

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2019-532815

(P2019-532815A)

(43) 公表日 令和1年11月14日(2019.11.14)

(51) Int.Cl.

**B23K 26/352 (2014.01)**  
**B23K 26/53 (2014.01)**  
**C03B 33/09 (2006.01)**  
**H01L 21/301 (2006.01)**

F 1

B 23 K 26/352  
B 23 K 26/53  
C 03 B 33/09  
H 01 L 21/301

33/09  
21/78

テーマコード(参考)

4 E 1 6 8  
4 G 0 1 5  
5 F 0 6 3

B

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 29 頁)

(21) 出願番号 特願2019-504698 (P2019-504698)  
(86) (22) 出願日 平成29年7月21日 (2017.7.21)  
(85) 翻訳文提出日 平成31年3月6日 (2019.3.6)  
(86) 国際出願番号 PCT/US2017/043229  
(87) 国際公開番号 WO2018/022441  
(87) 国際公開日 平成30年2月1日 (2018.2.1)  
(31) 優先権主張番号 62/368,053  
(32) 優先日 平成28年7月28日 (2016.7.28)  
(33) 優先権主張国・地域又は機関  
米国(US)

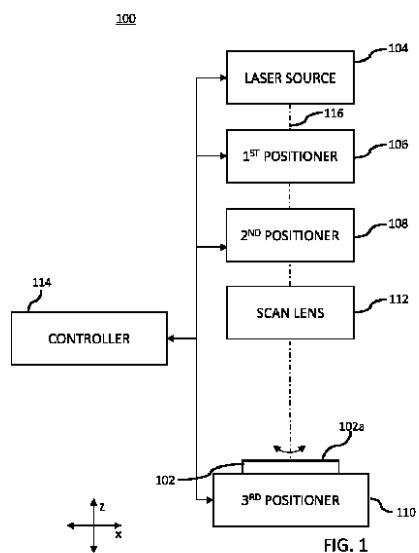
(71) 出願人 593141632  
エレクトロ サイエンティフィック イン  
ダストリーズ インコーポレーテッド  
アメリカ合衆国, 97229 オレゴン州  
, ポートランド, ノースウェスト・サイエ  
ンス・パーク・ドライブ 13900  
(74) 代理人 100109896  
弁理士 森 友宏  
(72) 発明者 フィン, ダラ  
アメリカ合衆国, 97229 オレゴン州  
, ポートランド, ノースウェスト・サイエ  
ンス・パーク・ドライブ 13900 エ  
レクトロ サイエンティフィック インダ  
ストリーズ インコーポレーテッド

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】レーザ加工装置及びワークピースをレーザ加工する方法

## (57) 【要約】

第1の面と該第1の面と反対側の第2の面とを有するワークピースを加工する方法は、500kHzよりも高いパルス繰り返し率で200ps未満のパルス持続時間と有する第1のレーザパルスビームを生成し、ワークピースと交差するビーム軸に沿って第1のレーザパルスビームを照射し、ビーム軸を加工軌跡に沿ってスキャンする。ビーム軸は、連続的に照射されるレーザパルスがワークピースに非ゼロバイトサイズで当たってワークピースの第1の面にフィーチャを形成するようにスキャンされる。フィーチャが $1.0 \mu\text{m}$ 以下の平均表面粗さ( $R_a$ )の加工済ワークピース表面を確実に有するように、バイトサイズ、パルス持続時間、パルス繰り返し率、レーザパルススポットサイズ及びレーザパルスエネルギーのような1以上のパラメータが選択される。



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

第1の面と、前記第1の面と反対側の第2の面とを有するワークピースを用意し、  
500kHzよりも高いパルス繰り返し率で200ps未満のパルス持続時間と、スポットサイズ  
と、パルスエネルギーとを有する第1のレーザパルスビームを生成し、  
前記ワークピースと交差するビーム軸に沿って前記第1のレーザパルスビームを照射し  
、  
連続的に照射されるレーザパルスが前記ワークピースに非ゼロバイトサイズで当たって  
前記ワークピースの前記第1の面にフィーチャを形成するように前記ビーム軸を加工軌跡  
に沿ってスキャンし、前記フィーチャは、1.0 μm未満の平均表面粗さ (Ra) を有する加工  
済ワークピース表面を有するものとして特徴付けられる、  
方法。

**【請求項 2】**

前記パルス持続時間は1ps以下である、請求項1の方法。

**【請求項 3】**

前記パルス持続時間は800fs以下である、請求項1から2のいずれかの方法。

**【請求項 4】**

前記パルス繰り返し率は1264kHzよりも高い、請求項1から3のいずれかの方法。

**【請求項 5】**

前記パルス繰り返し率は1800kHz以上である、請求項1から4のいずれかの方法。

**【請求項 6】**

前記パルス繰り返し率は1900kHz以上である、請求項1から5のいずれかの方法。

**【請求項 7】**

前記パルス繰り返し率は2000kHz以上である、請求項1から6のいずれかの方法。

**【請求項 8】**

前記パルス繰り返し率は3000kHz以上である、請求項1から7のいずれかの方法。

**【請求項 9】**

前記平均表面粗さ (Ra) は0.75 μm未満である、請求項1から8のいずれかの方法。

**【請求項 10】**

前記平均表面粗さ (Ra) は0.5 μm未満である、請求項1から9のいずれかの方法。

**【請求項 11】**

前記平均表面粗さ (Ra) は0.4 μm未満である、請求項1から10のいずれかの方法。

**【請求項 12】**

前記平均表面粗さ (Ra) は0.3 μm未満である、請求項1から11のいずれかの方法。

**【請求項 13】**

前記平均表面粗さ (Ra) は0.25 μm未満である、請求項1から12のいずれかの方法。

**【請求項 14】**

さらに、

第2のレーザパルスビームを生成し、

前記第2のレーザパルスビーム中のレーザパルスを集束させてビームウェストを生成し  
、

前記ビームウェストが前記ワークピース内又は前記ワークピースの前記第2の面上に配  
置されるように、前記集束させた第2のレーザパルスビームを前記加工済ワークピース表  
面と交差するビーム軸に沿って照射し、

前記ビームウェストで前記ワークピースを加工する、

請求項1から13のいずれかの方法。

**【請求項 15】**

前記ワークピースは、前記第1のレーザパルスビーム中のレーザパルスの波長に対して  
よりも、前記第2のレーザパルスビーム中のレーザパルスの波長に対してより透過的である、  
請求項14の方法。

**【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、2016年7月28日に提出された米国仮特許出願第62/368,053号の利益を主張するものであり、当該米国仮特許出願はその全体が参照により組み込まれる。

**【背景】****【0002】****I. 技術分野**

本開示は、概してパルスレーザ及び高い繰り返し率を用いて材料を加工することに関するものである。

10

**【関連出願】****【0003】****II. 関連技術の説明**

例えば、薄厚シリコンウェハダイシング、プリント回路基板(PCB)ドリリング、太陽電池の製造、及びフラットパネルディスプレイの製造をはじめとする材料加工用途は、同じような材料加工方法を用い、同じような問題を抱えている。以前の解決策は、機械的加工方法及びリソグラフィによる加工方法を用いていた。しかしながら、デバイスサイズが小さくなり、デバイスの複雑性が増加し、化学処理に環境コストがかかることから、産業界はレーザ加工方法を採用する方向に動いている。今では、典型的な波長が1 μmで緑色又はUV波長に波長変換される高パワーのダイオード励起固体レーザが用いられている。一部の用途で利用されている1つの方法は、比較的速いスキャン速度で反復パスを用いてワークピースを徐々にカッティングするものである。そのような用途においては、主として3つの問題がある。すなわち、(a)加工箇所又はその近傍においてデブリが生じ、これが蓄積すること、(b)大きな熱影響部(HAZ)が生じること、(c)商業的に実現可能な、十分に高い材料除去速度を実現することである。本明細書で使用される場合には、「デブリ」という語は、レーザ加工中に(固体、液体又は気体のいずれかの形態で)加工箇所から噴出するワークピース材料を意味するものとし、リキャスト、スラッグ、再析出物などのような他の用語を用いて普通に述べられることがある。HAZは、レーザ加工中に生じた熱により、その微細構造又は他の化学的、電気的又は物理的特性が変化したワークピースの領域を意味している。

20

**【0004】**

効率的かつ高品質のレーザ加工をワークピースに対して行うために様々な選択肢が提案されており、例えば超短パルス持続時間のレーザパルスを高い繰り返し率で生成するためのレーザが用いられている。これにより比較的長いパルス幅のレーザパルスを用いる場合に比べて生成されるデブリが少なく、ワークピース内に生じるHAZが比較的小さくなる。しかしながら、高い繰り返し率で生成される超短レーザパルスを用いる方法では、依然としてデブリが生じる。ある用途においては、生じたデブリが蓄積することにより、望ましくない粗面や不均一な面が生じたり、望ましくない応力集中が生じたりする場合などにはデブリの蓄積が問題となり得る。

30

**【0005】**

従来から、加工済ワークピースを化学エッチング液に曝露することにより、あるいは加工済ワークピースを(例えばDI水からなる)超音波浴内で清浄することにより、あるいはこれに類する方法により、蓄積したデブリを除去することができる。この問題は、ワークピースを犠牲材料層でコーティングすることによっても解決することができ、この場合には、レーザ加工中に生じたデブリが犠牲層上に蓄積し、この犠牲層をレーザ加工が完了した後に除去することができる。しかしながら、そのような方法では、付加的な処理工程及び付加的な消耗材料が追加されることによってスループットが低下し、コストが上昇する。したがって、そのようなデブリを除去する必要のない解決策が好ましいものとなるであろう。

40

**【概要】**

50

## 【0006】

本発明の一実施形態は、第1の面と、上記第1の面と反対側の第2の面とを有するワークピースを用意し、500kHzよりも高いパルス繰り返し率で200ps未満のパルス持続時間と有する第1のレーザパルスビームを生成し、上記ワークピースと交差するビーム軸に沿って上記第1のレーザパルスビームを照射し、上記ビーム軸を加工軌跡に沿ってスキャンする方法として特徴付けることができる。上記ビーム軸は、連続的に照射されるレーザパルスが上記ワークピースに非ゼロバイトサイズで当たって上記ワークピースの上記第1の面にフィーチャを形成するようにスキャンされる。上記フィーチャが1.0  $\mu\text{m}$ 以下の平均表面粗さ( $\text{Ra}$ )を有する加工済ワークピース表面を確実に有するように、バイトサイズ、パルス持続時間、パルス繰り返し率、レーザパルススポットサイズ及びレーザパルスエネルギーのような1以上のパラメータが選択される。

10

## 【0007】

ある実施形態においては、上記第1のレーザパルスビーム内の上記レーザパルスのそれぞれのパルス持続時間が、1ps以下、800fs以下、750fs以下、700fs以下、650fs以下、又は600fs以下である。

20

## 【0008】

ある実施形態においては、上記第1のレーザパルスビーム内の上記レーザパルスのパルス繰り返し率は、1200kHzより高いか、1250kHzより高いか、1300kHzより高いか、1400kHzより高いか、1500kHzより高いか、1600kHzより高いか、1700kHzより高いか、1800kHzより高いか、1900kHzより高いか、2000kHzより高いか、あるいは3000kHzより高い。

30

## 【0009】

ある実施形態においては、上記平均表面粗さ( $\text{Ra}$ )は、0.75  $\mu\text{m}$ 以下、0.5  $\mu\text{m}$ 以下、0.4  $\mu\text{m}$ 以下、0.3  $\mu\text{m}$ 以下、0.25  $\mu\text{m}$ 以下、0.2  $\mu\text{m}$ 以下、0.15  $\mu\text{m}$ 以下などであるか、あるいはこれらの値のいずれかの間にある。

## 【0010】

一実施形態においては、上記方法は、(上記ワークピースの上記第1の面に上記フィーチャが形成された後)第2のレーザパルスビームを生成し、上記第2のレーザパルスビーム中のレーザパルスを集束させてビームウェストを生成し、上記ビームウェストが上記ワークピース内又は上記ワークピースの上記第2の面上に配置されるように、上記集束させた第2のレーザパルスビームを上記加工済ワークピース表面と交差するビーム軸に沿って照射し、上記ビームウェスト又はその近傍で上記ワークピースを加工する動作を付加的に含むものとしてさらに特徴付けることができる。一実施形態においては、上記ワークピースは、上記第1のレーザパルスビーム中のレーザパルスの波長に対してよりも、上記第2のレーザパルスビーム中のレーザパルスの波長に対してより透過的である。

30

## 【図面の簡単な説明】

## 【0011】

【図1】図1は、本発明の一実施形態による、ワークピースを加工するための装置を模式的に示している。

40

【図2】図2及び図3は、シリコンウェハに形成されたトレンチの(上面から撮影した)顕微鏡写真を示している。

【図3】図2及び図3は、シリコンウェハに形成されたトレンチの(上面から撮影した)顕微鏡写真を示している。

【図4】図4は、それぞれシリコンウェハの表面に形成された1組の交差スクライブラインを含むレーザ加工済フィーチャの(上面から撮影した)顕微鏡写真を示している。

【図5】図5は、異なるパルス繰り返し率でレーザパルスをスキャンビーム軸に沿って伝搬させることにより、シリコンウェハに形成されたトレンチ内の加工済ワークピース表面の平均表面粗さ( $\text{Ra}$ )と、トレンチ形成プロセス中の材料除去速度との関係を、バイトサイズ及びフルエンスの関数として示す1組のグラフを示している。

50

【図6】図6は、ある特性を有する加工済ワークピース表面を形成することとなる、シリコンウェハにトレンチを形成するためのプロセスウィンドウを示す1組のグラフを示して

いる。

【図7】図7は、滑らかな加工済ワークピース表面を生成する方法でトレンチを形成するように加工されたシリコンウェハの（側断面から撮影した）顕微鏡写真を示している。

【図8 A】図8A及び図8Bは、シリコンウェハの内側にトレンチクラックを形成するようにシリコンウェハがさらに加工された後の図7に示される加工済シリコンウェハの（側断面から撮影した）顕微鏡写真を示している。図8Aは、図7に示されるトレンチの幅を横断する図を示している。

【図8 B】図8A及び図8Bは、シリコンウェハの内側にトレンチクラックを形成するようにシリコンウェハがさらに加工された後の図7に示される加工済シリコンウェハの（側断面から撮影した）顕微鏡写真を示している。図8Bは、図7に示されるトレンチの長さ方向に沿った図である。

【図9 A】図9A～図9Dは、ある実施形態におけるワークピースを加工するための方法を示している。

【図9 B】図9A～図9Dは、ある実施形態におけるワークピースを加工するための方法を示している。

【図9 C】図9A～図9Dは、ある実施形態におけるワークピースを加工するための方法を示している。

【図9 D】図9A～図9Dは、ある実施形態におけるワークピースを加工するための方法を示している。

#### 【詳細な説明】

##### 【0012】

本明細書においては、実施形態の例が添付図面を参照して述べられる。明確にそうでないことが記載されていない限り、図面においては、コンポーネント、フィーチャ、要素などのサイズや位置など、またそれらの間の距離は、必ずしも縮尺通りではなく、明確にするために誇張されている。

##### 【0013】

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。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／又はコンポーネント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、コンポーネント、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。本明細書において使用されるセクション見出しあは、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。

##### 【0014】

特に示されている場合を除き、「約」や「その前後」などの用語は、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。

##### 【0015】

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

10

20

30

40

50

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。

#### 【0016】

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がある。

10

#### 【0017】

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よう。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。

#### 【0018】

##### I. 概説

本明細書において述べられる実施形態は、概して、レーザを用いた加工（本明細書においてはワークピースのレーザ加工、レーザでの加工、あるいは最も簡単に「加工」ともいう）のための方法及び装置に関するものである。一般的に、レーザ放射でワークピースを照射して、ワークピースを加熱したり、溶融したり、蒸発させたり、アブレートしたり、クラックしたり、研磨したりするなどにより加工の全体又は一部が行われる。図示された装置により行われ得るプロセスの具体的な例としては、ビアドリーリング、スクライビング、ダイシング、エンゲレービングなどが挙げられる。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フィーチャは、開口、ビア（例えば、非貫通ビア、貫通ビア、スロットビア）、溝、トレンチ、スクライブライン、切溝、凹部など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものを含み得る。

20

#### 【0019】

加工可能なワークピースは、金属、高分子、セラミック、あるいはこれらを任意に組み合わせたものとして包括的に特徴付けることができる。加工可能なワークピースの具体例としては、集積回路（IC）、ICパッケージ（ICP）、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、 $Al_2O_3$ 、 $AlN$ 、 $BeO$ 、 $Cu$ 、 $GaAs$ 、 $GaN$ 、 $Ge$ 、 $InP$ 、 $Si$ 、 $SiO_2$ 、 $SiC$ 、 $Si_{1-x}Ge_x$  ( $0.0001 < x < 0.9999$ )など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの又はその合金から形成される基板）、プラスチック、ガラス（例えば、非強化ガラス又は熱強化ガラス又は化学強化ガラス又はその他）、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が挙げられる。したがって、加工できる材料は、1以上の金属（例えば、 $Al$ 、 $Ag$ 、 $Au$ 、 $Cu$ 、 $Fe$ 、 $In$ 、 $Mg$ 、 $Pt$ 、 $Sn$ 、 $Ti$ など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの又はこれらの合金）、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、基板材料（例えば、 $Al_2O_3$ 、 $AlN$ 、 $BeO$ 、 $Cu$ 、 $GaAs$ 、 $GaN$ 、 $Ge$ 、 $InP$ 、 $Si$ 、 $SiO_2$ 、 $SiC$ 、 $Si_{1-x}Ge_x$ など、又はこれらの組み合わせ又はこれらの合金）、（例えば、酸化ケイ素、窒化ケイ素、酸窒化ケイ素など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののように層間誘電体構造として用いられる）無機誘電材料、low-k誘電体材料（例えば、メチルシリセスキオキサン（MSQ）、水素シリセスキオキサン（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）、ファイバガラス、高分子材料（ポリアミド、ポリイ

30

40

50

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、及びこれらの任意の化合物、複合物、又は混ぜ物)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。

【0020】

II. システム - 概説

図1は、本発明の一実施形態による、ワークピースを加工するための装置を模式的に示している。

【0021】

図1に示される実施形態を参照すると、ワークピース102を加工するための装置100は、レーザパルスを生成するためのレーザ源104と、第1のポジショナ106と、第2のポジショナ108と、第3のポジショナ110と、スキャンレンズ112と、コントローラ114とを含んでいる。以下の説明を考慮すると、装置100が第2のポジショナ108を含む場合には、第1のポジショナ106を含めることは任意的なものである(すなわち、装置100は第1のポジショナ106を含む必要がない)ことを理解すべきである。同様に、装置100が第1のポジショナ106を含む場合には、第2のポジショナ108を含めることは任意的なものである(すなわち、装置100は第2のポジショナ108を含む必要がない)ことを理解すべきである。最後に、第3のポジショナ110を含めることは任意的なものである(すなわち、装置100は第3のポジショナ108を含む必要がない)ことを同様に理解すべきである。

【0022】

図示はされていないが、装置100は、レーザ源104により生成されたレーザパルスをスキャンレンズ112に至る1以上のビーム経路(例えば、ビーム経路116)に沿って集束し、拡大し、コリメートし、成形し、偏光し、フィルタし、分割し、結合し、クロップし、あるいは改質し、調整し、方向付けるための1以上の光学要素(例えば、ビームエキスパンダ、ビーム整形器、アパーチャ、高調波発生結晶、フィルタ、コリメータ、レンズ、ミラー、偏光器、波長板、回折光学素子など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの)も含んでいる。米国特許第4,912,487号、第5,633,747号、第5,638,267号、第5,751,585号、第5,847,960号、第5,917,300号、第6,314,473号、第6,430,465号、第6,700,600号、第6,706,998号、第6,706,999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7,245,412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8,158,493号、第8,288,679号、第8,404,998号、第8,497,450号、第8,648,277号、第8,680,430号、第8,847,113号、第8,896,909号、第8,928,853号又は上述の米国特許出願公開第2014/0026351号、第2014/0197140号、第2014/0263201号、第2014/0263212号、第2014/0263223号、第2014/0312013号、又はドイツ連邦特許第DE102013201968B4号、又は国際特許公開第WO2009/087392号、あるいはこれらを任意に組み合わせたものに開示されているように、上記のコンポーネントのうち1つ以上を設けてもよく、あるいは、装置100が1以上の附加的なコンポーネントを含んでいてもよいこともさらに理解できよう。これらの公報のそれぞれは参照によりその全体が本明細書に組み込まれる。

【0023】

スキャンレンズ112を通って伝搬するレーザパルスは、ビーム軸に沿って伝搬してワークピース102に照射される。ワークピース102に照射されたレーザパルスは、ガウス形又は整形された形(例えば、「トップハット形」)の空間強度プロファイルを有するものとして特徴付けられていてもよい。空間強度プロファイルは、ビーム軸(又はビーム経路116)に沿って伝搬するレーザパルスの断面形状としても特徴付けられていてもよい。この断面形状は、円形、橢円形、矩形、三角形、六角形、リング型などであってもよく、あるいは任意の形状であってもよい。加えて、そのように照射されたレーザパルスは、2μmから200μmの範囲のスポットサイズでワークピース102に照射され得る。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、照射レーザパルスによって加工される

10

20

30

40

50

ワークピース102の領域（「加工箇所」、「プロセススポット」、「スポット位置」又はより単純に「スポット」とも呼ばれる）をビーム軸が横切る位置での照射レーザパルスの直径又は空間的幅を意味する。本明細書における議論に関しては、スポットサイズは、ビーム軸から光強度がビーム軸における光強度の $1/e^2$ に低下するところまでの径方向距離又は横断距離として測定される。一般的に、レーザパルスのスポットサイズは、ビームウェストで最小になる。しかしながら、スポットサイズを  $2 \mu\text{m}$ よりも小さくでき、あるいは  $200 \mu\text{m}$ よりも大きくできることは理解できよう。このように、ワークピース102に照射される少なくとも1つのレーザパルスは、 $2 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 、 $7 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 、 $35 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 、 $45 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $55 \mu\text{m}$ 、 $80 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$ などよりも小さいスポットサイズ、これらよりも大きいスポットサイズ、これらと等しいスポットサイズ、あるいはこれらの値のいずれかの間のスポットサイズを有することができる。一実施形態においては、ワークピース102に照射されるレーザパルスは、 $25 \mu\text{m}$ から $60 \mu\text{m}$ の範囲のスポットサイズを有し得る。他の実施形態においては、ワークピース102に照射されるレーザパルスは、 $35 \mu\text{m}$ から $50 \mu\text{m}$ の範囲のスポットサイズを有し得る。

10

## 【0024】

A. レーザ源

一般的に、レーザ源104はレーザパルスを生成することができる。このため、レーザ源104は、パルスレーザ源、QCWレーザ源、又はCWレーザ源を含み得る。レーザ源104がQCWレーザ源又はCWレーザ源を含む場合、レーザ源104は、QCWレーザ源又はCWレーザ源から出力されるレーザ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）をさらに含み得る。図示されていないが、装置100は、レーザ源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。したがって、ワークピース102に最終的に照射されるレーザパルスは、紫外光（UV）、可視光（例えば緑色）、赤外光（IR）、近赤外光（NIR）、短波長赤外光（SWIR）、中波長赤外光（MWIR）、又は長波長赤外光（LWIR）の範囲の電磁スペクトル、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののうち1つ以上における1以上の波長を有するものとして特徴付けられていてもよい。

20

## 【0025】

レーザ源104により出力されるレーザパルスは、 $30\text{fs}$ から $500\text{ps}$ の範囲にあるパルス幅又はパルス持続時間（すなわち、時間に対する光パワーの半値全幅（FWHM）に基づく）を有することができる。しかしながら、パルス持続時間を $10\text{fs}$ よりも短くしてもよく、あるいは $500\text{ps}$ よりも長くしてもよいことは理解できよう。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、 $10\text{fs}$ 、 $15\text{fs}$ 、 $30\text{fs}$ 、 $50\text{fs}$ 、 $75\text{fs}$ 、 $100\text{fs}$ 、 $150\text{fs}$ 、 $200\text{fs}$ 、 $300\text{fs}$ 、 $500\text{fs}$ 、 $700\text{fs}$ 、 $750\text{fs}$ 、 $800\text{fs}$ 、 $850\text{fs}$ 、 $900\text{fs}$ 、 $1\text{ps}$ 、 $2\text{ps}$ 、 $3\text{ps}$ 、 $4\text{ps}$ 、 $5\text{ps}$ 、 $7\text{ps}$ 、 $10\text{ps}$ 、 $15\text{ps}$ 、 $25\text{ps}$ 、 $50\text{ps}$ 、 $75\text{ps}$ 、 $100\text{ps}$ 、 $200\text{ps}$ 、 $500\text{ps}$ などよりも短いパルス持続時間、これらよりも長いパルス持続時間、これらと等しいパルス持続時間、あるいはこれらの値のいずれかの間のパルス持続時間を有することができる。一実施形態においては、レーザ源104により出力されるレーザパルスは、 $10\text{fs}$ から $1\text{ps}$ の範囲にあるパルス持続時間を有している。他の実施形態においては、レーザ源104により出力されるレーザパルスは、 $500\text{fs}$ から $900\text{fs}$ の範囲にあるパルス持続時間を有している。

30

## 【0026】

レーザ源104により出力されるレーザパルスは、 $100\text{mW}$ から $50\text{kW}$ 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 $100\text{mW}$ よりも小さくしてもよく、あるいは $50\text{kW}$ よりも大きくしてもよいことは理解できよう。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、 $100\text{mW}$ 、 $300\text{mW}$ 、 $500\text{mW}$ 、 $800\text{mW}$ 、 $1\text{W}$ 、 $2\text{W}$ 、 $3\text{W}$ 、 $4\text{W}$ 、 $5\text{W}$ 、 $6\text{W}$ 、 $7\text{W}$ 、 $10\text{W}$ 、 $15\text{W}$ 、 $25\text{W}$ 、 $30\text{W}$ 、 $50\text{W}$ 、 $60\text{W}$ 、 $100\text{W}$ 、 $150\text{W}$ 、 $200\text{W}$ 、 $250\text{W}$ 、 $500\text{W}$ 、 $2\text{kW}$ 、 $3\text{kW}$ 、 $20\text{kW}$ 、 $50\text{kW}$ などよりも大きいか等しい平均パワー、あるいはこれらの値のいずれかの間の平均パワーを有することができる。

40

## 【0027】

50

レーザ源104によりレーザパルスを5kHzから1GHzの範囲にあるパルス繰り返し率で出力することができる。しかしながら、パルス繰り返し率は、5kHzより低くてもよく、あるいは1GHzよりも高くてよいことは理解できよう。このように、レーザ源104によりレーザパルスを、5kHz、50kHz、100kHz、250kHz、500kHz、800kHz、900kHz、1MHz、1.5MHz、1.8MHz、1.9MHz、2MHz、2.5MHz、3MHz、4MHz、5MHz、10MHz、20MHz、50MHz、70MHz、100MHz、150MHz、200MHz、250MHz、300MHz、350MHz、500MHz、550MHz、700MHz、900MHz、2GHz、10GHzなどよりも低いパルス繰り返し率、これらよりも高い繰り返し率、これらと等しいパルス繰り返し率、あるいはこれらの値のいずれかの間のパルス繰り返し率で出力することができる。ある実施形態においては、パルス繰り返し率は1.5MHzから10MHzの範囲であり得る。

10

#### 【0028】

波長、パルス持続時間、平均パワー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パルスは、パルスエネルギー、ピークパワーなどのような1以上の他の特性により特徴付けることができる。このレーザパルスは、1以上の所望の特性を有する1以上のフィーチャを形成するようにワークピース102又はそのコンポーネントを加工するのに十分な(W/cm<sup>2</sup>で測定される)光強度、(J/cm<sup>2</sup>で測定される)フルエンスなどでプロセススポットにおいてワークピース102を照射するための1以上の他の特性に基づいて選択することができる。そのような他のパラメータの例としては、ワークピース102の材料特性、バイトサイズ、所望の加工スループットなど、あるいはこれらを任意に組み合わせたものに加え、波長、パルス持続時間、平均パワー及びパルス繰り返し率などの上述した特性のうち1つ以上のものが挙げられる。本明細書で使用される場合には、「バイトサイズ」という用語は、連続的に照射されるレーザパルスが当たるスポット領域間の中心間距離を意味している。

20

#### 【0029】

例えば、ワークピース102に照射されるレーザパルスは、1μJから20μJの範囲にあるパルスエネルギーを有し得る。一実施形態においては、照射されるいずれのレーザパルスも2μJから10μJの範囲にあるパルスエネルギーを有し得る。他の実施形態においては、照射されるいずれのレーザパルスも3μJから6μJの範囲にあるパルスエネルギーを有し得る。しかしながら、照射されるレーザパルスのパルスエネルギーは、1μJよりも低くてもよく、あるいは20μJよりも高くてよいことは理解できよう。他の例においては、ワークピース102に照射されるレーザパルスは、1μJから20μJの範囲にあるフルエンスを有し得る。一実施形態においては、照射されるいずれのレーザパルスも2μJから10μJの範囲にあるパルスエネルギーを有し得る。他の実施形態においては、照射されるいずれのレーザパルスも2μJから6μJの範囲にあるパルスエネルギーを有し得る。しかしながら、照射されるレーザパルスのパルスエネルギーは、1μJよりも低くてもよく、あるいは20μJよりも高くてよいことは理解できよう。

30

#### 【0030】

レーザ源104を特徴付け得るレーザの種類の例としては、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、ファイバーレーザ、フォトニック結晶ロッド/ファイバーレーザ、パッシブモードロック固体バルク又はファイバーレーザ、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。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、EOLIT E社により製造されるBOREAS、HEGOA、SIROCCO又はCHINOOKシリーズのレーザ、PYROPHOTON ICS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シリーズのレーザ、TRUMPF社により製造されるTRUFLOWシリーズのレーザ(例えば、TRUFLOW 2000、2700、3200、3600、4000、5000、6000、7000、8000、10000、12000、15000、20000)、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

40

50

れるFCPA  $\mu$  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、CLM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、GLP N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、TL PNシリーズ、TLRシリーズ、ULPNシリーズ、ULRシリーズ、VLMシリーズ、VLPNシリーズ、Y LM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-100-M、GPLN-500-QCW、GPLN-500-M、GPLN-500-R、GPLN-2000-S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

## 【0031】

B. 第1のポジショナ

第1のポジショナ106は、ビーム経路116に配置され、位置付けられ、あるいは設置されており、レーザ源104により生成されたレーザパルスを回折し、反射し、屈折し、又はこれに類似することを行い、あるいはこれらを任意に組み合わせてビーム経路116を移動し、その結果、ワークピース102に対してビーム軸を移動させるように動作することができる。一般的に、第1のポジショナ106は、X軸（又はX方向）及びY軸（又はY方向）に沿ってビーム軸をワークピース102に対して移動させるように構成される。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よう。

20

## 【0032】

第1のポジショナ106によりなされるワークピース102に対するビーム軸の移動は、概して、X方向及びY方向に0.01mmから4.0mm延びる第1のスキャンフィールド又は「第1のスキャニング範囲」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制限される。しかしながら、第1のスキャニング範囲は、（例えば、第1のポジショナ106の構成、ビーム経路116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に入射するレーザパルスのビームサイズ、スポットサイズなどの1以上のファクタに応じて）X方向又はY方向のいずれかに0.01mmよりも短く延びていてもよく、あるいは4.0mmよりも長く延びていてもよいことは理解できよう。このように、第1のスキャニング範囲は、X方向及びY方向のいずれかに、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などよりも長い距離、これらと等しい距離、あるいはこれらの値のいずれかの間の距離だけ延びていてもよい。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、レーザパルスの直径又は幅を意味し、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得る。

30

## 【0033】

一般的に、第1のポジショナ106がビーム軸を移動させ、これによりプロセススポットを位置決めできる帯域幅（すなわち第1の位置決め帯域幅）は、50kHz（又はその前後）から10MHz（又はその前後）の範囲にある。このように、第1のポジショナ106は、20 $\mu$ s（又はその前後）ごとに1スポット位置から0.1 $\mu$ s（又はその前後）ごとに1スポット位置までの範囲の位置決め速度（第1の位置決め帯域幅から得られる）でプロセススポットを第1のスキャニング範囲内の任意の位置に位置決めすることができる。位置決め速度の逆数は、本明細書では「位置決め時間」と呼ばれ、プロセススポットの位置を第1のスキャニング範囲内のある位置から第1のスキャニング範囲内の任意の他の位置に変えるために必要な期間を意味する。このように、第1のポジショナ106は、20 $\mu$ s（又はその前後）から0.1 $\mu$ s（又はその前後）の範囲の位置決め時間により特徴付けることができる。一実施形態においては、第1の位置決め帯域幅は、100kHz（又はその前後）から2MHz（又はその前後）の範囲にある。例えば、第1の位置決め帯域幅は1MHz（又はその前後）であ

40

50

る。

【0034】

第1のポジショナ106は、マイクロエレクトロメカニカルシステム(MEMS)ミラー又はミラーアレイ、AO偏向器(AOD)システム、電気光学偏向器(EOD)システム、圧電アクチュエータ、電歪アクチュエータ、ボイスコイルアクチュエータなどを組み込んだファーストステアリングミラー(FSM)要素、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であり得る。一実施形態においては、第1のポジショナ106は、少なくとも1つ(例えば、1つ、2つなど)の単一素子AODシステム、少なくとも1つ(例えば、1つ、2つなど)のフェイズドアレイAOD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を含むAODシステムである。双方のAODシステムは、結晶Ge、PbMoO<sub>4</sub>、又はTeO<sub>2</sub>、ガラス状SiO<sub>2</sub>、石英、As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>などの材料から形成されるAOセルを含んでいる。しかしながら、前者は、AOセルに音響的に連結された単一の超音波変換器を含んでおり、後者は、共通のAOセルに音響的に連結された少なくとも2つの超音波変換器からなるフェイズドアレイを含んでいる。

【0035】

AODシステムのいずれかを、ビーム経路116を偏向することにより、(例えば、単一の方向に沿ってビーム軸を移動するように構成される)単軸AODシステムとして、又は(例えば、複数の方向、例えばX方向及びY方向に沿ってビーム軸を移動するように構成される)多軸AODシステムとして提供してもよい。一般的に、多軸AODシステムは、マルチセルシステム又はシングルセルシステムとすることができます。マルチセル多軸システムは、典型的には、それぞれ異なる軸に沿ってビーム軸を移動するように構成される複数のAODシステムを含んでいる。例えば、マルチセル多軸システムは、X方向に沿ってビーム軸を移動するように構成される第1のAODシステム(例えば「X軸AODシステム」)(例えば、単一素子又はフェイズドアレイAODシステム)と、Y方向に沿ってビーム軸を移動するように構成される第2のAODシステム(例えば「Y軸AODシステム」)(例えば、単一素子又はフェイズドアレイAODシステム)とを含むことができる。シングルセル多軸システム(例えば「X/Y軸AODシステム」)は、典型的には、X方向及びY方向に沿ってビーム軸を移動するように構成される単一のAODシステムを含んでいる。例えば、シングルセルシステムは、共通のAOセルの異なる平面、ファセット、側面などと音響的に結合された少なくとも2つの超音波変換器を含むことができる。

【0036】

C. 第2のポジショナ

第1のポジショナ106と同様に、第2のポジショナ108は、ビーム経路116に設置され、レーザ源104により生成され、第1のポジショナ106を通過したレーザパルスを回折し、反射し、屈折し、又はこれに類似することを行い、あるいはこれらを任意に組み合わせて、スキャンレンズ112に対するビーム経路116の移動を介して、ワークピース102に対して(例えば、X方向及びY方向に沿って)ビーム軸を移動するように動作することができる。第2のポジショナ108により行われる、ワークピース102に対するビーム軸の移動は、概して、第1のスキャニング範囲よりも大きな領域にわたってX方向及び/又はY方向に延びる第2のスキャンフィールド又は「スキャニング範囲」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制限される。本明細書で述べられる構成では、第1のポジショナ106により行われるビーム軸の移動を第2のポジショナ108により行われるビーム軸の移動に重ねることができることは理解すべきである。このように、第2のポジショナ108は、第2のスキャニング範囲内で第1のスキャニング範囲をスキャンするように動作可能である。

【0037】

一実施形態においては、第2のスキャニング範囲は、X方向及び/又はY方向に1mmから50mm延びている。しかしながら、第2のスキャニング範囲がX方向/又はY方向のいずれかに1mm未満又は50mmよりも長く延びるように第2のポジショナ108が構成されていてもよいことは理解できよう。このように、ある実施形態においては、(例えば、X方向又

10

20

30

40

50

はY方向、あるいはその他の方向における)第2のスキャニング範囲の最大寸法は、ワークピース102に形成されるフィーチャ(例えば、ビア、トレーナ、スクライブライン、凹部、導電トレースなど)の対応する最大寸法(XY平面で測定される)以上であり得る。しかしながら、他の実施形態においては、第2のスキャニング範囲の最大寸法は、形成されるフィーチャの最大寸法未満であり得る。

【0038】

一般的に、第2のポジショナ108がビーム軸を移動して、プロセスを位置決め(これにより第2のスキャニング範囲内で第1のスキャニング範囲をスキャン)できる帯域幅(すなわち第2の位置決め帯域幅)は、第1の位置決め帯域幅よりも狭い。一実施形態においては、第2の位置決め帯域幅は、900Hzから5kHzの範囲にある。他の実施形態においては、第1の位置決め帯域幅は、2kHzから3kHz(例えば約2.5kHz)の範囲にある。例えば、第2のポジショナ108は、2つのガルバノメータミラーコンポーネントを含むガルバノメータミラーシステムとして提供される。1つのガルバノメータミラーコンポーネントは、ワークピース102に対してX方向に沿ってビーム軸を移動するように構成されており、他のガルバノメータミラーコンポーネントは、ワークピース102に対してY方向に沿ってビーム軸を移動するように構成されている。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のポジショナ108及び第1のポジショナ106の特定の構成によっては、第2の位置決め帯域幅が第1の位置決め帯域幅以上であってもよいことは理解されよう。

10

【0039】

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を移動させ、この結果、ビーム軸に対してワークピース102を移動させるように動作することができる。ビーム軸に対するワークピース102の移動は、概して、第2のスキャニング範囲よりも大きな領域にわたってX方向及び/又はY方向に延びる第3のスキャンフィールド又は「スキャニング範囲」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制限される。一実施形態においては、第3のスキャニング範囲は、X方向及び/又はY方向に25mmから2m延びている。他の実施形態においては、第3のスキャニング範囲は、X方向及び/又はY方向に0.5mから1.5m延びている。一般的に、(例えば、X方向又はY方向、あるいはその他の方向における)第3のスキャニング範囲の最大寸法は、ワークピース102に形成されるフィーチャの対応する最大寸法(XY平面で測定される)以上である。必要に応じて、第3のポジショナ110は、Z方向に(例えば、1mmから50mmの範囲にわたって)延びるスキャニング範囲内でビーム軸に対してワークピース102を移動するように構成されていてもよい。このため、第3のスキャニング範囲は、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。

20

30

【0040】

本明細書で述べられる構成では、第1のポジショナ106及び/又は第2のポジショナ108により行われるビーム軸の移動を第3のポジショナ110により行われるワークピース102の移動に重ねることができることは理解すべきである。このように、第3のポジショナ110は、第3のスキャニング範囲内で第1のスキャニング範囲及び/又は第2のスキャニング範囲をスキャンするように動作可能である。一般的に、第3のポジショナ110がプロセススポットを位置決め(これにより第3のスキャニング範囲内で第1のスキャニング範囲及び/又は第2のスキャニング範囲をスキャン)できる帯域幅は、第2の位置決め帯域幅よりも狭い(例えば、10Hz又はその前後、あるいはそれ未満)。

40

【0041】

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X方向、Y方向及び/又はZ方向に沿ってワークピース102を並進移動可能な)1以上の直動ステージ、(例えば、それぞれ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ワークピース102に与えることが可能な)1以上の回転ステージ、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として提供される。一実施形態においては、第

50

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軸ステージと、X軸ステージにより支持され（これによりX軸ステージによりX方向に沿って移動可能であり）、ワークピース102をY方向に沿って移動するためのY軸ステージとを含んでいる。図示はされていないが、装置100は、第3のポジショナ110に連結されたオプションのチャックを含んでいてもよく、このチャックにワークピース102をクランプ、固着、保持、固定あるいは支持することができる。図示はされていないが、装置100は、第3のポジショナ110を支持するオプションのベースを含んでいてもよい。

#### 【0042】

これまで述べてきたように、装置100は、いわゆる「スタック型」位置決めシステムを用いている。すなわち、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などのコンポーネントの位置が、第3のポジショナ110を介して移動されるワークピース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内で静止したままである。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以上のコンポーネントを移動させるように第3のポジショナ110を配置及び構成してもよく、ワークピース102を静止したままにしてもよい。さらに他の実施形態においては、装置100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以上のコンポーネントが1以上の直動ステージ又は回転ステージにより搬送され、1以上の直動ステージ又は回転ステージがワークピース102を移動するように配置及び構成されるスプリット軸位置決めシステムを用いることもできる。このように、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などのうち1つ以上の移動に加えて、ワークピース102の移動を生じさせる。装置100において有利にあるいは有効に利用され得るスプリット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6,706,999号、第7,605,343号、第8,680,430号、第8,847,113号、又は米国特許出願公開第2014/0083983号に開示されたもののいずれか、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。これらの公報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。

#### 【0043】

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以上のコンポーネントは、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として搬送され得る。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。

#### 【0044】

##### D. スキャンレンズ

（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、一般的には、典型的には所望のプロセススポットに位置決めできるような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パルスを集束す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（この場合には、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成される）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。

#### 【0045】

##### E. コントローラ

一般的に、コントローラ114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などの装置100の1以上のコンポーネントと（例えば、USB、Ethernet、Firewire、Wi-Fi、RFID、NFC、Bluetooth、Li-Fiな

10

20

30

40

50

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通信リンクを介して)通信可能に連結されており、これらのコンポーネントは、コントローラ114により出力される1以上の制御信号に応じて動作可能となっている。

#### 【0046】

例えば、コントローラ114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よう。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。複合又は非複合相対移動を指示する制御信号を予め計算してもよいし、あるいはリアルタイムで決定してもよい。

10

#### 【0047】

一般的に、コントローラ114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構成される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構成されると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。

20

30

#### 【0048】

一実施形態においては、コントローラ114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。

40

#### 【0049】

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、ライソードライバ、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10

50

8、第3のポジショナ110、レンズアクチュエータなどのような1以上のコンポーネントの入力と通信可能に連結され得る。一実施形態においては、それぞれのドライバは、典型的には、コントローラ114が通信可能に連結される入力を含んでおり、これにより、コントローラ114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以上のコンポーネントに関連付けられた1以上のドライバの入力に伝達され得る。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などのコンポーネントは、コントローラ114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。

#### 【0050】

他の実施形態においては、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、コンポーネント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などのコンポーネントと通信可能に連結された（そして当該コンポーネントに関連付けられた）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、それぞれのコンポーネント固有のコントローラは、コントローラ114と通信可能に連結され、コントローラ114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伝達され得る。この実施形態において、コンポーネント固有のコントローラは、コントローラ114に関して述べたのと同様に構成され得る。

#### 【0051】

1以上のコンポーネント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、あるコンポーネント（例えばレーザ源104）に関連付けられたコンポーネント固有のコントローラは、あるコンポーネント（例えば第1のポジショナ106など）に関連付けられたコンポーネント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、コンポーネント固有のコントローラのうち1つ以上が、1以上の他のコンポーネント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。

#### 【0052】

### III. ワークピース材料の除去に関する実験結果

ある実施形態によれば、以下により詳細に述べるように、装置100は、ワークピース102の一部を除去して1以上のフィーチャ（例えば、開口、スロット、ビア、溝、トレチ、スクライブライン、切溝、凹部領域など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもの）を形成することによりワークピース102を加工するように構成されたレーザ源104を備えている。加工の結果として生成された表面は、以下、「加工済ワークピース表面」といい、側壁、底面など、又はこれらの任意の一部又は任意の組み合わせを含み得る。これらの実施形態においては、超短パルス持続時間有するレーザパルスを高い繰り返し率でワークピース102に照射することによりワークピース102から材料が除去される。

#### 【0053】

様々な研究によれば、（数十ps未満のパルス持続時間有するレーザパルスを用いる）超短パルス方式におけるレーザ材料加工は、それよりも長いパルスに比べて数多くの利点を有していることが示されている。ピコ秒及びフェムト秒でのレーザ相互作用の熱的衝撃は非常に限定的であり、付帯的なダメージを最小限としつつ、レーザエネルギーの放散を小さな光学的侵入深さに制限することができる。正確に制限されたこのレーザ「加熱」により、下地のバルク材料へのエネルギー損失が最小限になり、効率的で制御可能なアブレーションプロセスを実現することができる。超短パルス持続時間によって、さらに、相当な量のアブレーションプルーム及び/又はプラズマが生じる前にレーザエネルギーの多くの部分がワークピース102に確実に伝達することとなる。これよりも長いパルス持続時間のレーザパルスでは、プラズマ反射、プラズマ散乱及びプルーム散乱、及びプルーム加熱のためにそのような効率的なエネルギー結合は実現できない。超短レーザパルスが高いパルス繰り返し率（すなわち100kHzを超える）で照射される場合には、プロセススポットに

10

20

30

40

50

以前に照射されたレーザパルスにより生じた熱が、そのスポットから完全に放出されず、その熱の少なくとも一部が、次のレーザパルスが照射されるまでワークピース102内のそのスポットの近傍に存在することも一般的に知られている。したがって、以前に照射されたプロセススポットの近傍のワークピース102の領域内に熱が蓄積する傾向があり、この結果、続いて照射されるレーザパルスをワークピース102の加熱された領域に照射することができる。加熱された領域に超短レーザパルスが照射される場合には、温度が上昇することが、デブリの生成を減少しつつ、レーザと材料との間の相互作用に良い影響を与える効率的な材料除去を高める手助けとなり得る。

#### 【0054】

しかしながら、本発明者等は、(パルス繰り返し率に加え)フルエンス、平均パワー、パルスエネルギー、バイトサイズ及びスポットサイズなどのパラメータ及びこれらのパラメータのうち2つ以上を様々な組み合わせたものが、加工済ワークピース表面の表面形態に影響を与えることがある、場合によっては、加工中のデブリの生成に影響を与えることがあることを発見した。以下では、本発明者等の広範な実験的研究の間に発見された新規かつ予想できなかつた関係の例を挙げる。これらの実験においては、加工されるワークピース102の材料は、照射されるレーザパルスにおける光の波長に対して「透過的」ではなかつた(あるいは「非透過的」であった)。この文脈において、材料が、照射されるレーザパルスの特定の帯域幅内において線形吸収スペクトルと厚さを有しており、材料を(ビーム軸に沿って)透過する光の割合が99%未満、97%未満、95%未満、90%未満、75%未満、50%未満、25%未満、15%未満、10%未満、5%未満、1%未満である場合に、その材料は「非透過的」であると言える。

#### 【0055】

##### A. バイトサイズとデブリ生成との間の関係

図2は、この例ではシリコンウェハとして提供されたワークピース102の表面に形成されたトレンチ(a)から(e)の(上面から撮影した)顕微鏡写真を示している。ビーム軸とワークピース102との間で相対移動を生じさせつつ、レーザパルスが照射され、左から右に延びるプロセス軌跡に沿ってレーザパルスが照射される。それぞれのトレンチの開始端は、顕微鏡写真の左側に示されており、トレンチ(a)から(c)の終了端は右側に示されている。トレンチ(d)及び(e)の終了端の外観は、トレンチ(c)の終了端の外観と実質的に同一であった。

#### 【0056】

トレンチ(a)から(e)のそれぞれは、スポットサイズ35μm、パルス持続時間800fs、パルスエネルギー6μJのレーザパルスをパルス繰り返し率1855kHzでビーム軸に沿って伝搬させることにより形成された。連続的に照射されるレーザパルスがトレンチ(a)についてはバイトサイズ0.5μmで、トレンチ(b)についてはバイトサイズ0.475μmで、トレンチ(c)についてはバイトサイズ0.5μmで、トレンチ(d)についてはバイトサイズ0.425μmで、トレンチ(e)についてはバイトサイズ0.4μmでワークピース102に当たるようにビーム軸とワークピース102との間で相対移動を生じさせた。トレンチ(a)から(e)は、照射レーザパルスを単一パスでプロセス軌跡に沿ってスキャンすることによって形成された。

#### 【0057】

図2に示されるように、トレンチの内側及び外側の両方でデブリが顕著に目立って形成されたトレンチ(a)を形成するようにパラメータを選択した。この結果、加工済ワークピース表面が粗くなり、トレンチのエッジに沿った加工済領域の外側のワークピース表面も粗くなつた。バイトサイズを0.5μmから0.475μmに減少させると、トレンチ形成プロセスによりトレンチ(b)の長さの多くの部分に沿ってデブリが生じるが、トレンチ(b)の端部及びその近傍ではデブリが検出されないことが分かる。トレンチ(b)を形成し始めてから目立つたデブリの生成がなくなるまで約850μsが経過したと予測される(すなわち、デブリ遷移期間は約850μsであった)。トレンチ(c)、(d)及び(e)の形成中にそれぞれバイトサイズを0.45μmから0.425μm、0.4μmとさらに減少させると、デブリ遷移

10

20

30

40

50

期間はそれぞれ約600 μs、約320 μs及び約305 μsに短縮された。

【0058】

特定の理論に拘束されることは望んでいないが、本発明者等は、(スポットサイズ、パルス持続時間、パルスエネルギー及びパルス繰り返し率を一定に保持しつつ)バイトサイズを減少させることにより、ワークピースにおいてレーザパルスが連続的に照射される空間領域が減少するため、デブリ遷移期間が短くなると考えている。これにより、照射されたプロセススポットを局所的に取り囲むワークピース102内の領域に熱が蓄積し得る。デブリ遷移期間が経過した後、これらの領域の一部(すなわち、プロセス軌跡に沿って位置している領域)の温度は上昇したまま(すなわち、除去される材料の融解温度と気化温度との間)となる。ワークピース102のこれらの領域内に残った残留熱によって、目立ったデブリを生じることのない、内部の材料の効率的なアブレーションが可能となる。

10

【0059】

B. パルスエネルギーとデブリ生成との間の関係

図3は、この例ではシリコンウェハとして提供されたワークピース102の表面に形成されたトレンチ(a)から(e)の(上面から撮影した)顕微鏡写真を示している。ビーム軸とワークピース102との間で相対移動を生じさせつつ、レーザパルスが照射され、左から右に延びるプロセス軌跡に沿ってレーザパルスが照射される。それぞれのトレンチの開始端のみが示されている。

【0060】

トレンチ(a)から(e)のそれぞれは、スポットサイズ35 μm、パルス持続時間800fsのレーザパルスをパルス繰り返し率1979kHzでビーム軸に沿って伝搬させることにより形成された。連続的に照射されるレーザパルスがそれぞれのトレンチについてバイトサイズ0.5 μmでワークピース102に当たるようにビーム軸とワークピース102との間で相対移動を生じさせた。ワークピース102に照射されたレーザパルスは、トレンチ(a)の形成中は6 μJのパルスエネルギーを有し、トレンチ(b)に対しては5 μJのパルスエネルギーを有し、トレンチ(c)に対しては4 μJのパルスエネルギーを有し、トレンチ(d)に対しては3 μJのパルスエネルギーを有し、トレンチ(e)に対しては2 μJのパルスエネルギーを有していた。トレンチ(a)から(e)は、照射レーザパルスを単一パスでプロセス軌跡に沿ってスキャンすることによって形成された。

20

【0061】

図3に示されるように、トレンチの外側の開始端の近傍でデブリが顕著に目立って形成されたトレンチ(a)を形成するようにパラメータを選択した。この結果、加工済み領域の外側のワークピース表面が粗くなり(開始端から離れたトレンチに沿ってより目立たなくなり)、トレンチ内の加工済ワークピース表面は比較的滑らかになった。パルスエネルギーを6 μJから5 μJに下げるとき、トレンチ形成プロセスによりトレンチの外側の開始端の近傍でデブリが顕著に目立って形成され(開始端から離れたトレンチに沿ってもデブリが目立つ)、加工済み領域の外側のワークピース表面が粗くなることが分かる。トレンチ(b)内の加工済ワークピース表面は、トレンチ(a)内の加工済ワークピース表面ほど滑らかではなかった。さらにパルスエネルギーを4 μJに下げるとき、トレンチ形成プロセスによりトレンチ(c)の開始端においてデブリが顕著に目立って生成され、加工済み領域の外側のワークピース表面が粗くなり、トレンチ(c)内の加工済ワークピース表面も粗くなる。また、トレンチ(a)から(c)の長辺に沿って、開始端から終了端まで改鑄材料の稜線の形態でデブリが存在した。さらにパルスエネルギーを3 μJに下げるとき、トレンチ形成プロセスによりトレンチ(d)の開始端の内部及びその周囲にデブリが目立って形成され、加工済み領域の外側のワークピース表面が粗くなり、トレンチ(d)内の加工済ワークピース表面も粗くなることがわかる。しかしながら、比較的短いデブリ遷移期間の後、目立ったデブリの生成は見られなかった。トレンチ(d)の開始端からの距離が増加すると、改鑄材料の稜線も消えた。さらにパルスエネルギーを2 μJに下げるとき、トレンチ(e)の開始端又はその近傍のトレンチ(e)の外側で非常に少ない量のデブリが生成され、トレンチ内には目立ったデブリがないことがわかる。しかしながら、トレンチ(e)

30

40

50

内の加工済ワークピース表面は滑らかであり、著しいデブリは見られなかった。トレンチ(e)の外側で改鋸材料の稜線も見られなかった。

#### 【0062】

##### C. デブリ生成に対するスケーリングの影響

図4は、レーザ加工済フィーチャ(a)及び(b)の(上面から撮影した)顕微鏡写真を示している。いずれのレーザ加工済フィーチャも、この例ではシリコンウェハとして提供されるワークピース102の表面に形成された1組の交差スクリーブラインを含んでいる。

#### 【0063】

フィーチャ(a)及び(b)を形成するために、ビーム軸とワークピース102との間で相対移動を生じさせつつ、レーザパルスがワークピース102に照射された。それぞれのスクリーブラインに対して3本の平行なスキャンラインを含むプロセス軌跡に沿ってレーザパルスが照射され、それぞれのスキャンラインは単一のパスで行われた。フィーチャ(a)及び(b)のそれぞれは、パルス持続時間800fsのレーザパルスをパルス繰り返し率1855kHzでビーム軸に沿って伝搬させることにより形成された。フィーチャ(a)の形成中にワークピース102に照射されたレーザパルスは、25μmのスポットサイズと3.14μJのパルスエネルギーを有しており、連続的に照射されるレーザパルスがバイトサイズ0.1μmでワークピース102に当たるようにビーム軸とワークピース102との間で相対移動を生じさせた。フィーチャ(b)の形成中にワークピース102に照射されたレーザパルスは、35μmのスポットサイズと6.16μJのパルスエネルギーを有しており、連続的に照射されるレーザパルスがバイトサイズ0.25μmでワークピース102に当たるようにビーム軸とワークピース102との間で相対移動を生じさせた。

10

20

20

#### 【0064】

図4から明らかなように、フィーチャ(a)の形成中にかなりの量のデブリが生成され、スクリーブラインの加工済ワークピース表面は粗くなり、孔や他のダメージが目に見えた。これに対して、フィーチャ(b)の形成中には実質的にデブリは生成されず、得られたスクリーブラインの加工済ワークピース表面は滑らかで、実質的にデブリの堆積もなかった。注:点線の円で囲ったフィーチャ(b)の領域においては、かなりのデブリが生成され堆積した。この領域は、2回加工されたフィーチャの領域に対応している。

30

#### 【0065】

##### D. バイトサイズ、フルエンス及びパルス繰り返し率の表面粗さ及び材料除去速度との関係

図5は、この例ではシリコンウェハとして提供されるワークピース102に、2つのパルス繰り返し率(すなわち927kHz以下と1855kHz以下)のうちの1つでレーザパルスをビーム軸に沿って伝搬させつつ、照射されるレーザパルスを加工軌跡に沿って単一パスでスキャンすることにより形成されるトレンチ内の加工済ワークピース表面の平均表面粗さ(Ra)と、トレンチ形成プロセス中の材料除去速度(面積um<sup>2</sup>)との関係を、バイトサイズ(μmの単位で測定される)及びフルエンス(J/cm<sup>2</sup>の単位で測定される)の関数として示す1組のグラフを示している。平均表面粗さ(Ra)は、50倍の対物レンズを有するキーエンス社3次元共焦点走査型顕微鏡を用いて測定した。

40

#### 【0066】

図5から明らかなように、0.2μmより大きなバイトサイズでは、加工済ワークピース表面の平均表面粗さは、約0.25μm以下に低下し、鏡のように滑らかな表面仕上げに近づく。試験されたすべてのバイトサイズ及びフルエンスレベルに関して、1855kHz以下のパルス繰り返し率で照射されるレーザパルスを用いて得られる加工済ワークピース表面の平均表面粗さは、927kHz以下のパルス繰り返し率で照射されるレーザパルスを用いて得られる、対応する加工済ワークピース表面の平均表面粗さよりも概して小さい。um<sup>2</sup>面積値は、スクリーブの断面積を表しており、バイトサイズが大きくなると材料除去速度が低下することを示している。927kHz以下のパルス繰り返し率でのトレンチ形成中の材料除去速度は、1855kHz以下のパルス繰り返し率でのトレンチ形成中の材料除去速度と同様である。

50

#### 【0067】

## E. バイトサイズ、フルエンス、パルス繰り返し率及び平均パワーのデブリ生成との関係

図6は、この例ではシリコンウェハとして提供されるワークピース102にトレンチを形成するためのプロセスウィンドウを示す1組のグラフを示している。i)目立ったデブリの生成がない加工済ワークピース表面（すなわち、図2から図5に関して述べたような、目立ったデブリの堆積がない加工済ワークピース表面）が形成され、ii)デブリが目立って生成される加工済ワークピース表面（すなわち、図2から図5に関して述べたような、目立ったデブリの堆積がある加工済ワークピース表面）が形成される。参照番号600により示されるパターンで印された領域は、デブリが目立って生成されるパラメータ空間を表しており、参照番号602により示されるパターンで印された領域は、目立ったデブリが形成されないパラメータ空間を表している。観察されたトレンチは、5つのパルス繰り返し率（すなわち、927.55kHz、1264kHz、1855kHz、2022kHz及び3051kHz）のうちの1つでレーザパルスをビーム軸に沿って伝搬させつつ、照射されるレーザパルスを加工軌跡に沿って単一パスでスキャンすることにより形成された。それぞれのパルス繰り返し率で、複数のトレンチが形成された。それぞれのトレンチは、バイトサイズ（μmの単位で測定される）、フルエンス（J/cm<sup>2</sup>の単位で測定される）及び平均パワー（Wの単位で測定される）の異なる組み合わせを用いて形成された。

### 【0068】

図6に示されるように、927.55kHz及び1264kHzでは、試験されたバイトサイズ、フルエンス及び平均パワーの値のすべての組み合わせにおいて、程々の量から相当量のデブリを生成することがわかった。一方、1855kHz、2022kHz及び3051kHzでは、一部（すべてではない）のパラメータ値の組み合わせにおいて、デブリの堆積がほとんどないか全くない加工済ワークピース表面が得られることがわかった。この知見は、加工される特定の材料に対して、それ以下ではデブリ生成が避けられないパルス繰り返し率の閾値があることを示す傾向にある。しかしながら、パルス繰り返し率の閾値以上では、他の一般的な観察結果を得ることができる。すなわち、比較的低いフルエンス又は平均パワー値では、程々の量又は相当量のデブリを生成することなくフィーチャを形成するために、比較的広い範囲のバイトサイズを使ってワークピース102を加工することができる。また、フルエンス又は平均パワーが増加すると、このバイトサイズの範囲が狭くなる。

### 【0069】

領域600と領域602が重なるパラメータ空間が存在する。例えば、参照番号604により示されるパターンにより印された領域を参照されたい。この重なりは、(1) 相当な又は目立ったデブリの生成と些細な又は目立たないデブリの生成との間に遷移があること、又は、(2) 与えられたフルエンス、パワー及びバイトサイズに対して、清浄な又は滑らかなフィーチャ又はデブリの生成を伴うフィーチャを生成し得るプロセスが存在することを示していると一般的に理解することができる。一例として、1855kHzでは、パワーとフルエンスを整合させるプロセスに対して、異なる結果（すなわち、清浄な又は滑らかなフィーチャ又はデブリの生成を伴うフィーチャ）を生じるポットサイズとパルスエネルギーの組み合わせが存在する。換言すれば、領域600と領域602が重なるパラメータ空間内の所定の座標では、照射されるレーザパルスのスポットサイズ及びパルスエネルギーに応じて、清浄又は滑らかな表面を有するフィーチャ又はデブリの生成を伴うフィーチャを形成することができる。

### 【0070】

## IV. 実験結果に基づく実施形態の例

上記第III章A節からE節において述べた実験の結果に基づけば、本発明の一実施形態は、除去プロセス中に（非透過的なワークピース102に照射されるレーザパルスの光の波長に対して）材料を除去することによりワークピース102にフィーチャ（例えば、スクライプ又は他のトレンチ又は凹部など）を形成するためのレーザプロセスとして特徴付けることができる。例えば、図9Aに示される実施形態を参照すると、ワークピース102は、上面（例えば面900a）と上面と反対側の下面（例えば面900b）とを有する半導体ウェハであ

り得る。半導体ウェハは、（例えば、シリコン、ゲルマニウム、 $Si_{1-x}Ge_x$ （ $0.0001 < x < 0.9999$ ）、GaAs、GaN、InP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材料から形成される）基板902と、（例えば、電界効果トランジスタ、誘電体層、配線メタライゼーション構造、パッシベーション層など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものから形成される）デバイス層904とを含み得る。ワークピース102は、上述した半導体ウェハ以外の任意の方法により提供されてもよいことは認識すべきである。例えば、ワークピース102は、 $Al_2O_3$ 、AlN、BeO、Cu、GaAs、GaN、Ge、InP、Si、 $SiO_2$ 、SiC、 $Si_{1-x}Ge_x$ （ $0.001 < x < 0.9999$ ）など、又はこれらを任意に組み合わせたもの又はこれらの任意の合金から形成される基板（例えば、電子基板、半導体基板、光学基板など）を含む任意の単層構造又は多層構造、プラスチック、ガラス（例えば、非強化ガラス又は熱強化ガラス又は化学強化ガラス又はその他のガラスのいずれか）、石英、サファイヤ、プラスチック、シリコン、1以上の金属（例えば、Al、Ag、Au、Cu、Fe、In、Mg、Pt、Sn、Tiなど、又はこれらを任意に組み合わせたもの又はこれらの任意の合金）、導電性金属酸化物（例えばIT0など）、透明な導電性ポリマー、セラミック、ワックス、樹脂、（例えば、酸化ケイ素、窒化ケイ素、酸窒化ケイ素など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののように層間誘電体構造として用いられる）無機誘電材料、low-k誘電体材料（例えば、メチルシリセスキオキサン（MSQ）、水素シリセスキオキサン（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）、ファイバガラス、高分子材料（ポリアミド、ポリイミド、ポリエスチル、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、及びこれらの任意の化合物、複合物、又は混ぜ物）など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものなどから形成される物として提供され得る。

#### 【0071】

次のうち1つ以上を有利に達成するような方法でワークピース102の一部を確実に除去するように除去プロセスのパラメータ（例えば、フルエンス、平均パワー、パルス繰り返し率、パルスエネルギー、スポットサイズ、バイトサイズなどのうち1つ以上）が選択され、制御され、あるいは設定される。加工中のデブリの生成を最小限又はゼロにすること、滑らかな加工済ワークピース表面を生成すること、欠陥、傷又はクラックの数の少ない加工済ワークピース表面を生成すること、工済ワークピース表面に隣接してワークピース102内に均一なHAZを生成すること。例えば、除去プロセス中に、ワークピース102と交差するビーム軸に沿ってレーザパルスビームを照射してもよく、連続的に照射されるレーザパルスが非ゼロバイトサイズでワークピース102に当たり、ワークピース102の上面900aにフィーチャ（例えば、図9Bに示されるようなフィーチャ906であり、凹部やトレンチなどであり得る）を形成するようにレーザパルスビームをスキャンしてもよい。

#### 【0072】

図9Bに示される実施形態においては、フィーチャ906は、デバイス層904を貫通し、（例えば、基板902の上面から測定した深さdまで）基板902の一部にまで延びている。ある実施形態においては、深さdは、5μm（又はその前後）から22μm（又はその前後）の範囲であり得る。例えば、深さdは、5μm、5.5μm、6.0μm、6.5μm、7.0μm、7.5μm、8.0μm、8.5μm、10μm、12μm、15μm、17μm、20μm、22μmなど、あるいはこれらの値のいずれかの間であり得る。しかしながら、深さdは、5μm未満であってもよく、あるいは22μmよりも大きくてよいことは認識すべきである。他の実施形態においては、フィーチャ906

#### 【0073】

十分に滑らかな加工済ワークピース表面（例えば、加工済ワークピース表面906）を形

10

20

30

40

50

成するようにパラメータを選択する場合には、ワークピース102の内部加工やワークピース102のワークピース貫通加工など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののような後続のプロセスを容易にするために加工済ワークピース表面を用いてもよい。加工済ワークピース表面が1.0 μm以下の平均表面粗さ( $R_a$ )を有する場合には、加工済ワークピース表面(例えば加工済ワークピース表面906)は後続のプロセスを容易にするのに「十分に滑らかである」と考えることができる。ある実施形態においては、加工済ワークピース表面は、1.0 μm未満、0.75 μm未満、0.5 μm未満、0.4 μm未満、0.3 μm未満、0.25 μm未満、0.2 μm未満、0.15 μm未満など、あるいはこれらの値のいずれかの間の平均表面粗さ( $R_a$ )を有し得る。

## 【0074】

10

ワークピース102の内部加工は、他のレーザパルスビームを最初に加工済ワークピース表面を通過し、その後、ワークピース内に入るように照射することにより行うことができる。この場合において、レーザパルスのビームウェストがワークピース102の内部に位置するようにレーザパルスビームが集束される。ワークピース102の内部加工中に使用されるレーザパルスは、加工されるワークピース102内の材料に対して加工済ワークピース表面の初期形成中に使用される波長よりも透過的な波長を有する。そのような内部加工に関連付けられたパラメータ(例えば、フルエンス、平均パワー、パルス繰り返し率、パルスエネルギー、スポットサイズ、バイトサイズなどのうち1つ以上)は、ワークピース102内の材料による照射レーザパルスの非線形吸収を誘起し、これにより、照射されたレーザパルスのビームウェスト又はその近傍にあるワークピース102内の材料の一部(例えば、図9Cに示される部分908)を加工(例えば、溶融したり、蒸発させたり、アブレートしたり、クラックしたり、脱色したりなど、あるいは化学的組成、結晶構造、電子構造、マイクロ構造、ナノ構造、濃度、粘度、屈折率、透磁率、比誘電率などの1以上の特質又は特性を変えたり)するように選択される。例えば、(例えば、図7の顕微鏡写真に示されるような)十分に滑らかな加工済ワークピース表面を形成するためにシリコンウェハのようなワークピース102にトレーニングが形成された後、上述のようにして内部加工を行って、(例えば、図8A及び図8Bの顕微鏡写真に示されるように(図8Aは図7に示されるトレーニングの幅を横断する図であり、図8Bは図7に示されるトレーニングの長さ方向に沿った図である))シリコンウェハの内部に一連のクラックを形成してもよい。

20

## 【0075】

30

図9Dを参照すると、ワークピース102のワークピース貫通加工は、他のレーザパルスビームを最初に加工済ワークピース表面(例えば加工済ワークピース表面906a)を通過し、その後、ワークピース内に入るように照射することにより行うことができる。レーザパルスのビームウェストがワークピース102の下面900b又はその近傍に位置するように、照射されるレーザパルスビームが集束される。ワークピース102の内部加工中に使用されるレーザパルスは、加工されるワークピース102内の材料に対して加工済ワークピース表面の初期形成中に使用される波長よりも透過的な波長を有する。そのようなワークピース貫通加工に関連付けられたパラメータ(例えば、フルエンス、平均パワー、パルス繰り返し率、パルスエネルギー、スポットサイズ、バイトサイズなどのうち1つ以上)は、下面900bでワークピース102の材料による照射レーザパルスの線形吸収又は非線形吸収を誘起し、これにより、(例えば、下面900bでトレーニング又は凹部910を形成するように)照射されたレーザパルスのビームウェスト又はその近傍にあるワークピース102の材料の一部を加工するように選択される。ワークピース102の実施可能な貫通ワークピース加工の例は、米国特許第9,610,653号において述べられており、この公報はその全体が参照により本明細書に組み込まれる。

40

## 【0076】

V. 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

50

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。

#### 【0077】

例えば、上記第III章で述べた実験は、ベアシリコンウェハに対して行ったが、加工される材料が照射レーザパルスの波長に対して非透過的であれば、超短レーザパルスを用いて（シリコンウェハ以外の）材料を含むワークピースを加工した場合にも同様の効果が見られることを認識すべきである。このように、シリコン以外の材料から構成される半導体ウェハ、電子デバイス基板又は光学デバイス基板（例えば、 $Al_2O_3$ 、 $AlN$ 、 $BeO$ 、 $Cu$ 、 $GaAs$ 、 $GaN$ 、 $Ge$ 、 $InP$ 、 $Si$ 、 $SiO_2$ 、 $SiC$ 、 $Si_{1-x}Ge_x$  ( $0.0001 < x < 0.9999$ ) など、あるいはこれらの任意の組み合わせ又はこれらの任意の合金から形成される基板）、プラスチック、ガラス（非強化ガラス又は熱強化ガラス又は化学強化ガラス又はその他のガラスのいずれか）、石英、サファイア、プラスチック、シリコンなど、1以上の金属（例えば、 $Al$ 、 $Ag$ 、 $Au$ 、 $Cu$ 、 $Fe$ 、 $In$ 、 $Mg$ 、 $Pt$ 、 $Sn$ 、 $Ti$ など、又はこれらを任意に組み合わせたもの又はこれらの任意の合金）、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、（例えば、酸化ケイ素、窒化ケイ素、酸窒化ケイ素など、あるいはこれらを任意に組み合わせたもののように層間誘電体構造として用いられる）無機誘電材料、Low-k誘電体材料（例えば、メチルシリセスキオキサン（MSQ）、水素シリセスキオキサン（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）、ファイバガラス、高分子材料（ポリアミド、ポリイミド、ポリエチル、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、及びこれらの任意の化合物、複合物、又は混ぜ物）など、あるいはこれらを任意に組み合わせたものなどから形成される物を加工するように上述した実施形態を有利に適合させることができることを認識すべきである。

#### 【0078】

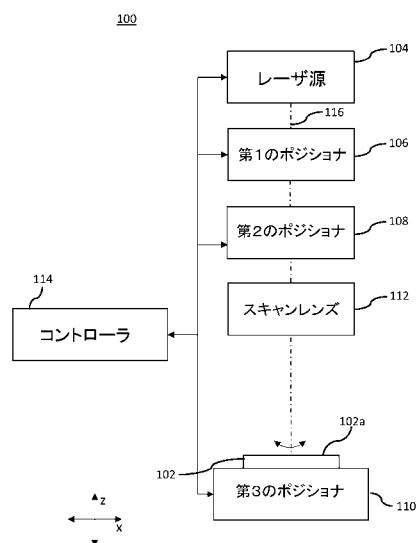
したがって、そのような改良はすべて、特許請求の範囲において規定される本発明の範囲に含まれることを意図している。例えば、当業者は、そのような組み合わせが互いに排他的になる場合を除いて、いずれかの文や段落、例又は実施形態の主題を他の文や段落、例又は実施形態の一部又は全部の主題と組み合わせることができることを理解するであろう。したがって、本発明の範囲は、以下の特許請求の範囲とこれに含まれるべき請求項の均等物とによって決定されるべきである。

10

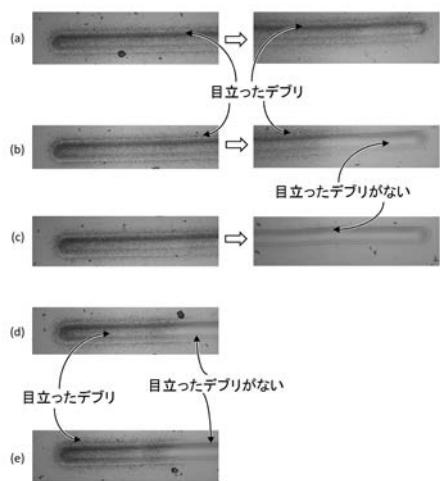
20

30

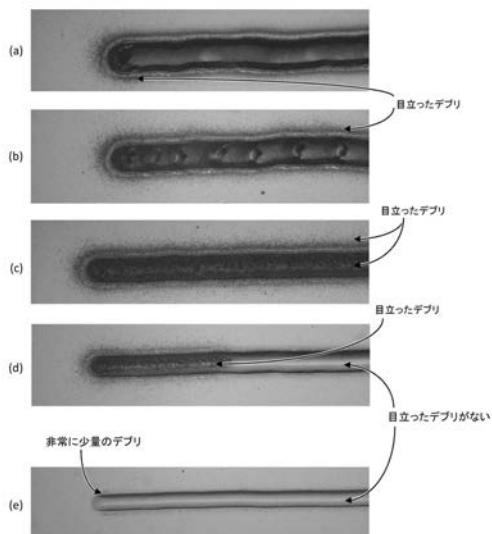
【図1】



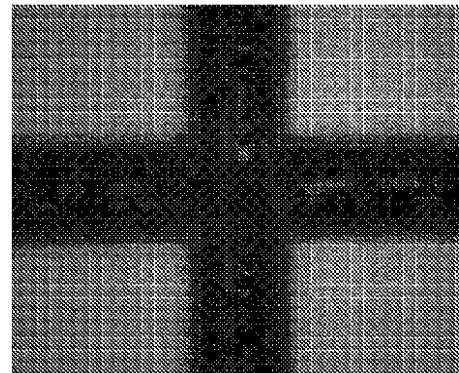
【図2】



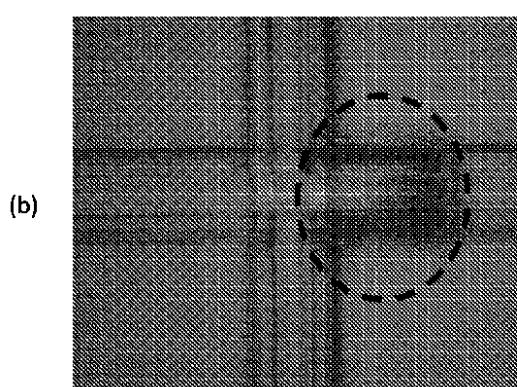
【図3】



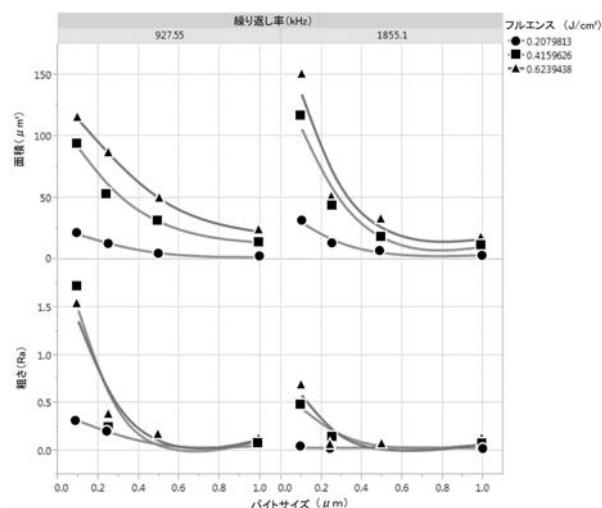
【図4 (a)】



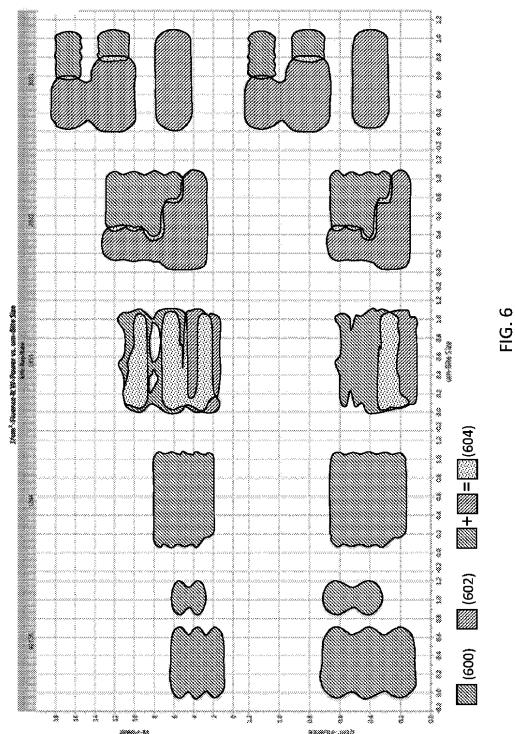
【図 4 ( b )】



【図 5】



【図 6】



【図 7】

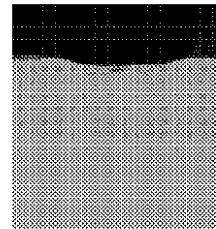


FIG. 7

【図 8 A】

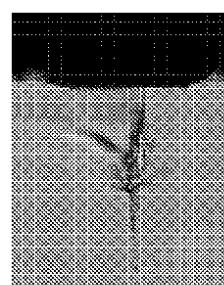


FIG. 8A

【図 8 B】

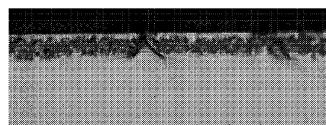


FIG. 8B

【図 9 C】

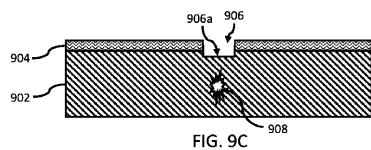


FIG. 9C

【図 9 A】

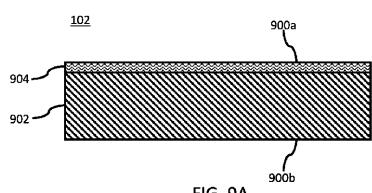


FIG. 9A

【図 9 D】

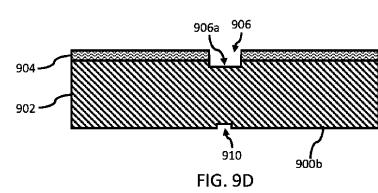


FIG. 9D

【図 9 B】

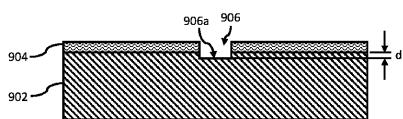


FIG. 9B

## 【国際調査報告】

<b>INTERNATIONAL SEARCH REPORT</b>		International application No. <b>PCT/US2017/043229</b>
<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> <b>B23K 26/0622(2014.01)i, B23K 26/06(2006.01)i, B23K 101/36(2006.01)n</b>		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B23K 26/0622; B23K 26/36; C03B 33/02; G06K 19/06; B23K 26/00; B23K 26/30; B23K 101/36		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Korean utility models and applications for utility models Japanese utility models and applications for utility models		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) eKOMPASS(KIPO internal) & Keywords: laser, processing, workpiece, beam, pulse, duration, repetition, rate, mean, surface, roughness		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2015-0232369 A1 (CORNING INCORPORATED) 20 August 2015 See paragraphs [0047]–[0049], [0058]; claims 1, 17–19, 24, 30; and figure 1A.	1–13
Y		14–15
Y	US 2008-0073438 A1 (GU et al.) 27 March 2008 See paragraph [0194]; and figure 2.	14–15
X	US 5138130 A (ISLAM et al.) 11 August 1992 See column 4, line 41 – column 6, line 15; and figure 1.	1–13
X	US 2014-0083986 A1 (ELECTRO SCIENTIFIC INDUSTRIES, INC.) 27 March 2014 See paragraphs [0040]–[0046]; and figure 10.	1–13
X	US 2015-0158116 A1 (ELECTRO SCIENTIFIC INDUSTRIES, INC.) 11 June 2015 See paragraphs [0080]–[0110] and figures 1–3.	1–13
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.		<input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "J" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search 26 October 2017 (26.10.2017)		Date of mailing of the international search report <b>26 October 2017 (26.10.2017)</b>
Name and mailing address of the ISA/KR International Application Division Korean Intellectual Property Office 189 Cheongsa-ro, Seo-gu, Daejeon, 35208, Republic of Korea Facsimile No. +82-42-481-8578		Authorized officer KIM, Jin Ho Telephone No. +82-42-481-8699
		

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International application No.

**PCT/US2017/043229**

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2015-0232369 A1	20/08/2015	CN 106029590 A CN 106102983 A CN 106132886 A EP 3083510 A1 EP 3099640 A2 JP 2017-508691 A JP 2017-510535 A JP 2017-511777 A KR 10-2016-0098468 A KR 10-2016-0101068 A KR 10-2016-0113694 A SG 11201604869P A TW 201536460 A US 2015-0165548 A1 US 2017-0001900 A1 US 2017-0008793 A1 WO 2015-095088 A1 WO 2015-095089 A2 WO 2015-095089 A3 WO 2015-113024 A1 WO 2015-113026 A2 WO 2015-113026 A3	12/10/2016 09/11/2016 16/11/2016 26/10/2016 07/12/2016 30/03/2017 13/04/2017 27/04/2017 18/08/2016 24/08/2016 30/09/2016 28/07/2016 01/10/2015 18/06/2015 05/01/2017 12/01/2017 25/06/2015 25/06/2015 08/10/2015 30/07/2015 30/07/2015 01/10/2015
US 2008-0073438 A1	27/03/2008	AT 550132 T CN 1981291 A CN 1981291 B EP 1779286 A2 EP 1779286 A4 EP 1779286 B1 JP 2008-504964 A KR 10-1278433 B1 KR 10-2007-0036784 A US 2006-0000814 A1 US 2008-0011852 A1 US 7469831 B2 WO 2006-012124 A2 WO 2006-012124 A3 WO 2006-012124 A8	15/04/2012 13/06/2007 15/06/2011 02/05/2007 03/12/2008 21/03/2012 21/02/2008 24/06/2013 03/04/2007 05/01/2006 17/01/2008 30/12/2008 02/02/2006 10/08/2006 23/03/2006
US 5138130 A	11/08/1992	CA 2009514 A1 CA 2009514 C	07/08/1991 25/04/1995
US 2014-0083986 A1	27/03/2014	CN 104703748 A EP 2897760 A1 EP 2897760 A4 JP 2015-533654 A KR 10-2015-0060826 A TW 201431635 A US 2014-0093693 A1	10/06/2015 29/07/2015 20/07/2016 26/11/2015 03/06/2015 16/08/2014 03/04/2014

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International application No.

**PCT/US2017/043229**

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
		WO 2014-058606 A1	17/04/2014
US 2015-0158116 A1	11/06/2015	CN 105916626 A EP 3077149 A1 EP 3077149 A4 JP 2016-539005 A KR 10-2016-0093593 A TW 201531362 A WO 2015-084860 A1	31/08/2016 12/10/2016 20/09/2017 15/12/2016 08/08/2016 16/08/2015 11/06/2015

## フロントページの続き

(81)指定国・地域 AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,MK,MT,NL,NO,PL,PT,R0,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IR,IS,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,SM,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT

(特許庁注：以下のものは登録商標)

1. FIREWIRE
2. BLUETOOTH
3. JAVA
4. VISUAL BASIC

(72)発明者 カイスリンガー,マイケル

アメリカ合衆国, 97229 オレゴン州, ポートランド, ノースウェスト・サイエンス・パーク  
・ドライブ 13900 エレクトロ サイエンティフィック インダストリーズ インコーポレーテッド

(72)発明者 クライネルト,ヤン

アメリカ合衆国, 97229 オレゴン州, ポートランド, ノースウェスト・サイエンス・パーク  
・ドライブ 13900 エレクトロ サイエンティフィック インダストリーズ インコーポレーテッド

(72)発明者 リン,ジイビン

アメリカ合衆国, 97229 オレゴン州, ポートランド, ノースウェスト・サイエンス・パーク  
・ドライブ 13900 エレクトロ サイエンティフィック インダストリーズ インコーポレーテッド

F ターム(参考) 4E168 AB02 AC01 AD01 AD02 AD12 AD14 AD18 AE00 AE01 CB04  
DA06 DA13 DA23 DA24 DA25 DA28 DA32 DA38 DA42 DA46  
DA47 EA11 EA13 EA15 JA02 JA03 JA04 JA05 JA12 JA13  
JA14 JA15 JA17 JA25 KA04  
4G015 FA03 FA06 FB01 FB02 FC11 FC14  
5F063 AA15 AA35 AA43 BA07 BA17 BA33 BA43 BA44 BA45 BA47  
BA48 CB02 CB06 CB12 CB13 CB16 CB17 CC23 DD26 DD31  
DD32