

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7543320号
(P7543320)

(45)発行日 令和6年9月2日(2024.9.2)

(24)登録日 令和6年8月23日(2024.8.23)

(51)国際特許分類

F I

H 0 5 K 3/00 (2006.01)

H 0 5 K 3/00 N

B 2 3 K 26/386 (2014.01)

B 2 3 K 26/386

請求項の数 30 (全61頁)

(21)出願番号	特願2021-573191(P2021-573191)	(73)特許権者	593141632
(86)(22)出願日	令和2年5月29日(2020.5.29)		エレクトロ サイエンティフィック イン
(65)公表番号	特表2022-536649(P2022-536649 A)		ダストリーズ インコーポレーテッド
(43)公表日	令和4年8月18日(2022.8.18)		アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン
(86)国際出願番号	PCT/US2020/035152		州, ビーバートン, サウスウェスト・ミ
(87)国際公開番号	WO2020/251782	(74)代理人	リカン・ウェイ 1 4 5 2 3
(87)国際公開日	令和2年12月17日(2020.12.17)		100109896
審査請求日	令和5年3月14日(2023.3.14)	(72)発明者	弁理士 森 友宏
(31)優先権主張番号	63/026,564		クライネルト, ヤン
(32)優先日	令和2年5月18日(2020.5.18)		アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		州, ビーバートン, サウスウェスト・ミ
(31)優先権主張番号	62/859,572	(72)発明者	リン, ジービン
(32)優先日	令和1年6月10日(2019.6.10)		アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン
	最終頁に続く		州, ビーバートン, サウスウェスト・ミ
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 レーザ加工装置、これを動作させる方法、及びこれを用いてワークピースを加工する方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

導電体構造及び誘電体構造を含むワークピースの前記導電体構造内に開口を形成する方法であって、前記導電体構造に形成される開口は、前記誘電体構造の一部を露出させ、

レーザエネルギービームが前記導電体構造上に入射するように前記ワークピース上に照射される前記レーザエネルギービームをスキャンし、このスキャンは、複数のスポット位置のそれぞれに前記レーザエネルギービームを照射することによりスキャンパターンの複数のスポット位置を順次指定することを含み、前記複数のスポット位置のうち連続的に指定されるスポット位置のそれぞれのペアにおけるスポット位置の中心の間の距離は、前記複数のスポット位置のうち空間的に隣接するスポット位置のペアにおけるスポット位置の中心の間の距離よりも大きく、

前記レーザエネルギービームのスキャン中に、前記導電体構造の一領域を加熱し、前記導電体構造の前記加熱された領域に隣接する前記誘電体構造を蒸発させ、

前記複数のスポット位置のすべてのスポット位置が指定された後にはじめて、前記蒸発した誘電体構造の圧力を用いて前記ワークピースから前記導電体構造の前記加熱された領域を噴出させる、

方法。

【請求項2】

前記導電体構造は、1 μmから20 μmの範囲の厚さを有する、請求項1に記載の方法。

【請求項3】

前記レーザエネルギービームは、電磁スペクトラムの赤外域の波長を有する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記レーザエネルギービームは、電磁スペクトラムの紫外域の波長を有する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記レーザエネルギービームをスキャンする際に、前記複数のスポット位置のそれぞれに少なくとも 1 つのレーザパルス照射する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記レーザエネルギービームをスキャンする際に、前記複数のスポット位置のうち少なくとも 1 つに 1 つだけのレーザパルス照射する、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

レーザエネルギーを照射するように前記レーザエネルギービームをスキャンする際に、レーザ源で第 1 のレーザパルスを生成し、
前記第 1 のレーザパルスを複数の第 2 のレーザパルスに時間的に分割する、
請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

前記複数の第 2 のレーザパルスのうちの少なくとも 2 つは、異なるパルス持続時間を有する、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

前記複数の第 2 のレーザパルスのうちの少なくとも 2 つは、同一のパルス持続時間を有する、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 10】

前記複数の第 2 のレーザパルスのうちの少なくとも 1 つのパルス持続時間は $1\ \mu\text{s}$ 以下である、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 11】

前記複数の第 2 のレーザパルスのうちの少なくとも 1 つのパルス持続時間は $0.5\ \mu\text{s}$ 以下である、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

前記複数の第 2 のレーザパルスのうちの少なくとも 1 つのパルス持続時間は $0.25\ \mu\text{s}$ 以下である、請求項 11 に記載の方法。

【請求項 13】

前記複数の第 2 のレーザパルスのうちの少なくとも 1 つのパルス持続時間は $0.125\ \mu\text{s}$ 以下である、請求項 10 から 12 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 14】

前記複数の第 2 のレーザパルスのうちの少なくとも 2 つは異なるピークパワーを有する、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 15】

前記複数の第 2 のレーザパルスのうち少なくとも 2 つは同一のピークパワーを有する、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 16】

前記第 1 のレーザパルスを時間的に分割する際に、前記第 1 のレーザパルスを回折する、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 17】

前記複数のスポット位置のうち連続的に指定されるスポット位置のそれぞれのペアにおけるスポット位置の中心の間の距離は $15\ \mu\text{m}$ 未満である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 18】

前記複数のスポット位置のうち連続的に指定されるスポット位置のそれぞれのペアにおけるスポット位置の中心の間の距離は $10\ \mu\text{m}$ 未満である、請求項 17 に記載の方法。

【請求項 19】

10

20

30

40

50

前記複数のスポット位置を指定することは、20kHz以上の速度で前記複数のスポット位置のうち異なるスポット位置を指定することを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項20】

前記速度は1MHz以上である、請求項19に記載の方法。

【請求項21】

前記速度は2MHz以上である、請求項20に記載の方法。

【請求項22】

前記速度は5MHz以上である、請求項21に記載の方法。

【請求項23】

前記速度は8MHz以上である、請求項22に記載の方法。

10

【請求項24】

前記導電体構造が前記ワークピースから噴出する際に前記導電体構造の一部は溶融する、請求項1に記載の方法。

【請求項25】

前記導電体構造が前記ワークピースから噴出する際に前記導電体構造の他の一部は溶融されず、溶融されていない部分は溶融された部分に囲まれる、請求項24に記載の方法。

【請求項26】

前記レーザエネルギービームは、電磁スペクトルの緑色光域の波長を有する、請求項1に記載の方法。

【請求項27】

20

さらに、前記スキャン中は、連続的に指定される少なくとも1つのペアが指定される期間にわたって、前記レーザエネルギービームが連続的に前記ワークピースに照射されるように前記レーザエネルギービームを照射する、請求項1に記載の方法。

【請求項28】

導電体構造及び誘電体構造を含むワークピース内にフィーチャを形成するための装置であって、前記フィーチャは、前記導電体構造に形成される開口を含み、

前記ワークピースの前記導電体構造に入射するビーム経路に沿って伝搬可能なレーザエネルギーからなるレーザエネルギービームを生成可能なレーザ源と、

前記ビーム経路を偏向可能なポジショナと、

前記ポジショナと通信可能に連結されるコントローラと

30

を備え、前記コントローラは、請求項1から27のいずれか一項に記載されたスキャンプロセスを行うように前記ポジショナの動作を制御するように構成される、装置。

【請求項29】

導電体構造及び誘電体構造を含むワークピース内にフィーチャを形成するための装置とともに使用されるコントローラであって、前記フィーチャは、前記導電体構造に形成される開口を含み、前記装置は、前記ワークピースの前記導電体構造に入射するビーム経路に沿って伝搬可能なレーザエネルギービームを生成可能なレーザ源と、前記ビーム経路を偏向可能なポジショナとを備え、

前記ポジショナと通信可能に連結されるプロセッサと、

40

前記プロセッサによりアクセス可能なメモリであって、前記プロセッサにより実行された際に、前記プロセッサに前記ポジショナの動作を制御させて請求項1から27のいずれか一項に記載の方法におけるスキャンングプロセスを実現する命令が格納されたメモリとを備える、コントローラ。

【請求項30】

導電体構造及び誘電体構造を含むワークピース内にフィーチャを形成するための装置とともに使用されるコンピュータ読取可能記録媒体であって、前記フィーチャは、前記導電体構造に形成される開口を含み、前記装置は、前記ワークピースの前記導電体構造に入射するビーム経路に沿って伝搬可能なレーザエネルギービームを生成可能なレーザ源と、前記ビーム経路を偏向可能なポジショナと、前記ポジショナの動作を制御可能なコントロー

50

ラとを備え、

前記コントローラに請求項 1 から 27 のいずれか一項に記載の方法を実行させるための命令を記録したコンピュータ読取可能記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【関連出願に対する相互参照】

【0001】

本出願は、2019年6月10日に提出された米国仮特許出願第62/859,572号、2019年1月4日に提出された米国仮特許出願第62/930,287号、2020年2月5日に提出された米国仮特許出願第62/970,648号、及び2020年5月18日に提出された米国仮特許出願第63/026,564号の利益を主張するものであり、これらの仮特許出願のそれぞれはその全体が参照により組み込まれる。

10

【背景】

【0002】

I. 技術分野

本発明の実施形態は、ワークピースをレーザ加工するための装置及び方法に関するものである。

【0003】

II. 関連技術の説明

プリント回路基板（異なる種類のリジット及びフレキシブルの両方）などのワークピースに非貫通ビア及び貫通ビア（典型的には直径150 μm 未満）を形成するためにレーザプロセスが用いられることが多い。ビアを形成するために、使用され得るレーザプロセスは、いわゆる「パンチ」プロセス、「トレパン」プロセス、又はこれらの組み合わせである。パンチプロセス中には、ビアが形成されている間は、静止状態にされるワークピースにレーザエネルギービームが照射される。これに対して、トレパンプロセス中には、ビアを形成するためにワークピースに対してレーザエネルギービームが移動される。従来から、トレパンプロセス中には、レーザエネルギービームによりワークピース上に照射されるスポットを螺旋形又は円形パターンでスキャンするようにレーザエネルギービームが移動される。

20

【概要】

【0004】

一実施形態は、第1の構造及び第2の構造を含むワークピース内にフィーチャを形成する方法として特徴付けることができる。上記フィーチャは、上記第1の構造に形成される開口を含む。この方法では、上記レーザエネルギービームが上記第1の構造上に入射してスキャンパターンの複数の空間的に異なるスポットに順次上記レーザエネルギーが照射されるように、上記ワークピース上に照射されるレーザエネルギービームをスキャンすることができる。上記スキャンは、a) 上記複数の空間的に異なるスポット位置のうち少なくとも2つのスポット位置に上記レーザエネルギーを照射して、上記フィーチャが形成される上記ワークピースの領域内に上記レーザエネルギーを分布させ、b) 上記a)の後、上記複数の空間的に異なるスポット位置のうち少なくとも2つのスポット位置に上記レーザエネルギーを照射して、上記領域内で上記第1の構造を間接的にアブレートすることにより上記開口を形成することを含み得る。

30

【0005】

他の実施形態は、第1の構造及び第2の構造を含むワークピース内にフィーチャを形成するための装置として特徴付けることができる。上記フィーチャは、上記第1の構造に形成される開口を含む。この装置は、上記ワークピースの上記第1の構造に入射するビーム経路に沿って伝搬可能なレーザエネルギービームを生成可能なレーザ源と、上記ビーム経路を偏向可能なポジショナと、上記ポジショナと通信可能に連結されるコントローラとを含み得る。上記コントローラは、上記段落で述べたスキャンプロセスを行うようにポジショナの動作を制御するように構成され得る。

40

【0006】

50

さらに他の実施形態は、レーザ源と、音響光学偏向器（AOD）システムと、コントローラとを含む装置として特徴付けることができる。上記レーザ源は、少なくとも1つのレーザパルスを含むレーザエネルギービームを生成可能であり、上記レーザエネルギービームは、ビーム経路に沿ってワークピースに伝搬可能である。上記AODシステムは、上記ビーム経路を偏向可能であり、与えられた第1のRF信号に応答して第1の軸に沿って上記ビーム経路を偏向可能な第1のAODを含む。上記コントローラは、上記AODシステムと通信可能に連結され、上記AODシステムの動作を制御するように構成され、これにより上記AODシステムに入射する共通レーザパルスを複数のパルススライスに時間的に分割するように上記第1のRF信号の周波数が少なくとも2回変化し、上記第1のRF信号の上記周波数は、20kHz以上の速度で変化する。

10

【0007】

さらに他の実施形態は、レーザ源と、スキャンレンズを有する第1のスキャンヘッドと、スキャンレンズを有する第2のスキャンヘッドと、ポジショナと、コントローラとを含む装置として特徴付けることができる。上記レーザ源は、少なくとも1つのレーザパルスを有するレーザエネルギービームを生成可能であり、上記レーザエネルギービームは、ビーム経路に沿ってワークピースに伝搬可能である。上記ポジショナは、上記第1のスキャンヘッドと上記第2のスキャンヘッドとの間で上記ビーム経路を選択的に偏向可能である。上記コントローラは、上記ポジショナと通信可能に連結され、上記ポジショナに入射する共通レーザパルスを第1のパルススライスセットと第2のパルススライスセットとを含む複数のパルススライスに時間的に分割するように上記ポジショナの動作を制御するように構成される。上記コントローラは、さらに、上記第1のパルススライスセットを上記第1のスキャンヘッドに偏向し、上記第2のパルススライスセットを上記第2のスキャンヘッドに偏向するように上記ポジショナの動作を制御するように構成され、上記第2のパルススライスセット中の少なくとも1つのパルススライスは、時間的に上記第1のパルススライスセット中の2つの連続するパルススライスの間に存在する。

20

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図1】図1及び図31は、本発明のある実施形態に係るレーザ加工装置を模式的に示すものである。

【図2】図2は、一実施形態において第1のポジショナに組み込み可能な多軸AODシステムを模式的に示すものである。

30

【図3-4】図3及び図4は、ある実施形態におけるパルススライシングを行うための手法を模式的に示すものである。

【図5】図5は、レーザ加工装置により加工され得るワークピースの実施形態を模式的に示す断面図である。

【図6-7】図6及び図7は、レーザ加工装置を用いて図5に関して述べられるワークピースに形成することができるフィーチャの実施形態を模式的に示す断面図である。

【図8-22】図8から図22及び図24(a)は、図6及び図7に関して述べられるようなフィーチャを形成するために、図5に関して述べられるワークピース上に照射されるレーザエネルギービームにより照射されるプロセススポットがスキャンされるスキャンパターンの実施形態の例を示す図である。

40

【図23】図23、図24(b)、図25及び図26は、それぞれ図14、図24(a)、図16及び図15に示されるスキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンした際に（例えば、図6に示されるような）ワークピースに形成される非貫通ビアの顕微鏡写真である。図23及び図24(b)では、非貫通ビアの直径dは約100µmである。図25では、非貫通ビアの直径dは約75µmである。図26では、それぞれの非貫通ビアの直径dは約180µmである。

【図24(a)】図8から図22及び図24(a)は、図6及び図7に関して述べられるようなフィーチャを形成するために、図5に関して述べられるワークピース上に照射されるレーザエネルギービームにより照射されるプロセススポットがスキャンされるスキャンパターンの実施形態の例を示す図である。

50

【図 2 4 (b)】図 23、図 24(b)、図 25 及び図 26 は、それぞれ図 14、図 24(a)、図 16 及び図 15 に示されるスキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンした際に（例えば、図 6 に示されるような）ワークピースに形成される非貫通ビアの顕微鏡写真である。図 23 及び図 24(b) では、非貫通ビアの直径 d は約 $100\ \mu\text{m}$ である。図 25 では、非貫通ビアの直径 d は約 $75\ \mu\text{m}$ である。図 26 では、それぞれの非貫通ビアの直径 d は約 $180\ \mu\text{m}$ である。

【図 2 5】図 23、図 24(b)、図 25 及び図 26 は、それぞれ図 14、図 24(a)、図 16 及び図 15 に示されるスキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンした際に（例えば、図 6 に示されるような）ワークピースに形成される非貫通ビアの顕微鏡写真である。図 23 及び図 24(b) では、非貫通ビアの直径 d は約 $100\ \mu\text{m}$ である。図 25 では、非貫通ビアの直径 d は約 $75\ \mu\text{m}$ である。図 26 では、それぞれの非貫通ビアの直径 d は約 $180\ \mu\text{m}$ である。

10

【図 2 6】図 23、図 24(b)、図 25 及び図 26 は、それぞれ図 14、図 24(a)、図 16 及び図 15 に示されるスキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンした際に（例えば、図 6 に示されるような）ワークピースに形成される非貫通ビアの顕微鏡写真である。図 23 及び図 24(b) では、非貫通ビアの直径 d は約 $100\ \mu\text{m}$ である。図 25 では、非貫通ビアの直径 d は約 $75\ \mu\text{m}$ である。図 26 では、それぞれの非貫通ビアの直径 d は約 $180\ \mu\text{m}$ である。

【図 2 7】図 27 は、第 2 型スキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンすることにより形成されるビア開口の形状の平面図を模式的に示す図である。

【図 2 8】図 28 は、レーザエネルギービームによりスキャンされた際に、図 27 に例示的に示される楕円形開口を有するビアを生成するスポット位置の例示的な円形配置を示す図である。

20

【図 2 9】図 29 は、レーザエネルギービームによりスキャンされた際に、図 27 に示される開口形状よりも真円度の高い開口形状を有するビアを生成するスポット位置の例示的な楕円配置を示す図である。

【図 3 0】図 30 は、一実施形態において非貫通ビアの形成中にパルススライシングを行うための手法を示す 1 組の図である。

【図 3 1】図 1 及び図 31 は、本発明のある実施形態に係るレーザ加工装置を模式的に示すものである。

【図 3 2 - 4 5】図 32 ~ 図 45 は、ある実施形態において様々なフィーチャの形成中にパルススライシングを行うための手法を示す図である。

30

【図 4 6】図 46、図 48 及び図 49 は、本発明のある実施形態において形成されるビア開口の顕微鏡写真である。

【図 4 7】図 47、図 50 及び図 51 は、図 48 に示されるものに似た開口を有するビアを形成するための手法を示す図である。

【図 4 8】図 46、図 48 及び図 49 は、本発明のある実施形態において形成されるビア開口の顕微鏡写真である。

【図 4 9】図 46、図 48 及び図 49 は、本発明のある実施形態において形成されるビア開口の顕微鏡写真である。

【図 5 0】図 47、図 50 及び図 51 は、図 48 に示されるものに似た開口を有するビアを形成するための手法を示す図である。

40

【図 5 1】図 47、図 50 及び図 51 は、図 48 に示されるものに似た開口を有するビアを形成するための手法を示す図である。

【詳細な説明】

【0 0 0 9】

以下、添付図面を参照しつつ実施形態の例を説明する。明示的に述べている場合を除き、図面においては、構成要素、特徴、要素などのサイズや位置などやそれらの間の距離は、必ずしも縮尺通りではなく、また理解しやすいように誇張されている。図面を通して同様の数字は同様の要素を意味している。このため、同一又は類似の数字は、対応する図面で言及又は説明されていない場合であっても、他の図面を参照して述べられることがある。また、参照番号の付されていない要素であっても、他の図面を参照して述べられること

50

がある。

【0010】

明細書において使用される用語は、特定の例示的な実施形態を説明するためだけのものであり、限定を意図しているものではない。特に定義されている場合を除き、本明細書において使用される（技術的用語及び科学的用語を含む）すべての用語は、当業者により一般的に理解されるのと同じ意味を有する。本明細書で使用される場合には、内容が明確にそうではないことを示している場合を除き、単数形は複数形を含むことを意図している。さらに、「備える」及び／又は「備えている」という用語は、本明細書で使用されている場合には、述べられた特徴、整数、ステップ、動作、要素、及び／又は構成要素の存在を特定するものであるが、1つ以上の他の特徴、整数、ステップ、動作、要素、構成要素、及び／又はそのグループの存在又は追加を排除するものではないことを理解すべきである。特に示している場合を除き、値の範囲が記載されているときは、その範囲は、その範囲の上限と下限の間にあるサブレンジだけではなく、その上限及び下限を含むものである。特に示している場合を除き、「第1」や「第2」などの用語は、要素を互いに区別するために使用されているだけである。例えば、あるノードを「第1のノード」と呼ぶことができ、同様に別のノードを「第2のノード」と呼ぶことができ、あるいはこれと逆にすることもできる。

【0011】

特に示されている場合を除き、「約」や「その前後」などは、量、サイズ、配合、パラメータ、及び他の数量及び特性が、正確ではなく、また正確である必要がなく、必要に応じて、あるいは許容誤差、換算係数、端数計算、測定誤差など、及び当業者に知られている他のファクタを反映して、概数であってもよく、さらに／あるいは大きくても小さくてもよいことを意味している。本明細書において、「下方」、「下」、「下側」、「上方」、及び「上側」などの空間的に相対的な用語は、図に示されるような、ある要素又は特徴の他の要素又は特徴に対する関係を述べる際に説明を容易にするために使用され得るものである。空間的に相対的な用語は、図において示されている方位に加えて異なる方位を含むことを意図するものであることは理解すべきである。例えば、他の要素又は特徴の「下方」又は「下」にあるとして説明される要素は、図中の対象物が反転した場合には、他の要素又は特徴の「上方」を向くことになる。このように、「下方」という例示的な用語は、上方及び下方の方位の双方を含み得るものである。対象物が他の方位を向く場合（例えば90度回転される場合や他の方位にある場合）には、本明細書において使用される空間的に相対的な記述子はこれに応じて解釈され得る。

【0012】

本明細書において使用されるセクション見出しは、特に言及している場合を除いて、整理のためだけのものであり、述べられた主題を限定するものと解釈すべきではない。本開示の精神及び教示を逸脱することなく、多くの異なる形態、実施形態及び組み合わせが考えられ、本開示を本明細書で述べた実施形態の例に限定して解釈すべきではないことは理解できるであろう。むしろ、これらの例及び実施形態は、本開示が完全かつすべてを含むものであって、本開示の範囲を当業者に十分に伝えるように提供されるものである。

【0013】

Ⅰ. 概要

本明細書において述べられる実施形態は、概して、ワークピースをレーザ加工（あるいは、より簡単に「加工」）するための方法及び装置に関するものである。一般的には、レーザ放射をワークピースに照射してワークピースを形成する1以上の材料の1以上の特性又は性質（例えば、化学的組成、原子構造、イオン構造、分子構造、電子構造、微細構造、ナノ構造、密度、粘性、屈折率、透磁率、比誘電率、テクスチャ、色、硬さ、電磁放射に対する透過率など、又はこれらを任意に組み合わせたもの）を加熱し、溶融し、蒸発させ、アブレートし、傷つけ、脱色し、研磨し、粗くし、炭化し、発泡させ、あるいは改質することにより、加工が全体にわたって、あるいは部分的に行われる。加工される材料は、加工の前又は加工中においてワークピースの外部に存在していてもよく、あるいは、加

工の前又は加工中において完全にワークピースの内部に位置していても（すなわち、ワークピースの外部に存在していなくても）よい。

【0014】

以下でより詳細に述べられる、開示されたレーザ加工用装置により行うことができるプロセスの具体例としては、ビアのドリル加工又は他の孔の形成が挙げられる。本明細書で述べられる実施形態は、カッティング、打ち抜き、溶接、スクライビング、彫刻、マーキング（例えば、表面マーキング、サブ表面マーキングなど）、レーザ誘起フォワード転送、洗浄、漂白、高輝度ピクセルの修復（例えば、カラーフィルタ暗化、OLED材料の改質など）、膜除去、表面テクスチャリング（例えば、粗くする、滑らかにするなど）、又はこれに類似するもの、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを行うか、あるいは促進するために拡張することができることは理解できるであろう。このように、加工の結果として、ワークピース上に、あるいはワークピース内に形成され得る1以上のフィーチャは、開口、スロット、ビア又は他の孔、溝、トレンチ、スクライプライン、切溝、凹部、導電トレース、オーム接触、抵抗パターン、人間が読み取ることができる又は機械により読み取ることができる印（例えば、視覚的に又はテクスチャにおいて区別できる1以上の特性を有するワークピース内又はそのようなワークピース上の1以上の領域を備える）、又はこれに類似するもの、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを含み得る。開口、スロット、ビア、孔などのフィーチャは、上面視において任意の好適な又は望ましい形状（例えば、円形、楕円形、正方形、矩形、三角形、管状、又はこれに類似するもの、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）を有していてもよい。さらに、開口、スロット、ビア、孔などのフィーチャは、（例えば、いわゆる「貫通ビア」、「貫通孔」などを形成するように）ワークピースを完全に貫通して延びていてもよいし、あるいは（いわゆる「非貫通ビア」、「非貫通孔」などを形成するように）ワークピース内を部分的にのみ延びていてもよい。

【0015】

加工され得るワークピースは、1以上の金属、ポリマー、セラミック、複合物、又はこれらを任意に組み合わせたもの（例えば、合金であるか、化合物であるか、混合物であるか、溶液であるか、複合物であるかなどを問わない）から形成されるものとして総称して特徴付けることができる。本明細書で特に述べられるワークピースの例としては、プリント回路基板（PCB）のパネル（本明細書においては「PCBパネル」ともいう）、PCB、フレキシブルプリント回路（FPC）、集積回路（IC）、及びICパッケージ（ICP）が挙げられる。しかしながら、発光ダイオード（LED）、LEDパッケージ、半導体ウェハ、電子又は光学デバイス基板（例えば、 Al_2O_3 、 AlN 、 BeO 、 Cu 、 GaAs 、 GaN 、 Ge 、 InP 、 Si 、 SiO_2 、 SiC 、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ など、あるいはこれを任意に組み合わせたもの又はこれらの合金を任意に組み合わせたものから形成される基板）、リードフレーム、リードフレームブランク、プラスチック、非強化ガラス、熱強化ガラス、（例えばイオン交換プロセスを介した）化学強化ガラス、石英、サファイヤ、プラスチック、シリコンなどから形成される物、電子ディスプレイ（例えば、TFT、カラーフィルタ、有機LED（OLED）アレイ、量子ドットLEDアレイなど、又はこれらを任意に組み合わせたものが形成された基板）の構成要素、レンズ、ミラー、スクリーンプロテクタ、タービン翼、粉末、膜、箔、板、型（例えば、ワックスモールド、射出成形プロセスやインベストメント鑄造プロセス用の型など）、布地（織物、フェルトなど）、外科用器具、医療用インプラント、パッケージされた製品、靴、自転車、自動車、自動車部品又は航空部品（例えば、フレーム、ボディパネルなど）、家庭用電気製品（例えば、電子レンジ、オーブン、冷蔵庫など）、（例えば、腕時計、コンピュータ、スマートフォン、タブレットコンピュータ、ウェアラブル電子デバイスなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののための）デバイスハウジングのような他の種類のワークピースも有益に加工できることは理解できるであろう。

【0016】

したがって、加工され得る材料には、 Al 、 Ag 、 Au 、 Cu 、 Fe 、 In 、 Mg 、 Pt 、 Sn 、 Ti など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの（例えば、合金であるか、複合物であるか

などを問わない)などの1以上の金属、導電性金属酸化物(例えばITOなど)、透明な導電性ポリマー、セラミック、ワックス、樹脂、無機誘電体材料(例えば、層間誘電体構造に使用される。酸化ケイ素、窒化ケイ素、酸窒化ケイ素など、又はこれらを任意に組み合わせたもの)、low-k誘電体材料(メチルシルセスキオキサン(MSQ)、水素シルセスキオキサン(HSQ)、フッ化オルトケイ酸テトラエチル(FTEOS)など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの)、有機誘電体材料(例えば、SILK、ベンゾシクロブテン、Nautilus(いずれもDow社により製造される)、ポリフルオロテトラエチレン(DuPont社により製造される)、FLARE(Allied Chemical社により製造される)など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの)、ガラス繊維、高分子材料(ポリアミド、ポリイミド、ポリエステル、ポリアセタール、ポリカーボネート、改質ポリフェニレンエーテル、ポリブチレンテレフタレート、ポリフェニレンサルファイド、ポリエーテルスルホン、ポリエーテルイミド、ポリエーテルエーテルケトン、液晶ポリマー、アクリロニトリルブタジエンスチレン、又はこれらの任意の化合物、複合物、又は合金)、革、紙、組立材(例えば、「ABF」としても知られる、味の素ビルドアップフィルムなど)、ガラス繊維強化エポキシ積層(例えばFR4)、プリプレグ、ソルダレジストなど、あるいはこれらの任意の複合物、積層体、又は他の組み合わせが含まれる。

【0017】

II. システムー概要

図1は、本発明の一実施形態におけるレーザ加工装置を模式的に示している。

【0018】

図1に示される実施形態を参照すると、ワークピース102を加工するためのレーザ加工装置100(本明細書においては単に「装置」ともいう)は、レーザエネルギービームを生成するレーザ源104と、第1のポジション106と、第2のポジション108と、第3のポジション110と、スキャンレンズ112とを含むものとして特徴付けることができる。第2のポジション108、第3のポジション110及びスキャンレンズ112のそれぞれは任意的なものであり、装置100から省略してもよいことに留意すべきである。スキャンレンズ112及び第2のポジション108は、必要に応じて、共通のハウジング又は「スキャンヘッド」120に一体化することができる。

【0019】

以下でより詳細に述べるように、第1のポジション106は、ビーム経路114を第2のポジション108のいずれかに偏向するためにレーザエネルギービームを回折することが可能になっている。本明細書で使用される場合には、「ビーム経路」という用語は、レーザエネルギービームがレーザ源104からスキャンレンズ112に伝搬する際に、レーザエネルギービーム中のレーザエネルギーが通る経路を意味する。ビーム経路114を第2のポジション108に偏向する際には、第1の角度範囲(本明細書においては「1次角度範囲116」ともいう)内の任意の角度(例えば、これは第1のポジション106に入射するビーム経路114に対して測定される)でビーム経路114を偏向することができる。

【0020】

第2のポジション108は、ビーム経路114をスキャンレンズ112に偏向するように、レーザ源104により生成され、第1のポジション106により偏向されたレーザエネルギービームを回折し、反射し、屈折し、あるいはこれに類することを行い、あるいはこれらを任意に組み合わせて行う(すなわち、レーザエネルギービームを「偏向」する)ことが可能になっている。ビーム経路114をスキャンレンズ112に偏向する際には、第2のポジション108は、第2の角度範囲(本明細書では「2次角度範囲118」ともいう)内の任意の角度(例えば、これはスキャンレンズ112の光軸に対して測定される)でビーム経路114を偏向することができる。

【0021】

スキャンレンズ112に偏向されたレーザエネルギーは、典型的には、ワークピース102に照射されるようにスキャンレンズ112により集束され、ビーム軸に沿って伝搬するように透過する。ワークピース102に照射されるレーザエネルギーは、ガウス形空間強度プロ

10

20

30

40

50

ファイル又は非ガウス形（すなわち「整形」）空間強度プロファイル（例えば、「トップハット形」空間強度プロファイル、スーパーガウス形空間強度プロファイルなど）を有するものとして特徴付けることができる。

【0022】

本明細書で使用される場合には、「スポットサイズ」という用語は、照射されるレーザーエネルギービームによって少なくとも部分的に加工されるワークピース102の一領域をビーム軸が交差する位置（「プロセススポット」、「スポット位置」、あるいは単に「スポット」とも呼ばれる）に照射されるレーザーエネルギービームの直径又は最大空間幅を意味する。本明細書における説明については、スポットサイズは、ビーム軸から、光学強度がビーム軸での光強度の $1/e^2$ にまで下がるところまでの半径方向距離又は横断距離として測定される。一般的に、レーザーエネルギービームのスポットサイズは、ビームウェストで最小となる。ワークピース102に照射されると、ビーム内のレーザーエネルギーは、 $2\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ の範囲のスポットサイズでワークピース102に当たるものとして特徴付けることができる。しかしながら、スポットサイズは、 $2\mu\text{m}$ より小さくでき、あるいは $200\mu\text{m}$ よりも大きくできることは理解できるであろう。このように、ワークピース102に照射されるレーザーエネルギービームは、 $2\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $35\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $45\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $55\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ など、あるいはこれらの値のいずれかの間の値よりも大きいか、あるいは小さいか、あるいはこれと等しいスポットサイズを有することができる。

【0023】

また、装置100は、レーザーエネルギービームがビーム経路114に沿って伝搬する際に、レーザーエネルギービームを上述した第1のポジション106、第2のポジションなど、あるいはこれに類するもの、あるいはこれらを任意に組み合わせたものに向けるために、レーザーエネルギービームを集束し、拡大し、コリメートし、整形し、偏光し、フィルタし、分割し、結合し、クロップし、吸収し、あるいは修正し、調整するなどのための1以上の他の光学的構成要素（例えば、ビームトラップ、ビームエキスパンダ、ビーム成形器、ビームスプリッタ、アパーチャ、フィルタ、コリメータ、レンズ、ミラー、プリズム、偏光子、位相リターダ、回折光学素子（当該技術分野においてDOEとして一般的に知られている）、屈折光学素子（当該技術分野においてROEとして一般的に知られている）など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）を含み得る。

【0024】

A. レーザ源

一実施形態においては、レーザー源104はレーザーパルスを生成することができる。このため、レーザー源104は、パルスレーザー源、CWレーザー源、QCWレーザー源、バーストモードレーザーなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを含み得る。レーザー源104がQCWレーザー源又はCWレーザー源を含む場合、レーザー源104は、パルスモードで動作してもよく、あるいは非パルスモードで動作するが、QCWレーザー源又はCWレーザー源から出力されるレーザー放射のビームを時間的に変調するパルスゲーティングユニット（例えば、音響光学（AO）変調器（AOM）、ビームチョッパなど）をさらに含んでもよい。図示されていないが、装置100は、レーザー源104により出力される光の波長を変換するように構成される1以上の高調波発生結晶（「波長変換結晶」としても知られている）を必要に応じて含むことができる。しかしながら、他の実施形態においては、レーザー源104が、QCWレーザー源又はCWレーザー源として提供され、パルスゲーティングユニットを含んでいなくてもよい。このように、レーザー源104は、その後ビーム経路114に沿って伝搬可能な一連のレーザーパルスとして、あるいは連続又は準連続レーザービームとして表され得るレーザーエネルギービームを生成可能なものとして広く特徴付けることができる。本明細書で述べられる多くの実施形態はレーザーパルスに言及しているが、適切な場合又は必要な場合には、連続ビーム又は準連続ビームを代替的又は付加的に用いることができることを理解すべきである。

【0025】

レーザー源104により出力されるレーザーエネルギーは、電磁スペクトルの紫外光域（UV）

、可視光域又は赤外光域（IR）の1以上の波長を有することができる。電磁スペクトルのUV範囲にあるレーザエネルギーは、100nm、121nm、124nm、157nm、200nm、334nm、337nm、351nm、380nmなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の波長のような、10nm（又はその前後）から385nm（又はその前後）の範囲にある1以上の波長を有していてもよい。電磁スペクトルの可視緑色光域のレーザエネルギーは、511nm、515nm、530nm、532nm、543nm、568nmなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の波長のような、500nm（又はその前後）から560nm（又はその前後）の範囲にある1以上の波長を有していてもよい。電磁スペクトルのIR域のレーザエネルギーは、600nmから1000nm、752.5nm、780nmから1060nm、799.3nm、980nm、1047nm、1053nm、1060nm、1064nm、1080nm、1090nm、1152nm、1150nmから1350nm、1540nm、2.6 μ mから4 μ m、4.8 μ mから8.3 μ m、9.4 μ m、10.6 μ mなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の波長のような、750nm（又はその前後）から15 μ m（又はその前後）の範囲にある1以上の波長を有していてもよい。

【0026】

レーザエネルギービームが一連のレーザパルスとして表される場合には、レーザ源104により出力されるレーザパルスは、10fsから900msの範囲のパルス幅又はパルス持続時間（すなわち、時間に対するパルス中の光パワーの半値全幅（FWHM）に基づく）を有し得る。しかしながら、パルス持続時間を10fsよりも短くしてもよく、あるいは900msよりも長くしてもよいことは理解できるであろう。このように、レーザ源104により出力される少なくとも1つのレーザパルスは、10fs、15fs、30fs、50fs、100fs、150fs、200fs、300fs、500fs、600fs、750fs、800fs、850fs、900fs、950fs、1ps、2ps、3ps、4ps、5ps、7ps、10ps、15ps、25ps、50ps、75ps、100ps、200ps、500ps、1ns、1.5ns、2ns、5ns、10ns、20ns、50ns、100ns、200ns、400ns、800ns、1000ns、2 μ s、5 μ s、10 μ s、15 μ s、20 μ s、25 μ s、30 μ s、40 μ s、50 μ s、100 μ s、300 μ s、500 μ s、900 μ s、1ms、2ms、5ms、10ms、20ms、50ms、100ms、300ms、500ms、900ms、1sなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値より短いパルス持続時間、これよりも長いパルス持続時間、あるいはこれと等しいパルス持続時間を有することができる。

【0027】

レーザ源104により出力されるレーザパルスは、5mWから50kWの範囲にある平均パワーを有することができる。しかしながら、平均パワーを5mWよりも低くしてもよく、あるいは50kWよりも高くしてもよいことは理解できるであろう。このように、レーザ源104により出力されるレーザパルスは、5mW、10mW、15mW、20mW、25mW、50mW、75mW、100mW、300mW、500mW、800mW、1W、2W、3W、4W、5W、6W、7W、10W、15W、18W、25W、30W、50W、60W、100W、150W、200W、250W、500W、2kW、3kW、20kW、50kWなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値よりも低い平均パワー、これよりも高い平均パワー、あるいはこれと等しい平均パワーを有することができる。

【0028】

レーザパルスは、5kHzから5GHzの範囲にあるパルス繰り返し率でレーザ源104により出力され得る。しかしながら、パルス繰り返し率は、5kHzよりも低くてもよく、あるいは5GHzよりも高くてもよいことは理解できるであろう。このように、5kHz、50kHz、100kHz、175kHz、225kHz、250kHz、275kHz、500kHz、800kHz、900kHz、1MHz、1.5MHz、1.8MHz、1.9MHz、2MHz、2.5MHz、3MHz、4MHz、5MHz、10MHz、20MHz、50MHz、60MHz、100MHz、150MHz、200MHz、250MHz、300MHz、350MHz、500MHz、550MHz、600MHz、900MHz、2GHz、10GHzなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値よりも低いパルス繰り返し率、これよりも高いパルス繰り返し率、あるいはこれと等しいパルス繰り返し率でレーザ源104によりレーザパルスを出力することができる。

【0029】

波長、平均パワー、及びレーザエネルギービームが一連のレーザパルスとして表される場合にはパルス持続時間及びパルス繰り返し率に加えて、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームは、パルスエネルギー、ピークパワーなどの1以上の他の特性により特徴付けることができる。そのような特性は、（例えば、1以上のフィーチャを形成するために）ワークピース102を加工するのに十分な光強度（ W/cm^2 で測定される）やフルエンス（ J/cm^2 で測定される）などでワークピース102のプロセススポットを照射してワークピース102を加工する（例えば1以上のフィーチャを形成する）ために（例えば、必要に応じて波長、パルス持続時間、平均パワー、パルス繰り返し率、スポットサイズなどの1以上の他の特性に基づいて）選択することができる。

【0030】

レーザ源104を特徴付け得るレーザの種類例としては、ガスレーザ（例えば、二酸化炭素レーザ、一酸化炭素レーザ、エキシマレーザなど）、固体レーザ（例えば、Nd:YAGレーザなど）、ロッドレーザ、ファイバレーザ、フォトニック結晶ロッド／ファイバレーザ、パッシブモードロック固体バルク又はファイバレーザ、色素レーザ、モードロックダイオードレーザ、パルスレーザ（例えば、msパルスレーザ、nsパルスレーザ、psパルスレーザ、fsパルスレーザ）、CWレーザ、QCWレーザなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものが挙げられる。構成によっては、ガスレーザ（例えば二酸化炭素レーザなど）は、1以上のモード（例えば、CWモード、QCWモード、パルスモード、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）で動作するように構成され得る。レーザ源104として提供され得るレーザ源の具体例としては、EOLITE社により製造されるBOREAS、HEGOA、SIROCCO又はCHINOOKシリーズのレーザ、PYROPHOTONICS社により製造されるPYROFLEXシリーズのレーザ、COHERENT社により製造されるPALADIN Advanced 355又はDIAMONDシリーズ（例えば、DIAMOND Eシリーズ、Gシリーズ、J-2シリーズ、J-3シリーズ、J-5シリーズ）、FLARE NXシリーズ、MATRIX QS DPSSシリーズ、MEPHISTO Qシリーズ、AVIA LXシリーズ、AVIA NXシリーズ、RAPID NXシリーズ、HYPERRAPID NXシリーズ、RAPIDシリーズ、HELIOSシリーズ、FIDELITYシリーズ、MONACOシリーズ、OPERAシリーズ、又はRAPID FXシリーズのレーザ、SPECTRA PHYSICS社により製造されるASCENDシリーズ、EXCELSIORシリーズ、EXPLORERシリーズ、FEMTOTRAINシリーズ、HIGHQ-2シリーズ、HIPPOシリーズ、ICEFYREシリーズ、NAVIGATORシリーズ、QUANTA-RAYシリーズ、QUASARシリーズ、SOLSTICS ACEシリーズ、SPIRITシリーズ、TALONシリーズ、VANGUARDシリーズ、又はVGENシリーズのレーザ、SYNRAD社により製造されるPULSTARシリーズ又はFIRESTARシリーズのレーザ、いずれもTRUMPF社により製造されるTRUFLOWシリーズのレーザ（例えば、TRUFLOW 2000、2600、3000、3200、3600、4000、5000、6000、6000、8000、10000、12000、15000、20000）、TRUCOAXシリーズのレーザ（例えば、TRUCOAX 1000）又はTRUDISKシリーズ、TRUPULSEシリーズ、TRUDIODEシリーズ、TRUFIBERシリーズ、又はTRUMICROシリーズのレーザ、IMRA AMERICA社により製造されるFCPA μ JEWEL又はFEMTOLITEシリーズのレーザ、AMPLITUDE SYSTEMES社により製造されるTANGERINE及びSATSUMAシリーズのレーザ（及びMIKAN及びT-PULSEシリーズの発振器）、IPG PHOTONICS社により製造されるCLシリーズ、CLPFシリーズ、CLPNシリーズ、CLPNTシリーズ、CLTシリーズ、ELMシリーズ、ELPFシリーズ、ELPNシリーズ、ELPPシリーズ、ELRシリーズ、ELSシリーズ、FLPNシリーズ、FLPNTシリーズ、FLTシリーズ、GLPFシリーズ、GLPNシリーズ、GLRシリーズ、HLPNシリーズ、HLPPシリーズ、RFLシリーズ、TLMシリーズ、TLPNシリーズ、TLRシリーズ、ULPNシリーズ、ULRシリーズ、ULMシリーズ、VLMシリーズ、VLPNシリーズ、YLMシリーズ、YLPFシリーズ、YLPNシリーズ、YLPPシリーズ、YLRシリーズ、YLSシリーズ、FLPMシリーズ、FLPMTシリーズ、DLMシリーズ、BLMシリーズ、又はDLRシリーズのレーザ（例えば、GPLN-532-100-M、GPLN-532-200、GPLN-532-500、ULR/ULM-355-200などを含む）、又はこれに類するもの、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上のレーザ源が挙げられる。

10

20

30

40

50

【0031】

B. 第1のポジショナ

一般的に、第1のポジショナ106は、（例えば、1次角度範囲116内でビーム経路114を偏向することにより）X軸（又はX方向）、Y軸（又はY方向）、又はこれらを組み合わせたものによってビーム軸をワークピース102に対して移動できるようになっている。図示されていないが、Y軸（又はY方向）は、図示されたX軸（又はX方向）及びZ軸（又はZ方向）に直交する軸（又は方向）を意味するものと理解できるであろう。

【0032】

第1のポジショナ106により行われるワークピース102に対するビーム軸の移動は、スキャンレンズ112により投影される第1のスキャン領域内でプロセススポットをスキャン、移動、あるいは位置決めできるように概して限定されている。一般的に、第1のポジショナ106の構成、ビーム経路114に沿った第1のポジショナ106の位置、第1のポジショナ106に入射するレーザエネルギービームのビームサイズなどの1以上のファクタに応じて、第1のスキャン領域は、X方向又はY方向のいずれかにおいて、0.01mm、0.04mm、0.1mm、0.5mm、1.0mm、1.4mm、1.5mm、1.8mm、2mm、2.5mm、3.0mm、3.5mm、4.0mm、4.2mm、5mm、10mm、25mm、50mm、60mmなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値より短い距離、又はこれより長い距離、又はこれと等しい距離まで延びていてもよい。本明細書で使用される場合には、「ビームサイズ」という用語は、レーザエネルギービームの直径又は幅を意味し、ビーム軸から、光学強度がビーム経路114に沿った伝搬軸での光強度の $1/e^2$ にまで下がる場所までの半径方向距離又は横断距離として測定され得る。（例えば、X軸及びY軸を含む平面（本明細書では「XY平面」という）における）第1のスキャン領域の最大寸法は、ワークピース102に形成されるフィーチャ（例えば、開口、凹部、ビア、トレンチなど）の対応する最大寸法（XY平面で測定される）よりも大きくてもよく、あるいはこれと等しくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよい。

【0033】

一般的に、第1のポジショナ106は、AO偏向器（AOD）システムとして提供され、AO偏向器（AOD）システムは、結晶ゲルマニウム（Ge）、ガリウムヒ素（GaAs）、黄鉛鉱（ $PbMoO_4$ ）、二酸化テルル（ TeO_2 ）、水晶、ガラス状 SiO_2 、三硫化ヒ素（ As_2S_3 ）、ニオブ酸リチウム（ $LiNbO_3$ ）など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものなどの材料から形成されるAOセルを有する1以上のAODを含んでいる。一実施形態においては、AODシステムは、少なくとも1つの（例えば、1つ、2つ、3つ、4つ、5つ、6つなどの）単一素子AOD、少なくとも1つの（例えば、1つ、2つ、3つ、4つ、5つ、6つなどの）多素子AODなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを含んでいる。本明細書においては、AODを1つだけ含むAODシステムは「シングルセルAODシステム」と呼ばれ、1つよりも多くのAODを含むAODシステムは「マルチセルAODシステム」と呼ばれる。本明細書で使用される場合には、「単一素子」AODは、AOセルに音響的に連結された超音波変換素子を1つだけ備えたAODを意味し、「多素子」AODは、共通のAOセルに音響的に連結された超音波変換素子を2つ以上含んでいる。AODシステムは、ビーム経路114を対応する方法で偏向することにより（例えば、ビーム軸を単一の軸に沿って偏向可能な）単一軸AODシステムとして、あるいは（例えば、ビーム軸を1以上の軸に沿って、例えばX軸に沿って、あるいはY軸に沿って、あるいはこれらを任意に組み合わせた軸に沿って偏向可能な）多軸AODシステムとして提供され得る。一般的に、多軸AODシステムは、シングルセルAODシステム又はマルチセルAODシステムとして提供され得る。マルチセル多軸AODシステムは、典型的には、それぞれ異なる軸に沿ってビーム軸を偏向可能な複数のAODを含んでいる。例えば、マルチセル多軸システムは、1つの軸に沿って（例えばX軸に沿って）ビーム軸を偏向可能な第1のAOD（例えば、単一素子又は多素子AODシステム）と、第2の軸（例えばY軸に沿って）ビーム軸を偏向可能な第2のAOD（例えば、単一素子又は多素子AOD）とを含み得る。シングルセル多軸システムは、典型的には、2つの軸に沿って（例えばX軸及びY軸に沿って）ビーム軸を偏向可能な単一のAODを含ん

でいる。例えば、シングルセル多軸システムは、共通のAOセルの直交配置された平面、小面、側面などに音響的に連結された2つ以上の超音波変換素子を含み得る。

【0034】

当業者によって理解されるように、AO技術（例えば、AOD、AOMなど）は、（AODの「回折軸」に沿って）AOセルを伝搬する1以上の音波により生じる回折作用を利用して、（AOD内の「光軸」に沿って）AOセルを同時に伝搬する入射光波（すなわち、本出願の文脈においてはレーザエネルギービーム）を回折している。入射レーザエネルギービームを回折することにより、典型的にはゼロ次及び1次回折ピークを含み、さらに高次（例えば、2次、3次など）の他の回折ピークも含み得る回折模様が生じる。当該技術分野において知られているように、ゼロ次回折ピークにおいて回折されたレーザエネルギービームの部分は「ゼロ次」ビームと呼ばれ、1次回折ピークにおいて回折されたレーザエネルギービームの部分は「1次」ビームと呼ばれるなどする。概して、ゼロ次ビーム及びその他の次数のビーム（例えば1次ビームなど）は、（例えば、AOセルの光出力側を通して）AOセルから出ていくときに異なるビーム経路に沿って伝搬する。例えば、ゼロ次ビームは、ゼロ次ビーム経路に沿って伝搬し、1次ビームは、第1次ビーム経路に沿って伝搬するといったようである。

【0035】

音波は、典型的には、（例えば、第1のポジション106の1以上のドライバからの）RF駆動信号を超音波変換素子に印加することによりAOセルに入力される。（例えば、コントローラ122、構成要素固有のコントローラなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものにより出力される1以上の制御信号に基づいて）RF駆動信号の特性（例えば、振幅、周波数、位相など）を制御して、入射光波が回折される方法を調整することができる。例えば、与えられたRF駆動信号の周波数が、ビーム経路114が偏向される角度を決定する。当該技術分野において知られているように、ビーム経路114が偏向される角度 θ は、以下のように計算することができる。

【数1】

$$\theta = \frac{\lambda \cdot f}{v}$$

ここで、 λ はレーザエネルギービームの光波長（nmで測定される）、 f は印加RF駆動信号の周波数（Hzで測定される）、 v はAOセル内の音波の速度（m/sで測定される）である。印加RF駆動信号の周波数が複数の周波数から構成される場合には、ビーム経路114は同時に複数の角度で偏向される。

【0036】

AOセルから出る1次ビーム経路は、典型的には、AOセル内で回転あるいは偏向されたビーム経路114とみなすことができる。本明細書で特に示さない限り、AOセルから出るビーム経路114は1次ビーム経路に対応している。AOセルから出るビーム経路114が（例えば、AOセルに入射したときのビーム経路114に対して）回転される中心軸（本明細書では「回転軸」ともいう）は、AOセルの回折軸と入射レーザエネルギービームを回折するようにAODを動作又は駆動したときにAOセル内で入射レーザエネルギービームが伝搬する方向に沿った光軸との両方に直交する。このように、AODは、AOセルの回折軸とAOセル内の光軸とを含む（あるいは、そうでなければこれに略平行な）平面（本明細書では「偏向平面」ともいう）内で入射ビーム経路114を偏向する。本明細書では、AODが偏向平面内でビーム経路114を偏向できる空間的範囲は、そのAODの「スキャン領域」と呼ばれる。したがって、第1のポジション106の第1のスキャン領域は、（例えば、第1のポジション106が単一のAODを含む場合には）単一のAODのスキャン領域に対応すると考えることができ、（例えば、第1のポジション106が複数のAODを含む場合には）複数のAODの結合スキャン領域に対応すると考えることができる。

【0037】

第1のポジショナ106は、第1のポジショナ106がプロセススポットを第1のスキャン領域内の任意の位置に位置決め（し、これによりビーム軸を移動）する速度を意味する「第1の位置決め速度」を有するものとして特徴付けることができる。例えば、第1の位置決め速度は、8kHz、10kHz、20kHz、30kHz、40kHz、50kHz、75kHz、80kHz、100kHz、250kHz、500kHz、750kHz、1MHz、5MHz、10MHz、20MHz、40MHz、50MHz、75MHz、100MHz、125MHz、150MHz、175MHz、200MHz、225MHz、250MHzなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値よりも大きくてもよく、あるいはこれ以下であってもよい。本明細書において、この範囲は、第1の位置決め帯域幅とも呼ばれる。第1のポジショナ106の動作中、RF駆動信号を繰り返し第1のポジショナ106の1以上の超音波変換器に与え、第1の位置決め帯域幅は、RF駆動信号が与えられる速度に対応する（例えば、これに等しい、あるいは少なくとも実質的に等しい）。RF駆動信号が与えられる速度は「更新速度」又は「リフレッシュ速度」とも呼ばれる。本明細書において、第1の位置決め速度の逆数は「第1の位置決め期間」と呼ばれ、プロセススポットの位置が第1のスキャン領域内のある場所から第1のスキャン領域内の別の場所まで変化するまでにかかる最短時間を意味する。このため、第1のポジショナ106は、200 μ s、125 μ s、100 μ s、50 μ s、33 μ s、25 μ s、20 μ s、15 μ s、13.3 μ s、12.5 μ s、10 μ s、4 μ s、2 μ s、1.3 μ s、1 μ s、0.2 μ s、0.1 μ s、0.05 μ s、0.025 μ s、0.02 μ s、0.013 μ s、0.01 μ s、0.008 μ s、0.0067 μ s、0.0057 μ s、0.0044 μ s、0.004 μ sなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値よりも長い、あるいはこれ以下の第1の位置決め期間を有するものとして特徴付けることができる。

【0038】

AOセルを形成する材料は、AOセルに入射するようにビーム経路114に沿って伝搬するレーザエネルギーの波長に依存することは理解できるであろう。例えば、偏向されるレーザエネルギーの波長が2 μ m（又はその前後）から20 μ m（又はその前後）の範囲にある場合には、結晶ゲルマニウムのような材料を用いることができ、偏向されるレーザエネルギーの波長が1 μ m（又はその前後）から11 μ m（又はその前後）の範囲にある場合には、ガリウムヒ素や三硫化ヒ素のような材料を用いることができ、偏向されるレーザエネルギーの波長が200nm（又はその前後）から5 μ m（又はその前後）の範囲にある場合には、ガラス状SiO₂、石英、ニオブ酸リチウム、黄鉛鉱、及び二酸化テルルのような材料を用いることができる。

【0039】

レーザ源104により出力されるレーザエネルギービームが一連のレーザパルスとして表される場合には、1次角度範囲116内の異なる角度でビーム経路114を変更するように第1のポジショナ106を動作させることができる。一実施形態においては、第1の位置決め期間は、レーザパルスのそれぞれのパルス持続時間以上である。したがって、AODが固定RF駆動周波数（又は1組の固定RF駆動周波数）で駆動されているときに、レーザパルスがAODのAOセルを透過する。レーザパルスがAODのAOセルを透過しているときに、AODに与える固定RF駆動周波数（又は1組の固定RF駆動周波数）を維持することにより、一般的に、レーザパルスの全パルス持続時間にわたってレーザパルスを均一に偏向することができ、このために「全パルス偏向」とも呼ばれることがある。しかしながら、他の実施形態においては、第1の位置決め期間は、レーザパルスのパルス持続時間よりも短い場合があり、このため、RF駆動周波数（又は1組のRF駆動周波数内の周波数）を変化させているときに、レーザパルスがAODのAOセルを透過することができる。レーザパルスがAODのAOセルを透過するときにAODに与えるRF駆動周波数を変化させることにより、レーザパルスを時間的に分割することができ、このために「部分パルス偏向」又は「パルススライシング」とも呼ばれることがある。パルススライシングの側面は、以下でより詳細に述べられる。本明細書では、レーザパルスを時間的に分割するためにパルススライシングの手法が適用されているが、連続又は準連続レーザビームとして表されるレーザエネルギービームを時間的に分割するためにこれらの手法が同様に適用され得ることは理解できるであろう。

【0040】

C. 第2のポジションナ

一般的に、第2のポジションナ108は、（例えば、2次角度範囲118内でビーム経路114を偏向することにより）ワークピース102に対してビーム軸をX軸（又はX方向）、Y軸（又はY方向）、又はこれらの組み合わせたものに沿って移動させることが可能である。

【0041】

第2のポジションナ108により行われるワークピース102に対するビーム軸の移動は、スキャンレンズ112により投影される第2のスキャン領域内でプロセススポットをスキャン、移動、あるいは位置決めできるように概して限定されている。一般的に、第2のポジションナ108の構成、ビーム経路114に沿った第2のポジションナ108の位置、第2のポジションナ108に入射するレーザエネルギービームのビームサイズ、スポットサイズなどの1以上のファクタに応じて、第2のスキャン領域は、X方向又はY方向のいずれかにおいて、第1のスキャン領域の対応する距離よりも長い距離まで延びていてもよい。上記の観点から、第2のスキャン領域は、X方向又はY方向のいずれかにおいて、1mm、25mm、50mm、75mm、100mm、250mm、500mm、750mm、1cm、25cm、50cm、75cm、1m、1.25m、1.5mなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値より短い距離、又はこれより長い距離、又はこれと等しい距離まで延びていてもよい。（例えば、XY平面における）第2のスキャン領域の最大寸法は、ワークピース102に形成されるフィーチャ（例えば、開口、凹部、ビア、トレンチ、スクライブライン、導電トレースなど）の（XY平面において測定される）最大寸法よりも大きくてもよく、これと等しくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよい。

【0042】

本明細書で述べられる構成の観点においては、第1のポジションナ106により行われるビーム軸の移動を第2のポジションナ108により行われるビーム軸の移動に重ね合わせることができる。このため、第2のポジションナ108は、第2のスキャン領域内で第1のスキャン領域をスキャンすることができる。

【0043】

一般的に、第2のポジションナ108が第2のスキャン領域内の任意の位置にプロセススポットを位置決め（これにより第2のスキャン領域内でビーム軸を移動、さらに／あるいは第2のスキャン領域内で第1のスキャン領域をスキャン）できる位置決め速度は、第1の位置決め帯域幅よりも小さい範囲（本明細書では「第2の位置決め帯域幅」ともいう）に及ぶものである。一実施形態においては、第2の位置決め帯域幅は、500Hz（又はその前後）から8kHz（又はその前後）の範囲にある。例えば、第2の位置決め帯域幅は、500Hz、750Hz、1kHz、1.25kHz、1.5kHz、1.75kHz、2kHz、2.5kHz、3kHz、3.5kHz、4kHz、4.5kHz、5kHz、5.5kHz、6kHz、6.5kHz、7kHz、7.5kHz、8kHzなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値よりも高くてもよく、あるいはこれと等しくてもよく、あるいはこれより低くてもよい。

【0044】

一実施形態においては、第2のポジションナ108は、2つのガルバノメータミラーコンポーネント、すなわち、ワークピース102に対してビーム軸をX軸に沿って移動させるように構成される第1のガルバノメータミラーコンポーネント（例えばX軸ガルバノメータミラーコンポーネント）と、ワークピース102に対してビーム軸をY軸に沿って移動させるように構成される第2のガルバノメータミラーコンポーネント（例えばY軸ガルバノメータミラーコンポーネント）とを含むガルバノメータミラーシステムとして提供され得る。しかしながら、他の実施形態においては、第2のポジションナ108は、ワークピース102に対してビーム軸をX軸及びY軸に沿って移動させるように構成される単一のガルバノメータミラーコンポーネントのみを含むガルバノメータミラーシステムとして提供されてもよい。さらに他の実施形態においては、第2のポジションナ108は、回転多面鏡システムなどとして提供されてもよい。このように、第2のポジションナ108及び第1のポジションナ106の特定の構成に応じて、第2の位置決め帯域幅は第1の位置決め帯域幅より大きい、これと等しくてもよいことは理解できるであろう。

【0045】

D. 第3のポジショナ

第3のポジショナ110は、スキャンレンズ112に対してワークピース102（例えばワークピース102a及び102b）を移動させ、その結果、ビーム軸に対してワークピース102を移動させることができる。ビーム軸に対するワークピース102の移動は、第3のスキャン領域内でプロセススポットをスキャン、移動、あるいは位置決めできるように概して限定されている。第3のポジショナ110の構成のような1以上のファクタに応じて、第3のスキャン領域は、X方向、Y方向、あるいはこれらを任意に組み合わせた方向において、第2のスキャン領域の対応する距離よりも長い距離又はこれと等しい距離まで延びていてもよい。しかしながら、一般的に、（例えば、XY平面における）第3のスキャン領域の最大寸法は、ワークピース102に形成されるフィーチャの（XY平面において測定される）対応する最大寸法よりも大きいか、これと等しい。必要に応じて、第3のポジショナ110は、（例えば、1mmから50mmの範囲にわたって）Z方向に延びるスキャン領域内でビーム軸に対してワークピース102を移動可能であってもよい。このように、第3のスキャン領域は、X方向、Y方向、及び／又はZ方向に沿って延びていてもよい。

【0046】

本明細書で述べられる構成の観点においては、（例えば、第1のポジショナ106及び／又は第2のポジショナ108により行われる）ワークピース102に対するプロセススポットの移動を第3のポジショナ110により行われるワークピース102の移動に重ね合わせることができることは理解すべきである。このため、第3のポジショナ110は、第3のスキャン領域内で第1のスキャン領域及び／又は第2のスキャン領域をスキャンすることができる。一般的に、第3のポジショナ110が第3のスキャン領域内の任意の位置にワークピース102を位置決め（これによりワークピース102を移動し、第3のスキャン領域内で第1のスキャン領域をスキャンし、さらに／あるいは第3のスキャン領域内で第2のスキャン領域をスキャン）できる位置決め速度は、第2の位置決め帯域幅よりも小さい範囲（本明細書では「第3の位置決め帯域幅」ともいう）に及ぶものである。一実施形態においては、第3の位置決め帯域幅は500Hz（又はその前後）未満である。例えば、第3の位置決め帯域幅は、500Hz、250Hz、150Hz、100Hz、75Hz、50Hz、25Hz、10Hz、7.5Hz、5Hz、2.5Hz、2Hz、1.5Hz、1Hzなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値と等しくてもよく、これよりも低くてもよい。

【0047】

一実施形態においては、第3のポジショナ110は、（例えば、それぞれワークピース102にX方向、Y方向、及び／又はZ方向に沿った並進移動を与えることができる）1以上の直動ステージ、（例えば、それぞれワークピース102にX方向、Y方向、及び／又はZ方向に平行な軸を中心とした回転移動を与えることができる）1以上の回転ステージなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものとして提供される。一実施形態においては、第3のポジショナ110は、ワークピース102をX方向に沿って移動するためのXステージと、Xステージにより支持され（これによりXステージによりX方向に沿って移動可能となる）、ワークピース102をY方向に沿って移動するためのYステージとを含んでいる。

【0048】

これまで述べたように、装置100は、第3のポジショナ110として、いわゆる「スタック型」位置決めシステムを使用し得る。この「スタック型」位置決めシステムは、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、スキャンレンズ112などのワークピース以外の構成要素の位置をワークピース102に対して（例えば、当該技術分野において知られているような1以上の支持部、フレームなどを介して）装置100内で静止させつつ、ワークピース102を移動可能とするものである。他の実施形態においては、第3のポジショナ110は、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、スキャンレンズ112など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上の構成要素を移動するように配置し、動作させてもよく、ワークピース102を静止させておいてもよい。

【0049】

さらに他の実施形態においては、第3のポジショナ110は、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、スキャンレンズ112など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上の構成要素が（例えば、フレームやガントリなどに搭載された）1以上の直動又は回転ステージにより搬送され、ワークピース102が1以上の他の直動又は回転ステージにより搬送される、いわゆる「分割軸」位置決めシステムとして提供され得る。そのような実施形態においては、第3のポジショナ110は、（例えば、第2のポジショナ108及びスキャンレンズ112を含む）スキャンヘッドのような1以上の構成要素を移動するように配置され、動作可能な1以上の直動又は回転ステージと、ワークピース102を移動するように配置され、動作可能な1以上の直動又は回転ステージとを含んでいる。例えば、第3のポジショナ110は、Y方向に沿ってワークピース102を移動させるYステージと、X方向に沿ってスキャンヘッドを移動させるXステージとを含んでいてもよい。装置100において有益に又は都合良く利用され得る分割軸位置決めシステムの例としては、米国特許第5,751,585号、第5,798,927号、第5,847,960号、第6,606,999号、第7,605,343号、第8,680,430号、第8,847,113号において、あるいは米国特許出願公開第2014/0083983号において開示されているもののいずれか、あるいはこれらを任意に組み合わせたものが挙げられる。これらの文献のそれぞれはその全体が参照により本明細書に組み込まれる。

【0050】

第3のポジショナ110がZステージを含む一実施形態においては、Zステージは、ワークピース102をZ方向に沿って移動させるように配置及び構成され得る。この場合において、Zステージは、ワークピース102を移動又は位置決めするための上述した他のステージのうち1つ以上により搬送されてもよく、あるいは、ワークピース102を移動又は位置決めするための上述した他のステージのうち1つ以上を搬送してもよく、あるいはこれらを任意に組み合わせてもよい。第3のポジショナ110がZステージを含む他の実施形態においては、Zステージは、スキャンヘッドをZ方向に沿って移動させるように配置及び構成され得る。このように、第3のポジショナ110が分割軸位置決めシステムとして提供される場合には、ZステージはXステージを搬送してもよいし、あるいはXステージにより搬送されてもよい。ワークピース102又はスキャンヘッドをZ方向に沿って移動させることにより、ワークピース102でのスポットサイズを変化させることができる。

【0051】

さらに他の実施形態においては、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、スキャンレンズ112などの1以上の構成要素は、多軸関節ロボットアーム（例えば、2軸、3軸、4軸、5軸、又は6軸アーム）により搬送され得る。そのような実施形態においては、第2のポジショナ108及び／又はスキャンレンズ112は、必要に応じて、ロボットアームのエンドエフェクタにより搬送され得る。さらに他の実施形態においては、ワークピース102は、多軸関節ロボットアームのエンドエフェクタ上で直接（すなわち第3のポジショナ110なしで）搬送され得る。さらに他の実施形態においては、第3のポジショナ110は、多軸関節ロボットアームのエンドエフェクタ上で搬送され得る。

【0052】

E. スキャンレンズ

概して、（例えば、単純なレンズ又は複合レンズのいずれかとして提供される）スキャンレンズ112は、典型的には、所望のプロセススポット又はその近傍に位置し得るビームウェストを生成するようにビーム経路に沿って方向付けられたレーザエネルギービームの焦点を合わせるように構成されている。スキャンレンズ112は、fシータレンズ、テレセントリックレンズ、アキシコンレンズ（その場合には、一連のビームウェストが生成され、ビーム軸に沿って互いにずれた複数のプロセススポットが生じる）など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものとして提供され得る。スキャンレンズ112は、（図示されるような）非テレセントリックレンズfシータレンズ、テレセントリックレンズ、アキシコンレンズ（その場合には、一連のビームウェストが生成され、ビーム軸に沿って互いにずれた複数のプロセススポットが生じる）など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの

として提供され得る。

【0053】

一実施形態においては、スキャンレンズ112は、固定焦点距離レンズとして提供され、（例えば、ビームウェストの位置をビーム軸に沿って変化させるように）スキャンレンズ112を移動可能なスキャンレンズポジショナ（例えば、図示しないレンズアクチュエータ）に連結される。例えば、レンズアクチュエータは、Z方向に沿ってスキャンレンズ112を直線的に並進可能なボイスコイルとして提供され得る。この場合において、スキャンレンズ112は、溶融シリカ、光学ガラス、セレン化亜鉛、硫化亜鉛、ゲルマニウム、ガリウムヒ素、フッ化マグネシウムなどの材料から形成されていてもよい。他の実施形態においては、スキャンレンズ112は、ビーム軸に沿ってビームウェストの位置を変化させるために（例えばレンズアクチュエータを介して）作動され得る可変焦点距離レンズ（例えば、ズームレンズ、又はCOGNEX社、VARIOPTIC社などにより現在提供されている技術を組み込んだ、いわゆる「液体レンズ」など）として提供される。ビーム軸に沿ってビームウェストの位置を変化させることにより、ワークピース102でのスポットサイズを変化させることができる。

10

【0054】

装置100がレンズアクチュエータを含む実施形態においては、レンズアクチュエータは、（例えば、スキャンヘッド内で第2のポジショナ108に対してスキャンレンズ112を移動可能とするように）スキャンレンズ112に連結されていてもよい。あるいは、レンズアクチュエータは、（例えば、スキャンレンズ112及び第2のポジショナ108と一緒に移動する場合には、スキャンヘッド自体を移動可能とするように）スキャンヘッド120に連結されていてもよい。他の実施形態においては、スキャンレンズ112及び第2のポジショナ108は、（例えば、スキャンレンズ112が一体化されるハウジングが第2のポジショナ108が一体化されるハウジングに対して移動可能となるように）異なるハウジングに一体化される。

20

【0055】

F. コントローラ

一般的に、装置100は、装置100の制御及び動作を制御又は促進するためのコントローラ122のような1以上のコントローラを含んでいる。一実施形態においては、コントローラ122は、レーザ源104、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、第3のポジショナ110、レンズアクチュエータ、（可変焦点距離レンズとして提供される場合には）スキャンレンズ112、固定具などの装置100の1以上の構成要素と（例えば、USB、RS-232、Ethernet、Firewire、Wi-Fi、RFID、NFC、Bluetooth、Li-Fi、SERCOS、MARC0、EtherCATなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上の有線又は無線のシリアル又はパラレル通信リンクを介して）通信可能に連結されており、これにより、これらの構成要素が、コントローラ122により出力された1以上の制御信号に応答して動作するようになっている。

30

【0056】

例えば、コントローラ122は、ビーム軸とワークピースとの間で相対移動を行い、ワークピース102内で経路又は軌跡（本明細書においては「プロセス軌跡」とも呼ばれる）に沿ってプロセススポットとワークピース102との間で相対運動を生じさせるように第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、又は第3のポジショナ110、あるいはこれらを任意に組み合わせたものの動作を制御し得る。これらのポジショナのうち任意の2つ、又はこれらのうちの3つすべてが、2つのポジショナ（例えば、第1のポジショナ106及び第2のポジショナ108、第1のポジショナ106及び第3のポジショナ110、第2のポジショナ108及び第3のポジショナ110）又は3つのポジショナが同時にプロセススポットとワークピース102との間で相対移動を生じさせる（これにより、ビーム軸とワークピースとの間で「複合相対移動」を生じさせる）ように制御されてもよいことは理解できるであろう。もちろん、任意の時点で、プロセススポットとワークピース102との間で相対移動を生じさせる（これにより、ビーム軸とワークピースとの間で「非複合相対移動」を生じ

40

50

させる)ように1つのポジショナ(例えば、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108又は第3のポジショナ110)だけを制御することも可能である。

【0057】

一実施形態においては、コントローラ122は、ワークピース102内のプロセス軌跡に沿ってプロセススポットとワークピース102との間で相対移動を生じさせるように、ビーム軸とそれぞれのワークピース102との間で(例えば、第2のポジショナ108と連携した、あるいは第3のポジショナ110と連携した、あるいはこれらを任意に組み合わせたものと連携した)複合相対移動又は非複合相対移動を生じさせる方法で1次角度範囲116内でビーム経路114を偏向するように第1のポジショナ106の動作を制御し得る。他の実施形態においては、コントローラ122は、第2のポジショナ108により導入されたトラッキング誤差を補償する方法でそれぞれの1次角度範囲116内でビーム経路114を偏向するように第1のポジショナ106の動作を制御し得る。

【0058】

上述した構成要素のうち1つ以上に行わせるように制御可能な動作の他の例としては、上述した米国特許第5,751,585号、第5,847,960号、第6,606,999号、第8,680,430号、第8,847,113号において開示されているような、あるいは、米国特許第4,912,487号、第5,633,747号、第5,638,267号、第5,917,300号、第6,314,463号、第6,430,465号、第6,600,600号、第6,606,998号、第6,816,294号、第6,947,454号、第7,019,891号、第7,027,199号、第7,133,182号、第7,133,186号、第7,133,187号、第7,133,188号、第7,244,906号、第7,245,412号、第7,259,354号、第7,611,745号、第7,834,293号、第8,026,158号、第8,076,605号、第8,288,679号、第8,404,998号、第8,497,450号、第8,648,277号、第8,896,909号、第8,928,853号、第9,259,802号において開示されているような、あるいは米国特許出願公開第2014/0026351号、第2014/0196140号、第2014/0263201号、第2014/0263212号、第2014/0263223号、第2014/0312013号において、あるいはドイツ連邦特許第DE102013201968B4号において、あるいは国際特許公開第W02009/087392号において、あるいはこれらを任意に組み合わせたものにおいて開示されているような動作、機能、プロセス、及び方法などが挙げられる。これらの文献のそれぞれは、その全体が参照により本明細書に組み込まれる。他の例においては、コントローラ122は、例えば、国際特許公開第W02017/044646A1号に開示されているように、(例えば、1以上のAODの1以上の超音波変換素子に印加されるRF信号をチャージングすることにより、1以上のAODの1以上の超音波変換素子にスペクトル整形されたRF信号を印加することにより、あるいはこれに類する方法により、あるいはこれらを任意に組み合わせた方法により)プロセススポットに照射されるレーザエネルギービームのスポット形状又はスポットサイズを変化させるための1以上のAOD(例えば、ある実施形態においては、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、又はそれらの組み合わせ)を含む任意のポジショナの動作を制御し得る。上記公報は、その全体が参照により本明細書に組み込まれる。印加されたRF信号は、所望の又は好適な方法により線形的に又は非線形的にチャージされていてよい。例えば、印加されたRF信号は、第1の速度でチャージされ、その後第2の速度でチャージされて、AOセルを通過するレーザエネルギービームを2つの異なる方法によって回折してもよい。この場合において、第1の速度は、第2の速度よりも遅くてもよいし、速くてもよい。

【0059】

一般的に、コントローラ122は、命令を実行する際に上述した制御信号を生成するように動作可能な1以上のプロセッサを含んでいる。プロセッサは、命令を実行するように動作可能なプログラマブルプロセッサ(例えば、1以上の汎用コンピュータプロセッサ、マイクロプロセッサ、デジタル信号プロセッサなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを含む)として提供され得る。プロセッサにより実行可能な命令は、ソフトウェア、ファームウェアなど、あるいは、プログラマブルロジックデバイス(PLD)、フィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)、フィールドプログラマブルオブジェクトアレイ(FPOA)、特定用途向け集積回路(ASIC)を含む(デジタル回路、アナログ回路、アナ

10

20

30

40

50

ログ／デジタル混合回路を含む）好適な形態の回路など、あるいはこれらを任意に組み合わせて実現され得る。命令の実行は、1つのプロセッサ上で行ってもよく、複数のプロセッサに分散させてもよく、1つのデバイス内又はデバイスのネットワークにわたる複数のプロセッサにわたって並行に行っても、あるいはこれに類する方法でも、あるいはこれらを任意に組み合わせて行ってもよい。

【0060】

一実施形態においては、コントローラ122は、（例えば、1以上の有線又は無線通信リンクを介して）プロセッサによりアクセス可能なコンピュータメモリのような有形媒体を含んでいる。本明細書で使用される場合には、「コンピュータメモリ」は、磁気媒体（例えば、磁気テープ、ハードディスクドライブなど）、光学ディスク、揮発性又は不揮発性半導体メモリ（例えば、RAM、ROM、NAND型フラッシュメモリ、NOR型フラッシュメモリ、SONOSメモリなど）などを含んでおり、ローカルアクセス可能なもの、又は（例えばネットワークを通じて）遠隔アクセス可能なもの、又はこれらを組み合わせたものであってもよい。一般的に、命令は、コンピュータソフトウェア（例えば、実行コード、ファイル、命令など、ライブラリファイルなど）として格納され得る。そのようなコンピュータソフトウェアは、例えば、C、C++、Visual Basic、Java、Python、Tel、Perl、Scheme、Ruby、アセンブリ言語、ハードウェア記述言語（例えば、VHDL、VERILOGなど）などによって書かれ、当業者によって本明細書で述べられた説明から簡単に作成することができる。コンピュータソフトウェアは、通常、コンピュータメモリにより伝達される1以上のデータ構造に格納される。

【0061】

図示はされていないが、1以上のドライバ（例えば、RFドライバ、サーボドライバ、ラインドライバ、電源など）が、レーザ源104、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、第3のポジショナ110、レンズアクチュエータ、（可変焦点距離レンズとして提供される場合には）スキャンレンズ112などのような1以上の構成要素を制御するためにそのような構成要素の入力と通信可能に連結され得る。したがって、レーザ源104、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、第3のポジショナ110、レンズアクチュエータ、（可変焦点距離レンズとして提供される場合には）スキャンレンズ112などのような1以上の構成要素も、当該技術分野において知られているような任意の好適なドライバを含んでいると考えることができる。それぞれのドライバは、典型的には、コントローラ122が通信可能に連結される入力を含んでおり、コントローラ122は1以上の制御信号（例えばトリガ信号など）を生成可能となっている。この制御信号は、装置100の1以上の構成要素に関連付けられた1以上のドライバの入力に送信され得る。このように、レーザ源104、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、第3のポジショナ110、レンズアクチュエータ、（可変焦点距離レンズとして提供される場合には）スキャンレンズ112などの構成要素は、コントローラ122により生成された制御信号に応答するようになっている。

【0062】

図示はされていないが、1以上の付加的なコントローラ（例えば、構成要素固有のコントローラ）が、必要に応じて、レーザ源104、第1のポジショナ106、第2のポジショナ108、第3のポジショナ110、レンズアクチュエータ、（可変焦点距離レンズとして提供される場合には）スキャンレンズ112などの構成要素と通信可能に連結された（そして当該構成要素に関連付けられた）ドライバの入力と通信可能に連結され得る。この実施形態において、それぞれの構成要素固有のコントローラは、コントローラ122と通信可能に連結され、コントローラ122から受信した1以上の制御信号に応答して1以上の制御信号（例えばトリガ信号など）を生成可能であってもよい。この1以上の制御信号は、その後、これと通信可能に連結されたドライバの入力に送信され得る。この実施形態において、構成要素固有のコントローラは、コントローラ122に関して述べたのと同様に動作可能となってもよい。

【0063】

1以上の構成要素固有のコントローラが設けられる他の実施形態においては、ある構成要素（例えばレーザ源104）に関連付けられた構成要素固有のコントローラは、ある構成要素（例えば第1のポジショナ106など）に関連付けられた構成要素固有のコントローラと通信可能に連結され得る。この実施形態においては、構成要素固有のコントローラのうち1つ以上が、1以上の他の構成要素固有のコントローラから受信した1以上の制御信号に応答して、1以上の制御信号（例えばトリガ信号など）を生成可能である。

【0064】

III. 多軸AODシステムに関する追加の議論

本明細書で述べられる多くの実施形態においては、第1のポジショナ106は、多軸AODシステムとして提供される。AODシステム内でのAODの構成に応じて、AODは、縦モードAOD又は剪断モードAODとして特徴付けることができ、直線偏光又は円偏光されたレーザエネルギービームを回折できるようになっていてもよい。このように、レーザエネルギービームの波長に応じて、またAODシステム中のAODのAOセルを形成する材料に応じて、AOD内のAOセルの回折軸がこれに入射するレーザエネルギービームの偏光面に平行又は垂直（あるいは少なくとも実質的に平行又は垂直）となるように内部のAODを方向付けることができる。例えば、レーザエネルギービームの波長は、電磁波スペクトルの紫外線域又は可視緑光域にあり、AODのAOセルは、石英のような材料から形成され、AOセルの回折軸が入射したレーザエネルギービームの偏光面に垂直（又は少なくとも実質的に垂直）になるようにAODを方向付けることができる。他の例においては、レーザエネルギービームの波長がいわゆる電磁波スペクトルの中波長赤外域又は長波長赤外域（すなわち、3 μm （又はその前後）から15 μm （又はその前後）の範囲にわたる波長）にあり、AODのAOセルが結晶ゲルマニウムのような材料から形成される場合には、AOセルの回折軸が入射したレーザエネルギービームの偏光面に平行（又は少なくとも実質的に平行）になるようにAODを方向付けることができる。

【0065】

図2に関して、多軸AODシステムは、第1のAOD202及び第2のAOD204を含むマルチセル多軸AODシステム200として提供されてもよい。第1のAOD202及び第2のAOD204のいずれも上述した方法により提供され得る。第1のAOD202は、（例えば、ビーム経路114に沿って伝搬する）入射レーザエネルギービームを第1の回転軸を中心として第1の角度範囲（本明細書では「第1のAOD角度範囲206」ともいう）内で任意の角度（例えば、第1のAOD202に入射するビーム経路114に対して測定される）だけ回転させて、偏向されたビーム経路114'に沿って伝搬する1次ビームを透過させるように配置され、動作できるようになっている。同様に、第2のAOD204は、第1のAOD202を透過した入射レーザエネルギービームを第2の回転軸を中心として第2の角度範囲（本明細では「第2のAOD角度範囲208」ともいう）内で任意の角度（例えば、第2のAOD204に入射するビーム経路114'に対して測定される）だけ回転させて、偏向されたビーム経路114''に沿って伝搬する1次ビームを透過させるように配置され、動作できるようになっている。理解できるように、ビーム経路114'及びビーム経路114''のそれぞれは、レーザエネルギービームが伝搬可能な経路の特定の例を表している。したがって、本明細書では、ビーム経路114'及びビーム経路114''のそれぞれを総称して「ビーム経路114」ということもできる。

【0066】

一般的に、第2のAOD204は、第2の回転軸が第1の回転軸と異なったものとなるように第1のAOD202に対して方向付けられる。例えば、第2の回転軸は、第1の回転軸に直交していてもよく、あるいは第1の回転軸に対して斜めになっていてもよい。AODの回折軸がAODの回転軸に直交する場合には、第2のAOD204の回折軸（「第2の回折軸」とも呼ばれる）は、第1のAOD202の回折軸（「第1の回折軸」とも呼ばれる）に対して直交するか、あるいは第1のAOD202の回折軸に対して斜めになり得る。しかしながら、他の実施形態においては、第2のAOD204は、第2の回転軸が第1の回転軸に平行（又は少なくとも実質的に平行）となるように第1のAOD202に対して方向付けられる。この場合において、第2のAOD204上に投影した場合に第1のAOD202の偏向平面が第2のAOD204

の偏向平面の方向に対して（例えば、90度又はその前後）回転するように、また、第2の回折軸が第1の回折軸に平行（又は少なくとも実質的に平行）となるように第1のAOD202の偏向平面を（例えば、90度又はその前後だけ）回転させるように1以上の光学的構成要素をビーム経路114'に配置することができる。例えば、上述したように偏向平面を回転させ得る方法の例に関して、国際公開第WO2019/060590A1を参照されたい。上述した方法により第1のAOD202の偏向平面を回転される際に、第2のAOD204上に投影した第1の回折軸が、第2の回折軸の方向に対して（例えば、90度又はその前後）回転される。

【0067】

一般的に、第1のAOD202内のAOセルは、第2のAOD204内のAOセルと同一か、あるいはこれと異なり得る材料から形成されている。さらに、第1のAOD202が入射レーザーエネルギービームを偏光するために使用する音波の種類は、第2のAOD204が入射レーザーエネルギービームを偏光するために使用する音波の種類と同じであってもよいし、あるいはこれと異なってもよい。

【0068】

第1のAOD202だけが1次ビームを生成し、あるいは第2のAOD204だけが1次ビームを生成し、あるいは第1のAOD202と第2のAOD204の両方が1次ビームを生成するように、任意の時点でAODシステム200を動作させてもよいことは理解できるであろう。したがって、第1のポジション106により生じたビーム経路114の偏向は、ビーム経路114'から得られる偏向のみから生じるものと、あるいはビーム経路114"から得られる偏向のみから生じるものと、あるいはビーム経路114'及び114"から得られる偏向の重ね合わせから生じるものと考えることができる。同様に、1次角度範囲116は、第1のAOD角度範囲206のみである、あるいは第2のAOD角度範囲208のみである、あるいは第1のAOD角度範囲206と第2のAOD角度範囲208の重ね合わせであると考えることができる。第1のポジション106がAODシステム200のようなAODシステムとして提供される場合、第1のポジション106は、必要に応じて、ビームトラップ、ビームエキスパンダ、ビーム整形器、アパーチャ、フィルタ、コリメータ、レンズ、ミラー、位相リターダ、偏光器など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上の他の付加的な光学的構成要素を含み得る。

【0069】

IV. AODシステムにおける回折効率に関する議論

本明細書で使用される場合には、「回折効率」という用語は、AODに入射するレーザーエネルギービームにおいてAODのAOセル内で1次ビームに回折されるエネルギーの割合を意味する。このため、回折効率は、AODに入射する入射レーザーエネルギービームの光パワーに対するAODにより生成された1次ビームの光パワーの比として表され得る。一般的に、印加RF駆動信号の振幅は、AODの回折効率に対して非線形効果を与えることがあり、AODの回折効率は、AODを駆動するために印加されるRF駆動信号の周波数の関数としても変化し得る。上記の観点から、第1のポジション106が上述したAODシステム200として提供される実施形態においては、第1のAOD202を駆動するために印加される第1のRF駆動信号は、ある振幅（本明細書では「第1の振幅」ともいう）を有するものとして特徴付けることができ、第2のAOD204を駆動するために印加される第2のRF駆動信号は、ある振幅（本明細書では「第2の振幅」ともいう）を有するものとして特徴付けることができる。

【0070】

一般的に、第1の振幅は、第1のRF駆動信号の第1の駆動周波数、第1のRF駆動信号によって第1のAOD202を駆動するときの所望の回折効率、第1のRF駆動信号によって第1のAOD202が駆動される期間中に偏向されるレーザーエネルギービームのピーク光パワー、第1のRF駆動信号によって第1のAOD202が駆動される期間中に偏向されるレーザーエネルギービームの平均光パワーなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上のファクタに基づいて選択あるいは設定され得る。同様に、第2の振幅は、第2のRF駆動信号の第2の駆動周波数、第2のRF駆動信号によって第2のAOD204を駆動するときの

所望の回折効率、第2のRF駆動信号によって第2のAOD204が駆動される期間中に偏向されるレーザエネルギービームのピーク光パワー、第2のRF駆動信号によって第2のAOD204が駆動される期間中に偏向されるレーザエネルギービームの平均光パワーなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上のファクタに基づいて選択あるいは設定され得る。

【0071】

V. パルススライシングに関する実施形態

上述したように、第1のポジション106が単一軸AODシステム又は（AODシステム200のような）多軸AODシステムとして提供されているかどうかを問わず、パルススライシングを行うように、すなわち、共通のレーザパルス（本明細書では「マザーレーザパルス」ともいう）を少なくとも2つのレーザパルスに時間的に分割するように第1のポジション106を動作させることができる。理解されるように、パルススライスはレーザパルス

10

【0072】

パルススライシングの一実施形態は図3に例示的に示されており、ここではマザーレーザパルス300が2つのパルススライスに時間的に分割されている。具体的には、第1のスライス期間p1中にマザーレーザパルス300が第1のパルススライス300aに分割され、第2のスライス期間p2中にマザーレーザパルス300が第2のパルススライス300bに分割される。理解されるように、パルススライスのパルス持続時間は、一般的に、そのマザーレーザパルスから時間的に分割されたスライス期間の長さに対応している。このため、例えば、第1のパルススライス300aは、第1のスライス期間p1に等しいパルス持続時間を有するものとして特徴付けることができ、第2のパルススライス300bは、第2のスライス期間p2に等しいパルス持続時間を有するものとして特徴付けることができる。さらに、理解されるように、パルススライスのパルス持続時間は、パルススライシング中の第1のポジション106の更新速度、パルススライシング中の第1のポジション106の更新速度の整数倍、又はこれらの組み合わせに対応し得る（例えば、これに等しいか、あるいは少なくとも実質的に等しい）。

20

【0073】

順番に続くスライス期間は、連続的に生じてよいし（すなわち、あるスライス期間は先行するスライス期間の直後に始まる）、あるいは間欠的に生じてよいし（すなわち、あるスライス期間は先行するスライス期間の直後の遅延の後に始まる）、あるいはこれらを組み合わせたものであってもよい。順番に続くスライス期間が間欠的に生じる場合には、遅延の長さは、第1のポジション106の位置決め期間の整数倍（この整数は、1、2、3、4、5、10、20、50、100など、あるいはこれらの間にある値のような任意の整数であり得る。）として特徴付けることができることは理解できるであろう。図3に示される実施形態は、順番に続くスライス期間p1とp2とが間欠的に生じる例である。上記観点から、AODシステム200により出力されるパルススライスは、パルススライシングを行うようにシステム200を動作させた際のAODシステム200の更新速度と等しいか、その倍数であるパルス繰り返し率を有するレーザエネルギービームを構成することができることは理解できるであろう。

30

40

【0074】

最初のスライス期間の開始から最後のスライス期間の終了まで共通のマザーレーザパルスに対して適用される合計の時間は、マザーレーザパルスのパルス持続時間（時間に対する光パワーの半値全幅（FWHM）に基づく）以下である。マザーレーザパルスは、一般的に、第1のポジション106の位置決め期間よりも長いパルス持続時間を有するものとして特徴付けることができる。ある実施形態においては、マザーレーザパルスのパルス持続時間は、1 μ s、2 μ s、5 μ s、10 μ s、15 μ s、20 μ s、25 μ s、30 μ s、40 μ s、50 μ s、100 μ s、300 μ s、500 μ s、900 μ s、1 ms、2 ms、5 ms、10 ms、20 ms、50 ms、100 ms、300 ms、500 ms、900 ms、1 sなど、あるいはこれらの間の値よりも長く、あるいはこれと等しく、あるいはこれよりも短い。

50

【0075】

一実施形態においては、それぞれのスライス期間の長さ（ひいては、それぞれのパルススライスのパルス持続時間）は、第1のポジション106の位置決め期間の整数倍（例えば、この整数は、1、2、3、5、10など、あるいはこれらの間の値である）である。ある実施形態においては、それぞれのスライス期間の長さは、 $200\mu s$ 、 $125\mu s$ 、 $100\mu s$ 、 $50\mu s$ 、 $33\mu s$ 、 $25\mu s$ 、 $20\mu s$ 、 $13.3\mu s$ 、 $12.5\mu s$ 、 $10\mu s$ 、 $4\mu s$ 、 $2\mu s$ 、 $1.3\mu s$ 、 $1\mu s$ 、 $0.2\mu s$ 、 $0.1\mu s$ 、 $0.05\mu s$ 、 $0.025\mu s$ 、 $0.02\mu s$ 、 $0.013\mu s$ 、 $0.01\mu s$ 、 $0.008\mu s$ 、 $0.0067\mu s$ 、 $0.0057\mu s$ 、 $0.0044\mu s$ 、 $0.004\mu s$ など、あるいはこれらの間の値よりも長く、あるいはこれと等しく、あるいはこれよりも短い。一般的に、マザーレーザパルスの1以上のスライス期間の長さは、同一のマザーレーザパルスの1以上の他のスライス期間の長さと同じであってもよく、あるいはこれと異なってもよい。例えば、図3は、第1のスライス期間p1が第2のスライス期間p2と等しいものとして図示しているが、第1のスライス期間p1の長さは第2のスライス期間p2の期間よりも長くてもよく、あるいはこれよりも短くてもよい。

10

【0076】

図3は、マザーレーザパルス300を2つのパルススライス（すなわち、第1のパルススライス300aと第2のパルススライス300b）にだけ時間的に分割することを示しているが、マザーレーザパルス300を2つよりも多くのパルススライスに（例えば、3つパルススライスに、5つのパルススライスに、8つのパルススライスに、10個のパルススライスに、25個のパルススライスに、30個のパルススライスに、50個のパルススライスなどに、あるいはこれに類するパルススライスに、あるいはこれらの間の値のパルススライスになど）時間的に分割してもよいことは理解できるであろう。例えば、図4を参照すると、レーザパルス300は、4つのパルススライス400a、400b、400c、400dに時間的に分割され得る。一実施形態においては、順番に続いて分割されるパルススライスの少なくとも1対の中のパルススライスが異なる1次角度範囲116内で偏向されるように第1のポジション106の動作が制御される。例えば、パルススライス400aは1次角度範囲116内で（例えば、第1の角度だけ）偏向することができ、その後、パルススライス400bは1次角度範囲116内で（例えば、第2の角度だけ）偏向することができ、その後、パルススライス400cは1次角度範囲116内で（例えば、第3の角度だけ）偏向することができ、その後、パルススライス400dは1次角度範囲116内で（例えば、第4の角度だけ）偏向することができる。他の実施形態においては、順番に続いて分割されるパルススライスの少なくとも1対の中のパルススライスが1次角度範囲116内で同一の角度だけ偏向されるように第1のポジション106の動作が制御される。

20

30

【0077】

スライス期間外では、当該技術分野において知られている任意の方法により第1のポジション106を動作させて、ビーム経路114に沿って伝搬するレーザエネルギービームが、最終的に第1のポジション106により偏向されたとき、ワークピース102を加工するには不十分なエネルギーを有するように入射レーザエネルギービームを減衰させることができる。

これに加えて、あるいはこれに代えて、スライス期間外では、ビーム経路114をビームトラップ、ビームダンプシステムなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものに向けて偏向するように第1のポジション106を動作させることができる。これに加えて、あるいはこれに代えて、スライス期間外では、入射レーザエネルギービームを第1のポジション106のAODに透過させてビームトラップ、ビームダンプシステムなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものに向けることができるように第1のポジション106の動作を停止することができる。

40

【0078】

上記ではパルススライシングが単一のマザーレーザパルス（すなわちレーザパルス300）に関して述べられてきたが、順番に続いて伝搬する一連のマザーレーザパルスに関してパルススライシングを行うように第1のポジション106を動作させてもよいことは理解で

50

きるであろう。この一連のパルスにおいて、順番に続くマザーレーザパルスを任意の所望の方法により時間的に分割してもよく、順番に続く2つのマザーレーザパルスを同一の方法によりあるいは異なる方法により時間的に分割してもよい。

【0079】

A. 回折効率に関する追加の議論

スライス期間内では、パルススライスの光パワーが経時的に一定になり、又は経時的に変化し、又はこれらを任意に組み合わせた形態となるように、入射レーザエネルギービームを減衰させるように第1のポジショナ106を動作させることができる。例えば、（例えば、与えられるRF駆動信号の周波数を一定に保持しつつ）スライス期間中にAODに与えられるRF駆動信号の振幅を維持する及び／又は変化させることにより、入射レーザエネルギービームを減衰させるようにAOD（例えば、第1のAOD202、第2のAOD204、又はこれらの組み合わせ）を駆動することができる。このように、例えば、第1のパルススライス300aの光パワーは、第1のスライス期間p1中は一定であっても変化してもよい。同様に、第2のパルススライス300bの光パワーは、第2のスライス期間p2中は一定であっても変化してもよい。

【0080】

共通のマザーレーザパルスが複数のパルススライスに時間的に分割される連続するスライス期間にわたって、2つの平均光パワー及び／又はピーク光パワーが一定になる、又は変化するように、（例えば、連続するスライス期間にわたってAODに与えられるRF駆動信号の振幅を維持する及び／又は変化させることにより）入射レーザエネルギービームを減衰させるように第1のポジショナ106を動作させることができる。このように、例えば、第1のスライス期間p1中の第1のパルススライス300aの平均光パワー又はピーク光パワーは、第2のスライス期間p2中の第2のパルススライス300bの平均光パワー又はピーク光パワーより大きくてもよく、これと等しくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよい。他の例では、パルススライス400aの平均光パワー又はピーク光パワーは、パルススライス400b、400c、400dのいずれかの平均光パワー又はピーク光パワーより大きくてもよく、これと等しくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよい。パルススライス400bの平均光パワー又はピーク光パワーは、パルススライス400c及び400dのいずれかの平均光パワー又はピーク光パワーより大きくてもよく、これと等しくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよい。パルススライス400cの平均光パワー又はピーク光パワーは、パルススライス400dの平均光パワー又はピーク光パワーより大きくてもよく、これと等しくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよい。

【0081】

第1のポジショナ106の動作に関する上記議論は、パルススライスの光パワーを設定又は変化させるものである（すなわち、部分パルス偏向を行うように第1のポジショナ106を動作させる場合である）が、第1のポジショナ106が全パルス偏向を行う際にレーザエネルギーの偏向パルスの光パワーを設定又は変化させるように第1のポジショナ106を同様に動作させることができることは理解できるであろう。

【0082】

VI. ビーム分岐に関する実施形態

図1は、レーザ加工装置100が単一の第2のポジショナ108を含んでいる実施形態を示しているが、本明細書に開示されている数多くの実施形態は、複数（すなわち2以上の）第2のポジショナ108を含むレーザ加工装置に適用できることは理解できるであろう。例えば、図31を参照すると、レーザ加工装置3100は、上述したレーザ加工装置100と同様に方法により提供され得るが、複数の第2のポジショナ（例えば、第2のポジショナ108a及び108b、それぞれを総称して「第2のポジショナ108」という）と複数のスキャンレンズ（例えば、スキャンレンズ112a及び112b、それぞれを総称して「スキャンレンズ112」という）とを含み得る。レーザ加工装置100と同様に、スキャンレンズ112及び対応する第2のポジショナ108は、必要に応じて、共通のハウジング又は「スキャンヘッド」に一体化することができる。このため、スキャンレンズ112a及び対応する第2のポジシ

ナ108（すなわち第2のポジシヨナ108a）は、共通のスキャンヘッド120aに一体化することができる。同様に、スキャンレンズ112b及び対応する第2のポジシヨナ108（すなわち第2のポジシヨナ108b）は、共通のスキャンヘッド120bに一体化することができる。本明細書で使用される場合には、スキャンヘッド120a及びスキャンヘッド120bのそれぞれは、本明細書では総称して「スキャンヘッド120」ともいう。

【0083】

第1のポジシヨナ106がレーザ加工装置3100に一体化される場合、第1のポジシヨナ106は、ビーム経路114を第2のポジシヨナ108のいずれかに偏向するためにレーザエネルギービームを回折し、反射し、屈折し、又は偏向することが可能になっていてもよい。ビーム経路114を第2のポジシヨナ108aに偏向する際には、第1の角度範囲（本明細書においては「第1の1次角度範囲116a」ともいう）内の任意の角度（例えば、これは第1のポジシヨナ106に入射するビーム経路114に対して測定される）でビーム経路114を偏向することができる。同様に、ビーム経路114を第2のポジシヨナ108bに偏向する際には、第2の角度範囲（本明細書においては「第2の1次角度範囲116b」ともいう）内の任意の角度（例えば、これは第1のポジシヨナ106に入射するビーム経路114に対して測定される）でビーム経路114を偏向することができる。本明細書で使用される場合には、第1の1次角度範囲116a及び第2の1次角度範囲116bのそれぞれは、本明細書では総称して「1次角度範囲116」ともいう。一般的に、第1の1次角度範囲116aは、第2の1次角度範囲116bと重なっておらず、接してもいない。第1の1次角度範囲116aは、第2の1次角度範囲116bよりも大きくてもよく、小さくてもよく、あるいはこれと等しくてもよい。本明細書で使用される場合には、1次角度範囲116のうち1つ以上の1次角度範囲内でビーム経路114を偏向することを本明細書では「ビーム分岐」という。

【0084】

一実施形態においては、（例えば第1の分岐期間中に）ビーム経路114を第2のポジシヨナ108aに偏向し、（例えば、第1の分岐期間後の第2の分岐期間中に）ビーム経路114を第2のポジシヨナ108bに偏向するように、あるいはこれと逆になるように、あるいはこれらを組み合わせるように第1のポジシヨナ106の動作を制御してもよい。他の例においては、ビーム経路114を第2のポジシヨナ108a及び第2のポジシヨナ108bに同時に偏向するように第1のポジシヨナ106の動作を制御してもよい。本明細書で述べられる実施形態においては、第1の分岐期間の長さは、第2の分岐期間の長さよりも長くてもよく、あるいは短くてもよく、あるいはこれと等しくてもよい。第1の分岐期間と第2の分岐期間のそれぞれの長さは、第1のポジシヨナ106の位置決め期間よりも長くてもよく、あるいは短くてもよく、あるいはこれと等しくてもよい。一実施形態においては、第1の分岐期間と第2の分岐期間のそれぞれの長さは、第1のポジシヨナ106の位置決め期間の整数倍（この整数は、1、2、3、4、5、10、20、50、100などの整数、あるいはこれらの値のいずれかの間にある任意の整数であり得る）として特徴付けることができる。第1のポジシヨナ106の「位置決め期間」に関するさらなる説明に関する後述のセクションを参照されたい。ある実施形態においては、それぞれの分岐期間の長さは、200 μ s、125 μ s、100 μ s、50 μ s、33 μ s、25 μ s、20 μ s、13.3 μ s、12.5 μ s、10 μ s、4 μ s、2 μ s、1.3 μ s、1 μ s、0.2 μ s、0.1 μ s、0.05 μ s、0.025 μ s、0.02 μ s、0.013 μ s、0.01 μ s、0.008 μ s、0.0067 μ s、0.0057 μ s、0.0044 μ s、0.004 μ sなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値よりも長くてもよく、あるいは短くてもよく、あるいはこれと等しくてもよい。

【0085】

レーザ源104により出力されるレーザエネルギービームが一連のレーザパルスとして表される場合には、それぞれの分岐期間は、レーザエネルギービーム中のレーザパルスのパルス持続時間以上の期間を有し得る。しかしながら、他の実施形態においては、1以上の分岐期間が、レーザエネルギービーム中のレーザパルスのパルス持続時間より短い期間を有していてもよい。そのような実施形態（あるいはレーザ源104により出力されるレーザエネルギービームが連続又は準連続レーザビームとして表される実施形態）においては、

ビーム分岐をすることによって、パルススライシングすることになり、これにより1以上のパルススライスを生成することになり得る。

【0086】

VII. フィーチャの形成

一般的に、図1又は図31に関して述べたレーザ加工装置又は他のレーザ加工装置のいずれに設けられるかを問わず、ワークピース102内にフィーチャ（例えば、開口、ビア、トレンチ、スロット、スクライブライン、凹部など）を形成するために、（例えば上述した）第1のスキャン範囲内でプロセススポットを高速でスキャンし、あるいは配置するために第1のポジション106を動作させ、使用することができる。ある実施形態においては、ワークピース102は、PCBパネル、PCB、FPC、IC、ICP、半導体デバイスなどとして提供され得る。このため、ワークピース102は、導電体構造（例えば、銅、銅合金から形成され得る膜、箔など、銅、チタン、窒化チタン、タンタルなどの1以上の金属を含む配線又は導電線構造など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）、誘電体構造（例えば、ビルドアップフィルム、ガラス繊維強化エポキシ積層体、層間誘電材料、low-k誘電材料、ソルダレジスト、高分子材料など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上の構成要素構造を含み得る。ワークピース102の導電体構造又は誘電体構造は、5 μm （又はその前後）から500 μm （又はその前後）の範囲の厚さを有することができる。このように、導電体構造又は誘電体構造の厚さは、0.5 μm 、0.1 μm 、1 μm 、3 μm 、5 μm 、10 μm 、15 μm 、18 μm 、20 μm 、25 μm 、30 μm 、35 μm 、40 μm 、50 μm 、70 μm 、80 μm 、100 μm 、110 μm 、120 μm 、250 μm 、300 μm 、350 μm 、400 μm 、450 μm 、550 μm 、600 μm など、あるいはこれらの値のいずれかの間の値よりも大きいか、あるいは小さいか、あるいは等しくてもよい。

【0087】

一実施形態においては、図5を参照すると、ワークピース102は、その第1の面側で第1の導電体構造502が接触する又は第1の導電体構造502に付着された誘電体構造500を含んでいる。誘電体構造500は、FR4、ポリイミド、液晶ポリマ、ABFなどの材料として提供され、15 μm （又はその前後）から120 μm （又はその前後）の範囲の厚さ（ t_1 ）を有し得る。第1の導電体構造502は、レーザエネルギーの吸収を増加させるために例えば、化学反応により、あるいはレーザ暗化プロセスなどにより処理されるか、あるいは暗化されていない露出面を有し得る銅又は銅合金箔として提供され得る。第2の導電体構造504（例えば、銅又は銅合金などにより形成されるパッド、トレース、箔など）は、第1の面とは反対側の誘電体構造500の第2の面に接触するか、第2の面に付着されていてもよい。第1の導電体構造502は、5 μm 、7 μm 、9 μm 、12 μm 、18 μm 、35 μm 、70 μm 、105 μm など、あるいはこれらの値のいずれかの間の値と等しい（あるいはほぼ等しい）厚さ（ t_2 ）を有し得る。第2の導電体構造が存在する場合には、第2の導電体構造は、第1の導電体構造502の厚さ（ t_1 ）よりも小さい、あるいはこれよりも大きい、あるいはこれと等しい厚さ（ t_3 ）を有し得る。必要に応じて、ワークピース102は、（例えば、第2の導電体構造504が誘電体構造500と誘電体構造508との間に存在するように）第2の導電体構造504が接触する又は第2の導電体構造504に付着された、図5に部分的に示される付加的な誘電体構造508のような1以上の付加的な構造を含み得る。

【0088】

一般的に、フィーチャ（例えば、開口、ビア、トレンチ、スロット、スクライブライン、凹部など）は、アブレーションによりワークピース102の1以上の構成要素構造から材料を除去することによって形成されるものとして特徴付けることができる。明確に述べられている場合を除いて、「アブレーション」という用語は、「直接アブレーション」、「間接アブレーション」、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを意味し得る。ワークピース102内の材料の直接アブレーションは、アブレーションの主たる原因が、照射されたレーザエネルギービーム内のエネルギーの材料による吸収（例えば、線形吸収、非線形吸収、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）による材料の分解である場合に生じる

。ワークピース102内の対象材料（例えば第1の導電体）の間接アブレーション（「リフトオフ」としても知られる）は、アブレーションの主たる原因が、ワークピース102に最終的に照射されるレーザエネルギービーム内のエネルギーを吸収する隣接する材料内で生じ、そこから伝達される熱による溶融と蒸発である場合に生じる。対象材料（例えば第1の導電体502）の除去は、対象材料と隣接材料との間における（例えば、隣接する材料の蒸発の際に生じる）蒸発した材料のポケット内の圧力が、ワークピース102から対象材料を噴出させるのに十分である場合に生じる。間接アブレーションによる材料の除去に関する検討事項は当該分野において知られており、国際公開第W02017/044646A1号においてより詳細に述べられている。

【0089】

A. スキャンパターンを用いたフィーチャ形成

（例えば、上述したように構成される）ワークピース102におけるビア（例えば、図6に例示的に示されている非貫通ビア600や図7に例示的に示されている貫通ビア700）のようなフィーチャを形成するために、第1のポジショナ106は、多軸AODシステム（例えばAODシステム200）として提供され、スキャンパターンを規定するプロセス軌跡に沿ってプロセススポット（すなわち、図5において矢印506で示されるように、ワークピース102に向けられるレーザエネルギービームが照射されるワークピース102上のスポット）をスキャンするように動作され得る。ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームが複数のパルスとして表される場合には、スキャンパターンは、フィーチャ（例えばビア）が形成されるワークピース102の領域内に分布するスポット位置のパターンとして特徴付けることができる。フィーチャの形成中、（例えば上述したような）全パルス偏向や部分パルス偏向、あるいは全パルス偏向と部分パルス偏向の組み合わせを実現するように第1のポジショナ106を動作させることができる。

【0090】

一般的に、（XY平面において測定される）スキャンパターンの最大寸法は、（XY平面において測定される）第1のスキャン領域の最大寸法よりも小さいか、それと等しい。さらに、ビアを形成するために使用されるスキャンパターンに沿ってスキャンされるプロセススポットのスポットサイズは、（第1の導電体構造502に形成される）ビア自体の（XY平面において測定される）最大寸法よりも小さい。したがって、ビアの最大寸法は、20 μm 、25 μm 、30 μm 、35 μm 、40 μm 、45 μm 、50 μm 、55 μm 、60 μm 、65 μm 、70 μm 、80 μm 、85 μm 、90 μm 、95 μm 、100 μm 、105 μm 、110 μm など、あるいはこれらの値のいずれかの間の値と等しく（又はほぼ等しく）なり得る。（例えば、ビアの底部において、あるいは誘電体構造と第2の導電体構造との間の界面又はその近傍において）誘電体構造に形成されるビアの（XY平面で測定される）最大寸法は、第1の導電体構造502に形成されるビアの最大寸法よりも大きくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよく、あるいはこれと等しくてもよい。

【0091】

スキャンパターンの特性は、スキャンパターンにおけるスポット位置の数、スキャンパターンにおけるスポット位置の配置、スキャンパターンにおいてスポット位置が指定される順序又は順番、連続的に指定されるスポット位置間の距離などを含み得る。一般的に、単一のレーザパルス又は単一組の連続的に照射されるレーザパルスがスポット位置でワークピース102に照射される際にスポット位置が指定される。本明細書で述べられる実施形態によれば、（間接アブレーション又は直接アブレーションと間接アブレーションの組み合わせにより）第1の導電体構造502が最終的にアブレートされる前にビアが形成されるワークピース102の領域にわたってレーザエネルギーを均一に（あるいは少なくともある程度均一に）分布させることができるように、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームの上記特性（例えば、波長、平均パワー、パルス持続時間、パルス繰り返し率、パルスエネルギー、ピークパワー、時間的光パワープロファイル、スポットサイズなど）のうち1つ以上又はすべてを考慮して、これらのスキャンパターン特性のうち1つ以上を選択あるいは設定することができる。そのようにすることにより、スキャンパターン

10

20

30

40

50

中のすべてのスポット位置が指定される前に、ビアが形成される第1の導電体構造502の領域を均一に（あるいは少なくともある程度均一に）第1の導電体構造502の加工閾値温度又はその近傍の温度に加熱することができる。このため、本明細書で述べられる実施形態によれば、ワークピース102にビアを形成するプロセスは、第1の導電体構造502に開口を形成するプロセスを含むものとして特徴付けることができる。これにより、開口が形成される第1の導電体構造502の領域を均一に（あるいは少なくともある程度均一に）第1の導電体構造502の加工閾値温度又はその近傍の温度に）加熱するために、スキャンパターン中の複数のスポット位置を最初に指定し、その後、第1の導電体構造502の加熱された領域の下方の誘電体構造500の一部を蒸発させてワークピース102から第1の導電体構造502の加熱領域を噴出させるためにスキャンパターン中の1以上の他のスポット位置を指定することにより（すなわち間接アブレーションにより）、第1の導電体構造502に開口が形成される。

10

【0092】

上記の観点から、（例えば間接アブレーションにより）第1の導電体構造502がアブレートされる前に、ビアが形成されるワークピース102の領域内に位置する第1の導電体構造502の部分（ビアが形成されるワークピース102の領域の中央に位置する第1の導電体構造502の領域（本明細書では「第1の導電体502の中央領域」ともいう）を含む）のすべて（少なくとも実質的にすべて）が溶融するように、レーザエネルギービームの特性（例えば、平均パワー、パルス持続時間、パルス繰り返し率、パルスエネルギー、ピークパワー、スポットサイズなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）に加え、上述したスキャンパターン特性のうちの1つ以上を選択あるいは設定することができることは理解できるであろう。しかしながら、第1の導電体構造502がアブレートされる前に、第1の導電体502の中央領域は溶融しないが、中央領域を取り囲む第1の導電体502の部分が溶融するように、スキャンパターンの特性、レーザエネルギービームの特性、又はこれらの組み合わせのうちの1つ以上を修正することができる。この場合には、（例えば、第1の導電体502の未溶融の中央領域の下方の誘電体構造の蒸発の際に）第1の導電体502の未溶融の中央領域を依然として間接アブレーションにより除去することができる。

20

【0093】

また、スキャンパターン中の連続的に指定されるスポット位置が指定される速度を考慮して、スキャンパターン特定のうちの1つ以上を選択あるいは設定することができる。スキャンパターン中の異なるスポット位置が指定される速度は、ビアの形成中の第1のポジション106の更新速度、ビアの形成中の第1のポジション106の更新速度の整数倍、又はこれらの組み合わせと等しくても（あるいは少なくとも実質的に等しくても）よい。したがって、スキャンパターン中の異なるスポット位置が指定される速度は、ビアの形成中の第1のポジション106の更新速度に対応し得る。このため、スキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンするのに必要な合計時間（本明細書では「露光時間」ともいう）は、スキャンパターン中のスポット位置の数に（スキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンするように第1のポジション106を動作させる際の）第1のポジション106の第1の位置決め期間を乗算した積に対応し得る。

30

【0094】

上記で述べたように、ビアを形成するプロセス中には、（例えば、直接アブレーション、間接アブレーション、又はこれらの組み合わせにより）第1の導電体構造502がアブレートされる前に、ビアが形成されるワークピース102の領域にわたって均一に（あるいは少なくともある程度均一に）レーザエネルギーが分布する。したがって、第1の導電体構造502がアブレートされる前に、スキャンパターンの少なくとも2つのスポット位置（例えば、2個、3個、4個、5個、6個、7個、8個、9個、10個など）が指定される。例えば、発明者等により行われたシミュレーションは、一連のレーザパルス（すなわち、9.4 μm 又は10.6 μm のような波長、70 μm のスポットサイズ、1 μs のパルス持続時間、約1.3 kWまでのピークパワーを有する）として表されるレーザエネルギービームが（レーザエネルギービームが第1の導電体構造502に入射するように）厚さ50 μm のFR4から形成

40

50

される誘電体構造と、レーザエネルギーの吸収を増加させる処理がなされた厚さ12 μm の銅箔から形成される第1の導電体構造502と、厚さ35 μm の銅箔から形成される第2の導電体構造とを有するPCBとして提供されるワークピース102に照射される場合には、第1の導電体構造502のアブレーションは、プロセススポットが最初にスキャンされた後6 μs から8 μs （又はその前後）の期間内に始まる。このため、このシミュレーションによれば、第1の導電体構造502がアブレートされる前に約6個から8個のスポット位置をレーザエネルギービームにより指定することができる。

【0095】

i. スキャンパターンの実施形態の例

以下では、図8から図22及び図24(a)に示されるスキャンパターンについて述べる。これらは、発明者等により、（例えば上述のように提供される）ワークピース102に9 μm （又はその前後）から11 μm （又はその前後）の範囲の波長（例えば、9.4 μm （又はその前後）、10.6 μm （又はその前後）などの波長）、250 W（又はその前後）から2 kW（又はその前後）の範囲のピークパワー、及び60 μm （又はその前後）から90 μm （又はその前後）の範囲のスポットサイズを有するレーザエネルギービームをワークピース102に照射するように用いて円形の（又は少なくとも概して円形の）非貫通ビアを形成するために行われたものである。しかしながら、スポットサイズは、60 μm よりも小さくてもよく、例えば、30 μm （又はその前後）から60 μm （又はその前後）の範囲であってもよいことは理解できるであろう。このため、以下で述べるような例示的なスキャンパターンに沿ってスキャンされるプロセススポットは、例えば、40 μm （又はその前後）、50 μm （又はその前後）、70 μm （又はその前後）、又は85 μm （又はその前後）など、あるいはこれらの値のいずれかの間の値のスポットサイズを有し得る。一般的に、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービーム中のパルスは、1 μs （又はその前後）のパルス持続時間を有している。しかしながら、以下で述べるスキャンパターンは、非貫通ビア以外のフィーチャ（例えば、貫通ビアトレンチ、スロット、又は他の凹部又は開口）を形成するために使用されてもよく、ビア以外のフィーチャを形成するためにスキャンパターンを修正してもよいことは理解できるであろう。

【0096】

また、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームの他の特性（例えば、パルス持続時間、パルス繰り返し率、ピークパワー、時間的光パワープロファイル、フルエンスなど）がワークピース102を加工するのに十分であるとする、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームは、9 μm 以下の波長（例えば、電磁スペクトルの紫外域又は緑色域）を有し得ることは理解できるであろう。例えば、レーザ源104は、IPG PHOTONICS社により製造されるULR/ULM-355-200シリーズのレーザのようなレーザとして提供され得る。これらのレーザは、355 nmの波長及び200 Wの平均パワーでレーザエネルギービームを生成することができる高パワーQCWファイバレーザである。このビームは、約1.4 nsのパルス持続時間を有し、80 MHzのパルス繰り返し率で出力されるレーザパルスによって構成される。他の例では、レーザ源104は、IPG PHOTONICS社により製造されるGPLN-532シリーズのレーザ（例えば、GPLN-532-200、GPLN-532-500など）のようなレーザとして提供され得る。このレーザは、パルスモード又はQCWモードで動作可能であり、532 nmの波長及び200 W以上の平均パワーでレーザエネルギービームを生成することができる。このビームは、約1.2 nsのパルス持続時間を有し、約50 MHz以上のパルス繰り返し率で出力されるレーザパルスによって構成される。

【0097】

最後に、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームの波長にかかわらず、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームは、加工されるワークピース102の材料構成、許容可能な品質及びスループット基準などの1以上のファクタに基づいて任意の好適な又は所望の特性（例えば、スポットサイズ、パルス持続時間、ピークパワー、パルスエネルギー、平均パワー、パルス繰り返し率など）を有し得ることは理解できるであろう。

【0098】

図8から図22及び図24(a)において、スキャンパターンのスポット位置は、円形配置に分布している（例えば、仮想円の共通周囲上に又はこれに沿って配置されている）。これらの図において、それぞれのスポット位置の中心が点又は円により示されている。図示されている横軸及び縦軸は参考のためのものであり、それぞれの軸の数字は、（ μm で測定される）距離又は位置を示している。したがって、図8から図22及び図24(a)に示されるスキャンパターンは、 $10\mu\text{m}$ （又はその前後）から $60\mu\text{m}$ （又はその前後）の範囲の半径を有するものとして特徴付けることができる。

【0099】

一実施形態においては、ビアを形成するために使用されるスキャンパターンは、隣接最遠方型のスキャンパターンであり得る。隣接最遠方型スキャンパターンにおいては、指定される2番目又は後続のスポット位置が、先に指定された他のスポット位置からできる限り離れた位置にある。隣接最遠方型スキャンパターンの例は、図8及び図9に示されている。

【0100】

図8を参照すると、隣接最遠方型スキャンパターンは、8個のスポット位置からなり（それぞれのスポット位置の中心は点800のような点で表されている）、それぞれのスポット位置は1回だけ指定される。例示的に図示されているように、8個のスポット位置は、円形配置に設けられている（例えば、仮想円の共通周囲上に又はこれに沿って配置されている）。スポット位置を接続する線と、スポット位置の近くの数字「1」、「2」、・・・「8」は、スキャンパターン800内のスポット位置が（例えば、第1のポジション106により少なくとも偏向されたレーザエネルギービームにより）指定される順番を示している。このため、スポット位置1は、スキャンパターン800内で指定される最初のスポット位置となり、スポット位置2は、スキャンパターン800内で指定される2番目のスポット位置などとなり、スポット位置8は、スキャンパターン800内で指定される最後のスポット位置となる。

【0101】

図9を参照すると、隣接最遠方型スキャンパターンは、円形配置の（例えば、仮想円の共通周囲上に又はこれに沿って配置される）16個のスポット位置からなる。図9に示されるスキャンパターンにおいては、それぞれのスポット位置は別のスポット位置と重なっている。したがって、点の地各区の識別子「1, 12」、「2, 11」、「3, 9」、・・・「5, 16」は、スポット位置を示しており、スポット位置を接続する線は、スキャンパターン内のスポット位置が（例えば、第1のポジション106により少なくとも偏向されたレーザエネルギービームにより）指定される順番を示している。このため、図9に示されるスキャンパターンにおいて、「1, 12」により示される点は、スキャンパターン800内で指定される最初のスポット位置の位置とスキャンパターン800内で指定される12番目のスポット位置の位置とを表しており、「2, 11」により示される点は、スキャンパターン内で指定される2番目のスポット位置の位置とスキャンパターン内で指定される11番目のスポット位置の位置とを表すなどとなる。

【0102】

（例えば、指定される2番目又は後続のスポット位置が先に指定された他のスポット位置からできる限り離れた位置にないように）隣接最遠方型スキャンパターンを修正し、依然としてビアを形成するために使用するのに好適なものにできることは理解できるであろう。修正された隣接最遠方型スキャンパターンの例が図10から図22に示されている。（図8及び図9に示されるスキャンパターンに加えて）図10から図22に示されるスキャンパターンは、一般的に、2つのタイプのうちの1つとして特徴付けることができる。1つ目のスキャンパターンのタイプ（本明細書では「第1型スキャンパターン」ともいう）では、連続的に指定されるスポット位置のペア間の midpoint が同じ場所（例えば、仮想円の中心）に位置する。2つ目のスキャンパターンのタイプ（本明細書では「第2型スキャンパターン」ともいう）では、連続的に指定されるスポット位置のペア間の midpoint が同じ場所に位

10

20

30

40

50

置しない。図8から図16、図20から図22、及び図24(a)は、第1型スキャンパターン
の例を示しており、図17から図19は、第2型スキャンパターンを示している。

【0103】

第2型スキャンパターンは、隣接するスポット位置が（例えば、図17及び図19に示さ
れるように）連続的に指定されるスキャンパターンとして、あるいは、隣接するスポット
位置が（例えば、図18に示されるように）連続的に指定されないスキャンパターンとして
特徴付けることができる。図17及び図19に示されるようなスキャンパターンのようなス
キャンパターンは、「連続的指定第2型スキャンパターン」と呼ばれ、図18に示されるよ
うなスキャンパターンのようなスキャンパターンは、「非連続的指定第2型スキャンパ
ターン」と呼ばれる。

10

【0104】

図17及び図19において、スポット位置1及び2は、互いに隣接し、連続的に指定され
るスポット位置の例である。図18において、スポット位置1及び7は、互いに隣接するが
、連続的に指定されないスポット位置の例である。むしろ、図18においては、スポット位
置1及び2は、互いに隣接していないが、連続的に指定される。図18に示されるスキャン
パターン例においては、スポット位置7は、（例えば、仮想円の円周に沿って）連続的に
指定されるスポット位置1と2との間に位置している。また、図18に示されるように、ス
ポット位置12と1は、（例えば、仮想円の円周に沿って）連続的に指定されるスポット位
置6と7との間に位置している。任意の数のスポット位置が、（例えば、仮想円の円周に
沿って）同一のスキャンパターン内の任意の2つの連続して指定されるスポット位置の
間に位置し得るように、図17から図19に示されるスキャンパターンを修正できることは理
解できるであろう。

20

【0105】

図8から図22及び図24(a)に示されるスキャンパターン例は、仮想円の共通周囲上に又
はこれに沿って配置される所定個数のスポット位置（例えば、4個、8個、12個、16個
、18個、又は20個のスポット位置）を有するように示されているが、（図示されている
か否かを問わず）いずれのスキャンパターンも、仮想円の共通周囲上に又はこれに沿って
配置される異なる数（例えば、2個、3個、5個、6個、10個、15個、22個、25個、2
8個、30個、32個、40個、50個、60個、70個、75個、80個、100個など、あるいはこ
れらの値のいずれかの間の値）のスポット位置を有することができ、スポット位置は、任
意の好適な又は所望の順序又は順番で指定されてもよいことは理解できるであろう。例え
ば、図8、図10から図13及び図15から図20に示されるスキャンパターン例は、1回だけ
順番に指定される複数のスポット位置を有するように示されているが、これらのスキャン
パターンのいずれかのスポット位置は、複数回（例えば、2回、3回、4回、5回など）
順番に指定されてもよいことは理解できるであろう。また、共通のスキャンパターン内の
スポット位置は、任意の所望の又は好適な形状（例えば、三角形、正方形、矩形、六角形
、楕円形、星形など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）を描いた他の線、周縁
、線分などの上に又はこれに沿って配置されていてもよいことは理解できるであろう。

30

【0106】

非隣接スポット位置が連続的に指定されるようにプロセススポットを第2型スキャン
パターンに沿ってスキャンする際に、任意の数のスポット位置が、（例えば、仮想円の円周
に沿って）連続的に指定されるスポット位置のペア間に位置していてもよい。そのような
連続的に指定されるスポット位置のペア間に位置し得るスポット位置の数は、3個のスポ
ット位置から10個のスポット位置の範囲（例えば、4個のスポット位置から6個のスポ
ット位置の範囲）とすることができる。

40

【0107】

ii. フィーチャ形状の歪みに関する追加の議論

第1のポジション106（例えば、AODシステム200のような多軸AODシステム）を動作
させて上述したような第2型スキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンする
ことにより生成されたビームは、第2型スキャンパターンのスポット位置が例えば図28に示

50

されるように仮想円の共通周囲上に又はこれに沿って配置されていても、例えば図27に示されるように（ワークピース102の表面において）楕円の開口を有し得ることが発見されている。ピア開口の形状におけるこの歪みを補償するために、（例えば、図29に示されるように、スポット位置が仮想楕円の共通周囲上に又はこれに沿って配置されるように）第2型スキャンパターンにおけるスポット位置の配置を修正することができる。図29に示される修正された第2型スキャンパターンは、一般的に、楕円の形状であるものとして特徴付けることができる。この楕円形状の長軸は、図27に示されるピア開口の形状の長軸に対して直交している。スポット位置が、共通の円の円周上に又はこれに沿って配置されるのではなく、共通の楕円の周囲上に又はこれに沿って配置されるように（上述した第2型スキャンパターンを含む）任意の第2型スキャンパターンを修正することができる。そのような修正されたスキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンすると、最終的に生成されるピアの開口は、図27に示される楕円形に比べてより円形の形状を有することとなる。

【0108】

iii. スキャンパターン、ピア真円度及びパルススライシングに関する追加の議論

図8から図22及び図24(a)において、横軸及び縦軸は、ピアを形成するためにスキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンするように動作する多軸AODシステム（例えばAODシステム200）内のAODの回折軸の方向を必ずしも表すものではないことに留意すべきである。一般的に、全パルス偏向、（上述したような）部分パルス偏向（すなわちパルススライシング）、又はこれらを組み合わせたものを行うためにAODシステム200を動作させつつ、プロセススポットを本明細書で述べられているような任意のスキャンパターンに沿ってスキャンすることができる。部分パルス偏向を行うように多軸AODシステム（例えば、AODシステム200）を動作させる際に、最終的に形成されるピア開口の真円度が、スキャンパターンの方向（すなわち、多軸AODシステムにおけるAODの回折軸の方向に対するスキャンパターン内の連続的に指定されるスポット位置の間の「ジャンプ」の方向）、スキャンパターン内の連続的に指定されるスポット位置の間の距離、及びプロセススポットがスキャンされている間の多軸AODシステムの更新速度のような1以上のファクタに依存し得ることが見出されている。特定の理論に拘束されることは望んでいないが、発明者等は、パルススライシング中にAODのAOセルをレーザパルスが通過する間に、AODに与えられるRF駆動周波数を変化させたときに生じるAOセル内の音波過渡変化が、入射レーザエネルギービームを望ましくない形態で回折すると考えている。音波過渡変化により生じる回折現象は、時として、ワークピース102でのプロセススポットの許容できない程度の歪みを生み出すことがある。特定のAODに与えられるRF駆動周波数の差が、AODの2つの連続する第1の位置決め期間の間で大きい場合に、プロセススポットの歪みが最も酷くなることが観察されている。また、スキャンパターン内の異なるスポット位置を連続的に指定するように多軸AODシステムの複数のAODを動作させると、プロセススポットの歪みをある程度軽減できることも観察されている。

【0109】

例えば、図14に示されるスキャンパターンにおいては、スポット位置1と2との間（及びスポット位置7と8との間、及びスポット位置9と10との間）の「ジャンプ」の方向は、多軸AODシステムにおけるAODの1つの回折軸（例えば、AODシステム200の第1のAOD202の第1の回折軸）と平行であり、スポット位置3と4との間（及びスポット位置5と6との間、及びスポット位置11と12との間）の「ジャンプ」の方向は、多軸AODシステムにおけるAODの他の回折軸（例えば、AODシステム200の第2のAOD204の第2の回折軸）と平行である。したがって、対角に示されている方向（それぞれAODシステム200のような多軸AODシステムにおけるAODの回折軸と平行である）に整列された連続的に指定されるスポットの間の距離は、図に示されている横方向又は縦方向に整列された連続的に指定されるスポットの間の距離よりも長い。このため、プロセススポットが図14に示されるスキャンパターンに沿ってスキャンされる際は、ワークピース102でのプロセススポットの形状が歪んで（例えば、図23に示されるような）比較的眞円度の低いピア開口が生

じることがある。しかしながら、比較的大きな「ジャンプ」（すなわち、スポット位置1と2との間、スポット位置3と4との間、スポット位置5と6との間、スポット位置7と8との間、スポット位置9と10との間、及びスポット位置11と12との間のジャンプ）の方向がいずれかのAODの回折軸に平行とならないように、図14に示されるスキャンパターンの方向を多軸AODシステムにおけるAODの回折軸に対して（例えば、図24(a)に示されるように45度だけ）回転させると、最終的に生成されるビア開口の真円度を図24(b)に示されるように改善することができる。図14に示されるように、スポット位置1と2との間（及びスポット位置7と8との間、及びスポット位置9と10との間）で、あるいはスポット位置3と4との間（及びスポット位置5と6との間、及びスポット位置11と12との間）でプロセススポットをスキャンするために、単一のAODだけを動作させる。しかしながら、図24(a)に示されるように、スポット位置1と2との間、スポット位置3と4との間、スポット位置5と6との間、スポット位置7と8との間、スポット位置9と10との間、及びスポット位置11と12との間でプロセススポットをスキャンするためには、複数のAODを動作させる必要がある。同様に、図16に示されるスキャンパターンにおける連続的に指定されるスポット位置の間の「ジャンプ」の方向は、多軸AODシステム内のいずれのAODの回折軸といずれも平行ではない。その結果、図16に示されるスキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンする場合には、最終的に生成されるビアは（例えば図25に示されるような）比較的高い真円度の開口を有する。

10

【0110】

AOD内では、与えられるRF駆動周波数のそれぞれが、入射レーザエネルギービームに与えられる実効位相傾斜に対応することに留意されたい。特に位相傾斜（単位は μ ラジアン）は、以下のように計算することができる。

20

【数2】

$$\text{位相傾斜} = \lambda * \Delta f / v$$

ここで、 λ は、AODを通過するレーザエネルギービームの光波長（nmで測定される）であり、 Δf は、AODに与えられるRF駆動周波数のAODの中心周波数からのずれ（Hzで測定される）、及び v は、AOセル内の音波の速度（m/sで測定される）である。パルススライシングを行うようにAODシステムを動作させたときに、入射レーザエネルギービームが、著しく異なる大きさの複数の位相傾斜（複数の位相傾斜セクションとも呼ばれる）により影響を受ける場合には、例えば、AODシステム200を動作させる更新速度に応じて歪みが酷くなり得る。しかしながら、複数の傾斜セクションの大きさがレーザエネルギービームの波長のわずかだけ異なるようにパルススライシングを行う場合には、観察されるであろう歪みの影響を低減することができる。これは、ビアを穿孔する際に部分パルス偏向を行うように多軸AODシステムを動作させるときに、多軸AODシステム（例えばAODシステム200）の更新速度だけではなく、使用されるスキャンパターンの選択と方向を誘導するのも役立つ。

30

【0111】

例えば、図8に示されるスキャンパターンにおけるスポット位置1と2との間の「ジャンプ」の方向は、AODの1つの回折軸（例えば、AODシステム200の第1のAOD202の第1の回折軸）と平行であり、スポット位置3と4との間の「ジャンプ」の方向は、AODの他の回折軸（例えば、AODシステム200の第2のAOD204の第2の回折軸）と平行である。このため、単一のAODによって実現される最も長距離のジャンプは、傾斜の約300 μ ラジアンに等しく、これは、AODを通過するレーザエネルギービームの直径（約15mm、又はその9.4 μ m波長の約50%になり得る）にわたる約4.5 μ mの位相傾斜に相当する。このため、スポット位置1からスポット位置2へのジャンプ及びスポット位置3からスポット位置4へのジャンプは比較的大きなジャンプとなる。

40

【0112】

（1 μ sの第1の位置決め期間に対応する）1MHzの更新速度で図8に示されるスキャ

50

ンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンするために部分パルス偏向を行うようにAODシステム200を動作させると、許容できる程度に丸い開口を有するビアを形成することができる。しかしながら、更新速度を2倍にして(0.5 μ sの第1の位置決め期間に対応する)2 MHzにすると、図8に示されるスキャンパターンに沿ってスキャンしたようにプロセススポットが歪んで、より正方形に似た形状を有する開口を有するビアが形成される。これに対して、図17から図19に示されるようなスキャンパターンにおいて連続的に指定されるスポット位置の間のジャンプの距離は、図8に示されるようなスキャンパターンにおいて連続的に指定されるスポット位置の間のジャンプの距離よりもずっと短くなり得る。例えば、図19に示されるスキャンパターンにおいて連続的に指定されるスポット位置の間のジャンプは、10 μ m未満(図8に示されるスキャンパターンにおけるものの3倍未満)になり得る。この結果、多軸AODシステムにおけるAODを2 MHzの更新速度で駆動する場合には、さらに、(0.125 μ sの第1の位置決め期間に対応する)8 MHzの更新速度で駆動する場合においてさえも、ワークピース102でのプロセススポットの歪みは非常に小さくなり得る。

【0113】

上記観点から、連続的に指定されるスポット位置が、スポット位置6個分まで空間的に互いに分離するように、さらに／あるいは、連続的に指定されるスポット位置のジャンプ間の距離が15 μ m(例えば、13 μ m、11 μ m、10 μ m、9 μ m、8 μ m、7 μ mなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値)未満となるように、比較的多く(例えば40個以上)のスポット位置(例えば、45個、50個、60個、75個、80個、90個、100個、124個のスポット位置など、あるいはこれらの値のいずれかの間の個数のスポット位置)を有する第2型スキャンパターン(例えば、本明細書で述べられた任意の方法により提供される)に沿って(例えば、上述した範囲のスポットサイズを有する)プロセススポットをスキャンするように、第1のポジショナ106(例えば、AODシステム200のような多軸AODシステム)を1 MHzよりも高い更新速度で(例えば、2 MHz、5 MHz、8 MHz、12 MHz、25 MHz、50 MHzなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値以上の更新速度で)動作させることにより、(例えば、上述したワークピース102に)ビアを形成することができる。

【0114】

iv. 局所的熱蓄積に関する追加の議論

ワークピース102に照射されるレーザパルスの波長、パルス持続時間、パルス繰り返し率、平均パワーなど、(例えば、スポット位置に照射されるレーザパルスの波長に対する)スポット位置での材料の線形吸収、スポット位置又はその近傍における材料の熱伝導率、熱拡散率、比熱容量など、プロセススポットがそれに沿ってスキャンされるスキャンパターンなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものなどの1以上のファクタに応じて、1以上のスポット位置にレーザパルスが照射される結果として生じる熱は、照射されたスポット位置から拡散して、プロセススポットの外部のワークピース102の領域内に蓄積し、プロセススポットの外部の領域でワークピース102の温度を上昇させ得る。

【0115】

蓄積された熱が、プロセススポットが照射されるスポット位置又はその近傍に位置するワークピース102の領域での温度を上昇させることになり、この温度上昇が閾値温度(すなわち「加工閾値温度」)を超える場合、(例えば、直接アブレーション、間接アブレーション、あるいはこれらを任意に組み合わせたものによって)ワークピース102をこの後に加工できる効率に良い影響を与え得る。一般的に、加工される材料に関連付けられた加工閾値温度は、加工される材料の融点又はガラス転移温度以上であるが、その気化温度よりは低い。しかしながら、他の実施形態においては、加工閾値温度は、加工される材料の融点又はガラス転移温度(例えば、加工される材料の融点又はガラス転移温度の98%、95%、93%、90%、89%、87%、85%、80%、75%、70%、65%、50%、40%など、あるいはこれらの値のいずれかの間の値)よりも低くてもよい。

【0116】

場合によっては、蓄積された熱は、加工することを意図していないワークピース102の領域（それぞれ本明細書においてはワークピース102「非フィーチャ領域」とも呼ばれる）内の温度を上昇させることがある。温度が十分に高いと、ワークピース102の非フィーチャ領域は、望ましくないダメージを受け得るようになる（例えば、好ましくない形で傷ついたり、溶融したり、剥離したり、アニールされたりなど）。このように、ワークピース102の非フィーチャ領域内で好ましくない熱の蓄積を避けるようにワークピース102を加工することが好ましい場合がある。本明細書で使用される場合には、ワークピース102のある領域が望ましくないダメージを受ける温度を「ダメージ閾値温度」と呼ぶ。ワークピース102のいずれかの非フィーチャ領域のダメージ閾値温度は、スポット位置又はその近傍又は非フィーチャ領域における材料の厚さ、熱伝導率、熱拡散率、比熱容量など、（照射されるレーザエネルギービームに対する）吸光率などに加え、非フィーチャ領域の近傍に位置する構造の熱伝導率、熱拡散率、比熱容量、サイズ及び寸法など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものなどの1以上のファクタに依存し得ることは理解すべきである。

【0117】

a. 好ましくないダメージを避ける

（例えば、図8から図29に関して上記で例示的に述べたスキャンパターン又はそれ以外のスキャンパターンに沿って）レーザエネルギービームをスキャンすることによって（例えば、図5及び図6に関して上記で述べたように）ワークピース102に非貫通ビア600を形成する際に、ワークピース102が層状に剥離し得ることが分かっている。ワークピース102が層状に剥離し得る領域の例としては、露出した第2の導電体構造504の周縁領域又はその近傍（例えば、円「A」で特定される領域内）における第2の導電体構造504と誘電体構造500及び誘電体構造508の一方又は両方との間の界面の領域、露出した第2の導電体構造504の中央領域又はその近傍（例えば、円「B」で特定される領域内）における第2の導電体構造504と誘電体構造508との間の界面の領域など、これらを任意に組み合わせたものが挙げられる。出願人が行った実験は、ワークピース102に照射されるレーザパルスが比較的高いピークパワーを有しているときに層剥離が生じることを示唆している。非貫通ビア600を形成するプロセスの終了に近づくとき、照射されたレーザパルスが第2の導電体構造504を相当な程度に加熱し、その熱が第2の導電体構造504から加熱された第2の導電体構造504に隣接する誘電体構造500及び／又は誘電体構造508の（例えば、円「A」及び／又は「B」で特定されるような領域内の）非フィーチャ領域に伝達される。蓄積した熱は、誘電体構造500の隣接領域の温度をそのガラス転移温度以上に（場合によっては、その熱分解温度以上に）上昇させ、ワークピース102内での層剥離を生じさせるか、あるいはワークピース102をより層剥離が生じやすいものにし得る。

【0118】

非貫通ビア600を形成するプロセス中の層剥離を防止するために、出願人は、プロセスの終了に近づいたときに、ワークピース102に照射されるレーザパルスのピークパワーが、それよりも前にワークピース102に照射されたレーザパルスのピークパワーよりも低くなり得ることを発見した。照射されるレーザパルスのピークパワーを下げることで、照射されるレーザパルスを（例えば、図8から図29に関して上記で例示的に述べたスキャンパターンに沿って）空間的に分布させることとの組み合わせが、第2の導電体構造504が相当程度に加熱することを防止し、誘電体構造500の隣接領域に望ましくない程度に熱が蓄積して層剥離に寄与し得ることを防止することが分かった。

【0119】

例えば、図30を参照すると、非貫通ビア600を形成するためにワークピース102に照射される複数のレーザパルスは、共通のマザーレーザパルス3000から第1のポジション106により時間的に分割されたパルススライスとして提供され得る。パルススライスは、（例えば、図8から図29に関して上記で例示的に述べたような、あるいはそれ以外の）任意の好適な又は所望のスキャンパターンに沿ってスキャンされ得る。マザーレーザパルス3000は、9 μm （又はその前後）から11 μm （又はその前後）の範囲の波長（例えば、9.4

μm （又はその前後）、 $10.6\mu\text{m}$ （又はその前後）などの波長）及び 250W （又はその前後）から 2kW （又はその前後）の範囲のピークパワー又は平均パワーを有し得る。

【0120】

この場合において、パルススライスは、第1のパルススライス3002及び第2のパルススライス3004を含み得る。第1の期間（例えば、これは最初のスライス期間 p_1 の開始から m 番目のスライス期間 p_m の終了までの合計期間であり得る）中に複数の第1のパルススライス3002がワークピース102に照射され、その後、第2の期間（例えば、これは $m+1$ 番目のスライス期間 p_{m+1} の開始から n 番目のスライス期間 p_n の終了までの合計時間であり得る）中に複数の第2のパルススライス3004がワークピース102に照射される。図30は、（スライス期間 p_1 及び p_m に対応する）2つの第1のパルススライス3002のみを図示しているが、第1のスライス期間 p_1 と m 番目のスライス期間 p_m との間でマザーレーザパルス3000から任意の数の第1のパルススライス3002を時間的に分割してもよいことは理解できるであろう。同様に、図30は、（スライス期間 p_{m+1} 及び p_n に対応する）2つの第2のパルススライス3004のみを図示しているが、 $m+1$ 番目のスライス期間 p_{m+1} と n 番目のスライス期間 p_n との間でマザーレーザパルス3000から任意の数の第2のパルススライス3004を時間的に分割してもよいことは理解できるであろう。第1の期間中にマザーレーザパルス3000からパルススライスが時間的に分割される連続スライス期間は、上述したように、連続的であっても、間欠的であっても、あるいはこれらを組み合わせた形態であってもよい。同様に、第2の期間中にマザーレーザパルス3000からパルススライスが時間的に分割される連続スライス期間は、上述したように、連続的に生じるものであっても、間欠的に生じるものであっても、あるいはこれらを組み合わせた形態であってもよい。さらに、図30においては、 m 番目のスライス期間 p_m と $m+1$ 番目のスライス期間 p_{m+1} とが間欠的に生じるもの（すなわち、 m 番目スライス期間 p_m の後、 $m+1$ 番目のスライス期間 p_{m+1} の前に遅延が介在するもの）として図示されているが、 m 番目のスライス期間 p_m と $m+1$ 番目のスライス期間 p_{m+1} とが連続的に生じるもの（すなわち、 $m+1$ 番目のスライス期間 p_{m+1} が m 番目のスライス期間 p_m の直後に開始するもの）であってもよいことは理解できるであろう。

【0121】

第1のパルススライス3002は、実質的に一定の第1の光パワー P_1 を有するものとして特徴付けることができ、第2のパルススライス3004は、第1の光パワー P_1 より低い実質的に一定の第2の光パワー P_2 を有するものとして特徴付けることができる。一般的に、上述したように、それぞれのスライス期間中にAODに与えられるRF駆動信号の振幅を維持する又は変化させることにより、パルススライスの光パワーを（例えば、第1の光パワー P_1 に、あるいは第2の光パワー P_2 に）設定し得る。一実施形態においては、第1の光パワー P_1 は、 150W （又はその前後）から 300W （又はその前後）の範囲（例えば 200W 又はその前後）であり得る。第2の光パワー P_2 は、第1の光パワー P_1 の75%から25%の範囲（例えば50%又はその前後）であり得る。

【0122】

非貫通ビア600の形成中にワークピースに最終的に照射されるレーザパルスは、 $60\mu\text{m}$ （又はその前後）から $90\mu\text{m}$ （又はその前後）の範囲のスポットサイズを有し得る。しかしながら、スポットサイズは、 $60\mu\text{m}$ よりも小さくてもよく、例えば、 $30\mu\text{m}$ （又はその前後）から $60\mu\text{m}$ （又はその前後）の範囲であってもよいことは理解できるであろう。このため、以下に述べる例示的スキャンパターンに沿ってスキャンされるプロセススポットは、例えば $40\mu\text{m}$ （又はその前後）、 $50\mu\text{m}$ （又はその前後）、又は $85\mu\text{m}$ （又はその前後）のスポットサイズを有し得る。

【0123】

一実施形態においては、上述した第1の期間は、上述した第2の期間より短い。例えば、第1の期間は、 $4\mu\text{s}$ （又はその前後）から $8\mu\text{s}$ （又はその前後）の範囲であってもよく、第2の期間は、 $8\mu\text{s}$ （又はその前後）から $12\mu\text{s}$ （又はその前後）の範囲であってもよい。他の実施形態においては、第1の期間は、第2の期間と等しくてもよく、あるいは

これよりも長くてもよい。

【0124】

一実施形態においては、第1のパルススライス3002のそれぞれのパルス持続時間は、第2のパルススライス3004のそれぞれのパルス持続時間と等しい（又は少なくとも実質的に等しい）。例えば、第1のパルススライス3002及び第2のパルススライス3004は、それぞれ1 μ s（又はその前後）のパルス持続時間を有し得る。しかしながら、他の実施形態においては、第1のパルススライス3002のいずれかのパルス持続時間は、第2のパルススライス3004のいずれかのパルス持続時間よりも長い、あるいはこれよりも短い。

【0125】

図30は、異なる光パワーを有する2つのパルススライスセット（すなわち、第1のパルススライス3002と第2のパルススライス3004）を含むパルススライシング手法を図示しているが、付加的な1以上のパルススライスセットを含むように上述したパルススライシング手法を修正してもよいことは理解できるであろう。付加的なパルススライスセットのそれぞれは、第1の光パワーP1又は第2の光パワーP2とは異なる光パワーを有する1以上のパルススライスを含み得るか、あるいは、直前のパルススライスセットの光パワーとは異なる光パワーを有し得る。

【0126】

b. 比較的厚い層の除去の促進

（例えば、図8から図29に関して上記で例示的に述べたスキャンパターン又はそれ以外のスキャンパターンに沿って）レーザエネルギービームをスキャンすることによって（例えば、図5及び図6に関して上記で述べたように）ワークピース102にビアを形成する際に、第1の導電体構造502の厚さが比較的薄い場合には、レーザエネルギービームに照射されるプロセススポットが図8から図22及び図24(a)に関して上記で述べたようなスキャンパターンに沿ってスキャンされると、（ワークピース102の第1の導電体に形成される）ビア開口は、比較的低い真円度を有し得ることが分かっている。説明の便宜上、第1の導電体構造502は、5 μ m（又はその前後）未満の厚さを有する場合には「比較的薄い」と考えることができる。例えば、比較的薄い第1の導電体構造502は、4.5 μ m、4 μ m、3 μ m、2.5 μ m、2 μ m、1.5 μ m、1 μ mなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値以下の厚さを有し得る。

【0127】

実際、上述したように、1組の特性を有するレーザエネルギービームにより照射されるプロセススポットが、5 μ mより大きな（例えば、5 μ m、7 μ m、9 μ m、12 μ m、18 μ m、35 μ mなど、あるいはこれらの値のいずれかの間の値より大きな）厚さを有する第1の導電体構造502を除去するために、図8から図22及び図24(a)に関して上記で述べたようなスキャンパターンに沿ってスキャンされる場合には、レーザエネルギーが、第1の導電体構造502がアブレートされる前にビアが形成されるワークピース102の領域にわたって均一に（あるいは少なくともある程度均一に）分布し得る。しかしながら、出願人により行われたシミュレーションは、（例えば、同一組の特性により特徴付けられる）同一のレーザエネルギービームが同一のスキャンパターンに沿ってスキャンされるとき、第1の導電体構造502が（上述したように）比較的薄い場合には、プロセススポットがスキャンパターンの全長にわたってスキャンされる前に第1の導電体構造502がアブレートされることを示していた。このシミュレーションの結果は、出願人により行われた実験により確認されている。

【0128】

（例えば、ビア（例えば、非貫通ビア600又は貫通ビア700）を形成するプロセス中に）比較的薄い第1の導電体構造502に形成されたビア開口の真円度を改善するために、スキャンパターンの幾何的重心又はその近傍に（例えば、図8から図22及び図24(a)のいずれかに示されている座標0, 0又はその近傍に）1以上のスポット位置を含むように、図8から図22及び図24(a)に関して上記で述べたいずれかのようなスキャンパターンを修正することができる。ここで、図8から図22及び図24(a)に実際に示されているスキャンパ

ターンのスポット位置は、本明細書では「加熱スポット位置」と呼ばれ、スキャンパターンの幾何的重心又はその近傍にある1以上のスポット位置は、本明細書では「除去スポット位置」と呼ばれる。図8から図22及び図24(a)に関して上記で述べたような任意の好適な方法によって加熱スポット位置がレーザエネルギービームにより指定され、その後、1以上の除去スポット位置が指定される。しかしながら、加熱スポット位置を指定する際に、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームは、ビアが形成される第1の導電体構造502の領域を第1の導電体構造502の加工閾値温度又はその近傍の温度まで均一に（あるいは少なくともある程度均一に）加熱するのに十分であるが、加熱された第1の導電体構造502がアブレートされるには不十分な1組の特性（例えば、ピークパワー、パルス持続時間、パルスエネルギーなど）により特徴付けられる。その後、第1の導電体構造502の加熱された領域を（例えば、間接アブレーション、直接アブレーション、又はこれらの組み合わせにより）アブレートするのに十分な1組の特性（例えば、ピークパワー、パルス持続時間、パルスエネルギーなど）により特徴付けられるレーザエネルギービームを用いて、修正されたスキャンパターンの1以上の除去スポット位置が指定される。

【0129】

一実施形態においては、除去スポット位置を指定するために使用されるレーザエネルギービームの1以上のパルスにおけるピークパワーは、加熱スポット位置のそれぞれを指定するために使用されるレーザエネルギービームの1以上のパルスにおけるピークパワーよりも高い。それぞれのレーザパルスが除去スポット位置又は加熱スポット位置のいずれを指定しているかを問わず、それぞれのレーザパルスのピークパワーが、第1の導電体構造502の厚さに依存し得る（すなわち、第1の導電体構造502の厚さが減少すると、必要とされるピークパワーが減少する）ことは理解できるであろう。例えば、2 μ mの厚さを有する第1の導電体構造502については、1 kW（又はその前後）から2 kW（又はその前後）の範囲のピークパワーを有するレーザパルスにより任意の除去スポット位置を指定し、250 W（又はその前後）から350 W（又はその前後）の範囲のピークパワーを有するレーザパルスにより加熱スポット位置を指定し得る。第1の導電体構造502が1.5 μ mの厚さを有する場合、例えば、300 W（又はその前後）から500 W（又はその前後）の範囲のピークパワーを有するレーザパルスにより任意の除去スポット位置を指定し、例えば、150 W（又はその前後）から250 W（又はその前後）の範囲のピークパワーを有するレーザパルスにより加熱スポット位置を指定し得る。

【0130】

他の実施形態においては、除去スポット位置を指定するために使用されるレーザエネルギービームの1以上のパルスのパルス持続時間が、加熱スポット位置を指定するために使用されるそれぞれのパルスのパルス持続時間より長い、これと等しい。しかしながら、一般的には、加熱スポット位置が指定される合計時間は、1以上の除去スポット位置が指定される合計時間よりも長くなるであろう。例えば、1以上の除去スポット位置が指定される合計時間は、加熱スポット位置が指定される合計時間の10%（又はその前後）から25%（又はその前後）の範囲となり得る。加熱スポット位置が指定される合計時間の25%（又はその前後）よりも多くの時間の間（例えば、加熱スポット位置が指定される合計時間の30%から60%）、1以上の除去スポット位置が指定されてもよいことは理解できるであろう。この場合には、除去ステップ中に照射されるレーザパルスのエネルギーは、誘電体構造500の一部を除去するためにも使用されるであろう。

【0131】

ある実施形態においては、上述したように第1のポジショナ106を動作させることにより、第1の導電体構造502の加熱と除去の間にワークピース102に照射されるレーザエネルギービームのピークパワー、パルス持続時間のような特性を好適に修正することができる。

【0132】

v. フィーチャ形状の歪みに関するさらなる議論

上述したように、図8から図22及び図24(a)において示されているスキャンパターンは

、 $10\mu\text{m}$ （又はその前後）から $60\mu\text{m}$ （又はその前後）の範囲の半径を有するものとして特徴付けることができる。第1の導電体502に形成されるようなビア開口の形状（例えば真円度）のような所望の特性を有するビアを形成するのに十分となるように、スキャンパターンの特性（例えば、スキャンパターン中のスポット位置の数、スキャンパターン中のスポット位置の配置、スキャンパターン中のスポット位置が指定される順序又は順番、連続的に指定されるスポット位置間の距離など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）及びワークピース102に照射されるレーザエネルギービームの特性（例えば、平均パワー、パルス持続時間、パルス繰り返し率、パルスエネルギー、ピークパワー、スポットサイズなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）が、維持されるか修正されるのであれば、スキャンパターンの半径を大きくできることは理解できるであろう。

10

【0133】

例えば、約 $60\mu\text{m}$ より大きな半径（例えば $70\mu\text{m}$ 以上）を有するように図17又は図19に示されるような連続的に指定される第2型スキャンパターンを修正する場合は、修正された連続的に指定される第2型スキャンパターンは、（例えば、隣接するスポット位置の間、連続的に指定されるスポット位置の間などで所望のピッチを維持するために）例えばより多くのスポット位置を含み得る。必要に応じて、第1の導電体502に形成されるようなビア開口の形状（例えば真円度）のような所望の特性を有するビアを形成するように、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームの1以上の特性（例えば、平均パワー、パルス持続時間、パルス繰り返し率、パルスエネルギー、ピークパワー、スポットサイズなど）も修正することができる。しかしながら、スキャンパターン中の最初のスポット位置と最後のスポット位置との間の第1の導電体の部分がまだ残っており、低い真円度のビア開口が生成される場合があるので、連続的に指定される第2型スキャンパターンを修正する際には、（例えば、隣接するスポット位置の間、連続的に指定されるスポット位置の間などで所望のピッチを維持するために）単により多くのスポット位置を含めない必要がある場合がある。

20

【0134】

ワークピース102の第1の導電体（例えば銅層）に形成される真円度の低いビア開口の一例が図46の顕微鏡写真に示されている。図46に示されるビア開口は、図17及び図19に示されるスキャンパターンに類似する連続的に指定される第2型スキャンパターンに沿ってワークピース102にわたって（例えば、図17及び図19に示されるスキャンパターンに関して上記で述べた範囲内に属する特性を有するレーザエネルギービームにより照射される）プロセススポットをスキャンすることにより形成されたものである。しかしながら、特に、スキャンパターンの半径を $70\mu\text{m}$ に増やした。図46に示される顕微鏡写真においては、破線領域内に位置する「タブ」は、ビア開口の真円度が低くなる原因である。特定のリオンに拘束されることは望まないが、最後のスポット位置が指定されるときまでに、スキャンパターンの第1のスポット位置又はその近傍内にある第1の導電体502の部分の温度は、第1の導電体502の加工閾値温度を下回っていたと考えられる。このため、最後のスポット位置が指定されるときには、第1のスポット位置又はその近傍では第1の導電体502内にその除去を促進するのに十分な熱エネルギーがなかった。

30

【0135】

一実施形態においては、第1の導電体502のビア開口の真円度は、他のスポット位置のすべてが指定された後にスキャンパターン中で最初に指定されたスポット位置のうち1つ以上を指定することにより改善され得る。例えば、図47に示される連続的に指定される第2型スキャンパターンを参照すると、1番目から24番目のスポット位置1～24が指定された後、1番目のスポット位置1により指定されたスキャンパターン内の位置が再び指定される（このため、「1，25」により示される点は、スキャンパターン中の1番目のスポット位置と25番目のスポット位置の位置を表している）。必要に応じて、25番目のスポット位置の後に、以前に指定された他のスポット位置を指定することができる。例えば、図47を再び参照すると、スポット位置2は、スポット位置25を指定した後に指定される（このため、「2，26」により示される点は、互いに重なる2番目のスポット位置と26

40

50

番目のスポット位置の位置を表している)。スポット位置26を指定した後にスポット位置3を指定してもよい(このため、「3, 27」により示される点は、互いに重なる3番目のスポット位置と27番目のスポット位置の位置を表している)。本明細書で使用される場合には、(例えば、上述したような)互いに重なるスポット位置は、本明細書では「連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置」と呼ばれる。任意の連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置に関して、最後に指定されるスポット位置は、「最終指定重複スポット位置」と呼ばれる。このため、「1, 25」により示されるスポット位置では、スポット位置25を「最終指定重複スポット位置」と呼ぶことができ、「2, 26」により示されるスポット位置では、スポット位置26を「最終指定重複スポット位置」と呼ぶことなどができる。

10

【0136】

第1の導電体におけるビア開口の所望の真円度を維持するという意味では、適切な連続的に指定される第2型スキャンパターンは、第1の1番目のスポット位置を連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置として提供する。1番目のスポット位置に続く1以上の連続的に指定されるスポット位置は、連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置としても提供され得る。したがって、第2型スキャンパターン内に含まれ得る連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置の数は、1、2、3、4、5、などと等しくなり得る。第2型スキャンパターン内に含まれる連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置の数を特定する代わりに、第2型スキャンパターンに含まれ得る連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置の数を第2型スキャンパターン中のスポット位置の総数に対する百分率として表すことができる。この場合には、連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置は、第2型スキャンパターン中のスポット位置の総数の12%(又はその前後)を占め得る。例えば、この百分率は、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10%、11%、12%、13%など、あるいはこれらの値のいずれかの間の値になり得る。しかしながら、最終的には、第2型スキャンパターン内に含まれる連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置の数は、上述したスキャンパターン特性のいずれか、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームの特性のいずれか(例えば、波長、平均パワー、パルス持続時間、パルス繰り返し率、パルスエネルギー、ピークパワー、光強度、フルエンス、スポットサイズなど)、ワークピース102の特性(例えば第1の導電体の厚さなど)など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上のファクタに依存し得る。図47に関して上記で述べたような連続的に指定される第2型スキャンパターンを提供することにより、1番目のスポット位置(すなわちスポット位置1)又はその近傍における第1の導電体の領域がその除去が促進するのに十分な熱エネルギーを蓄積し、これにより、(例えば図48に示されるような)高い真円度のビア開口を第1の導電体に生成することができる。連続指定第2型スキャンパターン重複スポット位置として提供されるスポット位置が多すぎる場合には、第1の導電体が過度に加工され、再び図49に示されるような低い真円度のビア開口が第1の導電体に生成されることがあることに留意すべきである。

20

30

【0137】

ここまでは、図17及び図19に関して述べたもののいずれかのような連続的に指定される第2型スキャンパターン中の連続的に指定されるスポット位置のそれぞれのペア間の距離は同一(又は少なくとも略同一)である。例えば、図17又は図19のいずれかにおけるスポット位置3と4との間の距離は、スポット位置1と最後のスポット位置(すなわち、図17におけるスポット位置12及び図19におけるスポット位置18)との間の距離と同一(又は略同一)である。第1の導電体におけるビア開口の所望の真円度を維持するという意味では、指定される最後のスポット位置を含む連続的に指定されるスポット位置のペア間の距離を、連続的に指定されるスポット位置の残りのペアが離間する距離より短くできるように、適切な連続的に指定される第2型スキャンパターンを構成することができる。例えば、図50を参照すると、スポット位置24と25との間の距離は、スポット位置1と2との間、スポット位置10と11との間などの距離よりも短くなり得る。一般的に、指定され

40

50

る最後の2つのスポット位置の間（例えばスポット位置24と25との間）の距離は、連続的に指定されるスポット位置の他のペア間の距離の30%（又はその前後）から99%（又はその前後）の間の範囲にあり得る。図50に関して上記で述べたような連続的に指定される第2型スキャンパターンを提供することにより、最初のスポット位置（すなわちスポット位置1）又はその近傍における第1の導電体の領域がその除去を促進するのに十分な熱エネルギーを蓄積し、これにより、高い真円度のビア開口を第1の導電体に生成することができる。

【0138】

他の実施形態においては、連続的に指定されるスポット位置の少なくとも1つのペア間に1以上のスポット位置を含むように、連続的に指定される第2型スキャンパターンを修正することができる。このため、第2型スキャンパターンのある部分における連続的に指定されるスポット位置は（例えば、連続的に指定される第2型スキャンパターンと同様に）互いに隣接し、第2型スキャンパターンの他の部分における連続的に指定されるスポット位置は（例えば、非連続的に指定される第2型スキャンパターンと同様に）互いに隣接しないことがある。このタイプの第2型スキャンパターンは、本明細書では「ハイブリッド第2型スキャンパターン」という。ハイブリッド第2型スキャンパターンの例が図51に示されている。図51を参照すると、ハイブリッド第2型スキャンパターンは、スポット位置1と2との間に位置するスポット位置25（スポット位置24の後に連続して指定される）を含み得る。図51は、スポット位置1と2との間に1つのスポット位置（すなわちスポット位置25）だけ位置しているように図示しているが、スポット位置1と2との間又は連続的に指定されるスポット位置の他の任意のペアの間に複数のスポット位置が配置されていてもよいことは理解できるであろう。必要に応じて、ハイブリッド第2型スキャンパターンは、スポット位置2と3との間のような、連続して指定されるスポット位置の1以上の付加的なペアの間に位置するスポット位置26（スポット位置25の後に連続して指定される）のような1以上の付加的なスポット位置をさらに含み得る。図51に関して上記で述べたようなハイブリッド第2型スキャンパターンを提供することにより、最初のスポット位置（すなわちスポット位置1）又はその近傍の第1の導電体の領域は、その除去を促進するのに十分な熱エネルギーを蓄積し、これにより、（例えば、図48に示されるような）高い真円度のビア開口を第1の導電体に生成することができる。しかしながら、最終的には、連続して指定されるスポット位置の1つのペアの間に追加されるスポット位置の数又はその間にスポット位置が配置される連続して指定されるスポット位置のペアの数は、上述したスキャンパターン特性のいずれか、ワークピース102に照射されるレーザエネルギービームの特性のいずれか（例えば、波長、平均パワー、パルス持続時間、パルス繰り返し率、パルスエネルギー、ピークパワー、光強度、フルエンス、スポットサイズなど）、ワークピース102の特性（例えば第1の導電体の厚さなど）など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような1以上のファクタに依存し得る。連続的に指定されるスポット位置の1つのペアの間に提供されるスポット位置が多すぎる場合、又はその間に1以上のスポット位置が存在する連続的に指定されるスポット位置のペアが多すぎる場合には、第1の導電体が過度に加工され、（例えば図49に示されるような）低い真円度のビア開口が第1の導電体に生成されることがあることに留意すべきである。

【0139】

上記では、比較的大きな半径を有し、真円度の高い開口を有するビアを生成するのに有用な第2型スキャンパターンが図47、図50及び図51に関して別個に述べられてきたが、第2型スキャンパターンのそれぞれのタイプに固有の特性を任意の好適な又は所望の方法で組み合わせてもよいことは認識すべきである。

【0140】

B. パンチプロセスによるフィーチャ形成

（例えば、上述のように構成される）ワークピース102にビア（例えば、図6に例示的に示されるような非貫通ビア600又は図7に例示的に示されるような貫通ビア700）のようなフィーチャを形成するために、第1のポジショナ106を多軸AODシステム（例えばA

10

20

30

40

50

ODシステム200)として提供し、ワークピース102における同一の(又は実質的に同一の)位置に繰り返しプロセススポットを生成するように動作させてもよい。本明細書で 사용되는場合には、「パンチプロセス」という用語は、ワークピース102の同一の(又は実質的に同一の)スポット位置にレーザパルスセットを照射してフィーチャ(例えば、ビア又は他の開口)を形成することをいう。(例えば、ビア又は他の開口のようなフィーチャを形成するための)パンチプロセス中に、全パルス偏向又は部分パルス偏向(上述したような、すなわちパルススライシング)又は全パルス偏向と部分パルス偏向との組み合わせを行うように第1のポジショナ106を動作させることができる。

【0141】

(例えば、ビア又は他の開口のようなフィーチャを形成するための)パンチプロセス中に、(レーザパルスが照射されることによる結果として)ワークピース102の材料(例えば誘電体構造500)が過度に加熱されることを防止する、あるいは、ワークピース102(又はワークピース102の1以上の構成要素構造)が望ましくない形で反ったり、層剥離したり、あるいは改質されたりすることを防止するように第1のポジショナ106を動作させることができる。以下でより詳細に説明するように、パンチプロセス中に、レーザパルスセット中の少なくとも1つの連続的なレーザパルスペア中のレーザパルスが間欠的に照射される(すなわち、あるレーザパルスが、先のレーザパルスの直後の遅延に続いて開始する)ことを確実にするように、あるいはレーザパルスセット中のあるレーザパルスの光パワーを他のレーザパルスに対して修正する、あるいはレーザパルスセット中のあるレーザパルスのパルス持続時間を他のレーザパルスに対して修正するなど、あるいはこれらを任意に組み合わせるように第1のポジショナ106を動作させることができる

【0142】

i. パルススライシングに関する実施形態の例

図32を参照すると、パンチプロセス中にマザーレーザパルス(例えばマザーレーザパルス3201)を複数のパルススライスに時間的に分割するように第1のポジショナ106を動作させることができる。このため、少なくとも1つの連続的に分割されたパルススライスペア内において1次角度範囲116内で同じ角度(又は少なくとも実質的に同じ角度)だけパルススライスを偏向するように第1のポジショナ106を動作させることができる。複数のパルススライス自体を複数のパルススライスセット(例えば、パルススライスセット3200a及び3200b、それぞれを総称して「パルススライスセット3200」という)にグループ分けすることができることは理解できるであろう。この場合において、共通パルススライスセット3200中のパルススライスを1次角度範囲116内で同じ角度(又は少なくとも実質的に同じ角度)だけ偏向するように、また、異なるパルススライスセット3200中のパルススライスを1次角度範囲116内で異なる角度(又は少なくとも実質的に異なる角度)だけ偏向するように第1のポジショナ106を動作させることができる。例えば、パルススライスセット3200a中のパルススライスを図1に示される1次角度範囲116内の第1の角度だけ(又は図31に示される第1の1次角度範囲116a内の角度だけ)偏向し、パルススライスセット3200b中のパルススライスを図1に示される1次角度範囲116内の第2の角度だけ(又は図31に示される第2の1次角度範囲116b内の角度だけ)偏向するように第1のポジショナ106を動作させることができる。しかしながら、パルススライスセット3200a及び3200b中のパルススライスは共通パルススライスセットとして考えることができ、したがってパルススライスのすべてのパルススライスセット3200a及び3200bを1次角度範囲116内の同一の(又は少なくとも実質的に同一の)角度に偏向できることは理解できるであろう。例示的に示されているように、所定の時点においては、パルススライスのパワーは、そのパルススライスが時間分割されるマザーレーザパルス3201のパワーより低い。マザーレーザパルス3201とパルススライスとの間のパワーの相違は、パルススライスを生成するように第1のポジショナ106を動作させたときの第1のポジショナ106における1以上のAODの回折効率、第1のポジショナ106内でのAODの使用と関連付けられた本来的な光損失など、又はこれらを任意に組み合わせたものの結果であり得る。

【0143】

図示された実施形態においては、パルススライスセット3200aは、1次パルススライス3202aと複数の2次パルススライス3204aとを含んでいる。同様に、図示された実施形態においては、パルススライスセット3200bは、1次パルススライス3202bと複数の2次パルススライス3204bとを含んでいる。本明細書で使用される場合には、1次パルススライス3202a及び3202bのそれぞれを総称して「1次パルススライス3202」といい、2次パルススライス3204a及び3204bのそれぞれを総称して「2次パルススライス3204」という。図示された実施形態においては、1次パルススライス3202のパルス持続時間及びパルスエネルギーは、それぞれの2次パルススライス3204のパルス持続時間及びパルスエネルギーよりも大きい。しかしながら、パルススライスセット3200aは、複数の1次パルススライス3202aと1以上の2次パルススライス3204aとを含むことができる。同様に、他の実施形態においては、パルススライスセット3200bは、複数の1次パルススライス3202bと1以上の2次パルススライス3204bとを含むことができる。

【0144】

一実施形態においては、1次パルススライス3202は、ワークピース102の第1の導電体構造502を（直接アブレーション、間接アブレーション、又はこれらの組み合わせを介して）アブレートするために使用される。この場合において、単一の1次パルススライス3202のパルス持続時間及びパルスエネルギーは、ワークピース102の第1の導電体構造502をアブレートするのに十分なものである。別の場合では、共通パルススライスセット3200における複数の1次パルススライス3202のそれぞれのパルス持続時間及びパルスエネルギーは、複数の1次パルススライス3202により第1の導電体構造502のアブレーションが行われるのに十分なものである。しかしながら、他の実施形態においては、ワークピース102上の所望のスポット位置に第1の導電体構造502が存在しない場合には、ワークピース102の誘電体構造500を（直接アブレーション、間接アブレーション、又はこれらの組み合わせを介して）アブレートするために1以上の1次パルススライス3202を使用することができる。パルススライスセット中の少なくとも1つの1次パルススライス3202のパルス持続時間、パルスエネルギー、ピーク光パワー、（例えば、図32における様々なパルススライスにより示されているような矩形の）時間的光パワープロファイルは、同一のパルススライスセット中の他の1次パルススライス3202のパルス持続時間、パルスエネルギー、ピーク光パワー、（例えば、図32における様々なパルススライスにより示されているような矩形の）時間的光パワープロファイルよりも大きくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよく、あるいはこれと同じであってもよいことに留意すべきである。

【0145】

一実施形態においては、それぞれの2次パルススライス3204は、一般的に、第2の導電体構造504を大きく加工することなく（例えば、非貫通ビア600のような非貫通ビアを形成するように）ワークピース102の誘電体構造500を除去するために使用される。この場合において、それぞれの2次パルススライス3204のパルス持続時間及びパルスエネルギーは、ワークピース102の第1の導電体構造502を（例えば、アブレーション、蒸発、溶融など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを介して）除去するのに十分なものであり、少なくとも最後の2次パルススライス3204のパルス持続時間及び／又はパルスエネルギーは、第2の導電体構造504を大きく加工することなく、ワークピース102の誘電体構造500を除去するのに十分なものである。このため、1つのパルススライスセットにおける少なくとも1つの2次パルススライス3204のパルス持続時間、パルスエネルギー、ピーク光パワー、（例えば、図32における様々なパルススライスにより示されているような矩形の）時間的光パワープロファイルは、同一のパルススライスセットにおける他の2次パルススライス3204のパルス持続時間、パルスエネルギー、ピーク光パワー、（例えば、図32における様々なパルススライスにより示されているような矩形の）時間的光パワープロファイルよりも大きくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよく、あるいはこれと同じであってもよい。

【0146】

他の実施形態においては、（直接アブレーション、間接アブレーション、又はこれらの

組み合わせを介して) ワークピース102の第2の導電体構造504をアブレートするために1以上の2次パルススライス3204を使用することができる。この場合において、(例えば、貫通ビア700のような貫通ビアを形成するために)(例えば、アブレーション、蒸発、溶融など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを介して)誘電体構造508を除去するために、第2の導電体構造504がアブレートされた後にワークピース102に照射される1以上の2次パルススライス3204を使用することができる。このため、あるパルススライスセットにおける少なくとも1つの2次パルススライス3204のパルス持続時間、パルスエネルギー、ピーク光パワー、(例えば、図32における様々なパルススライスにより示されているような矩形の)時間的光パワープロファイルは、同一のパルススライスセットにおける他の2次パルススライス3204のパルス持続時間、パルスエネルギー、ピーク光パワー、(例えば、図32における様々なパルススライスにより示されているような矩形の)時間的光パワープロファイルよりも大きくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよく、あるいはこれと同じであってもよい。

10

【0147】

しかしながら、さらに他の実施形態においては、貫通ビア(例えば貫通ビア700)を形成するためにパルススライスセット3200a及び3200bを使用することができる。この場合には、第1の導電体構造502及び誘電体構造500から材料を順次除去するためにパルススライスセット3200aを使用することができ、第2の導電体構造504及び誘電体構造508から材料を順次除去するためにパルススライスセット3200bを使用することができる。

【0148】

20

さらに他の実施形態においては、誘電体構造500が非均質な材料(例えば、エポキシ樹脂マトリクス内に繊維ガラス織布を含むガラス繊維強化エポキシ積層体として知られるFR4)である場合、また、ワークピース102の所望のスポット位置での誘電体構造500の一部がガラス材料を含んでいる場合には、所望のスポット位置でガラス材料を(例えば、アブレーション、蒸発、溶融など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを介して)効率的に除去できるように、ガラス材料を除去することを意図している少なくとも1つの2次パルススライス3204のパルス持続時間及びパルスエネルギーをエポキシ樹脂を除去することのみを意図している少なくとも1つの他の2次パルススライス3204のパルス持続時間及びパルスエネルギーに対して修正することができる。このため、あるパルススライスセットにおける少なくとも1つの2次パルススライス3204のパルス持続時間、パルスエネルギー、ピーク光パワー、(例えば、図32における様々なパルススライスにより示されているような矩形の)時間的光パワープロファイルは、同一のパルススライスセットにおける他の2次パルススライス3204のパルス持続時間、パルスエネルギー、ピーク光パワー、(例えば、図32における様々なパルススライスにより示されているような矩形の)時間的光パワープロファイルよりも大きくてもよく、あるいはこれよりも小さくてもよく、あるいはこれと同じであってもよい。

30

【0149】

パンチプロセス中に、連続するレーザパルスが間欠的に照射される場合は、あるレーザパルスの開始と前のレーザパルスの終了との間の時間(本明細書では「ギャップ時間」ともいう)が、次のレーザパルスが照射される前に、スポット位置又はその近傍の材料を(例えば、材料のダメージ閾値温度より低い温度に)ある程度冷却するのに十分なものであることを確実にするように、第1のポジション106を動作させることができる。例えば、図32を参照すると、パルススライスセット3200aの第1の2次パルススライス3204aの開始とパルススライスセット3200aの1次パルススライス3202aの終了との間のギャップ時間Tg1aが、第1の2次パルススライス3204aが照射される前に、スポット位置又はその近傍の誘電体構造500の材料をある程度冷却するのに十分なものであることを確実にし、これによりスポット位置又はその近傍における誘電体構造500の材料の望ましくない改質を避けることができるように、第1のポジション106を動作させることができる。パルススライスセット3200bの第1の2次パルススライス3204bの開始とパルススライスセット3200bの1次パルススライス3202bの終了との間のギャップ時間Tg1bは、ギャップ時

40

50

間Tg1aよりも長くてもよく、あるいはこれよりも短くてもよく、あるいはこれと等しくてもよい。

【0150】

図32に示されるように、パルススライスセット3200aの連続的に照射される2次パルススライス3204aの間のギャップ時間Tg2が、スポット位置又はその近傍での誘電体構造500の材料をその周囲の材料に望ましくないダメージを与えることなく、誘電体構造500の好適な加工を可能にするのに十分な温度に維持するのに十分なものであることを確実にするように、第1のポジション106を動作させることができる。パルススライスセット3200bの連続的に照射される2次パルススライス3204bの間のギャップ時間は、ギャップ時間Tg2よりも長くてもよく、あるいはこれよりも短くてもよく、あるいはこれと等しくてもよい。

10

【0151】

a. レーザパルスセットのシーケンシャル偏向とインターリーブ偏向

図32を参照すると、パンチプロセス中にマザーレーザパルス3201を複数のパルススライスセット3200に時間的に分割するように第1のポジション106を動作させることができる。レーザパルススライスセット3200a中のパルススライスは、レーザパルススライスセット3200b中のパルススライスが異なる角度に偏向される前に、すべて1次角度範囲116内の同一の（又は少なくとも実質的に同一の）角度に偏向される。このように、シーケンシャル偏向法によりレーザパルススライスセット3200a及び3200bを偏向するように第1のポジション106を動作させる。他の実施形態においては、インターリーブ偏向法によりレーザパルススライスセット3200a及び3200bを偏向するように第1のポジション106を動作させることができる。インターリーブ偏向法においては、パンチプロセス中に、マザーレーザパルス3201を複数のパルススライスセット3200に時間的に分割するように第1のポジション106を動作させ、レーザパルススライスセット3200a及び3200b中の1以上のパルススライスが1次角度範囲116内の異なる角度の間で交互に偏向される。

20

【0152】

例えば、図33を参照すると、1次パルススライス3202aが図1に示される1次角度範囲116内の第1の角度だけ（又は図31に示される第1の1次角度範囲116a内の第1の角度だけ）偏向され、その後、1次パルススライス3202bが図1に示される1次角度範囲116内の第2の角度だけ（又は図31に示される第2の1次角度範囲116b内の第1の角度だけ）偏向され、その後、2次パルススライス3204aが図1に示される1次角度範囲116内の第1の角度だけ（又は図31に示される第1の1次角度範囲116a内の第1の角度だけ）偏向され、その後、2次パルススライス3204bが図1に示される1次角度範囲116内の第2の角度だけ（又は図31に示される第2の1次角度範囲116b内の第1の角度だけ）偏向されるインターリーブ偏向法により第1のポジション106を動作させることができる。

30

【0153】

他の例においては、図34を参照すると、図33に関して述べた方法と類似するが、2次パルススライス3204a及び3204bが図1に示される1次角度範囲116内の第1の角度と第2の角度との間で（又は図31に示される第1の1次角度範囲116a及び第2の1次角度範囲116bの第1の角度の間で）交互に偏向されるインターリーブ偏向法により第1のポジション106を動作させることができる。

40

【0154】

パルススライスセット中のパルススライス間の上述したギャップ時間を考慮すると、シーケンシャル偏向法又はインターリーブ偏向法により第1のポジション106を動作させるかどうかにかかわらず、パンチプロセスによりフィーチャ（例えば、ビア又は他の開口）を形成するのに必要とされる合計時間が変化し得る。例えば、パルススライスセット3200aを使用してフィーチャを形成するのに必要な合計時間がTaであり、パルススライスセット3200bを使用してフィーチャを形成するのに必要な合計時間がTb（TbはTaより長くてもよく、あるいはこれより短くてもよく、あるいはこれと等しくてもよい）である場合には、パルススライスセット3200a及び3200bを用いて2つのフィーチャを形成するのに必

50

要な合計時間は、シーケンシャル偏向法により第1のポジション106を動作させる場合（例えば図32を参照）には T_{t1} である。しかしながら、図33に示されるインターリーブ偏向法を用いて、パルススライスセット3200a及び3200bを用いて同一の2つのフィーチャを形成するのに必要な合計時間は、 T_{t1} よりも短い T_{t2} である。図33においては、ギャップ時間 T_{g1b} がギャップ時間 T_{g1b} よりも長いものとして示されているが、2次パルススライス3204aのパルス持続時間及び／又はパワーを調整することにより、1次パルススライス3202bと第1の2次パルススライス3204aとの間のギャップ時間を調整することにより、2次パルススライス3204aの間のギャップ時間 T_{g2} を調整することにより、最後の2次パルススライス3204aと最初の2次パルススライス3204bとの間のギャップ時間を調整するなどにより、あるいはこれらを任意に組み合わせることにより、ギャップ時間 T_{g1b} と等しくなるようにしてもよいことに留意されたい。

10

【0155】

同様に、図34に示されるインターリーブ偏向法を用いると、パルススライスセット3200a及び3200bを用いて2つのフィーチャを形成するのに必要な合計時間は T_{t2} である。図34においては、ギャップ時間 T_{g1b} がギャップ時間 T_{g1b} よりも短いものとして示されているが、例えば、第1の2次パルススライス3204aのパルス持続時間及び／又はパワーを調整することにより、1次パルススライス3202bと第1の2次パルススライス3204aとの間のギャップ時間を調整することにより、2次パルススライス3204aの間のギャップ時間 T_{g2} を調整することなどにより、あるいはこれらを任意に組み合わせることにより、ギャップ時間 T_{g1b} と等しくなるようにしてもよいことに留意されたい。

20

【0156】

パンチプロセスに関して本明細書で実施形態を述べてきたが、これらの実施形態は、（例えば、図8から図29、図47、図50又は図51に関して本明細書において例示的に述べられているスキャンパターンに沿ってプロセススポットをスキャンすることにより、あるいはそれ以外の方法により）スキャンパターンを用いてフィーチャを形成するためにも適用できることは理解できるであろう。

【0157】

b. レーザパルスセットに関する追加の例

図32～図34に示される実施形態においては、パルススライスセット中のそれぞれのパルススライスは、矩形の時間的パワープロファイルを有しており、パルススライスセット中の任意のパルススライスのピーク光パワーは、そのパルススライス中の他のすべてのパルススライスのピーク光パワーと同一である。他の実施形態においては、パルススライスセット中の1以上のパルススライスは、他の形状の時間的パワープロファイルを有していてもよく、パルススライスセット中の任意のパルススライスのピーク光パワーは、そのパルススライスセット中の他のパルススライスと異なってもよく、あるいはその組み合わせでもよい。

30

【0158】

さらに、図32～図34に示される例では、異なるパルススライスセットの間では、1つのパルススライスセット内におけるパルススライスの特性（すなわち、パルスエネルギー、パルス持続時間、時間的パワープロファイル、パルススライス数、ギャップ時間など）は、他のパルススライスセット内における対応するパルススライスの特性と同一（又は実質的に同一）である。このため、共通マザーパルスから時間的に分割されたパルススライスセットは、同一であるものと考えることができる。他の実施形態においては、1つのパルススライス中の少なくとも1つのパルススライスの少なくとも1つの特性（例えば、パルスエネルギー、パルス持続時間、時間的パワープロファイル、パルススライス数、ギャップ時間など）は、他のパルススライスセット中の少なくとも1つの対応するパルススライスの特性と異なっている。このため、共通マザーパルスから時間的に分割されたパルススライスセットは、異なるものと考えることができる。

40

【0159】

図35～図45は、フィーチャ（例えば、非貫通ビアや貫通ビアのようなビア又は他の開

50

口)を形成するために(例えば、本明細書で述べた上述したスキャンパターンのいずれかに沿ってプロセススポットをスキャンすることにより、あるいは他の方法により)パンチプロセス中又はプロセススポットのスキャンプロセス中に第1のポジション106を動作させることにより生成され得る例示的なパルススライスセットのさらに他の実施形態を示すものである。

【0160】

図42を参照すると、2次パルススライス3204の時間的パワープロファイルは、(例えば、下方に傾斜した線により示されるように)連続的に変調される。この場合において、図42に示される2次パルススライス3204は、1次角度範囲116内の単一の角度だけ偏向されるか、共通の1次角度範囲116内の複数の角度だけ(経時的に)偏向され得る。図42

10

【0161】

図43を参照すると、2次パルススライス3204の時間的パワープロファイルは、段階的に変調されている。この場合には、図43に示される2次パルススライス3204は、1次角度範囲116内の単一の角度だけ偏向されるか、共通の1次角度範囲116内の複数の角度だけ(経時的に)偏向され得る。図42に示される例と同様に、図43に示される2次パルススライス3204を(例えば、2次パルススライス3204が比較的高い光パワーを有するよう

20

【0162】

IX. 結論

上記は、本発明の実施形態及び例を説明したものであって、これに限定するものとして解釈されるものではない。いくつかの特定の実施形態及び例が図面を参照して述べられたが、当業者は、本発明の新規な教示や利点から大きく逸脱することなく、開示された実施形態及び例と他の実施形態に対して多くの改良が可能であることを容易に認識するであろう。したがって、そのような改良はすべて、特許請求の範囲において規定される本発明の範囲に含まれることを意図している。例えば、当業者は、そのような組み合わせが互いに排他的になる場合を除いて、いずれかの文や段落、例又は実施形態の主題を他の文や段落、例又は実施形態の一部又は全部の主題と組み合わせることができることを理解するであろう。したがって、本発明の範囲は、以下の特許請求の範囲とこれに含まれるべき請求項の均等物とによって決定されるべきである。

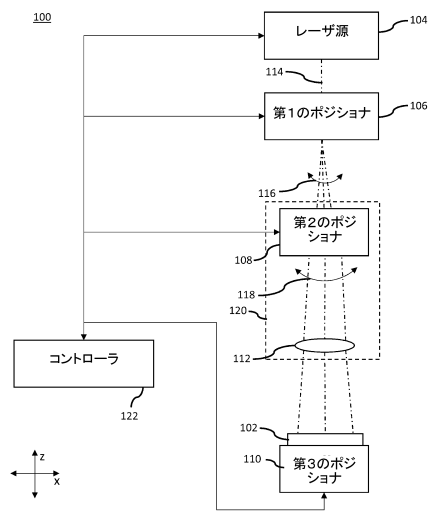
30

40

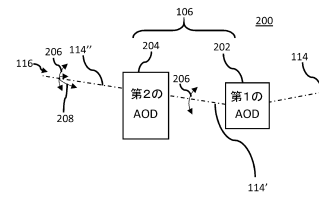
50

【図面】

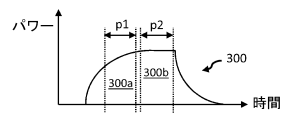
【図 1】



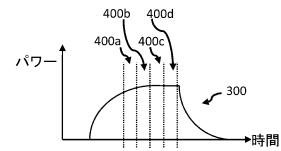
【図 2】



【圖 3】



【図 4】



【図 5】

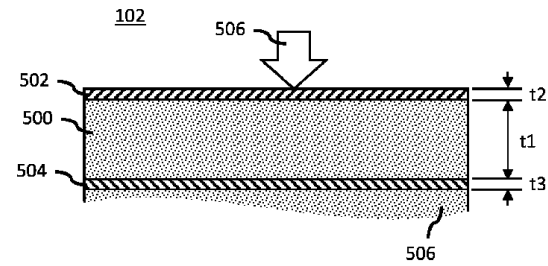


FIG. 5

【図 6】

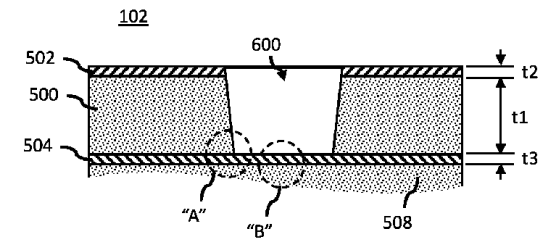


FIG. 6

10

【図 7】

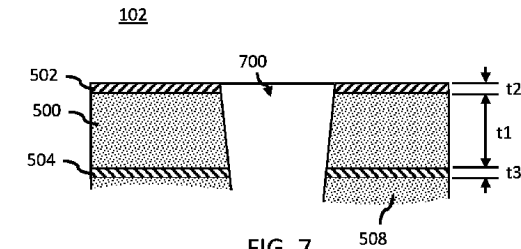


FIG. 7

【図 8】

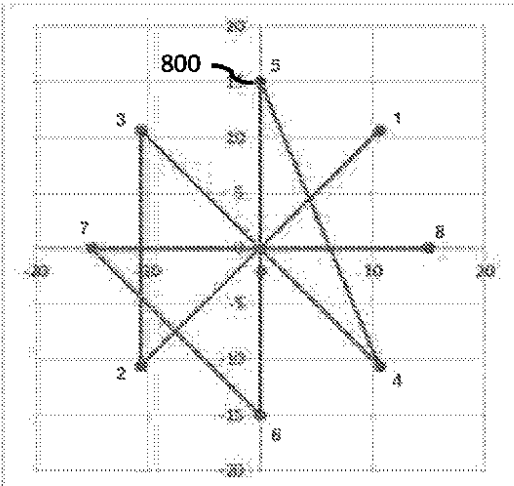


FIG. 8

20

30

40

50

【図 9】

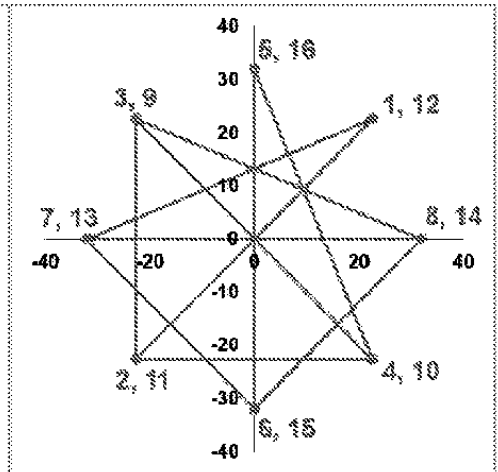


FIG. 9

【図 10】

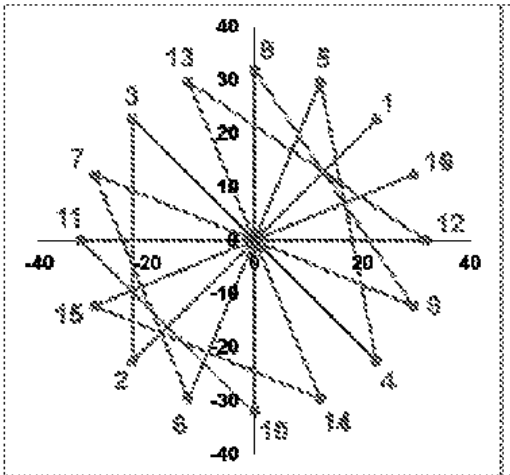


FIG. 10

【図 11】

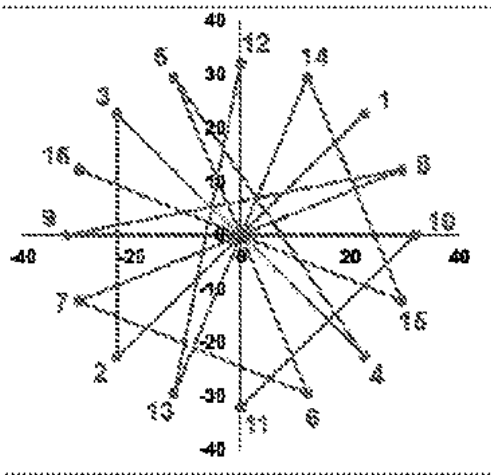


FIG. 11

【図 12】

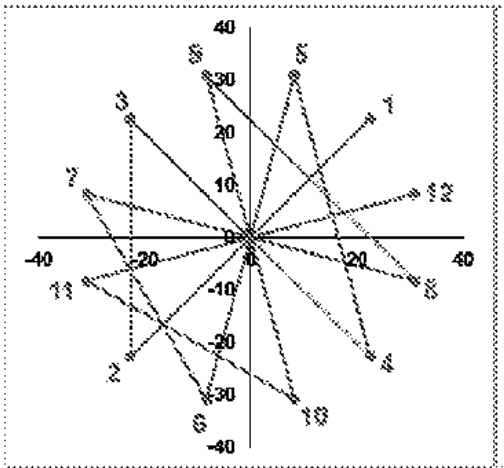


FIG. 12

10

20

30

40

50

【図 1 3】

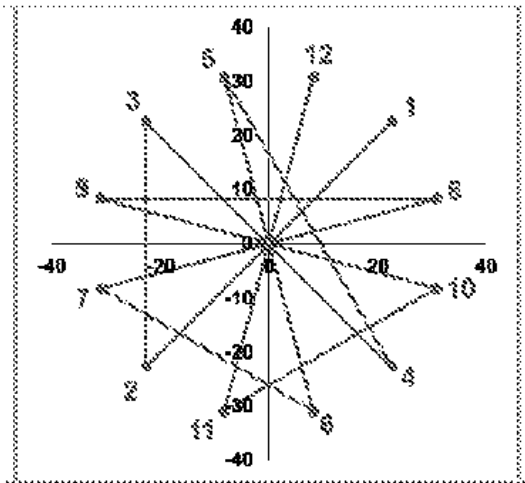


FIG. 13

【図 1 4】

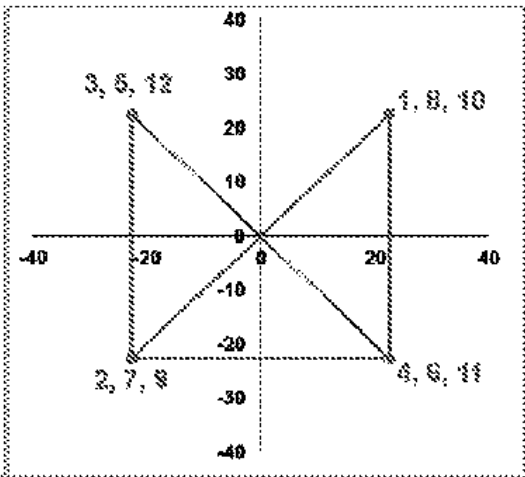


FIG. 14

【図 1 5】

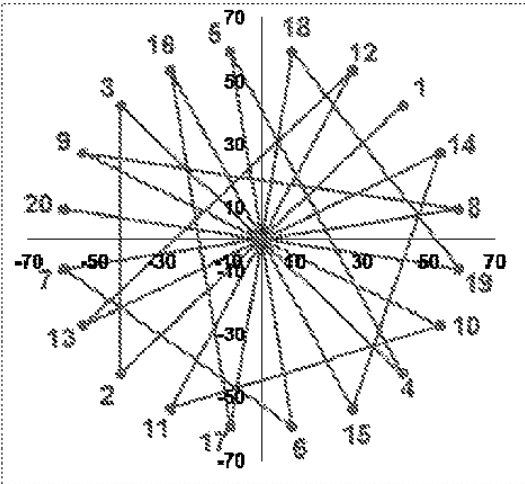


FIG. 15

【図 1 6】

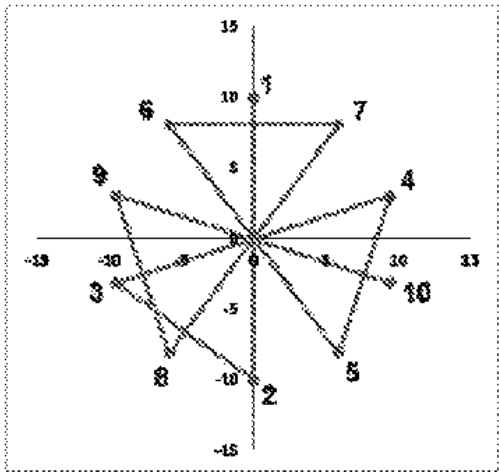


FIG. 16

10

20

30

40

50

【図 17】

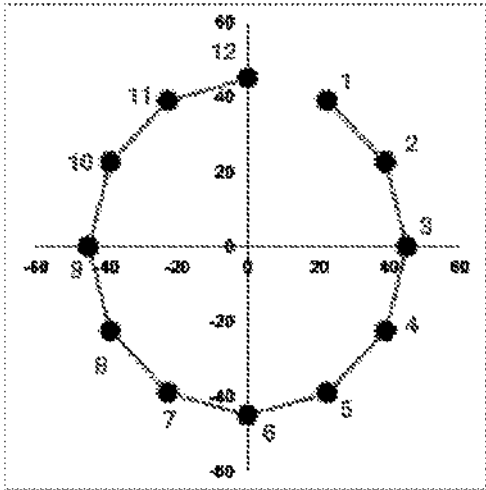


FIG. 17

【図 18】

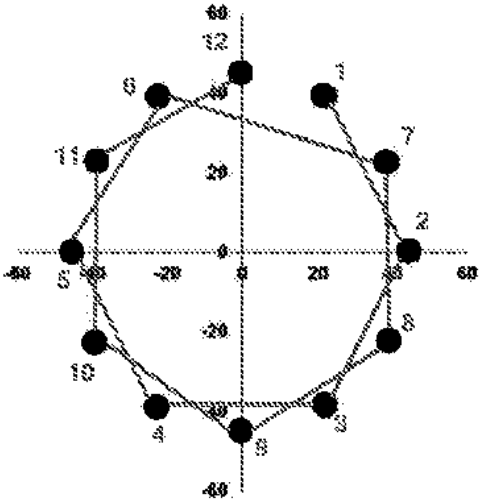


FIG. 18

10

20

【図 19】

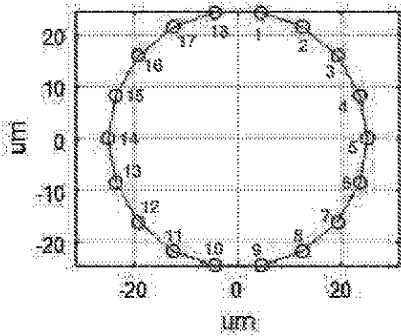


FIG. 19

【図 20】

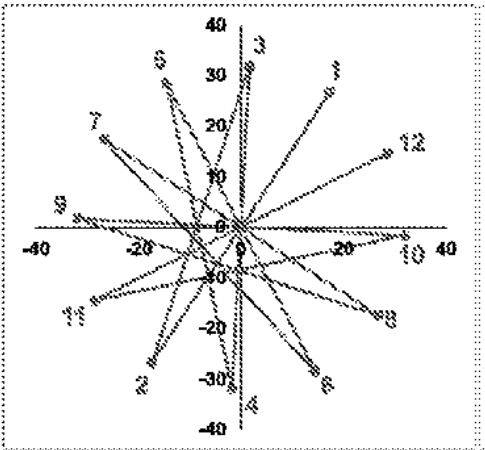


FIG. 20

30

40

50

【図 2 1】

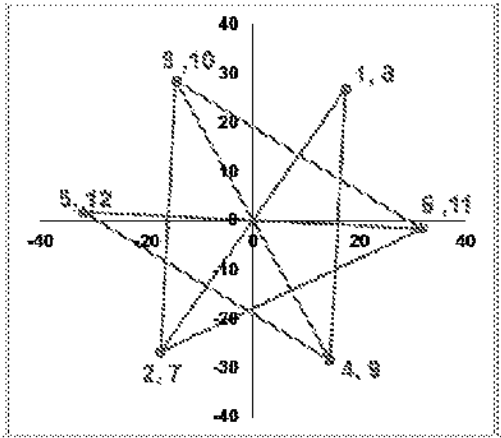


FIG. 21

【図 2 2】

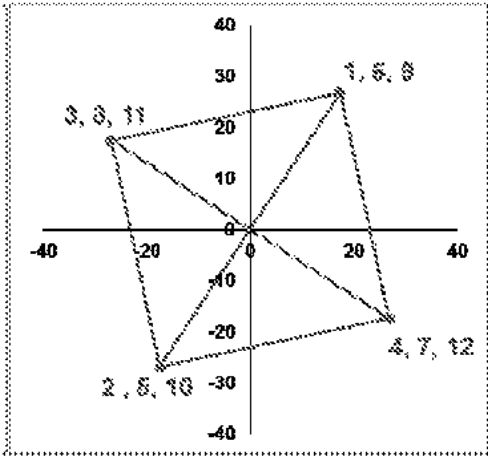


FIG. 22

10

【図 2 3】

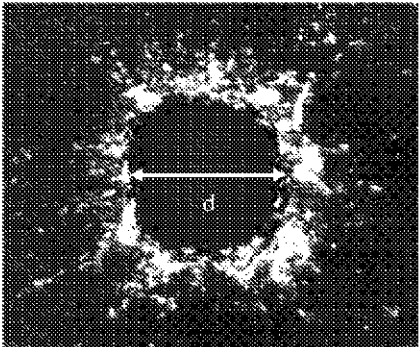
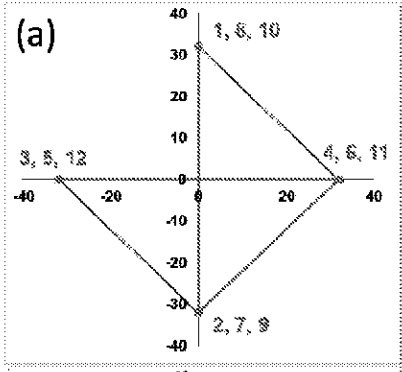


FIG. 23

【図 2 4 (a)】



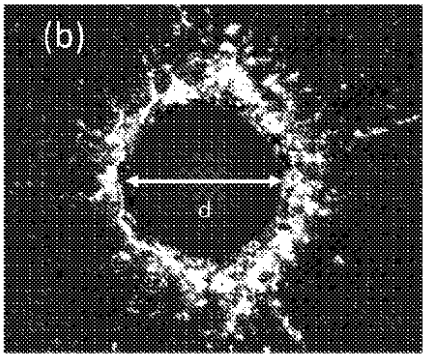
20

30

40

50

【図 2 4 (b)】



【図 2 5】

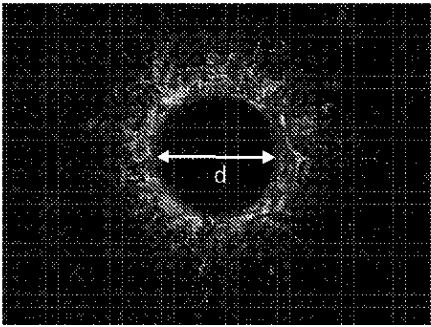


FIG. 25

10

【図 2 6】

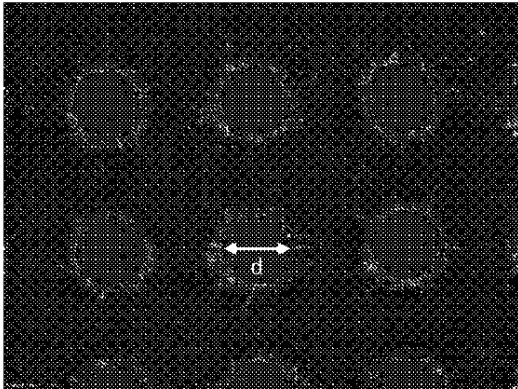


FIG. 26

【図 2 7】

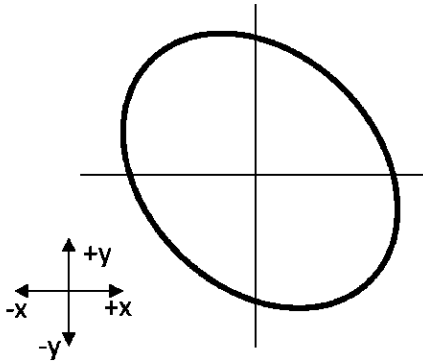


FIG. 27

20

30

40

50

【図 28】

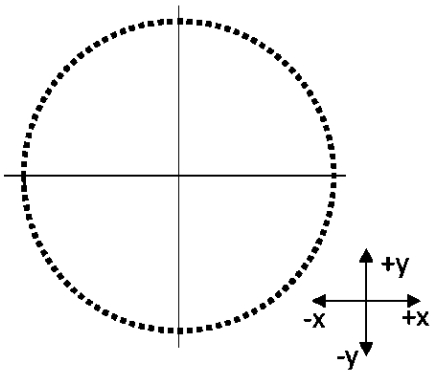


FIG. 28

【図 29】

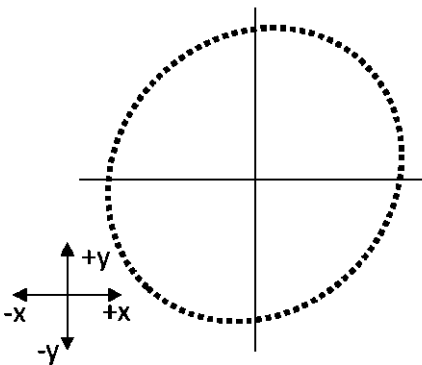
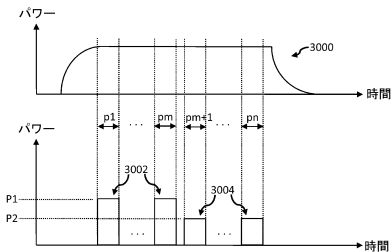
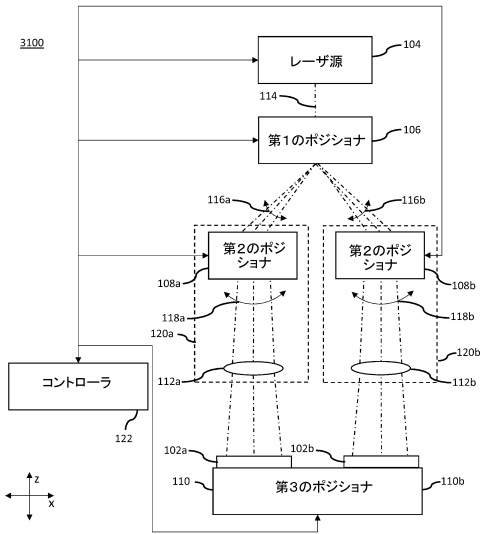


FIG. 29

【図 30】



【図 31】



10

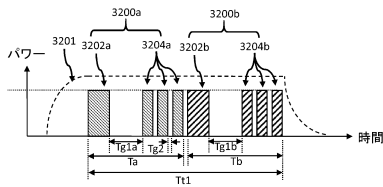
20

30

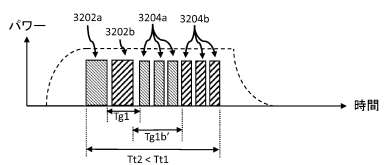
40

50

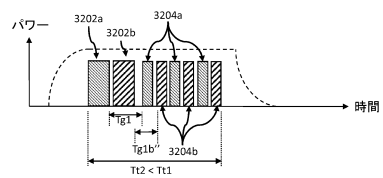
【図 3 2】



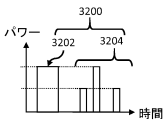
【図 3 3】



【図 3 4】

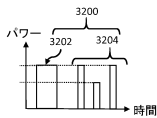


【図 3 5】

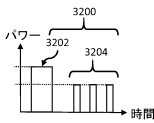


10

【図 3 6】

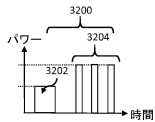


【図 3 7】

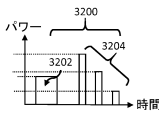


20

【図 3 8】

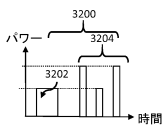


【図 3 9】

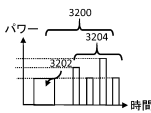


30

【図 4 0】



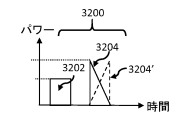
【図 4 1】



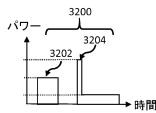
40

50

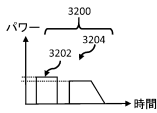
【図 4 2】



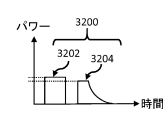
【図 4 3】



【図 4 4】



【図 4 5】



10

【図 4 6】

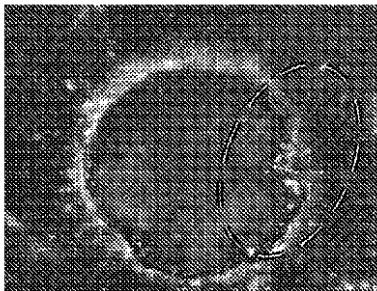


FIG. 46

【図 4 7】

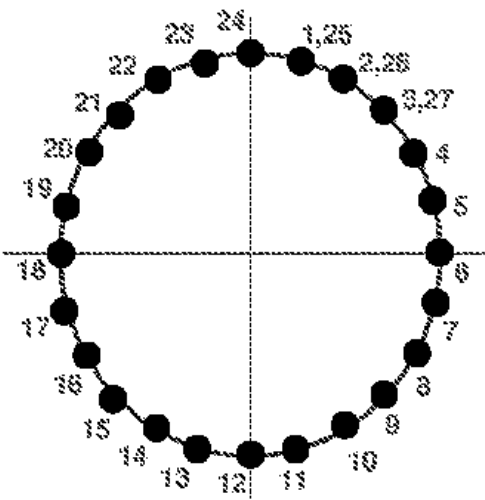


FIG. 47

20

30

40

50

【図 4 8】

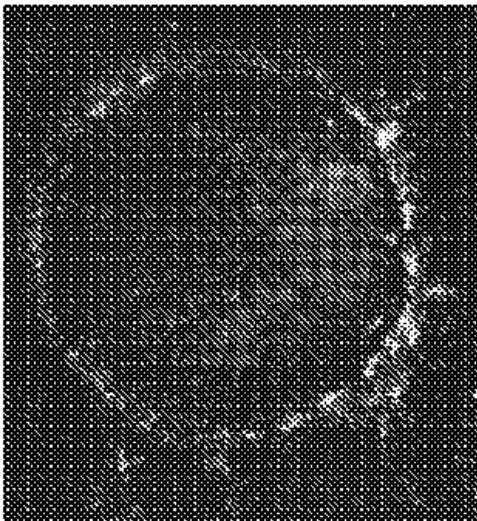


FIG. 48

【図 4 9】

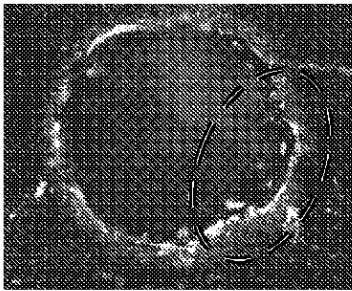


FIG. 49

10

20

【図 5 0】

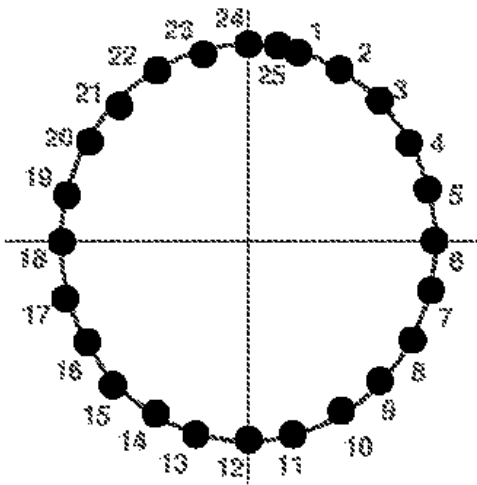


FIG. 50

【図 5 1】

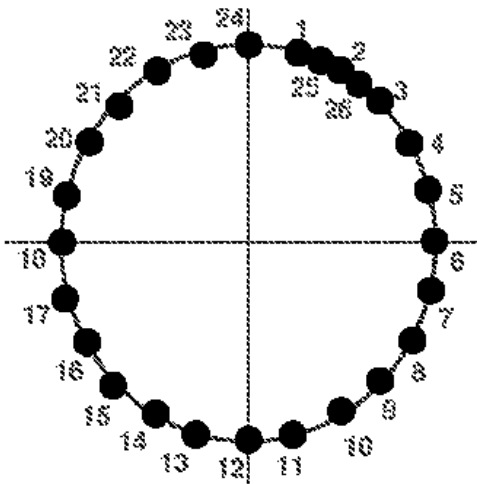


FIG. 51

30

40

50

フロントページの続き

(33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

(31)優先権主張番号 62/970,648

(32)優先日 令和2年2月5日(2020.2.5)

(33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

(31)優先権主張番号 62/930,287

(32)優先日 令和1年11月4日(2019.11.4)

(33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

リカン・ウェイ 1 4 5 2 3

(72)発明者 シュラウベン, ジョエル

アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン州, ビーバートン, サウスウェスト・ミリカン・ウェイ 1
4 5 2 3

(72)発明者 ウンラート, マーク

アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン州, ビーバートン, サウスウェスト・ミリカン・ウェイ 1
4 5 2 3

(72)発明者 フー, ホンファ

アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン州, ビーバートン, サウスウェスト・ミリカン・ウェイ 1
4 5 2 3

(72)発明者 チェン, ローリン

アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン州, ビーバートン, サウスウェスト・ミリカン・ウェイ 1
4 5 2 3

(72)発明者 ヤン, チュアン

アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン州, ビーバートン, サウスウェスト・ミリカン・ウェイ 1
4 5 2 3

(72)発明者 ロット, ジェフリー

アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン州, ビーバートン, サウスウェスト・ミリカン・ウェイ 1
4 5 2 3

(72)発明者 フィン, ダラ

アメリカ合衆国, 9 7 0 0 5 オレゴン州, ビーバートン, サウスウェスト・ミリカン・ウェイ 1
4 5 2 3

審査官 ゆずりは 広行

(56)参考文献 特表2018-532595 (JP, A)

国際公開第2019/146110 (WO, A1)

特開2003-136270 (JP, A)

特開2010-207881 (JP, A)

特開2006-026665 (JP, A)

特開2007-118079 (JP, A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H05K 3/00

B23K 26/386