情報と強度情報の両方を含んでもよい。

30

【0028】

一実施形態では、この方法は、好ましくは化学もしくは物理蒸着またはスパッタリングを使用して構造を転写するステップをさらに含んでもよい。場合によっては、この方法は構造を現像するステップをさらに含んでもよい。このようにして、金属または半導体などのそれぞれに異なる材料の構造が形成されてもよい。

40

【0029】

一実施形態では、この方法は、ビルド体積を複数のブロックに分割するステップであって、複数のブロックにおける各ブロックが露光システムの視野以下の横方向距離を有する、ステップと、ビルド体積をブロックの寸法に従って横方向距離の1つまたは複数の方向に沿って露光システムに対して移動させるステップとをさらに含んでもよい。そのような実施形態では、露光画像のシーケンスを算出するステップは、複数のブロックの各ブロックについて露光画像のシーケンスを算出するステップを含んでもよい。

【0030】

露光システムの視野に基づいてビルド体積をブロックに分割することによって、視野よりも大きい横方向距離を有するオブジェクトが形成されてもよい。次いで、感光媒体をブ

50

ロックごとに照明することによって3Dターゲット構造が形成されてもよい。一実施形態では、ブロックについての露光画像のシーケンスを算出するステップは、隣接するブロックについての露光画像のシーケンスに依存してもよい。

【0031】

一実施形態では、3Dターゲット構造は、複数の同一の点状、線状、またはシート状構造を備えてもよい。その場合、露光画像のシーケンスを算出するステップは、点状、線状、またはシート状構造に従って化学反応を開始するためのカーネルを決定するステップであって、カーネルが好ましくは、第1の波長の光を符号化する1つまたは複数の画素と第2の波長の光を符号化する画素のパターンを含む、ステップを含んでもよい。算出するステップは、露光画像のうちの1つまたは複数内でカーネルを繰り返すステップをさらに含んでもよい。一実施形態では、化学反応、たとえば重合を点状、線状、またはシート状構造に局所化するために、第1の波長の光を符号化する画素が、第2の波長の光を符号化する画素によって囲まれてもよい。

【0032】

したがって、ビルド体積全体またはビルド体積の実質的な部分について計算モデルを明示的に解くことなく比較的単純な構造が形成されてもよい。カーネルは、たとえば、露光システムのインパルス応答または点拡がり関数に基づいて事前に算出されてもよい。カーネルは一般に、露光画像よりもずっと小さく、すなわち、露光画像よりも画素がずっと少ない。カーネルは、露光画像が関連付けられ、露光画像が集束される複数の深度に基づいて、2次元であっても、または露光画像のシーケンスが第3の次元を画定する3次元であってもよい。カーネルに基づく計算は、疎な3Dターゲット構造を形成する場合に特に効率的であり得、ビルド体積の様々な部分が相互に影響を及ぼすことはほとんどまたはまったくない。

【0033】

一実施形態では、露光画像のシーケンス、好ましくは最適なシーケンスを算出するステップは、ターゲット化学反応速度、たとえば、ビルド体積の各点における重合速度 $P_0(x, y, z)$ の判定に基づいてもよい。算出するステップは、重合速度 P の数学モデルおよび放射伝搬 R のモデルに基づいて露光画像のシーケンス $S_0(x, y, z)$ の深度依存強度を判定するステップをさらに含んでもよい。露光画像のシーケンス $S_0(x, y, z)$ は、画像形成モジュール、たとえば、空間光変調器または制御可能なディスプレイによって生成される画像のシーケンスを表してもよく、この場合、各露光画像が、深度 z における焦点面についての xy 平面上に画定される。露光画像は焦点面上に集束されるが、露光画像はビルド体積の深度または厚さ全体を照明してもよい。したがって、ビルド体積の各部分における累積光強度を算出するには、露光画像のシーケンス全体を考慮しなければならない。

【0034】

各（焦点）平面に関連付けられた露光画像が他の平面における（累積）光強度に影響を及ぼす場合があるので、場ごとの算出ではなく、単一の手順における露光画像のシーケンス全体を算出すると有利である。詳細には、総強度または累積強度は、露光画像のシーケンスにおけるすべての露光画像の効果を重ね合わせた効果と見なされてもよい。集束する円錐の空間効果、および感光媒体の光学特性に起因して、この効果は複数の平面における平面ごとに異なる場合がある。

【0035】

重合速度モデル $P[L]$ は、累積照度 $L(x, y, z)$ を仮定してビルド体積内部の各点において実現される重合速度 $P(x, y, z)$ を予測してもよい。照度 $L(x, y, z)$ は、露光画像のシーケンス $S(x, y, z)$ が画像形成モジュールによって生成されたと仮定して放射光伝搬モデル $R[S]$ によってビルド体積内部の各点において予測されてもよい。この文脈では、照度は、露光画像のシーケンスのすべての露光画像にわたる累積強度である。

【0036】

一実施形態では、露光画像のシーケンス S_0 を算出するステップは、感光媒体、好ましくは減衰感光媒体に投影される露光画像のシーケンスに起因する化学反応速度を予測するためのモデル M に基づいて露光画像のシーケンスを算出するステップを含んでもよい。好ましくは、算出するステップは、 $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解くステップを含む。この場合、 M^{-1} は M の逆行列であり、 $P_0(x, y, z)$ は、空間座標 $\{x, y, z\}$ を有するビルド体積内のある位置におけるターゲット化学反応速度である。

【0037】

一実施形態では、 M は線形伝搬モデル R と線形重合モデル P の組合せであり、 $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解くステップは、 M の明示的な逆行列を算出するステップを含む。明示的な逆行列は、高い精度を有することがあるが、計算要求が高い場合があり、常に数学的または計算的に可能であるとは限らない。

10

【0038】

一実施形態では、 $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解くステップは、近似解 S_0 を反復的に算出するステップを含んでもよく、算出するステップは、ターゲット化学反応速度 P_0 と露光画像のシーケンス S_0 によってビルド体積を照明することに起因して実現される化学反応速度 $P(S_0)$ との差を最小限に抑えるステップを含む。反復解は、柔軟であり比較的实施が容易である解とすることができるが、計算時間と精度のバランスを取ることが必要になる場合がある。

【0039】

一実施形態では、 $S_0 = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解くことは、好ましくは畳み込みに基づいて M^{-1} の近似値を判定することを含んでもよい。そのような近似逆行列は、比較的高速であり、受け入れられる精度を有する場合がある。

20

【0040】

重合速度を露光の時間にわたって積分すると、形成された共有結合と体積要素におけるそのような結合の最大可能数との割合として定義されるモノマー転化率が与えられる。モノマー転化率は、Torres-Knoop による後述の論文および Kryven による第2の論文に記載されたゲル画分に直接置き換えることができる。このゲル画分は、各体積要素における硬化された樹脂のいわゆる硬度を特徴付ける。照明された体積要素は、モノマー転化率がある臨界値に達した直後に硬化する。

【0041】

一実施形態では、反応分子動力学を使用して重合速度モデル P が実施されてもよい。そのようなモデルは、Torres-Knoop, A による論文 *Soft matter* 14. 17 (2018) : 3404~3414. <https://doi.org/10.1039/c8sm00451j> に記載されており、この論文は、本明細書では参照により本出願に組み込まれている。別の実施形態では、重合速度モデル P は、動的ランダムグラフ技法に基づくモデルでもよく、動的ランダムグラフ技法は、反応分子動力学の解析的近似である。この技法は、Kryven による2つの論文 *I. Phys. Rev. E* 94. 1 (2016) : 012315 および *I. J. Math. Chem* (2018) 56 : 140 に記載されており、これらの論文は、本明細書では参照により本出願に組み込まれている。

30

【0042】

一実施形態では、重合速度モデル P は、タイプ $P[L] = \sum \alpha_i L_{\lambda_i} - \alpha_0$ の単純な線形近似、たとえば、いくつかの比例係数 α_i による L_{λ_i} 、すなわち照度の単色成分の和を介して実施されてもよい。媒体にある形態の光阻害剤が含まれるとき、二重波長重合モデル $P[L] = \alpha L_{\lambda_1} - \beta L_{\lambda_2} - \gamma$ を実施できることが多く、この場合、 L_{λ_1} および L_{λ_2} は、重合の速度を速くするかまたは遅くすることに関与する照度である。光阻害剤によって吸収される第2の波長を導入して、焦点面の外側で吸収される放射光によって誘起される光重合を補償することができる。この場合、「ポジティブ」露光および「ポジティブ」画像は、光重合型媒体における光重合反応またはフォトレジストにおける類似プロセスを開始することに関連付けられた露光に関し、一方「ネガティブ」露光および「ネガテ

40

50

ィブ」画像は、光重合または類似のプロセスを阻害することに関連付けられた露光に関する。

【0043】

一実施形態では、放射光伝搬モデル R は、露光画像のシーケンス $S(x, y, z)$ に対応するビルド体積内の累積照度 $L(x, y, z)$ を予測するが、幾何光学近似（すなわち、レイトレーシング）または波動光学特性（たとえば、放射輸送方程式）に基づくモデルであってもよい。両方のモデル R および P を組み合わせて、露光画像のシーケンスと重合速度との関係 $P(x, y, z) = P[R[S(x, y, z)]]$ または $P(x, y, z) = M[S(x, y, z)]$ を求めることができる。この場合、 M は結合モデルである。ターゲット重合速度 $P_0(x, y, z)$ を実現するのに必要な露光画像の最適シーケンス $S_0(x, y, z)$ を事前に算出するために、結合モデルについて逆問題を解いてもよい。この解は、線形代数の方法を明示型で（たとえば、逆行列として）使用して算出するか、または反復的に最適化アルゴリズム（たとえば、最急降下法）を使用して算出することができる。

10

【0044】

一実施形態では、伝搬モデル R は、光収差、散乱効果、および回折効果、たとえばエアリーディスク効果を含んでもよい。そのようなモデルを使用して逆行列を算出すると、超解像効果が実現される場合がある。

【0045】

一実施形態では、この方法は、露光画像の光を検出するステップであって、光が、感光媒体と相互作用しており、好ましくは、光が感光媒体を透過するかまたは光が媒体によって反射もしくは散乱されるかまたは光が感光媒体によって再放出される、ステップと、検出された光を使用して感光媒体の光学特性を判定するステップとをさらに含んでもよい。光学特性は、局所的な物理特性または化学特性を示してもよい。

20

【0046】

光学特性は、たとえば、感光媒体における感光剤の濃度もしくは感光剤の濃度の変化またはビルド体積における外部オブジェクトの存在に関する特性であってもよい。判定された光学特性は、たとえば、品質管理、進捗状況管理などに使用されるか、または3Dターゲット構造が既存の構造に対して形成されるときに露光画像のシーケンスを位置合わせするために使用されてもよい。これは、特に多方向照明の場合に適切であることがある。このことはたとえば、半導体パッケージングに適用されてもよく、またはマルチレイヤオブジェクトもしくはマルチマテリアルオブジェクトを形成するために適用されてもよく、この場合、それぞれの層またはそれぞれの材料は別個のステップで形成される。

30

【0047】

一実施形態では、この方法は、判定された光学特性と予測された光学特性との差に基づいて露光画像の算出されたシーケンスを更新するステップをさらに含んでもよい。これによって、形成される構造の品質がさらに向上する場合がある。

【0048】

一実施形態では、露光システムにおいて監視システムが実施されてもよく、その場合、ビルド体積を透過する光を照明時に測定し（透過顕微鏡法と同様に）、更新される媒体吸収率を算出するために使用することができる。代替的に、媒体内の感光化合物の更新される濃度を算出するために、照明時に誘起される蛍光が、共焦点顕微鏡法で使用される方法と同様に測定されてもよい。一般に、そのような測定は、製造プロセスの初期設定時に使用するか、露光画像のシーケンスを最適化するために製造プロセス中にリアルタイムに使用するか、または製造プロセスの終了時に品質管理のために使用することができる。

40

【0049】

一実施形態では、露光画像は画素を含んでもよく、または画素によって表されてもよい。画素は、第1の波長の光強度および／または第2の波長の光の光強度を符号化する画素値を有する。露光画像は、露光画像を集束させる平面に関連付けられてもよい。

【0050】

50

一実施形態では、ビルド体積および／または複数の平面をボクセル（３Ｄ空間内の点に関連付けられた体積要素）を含むボクセル表現によって表してもよく、ボクセルはボクセル値を有し、ボクセル値は、３Ｄターゲット構造の形状に基づいて感光媒体のターゲット状態を符号化する。ボクセルは複数の平面のうちの一平面に関連付けられてもよい。一実施形態では、各平面は、複数のボクセルを含んでもよく、好ましくは、ボクセルの高さは、複数の平面における平面間の距離に等しい。場合によっては、平面内のボクセルは、それぞれの平面に関連付けられた露光画像内の１つもしくは複数の画素に対応してもよくまたは１つもしくは複数の画素に関連付けられてもよい。

【００５１】

異なる実施形態では、ボクセル表現は、複数の平面とは異なる座標系において決定されてもよい。たとえば、第１のデータ表現を使用して、受信された３Ｄターゲット構造を表してもよく、場合によっては異なる解像度を有する第２のデータ表現を使用して、ビルド体積内のターゲット化学反応速度を表してもよく、場合によってはさらに別の解像度を有する第３のデータ表現を使用してビルド体積における光伝搬をモデル化してもよい。

【００５２】

一実施形態では、露光画像のシーケンスを算出するステップは、ビルド体積のあるボクセルに集束され、ならびに／または露光画像の画素から出射する光伝搬の軌跡を算出するための第１のモデルを提供するステップをさらに含んでもよい。

【００５３】

一実施形態では、露光画像のシーケンスを算出するステップは、露光画像のシーケンスに対するボクセルの累積露光によって誘起されるビルド体積のあるボクセルにおける状態および／または化学反応速度の変化を予測するための第２のモデルを提供するステップをさらに含んでもよい。

【００５４】

一実施形態では、露光画像のシーケンスを算出するステップは、露光画像のシーケンスの少なくとも１つの露光画像における１つまたは複数の画素について、第１のモデルおよび／または第２のモデルについての逆問題の厳密解または近似解に基づいて第１の波長の光および／または第２の波長の光の光強度を算出するステップをさらに含んでもよい。

【００５５】

一実施形態では、露光画像のシーケンスを算出するステップは、第１のボクセルについて、第１のボクセルのボクセル値および第１のボクセルに隣接する１つまたは複数の第２のボクセルについて算出された光強度に基づいて、第１のボクセルに関連付けられた平面に関連付けられた露光画像についての第１の波長の光および／または第２の波長の光の光強度を算出するステップをさらに含んでもよく、好ましくは、算出するステップは、逆問題の解を決定するステップを含む。

【００５６】

逆問題に対する解は、厳密解であっても、または近似解であってもよい。逆問題は、ビルド体積内の各ボクセルにおける累積光強度を算出するための第１のモデルに基づいてもよい。第１のモデルは、所定の深度における平面に集束される露光画像による照明についての光伝搬（光路）の軌跡を算出するステップを含んでもよい。軌跡は、各露光画像の各画素について算出されてもよく、算出するステップでは、焦点面の深度が考慮される。

【００５７】

追加または代替的に、逆モデルは、光に対するボクセルの累積的な露光によって誘起されるビルド体積の各ボクセルにおける状態の変化を予測し、たとえば、化学反応の速度または化学反応を活性化しならびに／または阻害するためのしきい値を予測するための第２のモデルに基づいてもよい。

【００５８】

露光画像のシーケンスを算出するステップは、露光画像のシーケンスの少なくとも１つの露光画像における画素について、第１および第２のモデルについての逆問題の厳密解または近似解に基づいて第１の波長の光および／または第２の波長の光の光強度を算出する

10

20

30

40

50

ステップを含んでもよい。

【0059】

一実施形態では、露光画像のシーケンスを算出するステップは、第1のボクセルに集束される第1の画素について、第1のボクセルのボクセル値、および第1のボクセルとは異なる1つもしくは複数の第2のボクセルのボクセル値、または第1の画素とは異なる1つもしくは複数の第2の画素の画素値のうちの少なくとも一方に基づく画素値を算出するステップをさらに含んでもよく、好ましくは、算出するステップは、ビルド体積における化学反応速度または累積光強度を判定するモデルの逆行列を判定するステップを含む。

【0060】

一実施形態では、露光画像のシーケンスを算出するステップは、複数の平面の各平面について複数の露光画像を算出するステップであって、各露光画像が、複数の対物レンズの異なる対物レンズまたはビルド体積に対して複数の位置の間を移動するように構成された対物レンズの異なる位置に関連付けられ、1つまたは複数の対物レンズが、ビルド体積を照明するように構成され、好ましくは、複数の対物レンズがそれぞれ複数の位置にあり、1つまたは複数の対物レンズの各々の開口数よりも大きい有効開口数を得るように構成される、ステップをさらに含んでもよい。複数の対物レンズおよび／またはビルド体積に対して移動するように構成された対物レンズを使用して、より高い有効開口数が得られる場合があり、少なくとも1つの次元における解像度が向上する。

【0061】

一態様では、本発明は、体積マイクロリソグラフィシステム用の計算モジュールであって、計算モジュールによって具現化されるプログラムの少なくとも一部を有するコンピュータ可読記憶媒体と、プロセッサ、好ましくはコンピュータ可読記憶媒体に結合されたマイクロプロセッサとを備え、プロセッサが、コンピュータ可読記憶コードを実行することに応答して、3D構造のデータ表現を受信する動作を含む実行可能な動作を実行するように構成される計算モジュールに関する。実行可能な動作は、感光媒体内のある体積またはビルド体積内に複数の平面を決定する動作をさらに含んでもよく、複数の平面の各々は、露光システムの光軸に沿ってビルド体積内の深度に関連付けられる。好ましくは、複数の深度における各深度は互いに異なる。各平面は、露光システムの焦点面の可能な位置に対応してもよい。感光媒体は、感光媒体内で化学反応を開始するための活性化化合物を含んでもよく、活性化化合物は、第1の波長の光によって活性化可能である。好ましくは、感光媒体はまた、感光媒体内の化学反応を阻害するための阻害化合物を含む。好ましくは、阻害化合物は、第1の波長とは異なる第2の波長の光によって活性化可能である。実行可能な動作は、構造の形状、ならびに好ましくは、感光媒体の特性および／または露光システムの仕様に基づいて、露光画像のシーケンスを算出する動作をさらに含んでもよく、露光画像のシーケンスの各露光画像は、複数の平面の一平面に関連付けられ、各露光画像は、第1の波長の光および／または第2の波長の光を含む。実行可能な動作は、露光システムによって使用される露光画像の算出されるシーケンスを定義する情報を記憶またはエクスポートする動作をさらに含んでもよい。

【0062】

計算システムは、上述の算出ステップのうちのいずれかを実行するようにさらに構成されてもよい。

【0063】

一態様では、本発明は、体積マイクロリソグラフィ用の露光システムに関する。露光システムは、ビルド体積を保持するためのホルダを備えてもよい。ビルド体積は、感光媒体内の化学反応を開始するための活性化化合物を含む感光媒体を含んでもよく、活性化化合物は、第1の波長の光によって活性化可能である。好ましくは、感光媒体はまた、感光媒体内の化学反応を阻害するための阻害化合物を含み、阻害化合物は、第1の波長とは異なる第2の波長の光によって活性化可能である。露光システムは、光学機器をさらに備えてもよく、光学機器は、その光軸に平行な方向におけるビルド体積の厚さと比較して薄い焦点深度を有する焦点面を形成するように構成される。露光システムは、ビルド体積に対し

10

20

30

40

50

て焦点面の位置に応じて第1の波長の露光画像を生成するための第1の画像形成モジュールをさらに備えてもよい。好ましくは、露光システムはまた、ビルド体積に対して焦点面の位置に応じて第2の波長の照明を生成するための第2の画像形成モジュールを備える。露光システムは、第1および／または第2の波長の露光画像のシーケンスを定義する情報を受信するように構成されたプロセッサさらに備えてもよく、その場合、露光画像のシーケンスの各露光画像は、光学機器の光軸に沿ってビルド体積内の深度に関連付けられる。各露光画像について、プロセッサは、光学機器および／またはホルダを制御して光学系の焦点面をそれぞれの露光画像に関連付けられたビルド体積内の深度に配置してもよい。プロセッサはさらに、第1および／または第2の画像形成モジュールを制御してそれぞれの露光画像によってビルド体積を照明してもよい。

10

【0064】

一実施形態では、第1の画像形成モジュールは、第1の波長の光を生成するための光源と、空間光変調器、たとえば、デジタルマイクロミラーデバイスとを備えてもよい。異なる実施形態では、第1の画像形成モジュールは、たとえば、OLED画面を備える単一のデバイスであってもよい。一実施形態では、第2の画像形成モジュールは、第2の波長の光を生成するための光源と、空間光変調器、たとえば、デジタルマイクロミラーデバイスとを備えてもよい。異なる実施形態では、第2の画像形成モジュールは、たとえば、OLED画面を備える単一のデバイスであってもよい。一実施形態では、第1の画像形成モジュールと第2の画像形成モジュールは同じデバイスであってもよく、第1の波長と第2の波長の両方の光を生成するように構成される。

20

【0065】

一実施形態では、露光システムは、単一の波長または複数の波長で動作する光源を含んでもよい。光源は、事前に算出された露光画像を高速に連続的に形成するための空間光変調器(SLM)に結合されてもよい。代替的に、光源はレーザスキャニングシステムを含んでもよい。同じ効果を実現するための他の方法が同様に使用されてもよい。

【0066】

一実施形態では、光学機器は、動的に調整可能な焦点距離を有する焦点面を形成するように構成された調整可能な光学機器である。一実施形態では、ホルダは、光軸に平行な方向に移動可能であるように構成される。

【0067】

一実施形態では、露光システムは、第1および／または第2の画像形成モジュールの方向とは異なる方向からビルド体積を照明するための追加の画像形成モジュールを備えてもよい。

30

【0068】

一態様では、本発明は、露光システム用のモジュールであって、露光画像のシーケンスの各露光画像が、光学機器の光軸に沿ってビルド体積内の深度に関連付けられた、第1および／または第2の波長の露光画像のシーケンスを定義する情報を受信し、各露光画像について、光学機器および／またはホルダを制御して光学系の焦点面をそれぞれの露光画像に関連付けられたビルド体積内の深度に配置し、第1および／または第2の画像形成モジュールを制御してそれぞれの露光画像によってビルド体積を照明するように構成されたプロセッサを備えるモジュールに関する。

40

【0069】

モジュールは、既存の顕微鏡、好ましくは本発明の実施形態に従って露光システムを得るように共焦点顕微鏡法向けに構成された顕微鏡と組み合わせられてもよい。モジュールは、顕微鏡の動的に調整可能な光学機器を動作させるためのアクチュエータをさらに備えてもよい。モジュールは、1つまたは複数の画像形成モジュール、たとえば、光源ならびに空間光変調器および／または動的に制御可能なディスプレイをさらに備えてもよい。

【0070】

本発明は、少なくとも1つのソフトウェアコード部を含むコンピュータプログラム、もしくは一連のコンピュータプログラム、または少なくとも1つのソフトウェアコード部を

50

記憶するコンピュータプログラム製品であって、ソフトウェアコード部が、コンピュータシステム上で実行されるときに上述の方法ステップのうちの1つまたは複数を実行するように構成されるコンピュータプログラムに関する場合もある。

【0071】

本発明は、少なくとも1つのソフトウェアコード部を記憶する非一時的コンピュータ可読記憶媒体であって、ソフトウェアコード部が、コンピュータによって実行または処理されるときに上述の方法ステップのうちの1つまたは複数を実行するように構成されるコンピュータ可読記憶媒体に関する場合もある。

【0072】

当業者には諒解されるように、本発明の各態様は、デバイス、方法、またはコンピュータプログラム製品として具現化されてもよい。したがって、本発明の各態様は、全体的にハードウェア実施形態の形をとってもよく、全体的にソフトウェア実施形態（ファームウェア、常駐ソフトウェア、マイクロコードなどを含む）の形をとってもよく、またはすべて本明細書では一般に「回路」、「モジュール」、または「システム」と呼ばれる場合もあるソフトウェア態様とハードウェア態様を組み合わせる実施形態の形をとってもよい。本開示で説明する機能は、コンピュータのプロセッサ／マイクロプロセッサによって実行されるアルゴリズムとして実装されてもよい。さらに、本発明の各態様は、コンピュータ可読プログラムコードが具現化され、たとえば記憶される1つまたは複数のコンピュータ可読媒体において具現化されるコンピュータプログラム製品の形をとってもよい。

【0073】

1つまたは複数のコンピュータ可読媒体の任意の組合せが利用されてもよい。コンピュータ可読媒体は、コンピュータ可読信号媒体またはコンピュータ可読記憶媒体であってもよい。コンピュータ可読記憶媒体は、たとえば、限定はしないが、電子、磁気、光学、電磁、赤外線、または半導体システム、装置、またはデバイス、またはそれらの任意の適切な組合せであってもよい。コンピュータ可読記憶媒体のより具体的な例は、限定はしないが、1つまたは複数のワイヤを有する電気接続部、移植可能なコンピュータディスクセット、ハードディスク、ランダムアクセスメモリ（RAM）、読取り専用メモリ（ROM）、消去可能プログラム可能な読取り専用メモリ（EEPROMまたはフラッシュメモリ）、光ファイバ、移植可能なコンパクトディスク読取り専用メモリ（CD-ROM）、光学記憶デバイス、磁気記憶デバイス、またはそれらの任意の適切な組合せを含んでもよい。本発明の文脈では、コンピュータ可読記憶媒体は、命令実行システム、装置、もしくはデバイスによって使用されるかまたは命令実行システム、装置、もしくはデバイスに関連して使用されるプログラムを含むかまたは記憶することができる任意の有形媒体であってもよい。

【0074】

コンピュータ可読信号媒体は、たとえばベースバンド内にまたはキャリア波の一部としてコンピュータ可読プログラムコードが具現化される伝搬データ信号を含んでもよい。そのような伝搬信号は、限定はしないが、電磁信号、光信号、またはそれらの任意の適切な組合せを含む様々な形態のうちのいずれをとってもよい。コンピュータ可読信号媒体は、コンピュータ可読記憶媒体ではなく、命令実行システム、装置、もしくはデバイスによって使用されるかまたは命令実行システム、装置、もしくはデバイスに関連して使用されるプログラムを通信、伝搬、または転送することができる任意のコンピュータ可読媒体であってもよい。

【0075】

コンピュータ可読媒体上で具現化されるプログラムコードは、限定はしないが、無線、有線、光ファイバ、ケーブル、RFなど、またはそれらの任意の適切な組合せを含む任意の適切な媒体を使用して送信されてもよい。本発明の各態様についての動作を実行するためのコンピュータプログラムコードは、Java（商標）、Python、Smalltalk、C++などのオブジェクト指向プログラミング言語、および「C」プログラミング言語もしくは同様のプログラミング言語などの従来の手続きプログラミング言語を含む

10

20

30

40

50

1つまたは複数のプログラミング言語の任意の組合せで書かれてもよい。プログラムコードは、全体がユーザのコンピュータ上で実行されてもよく、一部がスタンドアロンソフトウェアパッケージとしてユーザのコンピュータ上で実行されてもよく、一部がユーザのコンピュータ上で実行され、一部がリモートコンピュータ上で実行されてもよく、または全体がリモートコンピュータもしくはサーバ上で実行されてもよい。後者のシナリオでは、リモートコンピュータは、ローカルエリアネットワーク（LAN）もしくはワイドエリアネットワーク（WAN）を含む任意の種類のネットワークを通じてユーザのコンピュータに接続されてもよく、または接続が外部のコンピュータと（たとえば、インターネットサービスプロバイダを使用してインターネットを通じて）確立されてもよい。

【0076】

本発明の各態様について、以下で、本発明の実施形態による方法、装置（システム）、およびコンピュータプログラム製品のフローチャート図および／またはブロック図を参照しながら説明する。フローチャート図および／またはブロック図の各ブロックならびにフローチャート図および／またはブロック図におけるブロックの組合せをコンピュータプログラム命令によって実装できることが理解されよう。これらのコンピュータプログラム命令をプロセッサ、具体的には、汎用コンピュータ、専用コンピュータ、またはその他のプログラム可能データ処理装置のマイクロプロセッサまたは中央演算処理装置（CPU）に与えて機械を製造してもよく、それによって、命令は、コンピュータ、その他のプログラム可能データ処理装置、またはその他のデバイスのプロセッサを介して実行され、フローチャートおよび／またはブロック図の1つまたは複数のブロックに指定された機能／行為を実現するための手段を形成する。

【0077】

これらのコンピュータプログラム命令は、コンピュータ、その他のプログラム可能データ処理装置、またはその他のデバイスに特定の態様で働くように指示することができるコンピュータ可読媒体に記憶されてもよく、それによって、フローチャートおよび／またはブロック図の1つまたは複数のブロックに指定された機能／行為を実現する命令を含む、コンピュータ可読媒体に記憶された命令が製造品を作製する。

【0078】

コンピュータプログラム命令はまた、コンピュータ、その他のプログラム可能データ処理装置、またはその他のデバイス上にロードされ、コンピュータ、その他のプログラム可能データ処理装置、またはその他のデバイス上で一連の動作ステップを実行させてコンピュータ実施プロセスを形成してもよく、それによって、コンピュータまたはその他のプログラム可能装置上で実行される命令は、フローチャートおよび／またはブロック図の1つまたは複数のブロックに指定された機能／行為を実施するためのプロセスを提供する。

【0079】

図におけるフローチャートおよびブロック図は、本発明の様々な実施形態によるデバイス、方法、およびコンピュータプログラム製品の考えられる実装形態のアーキテクチャ、機能、および動作を示す。ここで、フローチャートまたはブロック図における各ブロックは、指定された論理機能を実施するための1つまたは複数の実行可能な命令を含むコードのモジュール、セグメント、または一部を表してもよい。いくつかの代替実装形態では、各ブロックに示された機能が図示された順序とは異なる順序で行われる場合があることに留意されたい。たとえば、関与する機能に応じて、連続して示される2つのブロックが実際には、実質的に同時に実行されることがあり、または各ブロックが逆の順序で実行されることがある。ブロック図および／またはフローチャート図の各ブロック、ブロック図および／またはフローチャート図におけるブロックの組合せを、指定された機能もしくは行為、または専用ハードウェアおよびコンピュータ命令の組合せを実行する専用ハードウェアベースのシステムによって実施できることに留意されたい。

【0080】

本発明を添付の図面を参照しながらさらに例示する。添付の図面は、本発明による実施形態を概略的に示す。本発明がいかなる点でもこれらの特定の実施形態に制限されないこ

10

20

30

40

50

とが理解されよう。

【図面の簡単な説明】

【0081】

【図1A】本発明の一実施形態による体積マイクロリソグラフィシステムの概略図である。

【図1B】本発明の一実施形態による体積マイクロリソグラフィシステムの概略図である。

【図2A】本発明の様々な実施形態による体積マイクロリソグラフィシステムの露光システムの図である。

【図2B】本発明の様々な実施形態による体積マイクロリソグラフィシステムの露光システムの図である。

【図3A】本発明の一実施形態による露光システムにおける断面を概略的に示す図である。

【図3B】本発明の一実施形態による露光システムにおける断面を概略的に示す図である。

【図3C】本発明の一実施形態による露光システムにおける断面を概略的に示す図である。

【図4A】光線光学に基づくシミュレートされた照度を示す図である。

【図4B】光線光学に基づくシミュレートされた照度を示す図である。

【図4C】光線光学に基づくシミュレートされた照度を示す図である。

【図5】光伝搬、吸光、およびその後の重合についての線形逆問題を解くことによって得られる露光画像の最適なシーケンスの例を示す図である。

【図6】行列反転および反復最小化アルゴリズムを使用して複雑な構造について算出された露光画像の最適なシーケンスの例を示す図である。

【図7】本発明の一実施形態による露光システムの概略図である。

【図8】本発明の一実施形態による体積マイクロリソグラフィの方法の流れ図である。

【図9】本発明の一実施形態による露光画像のシーケンスを決定する方法の流れ図である。

【図10】本発明の一実施形態による体積マイクロリソグラフィの方法について説明する流れ図である。

【図11】本発明の一実施形態によるビルド体積を照明する方法について説明する流れ図である。

【図12A】本発明の一実施形態において使用される場合がある1つまたは複数の露光システム対物レンズ用の構成を示す図である。

【図12B】本発明の一実施形態において使用される場合がある1つまたは複数の露光システム対物レンズ用の構成を示す図である。

【図12C】本発明の一実施形態において使用される場合がある1つまたは複数の露光システム対物レンズ用の構成を示す図である。

【図13】本開示で説明する方法およびソフトウェア製品を実行するために使用される場合がある例示的なデータコンピューティングシステムを示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0082】

図1Aおよび図1Bは、本発明の一実施形態による「共焦点」または体積マイクロリソグラフィシステムの概略図を示す。体積マイクロリソグラフィシステム100は、露光システム102と、露光システムを制御するためのコンピュータシステム112とを備えてもよい。露光システムは、一般に平面形状の感光媒体109のある体積を光学的に露光させるように共焦点撮像システムまたは構造化光照明システムと同様に実装されてもよい。以下では、露光される感光媒体の体積をビルド体積と呼ぶことがある。さらに、システムは、感光媒体の露光を監視するための監視システム111、たとえばビデオカメラを備えてもよい。

【0083】

露光システム102は、画像形成モジュール103と、画像形成モジュール103からの光を感光媒体に集束させるための光学系108とを備えてもよい。画像形成モジュールは、光源104とコンピュータ制御可能な空間光変調器106とを備えてもよい。図1Bは、所定の波長の光線105を生成する光源、たとえばレーザを含む露光システムの例示的な実装形態を示す。1つまたは複数の鏡122とレンズ124₁₋₂とを備える第1の光

10

20

30

40

50

学系120₁は、光線を空間光変調器上に中継するように構成されてもよい。空間光変調器は、コンピュータ制御可能な画素素子を備えてもよく、画素素子は、そのような画素素子上に落ちる光を変調するために使用することができる。たとえば、図1Bでは、SLMは、デジタルマイクロミラーデバイス(DMD)として実装されてもよく、各画素素子は制御可能なマイクロミラーとして構成される。他の実施形態では、SLMは、液晶SLMとして実装されてもよく、各画素素子は、光の強度を制御するための光学素子として構成される。

【0084】

SLMから出射した変調光は、1つまたは複数の鏡128とレンズ126₁₋₂とを備えるさらなる第2の光学系120₂を介して、変調光を平面形状の感光媒体内に配置された焦点面上に投影するように構成された集束素子108、たとえば対物レンズに向かって送られてもよい。集束素子は、平面形状の感光媒体内で焦点面を配置するように調整可能な焦点距離を有してもよい。平面形状の感光媒体109は、露光システムの光軸が平面形状の感光媒体の横面に垂直に向けられるように配向されてもよい。平面形状の感光媒体は、基板、たとえば透明基板上のフォトレジスト層として実装されてもよい。代替的に、平面形状の感光媒体109は平面形状の容器内の液体光重合型媒体であってもよい。

【0085】

露光システムは、光軸に垂直に(すなわち、平面形状の感光媒体の平面内で、たとえばx-y方向に)ならびに/または光軸の方向に(たとえば、z-方向に)移動可能な段110を備えてもよい。移動可能な段は、段の位置を高度に正確に制御するためにステッピングモータに接続されてもよい。調整可能な集束要素および/または可動段は、ビルド体積内の一連の深度に焦点面を配置するように制御されてもよい。

【0086】

コンピュータシステムは、集束素子(対物レンズ)の焦点距離を制御して平面形状の感光媒体内のビルド体積において焦点面のシーケンスを形成し、媒体内の各焦点面が所定の変調光パターンに露光されるように空間光変調器を制御するように構成されたソフトウェアおよび/またはハードウェアモジュールを備えてもよい。ビルド体積をそれぞれに異なる焦点面においてそれぞれの異なる露光画像に完全に露光させると、所望の所定のターゲット3D構造に従って構造化された重合されたビルド体積が得られる。

【0087】

この目的のために、コンピュータシステムは、1つまたは複数のソフトウェアプログラムを実行するためのプロセッサ114と、3Dターゲット構造、すなわち、露光システムのそれぞれに異なる焦点面において変調光パターンのシーケンスに従ってビルド体積を露光させることによって形成される3D構造の表現を保持するためのメモリ116とを備えてもよい。SLMによって生成され露光システムによってビルドシステムにおける焦点面上に投影される変調光パターンを以下では露光画像と呼ぶことがある。たとえば、一実施形態では、プロセッサは、3Dターゲット構造の入力された3Dモデルをターゲット重合速度 $P_0(x, y, z)$ 、すなわち、所望の3Dターゲット構造を形成するのに必要な3Dターゲット構造のボクセル位置における重合の速度のボクセル表現(体積素子の3Dアレイ)に変換してもよい。ターゲット重合速度は、たとえば、ビルド体積109の3D空間を表すデカルト座標 x, y, z または円筒座標 r, ϕ, z において定義することができる。ターゲット重合速度 $P_0(x, y, z)$ は、硬化する必要があるビルド体積内部のあらゆる位置についてある臨界値 P_{crit} に等しくてもよくまたは臨界値 P_{crit} を超えてもよい。さらに、ターゲット重合速度 $P_0(x, y, z)$ は、未硬化のままにする必要があるあらゆる位置についてゼロであってもよい。臨界値 P_{crit} は、感光媒体の反応度および総露光時間に依存してもよい。

【0088】

一実施形態では、コンピュータのプロセッサは、所与のターゲット重合速度 $P_0(x, y, z)$ についての露光画像118 $S_0(x, y, z)$ のシーケンスを決定するように構成されてもよい。このような露光画像を決定するためのソフトウェアは、3D構造の表

現を受信し、3D構造の表現ならびに感光媒体および露光システム102の特性に基づいて露光画像のシーケンスを決定するように構成され得る計算モジュールとして実装されてもよい。

【0089】

露光画像のシーケンスを決定するために最適化アルゴリズムが使用されてもよい。最適化は、ビルド体積内の放射光の伝搬および減衰を数学的に記述する伝搬モデルRおよび吸収された放射光によって開始される重合の速度を記述する重合モデルPについての逆問題を解くことに基づいてもよい。伝搬モデルRは、所望の精度に応じて、幾何光学近似（すなわち、レイトレーシング）および／または波動光学特性（たとえば、放射輸送方程式のセットによって記述される波動光学特性）に基づいてもよい。いくつかの実施形態では、両方のモデルが組み合わされてもよく、結合問題について解が得られてもよい。両方のモデルが線形である場合、たとえば、ある形態の行列反転を使用することによって厳密解が算出されてもよい。代替的に、近似解は、たとえば非線形重合モデルが使用されるときに反復最適化法を使用して得ることができる。近似を使用することによって近似解を得てもよい。たとえば、一実施形態では、伝搬モデルおよび／または重合モデルに対する畳み込み近似が使用されてもよい。ビルド体積に関する露光画像を算出するためのより詳細な例について、以下で図8および9を参照しながら説明する。

【0090】

コンピュータは、露光画像のシーケンスに基づいて露光システム102を制御するように構成された制御モジュールをさらに備えてもよい。露光システムを制御するプロセスは、画像形成モジュール103を制御するステップと、光学素子108を制御して焦点距離を調整するステップと、段またはホルダ110を制御してビルド体積を光学素子の光軸に平行でありならびに／または直交する方向に変位させるステップとを含んでもよい。

【0091】

制御モジュールは、計算モジュールによって算出されたそれぞれに異なる焦点距離についての露光画像118のシーケンス $S_0(x, y, z)$ を受信するか、または外部ソースから露光画像のシーケンスを受信してもよい。制御モジュールはその後、露光プロセスを実行し、感光媒体のビルド体積がそれぞれに異なる焦点距離において強度変調画像のシーケンスに露光される。その目的のために、制御モジュールは、集束素子108を制御して焦点距離を高速に変化させ、それによって、ビルド体積がビルド体積内のそれぞれに異なる焦点面においてそれぞれに異なる露光画像に露光される。それぞれに異なる焦点距離としては、ビルド体積全体が露光されるような焦点距離が選択されてもよい。このプロセスについて、図2を参照しながらより詳細に説明する。

【0092】

図2Aおよび図2Bは、本発明の様々な実施形態による露光システムの概略図を示す。詳細には、図2Aは、空間光変調器（SLM）と、光源と、強度変調放射パターンを生成するための光学系とを備える画像形成モジュール202を備える露光システムであって、あらゆる照射点（画素）が光円錐204となる露光システムを示す。画像は、2D平面画像として形成されてもよく、または点強度の高速2Dスキャンによって形成されてもよい。光円錐は光学集束素子206によって集束される。一実施形態では、光学集束素子は、高い開口角または高い開口数（NA）を有する対物レンズとして実装されてもよい。高い開口角によって高い円錐角度を実現することができ、したがって、より優れた深度解像度に望ましいより短い焦点深度を実現することができる。たとえば、 $NA = 0.87$ を有する標準的な対物レンズは開口角60度に対応する。従来技術の油浸レンズシステムを使用すると、1.0から1.4の間の範囲の開口数NAが実現される場合がある。高い有効開口数を実現するための代替構成について、以下に図12を参照しながら説明する。光学素子は、対物レンズから焦点距離216において焦点深度212を有する焦点面210を画定する。SLMの各画素素子が図2Aに示す光円錐を形成すると、ビルド体積208内の焦点面に露光画像214が投影されることがある。一般に、平面形状の感光媒体において、z方向は露光システムの光軸の方向に画定され、光軸は焦点面に対して垂直である。

【0093】

露光画像は、SLM202および対物レンズ206を制御することによって形成されてもよい。対物レンズは、ビルド体積208内部の軸方向位置 z に露光画像214を集束させるように構成された光学素子のシステムであってもよい。対物レンズは、アクチュエータを使用して軸方向位置における焦点を動的に変更するように構成されてもよい。従来技術のピエゾ作動による典型的なスキャン速度は毎秒100ミクロンであり、精度は1nmに近いものである場合がある。この速度は液体ダイナミックフォーカスレンズを使用して高められる場合がある。たとえば、市販のPIFOC ND72Z2LAQシステムは、20マイクロ秒内で3ミクロンの刻み幅で軸方向スキャンを実行する場合があります、150ミクロンの範囲で毎秒50個の画像を投影することが可能である。

10

【0094】

画像の各画素の放射エネルギーは、光円錐204内で光源の発散特性に従って広がり、対物レンズ206の焦点面210内の小さい領域に再び集光される。このこと自体によって、重合反応がビルド体積208内の狭い焦点深度212内に制限することが可能になる。そのような制限は、2D露光画像のシーケンスをそれぞれに異なる深度に集束させることによって3Dターゲット構造の各層を形成するのを可能にする。しかし、大きい領域同士を同時に硬化する必要がある場合、発散効果の役割が弱まり、解像が劣化する。

【0095】

図4A～図4Cは、図2Aを参照しながら説明した露光システムを使用して露光される垂直($x-z$)平面内のビルド体積における光伝搬の光線光学ベースのシミュレーションを示す。図4Aは、ビルド体積の中央の単一の点402に対応するターゲット構造についての単一の(最適化された)露光画像を算出することによって得られる相対光強度マップを示す。この露光画像は、ターゲット構造の深度に集束される。システムの光軸は、画像の中央垂直軸(すなわち、 z 方向)と一致する。ビルド体積は上面から照明される。

20

【0096】

この例では、第1の波長の光は、単一の露光画像を使用して単一の点上に集束される。露光画像は、この点を通して水平焦点面上に集束される。相対強度は、 z 座標に沿ってターゲット構造から離れる(光学集束素子に向かう方向または光学集束素子から離れる方向)ときに急激に低下する。勾配の陰しさは、焦点深度に関係があり、焦点深度が小さくなるにつれて勾配が陰しくなる。焦点深度は、 z 方向における解像についての程度と見なされてもよい。

30

【0097】

一般に、より小さい焦点深度はより広い光円錐に関連付けられる。したがって、焦点面の外側では、同じ光エネルギーがより広い表面にわたって広がり、強度がより低くなる。光強度が臨界レベルよりも低くなった場合、化学反応が活性化されない場合がある。この臨界レベルは、感光媒体の化学反応および特性に依存する。放射光を吸収しない完全に透過的な媒体では、光強度パターンは焦点面に対して対称である。吸光が役割を果たさないより現実的な媒体では、強度は対物レンズに近いほど高くなる。 x 軸に沿った方向において、画像は、焦点面の深度において鮮明になり、焦点面から離れた深度では広がる。このプロファイルは、図3Aに示す光円錐と同様である。

40

【0098】

図4Bは、 x 軸に沿ったビルド体積の中央における水平線404からなる3Dターゲット構造について算出される単一の露光画像の光の相対強度を示す。画像は、3Dターゲット構造の深度に位置する焦点面上に集束された単一の露光画像による照明の結果である。水平線を形成するために、図4Aに示す強度と同様な強度をボクセルごとに重ね合わせてもよい。したがって、3Dターゲット構造が点からなる水平線を含む場合、集焦点、したがってターゲット構造から離れる方向における強度の低下はずっと低速になる。概念的には、このことは、近傍のボクセルを照明したことによる光円錐の重ね合わせとして理解されてもよい。

【0099】

50

図 4 C は、 z 軸に沿ってビルド体積の中央において集束された垂直線 406 からなるターゲット構造についての累積強度を示す。この場合、露光画像のシーケンスは、 z 軸に沿った各焦点面についての露光画像を含む。各露光画像は、図 4 A に示す画像と同様の単一の画素画像を含み、異なる深度を有する。得られる累積相対強度マップは、より大きい深度における照明ボクセルに対する光円錐に起因する顕著な量の「迷」光放射を示す。この例では、放射光の強度は、ベールーランベルト吸光法則に従って指数関数的に減少する。この例における媒体の吸光度は、最深部において放射光の 90% が吸収されるような吸光度である。

【0100】

そのような「迷」光放射の作用を軽減するかまたはなくすために、第 2 の波長の光を使用して化学反応を阻害し、ターゲット構造の解像度を高めてもよい。その場合、重合速度は、第 1 の波長の「活性化」光の光強度と第 2 の波長の「阻害」光の光強度の両方に依存し、ならびに感光媒体の物理特性および化学特性に依存する。したがって、光軸に沿って（ z 方向）解像度を高めるために光阻害効果が使用されてもよい。たとえば、露光システムは、光阻害剤によって吸収されるが光開始剤には吸収されない波長を有する第 2 の放射光源を備えてもよい。

【0101】

図 2 B は、光開始剤と光阻害剤とを含む平面形状の感光媒体を照明するための露光システムを示す。そのような露光システムは、感光媒体内で光開始剤を活性化するために選択された波長を有する「ポジティブ」露光画像を生成するための第 1 の画像形成モジュール 220 を備えてもよい。第 2 の画像形成モジュール 222 によって「ネガティブ」画像が形成されてもよい。たとえば、ダイクロイックミラー 224 を使用して第 1 の画像形成モジュールからの光と第 2 の画像形成モジュールからの光が組み合わせられてもよい。そのようにして、一実施形態では、「ネガティブ」露光画像が、「ポジティブ」露光画像と同じ層上に集束されるかまたは単一のステップ内で「ポジティブ」露光画像を有する層に隣接する層上に集束されてもよい。代替的に、一実施形態では、「ネガティブ」露光画像が、「ポジティブ」露光画像に隣接する層上にわずかに遅延して集束されてもよい。たとえば、対物レンズが、焦点距離を変更しつつ、次の刻み幅だけ進むとき。

【0102】

一実施形態では、同じまたは同様の 1 つまたは複数の画像形成モジュールおよび同じまたは同様の光集束素子がビルド体積の他方の側に実装されてもよい。ビルド体積は、多数の側から接近可能である場合、場合によっては、露光システムが接近可能な任意の方向から照射されてもよい。

【0103】

さらに、透過顕微鏡構成と同様に、透過した放射光を測定するために監視システム 226、たとえばカメラを追加することができる。代替的に、または追加として、共焦点顕微鏡法構成と同様に、散乱放射または蛍光放射が検出されてもよい。そのようなシステムを使用して、露光前、露光中、または露光後のビルド体積のあらゆる点における感光化合物の吸光度、屈折率、または濃度の変化を監視することができる。

【0104】

したがって、図 3 B の露光システムに基づいて、「ネガティブ」パターンを互いに隣接する層上に集束させて、現在の焦点面の外側における光開始剤の活性化を補償することができる。そのような手法に適した化学組成は、M. de Beer らによる論文、*Science Advances* 5 (1): eaau8723 (2019) DOI: 10.1126/sciadv.aau8723 に記載されている。この組成は、400 nm から 500 nm の間の範囲の波長に感応する光開始剤のカンファーキノンと、400 nm よりも低い波長に感応する光阻害剤のビス〔2-（ o -クロロフェニル）-4,5-ジフェニルイミダゾル〕とを含む。二波長法に適した化学組成の別の例は、H. L. van der Laan らによる論文、*ACS Macro Lett.* 8 (8): 899-904 (2019) DOI: 10.1021/acsmacrolett.9b00412 に記載され

10

20

30

40

50

ている。これらの組成は、亜硝酸ブチル（NN）をUV活性光阻害剤として含むトリメチロールプロパントリアクリレート（TMPTA）ベースのアクリレート光重合型樹脂組成を含む。

【0105】

この光開始剤および光阻害剤と組み合わせて様々なモノマーが試験される。光開始剤、光阻害剤、およびモノマーのある組合せを仮定すると、媒体の吸光度は、放射波長、媒体に含まれる化合物の吸光度スペクトル、および化合物のそれぞれの濃度に依存する。したがって、照明波長と光開始剤および光阻害剤の濃度との最適な組合せとしては、ビルド体積全体に確実に放射光が到達することができる組合せが選択されてもよい。放射侵入深度を最大にし、感光化合物の活性化に費やされるエネルギーの量を最大にするために吸光度がゼロに近い透明モノマーが使用されてもよい。

10

【0106】

図3A～図3Cは、図2Aおよび図2Bの露光システムの一部の断面概略図を示す。図3Aは、第1の波長の光を放射する画素304を有する画像形成モジュール302を示す。画素は発散光円錐306を出射させ、発散光円錐306が対物レンズ308によって集束される。対物レンズは、所望の光学特性を形成するために複数の光学素子を備えてもよい。光は、ビルド体積310内を伝搬し、焦点面316内に画像形成モジュールの画像312を形成する。画素304の画像はボクセル314として示されている。

【0107】

図3Bは、同じ構成を示すが、この場合、ビルド体積310は第2の波長の光によって照明される。画像形成モジュール322は、画像形成モジュール302と同じデバイスであってもよく、両方の波長で光を放出するように構成可能である。画像形成モジュール322は異なるデバイスであってもよい。その場合、画像形成モジュールと対物レンズ308との間にさらなる光学機器（図示せず）、たとえば、図2Bに示すようなダイクロイックミラーが存在してもよい。画素324は発散光円錐326を出射させ、発散光円錐326はこの場合も、対物レンズによって集束される。対物レンズは、それぞれに異なる波長において異なる焦点距離を有してもよい。したがって、焦点面328は、第2の波長の光では、第1の波長の光とは異なる、ビルド体積内の深度に位置してもよい。焦点距離は、第1の波長の露光画像による照明と第2の波長の露光画像による照明とで能動的に調整されていてもよい。

20

30

【0108】

図3Cは、ビルド体積310に対して異なる位置に第2の対物レンズ338を備える変形構成を示す。第2の対物レンズは、第1の対物レンズ308の反対側に配置されるか、または異なる相対位置に配置されてもよい。一実施形態では、第2の対物レンズは、複数の方向からビルド体積を照明するために使用されてもよい。これによって、特に完全に透明ではない媒体において、印刷されるオブジェクトの解像度が高くなるか、またはビルド体積の最大厚さが大きくなる場合がある。一実施形態では、「ポジティブ」画像を形成する第1の画像形成モジュールは第1の対物レンズを使用してもよく、一方、「ネガティブ」画像を形成する第2の画像形成モジュールは第2の対物レンズを使用してもよい。

【0109】

いくつかの実施形態では、ビルド体積は、第1の波長と第2の波長の光によって同時に照明されてもよく、一方、他の実施形態では、第1の波長と第2の波長が交互に使用されてもよい。同時照明は、少なくとも上記の2つの波長の光を放出することができる単一の画像形成モジュールを用いて得られてもよく、複数の画像形成モジュールを使用して得られてもよい。

40

【0110】

図2および図3を参照しながら説明した露光プロセスは、所与のターゲット重合速度に基づいて露光画像のシーケンスを算出する必要がある、ターゲット重合速度はターゲット構造に依存することがある。説明では重合が参照されるが、計算は、光分解媒体における化学結合の除去および形成（再形成）などの他の化学反応について同様であってもよい。

50

【0111】

重合反応速度論の正確なモデリングは、自明なタスクではなく、たとえば反応力場またはランダムグラフ理論を使用して実行することができる。計算を簡略化するために、一実施形態では、次式の種類の経験的線形関係が近似として仮定されてもよい。

$$P[L_{\lambda 1}, L_{\lambda 2}] = \alpha L_{\lambda 1} - \beta L_{\lambda 2} - \gamma$$

上式で、 $L_{\lambda 1}$ および $L_{\lambda 2}$ はそれぞれ、第1の波長の光の累積強度および第2の波長の光の累積強度である。化学反応を活性化または開始するために選択される第1の波長の露光画像による照明は「ポジティブ」照明と見なされてもよく、一方、化学反応を阻害するために選択される第2の波長の露光画像による照明は「ネガティブ」照明と見なされてもよい。パラメータ α 、 β 、および γ は、経験的に決定され得る定数である。

10

【0112】

露光画像 $S(x, y, z)$ の所与のシーケンスに光伝搬モデル R を適用することによって、第1の波長と第2の波長の両方、すなわち、「ポジティブ」照明と「ネガティブ」照明の両方の光についての累積強度場 $L(x, y, z)$ を算出することができる。

$$L(x, y, z) = R[S(x, y, z)]$$

【0113】

両方のモデルが組み合わされてもよく、それにより、重合速度 P は、 $P = P[R[S_{\lambda 1}], R[S_{\lambda 2}]]$ によって与えられてもよく、モデルの仮定された線形性を考慮すると、次のように書くことができる。

$$P = R[\alpha S_{\lambda 1} - \beta S_{\lambda 2}] - \gamma$$

20

上式において、 $\alpha S_{\lambda 1} - \beta S_{\lambda 2}$ は、シーケンスにおける第1の波長の露光画像と第2の波長の露光画像との加重差であり、第1の波長の露光画像および第2の波長の露光画像は「ポジティブ」露光と「ネガティブ」露光に対応する。この差は、 $S_{\lambda 1}$ に対応する「ポジティブ」値および $S_{\lambda 2}$ に対応する「ネガティブ」値を含む S_0 で置き換えられてもよい。

【0114】

一実施形態では、モデルは時間成分を無視することによって簡略化されてもよい。このことは、それぞれに異なる深度で集束される露光画像による照明間の遅延が、重合速度と比較して無視できると仮定することによって証明される場合がある。より一般的な実施形態では、重合速度モデル P および／または伝搬モデル R に時間係数が組み込まれてもよい。

30

【0115】

最後に、重合の線形モデルは次のように表すことができる。

$$P_0(x, y, z) = R[S_0(x, y, z)] - \gamma$$

より一般的には、重合速度は次式のように書かれてもよい。

$$P_0(x, y, z) = M[S_0(x, y, z)]$$

上式において、 M は伝搬モデルと、重合モデルと、場合によってはその他のモデルを組み合わせた結合モデルである。この線形モデルについて逆問題の解を容易に得ることができる。たとえば、個別ケースにおいて R が行列（またはテンソル）を介して表される場合、ある種の行列反転を適用して逆行列 R^{-1} を得ることができる。その場合、露光画像の最適シーケンスは、単に次のように算出することができる。

40

$$S_0(x, y, z) = R^{-1}[P_0(x, y, z) + \gamma]$$

【0116】

代替的に、 R^{-1} を算出することが不可能であるかまたは実行不可能である場合、たとえば、行列 R 表現が過度に大きい場合、ある種の反復最適化アルゴリズムを使用することができる。一般的な手法では、最急降下アルゴリズムを使用してターゲット重合速度 $P_0(x, y, z)$ と予測速度との差を最小限に抑える。

$$||P_0(x, y, z) - R[S_0(x, y, z)] + \gamma||$$

【0117】

明示的な逆行列に基づく計算と反復解に基づく計算を比較する例を図6に示す。

【0118】

50

さらに代替的に、近似解を算出するためにMまたはRの（線形）擬似逆行列が使用されてもよい。そのような擬似逆行列はたとえば、畳み込みに基づいてもよい。この場合、受け入れられる精度および妥当な速度を有する方法が得られる場合がある。畳み込みが適切である場合がある。その理由は、各層または平面のターゲット照明は主として、限られた数の隣接する平面の照明の影響を受けるからである。

【0119】

図5は、図4A～図4Cに示す3Dターゲット構造と同様な3Dターゲット構造について、中央x-z平面内の露光画像の算出されたシーケンスから得られた重合速度のいくつかのシミュレートされた例を示す。第1の列は、「+」が示されており、重合を開始するための第1の波長の露光画像のシーケンス、または「ポジティブ」露光から得られた算出された累積強度を示す。第2の列は、「-」が示されており、重合を阻害するための第2の波長の露光画像のシーケンス、または「ネガティブ」露光から得られた算出された累積強度を示す。第3の列は、「P」が示されており、得られた予期される重合速度を示す。たとえば、(A1)および(A2)は、単一の点に制限されたターゲット重合について算出された露光画像の「ポジティブ」シーケンスおよび「ネガティブ」シーケンスを示し、(A3)は、得られた重合を示す。行(B)および行(C)は、それぞれ横線および縦線として形作られたターゲット構造についての同様の計算の結果を示す。「ネガティブ」露光における最も強い寄与は「ポジティブ」露光によって照明された点に最も近い位置に相当することがわかる。振動挙動は、(B)行において特に明らかであり、正則化ソルバによって抑制されてもよい。

【0120】

互いに近接する「ポジティブ」露光画像と「ネガティブ」露光画像が強い相関を有することは、露光画像のシーケンス $S_0(x, y, z)$ を算出するプロセスをサイズが限定されたカーネルを有するターゲット構造の畳み込みで置き換えることによって顕著に簡略化できることを示す。実装形態に応じて、そのような手法は基本的に、MまたはRの（線形）擬似逆行列を使用することに相当する。そのようなカーネルの形状は、たとえば、露光システムの点拡がり関数に基づいて、露光システムの各構成について事前に算出することができる。しかし、この場合、ビルド体積の内部の考えられる光学的不均一性を考慮することがより困難になる場合がある。

【0121】

いくつかの場合には、露光画像の計算を簡略化することができ、露光画像は、MまたはRなどの数学的モデルの逆行列の厳密解または近似解を算出するのではなく、事前に算出されたカーネルに基づいて算出されてもよい。カーネルは、第1のおよび／または第2の波長の光の光強度を符号化するかまたは表す複数の画素のパターンを含んでもよい。

【0122】

図5に示すように、ビルド体積の少なくとも1つの一部にわたって同一のカーネルまたはパターンの投影を繰り返すことによって単純な点状、線状、またはシート状の構造を生成することが可能である。線状構造用のカーネルは一般に、重合を開始する第1の波長の明るい中心点に相当し、カーネルの中心の外側での重合を阻害する第2の波長の点によって囲まれる。この手法は、ドット、ワイヤフレーム、格子、フィラメント、およびその他の同様の構造を印刷するために使用することができる。カーネルは、露光システムの点拡がり関数に基づくカーネルであってもよい。

【0123】

たとえば、一連の同一の露光画像によってビルド体積を照明することによって露光システムの光軸に平行な1本または複数の線が形成されてもよく、各露光画像は、1本または複数の線の各々について、露光画像の平面内の各方向において、第2の波長の光に対応する画素によって囲まれる第1の波長の光に対応する1つまたは複数の画素を含むカーネルを含む。第1の波長の光に対応する画素の数は、線状構造の直径に依存してもよい。いくつかの実施形態では、カーネルは、光軸に沿って近接または隣接する平面に集束される第1の露光画像の（直）前および（直）後の露光画像内の画素を含んでもよい。

【0124】

図6は、露光画像のシーケンスを算出するための2つのシミュレーション方法についての重合速度のシミュレートされた例を示す。詳細には、図6は、複雑なターゲット構造であるオーム（Aum）記号を得るための反復最適化（A1～A3）を介して最適化されたシーケンスおよび明示的な行列反転（B1～B3）を介して最適化されたシーケンスについての結果を示す。図5と同様に、（A1）および（A2）はそれぞれ、「ポジティブ」照度および「ネガティブ」照度を示し、すなわち、それぞれ露光画像のシーケンスによる照明に起因する第1および第2の波長の光の累積強度を示す。（A3）は、得られる重合速度を示す。（A1）および（A2）では、一定刻み幅最急降下法を使用して（200回反復する）露光画像のシーケンスが算出されている。この例では、結果は、ビルド体積の底部がそれほど鮮明にならない。しかし、一般に反復の回数を増やすことによってより良い結果が得られることがある。

10

【0125】

図示の例では、第2の行（B1～B3）に示すように、反復解ではなく伝搬行列の明示的な逆行列を使用してより鮮明な画像が実現される。（B1）および（B2）はこの場合も、それぞれ露光画像のシーケンスによる照明に起因する第1および第2の波長の光の累積強度を示し、一方、（B3）は得られる重合速度を示す。他の方法では、たとえば、結合モデルおよび／またはその逆行列に対する畳み込みまたはその他の近似を使用して露光画像のシーケンスを高速にかつかなり正確に決定してもよい。

20

【0126】

図7は、本発明の一実施形態による露光システムの概略図を示す。詳細には、図7は、2つの照明システム702、704を備える露光システムを示し、照明システム702、704は、大きいビルド体積706に対処するように設計される。ビルド体積は、段またはホルダ上に設置されてもよい。図示の例では、照明システムは、2つの対向する側からビルド体積を照明するように配置される。そのような構成は、z軸スキャンの速度を上げるか、ビルド体積の対処可能な深度を増すために使用することができ、z軸スキャンの速度またはビルド体積の対処可能な深度は、高い吸光度またはz軸スキャンシステムの機械的特性によって制限される場合がある。段は、横方向ビルド体積サイズを増大させるために、横方向における露光システムに対するビルド体積の相対位置を変更するように横（x，y）方向においてさらに移動可能であってもよい。

30

【0127】

一実施形態では、一方の照明システムを使用して第1の波長の「活性化する」光によってビルド体積を照明してもよく、一方、他方の照明システムを使用して第2の波長の「阻害する」光によってビルド体積を照明してもよい。異なる実施形態では、両方の照明システムが第1の波長と第2の波長の両方の光によってビルド体積を照明してもよい。

【0128】

図8は、本発明の様々な実施形態による、露光画像のシーケンスを決定する方法、およびそのような露光画像に基づいて露光システムを制御する方法の流れ図を示す。露光画像のシーケンスを決定する方法は、ターゲットゾーン、好ましくは3Dターゲットゾーンについてのターゲット重合速度に基づいて露光画像のシーケンスを決定するステップを含んでもよい。

40

【0129】

この方法は、コンピュータのメモリに記憶されたプログラムコードの形でコンピュータ上に実装されてもよい。プログラムコードは、コンピュータのプロセッサによって実行されてもよく、それによって、コンピュータが露光画像のシーケンスおよびビルド体積内の焦点面の対応する深度を決定することが可能になり、露光画像のシーケンスおよび焦点面の対応する深度を使用して露光システム、たとえば、図2を参照しながら説明したようなシステムを制御することができる。露光画像の算出されたシーケンスを使用して複数の深度依存露光画像を制御して生成してターゲットゾーンにおける感光媒体の所望の化学プロセス（たとえば、光重合）を実現してもよく、それによって、3Dターゲット構造に従って

50

光重合されたビルド体積が形作られる。

【0130】

第1のステップ802では、コンピュータのプロセッサによって入力データが受信されてもよい。入力データは、オブジェクトの3Dスキャン、すなわち、CADモデルなどのコンピュータによって生成された3Dモデルを含んでもよい。入力データセットは、点群データ、メッシュデータ、サーフェスデータ、ボリウムデータ、またはオブジェクトの3Dモデルを表すための任意の他の適切なデータタイプを含んでもよい。ステップ804では、入力データに基づいて3Dターゲット構造のモデルが形成される。次のステップ806において、3Dターゲット構造は、体積ターゲット重合速度 $P_0(x, y, z)$ に変換されてもよい。体積ターゲット重合速度は、重合が生じることが望まれるビルド体積の部分（位置）における第1の値と、重合が生じるべきではないビルド体積の部分における、第1の値とは異なる第2の値とを含んでもよい。感光媒体の種類および構成の目的に応じて、ターゲットボリウムに照射を施してもよくまたはターゲットボリウムを加工せずにしておいてもよい（たとえば、「ポジティブ」露光画像および／または「ネガティブ」露光画像が形成されてもよい）。

10

【0131】

プロセッサは次いで、ステップ810において、モデルおよび体積ターゲット重合に基づく露光画像を算出してもよい。たとえば、一実施形態では、逆問題 $S = M^{-1} [P_0(x, y, z)]$ を解くことによって露光画像 S が決定されてもよい。一般に、（結合）モデル M は、たとえば、光伝搬モデル R と重合モデル P とを含んでもよい。一実施形態では、結合モデル M は、線形モデルであってもよく、または線形モデルに近似されてもよく、解は、既知の線形代数方法を使用して連立一次方程式を解くことによって得られてもよい。他の実施形態では、解析解が可能ではないかまたは望ましくない場合があり、他の方法、たとえば、最急降下法または M の（線形）擬似逆行列に基づく方法などの反復方法を使用して問題を解いてもよい。

20

【0132】

次のステップ812において、解 S から露光画像のシーケンス $S_0(x, y, z)$ が得られる。代表的な実施形態において、このシーケンスは、（ビルド体積に対する）一連の焦点面深度に対応する一連の軸値についての2D「ポジティブ」露光画像および「ネガティブ」露光画像を含む。様々な実施形態において、「ポジティブ」露光画像と「ネガティブ」露光画像は、組み合わされてもよく、または別々の画像であってもよい。軸値は、「ポジティブ」画像と「ネガティブ」画像について同一であってもよく、または異なってもよく、たとえば、露光システムの焦点深度の2分の1において切り替えられてもよい。複数の照明システムを有する実施形態では、たとえば図7に示すように、露光画像のシーケンスが露光システム内の各照明システムについて決定されてもよい。

30

【0133】

露光システムは、次のステップ814では、露光画像のシーケンス $S_0(x, y, z)$ を使用してビルド体積に照射を施す。代表的な実施形態では、ビルド体積内の各焦点面位置 z について、「ポジティブ」露光画像および／または「ネガティブ」露光画像はビルド体積内の焦点面に投影されてもよい。他の実施形態は、2次元露光画像を線ごとにまたは画素ごとに「スキャンする」ことによってビルド体積に照射を施してもよい。

40

【0134】

最後のステップ816では、出力オブジェクトが得られる。このステップは、開始された重合が硬化を終了するのを待つステップを含んでもよい。このステップはまた、硬化されたオブジェクトまたは他の処理を施されたオブジェクトを媒体から取り出すステップを含んでもよい。いくつかの実施形態では、このステップはまた、現像ステップおよび／または化学もしくは物理蒸着ステップまたはエッチングステップを含んでもよい。このようにして、それぞれに異なる材料のオブジェクトが得られてもよい。

【0135】

図9は、本発明の一実施形態による露光画像のシーケンスを決定する方法の流れ図を示

50

す。詳細には、この方法は、反復計算方法を使用して露光画像のシーケンスを決定する。この方法は、コンピュータのメモリに記憶されたプログラムコードの形でコンピュータ上に実装されてもよい。プログラムコードは、コンピュータのプロセッサによって実行されてもよく、それによって、コンピュータが露光画像のシーケンスおよびビルド体積内の焦点面の対応する深度を決定することが可能になる。この方法は、図 8 を参照しながら説明したステップ 810 において完全にまたは部分的に実行されてもよい。

【0136】

第 1 のステップでは、体積ターゲット重合速度 $P_0(x, y, z)$ 902 が得られ、コンピュータのプロセッサに与えられてもよい。次のステップ 904 では、プロセッサは初期重合速度を仮定することによってプロセスを開始してもよい。これはデフォルトの推定重合速度であってもよく、デフォルトの推定重合速度は、ターゲット重合速度 $P_0(x, y, z)$ のある特性に基づいて推定されてもよい。これによって、露光画像のシーケンス $S(x, y, z)$ の初期推定値が得られる (906)。この初期推定値に基づいて、次のステップ 908 では、プロセッサは得られる体積重合速度 $P(x, y, z)$ を算出してもよい。このステップは、光伝搬モデル R および／もしくは重合モデル P 、またはたとえば結合モデル M を使用するステップを含んでもよい。プロセッサは、算出された重合速度とターゲット重合速度との差に基づいて、露光画像のシーケンスについての更新推定値を決定してもよい。更新推定値は、たとえば、 M * すなわちモデル M のいわゆる随伴行列が公知であるときに最急降下法を使用して求められてもよい。更新重合速度が算出され、ターゲット重合速度と比較されてもよい (912)。プロセスは、停止基準が満たされるまで引き続き推定値を更新してもよい。その場合、露光画像の最終シーケンスが出力として提供されてもよい (914)。

【0137】

図 10 は、本発明の一実施形態による「共焦点」または体積マイクロリソグラフィの方法について説明する流れ図を示す。この方法は、3D ターゲット構造および光伝搬、吸光、および化学反応速度、たとえば重合速度などの感光媒体のモデル化された特性に基づいて露光画像のシーケンスを決定するステップを含んでもよい。この方法は、コンピュータのメモリに記憶されたプログラムコードの形でコンピュータ上に実装されてもよい。プログラムコードは、コンピュータのプロセッサによって実行されてもよく、それによって、コンピュータが、露光システム、たとえば、図 2 を参照しながら説明したようなシステムを制御するために使用できる露光画像のシーケンスを決定することが可能になる。露光画像の算出されたシーケンスを使用して、3D ターゲット構造に関係するターゲットゾーンにおいて、所望の化学反応、たとえば、光重合を生じさせる複数の深度依存露光を制御し、生成してもよい。露光画像のシーケンスは、化学反応を開始または活性化する第 1 の波長の光と、化学反応を阻害する第 2 の波長の光を含んでもよい。

【0138】

第 1 のステップ 1002 では、3D 構造を表すデータ表現が、ビルド体積を照明するための露光システム、たとえば、図 2 を参照しながら説明した露光システムに接続されたコンピュータに提供されてもよい。

【0139】

第 2 のステップ 1004 では、コンピュータは、ビルド体積内の複数の平面、すなわち、露光システムの光軸に沿ってビルド体積内の深度に関連付けられた複数の平面の各々を決定してもよい。各平面は一般に、露光システムの光軸に垂直である。各平面は一般に、互いに等距離離れた平面である。平面間の距離は、露光システムの特性、たとえば、露光システムの焦点深度、または露光システムがビルド体積に対して焦点面の垂直位置を調整することのできる刻み幅に依存してもよい。

【0140】

ビルド体積は、感光媒体内で化学反応を開始するための活性化化合物と、好ましくは化学反応を阻害するための阻害化合物とを含む感光媒体を含んでもよい。活性化化合物は、第 1 の波長の光によって活性化可能であってもよく、阻害化合物は、第 1 の波長とは異なる

る第2の波長の光によって活性化可能であってもよい。活性化化合物は、感光媒体内に構造を形成するのに十分な化合物であってもよいが、阻害化合物を添加することによって、たとえば、解像度を高くしてもよく、または垂直次元における構造の最大サイズを大きくしてもよい。

【0141】

次のステップ1006において、コンピュータは、構造のデータ表現を使用して感光媒体内のターゲットゾーンを決定してもよい。コンピュータは、構造の形状に基づいて、ビルド体積を照明するために使用され得る露光画像のシーケンスを算出してもよい。露光画像のシーケンスの各露光画像は、複数の平面のうちの一平面に関連付けられ、したがって、ビルド体積内の対応する深度に関連付けられる。各露光画像は、化学反応を開始または

10

【0142】

露光画像のシーケンスは、反応速度モデル、たとえば重合モデルおよび伝搬モデルを使用して算出されてもよい。各モデルは単一のモデルとして組み合わされてもよい。有利には、線形モデルが使用されてもよい。算出するステップは、たとえば、結合モデルを明示的に反転させるステップまたはモデルの反復解を求めるステップを含んでもよい。任意の適切な座標系が使用されてもよい。一実施形態では、各平面について、活性化露光画像および阻害露光画像が算出される。異なる実施形態では、活性化平面と阻害平面がたとえば

20

【0143】

次のステップ1008では、コンピュータは、露光システムを制御して露光画像のシーケンスによってビルド体積を照明してもよい。詳細には、複数の平面の各々について、コンピュータは、露光システムを制御してそれぞれの平面に関連付けられたビルド体積内の深度に露光システムの焦点面を配置し、それぞれの平面に関連付けられた露光画像によってビルド体積を照明してもよい。第1の波長および好ましくは第2の波長の光による累積照明によって、感光媒体内のターゲットゾーンにおける制御された化学反応、たとえば、第1のステップにおいてコンピュータに提供された構造に対応するゾーンにおける重合が生じてもよい。このステップの実施形態について、図11を参照しながらより詳しく説明する。

30

【0144】

図11は、本発明の一実施形態によるビルド体積を照明する方法について説明する流れ図を示す。この方法は、露光システムによって実行されてもよい。露光システムは、露光システムのコンピュータ制御部分を備えてもよい。この方法は、コンピュータのメモリに記憶されたプログラムコードの形で実装されてもよい。プログラムコードは、コンピュータのプロセッサによって実行されてもよく、それによって、コンピュータが露光システムの各部を制御して露光画像のシーケンスによってビルド体積を照明することが可能になる。露光画像のシーケンスは、たとえば、3D構造のデータ表現に基づいてコンピュータによって算出されてもよく、または計算ユニットから受信されてもよい。

40

【0145】

第1のステップ1102において、コンピュータは、感光媒体を含むビルド体積を第1の位置に配置し、それによって、光学系の焦点面がビルド体積内の第1の深度に位置するように、露光システムを構成してもよい。代表的な実施形態では、システムは、ビルド体積の頂部層または底部層から始まってもよい。ビルド体積は、ホルダ、たとえば容器内に保持されてもよく、段上、場合によっては可動段上に配置されてもよい。

【0146】

ビルド体積は、感光媒体内で化学反応を開始するための活性化化合物と、好ましくは化学反応を阻害するための阻害化合物とを含む感光媒体を含んでもよい。活性化化合物は、

50

第1の波長の光によって活性化可能であってもよく、阻害化合物は、第1の波長とは異なる第2の波長の光によって活性化可能であってもよい。活性化化合物は、感光媒体内に構造を形成するのに十分な化合物であってもよいが、阻害化合物を添加することによって、たとえば、解像度を高くしてもよく、または垂直次元における構造の最大サイズを大きくしてもよい。

【0147】

次のステップ1104において、コンピュータシステムは、露光システムの画像形成モジュール、たとえば光源および空間光変調器を制御して活性化露光画像によってビルド体積を照明してもよい。露光システムがビルド体積の深度または厚さ全体を照明するが、露光画像の画像が焦点面上に集束されることに留意されたい。

【0148】

任意のステップ1106において、コンピュータシステムは、露光システムの画像形成モジュールを制御して第2の波長の光の阻害露光画像によってビルド体積を照明してもよい。一実施形態では、ステップ1104とステップ1106は単一のステップとして組み合わせられてもよい。異なる実施形態では、ステップ1104およびステップ1106の順序は反転させてもよい。

【0149】

次のステップ1108では、コンピュータは、焦点面をビルド体積に対して再配置し、それによって、光学系の焦点面がビルド体積内の新しい深度に位置するように露光システムを構成してもよい。好ましい実施形態では、露光システムは調整可能な光学機器を備える。その場合、調整可能な光学機器の対物レンズに対して焦点面をシステムの光軸に沿って移動させてもよく、ビルド体積は対物レンズに対して静止させたままであってもよい。異なる実施形態では、システムの焦点距離は固定したままであってもよいが、ビルド体積は、光学機器に対して光軸に平行な方向に移動させる。一実施形態では、ステップ1108は、ステップ1104とステップ1106の間で繰り返されてもよい。

【0150】

ステップ1104～ステップ1108は、露光画像のシーケンス全体を使用してビルド体積を照明するまで繰り返されてもよい。代表的な実施形態では、露光システムは、ビルド体積をスキャンし、焦点面をビルド体積内の隣接する層に移動させる。一実施形態では、活性化場による照明と阻害場による照明との間に追加の再配置ステップを存在させることができる。

【0151】

図12A～図12Cは、本発明の実施形態において使用される場合がある1つまたは複数の対物レンズについての配置を示す。一般に、光学系の解像度は対物レンズの開口数（NA）に依存する。開口数は、屈折率とレンズによって形成される光円錐の開口角の2分の1の正弦との積として定義される。屈折率が1.0の媒体として空気を使用するいわゆる乾燥対物レンズは、NAを最大1.0とすることができる。これは180°の開口角に相当し、現実的に実現不能である。より屈折率が高い媒体に浸漬させた対物レンズ、たとえば屈折率が約1.5であるオイルを使用する油浸対物レンズは、より高いNA、したがって、より高い解像度に達する場合がある。上記に図2を参照しながらより詳細に説明したように、焦点深度は対物レンズの開口数に反比例する。したがって、高開口数システムは、すべての3つの次元において高解像度を実現する場合がある。

【0152】

図12Aは、半開口角1204を有する光円錐1203によってビルド体積1200を照明する代表的な対物レンズ1202を示す。

【0153】

光円錐はさらに、光軸1206および焦点面1208を画定する。露光システムの有効開口数を高めるために、複数の対物レンズおよび／または1つまたは複数の可動対物レンズが使用されてもよい。

【0154】

図12Bは、ビルド体積1200に対してそれぞれの異なる角度に向けられた2つの対物レンズ1212₁,₂を有する実施形態を示す。有効半開口角1214、したがって、有効開口数は、個々の各対物レンズの開口数よりも大きい。

【0155】

そのような実施形態では、露光画像が各対物レンズについて、ビルド体積内の各焦点面または各焦点深度について算出されてもよい。ビルド体積は、複数の露光画像によって同時に照明されてもまたは順次照明されてもよい。同様の光学系を立体顕微鏡法または光シート顕微鏡法(LSM)の分野にも見ることができ、これらの顕微鏡法では、第1の対物レンズが、励起光を投影するために使用され、第2の対物レンズが試料によって放出された蛍光を捕捉する。他の実施形態では、3つ以上、たとえば、3つ、4つ、6つ、または6つよりも多くの対物レンズが使用されてもよい。

10

【0156】

図12Cは、複数の位置(点線によって示されている)の間を移動するように構成された可動対物レンズ1222を有する実施形態を示す。ビルド体積1200に対する対物レンズの配向は、各深度においてそれぞれに異なる角度に投影されるように変更されてもよい。可動対物レンズの有効半開口角1224、したがって有効開口数は、(静止)対物レンズ自体の開口数よりも大きい。

【0157】

そのような実施形態では、各深度における単一の露光画像を事前に算出し投影する代わりに、各深度、すなわち各焦点面に複数の画像が投影されてもよく、一方、対物レンズの配向はビルド体積に対して変更される。実装形態に応じて、複数の所定の位置の各々について露光画像が算出されてもよく、または対物レンズが移動する間に露光画像が連続的に適応されてもよい。一実施形態では、対物レンズは、ビルド体積の表面に平行な軸を中心として回転してもよい。異なる実施形態では、対物レンズは、ビルド体積に垂直な軸を中心として回転してもよく、またはビルド体積が回転可能な段上に設置されてもよい。

20

【0158】

複数の対物レンズを有するかまたはビルド体積に対して移動可能な1つもしくは複数の対物レンズを有する実施形態は、単一の対物レンズのパラメータによって指示される限界を超えてシステムの解像度を高め、したがって、形成されるオブジェクトにおいてより高い解像度および／またはより小さいディテールを得る方法を提供する場合がある。

30

【0159】

図13は、本開示で説明するような露光システムにおいて使用され得る例示的なデータ処理システムを示すブロック図である。データ処理システム1300は、システムバス1306を通じてメモリ素子1304に結合された少なくとも1つのプロセッサ1302を含んでもよい。したがって、データ処理システムは、メモリ素子1304内にプログラムコードを記憶してもよい。さらに、プロセッサ1302は、システムバス1306を介してメモリ素子1304からアクセスされるプログラムコードを実行してもよい。一態様では、データ処理システムは、プログラムコードを記憶しおよび／または実行するのに適したコンピュータとして実装されてもよい。しかし、データ処理システム1300が、プロセッサとメモリとを含み、本明細書内で説明した機能を実行することのできる任意のシステムの形で実装されてもよいことを諒解されたい。

40

【0160】

メモリ素子1304は、たとえば、ローカルメモリ1308と1つまたは複数の大容量記憶デバイス1310などの1つまたは複数の物理メモリデバイスを含んでもよい。ローカルメモリは、ランダムアクセスメモリまたは一般にプログラムコードの実際の実行時に使用されるその他の非永続メモリデバイスを指す場合がある。大容量記憶デバイスは、ハードドライブまたはその他の永続データ記憶デバイスとして実装されてもよい。処理システム1300は、実行時に大容量記憶デバイス1310からプログラムコードを取り出さなければならない回数を減らすために少なくとも一部のプログラムコードを一時的に記憶する1つまたは複数のキャッシュメモリ(図示せず)を含んでもよい。

50

【0161】

場合によっては、入力デバイス1312および出力デバイス1314として示される入出力（I/O）デバイスをデータ処理システムに結合することができる。入力デバイスの例には、限定はしないが、たとえばキーボード、マウスなどのポインティングデバイスなどを含めてもよい。出力デバイスの例には、限定はしないが、たとえばモニタまたはディスプレイ、スピーカなどを含めてもよい。入力デバイスおよび／または出力デバイスは、データ処理システムに直接結合されてもよく、または介在する入出力コントローラを通じて結合されてもよい。データ処理システムを介在するプライベートネットワークまたはパブリックネットワークを通じて他のシステム、コンピュータシステム、リモートネットワークデバイス、および／またはリモート記憶デバイスに結合するのを可能にするために、ネットワークアダプタ1316がデータ処理システムに結合されてもよい。ネットワークアダプタは、前記システム、デバイス、および／またはネットワークによって送信されるデータを受信するためのデータ受信機と、データを前記システム、デバイス、および／またはネットワークに送信するためのデータ送信機とを備えてもよい。モデム、ケーブルモデム、およびイーサネットカードは、データ処理システム1350とともに使用され得る様々な種類のネットワークアダプタの例である。

10

【0162】

図13に示すように、メモリ素子1304はアプリケーション1318を記憶してもよい。データ処理システム1300はさらに、アプリケーションの実行を推進することができるオペレーティングシステム（図示せず）を実行してもよいことを諒解されたい。アプリケーションは、実行可能なプログラムコードの形で実装され、データ処理システム1300、たとえばプロセッサ1302によって実行することができる。データ処理システムは、実行されるアプリケーションに応じて、本明細書でさらに詳しく説明する1つまたは複数の動作を実行するように構成されてもよい。

20

【0163】

一態様では、たとえば、データ処理システム1300は、クライアントデータ処理システムを表してもよい。その場合、アプリケーション1318は、クライアントアプリケーションを表してもよく、クライアントアプリケーションは、実行されたときに、本明細書で「クライアント」を参照して説明する様々な機能を実行するようにデータ処理システム1300を構成する。クライアントの例には、限定はしないが、パーソナルコンピュータ、ポータブルコンピュータ、携帯電話などを含めることができる。別の態様では、データ処理システムはサーバを表してもよい。たとえば、データ処理システムは（HTTP）サーバを表してもよく、その場合、アプリケーション1318は、実行されたときにデータ処理システムを（HTTP）サーバ動作を実行するように構成してもよい。別の態様では、データ処理システムは、本明細書で参照されるモジュール、ユニット、または機能を表してもよい。

30

【0164】

本明細書で使用される用語は、特定の実施形態について説明することのみを目的としており、本発明を限定することを意図していない。本明細書では、単数形「a」、「an」、および「the」は、文脈による明白な別段の指示がない限り、複数形も含むことを意図している。用語「備える（含む）」および／または「備えている（含んでいる）」が、本明細書で使用されるときに、前述の特徴、整数、ステップ、動作、要素、および／または構成要素の存在を指定するが、1つまたは複数の他の特徴、整数、ステップ、動作、要素、構成要素、および／またはそれらの群の存在または追加を除外しないことがさらに理解されよう。

40

【0165】

特許請求の範囲内のすべてのミーンズプラスファンクション要素またはステッププラスファンクション要素の対応する構造、材料、行為、および均等物は、具体的に請求される他の請求される要素と組み合わせて機能を実行するための任意の構造、材料、または行為を含むことが意図される。本発明の説明は、図示および説明を目的として提示されている

50

が、網羅的であることを意図しておらず、また、本発明を開示された形態に限定すること
も意図していない。当業者には、本発明の範囲および趣旨から逸脱せずに多数の修正実施
形態および変形実施形態が明らかになろう。実施形態は、本発明の原則および実際の用
途について最も適切に説明し、当業者が本発明を様々な実施形態について、考えられる特
定の使用に適した様々な修正実施形態とともに理解するのを可能にするために選択され、
説明されている。

【符号の説明】

【0166】

100	体積マイクロリソグラフィシステム	
102	露光システム	10
103	画像形成モジュール	
104	光源	
105	光線	
106	空間光変調器	
108	光学系、集束素子	
109	感光媒体、ビルド体積	
110	段、ホルダ	
112	コンピュータシステム	
114	プロセッサ	
116	メモリ	20
118	露光画像	
120 ₁	第1の光学系	
120 ₂	第2の光学系	
122	鏡	
124 ₁₋₂	レンズ	
126 ₁₋₂	レンズ	
128	鏡	
202	画像形成モジュール、SLM	
204	光円錐	
206	光集束素子、対物レンズ	30
208	ビルド体積	
210	焦点面	
212	焦点深度	
214	露光画像	
216	焦点距離	
220	第1の画像形成モジュール	
222	第2の画像形成モジュール	
224	ダイクロイックミラー	
226	監視システム	
302	画像形成モジュール	40
304	画素	
306	発散光円錐	
308	対物レンズ	
310	ビルド体積	
312	画像	
314	ボクセル	
316	焦点面	
322	画像形成モジュール	
324	画素	
326	発散光円錐	50

3 2 8	焦点面	
3 3 8	第 2 の対物レンズ	
4 0 2	単一の点	
4 0 4	水平線	
4 0 6	垂直線	
7 0 2、7 0 4	照明システム	
7 0 6	ビルド体積	
9 0 2	体積ターゲット重合速度	
1 2 0 0	ビルド体積	
1 2 0 2	対物レンズ	10
1 2 0 3	光円錐	
1 2 0 4	半開口角	
1 2 0 6	光軸	
1 2 0 8	焦点面	
1 2 1 2	$1, 2$ 対物レンズ	
1 2 1 4	有効半開口角	
1 2 2 2	可動対物レンズ	
1 2 2 4	有効半開口角	
1 3 0 0	データ処理システム	
1 3 0 2	プロセッサ	20
1 3 0 4	メモリ素子	
1 3 0 6	システムバス	
1 3 0 8	ローカルメモリ	
1 3 1 0	大容量記憶デバイス	
1 3 1 2	入力デバイス	
1 3 1 6	ネットワークアダプタ	
1 3 1 8	アプリケーション	
1 3 5 0	データ処理システム	
$L(x, y, z)$	累積照度	
$P(x, y, z)$	重合速度	30
P_0	ターゲット化学反応速度	
$P(S_0)$	化学反応速度	
P	重合速度モデル	
R	放射伝搬モデル	
S_0	近似解	
$S(x, y, z)$	露光画像のシーケンス	

【図面】

【図 1 A】

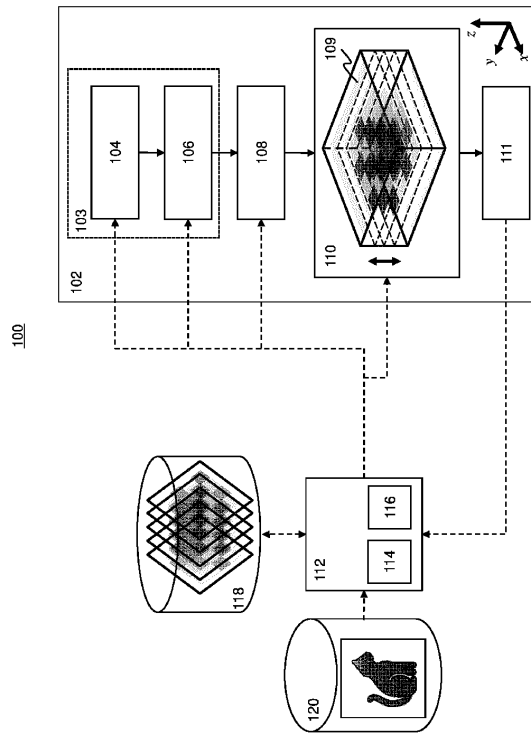


FIG. 1A

【図 1 B】

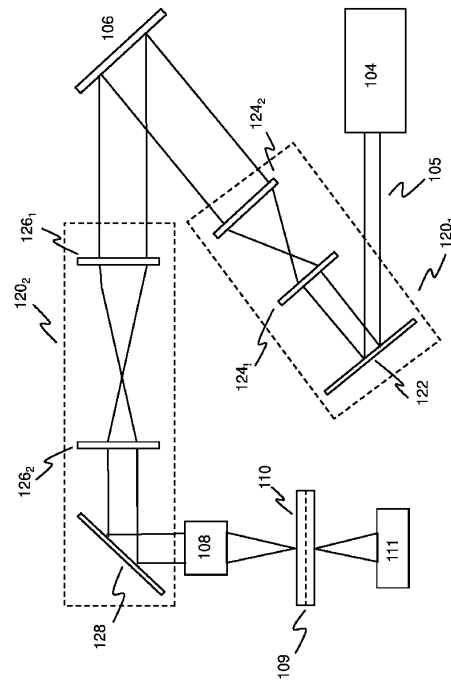


FIG. 1B

【図 2 A - 2 B】

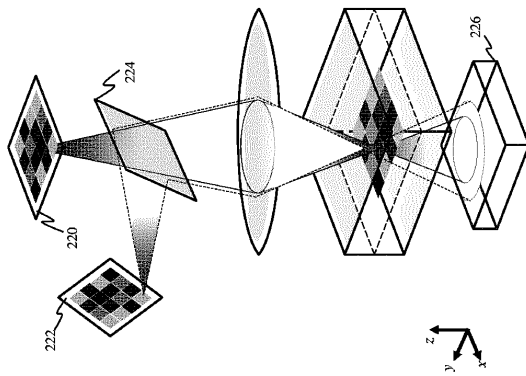


FIG. 2B

【図 3 A】

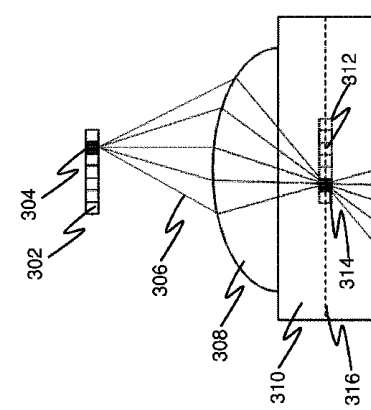


FIG. 3A

FIG. 2A

【図 3 B】

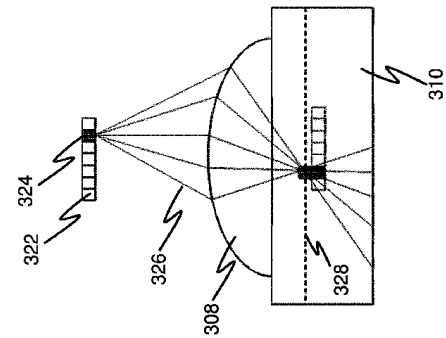


FIG. 3B

【図 3 C】

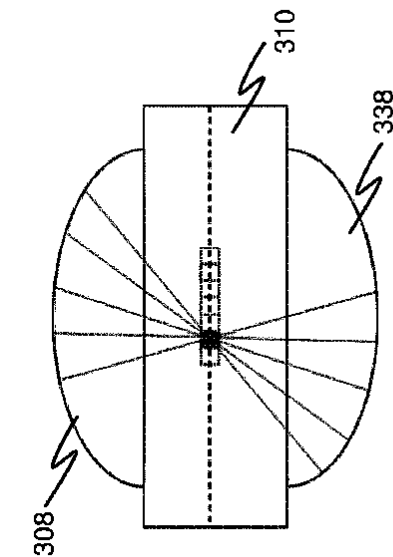


FIG. 3C

【図 4】

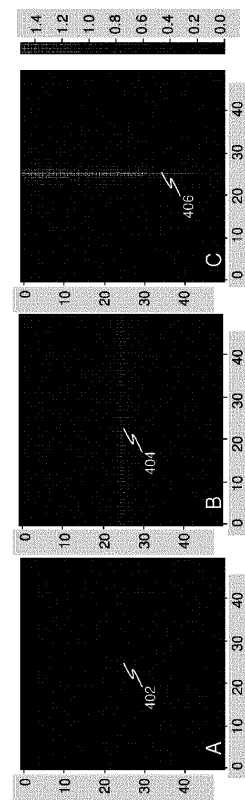


FIG. 4

【図 5】

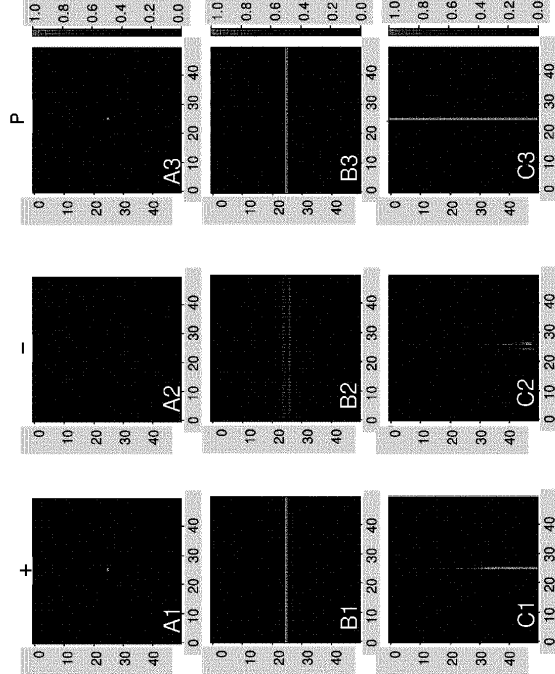


FIG. 5

10

20

30

40

50

【図 6】

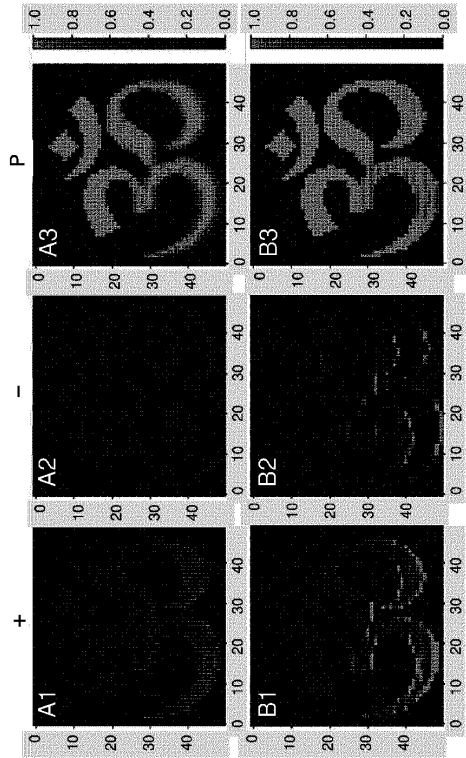


FIG. 6

【図 7】

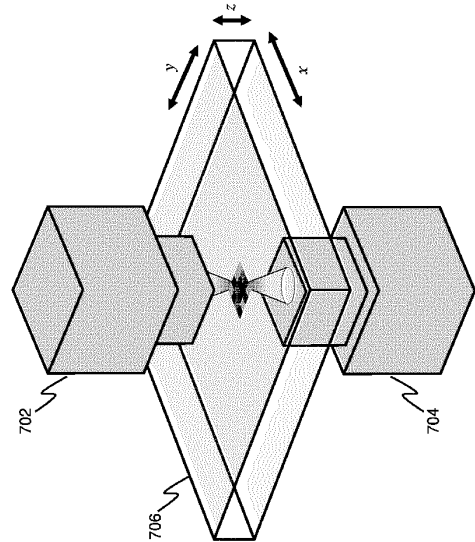
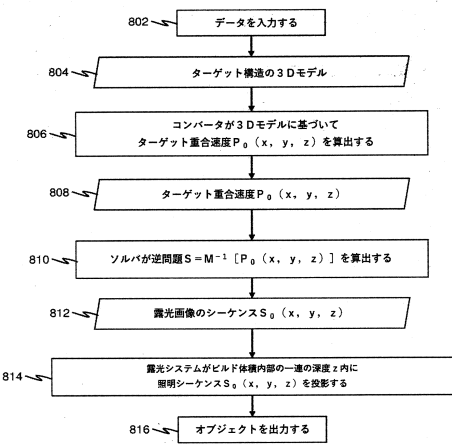
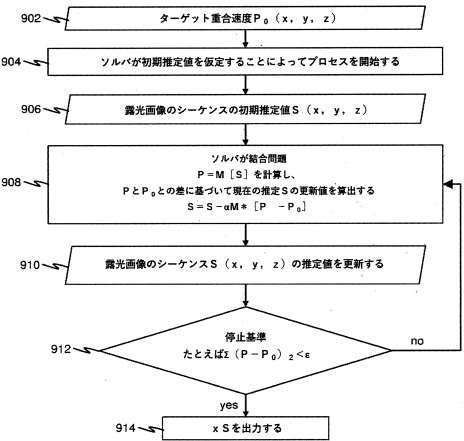


FIG. 7

【図 8】



【図 9】



10

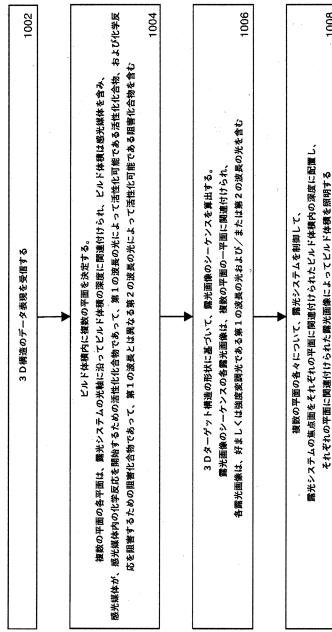
20

30

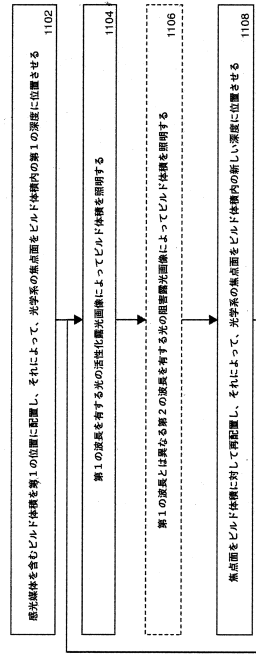
40

50

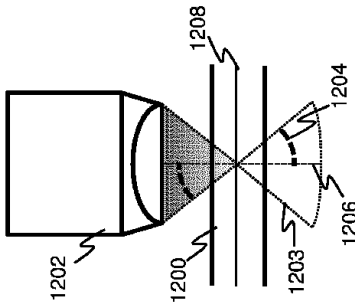
【図 10】



【図 11】



【図 12 A】



【図 12 B】

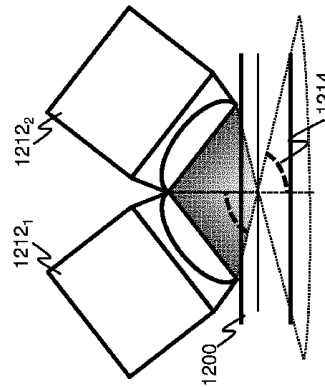
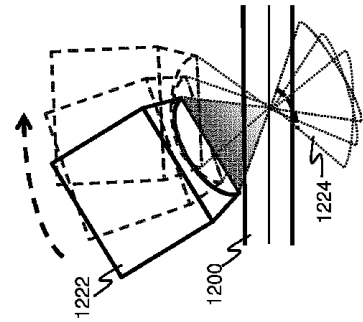


FIG. 12A

FIG. 12B

【図 1 2 C】



【図 1 3】

FIG. 12C

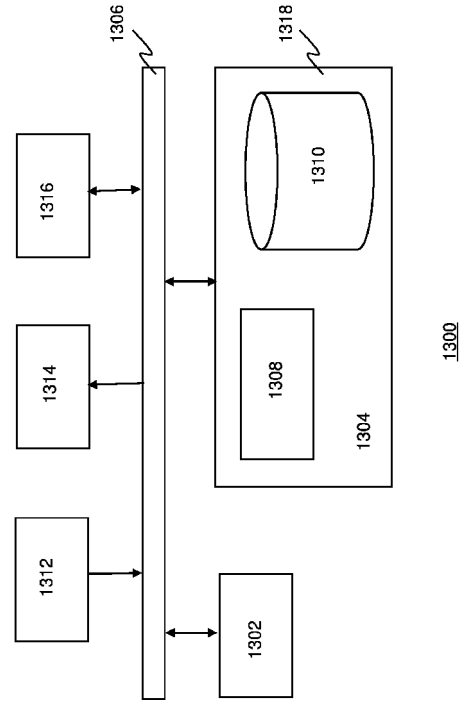


FIG. 13

10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類	F I
B 3 3 Y 30/00 (2015.01)	B 3 3 Y 30/00
B 3 3 Y 50/02 (2015.01)	B 3 3 Y 50/02

内

審査官	右▲高▼ 孝幸
(56)参考文献	特開平 1 0 - 1 4 2 8 0 6 (J P , A) 国際公開第 2 0 1 7 / 1 0 4 3 6 8 (W O , A 1)
(58)調査した分野	(Int.Cl., D B 名)
	G 0 3 F 7 / 2 0
	B 2 9 C 6 4 / 1 3 5
	B 2 9 C 6 4 / 3 9 3
	B 2 9 C 6 4 / 2 9 1
	B 3 3 Y 1 0 / 0 0
	B 3 3 Y 3 0 / 0 0
	B 3 3 Y 5 0 / 0 2