

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5801558号
(P5801558)

(45) 発行日 平成27年10月28日(2015.10.28)

(24) 登録日 平成27年9月4日(2015.9.4)

(51) Int.Cl. F I
G O 3 F 7/20 (2006.01) G O 3 F 7/20 5 O 1

請求項の数 1 (全 31 頁)

(21) 出願番号	特願2010-548796 (P2010-548796)	(73) 特許権者	505005049
(86) (22) 出願日	平成21年2月17日(2009.2.17)		スリーエム イノベイティブ プロパティ
(65) 公表番号	特表2011-514556 (P2011-514556A)		ズ カンパニー
(43) 公表日	平成23年5月6日(2011.5.6)		アメリカ合衆国, ミネソタ州 55133
(86) 国際出願番号	PCT/US2009/034287		-3427, セント ポール, ポスト オ
(87) 国際公開番号	W02009/108543		フィス ボックス 33427, スリーエ
(87) 国際公開日	平成21年9月3日(2009.9.3)		ム センター
審査請求日	平成24年1月25日(2012.1.25)	(74) 代理人	100099759
(31) 優先権主張番号	61/031, 538		弁理士 青木 篤
(32) 優先日	平成20年2月26日(2008.2.26)	(74) 代理人	100092624
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 鶴田 準一
前置審査		(74) 代理人	100114018
			弁理士 南山 知広
		(74) 代理人	100141254
			弁理士 榎原 正巳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 多光子露光システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

露光システムであって、

ビームを光軸に沿って実質的に第1の波長で放射する光源であって、該ビームは前記第1の波長で実質的に光学的に透明である樹脂中に重合を誘起する光源と、

第1のビームモニターシステムであって、該第1のモニターシステムは、前記ビームの第1の特性をモニターして第1の信号を生成し、前記第1の特性は、前記ビームの前記光軸に垂直な面内の前記ビームのパワー、形状、及び位置の少なくとも1つを含む第1のビームモニターシステムと、

前記ビームの発散をモニターする第1の発散モニターシステムと、

前記ビームの発散及び形状の少なくとも1つを調整する第1の発散変調システムと、

第1の速度で前記ビームのパワーを調整する第1のパワー制御システムと、

第2のモニターシステムであって、該第2のモニターシステムは、前記ビームの前記第1の特性をモニターし、第2の信号を生成し、前記第1及び第2の信号は前記第1の特性の調整に使用される、第2のモニターシステムと、

前記樹脂の露光を制御するために前記ビームを透過させる又は阻止する第1のシャッターと、

前記光軸に沿った前記ビームの焦点の位置をモニターする第3のモニターシステムと、

前記ビームの発散及び形状の少なくとも1つを調整する第2の発散変調システムと、

前記第1の速度より大きくない第2の速度で前記ビームを走査する第1のガルバノメー

10

20

ターシステムであって、前記走査は前記光軸に実質的に垂直な第 1 の方向に沿ったものである、第 1 のガルバノメーターシステムと、

前記第 1 の速度より大きくない第 3 の速度で前記ビームを走査する第 2 のガルバノメーターシステムであって、前記走査は前記光軸に実質的に垂直であり、前記第 1 の方向とは異なる第 2 の方向に沿ったものである、第 2 のガルバノメーターシステムと、

前記樹脂内の位置で前記ビームを集束するための対物レンズシステムと、

前記樹脂を保持及び位置決めし、並びに前記樹脂に対する温度及び振動の少なくとも 1 つの影響を低減するための試料保持システムと、

を備える、露光システム。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

本発明は、光学システム、特に光硬化型材料を用いる多光子露光方法での使用に好適な光学システムに関する。

【背景技術】

【0002】

多光子硬化方法は、米国特許第 6,855,478 号で述べられている。これらの方法では、多光子硬化型光反応性組成物の層を基材上に塗布し、超高速レーザービームなどの集束照射エネルギー源を用いて、選択的に硬化させる。多光子硬化技術は、ミクロ - 又はナノスケールの解像度を持つ 2 次元 (2D) 及び / 又は 3 次元 (3D) 構造物を加工する

20

のに使用され得る。

【0003】

多光子硬化技術を使用して、レーザービームの焦点の位置を光反応性組成物内で 3 次元 (すなわち、x 軸、y 軸、及び z 軸方向) 制御することにより、3D 構造物がボクセル (3D 体積要素) ごとに作製され得る。多くの場合、ほぼ単一のボクセル層 (すなわち、x - y 面) を硬化させ、続いて焦点を約 1 ボクセル長さ (すなわち、z 軸上) 移動させ、次の層 (すなわち、x - y 面) を硬化させることにより、3D 構造物が形成される。所望の構造物が少なくとも部分的に硬化されるまで、この方法を繰り返し得る。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

30

【0004】

一態様では、本開示は、ビームを光軸に沿って放射する光源を含む露光システムに関する。ビームは樹脂中に多光子反応を誘起することができる。本露光システムは、多光子反応を受ける樹脂と、自動化システムと、を更に含む。自動化システムは、光軸に垂直な面内のパワー、パルス長、形状、発散、又は位置から選択されるビームの少なくとも 1 つの性質を測定し、ビームのこの性質を表示する少なくとも 1 つの信号を生成するモニターを含む。サブシステムはモニターからの信号に応答してビームを調整する。

【0005】

別の態様では、本開示は、ビームを光軸に沿って放射する光源を含み、ビームが樹脂中に多光子反応を誘起することができる、露光システムに関する。本露光システムは、多光子反応を受ける樹脂と、並びに樹脂内のボクセル形状をモニターする自動化システムと、を更に含む。この自動化システムは、ボクセル形状を表示する信号を生成し、信号に応答してビームを調整する。

40

【0006】

更に別の態様では、本開示は、ビームを光軸に沿って放射する光源を含み、ビームが樹脂中に多光子反応を誘起することができる、露光システムに関する。本露光システムは、多光子反応を受ける樹脂と、自動化システムと、を更に含む。この自動化システムは、樹脂内のボクセル形状をモニターする手段、及びこのモニターする手段からの信号に応答してビームを調整する手段を含む。

【0007】

50

更に別の態様では、本開示は、ビームを光軸に沿って実質的に第1の波長で放射する光源を含み、ビームは第1の波長で実質的に光学的に透明である樹脂中に重合を誘起する、露光システムに関する。本露光システムは、第1のビームモニターシステムを更に含み、この第1のビームモニターシステムはビームの第1の特性をモニターし、第1の信号を生成する。第1の特性は、ビームの光軸に垂直な面内のビームのパワー、形状、及び位置の少なくとも1つを含む。本露光システムは、ビームの発散をモニターする第1の発散モニターシステムと、ビームの発散及び形状の少なくとも1つを調整する第1の発散変調システムと、第1の速度でビームのパワーを調整する第1のパワー制御システムと、を更に含む。本露光システムは、第2のモニターシステムを更に含み、この第2のモニターシステムは、ビームの第1の特性をモニターし、第2の信号を生成し、第1及び第2の信号は第1の特性の調整に使用される。本露光システムは、樹脂の露光を制御するためにビームを透過させる又は阻止する第1のシャッターと、光軸に沿ったビームの焦点の位置をモニターする第3のモニターシステムと、ビームの発散及び形状の少なくとも1つを調整する第2の発散変調システムと、第1の速度より大きくない第2の速度でビームを走査する第1のガルバノメーターシステムであって、走査は光軸に実質的に垂直な第1の方向に沿ったものである、第1のガルバノメーターシステムと、第1の速度より大きくない第3の速度でビーム走査する第2のガルバノメーターシステムであって、走査は光軸に実質的に垂直であり、第1の方向とは異なる第2の方向に沿ったものである、第2のガルバノメーターシステムと、樹脂内の位置でビームを集束するための対物レンズシステムと、樹脂を保持及び位置決めし、並びに樹脂に対する温度及び振動の少なくとも1つの影響を低減するための試料保持システムと、を更に含む。

10

20

【0008】

本発明の1つ以上の実施形態の詳細を添付図及び以下の説明で明らかにする。本発明の他の特徴、目的、及び利点は、説明文並びに図面、及び特許請求の範囲より明らかとなるう。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】好ましくは複数のミクロ構造物又はナノ構造物を含む、物品の加工に使用され得る露光システムを図示するブロック図。

【図2】光学システムの概略ブロック図。

30

【図3】ビームモニターの概略ブロック図。

【図4】発散変調システムの図。

【図5】露光制御モジュールのブロック図。

【図6】半波長板と偏光板に入射するビームの概略ブロック図。

【図7】半波長板の角度に対するビームパワーのグラフ。

【図8】光学走査モジュールのブロック図。

【図9】光学リレーの概略光線図。

【図10A】2個のガルバノメーター及び2個の光学リレーを含むシステムの概略図。

【図10B】対物レンズ、光学リレー、及びガルバノメーターを含むシステムの概略図。

【図11】発散変調器の図。

40

【図12】光学システムのブロック図。

【図13】パワーダンプモジュールの概略ブロック図。

【図14】ビーム品質カメラとパワーモニターの概略ブロック図。

【図15】分散モジュールの概略ブロック図。

【図16】校正モジュールのブロック図。

【発明を実施するための形態】

【0010】

一般に、本開示は、多光子硬化型光反応性組成物中で反応を開始する能力を有する自動化システムに関する。自動化システムは、ビームの性質を測定するモニターと、モニターからの信号に応答してモニターした性質を改変するサブシステムを含む、多数の光学部品

50

を含む。光学部品は、硬化プロセスの確度及び／又は精度を改善するために、単独又は組み合わせで使用され得る。増強された確度によって、高度の精密形成３次元（３Ｄ）構造物、特に複雑形状又はマイクロ－又はナノスケールの外形を含む構造物の製造が可能となる。自動化システムによって、多光子硬化プロセスの商用に重要である、正確な構造物を高スループットで製造することも可能となる。

【００１１】

図１は、反応を選択的に開始し、及び／又は光反応性組成物を少なくとも部分的に硬化し、物品の外形を精密に規定するのに使用可能である、例示の自動化露光システムを図示するブロック図である。露光システム１０は光学システム１１を含み、光学システム１１の更なる詳細を図示するブロック図を図２に示す。露光システム１０は、制御モジュール１２、多光子硬化型光反応性組成物を含む樹脂２２、樹脂２２を載せる基材２０、基材２０を支持するチャック１８、及びチャック１８を持するステージ１６も含む。チャック１８及びステージ１６は、共に、試料（すなわち、樹脂２２）を保持する及び／又は位置決めする、試料保持システム１５を構成する。いくつかの実施形態では、保持システム１５は、硬化工程に及ぼす少なくとも１つの環境的な要素（例えば、温度及び／又は振動）の影響を低減することができる。

【００１２】

光学システム１１は、照射パルス２６のビーム（以降、「ビーム２６」）を提供する光源３２（図２も参照）を含む、光学画像形成システムである。ビーム２６は、高開口数対物レンズ（図８の対物レンズ１１４も参照）から画像面１４上に集束される。図１では、樹脂２２、基材２０、及びチャック１８は、露光システム１０内の画像面１４に対して位置決めされて、潜像の形成又は樹脂２２の少なくとも部分的な硬化が可能となる。

【００１３】

下記に更に詳述するように、自動化光学システム１１は、モニタリングを維持及び／又は増強し、並びに１つ以上のビーム２６の焦点２８の品質及び位置決めを制御するために単独又は組み合わせで選択的に適用される、モジュール機能要素を含み得る。本明細書では、用語、自動化は、初期の組み立てに続いて、１つ以上のビーム２６の焦点２８の位置をモニター及び／又は制御するのに、人間の介在なしでモジュール機能要素を適用する、システムを指す。システムの自動化された性状によって、ビーム２６（すなわち、サイズ、形状、パワー、パルス長、発散など）の特性を迅速な調整し、並びに焦点２８の位置を制御して、樹脂２２内に物品の外形を正確かつ迅速に作り出すことが可能となる。いくつかの実施形態では、システムの自動化された性状によって、ビーム特性及び／又は位置を約１秒未満で調整することが可能となり、他の実施形態では、これらの調整を約０．１秒未満で行うことができ、他の実施形態では、これらの調整をミリ秒のオーダーの時間枠で行うことができる。この迅速な調整は、物品生成の確度、速度、及び効率を増強する。

【００１４】

樹脂２２内で外形を３次元の解像度をもって作り出すために、樹脂２２は、樹脂２２内で１光子又は多光子の重合を開始するのに好適なエネルギーの波長を好ましくは含む、ビーム２６の波長の少なくとも一部に対して実質的に光学的に透明であり得る。

【００１５】

例えば、多光子重合工程では、十分なパワーのパルスが樹脂２２内に存在する場合、照射光の２個以上の光子が樹脂２２と実質的に同時に相互作用する、非線形プロセスが起こる。非線形相互作用プロセス時、樹脂の光増感剤成分の少なくとも一部は、焦点２８近傍で潜像の形成又は樹脂２２の少なくとも部分硬化を生じる化学反応を誘起する励起状態に達して、材料の少なくとも部分硬化したボクセルを生じる。焦点２８及び樹脂２２を x 軸、 y 軸又は z 軸方向（図１に直交する $x-y-z$ 軸を示す（ y 軸は図１に示す画像面に実質的に垂直な方向に延びる））の少なくとも１つで相互に移動して、樹脂２２内で多数個のボクセルを形成し得る。多数個のボクセルは、物品の本体及び／又は物品上の特定のマイクロ又はナノスケールの特性を規定する。

【００１６】

下記に更に詳述するように、ビーム 26 を樹脂 22 に対して x、y、及び / 又は z 軸方向に沿って移動し得る。又は、チャック 18、したがって基材 20 及び樹脂 22 をビーム 26 に対して x、y、及び / 又は z 軸方向に沿って移動し得る。あるいは、ボクセルを樹脂 22 内の異なる位置において加工するために、ビーム 26 及びチャック 18 の両方を相互に移動し得る。ビーム 26 を樹脂 22 に対して移動する実施形態では、光学システム 11 は、樹脂 22 内で焦点 28 の位置を制御するのに、樹脂 22 内でビーム 26 を選択的に位置決めすること、及び物品の外形を規定するのに、樹脂 22 の領域を選択的に硬化することの一助となり得る。いくつかの実施形態では、焦点 28 を 1 つの寸法（すなわち、x 軸、y 軸、又は z 軸）で走査し得る。他の実施形態では、ビーム 26 の焦点 28 を 2 次元（すなわち、x - y 軸、y - z 軸又は x - z 軸に沿って）で走査し得る。更に他の実施形態では、ビーム 26 の焦点 28 を 3 次元（すなわち、x - y - z 軸に沿って）で走査し得る。

10

【0017】

樹脂 22 は、意図されている用途によって広く多様であってもよく、任意の好適な多光子硬化型光反応性組成物を含む。例えば、多光子硬化型光反応性組成物は、反応性種、多光子増感剤、電子受容体、及び他の随意の成分を含み得る。通常、多光子露光型光反応性組成物は少なくとも 1 つの反応性種を含む。反応性種は、少なくとも部分硬化した樹脂 22 の感光性が高いこと、ビーム 26 への露光時の屈折率の変化が最小であること、強度及び靱性が高いことなどを含む多岐にわたる性質に基づいて選択され得る。

【0018】

20

光反応組成物内で使用するのに好適な反応種としては、硬化性の化学種と非硬化性の化学種の双方が挙げられる。硬化性の化学種が一般に好ましく、また硬化性の化学種としては、例えば、付加重合性モノマー及びオリゴマーと付加架橋性ポリマー（例えばアクリレート、メタクリレート、及びスチレンなどの特定のビニル化合物を含む、ラジカル重合性又は架橋性のエチレンシステム不飽和の化学種）、並びにカチオン重合性モノマー及びオリゴマー、カチオン架橋性ポリマー（この化学種は最も一般的には酸開始されており、またこの化学種には、例えばエポキシ、ビニルエーテル、シアネートエステルなどが挙げられる）、その他同種のもの、それらの混合物が挙げられる。

【0019】

このようなシステムの使用によって、集束照射ビーム 26 の焦点領域に重合を閉じ込める又は限定することができるので、光開始剤システムは、多光子光開始剤システムであり得る。このようなシステムは、好ましくは、少なくとも 1 つの多光子増感剤、少なくとも 1 つの光開始剤（又は電子受容体）、及び場合によっては、少なくとも 1 つの電子供与体を含む 2 成分 - 又は 3 成分システムである。このような多成分システムは増強された感度をもたらし、光反応性組成物の光反応の実施に必要とされる露光を低減することができる。このことは、短時間での露光を可能とさせ、樹脂 22 及び / 又は光学システム 11 の 1 つ以上の部品の相対運動により問題の可能性を低減させる。

30

【0020】

好ましくは、多光子光開始剤システムは以下：（a）少なくとも 2 個の光子を同時に吸収する能力を有し、好ましくはフルオレセインの吸収する能力よりも大きい二光子吸収断面積を有する、少なくとも 1 つの多光子増感剤、（b）場合によっては、多光子増感剤と異なり、増感剤の電子励起状態に電子を供与することができる、少なくとも 1 つの電子供与体化合物、及び（c）増感剤の電子励起状態から電子を受け取ることにより増感されて、少なくとも 1 つのフリーラジカル及び / 又は酸を形成することができる、少なくとも 1 つの光開始剤、の光化学的に有効な量を含む。

40

【0021】

あるいは、多光子光開始剤システムは、少なくとも 1 つの光開始剤を含む 1 成分システムであることができる。1 成分の多光子光開始剤システムとして有用な光開始剤としては、アシルホスフィンオキシド（例えば、Ciba により商品名 Irgacure 819 で販売されているもの、並びに BASF Corporation により商品名 Luci

50

rinで販売されているTPO-L 2, 4, 6トリメチルベンゾイルエトキシフェニルホスフィンオキシド)と、共有結合したスルホニウム塩部分を含むスチルベン誘導体(例えば、W. Zhou et al., Science 296, 1106 (2002))に述べられているもの)が挙げられるベンジルケタールなど、他の従来の紫外線(UV)光開始剤を利用することもできるが、その多光子光開始感度は一般に比較的低い。

【0022】

樹脂22の多光子光開始剤システムでの使用に好適な多光子光増感剤は、十分な光に露光されると、少なくとも2個の光子を同時に吸収することができるものである。好ましくは、光増感剤は、フルオレセインよりも大きい(すなわち、3', 6'-ジヒドロキシスピロ[イソベンゾフラン-1(3H), 9'-(9H)キサントレン]-3-オンよりも大きい)二光子吸収断面積を有している。一般に、好ましい断面積は、C. Xu及びW. W. WebbによりJ. Opt. Soc. Am. B, 13, 481 (1996年)(Marder and Perry et al.によりPCT国際公開特許第WO98/21521号、85頁18~22行に引用されている)に記載された方法で測定される、約 $50 \times 10^{-50} \text{ cm}^4 \text{ 秒/光子}$ を超えることができる。

10

【0023】

より好ましくは、光増感剤の二光子吸収断面積は、フルオレセインの約1.5倍を超え(又は、あるいは、上記方法で測定される約 $75 \times 10^{-50} \text{ cm}^4 \text{ 秒/光子}$ を超える)、更により好ましくはフルオレセインの約2倍を超え(又は、あるいは、約 $100 \times 10^{-50} \text{ cm}^4 \text{ 秒/光子}$ を超える)、最も好ましくはフルオレセインの約3倍を超え(又は、あるいは、約 $150 \times 10^{-50} \text{ cm}^4 \text{ 秒/光子}$ を超える)、最適にはフルオレセインの約4倍を超える(又は、あるいは、約 $200 \times 10^{-50} \text{ cm}^4 \text{ 秒/光子}$ を超える)。

20

【0024】

好ましくは、この光増感剤は、反応性種(反応性種が液体であるならば)に可溶性であるか、又は反応性種と、及び樹脂22中に含まれる随意的のバインダーと相溶性である。最も好ましくは、この光増感剤は、また、米国特許第3,729,313号に記載の方法を使用して、2-メチル-4,6-ビス(トリクロロメチル)-s-トリアジンを、光増感剤の1光子吸収スペクトルと重なり合う波長範囲(1光子吸収条件)における連続照射下で増感させることもできる。

【0025】

光反応性組成物の多光子光開始剤システムに有用な電子供与体化合物は、電子を光増感剤の電子励起状態に供与できるこれらの化合物(光増感剤自身以外)である。このような化合物は、場合によっては、光開始剤システムの多光子感光性を増大させ、それによって光反応性組成物の光反応を成し遂げるのに必要な露光を減少させるために使用され得る。電子供与体化合物は、好ましくは、ゼロより大きくかつp-ジメトキシベンゼンの酸化電位以下である酸化電位を有している。好ましくは、酸化電位は、標準的な飽和カロメル電極(「S.C.E.」)に対して約0.3~1ボルトである。

30

【0026】

電子供与体化合物は、好ましくは反応性種に可溶性でもある。好適な供与体は、一般に、所望の波長の照射ビーム26に露光したとき、硬化速度又は樹脂22の画像濃度を増加させることができる。

40

【0027】

光反応性組成物の反応性種に好適な光開始剤(すなわち、電子受容体化合物)は、多光子光増感剤の電子励起状態から電子を受け取り、少なくとも1つのフリーラジカル及び/又は酸を形成することにより光増感されることができるものである。そのような光開始剤としては、ヨードニウム塩(例えば、ジアリールヨードニウム塩)、スルホニウム塩(例えば、所望によりアルキル基又はアルコキシ基で置換されており、また場合によっては、隣接アリール部分を橋架けしている2,2'オキシ基を有するトリアリールスルホニウム塩)、その他同種のもの、及びそれらの混合物が挙げられる。

【0028】

50

光開始剤は、好ましくは反応種に可溶性であり、また好ましくは貯蔵性を有している（すなわち、光増感剤及び電子供与体化合物の存在下で、反応種中に溶解したとき、反応種の反応を自発的に促進しない）。したがって、特定の光開始剤の選択は、上述のように、選択される特定の反応種、光増感剤、及び電子供与体化合物にある程度依存し得るものである。反応種が酸開始化学反応を受けることができる場合、光開始剤はオニウム塩（例えば、ヨードニウム塩又はスルホニウム塩）である。

【0029】

多光子光重合システムでの使用に好適な樹脂に関する更なる詳細は、例えば、代理人整理番号第63221US002号を有し、「HIGHLY FUNCTIONAL MULTIPHOTON CURABLE REACTIVE SPECIES」と題する米国特許出願第60/979,229号に見い出すことができる。

10

【0030】

チャック18により支持される基材20は、好ましくは樹脂22を支持する。本出願にわたって樹脂22を支持する基材20が参照されているが、いくつかの実施形態では、基材20は、必要でなく、樹脂22は、チャック18により直接に支持され得るということを理解すべきである。基材20は、樹脂22を支持するのに十分な任意の好適な材料又は材料の組み合わせから形成され得る。基材20は、射出成形、圧縮成形、エンボス加工、押し出しエンボス加工、金型内での重合、スタンピング、鋳型、機械加工、エッチング、焼結、研磨、化学的及び物理的堆積、結晶化、硬化（単一及び多光子硬化を含む）などを含む、任意の従来の方法により形成され得る。いくつかの実施形態では、基材20は、樹脂22を支持するために実質的に平坦な表面を規定する。このような実施形態では、基材20は、シリコンウエハ、ガラス板、機械加工された基材などを含み得る。

20

【0031】

更に他の実施形態では、基材20は実質的に非平坦な表面を含み得る。例えば、基材20は、1つ以上の軸に沿って凹面又は凸面の曲面を有し得る。例えば、基材20は、円筒形、球形、楕円形、鞍形などであり得る。いくつかの実施形態では、基材20は、ダイヤモンド旋削法、研磨などにより形成されるものなどの精密ロールであり得る。これらの実施形態では、基材20の表面は実質的に平滑であるか、パターン化された外形などの外形を含み得る。いくつかの好ましい実施形態では、基材20が曲面を有する場合には、基材20は実質的に平滑である。

30

【0032】

基材20は、山又は谷などの表面不規則性を含み得る。いくつかの実施形態では、ポリエチレンテトラレート、ポリイミドなどから形成されるものなどのマイクロ構造化フィルムは、好適な基材となり得る。加えて、いくつかの実施形態では基材20は、凹部、突出部、柱、チャンネル、溝、空洞などの連続的又は不連続的なパターンを含む外形を有し得る。外形は、例えば、レーザー書き込み、化学エッチング、鋳型などを含む任意の従来の方法により形成され得る。例えば、微少電気機械システム（MEMS）などの構造物は、基材の外形の上又は中に多光子開始重合により形成され得る。外形に構造物を付加する実施例は、例えば、米国特許出願公開第2003/0155667号に見い出すことができる。

40

【0033】

下記に更に詳述するように、基材20は、基材20の位置の位置合わせをx-y軸で可能とさせる基点構造物も含み得る。基点構造物としては、連続的又は非連続的な溝、凹部、突出部などが挙げられる。

【0034】

基材20は、任意の好適な機構を用いてチャック18に対して保持され得る。一実施形態では、基材20は、機械的な締結具を用いてチャック18に対して実質的に固定的に保持される。機械的な締結具としては、クリップ、スクリュー、ボルト、接着剤などが挙げられる。機械的な締結具は、好ましくは基材20に対して複数の個所で配設されて、力を基材20上に分配し、基材20の不必要な変形を最小化する又は防止する。

50

【 0 0 3 5 】

別な実施形態では、基材 2 0 は、真空圧力を用いてチャック 1 8 に対して実質的に固定的に保持される。真空圧力は、機械的な締結具よりもより均一に基材 2 0 上に力を分配し、基材 2 0 の不必要な変形を減少させ得る。

【 0 0 3 6 】

チャック 1 8 は基材 2 0 を支持する表面を規定する。このように、多くの場合、チャック 1 8 の構造は、基材 2 0 の構造にぴったり合うように選択される。例えば、図 1 に示す実施形態では、チャック 1 8 は、実質的に平坦な基材 2 0 を支持するために実質的に平坦な表面 1 8 A を規定する。他の実施形態では、基材 2 0 は、曲面を規定し、その場合には、チャック 1 8 は、基材 2 0 の曲面を支持するような形状となり得る。例えば、基材 2 0 は、樹脂 2 2 を支持する実質的に円筒形の表面を規定し、その場合には、チャック 1 8 は円筒形の基材 2 0 を支持するような形状となり得る。あるいは、基材 2 0 の構造は、チャック 1 8 の構造にぴったり合うように選択され得る。例えば、チャック 1 8 は、ローラーに搭載された表面を含むか、又は基材 2 0 を回転するために旋盤を含み得る。

【 0 0 3 7 】

チャック 1 8 は、1 つ以上の成分材料から加工され、基材 2 0 及び樹脂 2 2 のインターフェース 2 4 の、温度の変化に正確かつ合致している位置を提供する 1 つ以上の好適な材料から加工され得る。例えば、チャック 1 8 は、比較的低い熱膨張係数 (C T E) を呈する、1 つ以上の材料から加工され得る。チャック 1 8 に好適な材料としては、グラナイト、P e r l u m i t e、窒化ケイ素などが挙げられるが、これらに限定されるものでない。基材 2 0 が置かれる実質的に平坦な表面 1 8 A を維持し、温度変化によるビーム 2 6 に対する基材 2 0 の位置の相対的に小さな変化をもたらすには、チャック 1 8 には比較的低い C T E が望ましい。

【 0 0 3 8 】

いくつかの実施形態では、チャック 1 8 は、x 軸、y 軸、及び z 軸方向の少なくとも 1 つに沿って可動性である。チャック 1 8 とステージ 1 6 との間の摩擦を低減するために、チャック 1 8 は空気軸受け表面 (A B S) 上に支持され得る。チャック 1 8 とステージ 1 6 との間の摩擦を低減することは、制御モジュール 1 2 がチャック 1 8 を低エネルギー所用量で x 軸及び y 軸方向に沿って高精度で移動させることの一助となり得る。A B S は、圧縮空気、圧縮窒素又は圧縮不活性ガスなどの任意の好適な源により生成され得る。

【 0 0 3 9 】

チャック 1 8 は、例えばモーターの動力下で x 軸、y 軸、及び z 軸方向の少なくとも 1 つに沿って可動性であり得る。例えば、1 つの好ましい実施形態では、リニアモーターを使用して、チャック 1 8 を高精度かつ正確な方法で移動し得る。いくつかの実施形態では、例えばチャック 1 8 に沿った複数の個所で独立の z 軸調整を提供することにより、チャック 1 8 も基材 2 0 を平坦化する能力をもたらし得る。

【 0 0 4 0 】

ステージ 1 6 も 1 つ以上の好適な材料から作製され得る。いくつかの実施形態では、ステージ 1 6 は、例えば、グラナイトなどの比較的低い C T E の 1 つ以上の材料を含む。他の実施形態では、C T E の大きさは、露光システム 1 0 における C T E の整合より重要でない。露光システム 1 0 のさまざまなモジュールの C T E の整合は、熱膨張又は収縮の量が異なることによる個別モジュールの相互の相対運動を低減し、したがって樹脂 2 2 とビーム 2 6 の相対運動を低減し得る。更に他の実施形態では、例えば、冷却フィン、熱交換器などを用いて、チャック 1 8 及びステージ 1 6 を受動的又は能動的に冷却し得る。加えて、ステージ 1 6 を、ステージ 1 6 を支持する構造物 (すなわち、床) から実質的に分離され得る。ステージ 1 6 を支持構造物から分離することによって、樹脂 2 2 に及ぼす支持構造物の振動の影響が低減され得る。ステージ 1 6 の分離は、例えばポリマー振動分離パッドなどの材料を用いて達成され得る。

【 0 0 4 1 】

制御モジュール 1 2 は、チャック 1 8 の位置を x - 、 y - 、及び / 又は z 軸で変化させ

10

20

30

40

50

て、ビーム 26 の焦点 28 の位置を樹脂 22 に対して変え得る。しかしながら、いくつかの実施形態では、樹脂 22 に対するビーム 26 の焦点 28 の x 軸、y 軸、及び z 軸位置の少なくとも 1 つは、光学システム 11 の部品を用いて改変される。

【0042】

制御モジュール 12 は、一般に、光学システム 11 を制御し、1 つ以上のサブモジュールも含み得る。一実施形態では、制御モジュール 12 は、マイクロプロセッサ、コントローラー、デジタル信号プロセッサ (DSP)、特定用途向け集積回路 (ASIC)、現場書き換え可能なゲートアレイ (FPGA)、ディスクリート論理回路などのプロセッサを含む。いくつかの実施形態では、プロセッサは、ソフトウェア、ハードウェア、ファームウェア又はこれらの組み合わせを実行して、モジュール 32、34、36、38、82、42、46、及び 110 のそれぞれを制御し得る。

10

【0043】

図 2 は、光学部品の列を規定する、モジュール 32、34、36、38、82、42、46、及び 110 の配置の 1 つの実施形態を例示する、光学システム 11 のブロック図である。図 2 に示すモジュールの順序は、単に例示的なものであり、いかなる方法でも限定的なものではないと理解されるべきである。他の実施形態では、例えば、第 2 のビームモニター 42 及び位置検出器 46 は、異なる順番であり、光学システム 11 を組み込むスペースにより影響される寸法、形状又は他の配慮に依存し得る。さまざまなモジュール 32、34、36、38、82、42、46、及び 110 は、ビーム 26 の性質を測定するモニターシステム、及びビーム 26 の測定された性質を改変する能力のあるサブシステムの両方を含む。例えば、測定される性質としては、ビーム 26 の光軸に垂直な面内のパワー、パルス長、形状、発散、又は位置の少なくとも 1 つを含むことができる。ビーム 26 の測定される性質を改変する能力を有する特定のモニターシステム及びサブシステムは、下記に更に詳細に述べられる。

20

【0044】

光源 32 は、樹脂 22 の少なくとも部分的な硬化を開始するのに十分な強度の照射パルス 26 のビームを放射する。いくつかの実施形態では、ビーム 26 は、公称波長プラス又はマイナス約 5 nm などの相対的に狭い波長範囲を含み、実質的に第 1 の波長で放射されるとされ得る。多光子重合に有用なものなどのいくつかの実施形態では、放射照射光パルスの中心波長は、約 400 nm ~ 約 2000 nm の、好ましくは約 500 nm ~ 約 1000 nm の、より好ましくは約 750 nm ~ 約 850 nm の範囲であり得る。光源 32 は、光源 32 から樹脂 22 までのビーム 26 の経路により規定される光軸 27 に沿って照射光パルスを放射する。光学システム 11 を多光子重合方法で使用する実施形態では、光源 32 は、樹脂 22 の光反応性組成物中で使用される多光子開始システムに適切な波長で多光子吸収を生じさせるのに十分なパワーを有するビーム 26 を放射する。光源 32 は、樹脂 22 の硬化を開始するのに必要なピークパワーと強度を含むビーム 26 を放射する。いくつかの実施形態では、光源 32 は、約 100 fs など、約 1 フェムト秒 (fs) ~ 約 10 ps の出力パルス幅を含むビームを放射し得る。いくつかの他の実施形態では、光源 32 は、約 10 ns 未満の、好ましくは約 10 ps 未満の、より好ましくは約 100 fs 未満の出力パルス幅を含むビームを放射し得る。いくつかの場合には、高いパルス繰り返し速度が望ましいことがある。いくつかの他の実施形態では、光源 32 は、約 1 kHz 超の、好ましくは約 50 MHz 超の出力パルス繰り返し速度を含むビームを放射し得る。

30

40

【0045】

一実施形態では、光源 32 は、パルス化フェムト秒レーザー秒などの比較的低パワーの超高速レーザー光である。一例として、光源 32 は、Newport Corporation (Irvine, California) から市販されている、商品名 Mai Tai で Spectra-Physics から入手可能な Ti : サファイアレーザーを含み得るか、又はファーマをベースとした超高速レーザーを含み得る。

【0046】

いくつかの実施形態では、ボクセルは、単一レーザーパルスにより形成可能である。い

50

くつかの他の実施形態では、ボクセルの形成は、2個以上のパルスが必要とする。他の実施形態では、多数個パルスは複数のボクセルの硬化を開始し得る。「低パルスエネルギー」レーザービーム26は、樹脂22の体積を十分に硬化するには不十分なパワーを呈する照射光パルス26のビームを指す。むしろ、低パルスエネルギービーム26によって樹脂22内の体積を十分に硬化するには順次パルスが必要である。

【0047】

別の実施形態では、光源32は、樹脂22の完全硬化を開始するのに多数個のパルスが必要としない、高パワー連続波(CW)レーザーである。しかしながら、いくつかの場合には、レーザービーム26のパワーを最小化して、樹脂22の不測の加熱を最小とすることが望ましいことがある。高パワーCWレーザーが単一パルスにより樹脂22の体積の完全硬化を開始することは可能であり得るが、高パワーのCWレーザーを使用して、ボクセルを段階的な方法で順次硬化し得、ある場合にはこれにより正確な硬化プロファイルが得られる。

【0048】

いくつかの実施形態では、樹脂22の体積の硬化の開始には光学系無しでは不十分なビーム26を放射する、比較的低いパルスエネルギーのレーザーが光学要素との組み合わせで使用され得る。集束光学系は、光源32から出力されるビーム26の強度を増加させて、低パルスエネルギー光源32が放射するビーム26による樹脂22の硬化を可能とし得る。所望の場合は、光源32が出力するビーム26の強度を減少させるように、集束光学系を設計してもよい。光源32から所望の強度のビーム26を得るのに使用される光学要素の組み合わせは、「瞳関数合成(pupil function synthesis)」と呼ばれることがある。下記に更に詳述するように、プューピル関数合成は、ビーム26を集束する、焦点28においてビーム26に特別な形状を付与する(これは樹脂22内で形成されるボクセルのサイズを制御するのに望ましい場合がある)、又はビーム26の形状を変化させることができる。

【0049】

光源32は、不測に変動するパワー又は軌跡を有するビーム26を放射し得る。パワー変動は、ビーム26の焦点28の不安定な位置決めを生じることがあり、これは樹脂22に対して焦点28の位置を精密かつ正確に制御する光学システム11の能力に悪影響を及ぼし得る。光学システム11の1つ以上の部品の高周波又は低周波数振動も焦点28の位置決めに悪影響を及ぼし得る。例えば、システム10が配置されている建物に対する(すなわち、加熱、通風又は空気調和システムに対する)空気調和ユニットの振動が振動を生じる場合がある。

【0050】

第1の例のモニターは、第1のビームモニター34及び/又は第2のビームモニター42を含み得る。ビーム26の焦点28の位置に望まれる制御は高度であるために、ビーム26の位置は、光学システム11内の1つ以上の個所においてサンプリング及び制御され得る。この個所のそれぞれにおいて、ビーム26の少なくとも1つの特性を測定し、ビーム26の位置、パワー及び/又は形状に影響を及ぼす光学要素を制御することができる、少なくとも1つの特性に基づく信号を制御モジュール12などの素子に出力するために、ビームモニターを設置し得る。図2に図示する実施形態などのいくつかの実施形態では、光学システム11は、第1のビームモニター34と第2のビームモニター42を含んで、光学システム11中の2つの個所においてビーム26の位置モニタリング及び第1の特性の補正を提供する。第1及び第2のビームモニター34、42のそれぞれは、図3に示すように、位置センス検出器(PSD)62、デジタルカメラ64、ビーム走査モジュール66、及び制御モジュール68を含み得る。

【0051】

制御モジュール68は、露光システム10の制御モジュール12のように、マイクロプロセッサ、DSP、ASIC、FPGA、ディスクリート論理回路などのプロセッサを含み得る。このプロセッサは、ソフトウェア、ハードウェア、ファームウェア又はこ

10

20

30

40

50

これらの組み合わせを実行して、検出器 62、デジタルカメラ 64、及びビーム走査モジュール 66 のそれぞれを制御し得る。図 3 に示すビームモニター 34、42 の実施形態は制御モジュール 68 を含んで、位置センシング検出器 62、デジタルカメラ 64、及びビーム走査モジュール 66 を制御するが、他の実施形態では、露光システム 10 の制御モジュール 12 は必要な制御を提供し得る。あるいは、制御モジュール 12、68 は相互に組み合わせ使用され得る。

【0052】

焦点 28 の位置を適切に補正するために、第 1 のビームモニター 34 と第 2 のビームモニター 42 は、相対的に高速でビーム 26 の位置の測定に、PSD 62 を含む。いくつかの実施形態では、PSD 62 は、それぞれの四分割検出器中のシリコンチップにより出力される電圧に基づいて x - y 面（光軸 27 に垂直な面）でビーム 26 の位置を指示する 4 個のシリコンチップを含む、四分割検出器を含む。PSD 62 は、ビーム走査モジュール 66 の制御に信号を使用するビームモニターコントローラー 68 に信号を出す。

【0053】

ビームモニター 34、42 は、PSD 62 に加えてデジタルカメラ 64 を含んで、PSD 62 よりもビーム 26 の位置情報（光軸 27 に垂直な面内の）を提供し得る。デジタルカメラ 64 もビーム 26 のサイズ、形状、及び / 又はパワーに関する情報を提供し得る。デジタルカメラ 64 は、例えば、CCD 又は CMOS カメラなど、ビーム 26 の波長に感度を有する任意の好適なカメラであり得る。ビームモニター 34、42 のフィードバックループに対して決定的でない、ビーム 26 についての情報を求めるために、デジタルカメラ 64 が使用され得る。例えば、デジタルカメラ 64 は、ビーム 26 の形状、サイズ、及び / 又は強度領域を表示する情報を提供するのに有用であり得る。ビーム 26 が所望の結果をもたらさない（すなわち、樹脂 22 が所望するように硬化されない）場合には、デジタルカメラ 64 からのフィードバックを使用して、問題の源を分離し得る。

【0054】

ビーム 26 の 1 つ以上の特性を変えるために、閉ループフィードバックでもデジタルカメラ 64 が使用され得る。例えば、第 1 のビームモニター 34 及び第 2 のビームモニター 42 のそれぞれのデジタルカメラ 64 によりモニターされるビーム 26 のサイズ又は形状を発散モニター 36 により使用して、所望しない発散又は非点収差がビーム 26 中に存在するかどうかを決定し得る。次に、下記に更に詳述するように、第 1 の発散変調器 38 に指示して、不必要な発散又は非点収差を除去するのに、ビーム 26 に補正を提供するために、発散モニター 36 がこの情報を使用し得る。しかしながら、いくつかの実施形態では、制御システムの中にデジタルカメラ 64 を能動的に入力し得ないが、代わりに、光学システム 11 の操作を後で分析するために、デジタルカメラ 64 により提供される情報が使用され得る。

【0055】

位置センシング検出器 62 及びデジタルカメラ 64 からビーム 26 の位置情報を受け、位置情報に基づいてビーム 26 を再位置決めするために、制御モジュール 68 が例えば、ビーム走査モジュール 66 などのビーム 26 の位置を改変することができるサブシステムを制御する。ビーム走査モジュール 66 は、例えば、レンズ、ミラーなどを含むビーム 26 を再位置決めするか又は再び導くのに有用な任意の光学要素を含み得る。一実施形態では、ビーム走査モジュール 66 は、ビーム 26 の位置に対して相対的に高速の補正を行う少なくとも 1 つの圧電駆動型ミラーを含む。ビーム 26 を実質的に光軸 27 に垂直な面内で再位置決めするために、圧電駆動型ミラーは、一軸又は二軸に沿って補正を行い得る。別の例として、ビーム走査モジュール 66 は 2 個の圧電駆動型ミラーを含み得る。2 個のミラーの第 1 のミラーは、ビーム 26 のドリフト補償のために、ゆっくりではあるが大きく動くことができる一方で、第 2 のミラーは、光学システム成分から高周波数の振動を取り去るのに、小振幅の相対的に速い補正を行う。他の実施形態では、任意の好適な数のミラーを使用するか、又はガルバノメーターなどの別のシステムによりミラーを駆動し得る。

【 0 0 5 6 】

別の実施形態では、ビーム 2 6 の位置の中に制御された量のノイズを導入するために、第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2 を使用し得る。この制御された量のノイズは、樹脂 2 2 中で形成される少なくとも部分的に硬化された構造物の縁又は表面を平滑化する働きをし得る。

【 0 0 5 7 】

上記に概述したように、光源 3 2 は、光軸 2 7 に垂直な面内で非円形形状を生じる非点収差を含むビーム 2 6 を放射し得る。上記に概述したように、光源 3 2 は、ある量の発散を含むビーム 2 6 も放射し得る。加えて、光源 3 2 により放射されるビーム 2 6 の非点収差及び発散は、両方とも経時的に変わり得る。したがって、光学システム 1 1 は、ビーム 2 6 の非点収差及び発散をモニターするためのモニターシステムを含み得る。発散モニター 3 6 は、ビーム 2 6 の非点収差及び発散の両方をモニターし得る。発散モニター 3 6 は、第 1 のビームモニター 3 4 に後続するものとして図 2 に図示されるが、光学システム 1 1 中の任意の点に配置され得る。加えて、いくつかの実施形態では、ビーム 2 6 中に存在する任意の非点収差又は発散を求めるために、発散モニター 3 6 は、第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2 の出力を使用し得る。

【 0 0 5 8 】

発散モニター 3 6 がディスクリートモジュールである実施形態では、発散モニター 3 6 は、例えば、ビームスプリッター、ビームサンプリングミラーなどを用いて、光学システム 1 1 の大部分に大部分のビーム 2 6 を透過する一方で、ビーム 2 6 の小部分をサンプリングし得る。一実施形態では、ビーム 2 6 の小部分は、ビーム 2 6 を分割するビームスプリッターに導かれて、2 本の小ビームを形成し得る。小ビームの一方は、CCD カメラなどのカメラをベースとする 2 次元 (2 D) センサまで短光路を進み、もう一方の小ビームは、2 D センサまで長光路を進む。2 D センサにより測定してこの 2 本の小ビームが同一のサイズでないならば、2 本の小ビームのサイズの相対的な差 (すなわち、幅又は面積) は、ビーム 2 6 の発散量を決定する。

【 0 0 5 9 】

別の実施形態では、発散モニター 3 6 は、干渉法を用いてビーム 2 6 の発散をモニターする。干渉法では、ビーム 2 6 は、それ自身と干渉し、等しい光路の横剪断 (若干のくさび付きの) 又は回転剪断を生み出す。生成する干渉縞によって、コンパクトかつ単純な構造でコリメーションの度合いを決めることが可能となる。

【 0 0 6 0 】

発散モニター 3 6 (すなわち CCD カメラ) は、光軸 2 7 に垂直な面内のビーム 2 6 の形状も測定する。ビーム 2 6 の形状は、球状又は他の非球状の形状を有する焦点 2 8 を生じる、ビーム 2 6 中に存在する非点収差又は楕円度が存在するか、又は存在しないかを表示する。意図される用途によって、非点収差は望ましい場合もあり、又は望ましくない場合もある。例えば、非点収差をビーム 2 6 の中に意図的に維持又は導入することは、光軸 2 7 に垂直な面内に楕円形状 (又は非円形形状) のビーム 2 6 を生じ、これは選択されるボクセルの硬化をより効率的又は効率的に開始し得る。

【 0 0 6 1 】

他の実施形態では、ビーム 2 6 の発散及び非点収差を求めるために、発散モニター 3 6 は、第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2 のそれぞれのデジタルカメラ 6 4 の出力を使用し得る。例えば、それぞれのデジタルカメラ 6 4 は、ビーム 2 6 のサイズ及び形状を光軸 2 7 に垂直な面でモニターし得る。それぞれのビームモニター 3 4、4 2、したがってそれぞれのデジタルカメラ 6 4 は、ビーム 2 6 の特性を光学システム 1 1 内の異なる個所でモニターするために、第 1 のビームモニター 3 4 のデジタルカメラ 6 4 の出力を第 2 のビームモニター 4 2 のデジタルカメラ 6 4 の出力と比較することにより、光学システム 1 1 を通過するときのビーム 2 6 のサイズ又は形状の任意の変化を検出し得る。この比較は、発散モニター 3 6、制御モジュール 1 2、又はビームモニター 3 4、4 2 の一方の制御モジュール 6 8 などの別の制御モジュールにより行われ得る。

【 0 0 6 2 】

非点収差又は発散の補正が必要であるかどうかを決定するため、発散モニター 36 により測定されるビーム 26 の発散及び形状が制御モジュール 12 又は別の制御モジュール（例えば、発散モニター 36 及び第 1 の発散変調器 38 に使用される制御モジュールなどの）に出力され得る。ビーム 26 に必要な、いずれかの発散又は非点収差補正をもたらすために、制御モジュール 12 は、例えば、第 1 の発散変調器 38 など、ビーム 26 の発散又は形状を改変する能力を有するサブシステムを制御する。図 4 に示すように、入力ビーム 26 をほぼ 1 : 1 で拡大するために、第 1 の発散変調器 38 は、例えば、約 2 の焦点距離 F の距離だけ離れた、2 つの等しい正レンズ 72、76 など、それぞれが光学パワーを有する 2 つの要素を含み得る。発散モニター 36 により測定される任意の非点収差に回答して非点収差補正を制御するために、レンズ 72 は、レンズ 72 の回転位置を制御する回転ステージ上に搭載され得る。レンズ 74 の位置を図 4 の x 軸により制御するために、レンズ 74 は、線形ステージ上に搭載され得る。線形ステージは、レンズ 76 を負の x 軸方向に（図 4 中左に）移動させて、ビーム 26 の発散を増加させるか、又はレンズ 76 を正の x 軸方向に移動させて、ビーム 26 の発散を減少させ得る（すなわち、ビーム 26 の収束を増加させる）。

10

【 0 0 6 3 】

光学システム 11 は、少なくとも 1 つのモニターシステムと、ビーム 26 の性質を改変して、樹脂 22 のビーム 26 への露光を制御することができる少なくとも 1 つのサブシステムとを含む、露光制御モジュール 82 を更に含む。例えば、図 5 に図示する実施形態では、露光制御モジュール 82 は、制御モジュール 84、安全シャッター 86、パワーメーター 88、パワー制御 40、及び高速シャッター 44 を含む。パワー制御 40 は、ビーム 26 のパワーを制御し、高速シャッター 44 は、ビーム 26 への樹脂 22 の露光を開始及び停止して、樹脂 22 の一部の硬化を選択的に開始し、ディスプレイな 3D の外形又は構造物を作る。いくつかの実施形態では、パワー制御 40 及び高速シャッターシステム 44 は別々のモジュールを含み得る。前述のように、樹脂 22 を硬化させて、ボクセルを形成するプロセスは実質的に非線形であり、露光工程時の所望のレーザーパワーからのいずれかの偏倚も誤差を生じ得る。このように、パワー制御 40 が照射光ビーム 26 のパワーを所望のレベル又は所望のレベルのある範囲内に維持することは重要である。

20

【 0 0 6 4 】

パワー制御 40 及び高速シャッター 44 の両方が光学システム 11 の任意の他の部品と同じく実質的に急速に、又はそれよりも急速に応答するということが好ましい。例えば、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 50、52 は、通常、光学システム 11 中で最速の部品であり、パワー制御 40 及び高速シャッター 44 は、好ましくは第 1 及び第 2 のガルバノメーター 50、52 の速度に実質的に等しいか、又は大きい速度で応答する。

30

【 0 0 6 5 】

いくつかの実施形態では、露光制御モジュール 82 は安全シャッター 86 を含む。安全シャッター 86 は、光学システム 11 の制御されたスタートアップ及びシャットダウンを提供するのに有用であり得る。例として、安全シャッター 86 は、光源 32 のウォーミングアップの間、樹脂 22 の露光からビーム 26 を阻止し、光学システム 11 の残りの部品のシャットダウンの間閉じられる。いくつかのタイプのレーザービームでは、レーザーは、定常的なパワーレベルに達する前にウォームアップする。例えば、Spectra-Physics の Mai Tai レーザーは、多光子硬化プロセスでの使用に所望されるレベルまで安定化するのに約 5 ~ 約 30 分要する。しかしながら、ある場合には、ビーム 26 に所望のレベルの安定性を与えるために、安全シャッター 86 は、ビーム 26 を十分な時間阻止し得る。ウォームアップ期間に、ビーム 26 は、ビーム軌跡のパワー及び安定性の変動（すなわち、焦点 28 の個所の予測可能性）を受け得る。制御モジュール 84 又は露光システム 10 の制御モジュール 12 は、安全シャッター 86 を制御して、ウォームアップ期間、並びにビーム 26 により樹脂 22 の露光が望ましくない他の時間ビーム 26 を阻止し得る。光源 32 を消すことに加えて、又はその代わりに、例えば、安全シャッター 8

40

50

6が光学システム11の非常遮断として使用され得る。いくつかの実施形態では、安全シャッター86は、ビーム26の較正時にもビーム26を阻止し得る。

【0066】

露光制御モジュール82は、ビーム26が実質的に安定化され、樹脂22がビーム26の焦点28に対して所望の位置となった後、ビーム26の露光を開始及び停止する、高速シャッターシステム44も含む。露光制御モジュール82内の制御モジュール84は、シャッターシステムを制御し得る。「高」速シャッターシステム44は、一般に、ビーム26を1ミリ秒当たり約1スイッチ以上のオン/オフ間の速度でオン・オフし得る、任意のシャッターシステムでもあり得る。より好ましくは、高速シャッターシステムは、1マイクロ秒以上の速度、最も好ましくは約50ナノ秒(50ns)以上の速度、例えば約20nsで約1オン/オフサイクルの速度でビーム26をオン・オフし得る。

10

【0067】

一実施形態では、高速シャッターシステム54はポッケルスセル及び偏光板を含む。ポッケルスセルでは、電圧は、通過するビーム26の偏光の性質を変え得る結晶に印加される。高速シャッターの1つのタイプでは、ポッケルスセルは偏光板と組み合わせられる。ポッケルスセルは、光学的な回転の無い位置(0°)と概ね90°回転との間でスイッチングされて、ナノ秒で開閉するシャッターを規定し得る。加えて、樹脂22を露光する前にポッケルスセル及び偏光板の組み合わせ品を0°~90°の位置回転して、ビーム26のパワーを変え得る。

【0068】

20

別の実施形態では、高速シャッターシステム44は、ラジオ周波数の音波などの音波を用いる、音響光学効果を使用して、回折し、光の周波数を移動させる、音響光学変調器(AOM)を含む。AOMの1つのタイプでは、圧電トランスジューサーをガラスなどの材料に取り付け、振動電気信号がトランスジューサーを振動させ、ガラス中に音波を生じさせる。音波は屈折率を変化させ、光源32からの入射ビーム26を分散させる。しかしながら、光源32がフェムト秒レーザーを組み込んでいるときなどの場合には、AOM内のビーム26の光学分散は、ビーム26の光学的な精度に影響を及ぼし得る。

【0069】

更に他の実施形態では、高速シャッターシステム54は、1つ以上の機械的なシャッター、可変フィルター又はエタロンなどの機械的なスイッチング素子を含み得る。高速シャッターシステム54は、パワー制御40に関して下記に更に詳述される、半波長板及び偏光ビームスプリッター又は半波長板及び偏光板も含み得る。ポッケルスセル、AOM、機械的なスイッチング素子、及び他の高速シャッターシステムは、単独又は相互に組み合わせて使用され得る。

30

【0070】

パワーメーター88は、光学システム11内の所望の個所でビーム26のパワーをモニターし得る。加えて、いくつかの実施形態では、光学システム11は、1つ以上のパワーメーター88を含んで、光学システム11内の複数の個所のビーム26のパワーをモニターし得る。パワーメーター88は、例えば、パワーを表示する電圧を出力するシリコンチップを含む、マルチメーターを備え得る。いくつかの好ましい実施形態では、パワーメーター88は、National Institute of Standards and Technology(NIST)のトレーサブルパワーメーターを含む。

40

【0071】

いくつかの実施形態では、ビームサンプラーはビーム26の一部を反射し得る。ビーム26のこの反射された部分は、パワーメーター88によりモニターされて、ビーム26全体のパワーを測定する。ビーム26の一部のみがパワーメーター88の中に入力されるが、パワーメーター88又は制御モジュール84は、一部のパワー測定に基づいてビーム26全体のパワーを見積もるのに、適切なアルゴリズムを使用し得る。パワー測定に基づいて、パワーメーター88は、制御モジュール84にフィードバックを提供し、ビーム26のパワーを必要に応じて調整し得る。例えば、ビーム26のパワーは、光源32において

50

又はパワー制御 40 により調整され得る。他の実施形態では、下記に述べるように、パワー制御 40 は、ビーム 26 の一部をパワーメーター 88 に導き、光学システム 11 の残りにビーム 26 の残りの部分を透過させる、ビームスプリッターを含み得る。

【0072】

パワー制御 40 は、ビーム 26 の任意のパワー変動を補正する助けをするか、又は樹脂 22 のビーム 26 による露光の前に、ビーム 26 のパワーを所望のレベルに制御し得る。光源 32 により使用される一部の照射源によって、ビーム 26 が実質的な平衡に達した後でも、ビーム 26 は出力パワーの変動を呈し得る。例えば、パワー変動は、ビーム 26 の所望のパワー出力のプラス・マイナス 1 パーセントの範囲内で変わり得る。ビーム 26 を使用して、相対的に小規模の外形、すなわち、ナノメートル規模の外形を樹脂 22 内でパターン作製するときには、このようなパワー変動は望ましくない場合がある。

10

【0073】

したがって、パワー制御 40 は、ビーム 26 のパワーを所望のレベルに調整し得る。いくつかの実施形態では、パワー制御 40 は、光源 32 からの光を減衰させるのに、半波長板 (HWP) 及び偏光ビームスプリッター (PBS) 又は HWP 及び偏光板を含む。いくつかの実施形態では、光源 32 が樹脂 22 を少なくとも部分的に硬化するのに所望よりも大きいパワーを有するビーム 26 を出力する場合、パワー制御 40 は、光源 32 からの光を減衰させる。ビーム 26 のパワーを低下させることは、樹脂 22 の体積をビーム 26 の焦点 28 に露光することにより作られる、少なくとも部分的に硬化されるボクセルのサイズを縮小する一助となる。

20

【0074】

いくつかの実施形態では、PBS において方向付けされる入射光 (すなわち、ビーム 26) は、PBS により少なくとも 2 つの部分に分割され、第 1 の部分は、PBS によりビーム 26 の第 1 の部分のパワーに基づいてビーム 26 のパワーを評価するパワーメーター 88 の中に導かれ、ビーム 26 の別の部分は、PBS により光学システム 11 の残りの部分から焦点面 14 に導かれる。

【0075】

一実施形態では、図 6 に示すように、HWP 92 が回転運動のために搭載され、高速ガルバノメーターモーターが制御モジュール 84 又は加工システム 10 の制御モジュール 12 などの別の適切な制御モジュールの制御の下に HWP 92 を回転させる。一実施形態では、HWP 92 は、中心軸 91 を中心として時計周り及び反時計周りの方向にそれぞれ約 45°、合計約 90°回転され得る。HWP 92 が回転するにしたがって、ビーム 26 の偏光成分は回転される。ビーム 26 は HWP 92 を出て、PBS 93 に入る。ビーム 26 の偏光の性質によって、異なる量のビーム 26 が PBS 93 に透過し、ビーム 26 のパワーを変化させ得る。いくつかの好ましい実施形態では、PBS 93 により反射されるビーム 26 の一部は、光学システム 11 の残りにおいて継続し、ビーム 26 の透過部分は使用されない。

30

【0076】

ビーム 26 のパワーの HWP 92 の角度依存性を実験的に求め、図 7 に示すように、角度に対するパワーの対応する曲線 101 を生成し得る。1 つのタイプのポテンシャル曲線 101 を図 7 に示すが、例えば、直線、指数曲線などの他の曲線が可能である場合もある。実験的に誘導される曲線がソフトウェアの中にプログラムされ、HWP 92 の回転によるビーム 26 のパワーの制御に使用され得る。

40

【0077】

一般に、ボクセル生成工程に対するビーム 26 のパワーが実質的に実時間で変化し、樹脂 22 内で 1 つ以上のボクセルを作り出すように、HWP 92 は、相対的に高速のパワー制御の達成を助ける。相対的に高速のパワー制御によって、少なくとも部分的に硬化されるボクセルの体積を実質的に実時間で変えることが可能となる。

【0078】

一定の樹脂 22 に対して、ボクセルサイズは、一般に、樹脂 22 の体積により吸収され

50

るエネルギーの量の関数として考えられ得る。単純には、樹脂 22 の体積により吸収されるエネルギーの全量は、体積の樹脂 66 がビーム 26 の焦点 28 に露光される時間の量に掛けるビーム 26 のパワーにほぼ比例する。ビーム 26 のパワー、ビーム 26 の走査速度（したがって、樹脂 22 の体積の露光時間）、及びボクセルサイズの間の関係はかなり複雑であり得、異なるパワー / 速度の組み合わせにおいて線形又は非線形であり得る。

【 0079 】

パワー / 走査速度とボクセルサイズの間の関係を実験的に求めることによって、光学システム 11 を制御して、ビーム 26 のパワー、ビーム 26 の走査速度、又はその両方を変えることにより、樹脂 22 内に所望の体積のボクセルを作ることができる、相関を制御モジュール 84 又は別の好適な制御モジュールに提供し得る。例えば、ビーム 26 の走査速度を減少したときに、実質的に一定のボクセルサイズを維持するために、ビーム 26 のパワーも必要な量（すなわち、実験的に求められる量）だけ減少し得る。

【 0080 】

あるいは、所望のボクセルサイズの変化をもたらすために、ビーム 26 のパワーと走査速度の組み合わせを選択し得る。1つの例として、所定の走査速度でパワーを増加することによって、樹脂 22 の大きな体積を急速に硬化させるために望ましい、制限された解像度の外形を有する大きなボクセルサイズを生成し得る。この例では、小さいボクセル、したがって高い解像度の外形を作るために、大きな体積を限定された解像度で硬化する前後で、パワーが低下され得る（しきい強度以上の強度をなお維持しながら）。

【 0081 】

別の実施形態では、実時間のパワー制御をもたらすためには、ポッケルスセルも使用され得る。例えば、ポッケルスセルに所定の電圧を印加することによって、ポッケルスセルを通過するビーム 26 の偏光の性質の所定の変更が得られる。このようにして、ポッケルスセルは、HWP 92 を置き換え、PBS 93 と組み合わせて、ビーム 26 の実時間のパワー制御を提供する。

【 0082 】

更に他の実施形態では、パワー制御 40 及び高速シャッター 44 は、HWP 92 及び PBS 93 などのパワー制御 40 と高速シャッター 44 の両方の機能をする同一部品を含み得る。次に、パワーは、HWP 92 の回転を制御することにより制御され、高速シャッター 44 は、HWP 92 を偏光板 93 の方向と直交する偏光方向に回転することにより作動され得る。

【 0083 】

制御モジュール 84 又は別の制御モジュールは、パワー制御 40 を制御して、ビーム 26 を減衰し、パワーメーター 88 又は別のパワーメーター（パワー検出器 185、パワー検出器 212、若しくはパワー検出器 213 など）の出力に基づいて所望のパワーのビーム 26 を提供し得る。

【 0084 】

他の実施形態では、露光制御モジュール 82 は、パワーメーター 88 に加えて又はその代わりに他のパワー及びエネルギーモニター素子を含み得る。更には、所望のパワーレベルで設定するか、又は特定の光学部品に関してパワーレベル又は時間を追跡するために、他のパワー及びエネルギーモニター素子が特定の段階又は間隔で、及びさまざまな個所で光学システム 11 に組み込まれ得る。

【 0085 】

光学システム 11 は、本明細書中ではこれ以降、位置検出器 46 と呼ばれる別のモニターシステムを更に含み得る。位置検出器 46 は、ビーム 26 の焦点 28 の位置を光軸 27 に沿ってモニターする。特に、位置検出器 46 は、基材 20 と樹脂 22 の間のインターフェース 24 に関して焦点 28 の位置をモニターする。インターフェース 24 に関して焦点 28 の位置を突き止め及び追跡することは、インターフェース 24 における変動が樹脂 22 中で形成される構造物の高さの実質的な部分であり得るために、多くの実施形態では重要である。加えて、構造物が樹脂 22 内で形成され、基材 20 の表面に結合していない場

10

20

30

40

50

合には、樹脂 22 の任意の非露光部分を除去する溶剤現像などの任意の以降の加工が基材 20 から構造物を除去し得る。

【0086】

位置検出器 46 は、例えば、容量センサ、干渉計、共焦点センサなどを含む、広範囲の検出器を含み得る。「METHOD AND APPARATUS FOR PROCESSING MULTIPHOTON CURABLE PHOTOREACTIVE COMPOSITIONS」と題する米国特許出願第 60 / 752, 529 号に述べられている、共焦点センサなどの共焦点センサが一般的に好ましい。共焦点センサは、インターフェース 24 が光学システム 11 の焦点又はその近傍に位置する場合に、樹脂 22 と基材 20 の間のインターフェース 24 を検出する診断用素子である。光学システム 11 の焦点 28 は、ピンホールに共役であり、光学システム 11 の焦点のインターフェース 24 から再帰性反射される光のみがピンホールを通るようにされている。すべての他の点は焦点外となり、検出されない。この装置は、樹脂 22 と基材 20 のインターフェース 24 を正確に位置決めする。通常、光学系及び高速度検出器がピンホールの後方に配置される。いくつかの実施形態では、ピンホールは、高速検出器に案内されることを除いてピンホールのように挙動する、シングルモード - 又はマルチモードファイバーにより置き換えられる。

10

【0087】

しかしながら、焦点がインターフェース 24 に位置していない場合には、インターフェース 24 のどの側に焦点 28 が存在するかを決定することは難しい。したがって、代理人生理番号第 63182US002 号を有し、「CHROMATIC CONFOCAL SENSOR」と題されている、米国特許出願第 60 / 979, 240 号に述べられているものなどの色共焦点センサが使用され得る。色共焦点センサは、光軸 27 に沿ったインターフェース 24 に関して焦点 28 の改善された検出範囲を提供し得る。

20

【0088】

インターフェース 24 に関して焦点面の位置を測定するために、共焦点センサは、好ましくはビーム 26 の波長又は波長範囲を含む、ビーム 26 又は別のインタロゲータービームのいずれかを使用し得る。共焦点センサを焦点面の位置の測定に使用する場合、光学システム 11 は、インターフェース 24 から再帰性反射されるビームの少なくとも一部（ビーム 26 又は別のインタロゲータービームのいずれか）を集め、その部分を分光計に導く光学部品を含む。光学部品は、例えば偏光ビームスプリッター及び光学リレーを含み得る。次に、分光計は、再帰性反射されたビームの強度と、場合によっては波長をモニターし、インターフェース 24 に関して焦点 28 の場所を測定するのに、この情報を使用する。インタロゲータービームを使用する場合には、インタロゲータービームは対物レンズ 114 に導かれ、ビーム 26 の波長を含んで、インタロゲータービームとビーム 26 の焦点が実質的に同一であって、インターフェース 24 に関する焦点 28 の位置を単純化することが好ましい。

30

【0089】

光軸 27 に実質的に垂直な面（図 1 中の $x - y$ 面）中で基材 20 を位置決めするために、位置検出器 46 も使用され得る。上述のように、基材 20 は、溝、凹部、突出部などの基点構造物を含み得る。共焦点センサなどの位置検出器 46 は、焦点面を基材 20 と樹脂 22 のインターフェース 24 に関して位置決めするために、存在するならば、位置検出器による信号出力の変化により凹部又は突出部は、容易に位置決めされる。基材 20（ $x - y$ 面内の）に関する凹部又は突出部の個所が既知である場合には、それに応じて $x - y$ 面内の基材 20 に関する焦点 28 の位置を決定し得る。

40

【0090】

図 8 は、例えば、制御モジュール 112、対物レンズ 114、第 2 の発散変調器 48、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 50、52、及び光学リレー組立体 116 などの、ビーム 26 の位置を改変する能力のあるサブシステムを含む光学走査モジュール 110 のブロック図である。光学走査モジュール 110 は、ビーム 26 を画像面 14 に導き、光を実質

50

的にサブミクロンの精度で画像面 1 4 上に集束する。さまざまな実施形態では、光学走査モジュール 1 1 0 は、ビーム 2 6 を 1 次元、2 次元又は 3 次元で導光及び集束する。

【0091】

制御モジュール 1 1 2 は、露光システム 1 0 の制御モジュール 1 2 のように、マイクロプロセッサ、DSP、ASIC、FPGA、ディスクリート論理回路などのプロセッサを含み得る。プロセッサは、ソフトウェア、ハードウェア、ファームウェア又はこれらの組み合わせを実行して、対物レンズ 1 1 4、発散変調器 4 8、及び第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 を制御し得る。図 8 に示す光学走査モジュール 1 1 0 の実施形態は、制御モジュール 1 1 2 を含むが、他の実施形態では、露光システム 1 0 の制御モジュール 1 2 は、対物レンズ 1 1 4、発散変調器 4 8、及び第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 の必要な制御を提供し得る。あるいは、制御モジュール 1 2、1 1 2 は、相互に組み合わせて使用され得る。

10

【0092】

ビーム 2 6 の位置を改変する能力のある 1 つのサブシステムは、ビーム 2 6 を集束する対物レンズ 1 1 4 を含む。対物レンズ 1 1 4 は、樹脂 2 2 の硬化に必要な強度を得るのに十分な（光源 3 2 により出力されるビーム 2 6 と組み合わせて）開口数（NA）を備え、したがって対物レンズ 1 1 4 の NA は、樹脂 2 2 のタイプ、並びに少なくとも部分的に硬化される樹脂 2 2 内で規定されるボクセルのサイズによって異なり得る。一実施形態では、対物レンズ 1 1 4 は、約 1 . 0 ~ 約 1 . 8 の範囲の NA など高 NA 対物レンズを備える。「対物」レンズは、「対物」、「正」レンズ、又は「集束」レンズとも呼ばれ得る。いくつかの実施形態では、対物レンズ 1 1 4 は、油浸対物レンズ、又は屈折率整合流体などの浸漬対物レンズを含み得る。例えば、対物レンズ 1 1 4 と乾燥空気対物レンズの屈折率不整合によりビーム 2 6 中で球面収差が起こるのを防止するために、浸漬対物レンズが含まれ得る。対物レンズ 1 1 4 は、ビーム 2 6 の焦点をしっかりと樹脂 2 2 の層の中に集束して、少なくとも必要なしきい強度を呈するビーム 2 6 の一部（すなわち、焦点 2 8）に露光される樹脂 2 2 の層の領域の硬化を開始する、しきい強度に達する。一実施形態では、対物レンズ 1 1 4 は、Nikon Corporation (Tokyo, Japan) から入手可能な Nikon CFI Plan Fluor 20X 対物レンズである。Nikon 20X マルチ浸漬対物レンズは 0 . 7 5 の開口数及び 1 . 1 ミリメートル (mm) の視野を有する。

20

30

【0093】

対物レンズ 1 1 4 の前方焦点面（すなわち、樹脂 2 2 に最近接した焦点面）は、ミラーなどの光学システム 1 1 のさまざまな他の光学要素と光学リレーの焦点、又は画像面 1 4 を位置合わせするように選択され得る。平行化されたビームが前方焦点面の周りを 2 次元で旋回する場合には、集束ビームは、テレセントリック画像形成システムとして画像面 1 4 を 2 次元で有効に走査する。一実施形態では、ビーム 2 6 の x 軸及び y 軸の位置決めを行うために、光学走査モジュール 1 1 0 が光軸合わせされたビームを対物レンズ 1 1 4 の前方焦点面の周りを旋回するように配置される。

【0094】

光学走査モジュール 1 1 0 は、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 と、画像面 1 4 などのバーチャルな個所に画像を中継する 1 つ以上の光学要素を含む 1 つ以上の光学リレー組立体 1 1 6 とを更に含む。第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 は、単独又は光学リレー組立体 1 1 6 との組み合わせのいずれかで、ビーム 2 6 の位置を光軸に垂直な面内の少なくとも 1 つの方向で改変する能力のあるサブシステムを備える。一実施形態では、ガルバノメーター 5 0、5 2 は、ミラーを 1 つ又は 2 次元で旋回又は回転させるガルバノメーター上に搭載されたミラーを備え得る。光学リレー組立体 1 1 6 により生じる画像は、「内部」画像と考えられ得る。ビーム 2 6 を x 軸、y 軸又は z 軸方向で走査することが望ましいが、走査装置（すなわち、対物レンズ 1 1 4）が所望の空間内で物理的に適合しない場合には、光学リレー組立体 1 1 6 が有用であり得る。光学システム 1 1 は、ビーム 2 6 の走査位置を所望の個所（すなわち、画像面 1 4）に中継することにより、

40

50

ビーム 26 を走査する能力を維持しながら、走査装置を任意の好適な場所に置き得るように構成され得る。光学リレー組立体 116 を用いずにビーム 26 を 1 つ以上の方向で走査装置を、走査することがなお可能であるが、曲面の画像面又はビーム 26 の収差を生じ、不利であり得るために、相対的に遠い距離からこのようなことを行うことは、望ましくない場合がある。

【0095】

図 9 に基本的な光学リレー 120 の 1 つの実施形態の概略光線図を示す。いくつかの実施形態では、光学リレー 120 は、光学走査モジュール 110 の光学リレー組立体 116 に組み込まれ得る。図 9 中、光学リレー 120 は、物体 122、第 1 のレンズ 124 A、レンズ 124 A に実質的に同一の第 2 のレンズ 124 B、及び物体 126 を含む。物体 122 及び 126 は物体の画像である。レンズ 124 A 及び 124 B は、それぞれ焦点距離 F を有し、結果として、物体 122 及び 126 は、焦点距離 F_1 の約 4 倍隔てられる。更には、レンズ 124 A 及び 124 B は実質的に同一であるために、光学リレー組立体 116 は 1 : 1 の倍率をもたらし、物体 122 及び 126 は実質的に同一のサイズである。

【0096】

他の実施形態では、他の倍率が可能である。更には、他の実施形態では、より少数の又はより多数の光学要素を含む他のタイプの光学リレーが光学走査モジュール 110 により使用され得る。例えば、いくつかの実施形態では、光学リレー組立体 116 は、さまざまな角度で傾斜している 1 つ以上のガルバノメーター 50、52 と共に使用されて、1 次元、2 次元、又は 3 次元でビーム 26 を走査する。2 つの光学リレー 134 及び 140 と 2 つのガルバノメーター 50、52 を含むシステム 130 の 1 つの実施形態の概略光線図を図 10 A に示す。

【0097】

システム 130 は、ガルバノメーター 50、レンズ 136 A 及び 136 B を含む光学リレー 134、ガルバノメーター 52、及びレンズ 242 A 及び 242 B を含む光学リレー 140 を含む。システム 130 は、図 8 の光学リレー組立体 116 内に含まれ得る。平行化されたビーム 26、又は任意のタイプのビーム 26 を少なくとも 1 つの寸法内で走査するために、システム 130 を使用し得る。図 10 A に示す実施形態では、システム 130 は、平行ビーム 26 を x 軸及び y 軸方向（直交する $x - z$ 軸は図 10 A に示され、 y 軸は図 10 A の面に垂直に方向付けられる）で走査するように構成される。

【0098】

図 10 A が図示するように、ビーム 26 は、ガルバノメーター 50 において方向付けられ、ガルバノメーターはビーム 26 を実質的に垂直な方向で光学リレー 134 に向かって走査する。ビーム 26 は、光学リレー 134 のレンズ 136 A 及び 136 B を通過した後、ビーム 26 はガルバノメーター 52 上に投射され、ガルバノメーターは光学リレー 140 に向かって及び光学リレー 140 のレンズ 142 A 及び 142 B からビーム 26 を実質的に垂直な方向で走査する。ガルバノメーター 52 は、第 1 の光学リレー 134 の内部画像に位置決めされ、このようにして、第 1 の光学リレー 134 の内部画像が第 2 の光学リレー 140 の物体でもある。

【0099】

一般に、光学走査モジュール 110 の制御モジュール 112 は、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 50、52 の方向を制御して、ビーム 26 を x 軸及び y 軸方向で走査し得る。 x 軸及び y 軸方向の相対的な位置ビーム 26 は、ガルバノメーター 50、52 の相対的な位置に従ってマッピングされ得る。このように、ガルバノメーター 50、52 のそれぞれの所定の位置は、画像面 14 の x 軸及び y 軸中のビーム 26 の位置に対応し得る。制御モジュール 112 は、第 1 及び第 2 のビームモニター 34、42 により出力される信号に基づいて、又はチャック搭載 PSD 214 に基づいて、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 50、52 のそれぞれの位置を制御し得る。

【0100】

いくつかの実施形態では、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 50、52 は、一部の圧電

10

20

30

40

50

走査装置及び音響光学走査装置と比較して、ビーム 2 6 の相対的に速くかつ正確な走査をもたらすということが判明した。ビーム 2 6 の高速走査は、樹脂 2 2 内で構造物を形成する速度の増加の一助となり得る。一実施形態では、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 は、ガルバノメーターにより回転される誘電体を被覆したベリリウムミラーを含み得る。いくつかの実施形態では、ビーム 2 6 をガルバノメーター 5 0、5 2 により走査する速度は、パワー制御 4 0 がビーム 2 6 のパワーを調整する速度よりも遅いということが望ましい場合もある。

【 0 1 0 1 】

対物レンズ 1 1 4 は、その後方焦点面が第 2 のリレー 1 4 0 の内部画像になって、集束ビームが画像面 1 4 に作られるように配置され得る。例えば、図 1 0 B に示すように、筐体 1 4 4 中の対物レンズ 1 1 4 が第 2 の光学リレー 1 4 0 のレンズ 1 4 2 B の下流に配置されて、第 2 の光学リレー 1 4 0 から生じるビーム 2 6 の内部画像は、対物レンズ 1 1 4 から集束される。対物レンズ 1 1 4 は、ビーム 2 6 を画像面 1 4 上に集束し、ビーム 2 6 は、例えば x 軸方向及び y 軸方向（図 1 0 B に示す画像面に実質的に垂直に）に沿って少なくとも 2 次元で走査され得る。

10

【 0 1 0 2 】

光学リレー組立体 1 1 6 及び第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 は、ビーム 2 6 を画像面 1 4 に対して実質的に x - y 軸で走査するが、光学走査モジュール 1 1 0 は、例えば第 2 の発散変調器 4 8、対物レンズ 1 1 4、及びチャック 1 8 を含む、焦点 2 8 の位置を z 軸（又は図 4 中では直交の x - z 軸を示す）中で改変する能力を有する、少なくとも 1 つのサブシステムを更に備え得る。ビーム 2 6 の焦点 2 8 を実質的に z 軸に沿って走査することは、ボクセル位置決めを樹脂 2 2 内で光軸 2 7 に実質的に沿って（図 1 ならば z 軸）行う一助となる。焦点 2 8 を実質的に z 軸方向に沿って走査するための 3 つの技術を下記に述べるが、いかなる好適な技術も使用され得る。例えば、異なる実施形態では、実質的に光軸 2 7 に沿って焦点 2 8 を走査するための技術は、機械的な素子、光学素子又はこれらの組み合わせを使用し得る。

20

【 0 1 0 3 】

一実施形態では、モーター又は圧電素子は、対物レンズ 1 1 4 を実質的に z 軸方向に沿って移動して、焦点 2 8 を実質的に光軸 2 7 に沿って走査する。ある場合には、対物レンズ 1 1 4 を光軸 2 7 で走査することは、x - y 面で位置決めするビーム 2 6 の精度に影響を及ぼし得る。加えて、いくつかの実施形態では、圧電素子は、例えば、約 4 0 0 nm など、光軸 2 7 中の焦点 2 8 の位置の制限された範囲を提供する。しかしながら、対物レンズ 1 1 4 を移動して、ビーム 2 6 の焦点 2 8 を実質的に光軸 2 7 に沿って走査することは、他のビーム走査技術と比較して、ビーム 2 6 の相対的に正確な位置決めを提供し得る。

30

【 0 1 0 4 】

別の実施形態では、実質的に z 軸方向に沿ってチャック 1 8 を動かすために、露光システム 1 0 は、ビーム 2 6 の焦点 2 8 を実質的に光軸 2 7 に沿って走査するよりも機械的な組立体を含み得る。チャック 1 8 を移動して、樹脂 2 2 内で焦点 2 8 の軸 2 7 の位置を変えることによって、光学システム 1 1 を実質的に面内に保つことが可能となる。しかしながら、樹脂 2 2、基材 2 0、及びチャック 2 8 は、移動するには重量が相対的に大きく、それゆえチャック 1 8 を移動することは相対的に低速の工程となり、露光システム 1 0 の処理量を減少させ得る。すなわち、ある場合には、樹脂 2 2、基材 2 0、及びチャック 1 8 の重量は、露光システム 1 0 により樹脂 2 2 内にボクセルを作成する速度に悪影響を及ぼし得る。

40

【 0 1 0 5 】

図 1 1 は、第 2 の発散変調器 4 8 の概略図であり、ビーム 2 6 を実質的に光軸 2 7 に沿って走査するための技術で使用され得る。変調器 4 8 は、ビーム 2 6 が対物レンズ 5 4 に入る前にビーム 2 6 の発散を変える。発散変調器 4 8 は、例えば、ケプラー望遠鏡などの非焦点系望遠鏡であり得る。

【 0 1 0 6 】

50

発散変調器 48 は、結像レンズ組立体 152 とコリメーション光学系 156 を含む。結像レンズ組立体 152 は、 x 軸（図 11 に直交 $x-z$ 軸を示す）に沿って移動するように構成されている。結像レンズ 152 が x 軸に沿って移動するにつれて、ビーム 26 の内部焦点はコリメーション光学系 156 の前方焦点面 154 を通過する。図 11 に図示するように、内部焦点がコリメーション光学系 156 の前方焦点面 154 と一致すると、ビーム 26 はコリメーション光学系 156 から平行化され、放射する。内部焦点が前方焦点面 154 の左側にある場合には、発散変調器 48 から出るときビーム 26 は収束性であり、内部焦点が焦点面 154 の更に左である場合には、ビーム 26 はより収束性である。逆に、内部焦点が焦点面 154 の右にあるならば、ビーム 26 は発散性波面として出る。

【0107】

10

図 9 の光学リレー 120（図 11 では示さず）などの光学リレーは、コリメーション光学系 156 から出て、対物レンズ 114 に向けてビーム 26 を導く、波面（すなわち、ビーム 26）を再生し得る。ビーム 26 がコリメーション光学系 156 から発散性波面として出、発散性波面が対物レンズ 114 に入る場合には、ビーム 26 は、平行ビーム 26 の焦点でなく対物レンズ 114 から焦点に進む。他方、ビーム 26 がコリメーション光学系 156 から収束性波面として出るときは、ビーム 26 は平行ビーム 26 の焦点よりも対物レンズ 114 に近い焦点に進む。このようにして、ビーム 26 を光軸 27 に沿って位置決めすることは、第 2 の発散変調器 48 の結像レンズ組立体 152 を移動させることにより行われ得る。いくつかの実施形態では、結像レンズ組立体 152 は、対物レンズ 114 及びチャック 18 よりも小さい重量を有し、それにより結像レンズ組立体 152 を匹敵する量の動力により移動対物レンズ 114 及び / 又はチャック 18 よりも高速で移動させることが可能となる。結像レンズ組立体 152 のより速い移動によって、樹脂 22 内での焦点 28 の更に高速の位置決めが可能となる。

20

【0108】

第 2 の発散変調器 48 を使用して、ビーム 26 の位置を光軸 27 に沿って制御する実施形態では、対物レンズ 114 は、樹脂 22 内で形成されるボクセルの品質を改善することができる範囲の入射波面を扱うように好ましくは設計される。

【0109】

いくつかの実施形態では、第 2 の発散変調器 48 は、ビーム 26 に収差を導入し得る。収差は、画像面 14 の近くに導入される収差の補償にも使用され得る。いくつかの実施形態では、浸漬対物レンズは、画像面 14 の近くに導入される収差を補償するのに使用され得る。しかしながら、乾燥空気対物レンズを単純に使用する実施形態では、ボクセルが樹脂 22 内である深さ（ z 軸方向に沿って測定される）で形成される場合には、球面収差が存在し得る。このような実施形態では、球面収差は、コリメーション光学系 156 中で反対量の球面収差を導入することによるなどの、第 2 の発散変調器 48 の適切な設計により能動的に補償され得る。収差を補償することは、樹脂 22 内の広範囲の深さで実質的に高品質のボクセルを形成することの一助となり得る。

30

【0110】

いくつかの実施形態では、上述の方法の 2 つ以上を使用して、実質的に光軸 27 に沿ってビーム 26 の焦点 28 を走査することが好ましい場合がある。例えば、対物レンズ 114 上の機械的な走査を第 2 の発散変調器 48 に沿って使用して、例えば、拡張された範囲の光軸 27 制御などの焦点 28 の増強された位置決め制御を実質的に光軸 27 に沿って提供し得る。

40

【0111】

光学システム 11 は他の随意のモジュールも含み得る。随意のモジュールのそれぞれを下記に詳述し、図 12 に随意のモジュールのすべてを含む光学システム 161 を図示する。

【0112】

光学システム 161 は、光源 32 に続く随意のパワーダンプモジュール 163 を含む得る。パワーダンプモジュール 163 は、名称が示唆するように、光源 32 からのビーム 2

50

6出力のパワーを所望のレベル、例えば、光学システム11中の以降の光学部品を損傷しないレベル又はほぼ樹脂22の硬化を開始するのに必要とされるレベルまで低下させる能力のあるサブシステムである。パワーダンプモジュール163は、意図された用途に所望のパワーのビーム26を放射する光源32を使用するものなど、すべての実施形態において必要でない場合がある。

【0113】

図13に図示する一実施形態では、パワーダンプモジュール163は、偏光ビームスプリッター(PBS)171、随意の第2のPBS175、及び二分の一波長板173を含む。直線偏光のビーム26は、光源32から出て、第1のPBS171を通過する。次に、ビーム26は二分の一波長板173を通過し、その後で第2のPBS175に入る。第2のPBS175に対して二分の一波長板173の回転を制御することにより、第2のPBS175により光学システム11の以降の部品に導かれるビーム26の量を変え得る。

10

【0114】

光学システム161は、本明細書ではビーム品質カメラ及びパワーモニター165と呼ばれる、別のモニターシステムを更に含み得る。ビーム品質カメラ及びパワーモニター165を使用して、ビーム26を抽出する光学システム11内の個所でビーム26のパワー、形状又は位置の少なくとも1つをモニターする。図14に示すようなビーム品質カメラ及びパワーモニター165は、ビーム26の小区分26aを反射し、ビーム26の残りを透過するビームサンプリングミラー181を含む。ビームサンプリングミラー181により反射される区分26aは、ビームスプリッター183に通され、ビームスプリッターは、パワー検出器185に小区分26aの第1の部分26bを、並びに例えば、電荷結合素子(CCD)、CMOSベースのカメラ、又は別のフォトダイオードベースのセンサなどの、ビーム26の形状及び位置を検出する能力のある形状及び位置センサ187に区分26aの第2の部分26cを送出する。パワー検出器は、光学システム161中のこの地点においてビーム26の第1の部分26bのパワーをモニターし、形状及び位置センサ187は、ビーム26の第2の部分26cの形状及び位置をモニターする。ビーム26の第1の部分のみのパワーがモニターされるが、ビーム品質カメラ及びパワーモニターモジュール165はアルゴリズムを使用して、光学システム161中のこの地点においてビーム26の全パワーを見積もりし得る。1つの好ましい実施形態では、パワー検出器は、Newport Corp. (Irvine, CA)から商品名Newport 818 SLにより入手可能である。

20

30

【0115】

パワー検出器185と、形状及び位置センサ187は、ビーム26のモニターされたパワー、形状、及び位置に基づいて信号を出力し、光学システム161内のこの地点においてビーム26のパワー、形状、及び位置が所望の特性の許容可能な範囲内にあるかどうかを決めるために、信号は制御モジュール12により使用され得る。次に、制御モジュール12は、光学システム161(例えば、第1の発散変調器38、パワー制御40など)の部品を制御して、ビーム品質カメラ及びパワーモニターモジュール165により出力される信号に応答してビーム26のパワー、形状、及び位置の1つ以上に対して所望の調整を加え得る。

40

【0116】

光学システム161は、ビーム26中の任意の不必要な分散(すなわち、パルス幅の広幅化)をモニター及び補正するための分散モジュール167を更に含み得る。分散モジュール167は、モニターシステム、群速度分散(GVD)モニター191、及びビーム26の分散を改変する能力を有するサブシステムを含むことができ、図15に示すように制御モジュール195及び分散補償光学系193を含むことができる。

【0117】

ビーム26のテンポラル特性は、一般に、ビーム26の強度に影響を及ぼす。例えば、光源32がフェムト秒のビーム26をもたらす場合には、ビーム26が画像面14に向か

50

って伝播するとき群速度分散 (GVD) が生成し、ビーム 26 のピーク強度が減少して、ビーム 26 は、ビーム 26 が樹脂 22 に到達したときに樹脂 22 の硬化を開始するのに充分なしきい強度をもはや呈さない場合がある。フェムト秒パルスは、通常、テンポラルパルス幅によって、大きな帯域幅を網羅し得るさまざまな周波数からなる。これらの周波数が光学システム 11 を伝播するとき、長波長 (又は「赤色」) の光は、短波長 (又は「青色」) の光よりも速く伝播する。これは GVD と呼ばれる場合がある。

【0118】

GVD はパルス幅の時間を長くする効果を有し、望ましくない効果であることがある。GVD は、GVD モニター 191 を用いる分散モジュール 167 により測定され得る。1 つの普通の GVD モニターとしては自己相関装置が挙げられる。自己相関装置は入射パルスを取り込み、干渉計によりそれを分割し、第 1 の部分を可変遅延経路に沿って送り、第 2 の部分を設定経路長に沿って送る。次に、この 2 つの部分を結晶に送って、二次高調波 (SHG) として知られる非線形プロセスを作り出す。可変時間遅延に対する SHG 光エネルギーはパルス幅の測定を生じる。しかしながら、自己相関装置は難点を有し、光学システムにおける適用可能性を限定する。難点としては、軸合わせに対して鋭敏であること、最初のパルスについての詳細を限定する、パルスの形状について仮定をしなければならないこと、及び強度又は相の測定が欠如していることが挙げられる。これらの難点のために、周波数分解光ゲート法 (FROG) 又は超高速入射レーザー光 E 場の格子除去した現実的観測 (GRENOUILLE) などの別のタイプの GVD モニター 191 がビーム 26 の分散をモニターし得る。FROG は、時間遅延の対するエネルギーではなく、時間遅延に対する信号スペクトルを測定する。これによって、パルスのパルス幅、強度、及び相対的な相を求める測定が可能となる。しかしながら、FROG は、慣用の自己相関装置よりも複雑であり、通常、高価である。GRENOUILLE は、低複雑性の FROG 素子であり、可動部分を持たず、位置合わせに対して鋭敏でなく、なおパルスの全相及び強度データを測定する。

【0119】

GVD に対して補正するためには、分散モジュール 167 は、プリズム、格子 (標準的回折型又はファイバー型)、ミラー上のチャープ被膜、又はビームのスペクトル相を改変して、これらの分散補償された光学系中で赤色光が青色光よりも長い光路をとらなければならないような光学系が構成される光学フィルターなどの分散補償光学系 193、例えば、Gires-Tournois 干渉計又は Mach-Zehnder 干渉計の特別に設計されたカスケード鎖を用いて、ビーム 26 を予備補償又は補正し得る。このようにして、すべての色が残りの光学システム 11 を通過するのに、青色光は時間的に赤色光よりも十分に前方となり、実質的にすべての色は、同一時間に画像面 84 に到着して、フェムト秒ビーム 90 の超高速パルス幅を維持する。予備補償又は補正の量は、GVD モニター 191 により出力される信号に基づくものであり、制御モジュール 12 又は分散モジュール 167 に使用される制御モジュール 195 など別の適切な制御モジュールにより制御され得る。

【0120】

いくつかの光源 32 は、光源 32 それ自身の中に組み入れられた制御可能な分散補償外形を含む。これらの光源 32 を用いる実施形態では、光学システム 11 の設計及び組み立てによって、追加の分散補償光学系は、所望若しくは必要であってもよく、又は所望若しくは必要でなくともよい。

【0121】

ビーム 26 のパワーを制御するために、ビーム 26 の分散特性の制御も使用され得る。例えば、ビーム 26 の分散の量を増加させることにより、ビーム 26 の焦点 28 のパワーを減少させ得る。逆に、ビーム 26 の分散の量を減少させることにより、ビーム 26 の焦点 28 のパワーを増加し得る。しかしながら、ビーム 26 の分散を精密に制御することが困難であるために、いくつかの実施形態では、この方法は好ましくない場合もある。

【0122】

光学システム 1 6 1 は、随意の焦点面視認モジュール 1 6 9 も含んで、ビーム 2 6 が対物レンズ 1 1 4 を出た後で、ビーム 2 6 のパルス幅及び位置をモニターし得る。ビーム 2 6 が最終の対物レンズ 1 1 4 を通過した後、パルス幅を検出することができる使用可能な素子が極めて少ないために、ビーム 2 6 のパルス幅をモニターし、制御することは、実施困難である。焦点面視認モジュール 1 6 9 によって、ビーム 2 6 に露光されると蛍光を発する材料をモニターすることにより、ビーム 2 6 のパルス幅を相対的に測定することが可能となる。例えば、すべての他の変数が一定であると仮定すると、高蛍光は高ビーム 2 6 強度を示唆し、短いパルス幅を示唆するために、高パルス幅は蛍光が検出される場合には、低蛍光が検出される場合よりも相対的に短いということを推測し得る。

【 0 1 2 3 】

焦点面視認モジュール 1 6 9 によって、焦点 2 8 を $x - y$ 面（図 1 を参照）中で追跡することも可能となる。蛍光は、ビーム 2 6 の焦点 2 8 に位置する樹脂 2 2 の体積に実質的に閉じ込められ、焦点 2 8 の任意の運動は、樹脂 2 2 内の蛍光源の対応する運動を生じる。したがって、空間解像度を $x - y$ 軸中に有する検出器を使用することにより、樹脂 2 2 の蛍光部分の位置、したがって焦点 2 8 が $x - y$ 軸で追跡され得る。

【 0 1 2 4 】

1 つのこのような好適な検出器は、いくつかの実施形態では、それぞれの四分割センサ中のシリコンチップにより出力される電圧に基づいて、ビーム 2 6 の位置を $x - y$ 面（光軸 2 7 に垂直な面）で表示する 4 個のシリコンチップを含む、四分割センサ検出器を含む。別の好適な検出器としては、フォトダイオードのアレイが挙げられ得る。

【 0 1 2 5 】

焦点面視認モジュール 1 6 9 は、光学システム 1 6 1 内の多くの個所で挿入され、例えば、ビームスプリッター、ビームサンプリングミラーなどにより樹脂 2 2 から出る蛍光を受光し得る。

【 0 1 2 6 】

光学システム 1 1、1 6 1（これ以降、「光学システム 1 1」と呼ぶ）内のビーム 2 6 パワー及び焦点 2 8 の位置の両方を較正することも必要である場合もある。したがって、露光システム 1 0（図 1）は較正モジュール 2 1 0 を含み得、図 1 6 に図示される。較正モジュール 2 1 0 は、例えば、低速シャッター 2 1 1、パワーメーター 2 1 2、チャック搭載パワーメーター 2 1 3、チャック搭載位置センシング素子（PSD）2 1 4、及び制御モジュール 2 1 5 を含む、多数のサブモジュールを含んでもよい。制御モジュール 2 1 5 は、一般に、較正モジュール 2 1 0 を制御する。一実施形態では、制御モジュール 2 1 5 は、マイクロプロセッサ、コントローラ、デジタル信号プロセッサ（DSP）、特定用途向け集積回路（ASIC）、現場書き換え可能なゲートアレイ（FPGA）、ディスプレイ論理回路などのプロセッサを含む。いくつかの実施形態では、プロセッサは、ソフトウエア、ハードウエア、ファームウエア又はこれらの組み合わせを実行して、低速シャッター 2 1 1、パワーメーター 2 1 2、チャック搭載パワーメーター 2 1 3、及びチャック搭載 PSD 2 1 4 を制御し得る。他の実施形態では、較正モジュール 2 1 0 は制御モジュール 2 1 5 を含まず、代わりに露光システム 1 0 の制御モジュール 1 2 により制御されるか、又は制御モジュール 1 2、2 1 5 が較正モジュール 2 1 0 の制御に組み合わせで使用され得る。

【 0 1 2 7 】

ビーム 2 6 に樹脂 2 2 を露光せずにビーム 2 6 のパワー及び焦点 2 8 の位置の両方の較正を可能とする、1 つの光学部品としては、低速シャッター 2 1 1 が挙げられる。低速シャッター 2 1 1 としては、開いた位置から閉じた位置まで移動され得る、モーター駆動ミラーが挙げられる。いくつかの実施形態では、低速シャッター 2 1 1 は、高速シャッター 4 4 よりも低速であり得、すなわち、低速シャッター 2 1 1 は高速シャッター 4 4 よりも低速で入力に応答し得る。低速シャッター 2 1 1 は、光学システム 1 1 内の任意の地点に配置され得、いくつかの実施形態では、低速シャッター 2 1 1 を光学システム 1 1 の終点近く（すなわち、光学システム 1 1 の最終的な光学要素にできるだけ近く）の地点に配置

10

20

30

40

50

することが好ましい場合がある。低速シャッター 2 1 1 を光学システム 1 1 の終点近くに配置することによって、低速シャッター 2 1 1 を光学システム 1 1 の始点近くに配置する場合よりも画像面 1 4 におけるビーム 2 6 のパワーを代表する、ビーム 2 6 のパワーを測定することが可能となり得る。これは、多くの光学要素がビーム 2 6 のパワーに影響を及ぼすと予期されるためであり、したがって、低速シャッター 2 1 1 と光学システム 1 1 の終点の間のより少数の光学要素の数が少なければ、低速シャッター 2 1 1 と焦点面 1 4 の間のビーム 2 6 のパワーの潜在的な変化を小さくする。

【 0 1 2 8 】

低速シャッター 2 1 1 が開いた位置にある場合には、ビーム 2 6 は、光学システム 1 1 の他の光学部品（すなわち、露光制御モジュール 8 2 など）の制御下で光学システム 1 1 を通過し、樹脂 2 2 を露光するようになされる。低速シャッター 2 1 1 が閉じた位置にある場合には、低速シャッター 2 1 1 は、ビーム 2 6 を再びパワーメーター 2 1 2 に導き、ビーム 2 6 のパワーを測定する。パワーメーター 2 1 2 は、例えば、パワーを表示する電圧を出力するシリコンチップを含む、マルチメーターを含む任意の好適なパワーメーターであり得る。いくつかの実施形態では、パワーメーター 2 1 2 は、National Institute of Standards and Technology のトレーサブルパワーメーターである。

【 0 1 2 9 】

パワーメーター 2 1 2 はその出力を制御モジュール 2 1 5 に送出し得る。制御モジュール 2 1 5 は、ビーム 2 6 のパワーを較正するのに、パワーメーター 2 1 2 の出力を使用し得る。例えば、制御モジュール 2 1 5、又は露光システム 1 0 の制御モジュール 1 2 は、パワーメーター 2 1 2 及びデジタルカメラ 6 4 の出力又はパワー制御 4 0 のパワーメーターを比較し得る。制御モジュール 2 1 5 は、比較を単一の地点で行って、デジタルカメラ 6 4 の出力、又はパワー制御 4 0 のパワーメーターを調整して、パワーメーター 2 1 2 の出力を整合させるか、又は複数の光源 3 2 の出力設定において比較を行い、デジタルカメラ 6 4 又は制御 4 0 のパワーメーターにより表示されるパワーをパワーメーター 2 1 5 により測定されるパワーと相関させる、較正曲線を生成し得る。これによって、デジタルカメラ 6 4 及び / 又はパワー制御 4 0 のパワーメーターを配置する、光学システム 1 1 中のさまざまな地点においてビーム 2 6 のパワーをより正確に測定し、測定パワー値をより正確に比較することが可能となり得る。実際の送達パワーの較正は、光学システム 1 1 を用いて樹脂 2 2 中で形成される物品の忠実度を改善し、繰り返し性及び経時的な工程一貫性を確保する一助にもなり得る。

【 0 1 3 0 】

低速シャッターは、また、樹脂 2 2 の硬化を開始させることなく、インターフェース 2 4 に関して焦点 2 8 の位置を突き止めるために、位置検出器 4 6 の使用を可能とし得る。例えば、低速シャッターは、閉じているときには、ビーム 2 6 が樹脂 2 2 上に当たらないように光学システム 1 1 内の位置に配置されることができ、一方、インタロゲータービームは、基材 2 0 と樹脂 2 2 のインターフェース 2 4 にインタロゲーション及び位置の突き止めさせる。

【 0 1 3 1 】

システム較正モジュール 2 1 0 は、チャック 1 8 に搭載されたモジュールも含み、ビーム 2 6 が対物レンズ 1 1 4 を出た後、焦点 2 8 及びビーム 2 6 の位置及びパワーを較正し得る。特に、例示されている実施形態では、チャック搭載パワーメーター 2 1 3 及びチャック搭載 PSD 2 1 4 は、チャック 1 8 に搭載されて、焦点面 1 4 におけるビーム 2 6 に関する情報を提供する。パワーメーター 2 1 3 及び PSD 2 1 4 は、対物レンズ 1 1 4 の視野内のチャック 1 8 の任意の有用な個所に搭載され得る。すなわち、パワーメーター 2 1 3 と PSD 2 1 4 は、対物レンズ 1 1 4 がビーム 2 6 を集束するチャック 1 8 の任意の個所に搭載され得る。

【 0 1 3 2 】

画像面 1 4 におけるビーム 2 6 及び焦点 2 8 のパワー及び位置を較正することによって

10

20

30

40

50

、光学システム 1 1 全体の影響を考慮に入れることが可能となる。したがって、画像面 1 4 におけるビーム 2 6 及び焦点 2 8 のパワー及び位置を較正することは、低速シャッター 2 1 1 とパワーメーター 2 1 2 を用いる較正よりも正確な較正を提供し得る。

【 0 1 3 3 】

パワーメーター 2 1 2 と同様に、パワーメーター 2 1 3 としては、例えば、マルチメーターなどの N I S T トレサブルパワーメーターを挙げることができる。マルチメーターがチャック 1 8 上に直接に搭載され得るか、又はビーム 2 6 をマルチメーターに導く、集光レンズがチャック 1 8 に搭載され得る。マルチメーターは、ビーム 2 6 のパワーを指示する電圧又は他の信号を制御モジュール 2 1 5 又は露光システム 1 0 の制御モジュール 1 2 などの別の好適な制御モジュールに出力し得る。次に、制御モジュール 2 1 5 は、パワーメーター 2 1 3 による信号出力を使用して、デジタルカメラ 6 4、パワー制御 4 0 のパワーメーター、又はパワーメーター 2 1 2 をパワーメーター 2 1 2 を参照しながら上述したルーチンに類似した較正ルーチンで較正し得る。

【 0 1 3 4 】

チャック搭載 P S D 2 1 4 は、第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2、及び第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 のそれぞれの P S D 6 2 を含む、ビーム 2 6 の位置決めを担うモジュールを較正し得る。上述のように、画像面 1 4 の x - y 軸中のビーム 2 6 の位置を第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 の位置に相関付けすることができる。加えて、ガルバノメーター 5 0、5 2 は、第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2 のそれぞれの P S D 6 2 による位置信号出力に基づいて制御され得る。したがって、第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2 のそれぞれの P S D 6 2 により検出される位置、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 の位置、及びチャック搭載 P S D 2 1 4 により測定される、画像面 1 4 におけるビーム 2 6 の実際の場所の間の正確な較正を有することは重要である。制御モジュール 2 1 5、又は露光システム 1 0 の制御モジュール 1 2 などの別の好適な制御モジュールは、第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2 のそれぞれの P S D 6 2 と、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 を較正するのに、チャック搭載 P S D 2 1 3 による位置信号出力を使用してもよい。例えば、P S D 2 1 3 は、ビーム 2 6 の位置を検出し、2 つの座標値（すなわち、x 軸座標値及び y 軸座標値、又は動径座標値及び角座標値（極座標システム中で））を含む位置信号を出力することができる。制御モジュール 2 1 5 により、同一であるか又は同一でない場合もある、第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2 のそれぞれの P S D 6 2 により表示される座標値、及び第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2 への座標値入力と、これらの座標値は比較され得る。存在する場合には、これらの座標値の間の差異は、P S D 6 2 及び / 又はガルバノメーター 5 0、5 2 の座標値を更新して、P S D 2 1 3 の座標値と整合させることにより、制御モジュール 2 1 5 が補正する較正誤差を表示し得る。この方法を P S D 2 1 3 により測定される複数の座標値に対して繰り返して、第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2 のそれぞれの P S D 6 2、第 1 及び第 2 のガルバノメーター 5 0、5 2、及びチャック搭載 P S D 2 1 3 により測定される、画像面 1 4 の x - y 面内のビーム 2 6 の実際の位置のより正確な較正を生成し得る。

【 0 1 3 5 】

露光システム 1 0 の安定性と、製造される物品の所望の物品への忠実度を確保する一助とするために、パワー及び位置較正ルーチンのそれぞれが物品の製造時、又は物品の製造の間の時間において周期的に繰り返されてもよい。

【 0 1 3 6 】

完成物品に所望の外形を正確に生成するために、制御モジュール 1 2 又は任意の他の好適な制御モジュールは、露光システム 1 0 の制御を可能とさせるソフトウェア及び / 又はハードウェアと、さまざまな光学モジュールを含み得る。このソフトウェア及び / 又はハードウェアは、多数の制御システムレベルを含んで、さまざまなレベルの露光システム 1 0 を管理し得る。例えば、このソフトウェア及び / 又はハードウェアとしては、外形制御システム、監督制御システム、及び高速の高レベルの制御システムを挙げることができる

。

【 0 1 3 7 】

外形制御システムは、高速の集積化制御システムを含んで、ビーム 2 6 への樹脂 2 2 の露光を制御する。外形制御システムは、露光制御モジュール 8 2、光学走査モジュール 1 1 0、及び第 1 及び第 2 のビームモニター 3 4、4 2、位置検出器 4 6、及びシステム較正モジュール 2 1 0 を含むインターフェースを制御して、x -、y -、及び z 軸での協調された位置及び露光制御を提供し得る。外形制御システムは、ビーム 2 6 を所望の位置の中に移動させるために、実際のビーム 2 6 位置及び三軸すべてに対する所望のビーム 2 6 位置データを収集し、役割を担う光学モジュールを制御し得る。

【 0 1 3 8 】

高速の高レベル制御システムは、露光システム 1 0 のすべてのモジュールと接続し、物品生成の全体的な監督、光学的な診断、及びシステム順序付けを提供する。

【 0 1 3 9 】

システムを運転する環境は、露光システム 1 0 の動作を制限し得る。例えば、温度、湿度、及び電力の変動は、振動及び粒子の混入物と共に、露光システム 1 0 を用いて物品を製造する工程に有害であり得る。したがって、露光システム 1 0 中及びその周りで環境を制御することが望ましい場合がある。温度、湿度、及び粒子物質の含有量の 1 つ以上が露光システム 1 0 中及びその周りで制御され得る。例えば、システム 1 0 は、クラス 1 0 0 0 又はより良好なクリーン環境を提供するクリーンルームに収容され得る。周囲の環境は、システム 1 0 が経験する温度の範囲を制限する温度制御も含み得る。例えば、いくつかの好ましい実施形態では、+ / - 0 . 1 よりも良好な温度制御を提供し得る。湿度も所望の物品に対して高忠実度の物品を作成する露光システム 1 0 の能力に影響を及ぼす。いくつかの実施形態では、+ / - 1 0 % よりも良好な相対湿度の制御を提供して、システム 1 0 と製造物品に及ぼす湿度変動の影響を低減させるか又は実質的に除去し得る。

【 0 1 4 0 】

露光システムへの電力供給の予期しない又は所望しない遮断は、露光システム 1 0 の突然かつ無制御のシャットダウンにより引き起こされる欠陥により廃棄されるべき物品を生じ得る。例えば、ガルバノメーター 5 0、5 2 又は高速度シャッター 4 4 を光源 3 2 の前でシャットダウンと、硬化を所望しない体積の樹脂 2 2 が硬化され得る。したがって、いくつかの実施形態では、システム 1 0 は、無停電電源装置 (U P S) に接続されて、構築電源の停電の場合には、システム 1 0 は書き込み対象の少なくとも現行の外形 (しかし、可能性としては物品全体でない) を完成するのに充分長いバッテリー電源に移行し、樹脂 2 2 の不必要な体積の露光を防止するソフトシャットダウンを行ってもよい。いくつかの好ましい実施形態では、加工対象の部分に対して有害な影響無しでパワーを回復した後で、ソフトシャットダウンが再開可能である。

【 0 1 4 1 】

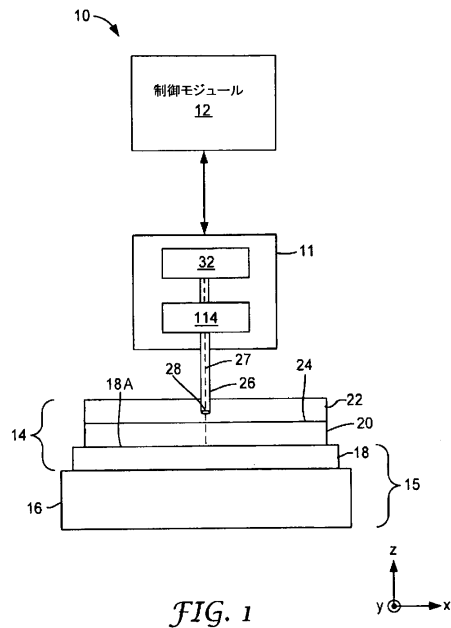
本発明のさまざまな実施形態について説明してきた。これら及び他の実施形態は、下記の特許請求の範囲内にある。

10

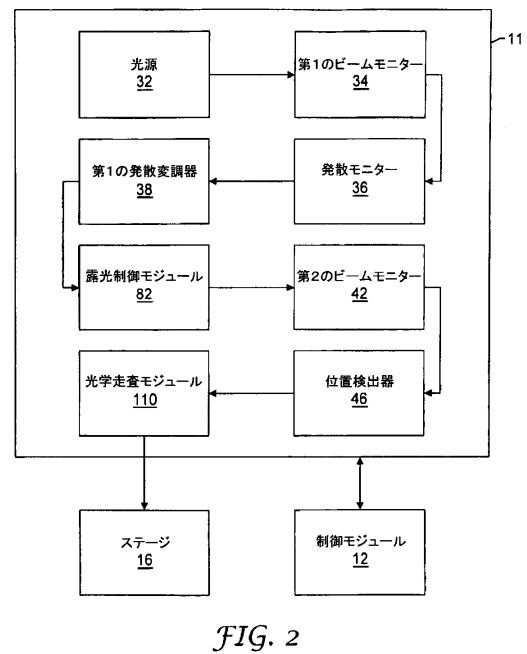
20

30

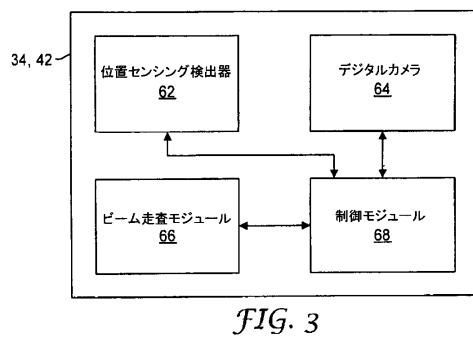
【図 1】



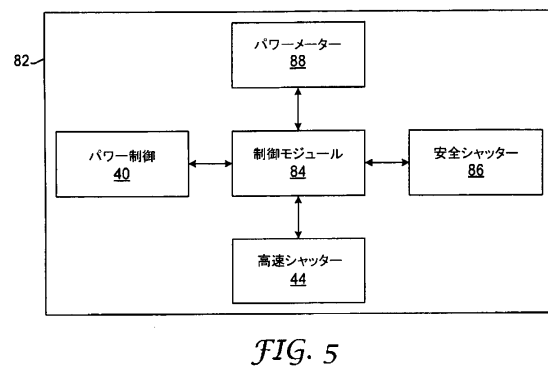
【図 2】



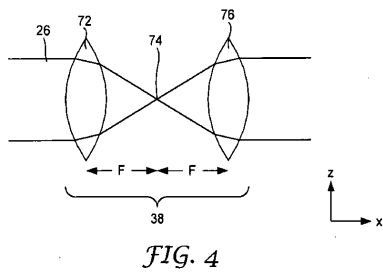
【図 3】



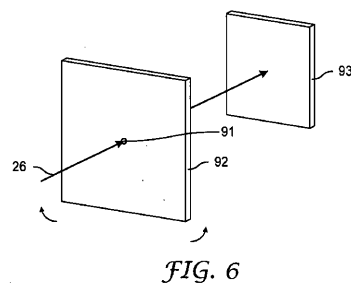
【図 5】



【図 4】



【図 6】



【図 7】

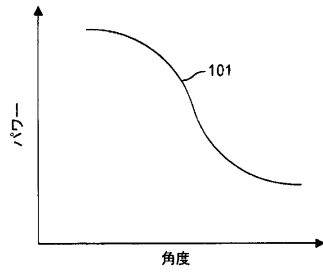


FIG. 7

【図 8】

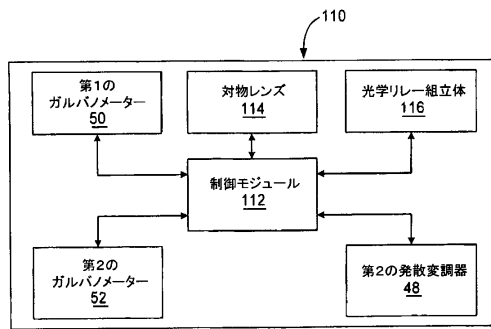


FIG. 8

【図 9】

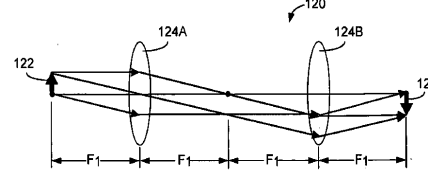


FIG. 9

【図 10A】

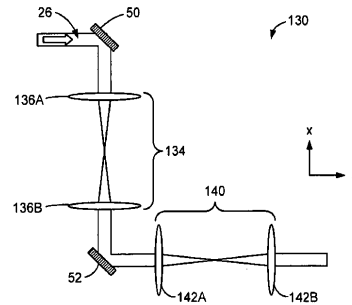


FIG. 10A

【図 10B】

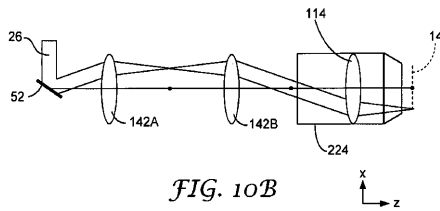


FIG. 10B

【図 11】

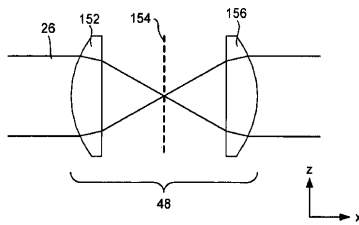


FIG. 11

【図 12】

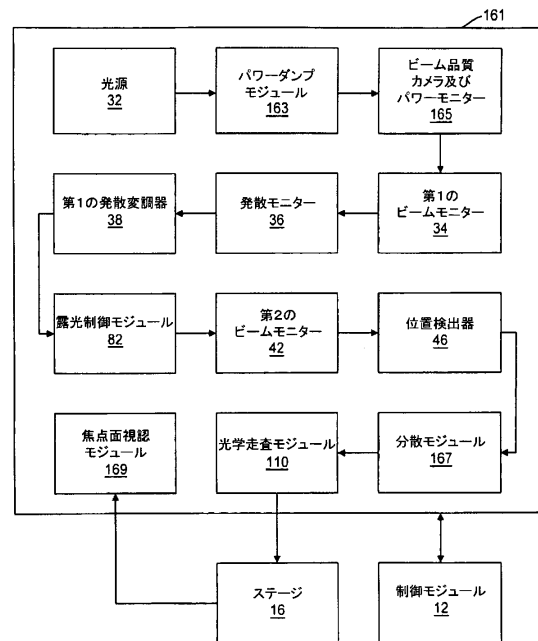


FIG. 12

【図 13】

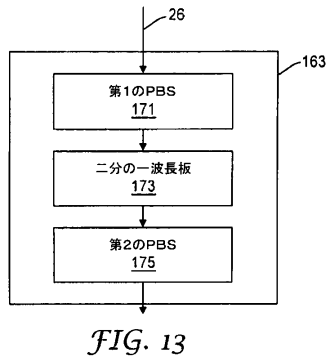


FIG. 13

【図 15】

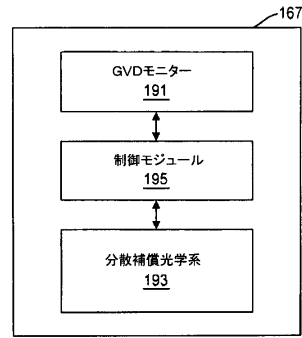


FIG. 15

【図 14】

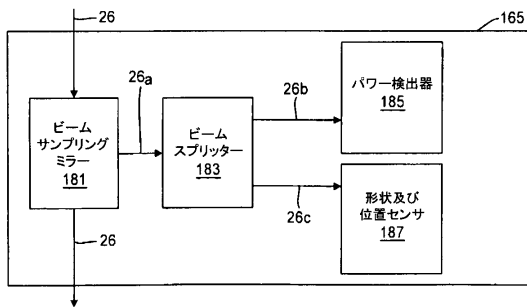


FIG. 14

【図 16】

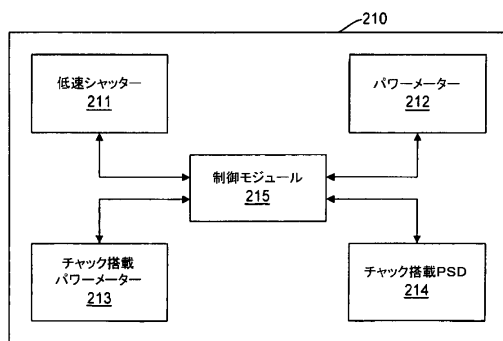


FIG. 16

フロントページの続き

- (72)発明者 デボー, ロバート ジェイ.
アメリカ合衆国, ミネソタ 55133-3427, セント ポール, ポスト オフィス ボックス 33427, スリーエム センター
- (72)発明者 ゲイツ, ブライアン ジェイ.
アメリカ合衆国, ミネソタ 55133-3427, セント ポール, ポスト オフィス ボックス 33427, スリーエム センター
- (72)発明者 ファクリス, ディーン
アメリカ合衆国, ニューヨーク 14572, ウェイランド, ダボルス コーナー ロード 7576
- (72)発明者 クラサ, ロバート ティー.
アメリカ合衆国, ミネソタ 55133-3427, セント ポール, ポスト オフィス ボックス 33427, スリーエム センター
- (72)発明者 マルコビッツ, ブルツェミスロウ ピー.
アメリカ合衆国, ミネソタ 55133-3427, セント ポール, ポスト オフィス ボックス 33427, スリーエム センター
- (72)発明者 シコラ, クレイグ アール.
アメリカ合衆国, ミネソタ 55133-3427, セント ポール, ポスト オフィス ボックス 33427, スリーエム センター

審査官 関口 英樹

- (56)参考文献 特開平09-129550(JP, A)
特開2003-001599(JP, A)
特開平07-245258(JP, A)
特開平07-304104(JP, A)
特開平04-263923(JP, A)
特開2001-287273(JP, A)
特開2003-233200(JP, A)
特表平09-504054(JP, A)
特表2009-521315(JP, A)
米国特許出願公開第2006/0072438(US, A1)
特許第4965052(JP, B2)
特開2004-009574(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G03F 7/20 - 7/24
H01L 21/027
B29C 67/00 - 67/08、69/00 - 69/02、
73/00 - 29/10、
B29D 31/00 - 31/02