

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4741795号
(P4741795)

(45) 発行日 平成23年8月10日 (2011.8.10)

(24) 登録日 平成23年5月13日 (2011.5.13)

(51) Int. Cl.	F I
B 2 3 K 26/00 (2006.01)	B 2 3 K 26/00 N
H O 1 S 3/00 (2006.01)	H O 1 S 3/00 B
H O 1 S 3/10 (2006.01)	H O 1 S 3/10 Z

請求項の数 55 (全 29 頁)

(21) 出願番号	特願2003-549041 (P2003-549041)	(73) 特許権者	591056259
(86) (22) 出願日	平成14年12月3日 (2002.12.3)		ジェネラル アトミックス
(65) 公表番号	特表2005-511314 (P2005-511314A)		アメリカ合衆国 カリフォルニア州, サン
(43) 公表日	平成17年4月28日 (2005.4.28)		ディエゴ, ジェネラル アトミックス コ
(86) 国際出願番号	PCT/US2002/038471		ート 3550
(87) 国際公開番号	W02003/047807	(74) 代理人	100077481
(87) 国際公開日	平成15年6月12日 (2003.6.12)		弁理士 谷 義一
審査請求日	平成17年11月22日 (2005.11.22)	(74) 復代理人	100115624
審査番号	不服2009-10026 (P2009-10026/J1)		弁理士 濱中 淳宏
審査請求日	平成21年5月18日 (2009.5.18)	(74) 復代理人	100120581
(31) 優先権主張番号	60/338, 258		弁理士 市原 政喜
(32) 優先日	平成13年12月4日 (2001.12.4)	(74) 代理人	100088915
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 阿部 和夫
(31) 優先権主張番号	10/120, 731		
(32) 優先日	平成14年4月10日 (2002.4.10)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザ加工における材料除去レートを増大する方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レーザパルスのバーストを供給するステップであって、前記バーストの各々は少なくとも2つレーザパルスを含み、前記レーザパルスの各々はほぼ10psから100nsの間の範囲内のパルス持続期間を有し、前記バーストの各々の前記レーザパルスの各々間の時間はほぼ5nsから5μsの間の範囲内にあり、連続するバースト間の時間は前記バーストの各々に含まれる前記レーザパルスの各々間の時間より長いステップと、

前記バーストをワークピースの方向に向けるステップであって、前記バーストの各々の一次レーザパルスの強度は、十分に前記ワークピースの一部が融点を超える温度を呈示させるよう選択されており、少なくとも1つの続くレーザパルスは該一次レーザパルスによる加熱によって生じた残滓と相互作用するよう時間調整され、該少なくとも1つの続くレーザパルスの強度は、前記残滓の損傷閾値を超えるよう選択されるステップと

を備え、

前記一次レーザパルスおよび前記少なくとも1つの続くレーザパルスは、前記少なくとも1つの続くレーザパルスを、前記残滓と相互作用するよう時間調整することによって材料除去レートを増大させるように、協同して作用することを特徴とする材料を修正する方法。

【請求項 2】

前記バーストの各々の前記レーザパルスは、離散レーザパルスを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記バーストの各々は、重なり合うレーザーパルスを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

バースト内の重なり合うレーザーパルス対の間の中間レーザー放射の強度は、前記ワークピースと相互作用する際に追加のアブレーションプラズマを生成しない強度であることを特徴とする請求項 3 に記載の方法。

【請求項 5】

前記バーストに含まれる前記レーザーパルスは、実質的に等しい持続期間を有することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

10

【請求項 6】

前記バーストに含まれる前記レーザーパルスは、異なる持続期間を有することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

前記バーストに含まれる前記レーザーパルスは、実質的に等しいエネルギーを有することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

前記バーストに含まれる前記レーザーパルスは、異なるエネルギーを有することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 9】

前記バーストに含まれる前記レーザーパルスは、実質的に等しい同一の空間分布を有することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

20

【請求項 10】

前記バーストに含まれる前記レーザーパルスは、異なる空間分布を有することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 11】

2つ以上の前記バーストは、繰り返し前記ワークピースの方向に向けられることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 12】

前記バーストに含まれる前記レーザーパルスは、実質的に同一の波長を有する光を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

30

【請求項 13】

前記バーストに含まれる前記レーザーパルスは、異なる波長を有する光を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 14】

レーザーパルスのバーストを供給するステップであって、前記バーストの各々は少なくとも2つレーザーパルスを含み、連続するバースト間の時間は前記バーストの各々に含まれる前記レーザーパルスの各々間の時間より長いステップと、

前記バーストをワークピースの方向に向けステップであって、前記バーストの各々の一次レーザーパルスの強度は前記ワークピースの損傷閾値を超えるよう選択されるステップと、

40

を備え、前記バーストの各々の一次パルスは、アブレーションプラズマおよびイジェクタを生成し、

前記バーストの各々の二次パルスは、アブレーションプラズマの実質的な散逸の後に発生し、およびイジェクタと相互作用するように時間調整され、該調整によって前記ワークピースと相互作用する加熱された材料を形成し、

前記一次パルスおよび前記二次パルスを、前記二次パルスを、前記イジェクタと相互作用するよう時間調整することによって材料除去レートを増大させるように、協同して作用することを特徴とする材料を修正する方法。

【請求項 15】

50

前記レーザパルスは、ほぼ 10 ps から 100 ns の間の範囲内のパルス持続期間を有し、前記バーストの各々の前記レーザパルスの各々間の時間は、ほぼ 5 ns から $5 \mu\text{s}$ の間の範囲内であることを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 16】

前記バーストの各々の前記レーザパルスは、離散レーザパルスを含むことを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 17】

前記バーストの各々は、重なり合うレーザパルスを含むことを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 18】

バースト内の重なり合うレーザパルス対の間の中間レーザ放射の強度は、前記ワークピースと相互作用する際に追加のアブレーションプラズマを生成しない強度であることを特徴とする請求項 17 に記載の方法。

【請求項 19】

前記バーストに含まれる前記レーザパルスは、実質的に等しい持続期間を有することを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 20】

前記バーストに含まれる前記レーザパルスは、異なる持続期間を有することを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 21】

前記バーストに含まれる前記レーザパルスは、実質的に等しいエネルギーを有することを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 22】

前記バーストに含まれる前記レーザパルスは、異なるエネルギーを有することを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 23】

前記バーストに含まれる前記レーザパルスは、実質的に同一の空間分布を有することを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 24】

前記バーストに含まれる前記レーザパルスは、異なる空間分布を有することを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 25】

2つ以上の前記バーストは、繰り返し前記ワークピースの方向に向けられることを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 26】

前記バーストに含まれる前記レーザパルスは、実質的に同一の波長を有する光を含むことを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 27】

前記バーストに含まれる前記レーザパルスは、異なる波長を有する光を含むことを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 28】

レーザパルスのバーストを供給するステップであって、前記バーストの各々は少なくとも2つレーザパルスを含み、連続するバースト間の時間は前記バーストの各々に含まれる前記レーザパルスの各々の間の時間より長いステップと、

前記バーストをワークピースの方向に向けるステップであって、前記バーストの各々の一次レーザパルスの強度は前記ワークピースの損傷閾値を超えるよう選択されるステップと

を備え、前記バーストの各々の一次パルスは、 20000 K より高い温度に対する第1の材料段階、および 10000 K より低い温度に対する第2の材料段階を作り、

前記バーストの各々の二次パルスは、前記第2の材料段階と主に相互作用するように時

10

20

30

40

50

間調整され、

前記一次パルスおよび前記二次パルスは、前記二次パルスを、前記第2の材料段階と相互作用するよう時間調整することによって材料除去レートを増大させるように、協同して作用することを特徴とする材料を修正する方法。

【請求項29】

ほぼ10psから100nsの間の範囲内のパルス持続期間を有するレーザパルスを生成するように構成されたレーザであって、前記レーザパルス間の時間は、前記パルス持続期間より長いレーザと、

前記レーザパルスの各々をスプリットレーザパルスに分割するように構成されたビームスプリッタと、

前記各スプリットレーザパルスが進行して、各々異なる長さとなるレーザ経路と、

前記各スプリットレーザパルスを受け、およびバーストとして前記スプリットレーザパルスをワークピース上に向けるように構成されたビームコンバイナと

を備え、前記各レーザ経路の種々の長さは、一次スプリットレーザパルスと続くスプリットレーザパルスとの間で前記ワークピースに到達する時間が該続くスプリットレーザパルスが該一次スプリットレーザパルスによって前記ワークピースの一部を加熱することによって生じた残渣と相互作用するようなものとなるように構成され、

前記スプリットレーザパルスの一次スプリットパルスが、前記ワークピースの一部を融点を超える温度まで加熱するよう選択された強度を有し、

前記一次スプリットレーザパルスおよび前記続くスプリットレーザパルスは、前記続くスプリットレーザパルスを、前記残渣と相互作用するよう時間調整することによって材料除去レートを増大させるように、協同して作用することを特徴とする材料を修正する装置。

【請求項30】

前記レーザ経路の1つを画定する少なくとも1つの反射器をさらに備えたことを特徴とする請求項29に記載の装置。

【請求項31】

前記ワークピース上に前記スプリットレーザパルスを集束するように構成された集束アセンブリをさらに備えたことを特徴とする請求項29に記載の装置。

【請求項32】

前記ビームスプリッタおよびビームコンバイナは、離散スプリットレーザパルスを生成するように構成されることを特徴とする請求項29に記載の装置。

【請求項33】

前記ビームスプリッタおよびビームコンバイナは、重なり合うスプリットレーザパルスを生成するように構成されることを特徴とする請求項29に記載の装置。

【請求項34】

前記ビームスプリッタおよびビームコンバイナは、実質的に等しい持続期間を有するようにするため、前記バーストの各々に含まれる前記スプリットレーザパルスを生成するように構成されることを特徴とする請求項29に記載の装置。

【請求項35】

前記ビームスプリッタおよびビームコンバイナは、異なる持続期間を有するようにするため、前記バーストの各々に含まれる前記スプリットレーザパルスを生成するように構成されることを特徴とする請求項29に記載の装置。

【請求項36】

前記ビームスプリッタおよびビームコンバイナは、実質的に等しいエネルギーを有するようにするため、前記バーストの各々に含まれる前記スプリットレーザパルスを生成するように構成されることを特徴とする請求項29に記載の装置。

【請求項37】

前記ビームスプリッタおよびビームコンバイナは、異なるエネルギーを有するようにするため、前記バーストの各々に含まれる前記スプリットレーザパルスを生成するように構

10

20

30

40

50

成されることを特徴とする請求項 29 に記載の装置。

【請求項 38】

前記ビームスプリッタおよびビームコンバイナは、実質的に同一の空間分布を有するようにするため、前記バーストの各々に含まれる前記スプリットレーザパルス生成するように構成されることを特徴とする請求項 29 に記載の装置。

【請求項 39】

前記ビームスプリッタおよびビームコンバイナは、異なる空間分布を有するようにするため、前記バーストの各々に含まれる前記スプリットレーザパルス生成するように構成されることを特徴とする請求項 29 に記載の装置。

【請求項 40】

前記ビームスプリッタは、実質的に同一の波長を有するようにするため、前記バーストの各々に含まれる前記スプリットレーザパルス生成するように構成されることを特徴とする請求項 29 に記載の装置。

【請求項 41】

前記ビームスプリッタは、異なる波長を有するようにするため、前記バーストの各々に含まれる前記スプリットレーザパルス生成するように構成されることを特徴とする請求項 29 に記載の装置。

【請求項 42】

レーザパルスのバーストを供給する手段であって、前記バーストの各々は少なくとも 2 つのレーザパルスを含み、前記レーザパルスの各々はほぼ 10 ps から 100 ns の間の範囲内のパルス持続期間を有し、前記バーストの各々の前記レーザパルスの各々間の時間はほぼ 5 ns から 5 μs の間の範囲内にあり、連続するバースト間の時間は前記バーストの各々に含まれる前記レーザパルスの各々間の時間より長い手段と、

前記バーストをワークピースの方向に向ける手段であって、前記バーストの各々の一次レーザパルスの強度は、十分に前記ワークピースの一部が融点を越える温度を呈示させるよう選択されたものであり、少なくとも 1 つの続くレーザパルスは該一次レーザパルスによる加熱によって生じた残渣と相互作用するよう時間調整され、該少なくとも 1 つの続くレーザパルスの強度は、前記残渣の損傷閾値を越えるよう選択される手段と

を備え、

前記一次レーザパルスおよび前記少なくとも 1 つの続くレーザパルスは、前記少なくとも 1 つの続くレーザパルスを、前記残渣と相互作用するよう時間調整することによって材料除去レートを増大させるように、協同して作用することを特徴とする材料を修正するための装置。

【請求項 43】

前記一次レーザパルスの強度は、前記ワークピースの損傷閾値を越えることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 44】

前記一次レーザパルスの強度は、前記ワークピースの損傷閾値を越えることを特徴とする請求項 29 に記載の装置。

【請求項 45】

前記各レーザ経路の種々の長さは、前記スプリットレーザパルス間で前記ワークピースに到達する時間が 5 ns から 5 μs 間の範囲になるように構成されることを特徴とする請求項 29 に記載の装置。

【請求項 46】

前記向けるステップは、前記バーストを前記ワークピースの第 1 の隣接する領域の方向に向けるステップを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 47】

前記バーストの各々の結果、前記ワークピースから一定量の材料を除去することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 48】

10

20

30

40

50

前記連続するバースト間の時間は、 0.05ms と 1.0ms との間の範囲内にあることを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項49】

前記バーストを提供する間、前記ワークピースを固定された位置に維持するステップをさらに備えたことを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項50】

前記向けるステップは、前記バーストを前記ワークピースの重なり合う領域の方向に向けるステップを含むことを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項51】

前記一次レーザーパルスは、前記ワークピースの表面を損傷させることを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項52】

前記一次レーザーパルスの強度は、前記ワークピースに達する際にアブレーションプラズマを生成させるものであることを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項53】

少なくとも1つの続くレーザーパルスの強度は、前記一次レーザーパルスの強度の3ないし10倍であることを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項54】

前記残滓の温度は、およそ 4000K ないし 8000K であることを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項55】

前記向けるステップは、前記バーストを前記ワークピースの方向に実質上同一線上に向けるステップを含むことを特徴とする請求項1に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、パルスレーザーを使用する材料処理の方法に関し、特に、本発明は、パルスレーザー放射による材料除去のレートおよび精度を増大する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来の手仕事による(mechanical)旋盤および手仕事によるツール(例えば、スリッティングソー)は、 1mm のオーダの深さで、ほぼ 100ミクロン の切り口幅(アスペクト比が $10:1$ より小さい)までに材料を切断/ドリリングするには有効である。このレベルより細かい場合は、電子ビームまたはレーザーツールが、一般に、切断または高精度の加工(刻むこと、ドリリングなど)に使用される。ほとんどの電子ビームおよび既存の工業レーザー技術においては、局所化された熱プロセスによって材料が除去されるが、この場合除去される材料は融点または沸点まで加熱される。有機材料(およびある種の無機材料)における分子解離によるレーザープロセスは、紫外線レーザーで達成することができるが、この光解離機構は、必ずしも全ての材料に適用可能なわけではない。

【0003】

電子ビームまたは最新技術のレーザーにより達成される際の局所化された熱プロセスにおける基本的な相互作用は、熱の形態(格子振動)に関心のある材料における入射ビームからのエネルギーの堆積作用である。連続型レーザービームまたはパルスレーザービームは、ワークピースにビームを集束する一組の光学構成部品の方向に向けて発射される。パルスレーザーの場合、ビーム 100 は、一般に 10 ナノ秒から 500 ナノ秒の間、例えば 100 ナノ秒の持続期間で、 0.1kHz から 100kHz の間の繰り返しレートを有する個別のパルス 10^2 の列からなる(図1参照)。ビームエネルギーの吸収は、金属の熱機械特性に応じて材料間で著しく異なることがある。レーザー吸収も、対象の材料の光学特性に応じる。例えば、金属は、誘電体とはかなり異なったレーザーエネルギーの吸収を行う。

【0004】

10

20

30

40

50

吸収されるレーザーエネルギーにより、結果として吸収箇所および吸収箇所の近くでの温度上昇が生じる。温度が融点または沸点まで上昇すると、材料は従来の溶融または気化によって除去されることとなる。レーザーのパルス持続期間によっては、照射されたゾーンにおける温度上昇は非常に速く、結果的に熱アブレーションおよび熱ショックを生じることがある。照射されたゾーンは、局所的な熱応力が材料の降伏強度より大きくなる事実（熱ショック）から、気化または単に溶解除去（ablate off）される。材料が熱機構を介して除去されるこういった場合の全てにおいて、材料が除去される箇所を取り囲む材料には影響が発生する。取り囲む材料は、大きな温度偏移または衝撃を受け、しばしば材料特性に対する著しい変化を生じる。結果的に、これらの変化には、グレイン構造、マイクロフラクチュアリング、または組成における実際の変化が含まれることがある。そのような組成変化は、酸化を含む（空気における切断の場合、または合金の場合、合金の組成における変化）。この影響を受けるゾーンは、材料の熱機械特性、レーザーパルス持続期間、および他の要因（例えば能動冷却）によっては、数ミクロンから数ミリの範囲となることがある。多くの応用において、このゾーンの材料特性はバルクの材料特性とかなり異なることがあるので、熱またはショックの影響を受けたゾーンは、その存在を著しく制限されるかもしれない。

【0005】

さらに、高精度での応用の際、再堆積または再凝固される材料の存在により従来のレーザーまたは電子ビームプロセスは制限をうけることとなる。前述のように、対象となる材料の溶融または気化のいずれかによって、切断またはドリリングが行われる。結果的に、除去される領域に隣接する表面は、しばしば溶融を生じる著しい熱負荷を受ける。この溶融は、凝固および切り口を囲むスラグの堆積に先立って流すことによって達成されることのできる。多くの高精度での応用の際に、スラグの存在は許容することができない。また、切り口の壁または上方表面上の気化された材料の再堆積は、普通である。この凝結は、下にあるバルク材料と相互作用する前に、ビームがこの凝結を再び除去しなければならないので、しばしば、切断の品質を低下させ、および切断効率を低下させる。

【0006】

これらの制限の多くは、切断の目的を達成するために二次的な技術の使用によって低減されることができ。これらの技術の最も一般的なものは、レーザーパルスの中に、またはレーザーパルスの直後に対象となる材料を能動冷却するものであり、および再堆積を防ぐように切断の近傍から気化されたまたは溶融された材料を除去するために、高圧ガスジェットを使用するものである。これらの技術は、システム複雑性における著しい増大を犠牲にして切り口の改善に有効であり、切断効率をしばしば低減することがある。

【0007】

非常に短い（ 10^{-10} 秒未満）パルスを用いるレーザーの使用は、特許文献1に記載されるなどの非常に高精度の材料加工に最近導入された。この技術は、特許文献2に記載されるなどの材料を除去するため非熱機構を利用する。この機構は、残る材料に無視できる付随的な損傷とともに非常に高精度を達成することが示されたが、パルスプロセスレート（レーザーパルス毎に除去された材料の量）、およびプロセス効率（レーザーエネルギーのジュール当たりの除去された材料のグラム）は制限される。

【0008】

ほとんどの工業的な加工プロセスにおいて、精度の許容可能なレベルおよび付随的な損傷が達成されると、注目は、プロセスレートおよび効率の最適化に移る。プロセスレートにおける増加は、特定の材料のためのレーザー波長の調整、ビーム成形、トリパンニング、ガスアシストなどを含む、多数の技術によって達成される。これらの技術のほとんど全ては、材料依存性であり、レーザー加工システムの複雑性における著しい増大を導く。

【0009】

【特許文献1】米国特許第5720894号明細書

【特許文献2】米国特許第6150630号明細書

【特許文献3】米国特許第5554355号明細書

10

20

30

40

50

【特許文献4】米国特許第6168744号明細書

【特許文献5】米国特許出願第20010009250号明細書

【非特許文献1】D. Bauerle、「Laser Processing and Chemistry」、頁638-642、Springer-Verlag、ニューヨーク、2000年

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

本発明は、パルス持続期間およびバースト間のタイミングが、材料除去速度を増大するように制御されるレーザパルスのバーストを利用する材料修正のための方法および装置を提供することによって、上述の必要性ならびに他の必要性に有利に取り組むことを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0011】

一実施形態において、本発明は、材料を修正するための方法および方法を達成する手段として特徴付けることができ、この方法は、レーザパルスのバーストを提供するステップを含み、各バーストは、少なくとも2つレーザパルスを含み、各レーザパルスは、ほぼ10psから100nsの範囲内のパルス持続期間を有し、各バーストの各レーザパルス間の時間は、ほぼ5nsから5μs間の範囲内であり、連続するバースト間の時間は、各バーストを含む各レーザパルス間の時間より長く、方法はさらに、バーストをワークピースの方向に向けるステップを含み、各バーストの一次レーザパルスの強度は、ワークピースの損傷閾値を超える。

20

【0012】

さらなる実施形態において、本発明は、材料を修正するための方法として特徴付けることができ、この方法は、レーザパルスのバーストを提供するステップを含み、各バーストは、少なくとも2つレーザパルスを含み、連続するバースト間の時間は、各バーストを含む各レーザパルス間の時間より長く、この方法はさらに、バーストをワークピースの方向に向けるステップを含み、各バーストの一次レーザパルスの強度は、ワークピースの損傷閾値を超え、各バーストの一次パルスは、アブレーションプラズマおよびイジェクタを生成し、各バーストの二次パルスは、アブレーションプラズマの実質的な散逸の後で発生し、かつイジェクタと相互作用するように時間調整され、それによってワークピースと相互作用する加熱された材料を形成する。

30

【0013】

他の実施形態において、本発明は、材料を修正するための方法として特徴付けられることができ、この方法は、レーザパルスのバーストを提供するステップを含み、各バーストは、少なくとも2つレーザパルスを含み、連続するバースト間の時間は、各バーストを含む各レーザパルス間の時間より長く、この方法はさらに、バーストをワークピースの方向に向けるステップを含み、各バーストの一次レーザパルスの強度は、ワークピースの損傷閾値を超え、各バーストの一次パルスは、20000Kより高い温度に対する第1の材料段階および10000Kより低い温度に対する第2の材料段階を作り、各バーストの二次パルスは、第2の材料段階と主に相互作用するように時間調整される。

40

【0014】

さらなる実施形態において、本発明は、材料を修正するための装置として特徴付けることができ、この装置は、ほぼ10psから100nsの範囲内のパルス持続期間を有するレーザパルスを生成するように構成されたレーザを含み、レーザパルス間の時間は、パルス持続期間より長く、この装置はさらに、各レーザパルスをスプリットレーザパルスに分割するように構成されたビームスプリッタと、各スプリットレーザパルスが進行し、かつ異なる長さを有するレーザ経路と、各スプリットレーザパルスを受け、かつワークピース上のバーストとしてスプリットレーザパルスに向けるように構成されたビームコンバイナを含む。各レーザ経路の異なる長さは、スプリットレーザパルス間でワークピースに到達する時間を、5nsから5μs間の範囲にするように構成され、各バーストを含むスプ

50

リットレーザパルスの一次パルスの強度が、ワークピースの損傷閾値を超える。

【0015】

対応する参照符号は、いくつかの図面を通じて対応する構成部品を示す。

【発明を実施するための最良の形態】

【0016】

本発明の目的は、材料の高精度レーザプロセスにおいて、最小限システム複雑さを増大させるだけで、プロセス速度および効率における著しい増大を可能にすることである。

【0017】

一実施形態において、本発明は、例えばドリリング、切断、および彫刻の目的でワークピースに入射する短い持続期間のレーザパルスのバーストを生成することによって、レーザ加工のプロセスレートおよび効率を増大させる方法である。バースト内のパルス間のタイミングは、バーストにおける二次（後続の）パルスが、一次パルスによって生成されたイジェクタと相互作用するようなものである。ここで、イジェクタという用語は、蒸気、プラズマ、または液体、気体、およびプラズマを含む混合された材料相の任意の組み合わせを意味するように使用する。

10

【0018】

図2Aを参照すると、ワークピースは、レーザパルス204、206のバースト202で照射される。実施形態において、それぞれバースト202を含む個々のパルス204、206は、10psから100nsの範囲の持続期間を有し、バースト202内の各パルス204、206間の時間は、5nsから5μsの範囲である。バースト202間の時間は、数Hzからほぼ100kHzの範囲であることができるレーザのパルス繰り返しレートによって決定される。しかしながら、バースト202間の時間は、各バースト202内のパルス204、206間の時間より実質的に長い（例えば、パルス204、206間の持続時間の10倍より長く、または100倍より長く、または1000倍より長い）。全てのレーザ波長およびワークピース材料を、本方法の実施するために使用することができる。さらに、実施形態に応じて、パルス204、206は、同一の波長であるように構成されることができ、または異なる波長であることができる。

20

【0019】

本発明のいくつかの実施形態によれば、一次パルス、例えばパルス204の強度は、イジェクタが生成されるようなワークピースまたはターゲットの損傷閾値を超える。一次レーザパルスとの相互作用によって生成される結果としての「イジェクタ」は、ワークピースの固体密度状態から生じ、それが最後に散逸するまで、プラズマ、気体、低密度液体、または相、圧力勾配、温度、および密度の他の混合の複数段階に遷移することは理解される。図6A～図6Eを参照すると、より詳細な説明が以下に示されることとなる。しかし、このイジェクタは、アブレーションプラズマ段階と低速移動イジェクタ段階とを含む2つの主要な段階で生成されることは、一般に理解される。簡略化のために、これらの段階は、一般にアブレーションプラズマ（段階1）および低速移動イジェクタ（または単にイジェクタまたは段階2）と呼ばれる。本発明のいくつかの実施形態によれば、各バースト202の二次パルス、例えばパルス206のタイミングは、アブレーションプラズマが、二次パルスの前に実質的に散逸するが、二次パルスが、ワークピース表面ではなく低速移動イジェクタに主に作用するようなものである。したがって、二次パルスは、低速移動イジェクタに作用し、低速移動イジェクタは、次に加熱されたプラズマまたは材料を形成し、この加熱されたプラズマまたは材料は、次にワークピース表面に作用する。この二次パルスの相互作用により、材料除去速度の増大が可能となるが、本明細書でより詳細にさらに記載される。

30

40

【0020】

いくつかの実施形態において、所定のバーストにおける各レーザパルスは、一次パルスの集束スポットの少なくとも一部が空間的に重なり合うターゲットまたはワークピースの位置の方向に向けられる。したがって、いくつかの実施形態において、二次パルス（例えばパルス206）の集束スポットは、一次パルス（例えばパルス204）と実質的に同一

50

の空間分布を有するように構成され、一方、他の実施形態において、二次パルスは、一次パルスとは異なる空間分布を有するように構成される。バーストにおける各パルスの正確な空間的な重なり合いは、必ずしも必要ではなく、バーストにおける後のパルスが、一次パルスによって生成されたイジェクタと主に相互作用するように焦点合わせされることだけが必要であることが理解される。各バーストにおいては、一次パルス（例えばパルス204）のエネルギー、持続期間、波長、および焦点幾何形状は、ワークピース材料の損傷閾値を超えるようなものであり、およびワークピース材料が、集束スポットのある部分上でイジェクトされるようなものである。各バースト202においては、二次および後続のパルス（例えばパルス206）の持続期間、波長、および焦点幾何形状は、所定のパラメータ内の任意の組み合わせとなりうるが、鋼、アルミニウム、およびシリコンを使用する実施形態では、より速い材料除去レートは、エネルギーが一次パルスエネルギーに近いかまたは一次パルスエネルギーを超えるときに達成されることに留意されたい。図2Aには、バーストで示された2つのレーザパルスがあるが、いくつかの実施形態では、バーストを含む2つより多いレーザパルスがあることに留意されたい。図2Aのパルスは方形パルスとして示されているが、パルスは、丸められたガウシアン、湾曲された、三角形、または任意の他の知られているパルス形状として構成することができることに留意されたい。

10

【0021】

いくつかの実施形態において、一次パルス（例えばパルス204）に対する二次パルス（例えばパルス206）のタイミングは、プロセスに対して重要である。材料は、第1のレーザパルス204の開始とともに始めることができるが、材料、一次レーザパルス204、およびレーザ焦点ならびにワークピースの幾何形状に応じて、 10^{-12} sより短く 10^{-7} sより長い範囲であることができる時間期間の一次レーザパルスの終了した後も続く時間期間にわたってワークピースからイジェクトされる。イジェクタの組成および物理特性は、これらの実施形態において、材料、環境、およびレーザに関するパラメータ並びにイジェクタが形成される時間で変化するので、一次パルス204に対する二次パルス206のタイミングは、ワークピースから材料の除去を最適化するように、二次レーザパルスが低速移動イジェクタと主に相互作用するため、アブレーションプラズマを実質的に散逸させることを確実にするには重要である。

20

【0022】

本発明のいくつかの実施形態と既知の従来技術との重要な違いは、本方法は、ワークピースの近傍からイジェクタを完全に除去しようとしたり、イジェクタを全く生成しないようにしたりすることはせず、プロセスにおける有用な、および重要な構成要素として、最初にレーザワークピース相互作用の結果として生じたイジェクタの存在を取り扱うことである。

30

【0023】

現在まで研究された関連技術におけるレーザパルスのバースト（例えば、図1に示された方法）を含む方法でも、ワークピースからのイジェクタは、材料プロセスを強化するためには使用されない。実際、レーザパルスの逐次的に適用することによって材料プロセスに対する利点を探求する研究では、ワークピースを溶融し、弱化し、荒らし、または他の固体特性を変更するため、パルスのバーストにおける最初のパルスを使用することに集中し、後続のレーザパルスは、研磨された表面を生成してマーカとして提供される（例えば、特許文献3を参照されたい）か、ワークピースから弱化した材料を除去する（例えば、特許文献4を参照されたい）かのいずれかである。これらの技術例が記載される上記文献の技術は双方とも、後続のレーザパルスが、直接ワークピース表面に作用し、かつ材料マーキングおよびダイヤモンドプロセスの範囲に制限される。

40

【0024】

（特許文献5に記載されるなど）フェムト秒レーザパルスのバーストの使用を含むさらなる技術は、基板が高温のままであり、材料がバーストのレーザパルス間で柔軟なままであるのに十分に迅速なレーザパルスの適用による利点を求める。したがって、著者によれば、柔軟にされたワークピース材料は、最初の状態のワークピース材料より速いレートで

50

除去される。発明者によれば、アブレーションプラズマは非常に小さく各パルス間で散逸するので、フェムト秒パルスの使用は重要であり、レーザがワークピースに直接作用することを可能にする。そのように、後続のフェムト秒パルスは、それ自体ワークピース表面に直接作用する。これとは対照的に、(フェムト秒パルスより約100万倍長い持続期間を有する)本発明のいくつかの実施形態における後続のナノ秒パルスは、ワークピース自体ではなく、生成された材料のイジェクタ段階に主に作用するように時間調整される。

【0025】

図2Bは、本発明のいくつかの実施形態による代替のバーストフォーマットを示す。この実施形態において、バースト210は、集められたパルス212、214のグループからなる。例えば、バーストは、重なり合うパルス、または連続して時間調整されたパルスからなる。いくつかの実施形態において、バーストは、ともにスミアが行われたいくつかの別個のパルスとして現れる。この実施形態において、パルス212、214は、ある最小パルスエネルギー(例えば、中間レーザ放射216)が、パルス212、214間にあるように設計される。これらのパルス212、214は、図2Aに示される離散(すなわち別個の)レーザパルスと同等に機能する。図2Aの離散パルス204、206と同様に、図2Bのパルス212、214は、10psから100nsの範囲に持続期間を有し、バースト210における各パルス212、214間の時間は、5nsから5μsの範囲である。再び、連続するバースト210間の時間は、数Hzからほぼ100kHzの範囲、例えば約0.05から1.0msの間であることができるレーザのパルス繰り返しレートによって決定される。しかしながら、バースト210間の時間は、上述のような各バースト210内のスパイク212、214間の時間より実質的に長い。

【0026】

パルス212、214は、わずかに重なり合っただけのものとして示されているが、パルス212、214は、パルス212、214のピーク間における中間レーザ放射216が、追加のアブレーションプラズマがイジェクタに当たるように生成されること引き起こす十分なエネルギーを有さないように、設計されることが望ましいことに留意されたい。図6Aから図6Eを参照して見られるように、多くの実施形態において、材料除去レートは、アブレーションプラズマの最外領域が散逸されるときに増大し、したがって(二次パルスの、例えばパルス214の)入射光が、より高い密度材料またはワークピースに近いイジェクタに到達することが可能になる。アブレーションプラズマとして前もって識別された最外プラズマの迅速な散逸は、追加のアブレーションプラズマが、一次パルスと二次パルスとの間で生成されない場合、最も速くなる。したがって、一次レーザパルスと二次レーザパルスとの間にレーザ放射が存在しないことによって、図2Aに示される本発明の方法が有効な実現される。

【0027】

しかしながら、図2Bに示されるように、図6Dおよび図10に以下に記載される状況を達成するために、一次パルスと二次パルスとの間の全てのレーザ照射を排除することは必ずしも必要ではない。アブレーションプラズマの実質的な散逸を可能にする十分な持続期間について十分に低い密度である中間レーザ放射の存在(例えば、中間レーザ放射216)は、この方法の効率を悪くすることがあるが、材料除去レートにおける全ての利点を必ずしも排除するとは限らない。したがって、この中間レーザ放射が十分に低い密度を有するようにして、さらなるアブレーションプラズマがワークピースと相互作用時に生成されないようにするのである。さらなるアブレーションプラズマを生成しない中間レーザ放射の最大量は、材料、雰囲気、およびレーザパラメータに応じて変わる。

【0028】

したがって、本発明の多くの実施形態によれば、2つ以上のレーザパルスからなるバーストを参照すると、パルス212、214間の任意の中間放射216が、さらなるアブレーションプラズマを生成するために十分でない限り、これらのレーザパルスは、一般に、図2Aに示される離散パルス204、206、または図2Bに示される重なり合い、または連続する時間調整されたパルス212、214などの任意のパルス状の構造とすること

10

20

30

40

50

ができる。バーストフォーマットのさらなる例は、図 2 C および図 2 0 から図 2 2 に示される。

【 0 0 2 9 】

図 3 A は、本発明の実施形態による均一な波長を有する図 2 A のパルスフォーマットを実現するためのシステムである。この実施形態において、例えば、ほぼ 3 ナノ秒の持続期間および 5 3 2 nm の波長の単一のレーザパルスが、レーザ 3 0 2 によって生成されるが、本発明のいくつかの実施形態により、レーザパルスが他の持続期間および他の波長を有することができることが理解される。レーザ 3 0 2 は、1 0 Hz から 1 0 0 k Hz の範囲（例えば、1 0 Hz から 1 0 k Hz ）の調整可能な繰り返しレートで、これらの単一のパルスを生成する。パルスは、入射光の 5 0 % を反射するように構成されたビームスプリッタ 3 0 4 に当たる。この点で、パルスは、2 つのパルス（スプリットパルスとも呼ばれる）に分割される。ビームスプリッタ 3 0 4 から反射されるパルスは、ビームコンバイナ 3 0 6 および集束アセンブリ 3 0 8 の方向に向けられる。第 2 のパルス（すなわち、ビームスプリッタ 3 0 4 を通って伝送されるスプリットパルス）は、ビームスプリッタ 3 0 4 から数メートルに配置された一対の高反射ミラー 3 1 0 および 3 1 2 からなる遅延線を介して移動する。遅延線を移動した後、スプリットパルスまたは第 2 のパルスは、ビームコンバイナ 3 0 6 に当たる。ビームスプリッタ 3 0 4 およびビームコンバイナ 3 0 6 は、ビームスプリッタ、偏光子、孔を含むミラーなどの多数のビーム組み合わせ光学構成部品の 1 つからなる。ビームコンバイナ 3 0 6 に当たると、第 2 のパルスは、集束光学構成部品 3 0 8 の方向に向けられる。第 1 のパルスおよび第 2 のパルスの経路は、ワークピース 3 1 4 上のほぼ同一の位置に集束されることとなり、すなわち第 1 のパルスおよび第 2 のパルスは、ほぼ同一の空間分布を有するように、第 1 のパルスおよび第 2 のパルスの経路は十分に近いものとなる。したがって、第 1 のパルスおよび第 2 のパルスは、上述の一次パルスおよび二次パルスに対応する。第 1 のパルスおよび第 2 のパルスは、実質的に同一の空間分布、または第 1 のパルスによって生成されたイジェクタと第 2 のパルスが相互作用をまだ提供する異なる空間分布を有するように集束することができることに留意されたい。ビームスプリッタ 3 0 4 またはビームコンバイナ 3 0 6 の設計または構成部品の異なる選択は、バーストにおけるパルス間でエネルギー分布および / または空間分布を変更できることにも留意されたい。パルス間の最適なエネルギー分布は、材料および適用状況により変更するので、これは望ましい機能である。このように、いくつかの実施形態において、一次パルスおよび二次パルスは、実質的に等しいエネルギーおよび / または強度、または異なるエネルギーおよび / または強度を有するように構成することができる。

【 0 0 3 0 】

したがって、図 3 A のシステムは、適切なパルス持続期およびパルス間の時間を有する 2 つのパルスを備えるバーストを生成する簡単な構造を示す。パルス間の持続期間は、ビームスプリッタ 3 0 4 / ビームコンバイナ 3 0 6 と、反射ミラー 3 1 0 および 3 1 2 との間の距離を変えることによって、すなわち、第 2 のパルスが横切る経路の長さを変更することによって、容易に修正されえることは理解される。

【 0 0 3 1 】

この実施形態において、パルスのバーストは 2 つのパルスからなる。さらに、この実施形態において、バーストにおける各パルスは、等しいエネルギーを有し、9 0 ns 離れてターゲットに当たる。最適な中間パルス遅延は、材料および適用に特定であることに留意されたい。一実施形態において、集束スポット径は、1 0 0 μ m であり、f : 1 0 の平凸レンズが、集束アセンブリ 3 0 8 に使用される。各パルスのエネルギーは、0 . 2 5 m J から 7 m J で変化し、したがって各バーストのエネルギーは、0 . 5 m J から 1 4 m J の範囲であるが、パルスおよびバーストのエネルギーに関する正確な値は、適用上必要とされるように適合するように変化しえることが理解される。

【 0 0 3 2 】

パルスのバーストは、2 つより多いパルスを含むことができ、当業者は、これを達成するために図 3 A の装置をより容易に構成できることに留意されたい。そのような 3 つ連続

10

20

30

40

50

するレーザパルス 2 2 2、2 2 4、および 2 2 6 を含むバーストフォーマット 2 2 0 は、図 2 C に示される。上述のように、一次パルス 2 2 2 は、高速移動アブレーションプラズマ段階および低速移動イジェクタ段階を生成し、一方、二次パルス 2 2 4 および 2 2 6 は、主に低速移動イジェクタ段階に作用することが望ましい。バースト 2 2 0 のパルスは、連続するパルス間にほぼ 5 ns から 5 μs あるように時間調整される。図 2 C のパルスは、離散パルスとして示されているが、バーストフォーマットは、図 2 B に示されるように重なり合うパルス 2 1 2、2 1 4 を有するバーストフォーマットに容易に修正されえることに留意されたい。

【 0 0 3 3 】

図 3 A のシステムのビームスプリッタ 3 0 4 およびビームコンバイナ 3 0 6 は、図 2 B に示されるように、重なり合うまたは連続する時間調整されたバースト 2 1 2、2 1 4 を有するバーストフォーマットを生成するため、変更または修正されえることにさらに留意されたい。

【 0 0 3 4 】

図 4 は、加工速度における改善を示す。図 4 は、全エネルギー / ショットのプロットであり、ここで、ショットは、0.7 mm 厚みのステンレス鋼における除去された厚み / ショットに対する 2 つ以上のパルスからなる単一のバーストを説明する。ドリリングレートは、本発明による方法を使用して増大されることが明かに理解でき、例えば線 4 0 2 は図 2 A による方法を示し、一方線 4 0 4 は図 1 による従来の方法を示す。本明細書に記載される方法は、切断、彫刻、または他の材料修正とすることができるとも理解される。

【 0 0 3 5 】

他の実施形態において、シリコンウエハのドリリングにおける、さらなる利点が明らかになる。従来のレーザドリリング技術において各レーザパルスのパワーの増大によって速度を増大させる場合、シリコンは割れ、したがって孔の品質は劣化することとなる。しかしながら、本発明の方法のいつかの実施形態においては、同様の大きさの割れを生じることなく、ドリリング速度におけるより大きな増大が可能となる。現在まで行われた検討において、速度の増大は、5 倍から 10 倍である。後に説明するように、この現象は、ワークピースの代わりにイジェクタを加熱するため、二次レーザパルスを使用して生じるアブレーション圧力の緩和に関連している。

【 0 0 3 6 】

ドリリングおよび切断の速度が増大されるだけでなく、品質も改善されるのは明らかである。図 5 は、0.4 mm 厚みのアルミニウムにトレパンを生成されたスロットの断面の写真画像 5 0 2 および 5 0 4 を示す。本発明の実施形態による技術（画像 5 0 2）は、知られている技術（画像 5 0 4）と比較して、2 倍以上の切断速度の改善を生じ、およびスロットの出口および入口縁部の周りの変形が低減されている。図 5 に示される二次パルスのエネルギーは、一次パルスのエネルギーのほぼ 3 倍であることに留意されたい。

【 0 0 3 7 】

第 2 の実施形態は、多重波長の使用を含み、図 3 B に示される。この実施形態において、ほぼ 3 ns の持続期間で、同時に 532 nm および 1064 nm 波長光からなる単一のレーザパルスが、レーザ 352 によって生成される。レーザ 352 は、10 Hz から 100 kHz の調整可能な繰り返しレートで、これら単一の二重波長パルスを生成する。パルスは、非線形周波数変換を介して 1064 nm、532 nm、および 355 nm からなる出力光を生成する結晶 354（例えば、8 mm 厚みの KD*P 結晶）に当たる。三重波長パルスが、3 つの出力波長の分離を生じるように（例えば、3 つのスプリットパルスが生成される）波長セパレータ 356（一般にビームスプリッタと呼ばれる）によって屈折する。このセパレータ 356 は、プリズム、または適切な波長で優先的な反射を提供する被覆されたミラー、あるいは波長板および偏光子などからなることができる。この実施形態において、532 nm の光は、セパレータ 356 から数メートル離れて配置された一対の高反射ミラー 358 および 360 からなる遅延ラインを横切る。遅延ラインの後で、532 nm の光は、ビームコンバイナ 362 に当たる。ビームコンバイナ 362 は、ビームス

10

20

30

40

50

プリッタ、プリズム、偏光子、孔を含むミラーなどの多数のビーム組み合わせ光学構成部品の1つからなる。355 nmの光は、遅延ループを横切ることなく、セパレータ356からビームコンバイナ362に進む。ビームコンバイナ362に当たると、光の各パルスは、集束アセンブリ364の方向に向けられる。第1のパルス(355 nm)および第2のパルス(532 nm)の経路が、十分に近く、それらは、ワークピース366上のほぼ同一の位置に集束することが理解される。パルス持続期間、波長などの正確なパラメータは、システムの構成に応じて修正することができる。他の実施形態において、1064 nmの光(すなわち、第3のスプリットパルス)は、異なる遅延経路を横切ることができ、代わりにバーストフォーマットを形成するようにコンバイナ362で組み合わせられる(例えば図2Cを参照されたい)。さらに、上述のように、このビームスプリッタおよびビーム組み合わせ構成部品は、実質的に同一または異なるエネルギー、実質的に同一または異なる空間分布、および/または実質的に同一または異なるパルス持続期間を有する離散または重なり合う/連続する時間調整されたパルスを生成するように修正することができる。

10

【0038】

シリコンで現在まで行われた研究において、このような355 nmの光および532 nmの光の使用によって、単一の波長(例えば、図4を参照)を有するパルスを用いる新たな方法を使用するのと少なくとも同等の従来の技術を超えるドリリング速度を改善する増大が得られる。

【0039】

20

二次パルスを生成するために使用される遅延ラインは、ミラー358、360以外のアイテムを使用して構成されることも理解される。例えば、光は、ミラーによって画定される遅延ループの代わりに光ファイバを横切ることができる。

【0040】

ビームスプリッタおよびビームコンバイナ構成部品は、2つ以上のパルスを生成するように構成されることがまた理解される。例えば、ビームスプリッタ(例えば、セパレータ356)は、初期のパルスを、それぞれ異なる遅延経路を横切ってビームコンバイナへ戻る3つのパルスに分割することができる。他の例において、さらなるビームスプリッタは、二次パルスを、ビームコンバイナに戻るような方向に向けられる2つの二次パルスに分割するように、遅延ラインに導入されることができる。

30

【0041】

図6Aから図6Eは、本発明の実施形態によるワークピース表面に対する位置に対する、レーザパルスおよび結果としてのイジェクタとともに示されたワークピースの密度の変化を示すグラフである。その元々の固体状態から、プラズマ、気体、低密度液体、または相の混合へのワークピース材料の転移のプロセス中、材料状態は、密度、圧力、および温度を含む勾配を含むものとして最も良く説明される。変換材料が変化を続けるので、勾配が大きすぎる。外力が存在しない場合には、この材料は均一に散逸する。これは、その固体状態のワークピースから離れ、有意なワークピース材料が無い周囲の雰囲気によって囲まれていて除去される材料を失う。そのように、図6Aから図6Eは、前述のプロセスにおける5つの異なる時間での位置の関数としての密度の変化を概略的に示す。

40

【0042】

図6Aは、レーザパルスが当たる前に、固体状態の元々のワークピース602の密度プロファイルを示す。ワークピースの最も高い密度、すなわちその元々の固体状態が、602として示される。水平軸は、ワークピース表面の元々の位置を示す垂直線606を有する線形位置である。したがって、線606の左は、ワークピースの表面下の材料密度であり、さらに左に移動することは、表面から離れてまたは表面内へのワークピース材料内にさらに移動することに対応する。同様に、線606の右は、ワークピースの表面から離れた様々な位置での材料(すなわち、雰囲気)密度であり、さらに右に移動することは、ワークピース表面からさらに離れた材料を示す。線604は、ゼロ密度線を示し、すなわち図6Aにおいてワークピース材料は存在しない。線608は、ワークピースへ向けられる

50

とした場合の、入射レーザーパルスに関する光貫通を示す。したがって、本発明のいくつかの実施形態によれば、線 608 によって示される光貫通を有する一次レーザーパルス、例えばパルス 204 は、ワークピース表面の方向に向けられる。

【0043】

図 6B は、一次レーザーパルスのワークピースとの相互作用の間の密度プロファイルを示す。当たったときに、ワークピースの部分は、ワークピース表面から除去され、かつ周囲雰囲気に移る。除去された材料は、線 606 のちょうど左側に線 602 における小さな曲線として示される。しかしながら、この除去された材料は、ワークピース表面から離れて膨張するプラズマ 610 またはイジェクタに転移し、ゼロ密度線 604 に対する線 606 の右側に延びる影が付けられた部分として示される。このように、このプラズマ 610 は、多くの異なる密度を有する材料で形成される。水平方向矢印 612 は、他のレーザーパルスがこのときに発射されるときの場合の、プラズマ 610 内へのレーザーの光貫通を示す。一般的なピコ秒、ナノ秒、およびマイクロ秒のレーザーパルスに関して、プラズマ周波数が光周波数と等しくなるまで、このレーザーパルスは、密度勾配に貫通する。プラズマの温度および質量密度に応じて、これと等価なことが、 $1/10$ の固体密度から $1/1000$ の固体密度の範囲であることができる密度で生じることができる。したがって、このレーザーが、プラズマを加熱し、プラズマが膨張するので、このレーザーは、プラズマとの相互作用を開始し、プラズマ背後のワークピースの高密度固体材料に到達しない。

【0044】

図 6C は、一次レーザーパルス後のターゲットからプラズマ 610 および他のイジェクタの変化を示す。プラズマ 610 のより外側領域（すなわち、図 6C における線 606 の右側に最も遠いこれらの部分）は、ターゲット表面により近いより高密度の材料より迅速に膨張する。より外側の領域が膨張するので、それらの密度および温度は低下する。再び、線 614 は、他のレーザーパルスがこのときに発射されるときの場合の、プラズマ 610 へのレーザーの光貫通を示す。再び、そのようなパルスは、プラズマ 610 材料に貫通せず、したがってワークピース表面と相互作用しない。このときに発射されたレーザーパルスは、図 6B と比較してワークピース表面からさらにイジェクタと相互作用する。

【0045】

図 6D は、二次レーザーパルス、例えばレーザーパルス 206 が、本発明のいくつかの実施形態によりワークピース内に発射されたときの、プラズマ 610 およびイジェクタを示す。このとき、プラズマのより外側の領域は、十分な膨張を受け、レーザー光は、それらを通り、かつまだ散逸されておらずワークピース表面に比較的近接する、より高密度なプラズマ、蒸気、イジェクタ、またはそれらの混合物に到達することができる。線 616 は、二次パルスに関するプラズマ 610 内へのレーザーの光貫通を示す。有利なことには、多くの実施形態によれば、低密度プラズマは、実質的に散逸し、ワークピース表面により近接するより高密度のより低速移動のイジェクタを残す。二次パルスは、ワークピース表面により近接するより高密度のより低速移動のイジェクタ（本明細書で低速移動イジェクタと一般に呼ばれる）と主に相互作用することを目的とし、低密度の高速移動イジェクタ段階（本明細書でアブレーションプラズマと呼ばれる）とは実質的に相互作用しない。時間的にこの時点で二次パルスを向けることによって、増大された材料除去レートが得られると考えられる。

【0046】

図 6E は、二次パルスが発射されない場合のワークピースでの材料プロセスが、変化を終える（例えば、約 1 ミリ秒）のに十分に長い時間での密度勾配を示す。ここで、ターゲットは、任意のレーザーパルスがワークピースに当たる前の場合のように、密度勾配を有せず、固体から周囲雰囲気への鋭い遷移を受けない。しかしながら、固体から周囲雰囲気への鋭い変化は、左へシフトされ、材料が除去されたことを示す。さらに、線 618 は、さらなるパルスが後で発射されるときの場合の他のレーザーパルスが有する光貫通を示す。例えば、このときワークピースは、他のパルスのパーストで照射されることができ、他の一次パルス 204 は、本発明のいくつかの実施形態によってワークピース表面に到達する。

10

20

30

40

50

これとは対照的に従来、二次レーザーパルスは、全てのイジェクタが散逸した後でこのときワークピースで発射される（例えば図1を参照）。

【0047】

単一のレーザーパルスが当たる結果としてのワークピースの相互作用および段階の様々な遷移の上述の説明が、一般に当業者に理解されることに留意されたい。含まれる物理プロセスの完全に記載するためには、前述の勾配の記載が必要となるが、それらの主な物理特性に応じて3つのゾーンまたは段階に分割することにより有用な近似が得られる。第1のゾーンまたは段階は、固体密度物質、すなわちレーザーパルスと相互作用する前のワークピースに対応するゾーンまたは段階である。このゾーンは、一般に固体状態と同様の密度を有する溶融プールで見出されるような材料の液体状態を含む。第2のゾーンまたは段階は、ターゲットに近く、かつ比較的低速に散逸し、いくつかの実施形態において、図6Dに示されるような入力光に対して露光されるイジェクタに対応するゾーンまたは段階である。前述のように、このイジェクタは、液体、蒸気、気体、プラズマ、および特定の物質を含むいくつかの可能な物理状態の組み合わせで発生ことがある。このイジェクタが比較的長い散逸時間をもつため、このゾーンは、「低速移動イジェクタ」と呼ばれる。第3のゾーンまたは段階は、比較的迅速に移動しかつ比較的迅速に散逸するアブレーションプラズマのゾーンまたは段階であり、したがって、「アブレーションプラズマ」と呼ばれる。

10

【0048】

それらの物質の特徴的な状態およびそれらが終わる時間スケールに応じて、これらの勾配を分類することによって、本発明のいくつかの実施形態において、レーザー材料プロセスに対する利点を生じる機構を簡単に説明することができる。さらに別の方法でイジェクタの異なる段階を識別して近似することによって、結果として生じるイジェクタの温度が定められる。例えば、低速移動イジェクタは、一般に10000Kより低い温度を有し、アブレーションプラズマは、一般に20000Kより高い温度を有する。この近似は、勾配の一部を除外することとなるが、それでも本明細書で示される方法の実装に関する議論の明瞭性を妨げることはない。

20

【0049】

図7、図8、図9、および図10は、どのように2つの適切な時間調整されたレーザーパルスが、材料除去に好ましい状況を与えるかを本発明の実施形態により概略的に示す。図7から図10のパルスは、図3Aおよび図3Bを参照して説明したものなど、適切なレーザーおよび光学装置によって生成される。図7は、集束レンズ706を介してターゲット708（ワークピース）の方向に向けられる、一次パルス702および二次パルス704を示す。図8および図9は、ターゲット708との一次パルスの相互作用を示す。一次パルス702は、迅速に散逸するアブレーションプラズマ802、および低速移動イジェクタ902を生成する。アブレーションプラズマおよび低速移動イジェクタは、一次パルス702によって生成された結果としてのイジェクタの異なる段階であり、より完全な説明が、図6Aから図6Eに与えられていることに留意されたい。アブレーションプラズマ802は、高速に移動する材料、例えば少なくとも 10^6 cm/sであり、かつ迅速に散逸する材料であるが、アブレーションプラズマ802の速度は、ワークピース材料、周囲雰囲気、およびレーザー放射パラメータに応じて変化することが分かる。低速移動イジェクタ902または材料は、アブレーションプラズマ802の速度より非常に低い速度、例えば約 10^3 cm/sから約 10^5 cm/sの速度で膨張するが、このイジェクタ902の速度は、ワークピース材料、周囲雰囲気、およびレーザー放射パラメータに応じて変化することが分かる。二次パルス704は、加熱されたプラズマまたは材料1002（すなわち、加熱されたイジェクタ902）を形成するため、低速移動イジェクタ902に主に作用し、一般にワークピース708の表面に作用しない。要するに、方法は、ワークピースの直近における一次パルス702によって生成される、デブリフィールド（例えば、一次パルス702によって生成されたイジェクタの低速移動イジェクタ902段階）を加熱するために、二次パルスを使用することによって作用する。この加熱された材料1002（例えば、加熱された低速移動イジェクタ）は、次にワークピースから材料を除去するために、ワー

30

40

50

ワークピースおよびそのイジェクタに作用する。圧力、温度、およびイジェクタ速度の測定および分析は、伝導、圧力、流体力学、および段階変化の物理プロセスを調査し、いかに新たな方法が、材料除去レートを増大するためにこれらのプロセスを操作するかを示す。さらに、この新たなデータおよび分析により、新たな方法に基づく加工技術の発展に導かれる。しかしながら、詳しい技術的な議論の前に、一次レーザーパルスによって生成されたイジェクタが、2つの離散段階で表れることに留意することは有用である。第1に、アブレーションプラズマ(すなわち、アブレーションプラズマ702)からなる初期段階があり、本実施形態の周囲雰囲気において30 ns以内で散逸する。イジェクタのアブレーションプラズマ段階の散逸レートは、雰囲気が、真空などのより低圧である場合、または圧力チャンバ内あるいは気体支援ジェットが存在などのより高圧の場合に変化することがある。第2に、ターゲットポイントの近傍に残り、かつ二次パルスの到着前に散逸しないイジェクタの低速移動本体(すなわち、イジェクタ902)が存在する。他の実施形態において、2つより多いパルスが使用され、例えばイジェクタ902またはデブリフィールドを加熱するための1つの二次パルスおよび1つ以上のさらなるパルスが使用されることに留意されたい。一次パルス702および二次パルス704は、同一または異なる波長、同一または異なるエネルギーレベル、同一または異なる強度、および/または同一または異なる空間分布を有するように構成することができることに留意されたい。図7から図10におけるパルス702および704は、例えば図2A、図2B、図2C、および図20から図22を参照して記載される、任意にパルス状の構造でありえることが理解される。

10

【0050】

20

圧力測定

一実施形態において、圧力測定は、ワークピースとして薄いフォイルを使用し、並びにその動作および機能性が従来技術で良く知られているVISAR(Velocity Interferometer System for Any Reflector)を使用して行われる。

【0051】

VISARは、10 μm厚みのターゲットフォイルの背面に付けられる光学プローブ(532 nmレーザー光)を使用する。加工レーザーパルスは、フォイルの前面に当たる。フォイルは、レーザーによって前面で生成される圧力波が、フォイルを介して減衰なく背面へ通過するのに十分に薄い。したがって、背面でなされる圧力測定は、レーザー加工パルス(例えば、パルス702および704)によって生成される圧力を正確に表示する。図11および図12は、一次レーザーパルス(図11)および二次レーザーパルス(図12)の両方に関して、レーザーパワーに応じて測定された圧力の比較を示す。圧力の下側の曲線および上の曲線は、測定の不正確性を含む。

30

【0052】

図11および図12のこれらのグラフは、本発明の一実施形態による二次パルスと一次パルスから生成されたイジェクタとの相互作用の間に二次パルスによって生成された圧力が、一次パルスとワークピースとの相互作用の間に一次パルスによって生成された圧力のほぼ1/4から1/2であることを示す。この比較により、二次パルスとイジェクタとの相互作用は、実質的に一次パルスの相互作用とは異なることが明らかとなる。

40

【0053】

温度測定

温度測定は、その動作および機能性が従来技術で良く知られているInGaAsフォトダイオードを使用して測定される熱放射に基づく。フォトダイオードの立ち上がり時間は、3 nsより短い。図13は、アルミニウムターゲットに入射する3 nsのレーザーパルスに関して、ワークピースの表面上の材料の温度履歴(低速移動イジェクタを含む)を示す。図13は、温度が、90 nsのパルス間の遅延を超える時間期間に関して2520 Kの沸点温度より非常に高いままであることを示す。

【0054】

図6Aから図6Eを参照して説明されるような勾配およびその変化の記載によれば、光

50

学放射測定は、プラズマからワークピースの背後における低温材料への視線に沿った放射および吸収の統合を示す。当然、高温領域は、低温領域より多くの光を放射するが、これは、光を吸収するようなプラズマの傾向、および光の伝播を妨げる前述の高密度プラズマの特性によって相殺 (offset) される。これは、プラズマから出る光ならびにプラズマに入る光に適用される。

【0055】

したがって、高温内部領域からの放射は、外側プラズマまたはイジェクタの存在によって隠されることがある。(図14から図16の)こま抜きの写真測定は、アブレーションプラズマの散逸に必要な時間がほぼ30 nsであることを示す。この時間の間、フォトダイオードによって検出された放射は、著しい増大を受け、次いで次の数百ナノ秒にわたって穏やかに低減する前に安定する。第1の30ナノ秒の間に、放射から得られる温度は、低速移動イジェクタを示すことはほとんど無いが、アブレーションプラズマからのいくつかの視線統合から生じる可能性がある。

10

【0056】

イジェクタのこま抜き写真測定は、30 nsより長い時間に関して、プラズマの介在はなく、低速移動材料の膨張速度が遅いことも示す。したがって、レーザパルスの入射後の30 nsより長い時間に関して、フォトダイオードによって記録された放射は、レーザ焦点から空気を通して伝播する衝撃波ではなく、ターゲット表面に近い材料から生じる。

【0057】

図6Aから図6Eを参照して前述されたように、アブレーションプラズマの温度は、20000 Kを超えることがあり、放射測定の前述の議論から明らかなように、レーザパルス後の30 nsでの低速移動イジェクタの温度は、7000 K (すなわち、10000 K未満) 程度である。放射のこの測定は、アルミニウムターゲットを使用してなされ、温度は、使用される材料およびレーザに応じて変化することがある。多くの実施形態において、アブレーションプラズマは、大きさの程度によって20000 Kを超えることがある。

20

【0058】

アブレーションプラズマ (例えば、膨張アブレーションプラズマ、および衝撃波などの周囲雰囲気との相互作用の結果として生じる任意の現象) の温度は、図13に示されていないことにも留意されたい。第1の30 nsの間に、アブレーションプラズマのブルーム、および存在するなら衝撃波は、(低速移動イジェクタを含む) ワークピースの表面での高温材料を妨げず、したがって、温度は、第1の30 nsの間に低速移動イジェクタに関して図13には正確に示されない。

30

【0059】

異なる材料により、一次パルスのエネルギー、持続期間、波長などの変数として異なる結果が生じるが、一般に、一次パルスは、少なくとも20000 Kの温度に加熱される第1の材料段階 (例えば、アブレーションプラズマ)、および少なくとも10000 Kの温度に加熱される第2の材料段階 (例えば、低速移動イジェクタ) を生成することがわかる。そのように、二次パルスは、加熱される第2の材料に主に作用するように時間調整され、次にワークピース表面に作用する。多くの実施形態において、第1の材料段階は、第2の材料の温度の5倍より高い温度、好ましくは10倍より高い温度に加熱されることにも留意されたい。

40

【0060】

こま抜き写真 (イジェクタ) 測定

次に図14から図16を参照すると、写真画像は、単一のレーザパルス (例えば、一次パルス) が当たった後の様々な時間でのワークピースの表面を示す。これらの測定に関して、アルミニウムターゲットは、カメラのターゲットポイントを撮像することによって研究されてきた。ターゲットは、532 nmの波長を有する3 nsのレーザパルスで照射される。図7に示されるなど、355 nmの波長を有する加工レーザからの単一のパルスが、ターゲットの方向に向けられる。図14から図16の写真画像は、ワークピースに対する60度の角度、および入射レーザパルスに対する30度の角度で取られたことに留意さ

50

りたい。照射レーザのタイミングは、加工レーザと相互作用の後の異なる時間でのターゲットの画像を提供する加工パルス後の10 nsから50 nsで変わる。ショット(30秒)の後の長い時間、照射レーザが第2の時間に発射され、ターゲットに対する全てのプロセスが変化を停止したとき(図16を参照)、ターゲットの後撮影画像が生成される。

【0061】

図14を参照して理解されるように、この結果は、一次レーザパルス後の11 nsのプロブレザ遅延時間で、ターゲットの右側は、一次パルスによって生成されたプラズマブルーム1402によってまだ妨げられないことを示す。より高密度を有し、かつワークピースの表面により近い低速移動イジェクタ1404も示される。写真収集システムの入射の傾斜角度、およびアルミニウムフォイルの固有の表面特徴は、この特徴を明らかにすることを支援する。製造プロセスにおける巻かれたフォイルサンプルに埋め込まれた水平方向線1406は、他の側(右側)ではなく、中央の暗いスポットの一方側(左側)に見られる。これは、アブレーションプラズマ1402、および存在するなら衝撃波は、表面から立ち上がり、斜めに入射するプロブレザは、レーザスポットの右側の損傷されていないターゲット表面を明らかにするように貫通できないからである。さらに、レンズによって画像に加えられたアーチファクト1408も示される。図15は、一次レーザパルスがターゲットに当たった後の37 nsのターゲットの写真を示す。ここで、アブレーションプラズマは、実質的に散逸し、プロブレ光は、レーザスポットの両側で損傷されていないターゲットを照射し、すなわち水平方向線1406は、表面の両側で見られる。レーザスポット自体は、完全に暗く、ターゲット表面のすぐ近くの低速移動イジェクタ1404の存在を明らかにする。図16は、レーザショット後の30 sのターゲットを示す。損傷された領域1410、または図15の暗いスポットとほぼ同一の径の損傷されたスポットは、明らかに見え、かつ中央の暗いスポットとして拡大して示される急な壁を有するより深い窪みまたは中央孔1412を有する。

【0062】

3つの顕著な特徴の第1は、照射レーザが数十ナノ秒だけ遅延された画像(図14を参照)は、高い吸収または高い散乱媒体を示唆するターゲットの完全に暗い領域を示すことであると現在考えられている。第2の特徴は、加工後の30秒で取られた画像(図16を参照)が、ターゲット上のレーザの全体作用のサイズは、暗い領域または損傷された領域1410にほぼ等しいことを示すことである。この実施形態において、第3は、収集光学構成部品の軸が入射の約60°を有するので、イジェクタ1404(例えば、イジェクタ902)の低速移動段階を含む「暗い物質」の範囲は、ターゲット中心でターゲット表面上の100 μm以下、およびスポットの縁部で10 μm未満とすることができることである。イジェクタ1404が、これより表面上でより高い位置にある場合、これは、写真の右側に見えるターゲットを不明瞭にさせ、それは図15および図16では見えるが図14では見えなくなっている。これは、多くとも10⁴ cm/sから10⁵ cm/sの範囲の非常に低い軸方向膨張速度であることを示唆する。写真は、30 ns後の側方膨張の証拠を示さないので、側方膨張速度は、10³ cm/s以下でありえる。

【0063】

二次パルスの相互作用および増大された加工レート

二重パルスレーザ加工に関する4つの結論は、診断結果から導くことができる。これら4つの結論は、本発明のいくつかの実施形態を理解することができ、材料、レーザ、およびプロセスの広範な変化に加えられる基礎を形成すると考えられる。

【0064】

結論#1: 一次パルスに続く材料除去プロセスは、2つの段階で発生する。すなわち、高速移動のアブレーションプラズマ(例えば、アブレーションプラズマ802)、および数百ナノ秒または数千ナノ秒で測定された時間の持続期間に関するターゲット点の近傍に残る低速移動イジェクタ(例えば、イジェクタ902)の本体である。この結論は、こま抜き写真および圧力測定から明らかである。

【0065】

結論#2：第2の結論は、低速移動イジェクタが、混合された液体気体相である可能性がある。この結論は、その低膨張速度から生じる。低膨張速度は、低い流体力学圧力を意味する。

【0066】

計算および測定（非特許文献1から調べられるなど）は、初期のアブレーションプラズマの膨張速度は、 10^6 cm/sの程度であることを示し、アルミニウムターゲットを使用する本発明の研究における圧力測定は、45 kBarの圧力が、それらの膨張速度に対応することを示す。低速移動物質の膨張速度は、アブレーションプラズマの速度の多くとも1/10から1/1000であるので、圧力が、アブレーションプラズマの圧力の多くとも1/10から1/1000であると仮定することは妥当である。したがって、圧力は、50 Barから5 kBarの範囲である。図17は、実質的に状態の理想気体等式とは実質的に異なる、周知のQEOS (Quotidian Equation of State) によって計算されるなど、3つの圧力でのアルミニウムの密度および温度を示す。低速移動イジェクタの温度は、4000 - 8000 Kの範囲であるので（温度は、実施形態に応じて10000 Kに近づくことがあるが）、図17は、低速移動物質の密度は、固体密度の1/10から1/100より少ない範囲であることを示す。この密度と温度の組み合わせは、QEOSによって予想されるアルミニウムの液体気体の同時に存在する領域に対応する。

10

【0067】

結論#3：二次レーザーパルスは、一般にワークピースと直接に相互作用しないが、次にワークピースおよびイジェクタと相互作用する他のプラズマ（例えば、材料1002）を形成するように、低速移動物質（すなわち、イジェクタ902）と代わりに主に作用する。

20

【0068】

ターゲットと二次パルスとの相互作用は、一次パルスの相互作用とは明らかに実質的に異なる。入力レーザー光（例えば、二次レーザーパルス）と強く相互作用するワークピースの直近に長く留まるイジェクタの本体が存在し、二次レーザーパルスによって固体ターゲットに展開される圧力は、一次レーザーパルスによって展開された圧力の数分の1である。

【0069】

結論#4：低速移動材料（すなわち、イジェクタ902）の容積、質量、および組成は、二次パルスの相互作用の性質に影響を及ぼす。

30

【0070】

二次パルスによって生成されるプラズマがワークピースと相互作用するのは、恐らく、ワークピースから離れる材料の流れの熱伝導、圧力、および修正の組み合わせである。

【0071】

例えば、低速移動材料の大きな厚い層を生成する一次パルス相互作用により、低速移動材料が薄い層の場合に比べ、熱伝導が等しい限り、ワークピースに対する二次レーザーパルスによって加熱される領域からの熱伝導が恐らくより小さくなる。

【0072】

本発明の実施形態の方法は、使用するアルミニウムおよびステンレス鋼における孔ドリリングを比較することによって理解される。図18は、性能増大比を示し、この性能増大比は、例えば図1の単一パルス技術を使用するレーザーの各ショットに関してターゲットから除去された μ m単位の値によって割った、例えば図2Aの二重パルス技術の実施形態を使用するレーザーの各ショットに関するターゲットから除去された μ m単位の値となる。一実施形態において、二重パルス構成の各レーザーショットは、一次パルスおよび二次パルスに分割されるので、この比は、比較する際の基礎として、各レーザーショットに関するターゲットへの全エネルギーを使用して計算される。例えば、一次パルスおよび二次パルスのエネルギーの合計が2 mJに等しいときに、二重パルス技術に関する切断レートは、単一パルスが2 mJで性能増大比を得るために2 mJのエネルギーを有するとき、単一パルス技術の切断レートによって分割される。

40

50

【 0 0 7 3 】

二重パルス技術のこの実施形態を使用した結果の相違は、図 1 8 に見られるように明らかに材料に依存する。二重パルスドリリングは、薄いまたは厚い鋼においてほぼ等しい増大となるのに対して、薄いアルミニウムでは増大は見られないが、厚いアルミニウムでは増大が見られる。これに対する妥当な説明としては、アルミニウムと鋼との異なる熱拡散率がある。表 1 は、アルミニウムおよびステンレス鋼の熱伝導率と、等しい容積を蒸散するために必要なエネルギーとの近似を示す。

【 0 0 7 4 】

【表 1】

表 1	300Kから沸騰まで加熱するために必要なエネルギーの近似 (単位 J/cm ³)	熱伝導率の近似 (単位 W/m/K)
アルミニウム	20,000	1
ステンレス鋼	65,000	0.2

10

【 0 0 7 5 】

一次パルスが、アブレーションプラズマ 8 0 2 を生成している間、プラズマからの熱伝導により、アブレーションされていない固体密度ターゲット材料が加熱される。アブレーションプラズマによって引き起こされた圧力は、図 1 1 および図 1 7 に見られるように、蒸発によって生成される低密度材料の膨張を抑制するのに十分に高いので、レーザパルスの後まで蒸散しない過熱された材料が生成される。過熱された材料のポストショット蒸発が、低速移動材料の層を形成すると考えられる。表 1 は、アルミニウムが、ステンレス鋼の 5 倍の熱伝導をもち、1 / 3 の熱容量しか有さないことを示す。したがって、熱伝導は、より迅速にエネルギーをアルミニウムに伝達し、アルミニウムは、等しい容積のステンレス鋼より少ないエネルギーで、高温になり、溶融し、かつ沸騰する。したがって、一次レーザパルスが、アルミニウムターゲットに当たるとき、鋼ターゲットにおいて生成される一次パルスより低速移動材料 (イジェクタ 9 0 2) のより多い容量の層を生成する。

20

【 0 0 7 6 】

いくつかの実施形態において、過熱された層を形成する圧力は、二次パルスの相互作用を検討するに際し非常に重要である。二次パルスは、5 k B a r の圧力を生成し、固体密度の 1 / 1 0 から 1 / 1 0 0 の密度を有するので、図 1 7 によれば二次パルスのピーク温度、例えば二次パルスによって加熱された材料 1 0 0 2 は、1 0 0 0 0 から 1 0 0 0 0 0 K である。図 1 9 は、アルミニウムの熱伝導率を示しているが、このプラズマを通る熱の伝導は、温度が増大すると、低温固体アルミニウムを通る熱の伝導に近づくことを示す。したがって、二次パルスは、一次パルスを伴う高圧力なしにワークピースに良好な熱接触の高温プラズマ (例えば、材料 1 0 0 2) を提供する。したがって、より容易に材料は沸騰し、一次パルスによるより少ない、二次パルスにより過熱された液体を形成することとなる。

30

【 0 0 7 7 】

正しい条件下では、このプロセスによって迅速な材料除去が可能となる。一般に、ショット当たりアルミニウムより少ないイジェクタしか生成しないステンレス鋼の場合、二次パルスからの熱が伝達されるべき距離は、より短く、イジェクタがドリル孔を塞ぐ傾向はより少なくなる。これは、図 1 8 の加工増大比に反映される。アルミニウムの場合、より多いイジェクタ 9 0 2 が生成され、二次パルスによって伝達される熱効率が低減し、深い孔を塞ぐ傾向が増大する。

40

【 0 0 7 8 】

孔閉塞については、さらに説明する必要がある。ステンレス鋼において上述のプロセスは、蒸発および熱伝達の物理によって支配されているように見えるが、アルミニウムターゲットにおける二次パルスによって生成されたプラズマは、様々な理由で加工レートを増

50

大する。図 18 に示されるように、二次パルスは、薄いアルミニウムには比較的少程度しか作用しない。なぜなら、孔は、孔を塞ぐ、または構築されたりキャストが大きな深さになるように十分なショットが必要なため、低速移動材料は十分に深くないからである。

【0079】

500 μm より深いアルミニウム孔において、低速移動層の 10^5 cm/s の速度は、500 nsの時間が、孔を明けるために低速移動材料については必要であることを意味する。図 13 は、低速移動材料の温度が、ただ200 ns後に沸点近くに低下することを明らかに示す。明らかに、実質的な冷却を、低速移動材料が孔を明ける前に設定し、結果的に材料の再堆積が増大し、したがって加工レートが低減する。二次パルスは、低速移動材料を加熱し、孔の外へのターゲットから離れるその流れを支援し、それによって孔を塞ぐ傾向を低減する。

10

【0080】

二次プラズマに存在し、ターゲットスポットから離れる材料の流れを支援すると考えられる圧力の強度を説明することも重要である。図 11 および図 12 は、一次パルスの圧力が、二次パルスの圧力の数倍であることを示すが、2つのパルス間に膨張するための時間を有するので、一次パルスより大きな範囲になりえる。この膨張により、ワークピースと二次パルスとの他の相互作用の操作が可能となる。それは超高压ガス支援ジェットとして使用できるのである。

20

【0081】

図 12 は、二次パルスで生成された圧力が、数 kBar から 20 kBar の範囲を示す。psi の単位で、この範囲は、30000 から 300000 psi であり、これは上限ではないが、利用可能なレーザーパワーによる試験では制限をうける。最終圧力がより高くなる可能性があることが考えられるのである。この高圧力は、実際にワークピースに伝達される。なぜなら、これらの圧力は、加工レーザが当たる側の反対で薄い箔の背面で測定されるからである。これらの圧力は、切断の他の一次パルスによって生成された溶融された、または弱化された材料を吹き飛ばすことが明らか可能で、それによって、より高い加工レートを達成する。

【0082】

次に図 20 から図 22 を参照すると、本発明のさらなる実施形態によるバーストフォーマットが示される。そのように、図 20 から図 22 のバーストは、時間調整されて、それがワークピース表面に近接する低速移動イジェクタと相互作用するように、二次パルスがアブレーションプラズマの実質的な散逸の後に発生するように設計される。さらに、上述のように、後続のバースト間の時間は、各バーストのパルス間に持続期間より長い、例えば 10 から 1000 倍長いものである。

30

【0083】

図 20 は、方形パルスとは反対に例えば図 2A に示されるような、離散した丸められたガウシアンパルスである一次パルス 2002 および二次パルス 2004 を有するバースト 2000 を示す。上述のように、一実施形態において、各バースト 2000 を備える個別パルス 2002、2004 は、10 ps から 100 ns の範囲の持続期間を有し、およびバースト 2000 内の各パルス 2002、2004 間の時間は、5 ns から 5 μs の範囲にある。そのようなバーストは、従来理解されているようなレーザを使用して生成することができる。

40

【0084】

図 21 は、一次パルス 2102 および二次パルス 2104 を有するバースト 2100 を示す。この実施形態において、二次パルス 2104 は、一次パルスの持続期間を超える、例えば約 10 倍の持続期間を有する。また、二次パルス 2104 の強度およびエネルギーは、一次パルス 2102 の強度およびエネルギーを超える。一次パルス 2102 は、上述のように構成され、強度（すなわち、プラスの振幅）が、ワークピースの損傷閾値を超える。しかしながら、二次パルス 2104 が、一次パルス 2102 より長い持続期間、大き

50

い強度、および大きいエネルギーを有することは利点である。例えば、二次パルス 2 1 0 4 と相互作用する間に生成される圧力は、一次パルス 2 1 0 2 と相互作用する間に生成される圧力の一部（例えば、 $1/4$ ）であるので、一次パルス 2 1 0 2 の強度、エネルギー、および持続期間と比較して、二次パルス 2 1 0 4 の 1 つ以上の強度、エネルギー、および持続期間を増大することは利点となる。例えば、二次パルス 2 1 0 4 の強度は、一次パルス 2 1 0 2 の強度より 10 倍まで大きくすることができる（好ましくは約 3 倍）。同様に、二次パルス 2 1 0 4 の持続期間は、一次パルス 2 1 0 2 の持続期間より 20 倍まで長くすることができる（好ましくは約 10 倍より長い）。パルスエネルギーに関しては、二次パルス 2 1 0 4 のエネルギーは、一次パルス 2 1 0 2 のエネルギーより 10 倍まで大きくすることができる。一次パルス 2 1 0 2 に対する二次パルス 2 1 0 4 のパラメータの変更は、二次パルス 2 1 0 4 との相互作用の間に生成されるより低い圧力を利用し、したがって、材料修正プロセスをさらに増大することが分かる。そのようなバーストは、従来理解されたようにレーザを使用して生成することができる。

10

【0085】

図 2 2 は、一次パルス 2 2 0 2 および二次パルス 2 2 0 4 を有するさらに他のバースト 2 2 0 0 を示す。この実施形態において、一次パルス 2 2 0 2 は、単一パルスとして機能する非常に短い重なり合う一連のパルスである。このタイプのパルス構造は、レーザによって、またはパルスを分割しかつ組み合わせる光学構成部品によって生成することができる。二次パルス 2 2 0 4 は、一次パルス 2 2 0 2 と類似するが、構成要素パルス間の重なり合いは少ない。一次パルス 2 2 0 2 および二次パルス 2 2 0 4 は、例えば図 2 A に示す一次パルス 2 0 4 および二次パルス 2 0 6 とは異なるが、これらは、等しく機能するように構成される。二次パルスは、レーザデバイスを使用して生成され、またはサブパルスを分割しかつ組み合わせる適切な光学構成部品を使用して、あるいはレーザのモードビティングによって生成されることができる。一次パルス 2 2 0 2 および二次パルス 2 2 0 4 は、また上述のように 10 ps から 100 ns の持続期間を有するように構成される。一次パルス 2 2 0 2 と二次パルス 2 2 0 4 との間に、中間レーザ放射 2 2 0 6 が存在するが、一般にノイズと考えられることにも留意されたい。二次パルス 2 2 0 4 が、アブレーションプラズマの実質的な散逸の後に発生するように時間調整されるので、任意の中間レーザ放射は、ワークピースから作られるさらなるアブレーションプラズマを生成しない十分に低い強度しかないことは一般に重要である。バースト 2 2 0 0 が、代わりに中間レーザ放射を有さないことにも留意されたい。特定のバーストは、パルス 2 2 0 2 に類似する少なくとも複数のパルス、またはパルス 2 2 0 4 に類似する少なくとも 2 つのパルスを備えることができる。さらなる変形の形態では、所定のバーストは、図 2 A、図 2 B、および図 2 0 から図 2 2 に示された個々のタイプのパルスの異なる組み合わせを備えることができる。

20

30

【0086】

本明細書に開示された発明は、特定の実施形態およびその適用を用いて記載してきたが、多数の修正および変形は、請求項に示される発明の範囲を逸脱することなく当業者によって行われうるものである。

【図面の簡単な説明】

40

【0087】

【図 1】ワークピース上の方向に向けられた従来のパルスフォーマットを示す。

【図 2 A】本発明によるバーストフォーマットの 1 つの実施形態を示す。

【図 2 B】本発明によるバーストフォーマットの他の実施形態を示す。

【図 2 C】本発明によるバーストフォーマットの他の実施形態を示す。

【図 3 A】本発明の 1 つの実施形態による均一な波長を有する図 2 A のパルスフォーマットを実施するシステムを示す。

【図 3 B】二重波長を有するパルスフォーマットを実施する図 3 A のシステムの変形を示す。

【図 4】本発明の 1 つの実施形態による方法を使用する鋼における孔ドリリングの強化を

50

示すプロットである。

【図5】従来の方法と、本発明の1つの実施形態による方法とを比較するトレパンを生成されたアルミニウムスロットの断面図を示す写真である。

【図6】図6Aから図6Eは、本発明の1つの実施形態によるワークピース表面に対する位置に対する、レーザパルスおよび結果としてのイジェクタとともに示されたワークピースの密度の変化を示すグラフである。

【図7】ステージ1：一次レーザパルス前、を示す本発明の1つの実施形態による方法の概略である。

【図8】ステージ2：一次パルスの相互作用、をさらに示す図7の方法の概略である。

【図9】ステージ3：一次パルスと二次パルスとの間、をさらに示す図7および図8の方法の概略である。

10

【図10】ステージ4：二次パルスの相互作用、をさらに示す図7から図9の方法の概略である。

【図11】一次パルス、すなわち本発明の1つの実施形態による一次パルスによって生成された圧力を示すプロットである。

【図12】本発明の1つの実施形態による二次パルスによって生成された圧力を示すプロットである。

【図13】本発明の1つの実施形態による一次パルスによる表面温度履歴を示すプロットである。

【図14】本発明の1つの実施形態による単一のレーザパルスが当たった後の11nsのワークピース表面の写真画像である。

20

【図15】レーザパルスが当たった後の37nsの図14のワークピース表面の写真画像である。

【図16】レーザパルスが当たった後の30sの図15のワークピース表面の写真画像である。

【図17】本発明の1つの実施形態による密度および温度等線を示すプロットである。

【図18】本発明の1つの実施形態によるアルミニウムおよび鋼における孔ドリリングに関する性能増大比を示すプロットである。

【図19】本発明の1つの実施形態による3つの濃度でのアルミニウムプラズマの熱伝導率を示すプロットである。

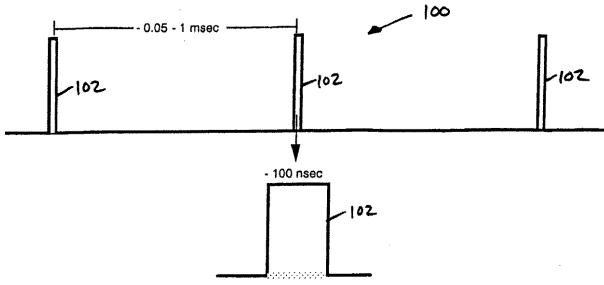
30

【図20】本発明のさらなる実施形態によるバーストフォーマットを示す。

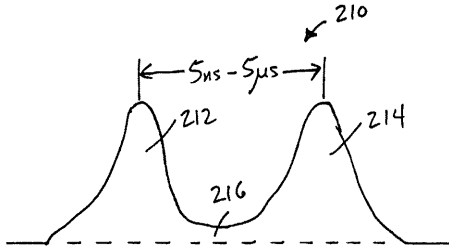
【図21】本発明のさらなる実施形態によるバーストフォーマットを示す。

【図22】本発明のさらなる実施形態によるバーストフォーマットを示す。

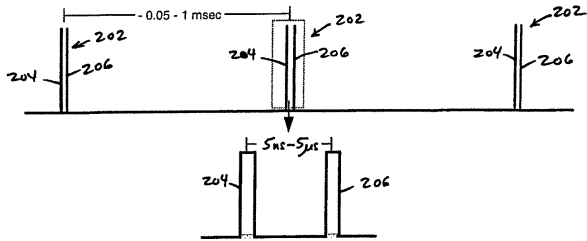
【図1】



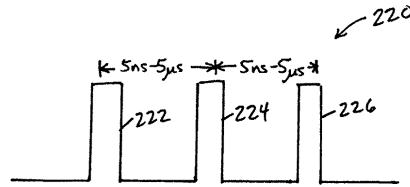
【図2B】



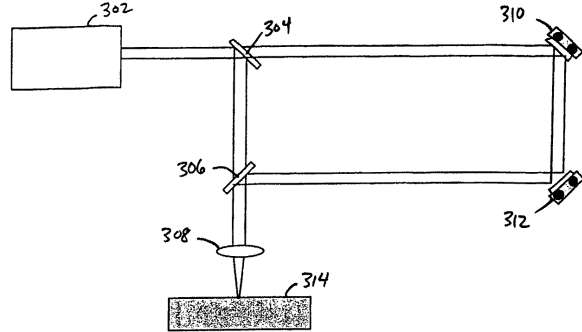
【図2A】



【図2C】



【図3A】



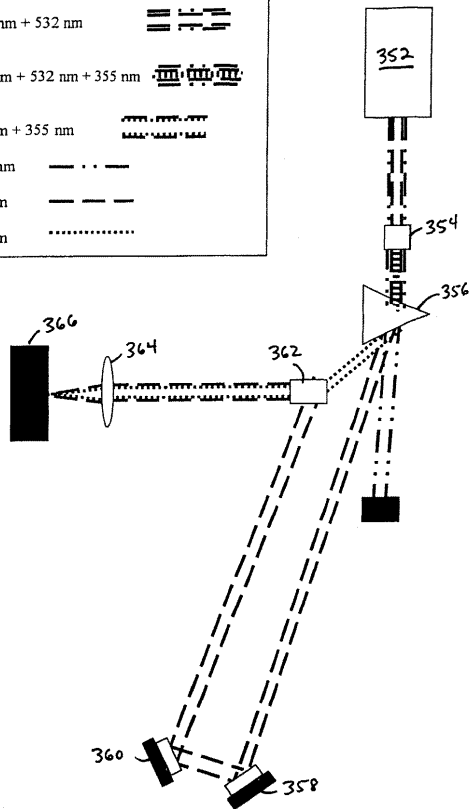
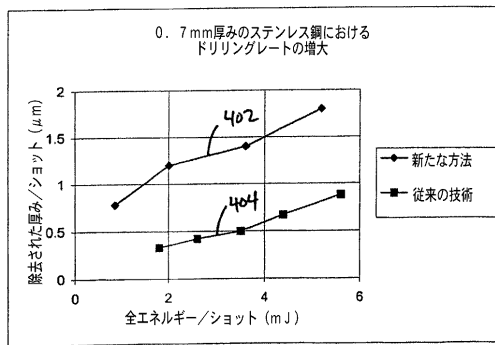
【図3B】

二重波長
パルスフォーマットシステム

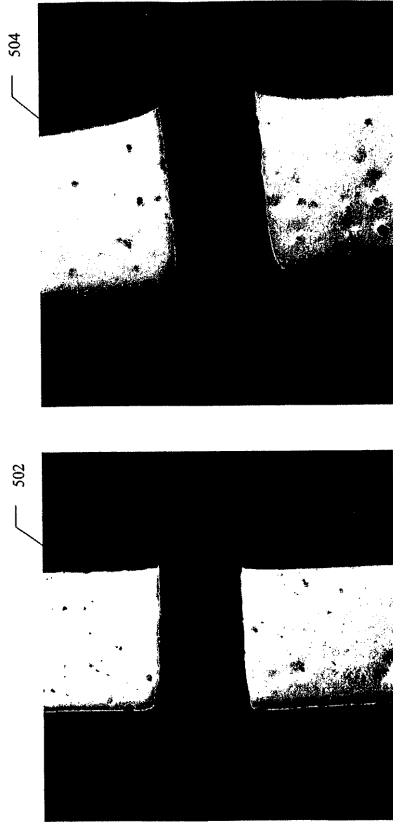
レーザー光凡例

1064 nm + 532 nm	
1064 nm + 532 nm + 355 nm	
532 nm + 355 nm	
1064 nm	
532 nm	
355 nm	

【図4】



【 図 5 】



【 図 6 】

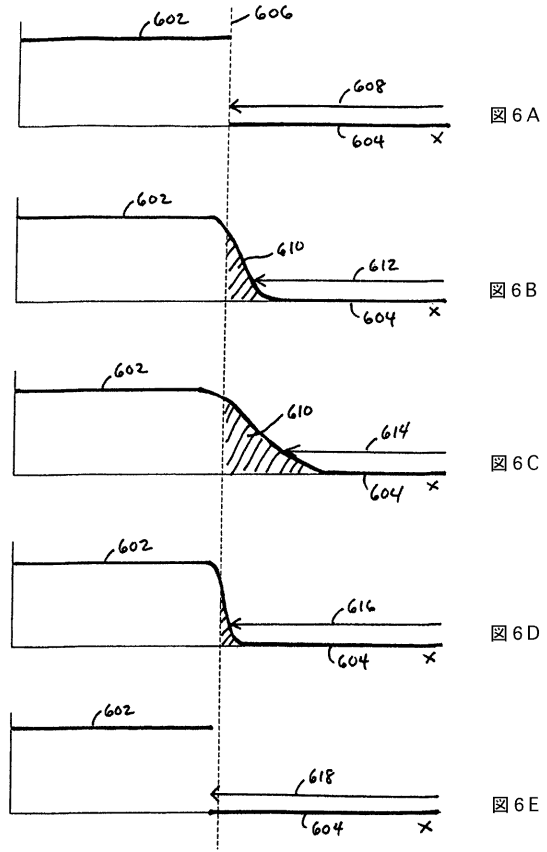
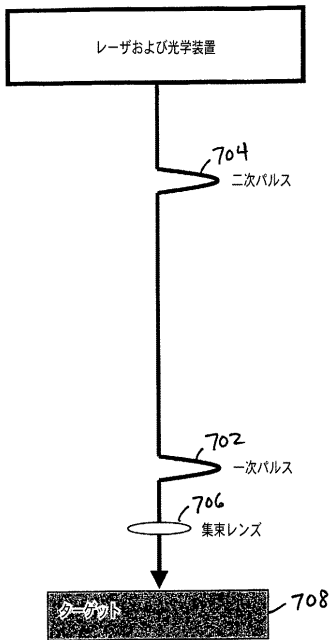


Figure 5: アルミニウムにおけるトレンバン生成されたスロットの断面
 左、新たな技術
 右、従来の技術

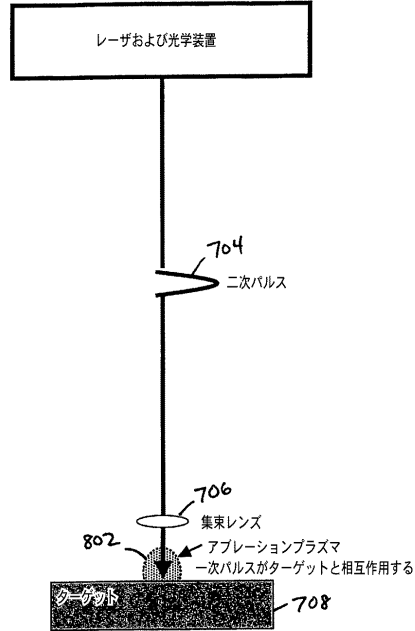
【 図 7 】

任意のレーザーパルスが
 ターゲットに当たる前のシステム



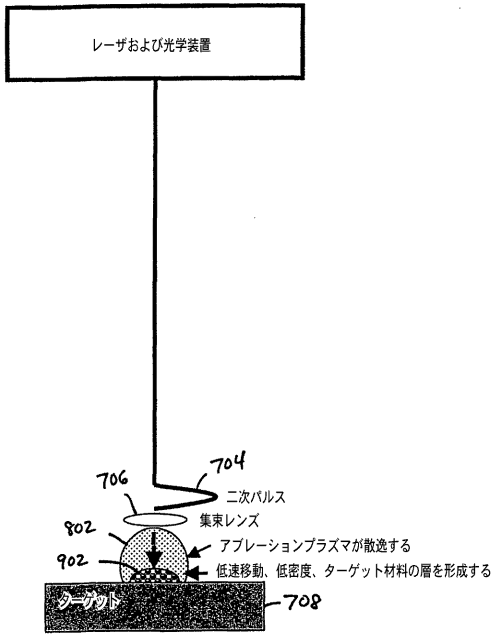
【 図 8 】

一次パルスがターゲットと
 相互作用する間のシステム



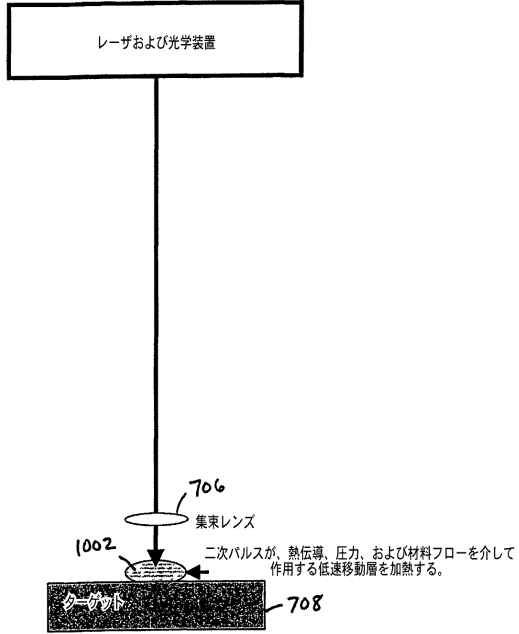
【図9】

一次パルスと二次パルスの相互作用間のシステム

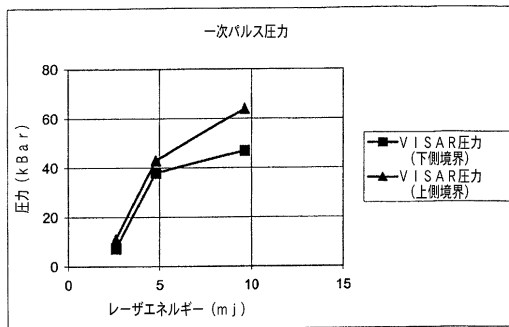


【図10】

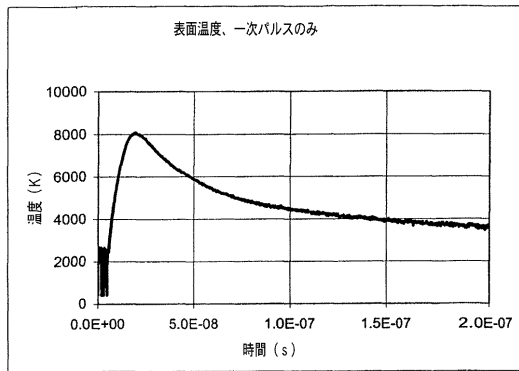
二次パルスの相互作用する間のシステム



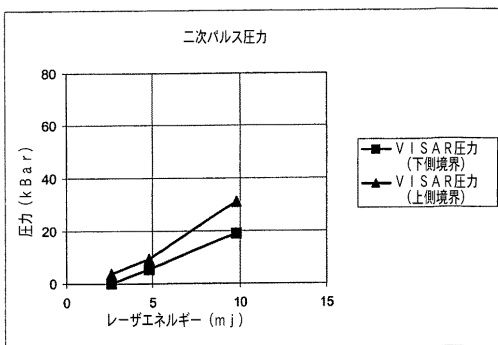
【図11】



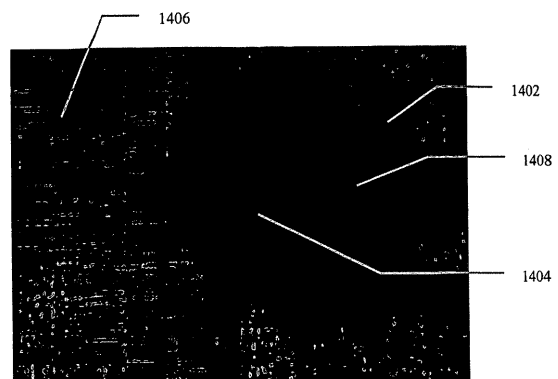
【図13】



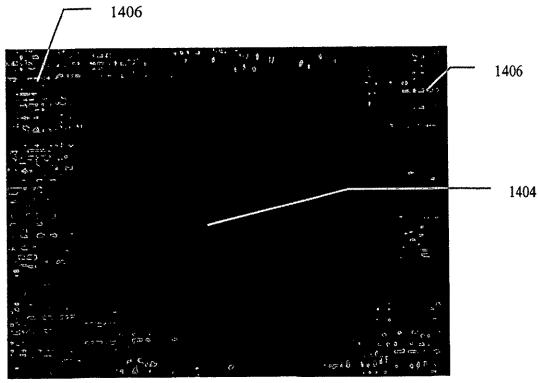
【図12】



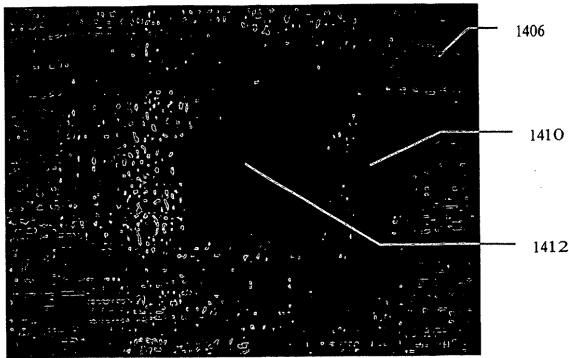
【図14】



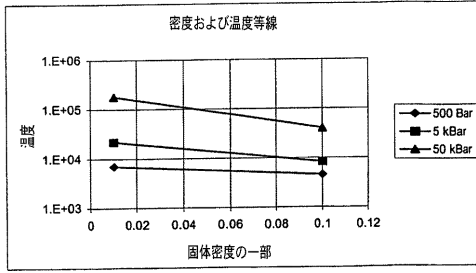
【図15】



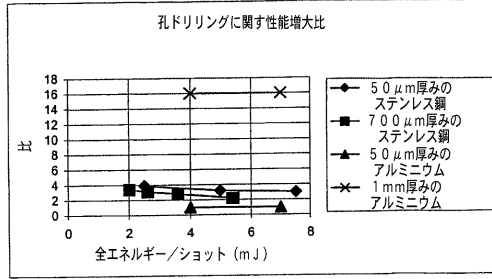
【図16】



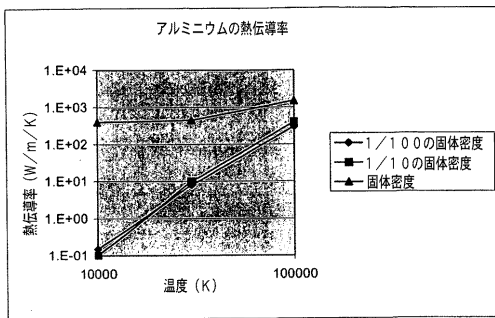
【図17】



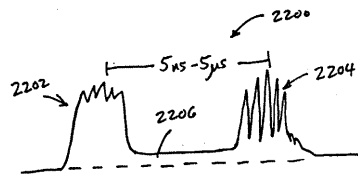
【図18】



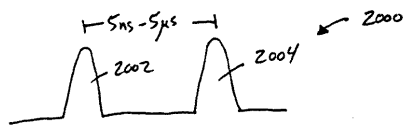
【図19】



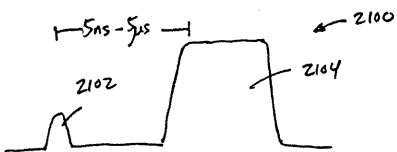
【図22】



【図20】



【図21】



フロントページの続き

- (72)発明者 アンドリュー シー・フォースマン
アメリカ合衆国 9 2 1 2 6 カリフォルニア州 サンディエゴ アデルマン アベニュー 1 0
3 5 3
- (72)発明者 ポール エス・バンクス
アメリカ合衆国 9 2 0 6 4 カリフォルニア州 サンマルコス ホーゾン コート 9 5 1
- (72)発明者 マイケル ディー・ペリー
アメリカ合衆国 9 2 0 6 4 カリフォルニア州 ポーウェイ イーストベール ロード 1 5 3
5 5

合議体

審判長 丸山 英行

審判官 田口 傑

審判官 藤井 昇

- (56)参考文献 特開平5 - 5 7 4 6 4 (J P , A)
特開2 0 0 1 - 2 5 9 8 6 8 (J P , A)
特開平1 1 - 1 4 5 5 8 1 (J P , A)

- (58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)
B23K 26/00 - 26/42