

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2019年4月11日(11.04.2019)



(10) 国際公開番号

WO 2019/069397 A1

(51) 国際特許分類:
B23K 26/02 (2014.01) B23K 26/50 (2014.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2017/036130

(22) 国際出願日: 2017年10月4日(04.10.2017)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(71) 出願人: ギガフォトン株式会社(GIGAPHOTON INC.) [JP/JP]; 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田400番地 Tochigi (JP).

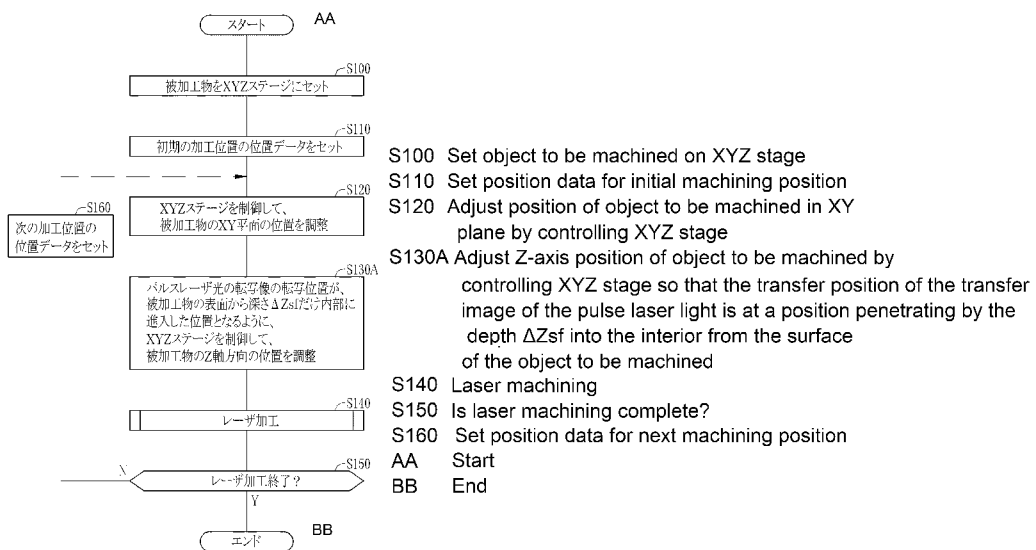
(72) 発明者: 柿崎 弘司 (KAKIZAKI, Kouji); 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギガフォトン株式会社内 Tochigi

(JP). 小林 正和 (KOBAYASHI, Masakazu); 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP). 諏訪 輝(SUWA, Akira); 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP). 若林 理(WAKABAYASHI, Osamu); 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP).

(74) 代理人: 松浦 憲三 (MATSUURA, Kenzo); 〒1630223 東京都新宿区西新宿二丁目6番1号 新宿住友ビル23階 私書箱第176号 新都心国際特許事務所 Tokyo (JP).

(54) Title: LASER MACHINING METHOD AND LASER MACHINING SYSTEM

(54) 発明の名称: レーザ加工方法及びレーザ加工システム



(57) Abstract: This laser machining method for performing laser machining on a transparent material that is transparent to ultraviolet rays uses a laser machining system provided with: a laser device that outputs ultraviolet pulse laser light; a transfer mask on which a transfer pattern through which the pulse laser light passes is formed; and a transfer optical system that transfers a transfer image, formed by the pulse laser light passing through the transfer pattern and having a shape corresponding to the transfer pattern. The method comprises: A. a positioning step in which relative positioning

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): 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, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (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, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告(条約第21条(3))

of the transfer position of the transfer image to be transferred by the transfer optical system and the transparent material is performed in the direction of the optical axis of the pulse laser light, the positioning being determined so that the transfer position penetrates into the interior of the transparent material by a prescribed depth ΔZsf from the surface of the transparent material in the optical axis direction; and B. an irradiation step in which the transparent material is irradiated with pulse laser light with a pulse width in the 1–100 ns range and a beam diameter at the transfer position of 10–150 μm .

(57) 要約: 紫外線のパルスレーザー光を出力するレーザー装置と、パルスレーザー光を透過する転写パターンが形成された転写マスクと、パルスレーザー光が転写パターンを透過することによって形成され転写パターンに応じた形状の転写像を転写する転写光学系とを備えたレーザー加工システムを用いて、紫外線に対して透明な透明材料に対してレーザー加工を施すレーザー加工方法は、以下のステップを備える: A. パルスレーザー光の光軸方向において、転写光学系によって転写される転写像の転写位置と、透明材料との相対的な位置決めを行う位置決めステップであって、転写位置が、光軸方向において透明材料の表面から所定の深さ ΔZsf だけ透明材料の内部に進出した位置となるように位置決めを行う位置決めステップ; B. パルス幅が 1 ~ 100 ns の範囲であって、かつ、転写位置でのビームの直径が 10 μm 以上 150 μm 以下のパルスレーザー光を透明材料に照射する照射ステップ。

明 細 書

発明の名称： レーザ加工方法及びレーザ加工システム

技術分野

[0001] 本開示は、レーザ加工方法及びレーザ加工システムに関する。

背景技術

[0002] 半導体集積回路の微細化、高集積化につれて、半導体露光装置においては解像力の向上が要請されている。半導体露光装置を以下、単に「露光装置」という。このため露光用光源から出力される光の短波長化が進められている。露光用光源には、従来の水銀ランプに代わってガスレーザ装置が用いられている。現在、露光用のガスレーザ装置としては、中心波長約248.4nmの紫外線を出力するKrFエキシマレーザ装置ならびに、中心波長約193.4nmの紫外線を出力するArFエキシマレーザ装置が用いられている。

[0003] 現在の露光技術としては、露光装置側の投影レンズとウエハ間の間隙を液体で満たして、当該間隙の屈折率を変えることによって、露光用光源の見かけの波長を短波長化する液浸露光が実用化されている。ArFエキシマレーザ装置を露光用光源として用いて液浸露光が行われた場合は、ウエハには水中における波長134nmの紫外光が照射される。この技術をArF液浸露光という。ArF液浸露光はArF液浸リソグラフィーとも呼ばれる。

[0004] KrF、ArFエキシマレーザ装置の自然発振におけるスペクトル線幅は約350～400pmと広いため、露光装置側の投影レンズによってウエハ上に縮小投影されるレーザ光（紫外線光）の色収差が発生して解像力が低下する。そこで色収差が無視できる程度となるまでガスレーザ装置から出力されるレーザ光のスペクトル線幅を狭帯域化する必要がある。スペクトル線幅はスペクトル幅とも呼ばれる。このためガスレーザ装置のレーザ共振器内には狭帯域化素子を有する狭帯域化部（Line Narrow Module）が設けられ、この狭帯域化部によりスペクトル幅の狭帯域化が実現されている。なお、狭

帯域化素子はエタロンやグレーティング等であってもよい。このようにスペクトル幅が狭帯域化されたレーザ装置を狭帯域化レーザ装置という。

[0005] また、エキシマレーザ光はパルス幅が $1\text{ ns} \sim 100\text{ ns}$ であって、中心波長はそれぞれ、 248.4 nm と 193.4 nm と短い。こうした特性を利用して、エキシマレーザ光は、露光用途以外に、高分子材料やガラス材料等の直接加工に用いられることがある。高分子材料は、結合エネルギーよりも高いフォトンエネルギーをもつエキシマレーザ光によって、高分子材料の結合を切断できる。そのため、非加熱加工が可能となり、加工形状が綺麗になることが知られている。また、ガラスやセラミックス等はエキシマレーザ光に対する吸収率が高いので、可視及び赤外線レーザ光では加工することが難しい材料の加工もできることが知られている。

先行技術文献

特許文献

- [0006] 特許文献1：特開平10-284792号公報
特許文献2：特開平11-224839号公報
特許文献3：特許3799060号公報
特許文献4：特開平3-157917号公報
特許文献5：特開2000-031574号公報

概要

[0007] 本開示の1つの観点に係るレーザ加工方法は、紫外線のパルスレーザ光を出力するレーザ装置と、パルスレーザ光を透過する転写パターンが形成された転写マスクと、パルスレーザ光が転写パターンを透過することによって形成され転写パターンに応じた形状の転写像を転写する転写光学系とを備えたレーザ加工システムを用いて、紫外線に対して透明な透明材料に対してレーザ加工を施すレーザ加工方法であって、以下のステップを備える：

A. パルスレーザ光の光軸方向において、転写光学系によって転写される転写像の転写位置と、透明材料との相対的な位置決めを行う位置決めステップであって、転写位置が、光軸方向において透明材料の表面から所定の深さ

ΔZ_{sf} だけ透明材料の内部に進入した位置となるように位置決めを行う位置決めステップ；及び

B. パルス幅が $1\text{ ns} \sim 100\text{ ns}$ の範囲であって、かつ、転写位置でのビームの直径が $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上 $150\text{ }\mu\text{m}$ 以下のパルスレーザ光を透明材料に照射する照射ステップ。

[0008] 本開示の1つの観点に係るレーザ加工方法は、紫外線のパルスレーザ光を出力するレーザ装置と、パルスレーザ光を集光する集光光学系とを備えたレーザ加工システムを用いて、紫外線に対して透明な透明材料に対してレーザ加工を施すレーザ加工方法であって、以下のステップを備える：

A. パルスレーザ光の光軸方向において、パルスレーザ光のビームウエスト位置と、透明材料との相対的な位置決めを行う位置決めステップであって、ビームウエスト位置が、光軸方向において透明材料の表面から所定の深さ ΔZ_{sf} だけ透明材料の内部に進入した位置となるように位置決めを行う位置決めステップ；及び

B. パルス幅が $1\text{ ns} \sim 100\text{ ns}$ の範囲であって、かつ、ビームウエスト位置でのビームの直径が $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上 $150\text{ }\mu\text{m}$ 以下のパルスレーザ光を透明材料に照射する照射ステップ。

[0009] 本開示の1つの観点に係るレーザ加工システムは、紫外線に対して透明な透明材料に対して紫外線のパルスレーザ光を照射してレーザ加工を施すレーザ加工システムであって、以下を備える：

A. パルス幅が $1\text{ ns} \sim 100\text{ ns}$ の範囲のパルスレーザ光を出力するレーザ装置；

B. レーザ装置から出力されるパルスレーザ光を透過する転写パターンが形成された転写マスク；

C. パルスレーザ光が転写パターンを透過することによって形成され転写パターンに応じた形状の転写像を透明材料に転写する転写光学系；

D. パルスレーザ光の光軸方向において、転写光学系によって転写される転写像の転写位置と、透明材料との相対的な位置決めを行う位置決め機構；

及び

E. 転写位置が、光軸方向において透明材料の表面から所定の深さ ΔZ_{sf} だけ透明材料の内部に進入した位置となるように、位置決め機構を制御して位置決めを行う位置決め制御部；

ここで、転写位置でのパルスレーザ光のビームの直径は $10\ \mu\text{m}$ 以上 $150\ \mu\text{m}$ 以下である。

図面の簡単な説明

[0010] 本開示のいくつかの実施形態を、単なる例として、添付の図面を参照して以下に説明する。

[図1]図1は、比較例のレーザ加工システムの構成を概略的に示す。

[図2]図2は、比較例のレーザ加工手順を示すフローチャートである。

[図3]図3は、比較例のレーザ加工の処理手順を示すフローチャートである。

[図4]図4は、比較例におけるレーザ加工の加工状態を示す説明図である。図4Aは、パルスレーザ光の転写位置を被加工物の表面に合わせてパルスレーザ光を照射した状態を示す。図4Bは、パルスレーザ光の照射による被加工物の加工状態を示す。

[図5]図5は、第1実施形態のレーザ加工システムの構成を概略的に示す。

[図6]図6は、第1実施形態のレーザ加工手順を示すフローチャートである。

[図7]図7は、第1実施形態のレーザ加工の加工結果を示す写真である。

[図8]図8は、第1実施形態におけるレーザ加工を施した場合の被加工物の状態遷移を示す説明図である。図8Aは、パルスレーザ光の転写位置を、被加工物の表面から深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置に合わせてパルスレーザ光を照射した状態を示す。図8Bは、パルスレーザ照射直後の被加工物の加工状態を示す。図8Cは、パルスレーザ光が自己収束している状態を示す。図8Dは、パルスレーザ光の照射による被加工物の加工状態を示す。

[図9]図9は、第1実施形態において、実験により得られた、フルーエンスと加工深さ ΔZ_d との関係を示すグラフである。

[図10]図10は、フルーエンスが不足した場合の加工結果の写真である。

[図11]図 1 1 は、第 1 実施形態において、実験により得られた、照射時間と加工深さ $\Delta Z d$ との関係を示すグラフである。

[図12]図 1 2 は、第 1 実施形態において、実験により得られた、転写位置の深さ $\Delta Z s f$ と加工深さ $\Delta Z d$ との関係を示すフローチャートである。

[図13]図 1 3 は、第 2 実施形態のレーザ加工システムの構成を概略的に示す。

[図14]図 1 4 は、第 2 実施形態のレーザ加工手順を示すフローチャートである。

[図15]図 1 5 は、第 2 実施形態のレーザ加工の処理手順を示すフローチャートである。

[図16]図 1 6 は、第 2 実施形態のレーザ加工装置の変形例を示す。

[図17]図 1 7 は、レーザ装置の変形例 1 を示す。

[図18]図 1 8 は、レーザ装置の変形例 2 を示す。

実施形態

[0011] <内容>

1. 概要
2. 比較例に係るレーザ加工システム及びレーザ加工方法
 2. 1 構成
 2. 2 動作
 2. 3 課題
3. 第 1 実施形態のレーザ加工システム及びレーザ加工方法
 3. 1 構成
 3. 2 動作
 3. 3 作用
 3. 4 好ましい加工条件
4. 第 2 実施形態のレーザ加工システム及びレーザ加工方法
 4. 1 構成
 4. 2 動作

4. 3 作用

4. 4 レーザ加工装置の変形例

5. レーザ装置の変形例

5. 1 変形例 1

5. 2 変形例 2

[0012] 以下、本開示の実施形態について、図面を参照しながら詳しく説明する。

以下に説明される実施形態は、本開示のいくつかの例を示すものであって、本開示の内容を限定するものではない。また、各実施形態で説明される構成及び動作の全てが本開示の構成及び動作として必須であるとは限らない。なお、同一の構成要素には同一の参照符号を付して、重複する説明を省略する。

[0013] 1. 概要

本開示は、被加工物にレーザ光を照射してレーザ加工を行うレーザ加工システム及びレーザ加工方法に関する。

[0014] 2. 比較例に係るレーザ加工システム及びレーザ加工方法

2. 1 構成

図 1 は、比較例に係るレーザ加工システムの構成を概略的に示す。レーザ加工システム 2 は、レーザ装置 3 と、レーザ加工装置 4 とを備えている。レーザ装置 3 とレーザ加工装置 4 は光路管 5 によって接続されている。

[0015] レーザ装置 3 は、マスターオシレータ 10 と、モニタモジュール 11 と、シャッタ 12 と、レーザ制御部 13 とを含んでいる。レーザ装置 3 は、レーザ媒質として、アルゴン (Ar) 及びフッ素 (F) を含む ArF レーザガスを使用する、ArF エキシマレーザ装置である。レーザ装置 3 は、中心波長が約 193.4 nm の ArF レーザ光である紫外線のパルスレーザ光を出力する。

[0016] マスターオシレータ 10 は、レーザチャンバ 21 と、一対の電極 22a 及び 22b と、充電器 23 と、パルスパワーモジュール (PPM) 24 とを含んでいる。図 1 においては、レーザ光の進行方向に略垂直な方向からみたレ

ーザチャンバ 21 の内部構成が示されている。

- [0017] レーザチャンバ 21 は、A r F レーザガスが封入されるチャンバである。一対の電極 22 a 及び 22 b は、レーザ媒質を放電により励起するための電極として、レーザチャンバ 21 内に配置されている。
- [0018] レーザチャンバ 21 には開口が形成され、この開口を電気絶縁部 28 が塞いでいる。電極 22 a は電気絶縁部 28 に支持され、電極 22 b はリターンプレート 21 d に支持されている。このリターンプレート 21 d は図示しない配線でレーザチャンバ 21 の内面と接続されている。電気絶縁部 28 には、導電部が埋め込まれている。導電部は、パルスパワーモジュール 24 から供給される高電圧を電極 22 a に印加する。
- [0019] 充電器 23 は、パルスパワーモジュール 24 の中の図示しない充電コンデンサに所定の電圧で充電する直流電源装置である。パルスパワーモジュール 24 は、レーザ制御部 13 によって制御されるスイッチ 24 a を含んでいる。スイッチ 24 a が O F F から O N になると、パルスパワーモジュール 24 は、充電器 23 に保持されていた電気エネルギーからパルス状の高電圧を生成し、この高電圧を一対の電極 22 a 及び 22 b 間に印加する。
- [0020] 一対の電極 22 a 及び 22 b 間に高電圧が印加されると、一対の電極 22 a 及び 22 b 間の絶縁が破壊され、放電が起こる。この放電のエネルギーにより、レーザチャンバ 21 内のレーザ媒質が励起されて高エネルギー準位に移行する。励起されたレーザ媒質が、その後低エネルギー準位に移行するとき、そのエネルギー準位差に応じた光を放出する。
- [0021] レーザチャンバ 21 の両端には、ウインドウ 21 a 及び 21 b が設けられている。レーザチャンバ 21 内で発生した光は、ウインドウ 21 a 及び 21 b を介してレーザチャンバ 21 の外部に出射する。
- [0022] マスターオシレータ 10 は、さらに、リアミラー 26 と、出力結合ミラー 27 とを含んでいる。リアミラー 26 には高反射膜がコートされており、出力結合ミラー 27 には部分反射膜がコートされている。リアミラー 26 は、レーザチャンバ 21 のウインドウ 21 a から出射された光を高い反射率で反

射してレーザチャンバ21に戻る。出力結合ミラー27は、レーザチャンバ21のウインドウ21bから出力される光のうちの一部を透過させて出力し、他の一部を反射させてレーザチャンバ21内に戻す。

[0023] 従って、リアミラー26と出力結合ミラー27とで、光共振器が構成される。レーザチャンバ21は、光共振器の光路上に配置される。レーザチャンバ21から出射した光は、リアミラー26と出力結合ミラー27との間で往復し、電極22aと電極22bとの間のレーザゲイン空間を通過する度に増幅される。増幅された光の一部が、出力結合ミラー27を介して、パルスレーザ光として出力される。

[0024] モニタモジュール11は、マスターオシレータ10を出射したパルスレーザ光の光路上に配置されている。モニタモジュール11は、例えば、ビームスプリッタ11aと、光センサ11bとを含んでいる。

[0025] ビームスプリッタ11aは、マスターオシレータ10から出射したパルスレーザ光を高い透過率でシャッタ12に向けて透過させるとともに、パルスレーザ光の一部を光センサ11bの受光面に向けて反射する。光センサ11bは、受光面に入射したパルスレーザ光のパルスエネルギーを検出し、検出されたパルスエネルギーのデータをレーザ制御部13に出力する。

[0026] レーザ制御部13は、レーザ加工制御部32との間で各種信号を送受信する。例えば、レーザ制御部13は、レーザ加工制御部32から、発光トリガ T_r 、目標パルスエネルギー E_t のデータ等を受信する。また、レーザ制御部13は、充電器23に対して充電電圧の設定信号を送信し、かつ、パルスパワーモジュール24に対してスイッチ24aのON又はOFFの指令信号を送信する。

[0027] レーザ制御部13は、モニタモジュール11からパルスエネルギーのデータを受信し、受信したパルスエネルギーのデータを参照して充電器23の充電電圧を制御する。充電器23の充電電圧を制御することにより、パルスレーザ光のパルスエネルギーが制御される。

[0028] シャッタ12は、モニタモジュール11のビームスプリッタ11aを透過

したパルスレーザ光の光路に配置される。レーザ制御部 13 は、レーザ発振の開始後、モニタモジュール 11 から受信するパルスエネルギーと目標パルスエネルギー E_t との差が許容範囲内となるまでの間は、シャッタ 12 を閉じるように制御する。レーザ制御部 13 は、モニタモジュール 11 から受信するパルスエネルギーと目標パルスエネルギー E_t との差が許容範囲内になったら、シャッタ 12 を開くように制御する。レーザ制御部 13 は、シャッタ 12 の開閉信号と同期して、パルスレーザ光の発光トリガ T_r の受け付けが可能となったことを表す信号を、レーザ加工装置 4 のレーザ加工制御部 32 に送信する。

[0029] レーザ加工装置 4 は、レーザ加工制御部 32 と、テーブル 33 と、XYZ ステージ 34 と、光学システム 36 と、筐体 37 と、フレーム 38 とを含んでいる。筐体 37 内には光学システム 36 が配置される。フレーム 38 には、筐体 37 と XYZ ステージ 34 が固定される。

[0030] テーブル 33 は、被加工物 41 を支持する。被加工物 41 は、パルスレーザ光が照射されてレーザ加工が行われる加工対象である。被加工物 41 は、紫外線のパルスレーザ光に対して透明な透明材料であり、例えば、合成石英ガラスである。レーザ加工は、例えば、被加工物 41 に穴を空ける穴加工である。XYZ ステージ 34 は、テーブル 33 を支持している。XYZ ステージ 34 は、X 軸方向、Y 軸方向、Z 軸方向に移動可能であり、テーブル 33 の位置を調整することにより、被加工物 41 の位置を調整可能である。XYZ ステージ 34 は、レーザ加工制御部 32 の制御の下、光学システム 36 から出射するパルスレーザ光が、所望の加工位置に照射されるように被加工物 41 の位置を調整する。

[0031] レーザ加工システム 2 は、例えば、被加工物 41 の 1 つの位置又は複数の位置に穴加工を施す。レーザ加工制御部 32 には、複数の加工位置に応じた位置データが順次セットされる。各加工位置の位置データは、例えば、XYZ ステージ 34 の原点位置を基準とした、各加工位置の X 軸方向、Y 軸方向、Z 軸方向のそれぞれの位置を規定した座標データである。レーザ加工制御

部 3 2 は、こうした座標データに基づいて X Y Z ステージ 3 4 の移動量を制御して、X Y Z ステージ 3 4 上の被加工物 4 1 を位置決めする。

[0032] 光学システム 3 6 は、例えば、高反射ミラー 3 6 a ~ 3 6 c と、ビームホモジナイザ 4 6 と、転写マスク 4 7 と、転写レンズ 4 8 とを備えており、被加工物 4 1 の表面に、加工形状に対応する像を転写する。高反射ミラー 3 6 a ~ 3 6 c、ビームホモジナイザ 4 6、転写マスク 4 7 及び転写レンズ 4 8 は、それぞれが図示しないホルダに固定されており、筐体 3 7 内において所定の位置に配置されている。

[0033] 高反射ミラー 3 6 a ~ 3 6 c は、紫外領域のパルスレーザ光を高い反射率で反射する。高反射ミラー 3 6 a は、レーザ装置 3 から入力されたパルスレーザ光を高反射ミラー 3 6 b に向けて反射し、高反射ミラー 3 6 b は、パルスレーザ光を、高反射ミラー 3 6 c に向けて反射する。高反射ミラー 3 6 c は、パルスレーザ光を転写レンズ 4 8 に向けて反射する。高反射ミラー 3 6 a ~ 3 6 c は、例えば、合成石英やフッ化カルシウムで形成された透明基板の表面に、パルスレーザ光を高反射する反射膜がコートされている。

[0034] ビームホモジナイザ 4 6 及び転写マスク 4 7 は、高反射ミラー 3 6 b 及び 3 6 c の間の光路上に配置されている。ビームホモジナイザ 4 6 は、フライアイレンズ 4 6 a とコンデンサレンズ 4 6 b とを備えている。ビームホモジナイザ 4 6 は、高反射ミラー 3 6 b で反射したパルスレーザ光の光強度分布を均一化して、転写マスク 4 7 をケーラ照明するように配置される。

[0035] 転写マスク 4 7 は、ビームホモジナイザ 4 6 から出射するパルスレーザ光の一部を透過させることで、被加工物 4 1 に対する加工形状に対応するパルスレーザ光の像を形成する。転写マスク 4 7 は、例えば、パルスレーザ光を遮光する遮光性を有する遮光板に、例えば光を透過する透過孔で構成される転写パターンが形成されたものである。ここで、転写マスク 4 7 の転写パターンの形状に応じて形成される、パルスレーザ光の像を転写像と呼ぶ。

[0036] 本例においては、転写マスク 4 7 の転写パターンは、円形のピンホールである。こうした転写マスク 4 7 を用いて、本例のレーザ加工装置 4 は、被加

工物 4 1 に対して、断面が円形の穴を形成する穴加工を施す。また、転写マスク 4 7 は、ピンホールの大きさを変更することが可能な可変機構を備えており、被加工物 4 1 への加工寸法に応じて、ピンホールの大きさを調節することができる。レーザ加工制御部 3 2 は、転写マスク 4 7 の可変機構を制御してピンホールの大きさを調節する。

[0037] 転写レンズ 4 8 は、入射したパルスレーザ光を集光して、ウインドウ 4 2 を介して、集光したパルスレーザ光を被加工物 4 1 に向けて出射する。転写レンズ 4 8 は、転写マスク 4 7 を透過することにより生成されたパルスレーザ光のピンホール形状の転写像を、転写レンズ 4 8 の焦点距離に応じた位置に結像させる転写光学系を構成する。ここで、転写レンズ 4 8 の作用によって、転写像が結像する結像位置を転写位置と呼ぶ。

[0038] この転写位置は、Z 軸方向において、パルスレーザ光が入射する入射側の表面と一致する位置に設定される。以下、単に、被加工物 4 1 の表面という場合は、被加工物 4 1 の入射側の表面を意味する。ここで、Z 軸方向は、転写レンズ 4 8 を出射して被加工物 4 1 に入射するパルスレーザ光の光軸方向と平行である。

[0039] 転写レンズ 4 8 は、複数枚のレンズの組み合わせによって構成される。転写レンズ 4 8 は、転写マスク 4 7 に設けられるピンホールの実際の寸法よりも小さな寸法のピンホール形状の転写像を、転写位置に結像させる縮小光学系である。転写レンズ 4 8 で構成される転写光学系の倍率 M は、たとえば、 $M = 1 / 10 \sim 1 / 5$ である。また、本例では、転写レンズ 4 8 を組合せレンズの例で示したが、転写レンズ 4 8 の光軸上近傍に 1 つの小さな円形の転写像を結像させる場合は、転写レンズ 4 8 を単レンズで構成してもよい。

[0040] ウインドウ 4 2 は、転写レンズ 4 8 と被加工物 4 1 との間の光路上に配置されており、筐体 3 7 に形成された開口に O リング（図示せず）によってシールされた状態で固定される。

[0041] アッテネータ 5 2 は、筐体 3 7 内において、高反射ミラー 3 6 a と高反射ミラー 3 6 b の間の光路上に配置されている。アッテネータ 5 2 は、例えば

、2枚の部分反射ミラー52a及び52bと、これらの部分反射ミラーの回転ステージ52c及び52dとを含んでいる。2枚の部分反射ミラー52a及び52bは、パルスレーザ光の入射角度によって、透過率が変化する光学素子である。部分反射ミラー52a及び部分反射ミラー52bは、パルスレーザ光の入射角度が互いに一致し、且つ所望の透過率となるように、回転ステージ52c及び回転ステージ52dによって傾斜角度が調整される。

[0042] これにより、パルスレーザ光は、所望のパルスエネルギーに減光されてアッテネータ52を通過する。アッテネータ52は、レーザ加工制御部32の制御信号に基づいて透過率Tが制御される。レーザ加工制御部32は、目標パルスエネルギー E_t を通じてレーザ装置3が出力するパルスレーザ光のフルエンスを制御することに加えて、アッテネータ52の透過率Tを制御して、パルスレーザ光のフルエンスを制御する。目標パルスエネルギー E_t を変化させればフルエンスを変化させることができるが、レーザ装置3のマスタオシレータ10では、パルスエネルギーを大きく変化させることは難しい。アッテネータ52を使用することで、マスタオシレータ10の出力が一定でも、フルエンスを変化させることができる。

[0043] 筐体37の内部には、レーザ加工システム2の稼働中、不活性ガスである窒素(N_2)ガスが常時流れている。筐体37には、窒素ガスを筐体37に吸入する吸入ポート37aと、筐体37から窒素ガスを外部に排出する排出ポート37bが設けられている。吸入ポート37a及び排出ポート37bには、図示しない吸気管や排出管を接続できるようになっている。吸入ポート37a及び排出ポート37bは、吸気管や排出管を接続した状態では、筐体37内に外気が混入するのを抑制するようにOリング(図示せず)によってシールされている。吸入ポート37aには、窒素ガス供給源43が接続される。

[0044] 光路管5内も窒素ガスが流れており、光路管5も、レーザ加工装置4の接続部分と、レーザ装置3との接続部分とにおいてOリングでシールされている。

[0045] 2. 2 動作

図2及び図3を参照しながら、レーザ加工システム2の動作を説明する。図2に示すように、レーザ加工を行う場合には、被加工物41がXYZステージ34のテーブル33にセットされる(S100)。レーザ加工制御部32は、初期の加工位置の位置データをXYZステージ34にセットする(S110)。

[0046] レーザ加工制御部32は、XYZステージ34を制御して、被加工物41のXY平面の位置を調整する(S120)。S120において、レーザ加工制御部32は、位置データに含まれるXY平面内の座標データに基づいてXYZステージ34の移動量を制御することにより、被加工物41のXY平面内の位置を調整する。これにより、被加工物41のXY平面内の位置が位置決めされる。

[0047] 次に、レーザ加工制御部32は、パルスレーザ光の転写像の転写位置が、被加工物41の表面と一致するように、XYZステージ34を制御して、被加工物41のZ軸方向の位置を調整する(S130)。具体的には、位置データにおいて、被加工物41のZ軸方向の位置は、パルスレーザ光の転写像の転写位置が、被加工物41の表面と一致するように規定されている。転写像の転写位置は、転写マスク47と転写レンズ48間の距離と、転写レンズ48の焦点距離等に応じて決まる。

[0048] S130において、レーザ加工制御部32は、位置データに基づいてXYZステージ34の移動量を制御することにより、被加工物41のZ軸方向の位置を調整する。これにより、Z軸方向において、転写位置と被加工物41の表面とが一致するように、転写位置と被加工物41との相対的な位置決めが行われる。上述したとおり、Z軸方向は、被加工物41に入射するパルスレーザ光の光軸方向と平行であるので、Z軸方向の位置決めは、パルスレーザ光の光軸方向の位置決めに相当する。

[0049] 被加工物41の位置決めが終了すると、レーザ加工が行われる(S140)。初期の加工位置に対するレーザ加工が終了した場合は、レーザ加工制御

部 3 2 は、次の加工位置がある場合（S 1 5 0 で N）には、次の加工位置の位置データを X Y Z ステージ 3 4 にセットする（S 1 6 0）。そして、X Y Z ステージ 3 4 で、被加工物 4 1 を次の加工位置に移動する（S 1 2 0 及び S 1 3 0）。次の加工位置において、被加工物 4 1 に対してレーザ加工が行われる（S 1 4 0）。次の加工位置が無い場合は、レーザ加工が終了する（S 1 5 0 で Y）。こうした手順が、すべての加工位置に対するレーザ加工が終了するまで繰り返される。

[0050] 本例においては、加工位置毎に、X Y 平面の位置と Z 軸方向の位置の両方の調整を行っている。しかし、複数の加工位置間で Z 軸方向の位置が同じ場合は、初期の加工位置において Z 軸方向の位置を調整するステップ S 1 3 0 を実施した後は、それ以降の加工位置についてはステップ S 1 3 0 を省略してもよい。この場合には、例えば、初期の加工位置の位置データをセットするステップ S 1 1 0 の後、まず Z 軸方向の位置を調整するステップ S 1 3 0 を実施する。その後に、ステップ S 1 2 0 を実施して、初期の加工位置に関する X Y 平面の位置を調整して、ステップ S 1 4 0 を実施する。そして、次の加工位置についてステップ S 1 6 0 を実施した後は、ステップ S 1 2 0 のみを実施し、ステップ S 1 3 0 を省略して、ステップ S 1 4 0 を実施する。

[0051] レーザ加工は、図 3 に示すフローチャートに従って行われる。レーザ加工制御部 3 2 は、転写像の転写位置である被加工物 4 1 の表面におけるパルスレーザ光が、レーザ加工に必要な所望のフルーエンス F_t となるようにパルスエネルギーを制御する。具体的には、レーザ加工制御部 3 2 は、目標パルスエネルギー E_t とアッテネータ 5 2 の透過率 T の制御を通じて被加工物 4 1 に入射するパルスエネルギーを制御する。また、レーザ加工制御部 3 2 は、レーザ装置 3 のレーザ制御部 1 3 に対して、目標パルスエネルギー E_t を送信する。これにより、レーザ制御部 1 3 において、目標パルスエネルギー E_t が設定される（S 1 4 1）。

[0052] ここで、フルーエンス F_t とは、レーザ加工に必要なフルーエンスであり、パルスレーザ光の転写像の転写位置における、パルスレーザ光のエネルギー

密度である。光学システム 36 の光損失が無視できる場合は、フルーエンス F_t は、下記式 (1) で定義される。

$$F_t = M^{-2} (T \cdot E_t) / S_{IL} [\text{mJ} / \text{cm}^2] \cdots \cdots (1)$$

ここで、 M ：転写光学系の倍率、 T ：アッテネータの透過率、 E_t ：レーザ加工に必要なパルスエネルギー、 S_{IL} ：転写マスク 47 にケーラ照明されるパルスレーザ光のレーザビームの面積である。

[0053] 転写マスク 47 に照射されたパルスレーザ光のうち、転写パターンであるピンホールを通過する光のみが被加工物 41 に照射されて、フルーエンス F_t に寄与する。そのため、アッテネータ 52 を透過したパルスレーザ光のパルスエネルギーである $T \cdot E_t$ を S_{IL} で割って、転写パターンを通過するパルスレーザ光の単位面積当たりのエネルギー密度が算出される。また、本例のように転写光学系が縮小光学系である場合は、倍率 M の値が小さいほど、すなわち、像を縮小するほど、エネルギー密度であるフルーエンスは増加する。

[0054] レーザ制御部 13 は、レーザ加工制御部 32 から目標パルスエネルギー E_t を受信すると、シャッタ 12 を閉じて、充電器 23 を作動させる。そして、レーザ制御部 13 は、図示しない内部トリガによってパルスパワーモジュール 24 のスイッチ 24a を ON する。これにより、マスターオシレータ 10 はレーザ発振する。

[0055] モニタモジュール 11 は、マスターオシレータ 10 から出力されるパルスレーザ光をサンプルして、パルスエネルギーの実測値であるパルスエネルギー E を計測する。レーザ制御部 13 は、パルスエネルギー E と目標パルスエネルギー E_t との差 ΔE が 0 に近づくように、充電器 23 の充電電圧を制御する。具体的には、レーザ制御部 13 は、差 ΔE が許容範囲になるように充電電圧を制御する (S142)。

[0056] レーザ制御部 13 は、差 ΔE が許容範囲となったか否かを監視する (S142)。レーザ制御部 13 は、差 ΔE が許容範囲となった場合 (S142で Y)、レーザ加工制御部 32 に対して、発光トリガ T_r の受信準備が完了したことを知らせる受信準備完了信号を送信し、かつ、シャッタ 12 を開ける

。これにより、レーザ装置 3 は、発光トリガ T_r の受信準備完了状態となる (S 1 4 3)。

[0057] レーザ加工制御部 3 2 は、受信準備完了信号を受信した場合、パルスレーザ光の転写像の転写位置におけるフルーエンスがレーザ加工に必要なフルーエンス F_t となるようにアッテネータ 5 2 の透過率 T を設定する (S 1 4 4)。本例において、被加工物 4 1 の Z 軸方向の位置決めにより (図 2 の S 1 3 0 参照)、転写位置は、被加工物 4 1 の表面の位置と一致しているので、転写位置におけるフルーエンスは、被加工物 4 1 の表面におけるパルスレーザ光のフルーエンスと一致する。そのため、こうしたアッテネータ 5 2 の透過率 T の設定により、被加工物 4 1 の表面の位置におけるパルスレーザ光のフルーエンスが、レーザ加工に必要なフルーエンス F_t に調節される。

[0058] アッテネータ 5 2 の透過率 T は、光学システム 3 6 の光損失が無い場合、上記式 (1) から下記式 (2) が求められる。

$$T = (F_t / E_t) S_{IL} \cdot M^2 \cdot \dots \cdot (2)$$

上述のとおり、 F_t : レーザ加工に必要なフルーエンス、 E_t : レーザ加工に必要な目標パルスエネルギー、 S_{IL} : 転写マスク 4 7 にケーラ照明されるパルスレーザ光のレーザビームの面積である。

[0059] レーザ加工制御部 3 2 は、アッテネータ 5 2 の透過率 T を設定した後、所定の繰り返し周波数 f と所定のパルス数 N で規定される発光トリガ T_r を、レーザ制御部 1 3 に送信する (S 1 4 5)。その結果、発光トリガ T_r に同期して、モニタモジュール 1 1 のビームスプリッタ 1 1 a を透過したパルスレーザ光はレーザ装置 3 から出力されて、レーザ加工装置 4 に入射する。

[0060] レーザ加工装置 4 に入射したパルスレーザ光は、高反射ミラー 3 6 a を径由してアッテネータ 5 2 において減光される。アッテネータ 5 2 を透過したパルスレーザ光は、高反射ミラー 3 6 b で反射して、ビームホモジナイザ 4 6 に入射する。パルスレーザ光は、ビームホモジナイザ 4 6 において光強度が空間的に均一化されて、転写マスク 4 7 をケーラ照明する。

[0061] 転写マスク 4 7 に照射されたパルスレーザ光のうち、ピンホールを透過し

たパルスレーザ光が高反射ミラー 36c で反射して転写レンズ 48 に入射する。転写マスク 47 のピンホールを透過したパルスレーザ光は転写レンズ 48 に入射する。転写レンズ 48 によって、転写マスク 47 のピンホールの縮小された転写像がウインドウ 42 を介して被加工物 41 の表面に転写される。転写レンズ 48 を透過したパルスレーザ光は、この転写像の領域の被加工物 41 の表面を照射する。こうしたパルスレーザ光のレーザ照射が、レーザ加工に必要な繰り返し周波数 f 及びパルス数 N で規定される発光トリガ T_r に従って行われる (S 145)。このレーザ照射により、被加工物 41 に対してピンホール形状の穴を形成するレーザ加工が施される。

[0062] 2. 3 課題

このような被加工物 41 に穴を形成するレーザ加工において、高アスペクト比の穴を形成したいという要望がある。高アスペクト比の穴とは、穴の直径に対して、穴の深さである加工深さが深い細長い穴を意味する。具体的には、高アスペクト比の穴とは、穴の直径が約 $10\ \mu\text{m}$ から約 $150\ \mu\text{m}$ に対して、加工深さが約 $1.5\ \text{mm}$ ($1500\ \mu\text{m}$) 以上ある穴である。ここでは、高アスペクト比を、 $1500\ \mu\text{m} / 150\ \mu\text{m} = 10$ 以上と定義する。

[0063] 上述した図 1 から図 3 に示す比較例に係るレーザ加工システム 2 においては、こうした高アスペクト比の穴加工の精度が低いという課題があった。比較例に係るレーザ加工システム 2 では、図 4 A に示すように、被加工物 41 は、被加工物 41 の表面と、パルスレーザ光 PL の転写像の転写位置 FP とが一致する状態で位置決めされる。この状態でレーザ照射が行われて、ウインドウ 42 を透過したパルスレーザ光 PL が、被加工物 41 に照射される。

[0064] パルスレーザ光 PL は、中心波長 $193.4\ \text{nm}$ の紫外線である ArF レーザ光であり、被加工物 41 は ArF レーザ光に対して透明な合成石英ガラスであるため、照射直後において、パルスレーザ光 PL は被加工物 41 を透過する。パルスレーザ光 PL の照射が継続されると、被加工物 41 の表面付近に欠陥が生じ、パルスレーザ光 PL の吸収が開始される。被加工物 41 において、パルスレーザ光 PL の吸収が開始された部分では、図 4 B に示すよ

うに、アブレーション加工が開始される。

[0065] 比較例に係るレーザ加工システム2では、図4Aに示すように、パルスレーザ光PLの転写像の転写位置FPと被加工物41の表面とが一致するため、被加工物41の表面においてはフルーエンス F_t が最大となる。そのため、図4Bに示すように、フルーエンス F_t が高い被加工物41の表面付近においてはアブレーション加工が進む。

[0066] しかしながら、フルーエンス F_t が $15\text{ J}/\text{cm}^2$ 以下の領域においては、転写位置で集光したパルスレーザ光は転写位置を通過すると発散するため、フルーエンス F_t も被加工物41の表面から深くなるほど減少する。そのため、比較例のレーザ加工システム2の加工方法では、Z軸方向と平行な深さ方向の穴Hの加工深さはせいぜい1mm程度にとどまっていた。また、1mm以上の加工深さが確保できた場合でも、加工精度が不十分であった。具体的には、穴Hの深い部分における加工直径が表面近くの加工直径と比較して著しく小さく、穴Hの深い部分における加工直径が要求される加工直径を満たさない先細形状の穴となってしまうなどである。このように、紫外線のパルスレーザ光を用いて、紫外線に対して透明な被加工物41に対してレーザ加工を施すレーザ加工方法においては、高アスペクト比の穴加工を精度よく行うことができないという課題があった。

[0067] 3. 第1実施形態のレーザ加工システム及びレーザ加工方法

3. 1 構成

図5は、第1実施形態に係るレーザ加工システム2Aの構成を概略的に示す。第1実施形態のレーザ加工システム2Aは、図1を参照しながら説明した比較例のレーザ加工システム2のレーザ加工装置4に代えて、レーザ加工装置4Aを備えている。第1実施形態の以下の説明においては、比較例のレーザ加工システム2との相違点を中心に説明し、同一の構成については同一の符号を付して説明を省略する。

[0068] 第1実施形態のレーザ加工装置4Aは、比較例のレーザ加工装置4と異なり、レーザ加工制御部32の代わりにレーザ加工制御部32Aを備えている

。レーザ加工装置 4 A のその他の構成については、比較例のレーザ加工装置 4 と同様である。

[0069] レーザ加工制御部 3 2 A において、比較例のレーザ加工制御部 3 2 と異なる点は、Z 軸方向におけるパルスレーザ光の転写位置と被加工物 4 1 との位置決め制御である。レーザ加工制御部 3 2 A は、被加工物 4 1 の Z 軸方向の位置について、パルスレーザ光の転写位置 F P と被加工物 4 1 の表面が一致する位置ではなく、パルスレーザ光の転写位置 F P を被加工物 4 1 の表面から所定の深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置に合わせる。その他の点については、レーザ加工制御部 3 2 A と同様である。

[0070] 上述したとおり、Z 軸方向の位置決めは、パルスレーザ光の光軸方向の位置決めに相当する。したがって、レーザ加工制御部 3 2 A は、位置決め機構である X Y Z ステージ 3 4 を制御することにより、パルスレーザ光の光軸方向において、転写位置と被加工物 4 1 との相対的な位置決めを行う位置決め制御部に相当する。

[0071] レーザ加工システム 2 A は、被加工物 4 1 に対して、加工直径が $10\ \mu\text{m}$ 以上 $150\ \mu\text{m}$ 以下の高アスペクト比の穴を加工する。そのため、レーザ加工装置 4 A は、転写位置におけるビームの直径が $10\ \mu\text{m}$ 以上 $150\ \mu\text{m}$ 以下のパルスレーザ光を被加工物 4 1 に対して照射する。転写位置におけるパルスレーザ光のビームの直径は、転写位置においては転写像の直径と一致する。レーザ加工装置 4 A においては、転写像の直径が $10\ \mu\text{m}$ 以上 $150\ \mu\text{m}$ 以下となるように、転写マスク 4 7 の転写パターンの大きさや、転写レンズ 4 8 の倍率 M が設定されている。

[0072] 3. 2 動作

図 6 を参照しながら、レーザ加工システム 2 A の動作を説明する。第 1 実施形態の図 6 のフローチャートと、比較例における図 2 のフローチャートと異なる点は、ステップ S 1 3 0 がステップ S 1 3 0 A に変更されている点であり、その他の点は同様である。レーザ加工制御部 3 2 A は、比較例と同様に S 1 0 0 から S 1 2 0 の処理を実行した後、S 1 3 0 A を実行する。

- [0073] S 1 3 0 Aにおいて、レーザ加工制御部 3 2 Aは、パルスレーザ光の転写像の転写位置が、被加工物 4 1 の表面から深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置となるように、X Y Z ステージ 3 4 を制御して、被加工物 4 1 の Z 軸方向の位置を調整する (S 1 3 0 A)。具体的には、位置データにおいて、被加工物 4 1 の Z 軸方向の位置は、パルスレーザ光の転写像の転写位置が、被加工物 4 1 の表面から深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置となるように規定されている。上述したとおり、転写像の転写位置は、転写マスク 4 7 と転写レンズ 4 8 間の距離と、転写レンズ 4 8 の焦点距離等に応じて決まる。
- [0074] S 1 3 0 Aにおいて、レーザ加工制御部 3 2 Aは、位置データに基づいて X Y Z ステージ 3 4 の移動量を制御することにより、被加工物 4 1 の Z 軸方向の位置を調整する。これにより、Z 軸方向と平行なパルスレーザ光の光軸方向において、転写像の転写位置が被加工物 4 1 の表面から深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置となるように、転写位置と被加工物 4 1 との相対的な位置決めが行われる。
- [0075] 被加工物 4 1 の位置決めが終了すると、レーザ加工が行われる (S 1 4 0)。S 1 4 0 から S 1 6 0 までの処理は、図 2 に示した比較例のレーザ加工システム 2 の処理と同様である。また、S 1 4 0 の処理内容についても、図 3 に示した比較例の処理と同様である。
- [0076] 本例においても、比較例で補足したとおり、複数の加工位置間で Z 軸方向の位置が同じ場合は、初期の加工位置において Z 軸方向の位置を調整するステップ S 1 3 0 A を実施した後は、それ以降の加工位置についてはステップ S 1 3 0 A を省略してもよい。この場合には、例えば、初期の加工位置の位置データをセットするステップ S 1 1 0 の後、まず Z 軸方向の位置を調整するステップ S 1 3 0 A を実施する。その後に、ステップ S 1 2 0 を実施して、初期の加工位置に関する X Y 平面の位置を調整して、ステップ S 1 4 0 を実施する。そして、次の加工位置についてステップ S 1 6 0 を実施した後は、ステップ S 1 2 0 のみを実施し、ステップ S 1 3 0 A を省略して、ステップ S 1 4 0 を実施する。

[0077] 3. 3 作用

図7は、第1実施形態のレーザ加工システム2Aを用いて、上述のレーザ加工方法の手順で、被加工物41に対してレーザ加工を施した場合の加工結果を示す写真である。被加工物41は可視光に対しても透明な合成石英ガラスであるため、図7の写真は、被加工物41の穴Hの加工完了後の状態をY軸方向から撮影したものである。図7の写真から、Z軸方向に細長い高アスペクト比の穴Hが形成されていることがわかる。

[0078] 図7に示す加工結果を得るための穴Hの加工条件は、次のとおりである。まず、被加工物41は、約6mm厚の合成石英ガラスである。パルスレーザ光は、上述のとおり、中心波長が約193.4nmの紫外線であるArFレーザ光である。繰り返し周波数fは1kHz、パルスレーザ光の照射時間は5secであり、照射パルス数は、 $1\text{ kHz} \times 5\text{ sec} = 5,000$ パルスである。転写位置におけるピンホール形状の転写像の直径は $100\mu\text{m}$ 、被加工物41の表面からの転写位置の深さ ΔZ_{sf} は1mm、フルエンスF_tは $11.7\text{ J}/\text{cm}^2$ である。こうした加工条件で、加工深さ ΔZ_d が約1.7mmで、被加工物41の表面、中間位置、最深部のそれぞれの直径が、 $110\mu\text{m}$ 、 $53\mu\text{m}$ 、 $45\mu\text{m}$ の高アスペクト比の穴加工が実現できた。

[0079] また、同様の加工条件で、照射パルス時間を10秒～15秒に増やした場合、すなわち、照射パルス数を10,000～15,000に増やした場合、後述する図11のグラフにも示すとおり、上記とほぼ同様の直径で、加工深さが3mm～4mmの高アスペクト比の穴加工が可能であることを実験により確認している。

[0080] 図8は、第1実施形態のレーザ加工システム2A及びレーザ加工方法を用いて、被加工物41に対してレーザ加工を施した場合の被加工物41の状態遷移を示す説明図である。第1実施形態に係るレーザ加工システム2Aでは、図8Aに示すように、パルスレーザ光PLの転写像の転写位置FPが、被加工物41の表面から深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置となるように位置決めされる。この状態でレーザ照射が行われて、ウインドウ42を透過し

たパルスレーザ光PLは、被加工物41に照射される。

[0081] パルスレーザ光PLは、中心波長が約193.4nmのArFレーザであり、被加工物41はArFレーザに対して透明な合成石英ガラスであるため、図8Aに示すように、照射直後において、パルスレーザ光PLは被加工物41を透過する。パルスレーザ光PLの照射が継続されると、図8Bに示すように、被加工物41の表面付近に欠陥DFが生じ、パルスレーザ光PLの吸収が開始される。

[0082] パルスレーザ光の照射が継続されると、パルスレーザ光PLの吸収を開始する被加工物41の表面付近では、パルスレーザ光の吸収率が増加して、図8Cに示すように、アブレーション加工が開始される。アブレーション加工が開始された後も、パルスレーザ光の一部は吸収されずに、被加工物41内部を透過する。このパルスレーザ光の透過光は、アブレーション加工が開始された後、ある時点から、図8Cに示すように、被加工物41の内部において発散することなく、自己収束して、Z軸方向と平行な深さ方向に進行する。そして、自己収束したパルスレーザ光は、深さ方向にアブレーション加工を進行させる。これにより、図8Dに示すように、穴Hの直径が約10 μ mから約150 μ mに対して、加工深さ ΔZ_d が1.5mm以上の高アスペクト比の穴Hの加工が施される。

[0083] このような高アスペクト比の穴Hが形成されるという加工結果から考えると、図8Cに示したとおり、被加工物41の内部においてパルスレーザ光が何らかの理由で自己収束していると考えられる。自己収束の理由としては、図8Cに示すとおり、被加工物41の内部においてパルスレーザ光が透過する光路に改質が生じて、深さ方向に細長く延びる改質層RFが生成されることが原因と考えられる。

[0084] 1つの仮説としては、この改質層RFは、パルスレーザ光の透過により他の部分と比較して屈折率が増大しており、それによって自己収束が生じていることが考えられる。もう1つの仮説としては、あたかも光ファイバ内を伝播する光のように、改質層RFと未改質部分との境界となる穴Hの内壁面に

においてパルスレーザ光がフレネル反射を繰り返して深さ方向に進行することによって自己収束が生じていることが考えられる。

[0085] こうした自己収束の理由はともかく、上述した加工条件で、被加工物 4 1 にレーザ加工を行ったところ、高アスペクト比の穴加工を精度よく行うことが確認できた。

[0086] 3. 4 好ましい加工条件

紫外線のパルスレーザ光を使用する場合は、パルス幅が半値全幅で、 $1\text{ ns} \sim 100\text{ ns}$ のナノ秒オーダのパルスレーザ光を使用することが望まれる。というのも、パルス幅はレーザ装置 3 の性能によって決まるが、現時点においては、紫外線のパルスレーザ光として、パルス幅がピコ秒オーダで高いパルスエネルギーのパルスレーザ光を出力できるレーザ装置 3 を製造することが難しいためである。本例のように、ナノ秒オーダの紫外線のパルスレーザ光を使用することで、現時点において容易に入手可能なレーザ装置 3 を使用することができる。

[0087] 好ましいパルス幅としては、半値全幅で $1\text{ ns} \sim 100\text{ ns}$ であり、さらに好ましくは、 $10\text{ ns} \sim 20\text{ ns}$ である。レーザ装置 3 としては、こうしたパルス幅のパルスレーザ光を出力するレーザ装置 3 を使用することが好ましい。

[0088] こうしたナノ秒オーダの紫外線のパルスレーザ光を使用して、合成石英ガラスなどの紫外線に対して透明な透明材料である被加工物 4 1 に対して、高アスペクト比の穴を形成するレーザ加工を施す場合に適した加工条件は、以下のとおりである。

[0089] 図 9 に示すグラフは、転写位置におけるフルーエンス F_t と、加工深さ ΔZ_d との関係を示すグラフである。プロット点が菱形で、かつ、実線で示されている曲線は、転写位置の深さ ΔZ_{sf} が 1 mm の場合のグラフであり、プロット点が四角形で、かつ、破線で示されている曲線は、転写位置の深さ ΔZ_{sf} が 2 mm の場合のグラフである。どちらのグラフも、フルーエンス F_t を上げるほど加工深さ ΔZ_d が増加している。

[0090] また、図9のグラフにおいては、フルーエンス F_t が $3\text{ J}/\text{cm}^2$ 未満のデータは示されていないが、転写位置のフルーエンス F_t が $3\text{ J}/\text{cm}^2$ 未満であると加工深さ ΔZ_d が浅く、高アスペクト比の穴加工ができにくいことを確認している。これは、フルーエンス F_t が $3\text{ J}/\text{cm}^2$ に満たないと、エネルギーが小さすぎてアブレーション加工が生じにくく、加工が不完全になってしまうためと考えられる。

[0091] 図10は、フルーエンス F_t を $2\text{ J}/\text{cm}^2$ に設定して、被加工物41に対してレーザ加工を施した加工結果を示す写真である。図7と同様に撮影方向はY軸方向である。加工条件は、フルーエンス F_t を除いて、図7の加工結果と同じ加工条件である。図10において、横方向に延びる白い破線は、被加工物41の表面の位置を示す。図10に示すように、フルーエンス F_t が $2\text{ J}/\text{cm}^2$ では、被加工物41の表面において僅かに穴が形成されるが、深さ方向に加工が進んでおらず、穴加工が不完全な様子が確認できる。

[0092] 図11に示すグラフは、照射時間と、加工深さ ΔZ_d との関係を示すグラフである。プロット点が菱形で、かつ、実線で示されている曲線は、フルーエンス F_t が $9.3\text{ J}/\text{cm}^2$ で、かつ、転写位置の深さ ΔZ_{sf} が 1 mm の場合のグラフである。プロット点が四角形で、かつ、破線で示されている曲線は、フルーエンス F_t が $4.7\text{ J}/\text{cm}^2$ で、かつ、転写位置の深さ ΔZ_{sf} が 2 mm の場合のグラフである。

[0093] 繰り返し周波数 f はどちらのグラフも 1 kHz である。図11の横軸の照射時間は単位が秒(sec)であるので、繰り返し周波数 $f \times$ 照射時間(秒)＝照射パルス数となり、例えば、照射時間が5秒の場合は、照射パルス数は5,000である。

[0094] 図11において、加工深さ ΔZ_d が飽和する飽和点について実線と破線のグラフを比較すると、フルーエンス F_t が相対的に低い破線のグラフの飽和点が約 10 sec であるのに対して、フルーエンス F_t が相対的に高い実線のグラフの飽和点は約 30 sec である。図11のグラフからは、フルーエンス F_t が高い方が、照射時間に対して飽和が遅くなり、加工深さ ΔZ_d を

深くすることが確認できる。

[0095] また、図 1 1 において、照射時間が約 3 秒、すなわち、繰り返し周波数 f が 1 k H z であることを前提とすると、照射パルス数が約 3, 0 0 0 までは、実線及び破線のどちらのグラフも重なっている。そのため、この範囲では、加工深さ $\Delta Z d$ は、フルーエンス $F t$ に依存していないことがわかる。このことから、照射パルス数が約 3, 0 0 0 までの範囲では、パルスレーザ光の自己収束が開始されていないと考えられる。そのため、照射パルス数は 3, 0 0 0 パルス以上あることが好ましい。照射パルス数の上限としては、加工深さ $\Delta Z d$ の飽和点に到達する照射パルス数である 3 5, 0 0 0 であることが好ましい。なお、図 1 1 では、繰り返し周波数 f が 1 k H z での結果を示しているが、繰り返し周波数 f が 1 0 0 H z の場合においても、照射パルス数で比較すると加工深さ $\Delta Z d$ が飽和する飽和点は略同じとなる。そのため、照射パルス数と加工深さ $\Delta Z d$ の関係に対しては、繰り返し周波数 f の依存は少ない。

[0096] 図 1 2 は、転写位置の深さ $\Delta Z s f$ と加工深さ $\Delta Z d$ の関係を示すグラフである。図 1 1 において、プロット点が菱形で、かつ、実線で示されている曲線は、図 1 1 に示す実線のグラフと同様に、フルーエンス $F t$ が 9. 3 J / c m² の場合のグラフであり、プロット点が四角形で、かつ、破線で示されている曲線は、図 1 1 に示す破線のグラフと同様に、フルーエンス $F t$ が 4. 7 J / c m² の場合のグラフである。どちらのグラフも、繰り返し周波数 f は 1 k H z で、照射時間は 1 0 秒である。

[0097] 図 1 2 において、フルーエンス $F t$ が相対的に低い破線のグラフでは、転写位置の深さ $\Delta Z s f$ が約 2. 5 m m までは、転写位置の深さ $\Delta Z s f$ が深いほど、加工深さ $\Delta Z d$ も増加している。これは、約 2. 5 m m までは、フルーエンス $F t$ が最大となる転写位置が被加工物 4 1 の表面から深くなるため、被加工物 4 1 の深い部分におけるパルスレーザ光のエネルギーが大きくなり深さ方向に加工が進むためと考えられる。

[0098] 一方、約 2. 5 m m を超えると、転写位置の深さ $\Delta Z s f$ が深くなっても

、加工深さ ΔZ_d は単調に低下する傾向になり、深さ ΔZ_{sf} が4 mmを超えると、加工深さ ΔZ_d が1 mmを大きく割り込む。これは、深さ ΔZ_{sf} が約2.5 mmを超えると、被加工物41の表面付近のフルーエンス F_t が不足して、表面付近のアブレーション加工が進まず、その結果、深さ方向にもアブレーション加工が進行しなくなるためと考えられる。

[0099] また、図12において、フルーエンス F_t が相対的に高い実線のグラフでは、転写位置の深さ ΔZ_{sf} が約0.5 mmから約3.5 mmの間では、加工深さ ΔZ_d が2 mm以上となっている。この範囲においては、フルーエンス F_t が最大となる転写位置が被加工物41の表面から深くなるため、被加工物41の深い部分におけるパルスレーザ光のエネルギーが大きくなり深さ方向にアブレーション加工が進むためと考えられる。

[0100] 一方、転写位置の深さ ΔZ_{sf} が約3.5 mmを超えると、転写位置の深さ ΔZ_{sf} が単調に低下する傾向になり、深さ ΔZ_{sf} が4 mmを超えると、加工深さ ΔZ_d が1 mmに近づく。

[0101] また、転写位置の深さ ΔZ_{sf} が0 mmから約0.5 mm近辺までの範囲では、加工深さ ΔZ_d については、2 mm以上の深さが確保できている。しかし、この範囲では、加工深さ ΔZ_d が確保できても、表面付近の加工直径に対して深い部分の加工直径が著しく細い先細形状の穴になってしまう場合が多く、加工精度が悪い。以上より、転写位置の深さ ΔZ_{sf} の好ましい範囲としては、0.5 mm以上4 mm以下の範囲であることが好ましい。

[0102] また、図12の実線と破線のグラフのそれぞれの加工深さ ΔZ_d のピーク値を比較すると、フルーエンス F_t が相対的に低い破線のグラフの方が、転写位置の深さ ΔZ_{sf} が深いところにピーク値がある。換言すれば、フルーエンス F_t が相対的に高い実線のグラフでは、フルーエンス F_t が相対的に低い破線のグラフと比較して、加工深さ ΔZ_d がピーク値を示す転写位置の深さ ΔZ_{sf} が被加工物41の表面付近にシフトしている。

[0103] また、図9において示したように被加工物41に対するレーザ加工に必要なフルーエンス F_t の下限値は3 J/cm²である。こうした図9及び図12

に示す実験結果を考慮すると、転写位置の深さ ΔZ s fの範囲として0.5 mm以上4 mm以下の範囲が特に好ましいのは、フルーエンス F_t が3 J / cm²から15 J / cm²までの範囲においてであると考えられる。

[0104] 3. 5 その他

本例のように、ビームホモジナイザ46を用いると、パルスレーザ光の光強度が空間的に均一化されて転写マスク47に照射される。そのため、転写マスク47においてパルスレーザ光が照射される範囲内であれば、転写マスク47内のどの位置に転写パターンが形成されていても、転写パターンによって形成されるパルスレーザ光の転写像のフルーエンスは安定する。

[0105] また、転写マスク47としては、例えば複数のピンホールが形成されたものなど、複数の転写パターンが形成されたものを使用してもよい。このような転写マスク47を使用すれば複数の穴を同時に加工することが可能となる。この場合の転写レンズ48としては、少なくとも加工側がテレセントリックな転写光学系を使用することが好ましい。というのも、テレセントリックな光学系であれば、複数の転写パターンを透過するそれぞれのパルスレーザ光の光軸が平行になるため、被加工物41に照射されるそれぞれのパルスレーザ光が被加工物41の表面に対して垂直に入射する。その結果、被加工物41の表面に対して中心軸が略垂直な複数の穴を形成することができる。

[0106] また、本例では、XYZステージ34を制御して被加工物41を移動させることにより、パルスレーザ光の転写位置と被加工物41との相対的な位置決めを行っている。このように被加工物41を移動する代わりに、転写マスク47をパルスレーザ光の光軸方向に移動させることによって相対的な位置決めを行ってもよい。すなわち、転写マスク47をパルスレーザ光の光軸方向に移動させることは、転写レンズ48が転写する転写像の物体側の位置を、転写レンズ48に対して変化させることに他ならないので、転写像の転写位置も光軸方向に変化する。これにより、パルスレーザ光の転写位置と被加工物41との相対的な位置決めが可能となる。なお、この場合、転写レンズ48に対して転写マスク47を光軸方向に移動させると、転写像の大きさも

変化する。このような、転写マスク47の移動に起因する転写像の直径の変化が抑制されるように、転写マスク47のピンホールの直径を変化させてもよい。

[0107] また、本例のように、転写光学系を用いてピンホール形状の転写像を被加工物41に転写する場合には、後述する第2実施形態のようにパルスレーザー光を単に集光して被加工物41に照射する場合と比較して、ビームの直径の変化が抑制されるというメリットがある。レーザー装置3が出力するパルスレーザー光のビームは、レーザー装置3の光共振器などの状態でモードが変化してビームの直径が変化する。これに対して、転写光学系を用いる場合は、パルスレーザー光のビームをそのまま被加工物41に照射するのではなく、転写マスク47でパルスレーザー光のピンホール形状の転写像を形成して、形成した転写像を被加工物41に転写する。そのため、パルスレーザー光のモード変化に起因するビームの直径の変化が抑制される。

[0108] また、本例では、レーザー装置3として、レーザー媒質としてArFレーザーガスを使用し、中心波長約193.4nmのパルスレーザー光を出力するArFエキシマレーザー装置を例に説明したが、他のレーザー装置でもよい。レーザー装置3としては、レーザー媒質としてKrFレーザーガスを使用し、中心波長が約248.4nmのパルスレーザー光を出力するKrFエキシマレーザー装置を使用してもよい。被加工物41として合成石英ガラスを使用する場合には、パルスレーザー光の中心波長の範囲は、F₂レーザーの中心波長である約157.6nmからKrFレーザーの中心波長である248.4nmの範囲であることが好ましい。

[0109] 被加工物41として合成石英ガラスを例にしたが、合成石英ガラスに限定されるものではなく、被加工物41としては、紫外線のパルスレーザー光に対して透明な透明材料であればよい。たとえば、紫外線のパルスレーザー光に対して透明な透明材料としては、MgF₂結晶、CaF₂結晶、サファイヤ等がある。

[0110] 4. 第2実施形態のレーザー加工システム及びレーザー加工方法

4. 1 構成

図 1 3 は、第 2 実施形態のレーザ加工システム 2 B を示す。図 1 3 に示すように、第 2 実施形態のレーザ加工システム 2 B は、レーザ装置 3 と、レーザ加工装置 4 B とを備えている。レーザ装置 3 は、第 1 実施形態と同様である。レーザ加工装置 4 B は、第 1 実施形態のレーザ加工装置 4 A の光学システム 3 6 に変えて、光学システム 6 1 を備えている。光学システム 6 1 は、第 1 実施形態の光学システム 3 6 のように転写マスク 4 7 や転写レンズ 4 8 を備えておらず、レーザ装置 3 が出力するガウシアン分布を持つパルスレーザ光のビームをそのまま集光して被加工物 4 1 に照射する集光光学系を備えた光学システムである。

[0111] レーザ加工制御部 3 2 B は、第 1 実施形態のレーザ加工制御部 3 2 A のようにパルスレーザ光の転写位置と被加工物 4 1 との相対的な位置決めを行う代わりに、パルスレーザ光のビームウエスト位置と被加工物 4 1 との相対的な位置決めを行う。レーザ加工システム 2 B のそれ以外の構成は、第 1 実施形態のレーザ加工システム 2 A と同様であるので、以下、相違点を中心に説明する。

[0112] 光学システム 6 1 は、高反射ミラー 3 6 a から 3 6 c と、アッテネータ 5 2 と、集光レンズ 6 2 とを備えている。高反射ミラー 3 6 a から 3 6 c 及びアッテネータ 5 2 は、第 1 実施形態の光学システム 3 6 と同様である。高反射ミラー 3 6 c は、パルスレーザ光を集光レンズ 6 2 に向けて反射する。

[0113] 集光レンズ 6 2 は、入射したパルスレーザ光を、ウインドウ 4 2 を介して被加工物 4 1 に集光するように配置される。

[0114] また、第 2 実施形態のレーザ加工システム 2 B も、第 1 実施形態のレーザ加工システム 2 A と同様に、被加工物 4 1 に対して、加工直径が $10\ \mu\text{m}$ 以上 $150\ \mu\text{m}$ 以下の高アスペクト比の穴を加工する。そのため、レーザ加工システム 2 B も、ビームウエスト位置におけるビームの直径が $10\ \mu\text{m}$ 以上 $150\ \mu\text{m}$ 以下のパルスレーザ光を被加工物 4 1 に照射する。ビームウエスト位置におけるパルスレーザ光のビームの直径は、パルスレーザ光のビーム

ウエスト位置における、後述する集光径Dと一致する。

[0115] レーザ加工システム2Bの場合は、レーザ加工システム2Aと異なり、ガウシアン分布のパルスレーザ光を、転写像に変換することなく被加工物41に照射する。そのため、パルスレーザ光のビームの直径は、レーザ装置3の仕様によって決まる。

[0116] 4. 2 動作

図14及び図15を参照しながら、レーザ加工システム2Bの動作を説明する。第2実施形態の図14のフローチャートと、第1実施形態の図6のフローチャートと異なる点は、ステップS130AがステップS130Bに変更されている点と、ステップS140がS140Bに変更されている点であり、その他の点は同様である。レーザ加工制御部32Bは、S100からS120を実行した後、S130Bを実行する。

[0117] S130Bにおいて、レーザ加工制御部32Bは、パルスレーザ光のビームウエスト位置が、被加工物41の表面から深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置となるように、XYZステージ34を制御して、被加工物41のZ軸方向の位置を調整する(S130B)。具体的には、位置データにおいて、被加工物41のZ軸方向の位置は、パルスレーザ光のビームウエスト位置が、被加工物41の表面から深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置となるように規定されている。

[0118] S130Bにおいて、レーザ加工制御部32Bは、位置データに基づいてXYZステージ34の移動量を制御することにより、被加工物41のZ軸方向の位置を調整する。これにより、Z軸方向と平行なパルスレーザ光の光軸方向において、ビームウエスト位置が被加工物41の表面から深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置となるように、被加工物41とビームウエスト位置との相対的な位置決めが行われる。

[0119] 被加工物41の位置決めが終了すると、レーザ加工が行われる(S140B)。S140Bのレーザ加工後のS150からS160までの処理は、第1実施形態と同様に、図2に示した比較例に係るレーザ加工システム2の処

理と同様である。

[0120] 図15は、レーザ加工を行うS140Bのフローチャートである。S140Bの処理は、基本的には、図3の比較例に係るフローチャートと同様であるが、S144の代わりにS144Bの処理が実行される。第2実施形態においては、パルスレーザ光のビームウエスト位置と被加工物41の相対的な位置決めを行う。そのため、S144Bにおけるアッテネータ52の透過率Tは、パルスレーザ光のビームウエストにおけるフルーエンスがF_tとなるように設定される。

[0121] ここで、第2実施形態におけるフルーエンスF_tとは、レーザ加工に必要なフルーエンスであり、パルスレーザ光のビームウエスト位置における、パルスレーザ光のエネルギー密度である。光学システム36の光損失が無視できる場合は、フルーエンスF_tは、下記式(3)で定義される。

$$F_t = E_t \cdot T / S \text{ [mJ / cm}^2\text{]} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、Sは照射面積であり、パルスレーザ光のビームウエスト位置における集光直径をDとすると、 $S = \pi (D/2)^2 \text{ [cm}^2\text{]}$ となる。集光直径Dは、 $1/e^2$ 全幅であり、 $1/e^2$ 全幅は、光強度がピーク値に対して $1/e^2$ の値となる位置における直径である。Tは、アッテネータ52の透過率である。

したがって、第2実施形態のアッテネータ52の透過率Tは、光学システム36の光損失が無いとした場合、上記式(3)から、下記式(4)に基づいて求められる。

$$T = \pi (D/2)^2 (F_t / E_t) \dots\dots\dots (4)$$

[0122] 第2実施形態において、パルスレーザ光の波長、パルス幅、フルーエンスF_tの範囲、ΔZ_{s f}の範囲、照射パルス数などの加工条件は、第1実施形態と同様である。

[0123] 4. 3 作用

第2実施形態の場合も、ビームウエスト位置は、第1実施形態の転写位置と同様に、照射するパルスレーザ光のフルーエンスが最も高くなる位置であ

る。そのため、ビームウエスト位置を、被加工物 4 1 の表面から深さ ΔZ_s f だけ内部に進出した位置とすることで、第 1 実施形態と同様に、高アスペクト比の穴加工を精度よく行うことが可能となる。

[0124] 4. 4 レーザ加工装置の変形例

図 1 6 に示すレーザ加工装置 4 C は、図 1 3 に示す第 2 実施形態のレーザ加工装置 4 B の変形例である。レーザ加工装置 4 C は、レーザ加工装置 4 B の光学システム 6 1 に代えて、光学システム 7 1 を備えている。また、レーザ加工制御部 3 2 B に代えて、レーザ加工制御部 3 2 C を備えている。それ以外の構成は同様である。以下、相違点を中心に説明する。

[0125] 光学システム 7 1 は、光学システム 6 1 に波面調節器 7 2 を追加したものである。波面調節器 7 2 は、凹レンズ 7 2 a、凸レンズ 7 2 b 及び 1 軸ステージ 7 2 c を備えている。1 軸ステージ 7 2 c は、凹レンズ 7 2 a を保持し、凹レンズ 7 2 a を光軸方向に移動して、凹レンズ 7 2 a と凸レンズ 7 2 b との間隔を調節する。凹レンズ 7 2 a 及び凸レンズ 7 2 b は、高反射ミラー 3 6 c と集光レンズ 6 2 の間のパルスレーザ光の光路上に配置されている。高反射ミラー 3 6 c で反射したパルスレーザ光は、凹レンズ 7 2 a 及び凸レンズ 7 2 b を介して集光レンズ 6 2 に入射する。

[0126] 凹レンズ 7 2 a と凸レンズ 7 2 b の間隔を調節することにより、被加工物 4 1 に照射されるパルスレーザ光のビームウエスト位置を変更することができる。

[0127] レーザ加工制御部 3 2 C は、XYZ ステージ 3 4 を制御して、被加工物 4 1 の XY 平面の位置を調整する。一方、Z 軸方向における、パルスレーザ光のビームウエスト位置と被加工物 4 1 との相対的な位置については、XYZ ステージ 3 4 で被加工物 4 1 を移動する代わりに、波面調節器 7 2 の 1 軸ステージ 7 2 c を制御してビームウエストの Z 軸方向の位置を調整する。具体的には、レーザ加工制御部 3 2 C は、1 軸ステージ 7 2 c を制御して、凹レンズ 7 2 a と凸レンズ 7 2 b の間隔を調節することにより、パルスレーザ光の波面を変更することができる。このパルスレーザ光の波面を制御すること

によって、パルスレーザ光のビームウエスト位置が、被加工物 4 1 の表面から深さ ΔZ_{sf} だけ内部に進入した位置となるようにビームウエスト位置を調整する。

[0128] 5. レーザ装置の変形例

上記各実施形態において、レーザ装置は種々の変形が可能である。例えば、レーザ装置として、図 1 7 や図 1 8 に示すレーザ装置を使用してもよい。

[0129] 5. 1 変形例 1

図 1 7 に示す変形例 1 のレーザ装置 3 D は、第 1 実施形態のレーザ装置 3 に、増幅器 8 0 を追加したものであり、それ以外はほぼ同様である。増幅器 8 0 は、マスターオシレータ 1 0 とモニタモジュール 1 1 の間のパルスレーザ光の光路上に配置されている。増幅器 8 0 は、マスターオシレータ 1 0 から出力されたパルスレーザ光のエネルギーを増幅する増幅器である。

[0130] 増幅器 8 0 は、基本的な構成は、マスターオシレータ 1 0 と同様であり、マスターオシレータ 1 0 と同様に、レーザチャンバ 2 1、充電器 2 3、及びパルスパワーモジュール (PPM) 2 4 を備えている。

[0131] レーザ制御部 1 3 D は、レーザ加工制御部 3 2 A から受信した目標パルスエネルギー E_t のデータを受信すると、充電器 2 3 の充電電圧を制御してパルスエネルギーを制御する。

[0132] レーザ制御部 1 3 D は、レーザ加工制御部 3 2 A から発光トリガ T_r を受信すると、マスターオシレータ 1 0 をレーザ発振させる。加えて、マスターオシレータ 1 0 に同期して増幅器 8 0 が作動するように制御する。レーザ制御部 1 3 D は、マスターオシレータ 1 0 が出力するパルスレーザ光が、増幅器 8 0 のレーザチャンバ 2 1 内の放電空間に入射したときに放電が生じるように、増幅器 8 0 のパルスパワーモジュール 2 4 のスイッチ 2 4 a をオンする。その結果、増幅器 8 0 に入射したパルスレーザ光は、増幅器 8 0 において増幅発振する。

[0133] 増幅器 8 0 で増幅されて出力されたパルスレーザ光は、モニタモジュール 1 1 においてパルスエネルギーが計測される。レーザ制御部 1 3 D は、計測さ

れたパルスエネルギーの実測値がそれぞれ目標パルスエネルギー E_t に近づくように、増幅器 80 とマスターオシレータ 10 のそれぞれの充電器 23 の充電電圧を制御する。

[0134] シャッタ 12 が開くと、モニタモジュール 11 のビームスプリッタ 11a を透過したパルスレーザ光は、図 5 に示したレーザ加工装置 4A に入射する。

[0135] レーザ装置 3D のように、増幅器 80 を設けることで、パルスレーザ光のパルスエネルギーを高くすることができる。

[0136] 5. 2 変形例 2

レーザ加工システムにおいて、図 18 に示す変形例 2 のレーザ装置 3E を用いてもよい。レーザ装置 3E は、マスターオシレータ 83 と、増幅器 84 とを備えている。また、レーザ装置 3E は、モニタモジュール 11 の代わりにモニタモジュール 11E を備えている。

[0137] モニタモジュール 11E は、第 1 実施形態のモニタモジュール 11 の構成に加えて、波長モニタ 11c とビームスプリッタ 11d が追加されている。

[0138] モニタモジュール 11E において、ビームスプリッタ 11d は、ビームスプリッタ 11a の反射光路上であって、光センサ 11b との間に配置される。ビームスプリッタ 11d は、ビームスプリッタ 11a が反射する反射光の一部を反射して、残りを透過する。ビームスプリッタ 11d を透過した透過光は、光センサ 11b に入射し、ビームスプリッタ 11d を反射した反射光は波長モニタ 11c に入射する。

[0139] 波長モニタ 11c は、周知のエタロン分光器である。エタロン分光器は、例えば、拡散板と、エアギャップエタロンと、集光レンズと、ラインセンサとで構成される。エタロン分光器は、拡散板、エアギャップエタロンによって入射するレーザ光の干渉縞を発生させ、発生した干渉縞を集光レンズでラインセンサの受光面に結像させる。そして、ラインセンサに結像した干渉縞を計測することによって、レーザ光の波長 λ を計測する。

[0140] マスターオシレータ 83 は、固体レーザ装置であり、シード光を出力する

半導体レーザ 86 と、シード光を増幅するチタンサファイヤ増幅器 87 と、波長変換システム 88 とを備えている。

[0141] 半導体レーザ 86 は、シード光として、波長が 773.6 nm で連続発振するレーザ光である、CW (Continuous Wave) レーザ光を出力する分布帰還型の半導体レーザである。半導体レーザ 86 の温度設定を変更することによって、発振波長を変化させることができる。

[0142] チタンサファイヤ増幅器 87 は、チタンサファイヤ結晶（図示せず）と、ポンピング用パルスレーザ装置（図示せず）を含む。チタンサファイヤ結晶は、シード光の光路上に配置される。ポンピング用パルスレーザ装置は、YLF レーザの第 2 高調波光を出力するレーザ装置である。

[0143] 波長変換システム 88 は、第 4 高調波光を発生させる波長変換システムであって、LBO (LiB_3O_5) 結晶と、KBBF ($\text{KB}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{F}_2$) 結晶とを含んでいる。各結晶は、図示しない回転ステージ上に配置されており、各結晶に対するシード光の入射角度を変更できるように構成されている。

[0144] 増幅器 84 は、図 17 に示した増幅器 80 と同様に、1 対の電極 22a 及び 22b、レーザ媒質として ArF レーザガスを含むレーザチャンバ 21 と、パルスパワーモジュール 24 と、充電器 23 とを含んでいる。また、増幅器 84 は、増幅器 80 と異なり、出力結合ミラー 81 及びリアミラー 82 の代わりに、凸面ミラー 91 と、凹面ミラー 92 とを備えている。

[0145] 凸面ミラー 91 と凹面ミラー 92 は、マスターオシレータ 83 から出力されたパルスレーザ光が、凸面ミラー 91 及び凹面ミラー 92 で反射することにより、レーザチャンバ 21 の放電空間内を 3 パスしてビームが拡大するように配置されている。

[0146] レーザ制御部 13E は、レーザ加工制御部 32A から目標波長 λ_t と目標パルスエネルギー E_t を受信すると、マスターオシレータ 83 の固体レーザ制御部 89 に目標波長 λ_t を送信する。また、レーザ制御部 13E は、目標パルスエネルギーとなるように、増幅器 84 の充電器 23 の充電電圧を設定する。

- [0147] 固体レーザ制御部 89 は、レーザ制御部 13E から目標波長 λ_t を受信すると、波長変換システム 88 から出力されるシード光の波長が、目標波長 λ_t となるように、半導体レーザ 86 の発振波長 λ_{a1} を変更する。ここで、発振波長 λ_{a1} は、目標波長 λ_t の 4 倍、すなわち、 $\lambda_{a1} = 4 \lambda_t$ に設定される。目標波長 λ_t が 193.4 nm であるので、 λ_{a1} は、 $193.4 \times 4 = 773.6$ nm となる。ここで、ArF レーザガスをレーザ媒質とする増幅器 84 の増幅可能な波長範囲は、193.2 nm ~ 193.6 nm であるので、必要に応じて、目標波長 λ_t をこの波長範囲で変更してもよい。
- [0148] 波長変換システム 88 において、LBO 結晶と KBBF 結晶の波長変換効率が最大となるように、固体レーザ制御部 89 は、図示しない回転ステージを制御して、各結晶に対するレーザ光の入射角度を設定する。
- [0149] 固体レーザ制御部 89 は、レーザ制御部 13E から発光トリガ T_r が入力されると、チタンサファイヤ増幅器 87 のポンピング用パルスレーザ装置にトリガ信号を送信する。チタンサファイヤ増幅器 87 において、ポンピング用パルスレーザ装置はトリガ信号に基づいて、入力されたシード光である CW レーザ光をパルスレーザ光に変換して出力する。チタンサファイヤ増幅器 87 から出力されたパルスレーザ光は、波長変換システム 88 に入力される。波長変換システム 88 は、 λ_{a1} のパルスレーザ光を第 4 高調波である目標波長 λ_t のパルスレーザ光に波長変換して出力する。
- [0150] また、レーザ制御部 13E は、レーザ加工制御部 32A から発光トリガ T_r を受信すると、マスターオシレータ 83 から出力されたパルスレーザ光が増幅器 84 のレーザチャンバ 21 の放電空間に入射した時に放電するように、パルスパワーモジュール 24 のスイッチ 24a をオンする。
- [0151] その結果、マスターオシレータ 83 から増幅器 84 に入射したパルスレーザ光は、レーザチャンバ 21 において、凸面ミラー 91 及び凹面ミラー 92 の作用によって放電空間内を 3 パスして増幅される。また 3 パスすることによってパルスレーザ光のビームの直径が拡大される。
- [0152] 増幅されたパルスレーザ光は、モニタモジュール 11E によってサンプル

され、パルスエネルギーと波長の実測値が計測される。レーザ制御部 13E は、計測されたパルスエネルギーと目標パルスエネルギー E_t との差が 0 に近づくように、充電器 23 の充電電圧を制御する。さらに、レーザ制御部 13E は、計測された波長と目標波長 λ_t との差が 0 に近づくように、半導体レーザの発振波長 λ_{a1} を制御する。モニタモジュール 11E のビームスプリッタ 11a を透過したパルスレーザ光は、シャッタ 12 が開くと、レーザ加工装置に入射する。

[0153] マスターオシレータ 83 が固体レーザ装置の場合は、図 13 または図 16 に示すレーザ加工装置 4B またはレーザ加工装置 4C の光源として適用するのが好ましい。出力されるパルスレーザ光のビームがシングル横モードのガウシアンビームに近いために、ビームウエスト位置におけるビームの直径を回折限界近くまで小さくすることができる。

[0154] 本例において、増幅器 84 として、マルチパス増幅器の例を示したが、これに限定されることなく、例えば、ファブリペロ型の共振器や、リング型の共振器を備えた増幅器であってもよい。

[0155] また、本例において、マスターオシレータ 83 として固体レーザ装置を用い、固体レーザ装置と、レーザ媒質として ArF レーザガスを使用する増幅器 84 とを組み合わせ、レーザ装置 3E を構成した。

[0156] 増幅器 84 が KrF レーザガスをレーザ媒質とする増幅器の場合は、増幅可能な波長範囲は $248.1\text{ nm} \sim 248.7\text{ nm}$ である。この場合のレーザ装置としては、マスターオシレータ 83 が、上記増幅可能な波長範囲で波長を変化させることができる波長可変の固体レーザ装置を用いてもよいし、スペクトル線幅を狭帯域化する狭帯域化 KrF エキシマレーザ装置であってもよい。さらに、増幅器 84 が F_2 レーザガスをレーザ媒質とする増幅器の場合は、増幅可能な波長は 157.6 nm である。この場合のレーザ装置は、例えば、マスターオシレータ 83 がこの波長域で発振する固体レーザ装置が用いられる。以上のように、紫外線のパルスレーザ光を増幅する増幅器の観点から、紫外線のパルスレーザ光の波長は、 $157.6\text{ nm} \sim 248.7\text{ nm}$

mの範囲が好ましい。

[0157] 上記の説明は、制限ではなく単なる例示を意図したものである。従って、添付の特許請求の範囲を逸脱することなく本開示の各実施形態に変更を加えることができることは、当業者には明らかであろう。

[0158] 本明細書及び添付の特許請求の範囲全体で使用される用語は、「限定的でない」用語と解釈されるべきである。例えば、「含む」又は「含まれる」という用語は、「含まれるものとして記載されたものに限定されない」と解釈されるべきである。「有する」という用語は、「有するものとして記載されたものに限定されない」と解釈されるべきである。また、本明細書及び添付の特許請求の範囲に記載される修飾句「1つの」は、「少なくとも1つ」又は「1又はそれ以上」を意味すると解釈されるべきである。

請求の範囲

- [請求項1] 紫外線のパルスレーザ光を出力するレーザ装置と、前記パルスレーザ光を透過する転写パターンが形成された転写マスクと、前記パルスレーザ光が前記転写パターンを透過することによって形成され前記転写パターンに応じた形状の転写像を転写する転写光学系とを備えたレーザ加工システムを用いて、前記紫外線に対して透明な透明材料に対してレーザ加工を施すレーザ加工方法は、以下のステップを備える：
- A. 前記パルスレーザ光の光軸方向において、前記転写光学系によって転写される前記転写像の転写位置と、前記透明材料との相対的な位置決めを行う位置決めステップであって、前記転写位置が、前記光軸方向において前記透明材料の表面から所定の深さ ΔZ_{sf} だけ前記透明材料の内部に進入した位置となるように前記位置決めを行う位置決めステップ；及び
- B. パルス幅が $1\text{ ns} \sim 100\text{ ns}$ の範囲であって、かつ、前記転写位置でのビームの直径が $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上 $150\text{ }\mu\text{m}$ 以下の前記パルスレーザ光を前記透明材料に照射する照射ステップ。
- [請求項2] 請求項1に記載のレーザ加工方法であって、
- 前記透明材料は、合成石英ガラスであって、前記パルスレーザ光の波長は $157.6\text{ nm} \sim 248.7\text{ nm}$ である。
- [請求項3] 請求項2に記載のレーザ加工方法であって、
- 前記パルスレーザ光は、ArFレーザ光である。
- [請求項4] 請求項3に記載のレーザ加工方法であって、
- 前記深さ ΔZ_{sf} の範囲は、 0.5 mm 以上 4 mm 以下である。
- [請求項5] 請求項4に記載のレーザ加工方法であって、
- 前記パルスレーザ光の前記転写位置におけるフルエンスは、 3 J/cm^2 以上 15 J/cm^2 以下である。
- [請求項6] 請求項3に記載のレーザ加工方法であって、
- 前記パルスレーザ光の照射パルス数は、 $3,000$ パルス以上であ

る。

[請求項7] 請求項6に記載のレーザ加工方法であって、
前記照射パルス数は、35,000パルス以下である。

[請求項8] 紫外線のパルスレーザ光を出力するレーザ装置と、前記パルスレーザ光を集光する集光光学系とを備えたレーザ加工システムを用いて、前記紫外線に対して透明な透明材料に対してレーザ加工を施すレーザ加工方法は、以下のステップを備える：

A. 前記パルスレーザ光の光軸方向において、前記パルスレーザ光のビームウエスト位置と、前記透明材料との相対的な位置決めを行う位置決めステップであって、前記ビームウエスト位置が、前記光軸方向において前記透明材料の表面から所定の深さ ΔZsf だけ前記透明材料の内部に進入した位置となるように前記位置決めを行う位置決めステップ；及び

B. パルス幅が1ns～100nsの範囲であって、かつ、前記ビームウエスト位置でのビームの直径が10 μm 以上150 μm 以下の前記パルスレーザ光を前記透明材料に照射する照射ステップ。

[請求項9] 請求項8に記載のレーザ加工方法であって、
前記透明材料は、合成石英ガラスであって、前記パルスレーザ光の波長は157nm～248nmである。

[請求項10] 請求項9に記載のレーザ加工方法であって、
前記パルスレーザ光は、ArFレーザ光である。

[請求項11] 請求項10に記載のレーザ加工方法であって、
前記深さ ΔZsf の範囲は、0.5mm以上4mm以下である。

[請求項12] 請求項11に記載のレーザ加工方法であって、
前記パルスレーザ光の前記ビームウエスト置におけるフルーエンスは、3J/cm²以上15J/cm²以下である。

[請求項13] 請求項10に記載のレーザ加工方法であって、
前記パルスレーザ光の照射パルス数は、3,000パルス以上であ

る。

[請求項14] 請求項13に記載のレーザ加工方法であって、
前記照射パルス数は、35,000パルス以下である。

[請求項15] 紫外線に対して透明な透明材料に対して前記紫外線のパルスレーザ光を照射してレーザ加工を施すレーザ加工システムは、以下を備える：

A. パルス幅が1 ns～100 nsの範囲の前記パルスレーザ光を出力するレーザ装置；

B. 前記レーザ装置から出力される前記パルスレーザ光を透過する転写パターンが形成された転写マスク；

C. 前記パルスレーザ光が前記転写パターンを透過することによって形成され前記転写パターンに応じた形状の転写像を前記透明材料に転写する転写光学系；

D. 前記パルスレーザ光の光軸方向において、前記転写光学系によって転写される前記転写像の転写位置と、前記透明材料との相対的な位置決めを行う位置決め機構；及び

E. 前記転写位置が、前記光軸方向において前記透明材料の表面から所定の深さ ΔZ だけ前記透明材料の内部に進入した位置となるように、前記位置決め機構を制御して前記位置決めを行う位置決め制御部、

ここで、前記転写位置での前記パルスレーザ光のビームの直径は10 μ m以上150 μ m以下である。

[請求項16] 請求項15に記載のレーザ加工システムであって、
前記透明材料は、合成石英ガラスであって、前記パルスレーザ光の波長は157 nm～248 nmである。

[請求項17] 請求項16に記載のレーザ加工システムであって、
前記パルスレーザ光は、ArFレーザ光である。

[請求項18] 請求項17に記載のレーザ加工システムであって、

前記深さ ΔZ_{sf} の範囲は、0.5 mm 以上 4 mm 以下である。

[請求項19]

請求項 18 に記載のレーザ加工システムであって、

前記パルスレーザ光の前記転写位置におけるフルーエンスは、 $3 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上 $15 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以下である。

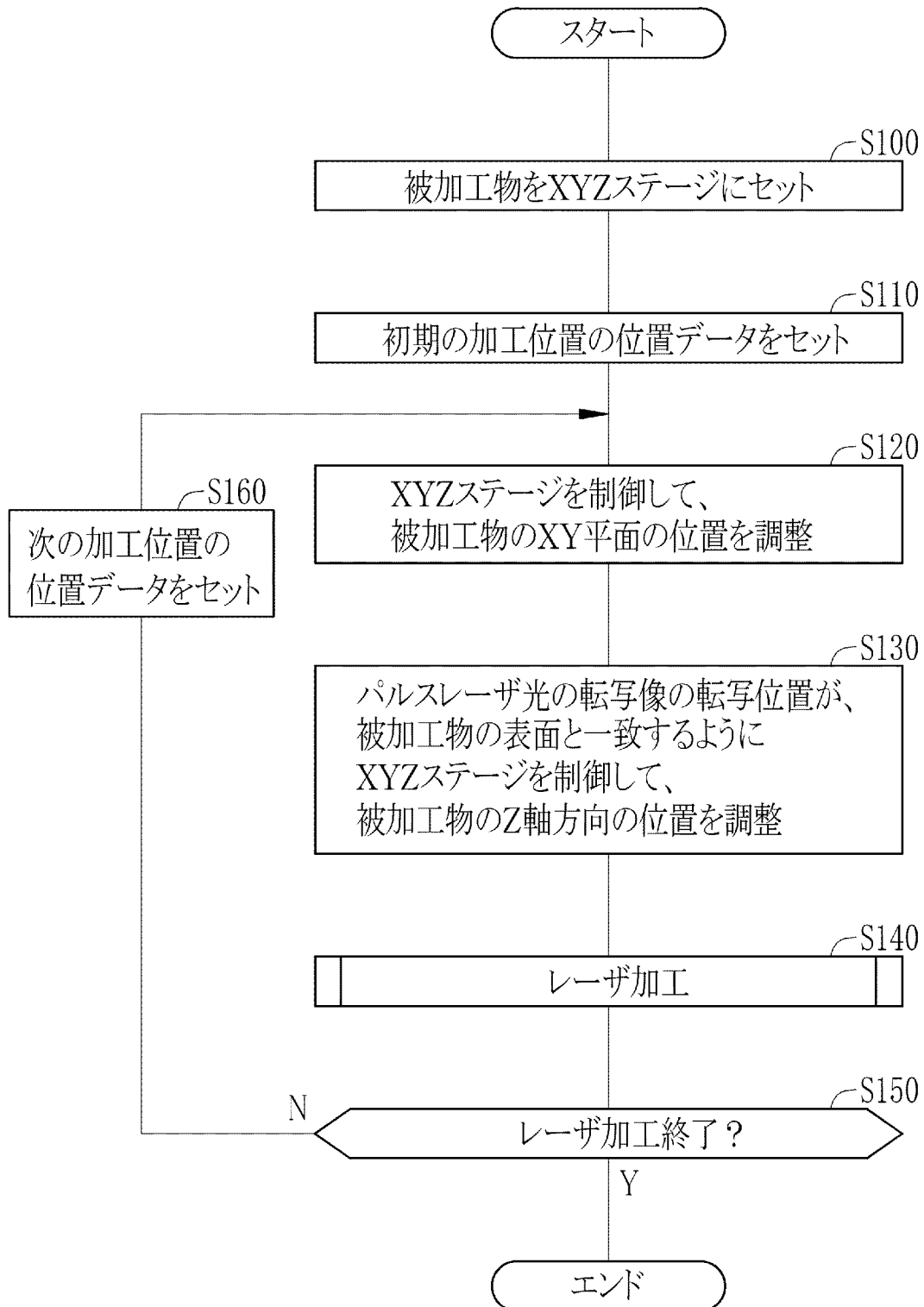
[請求項20]

請求項 18 に記載のレーザ加工システムであって、

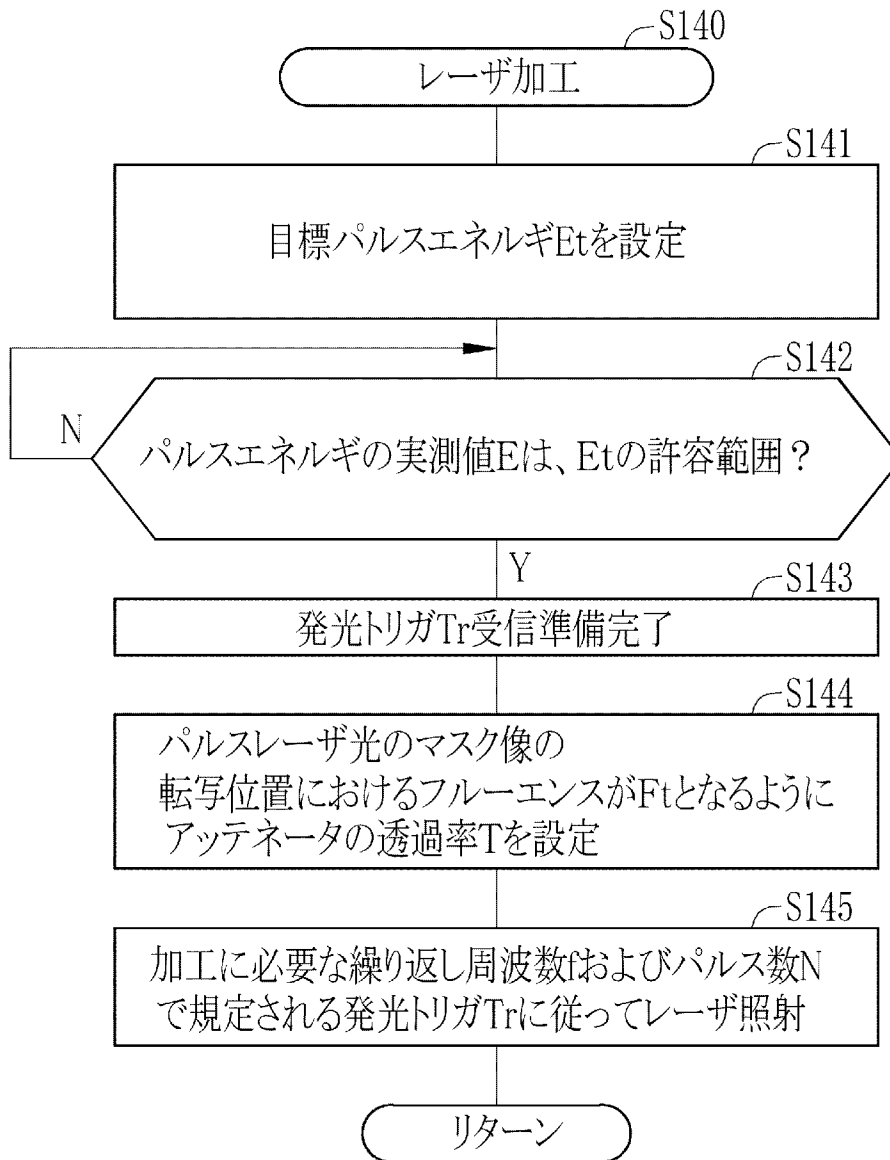
前記パルスレーザ光の照射パルス数は、3,000 パルス以上である。

[illegible]

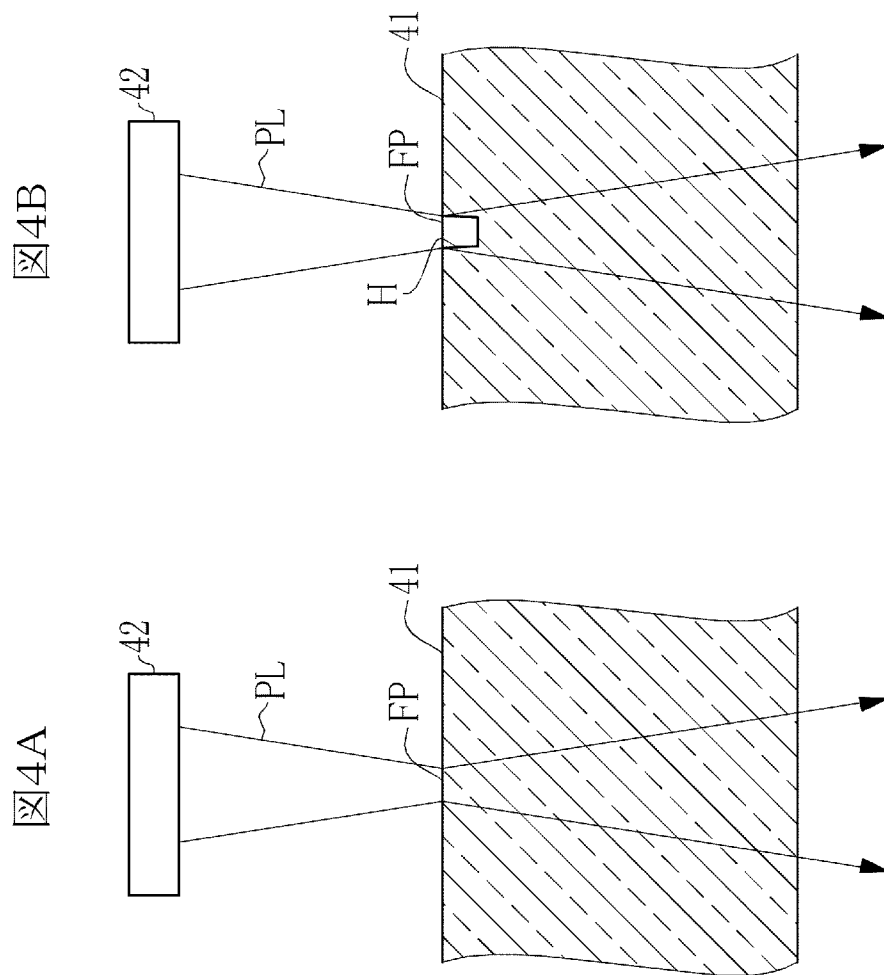
[図2]



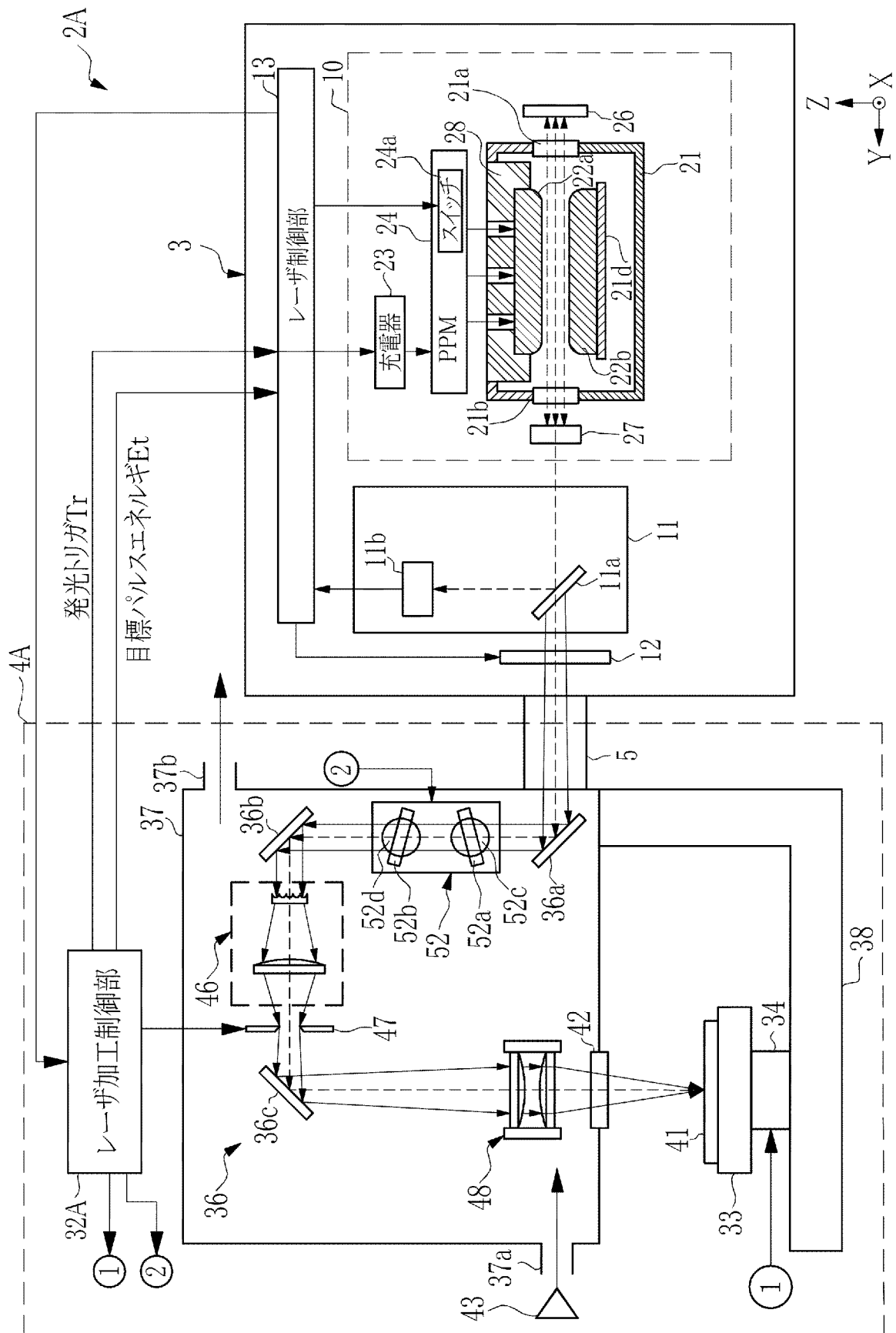
[図3]



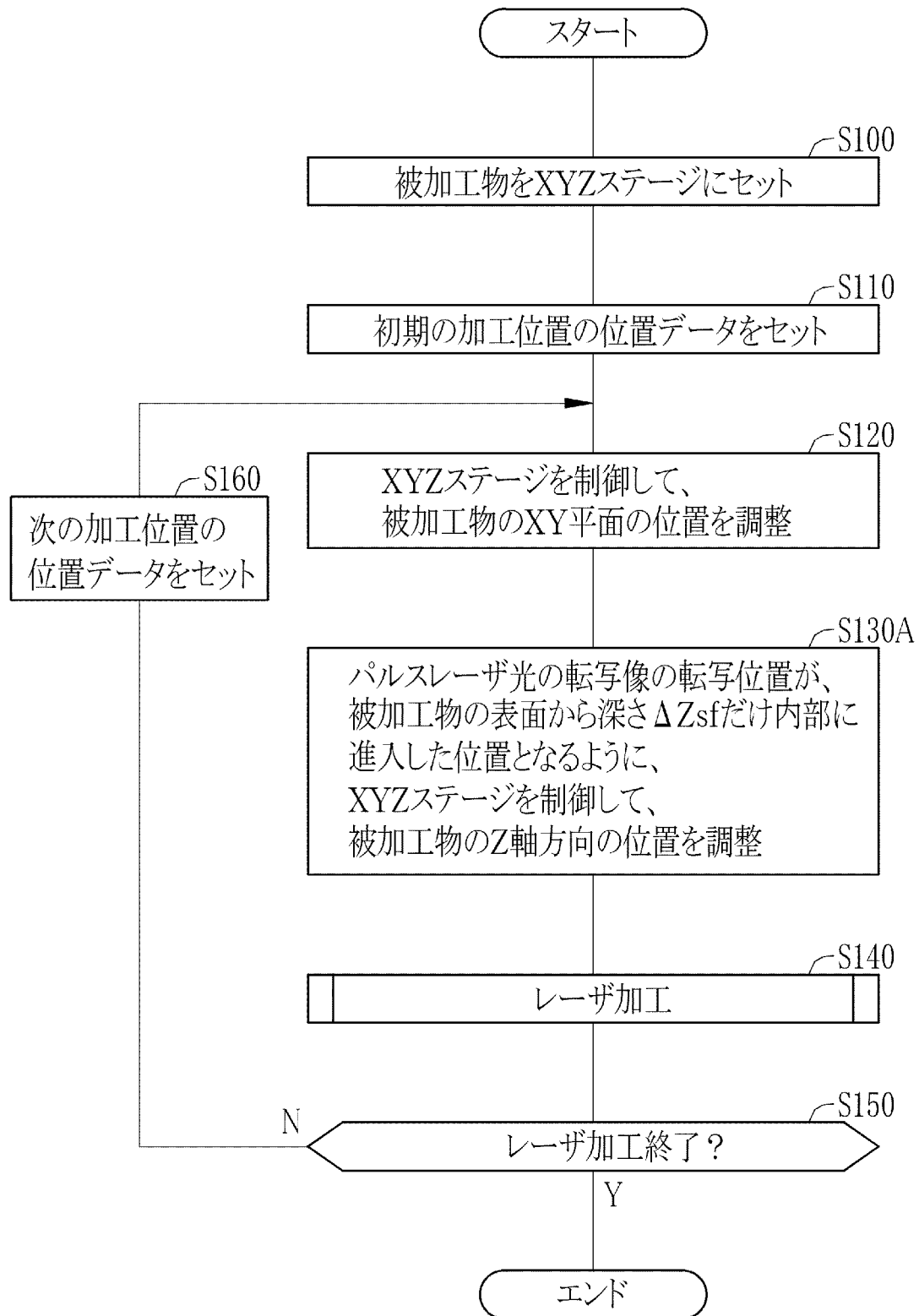
[図4]



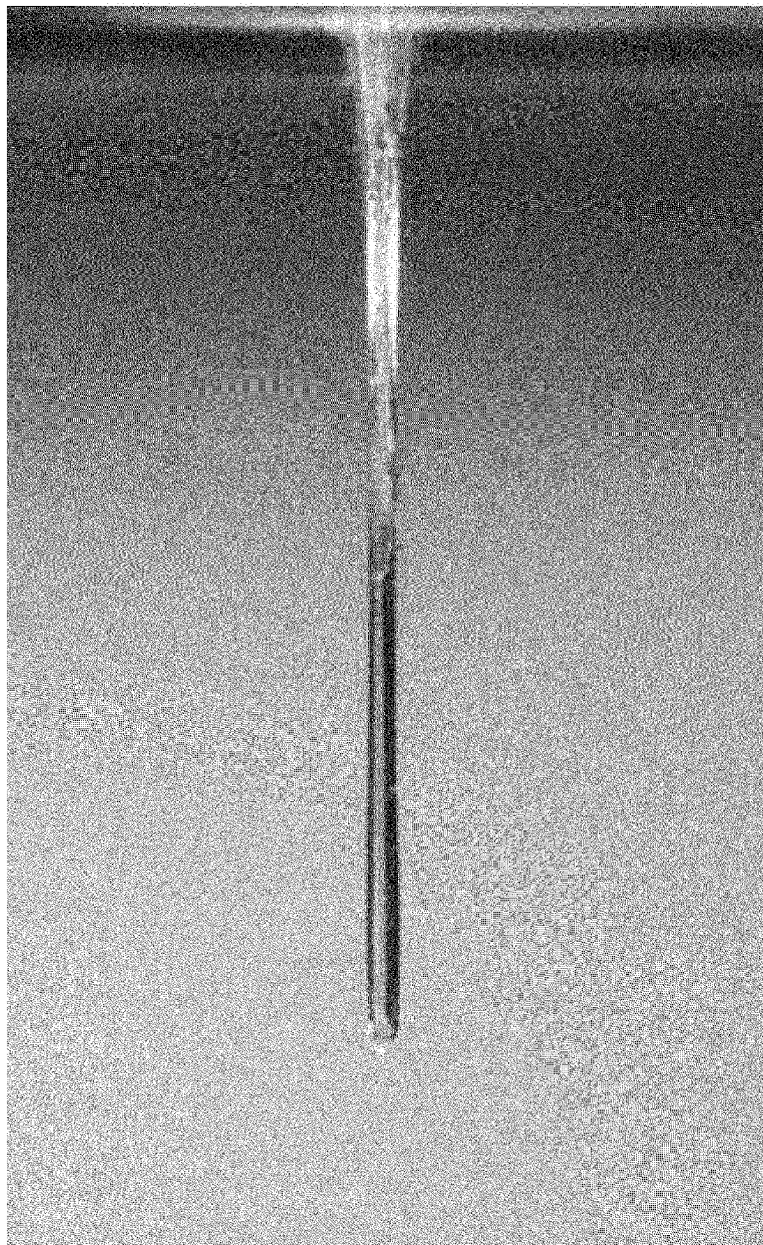
[図5]



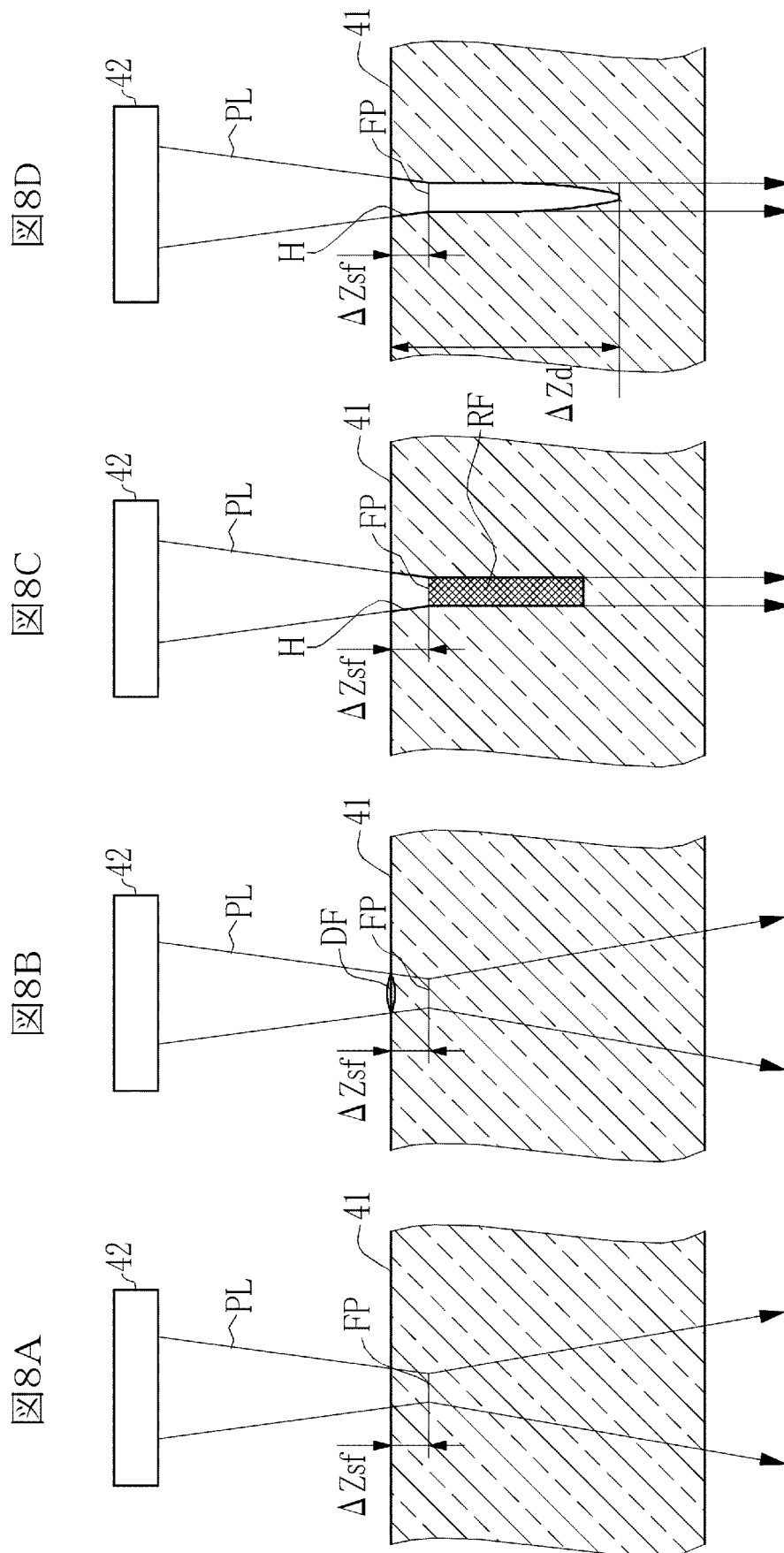
[図6]



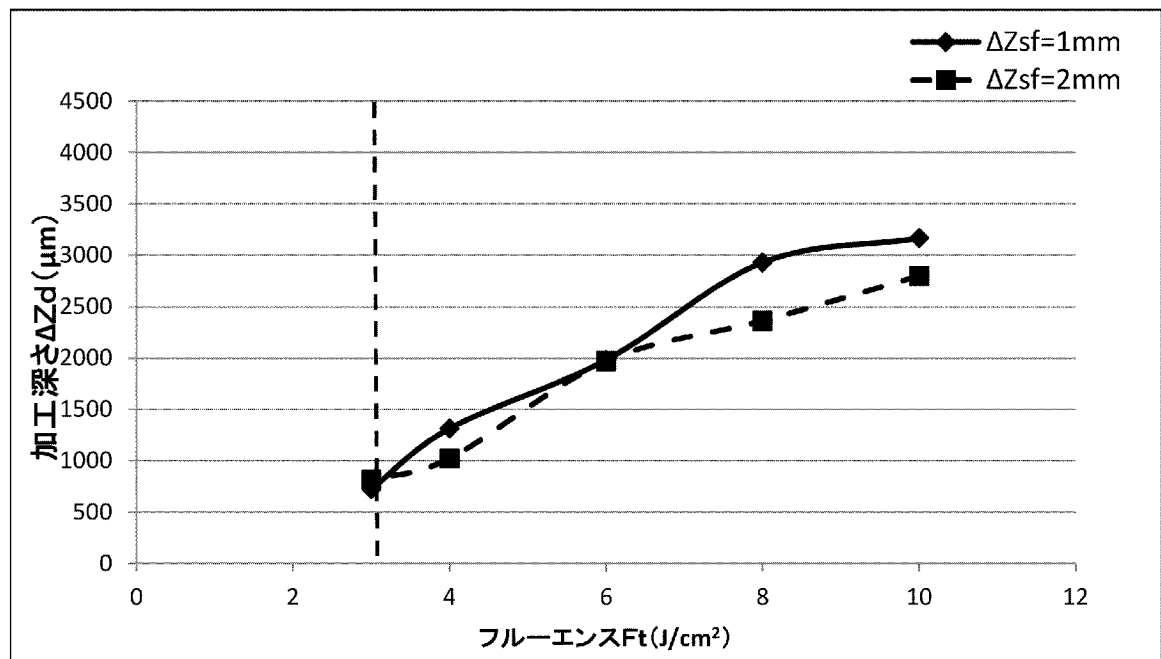
[図7]



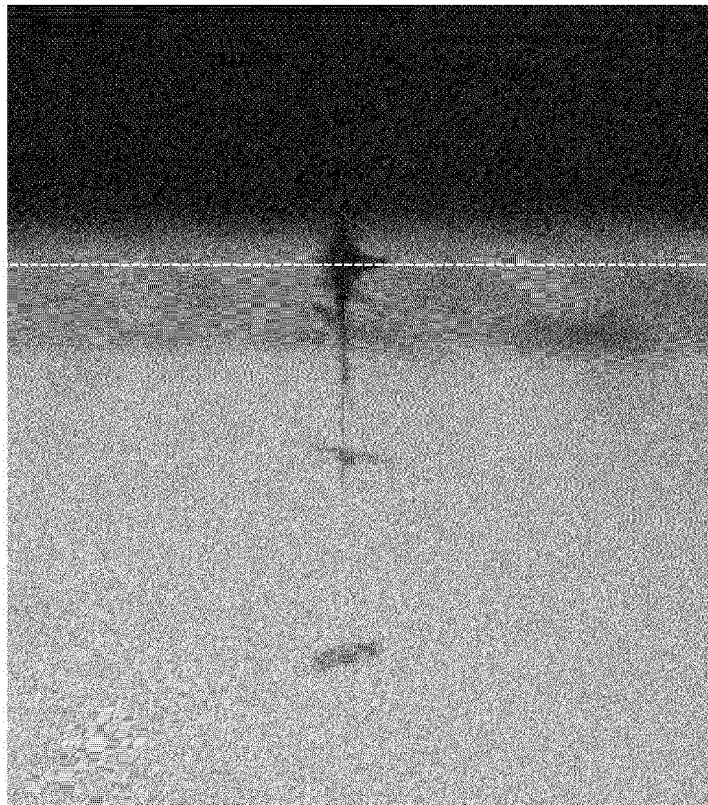
[図8]



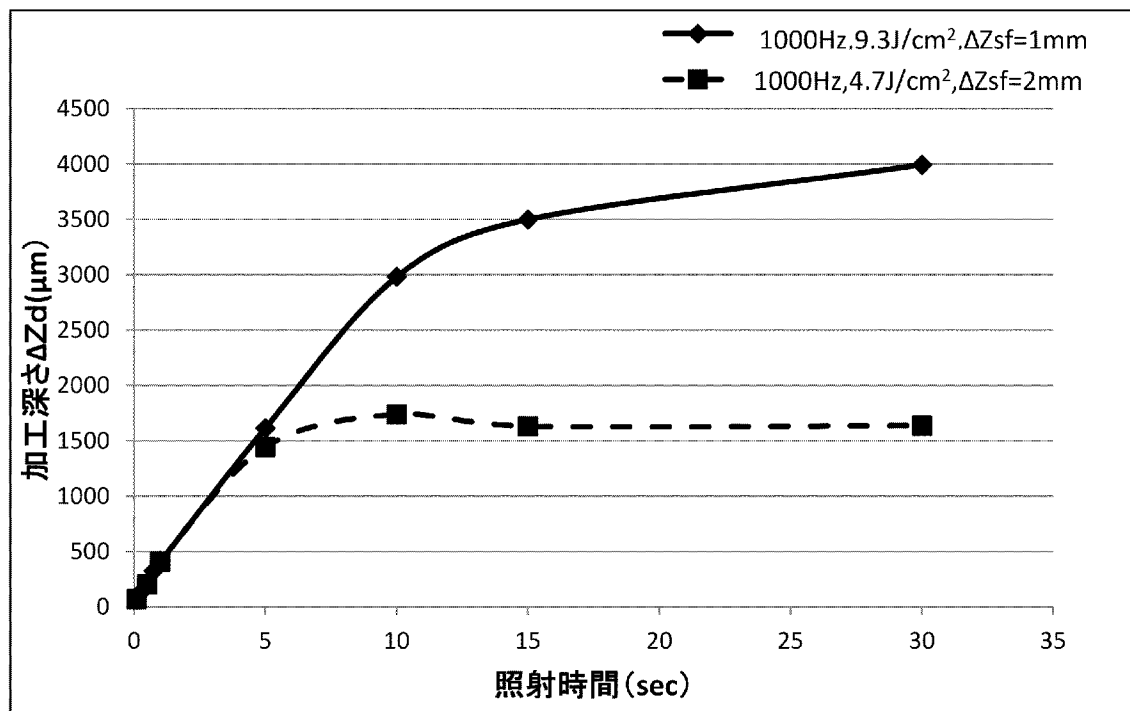
[図9]



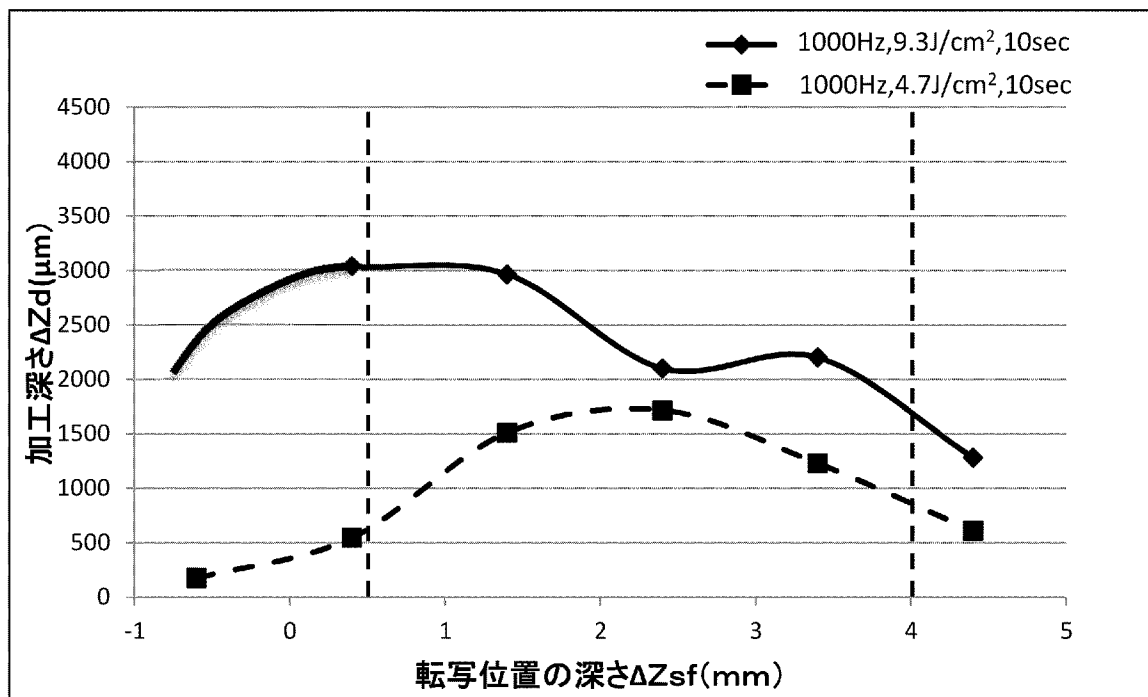
[図10]



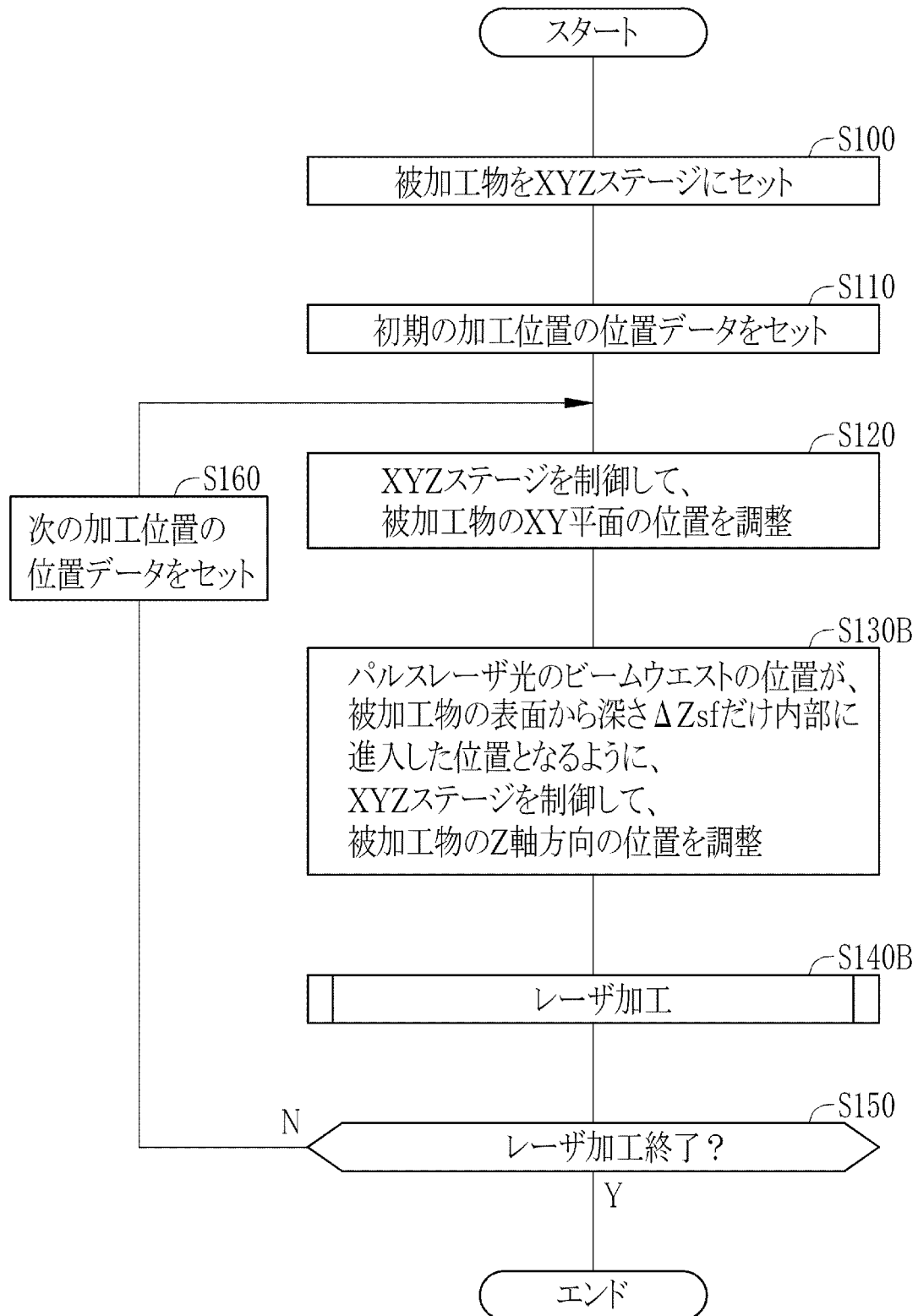
[図11]



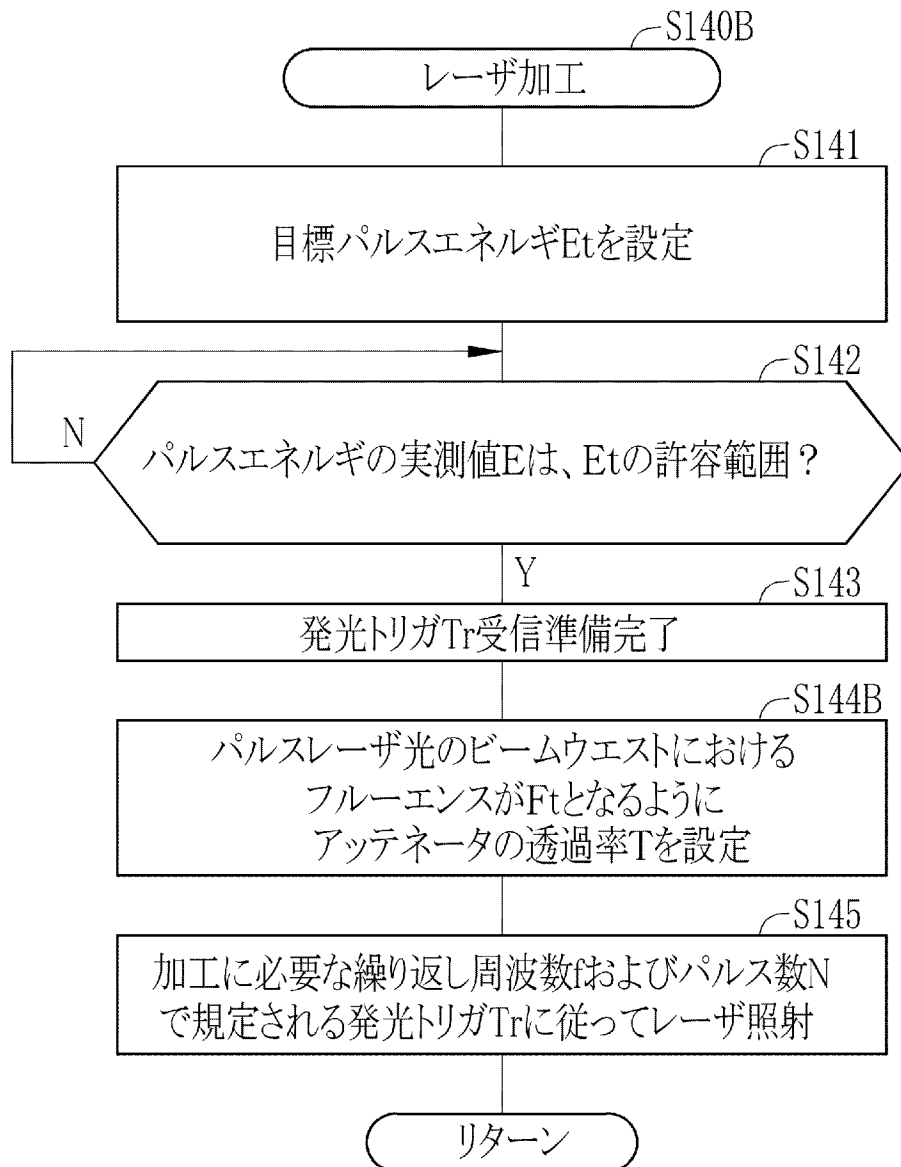
[図12]



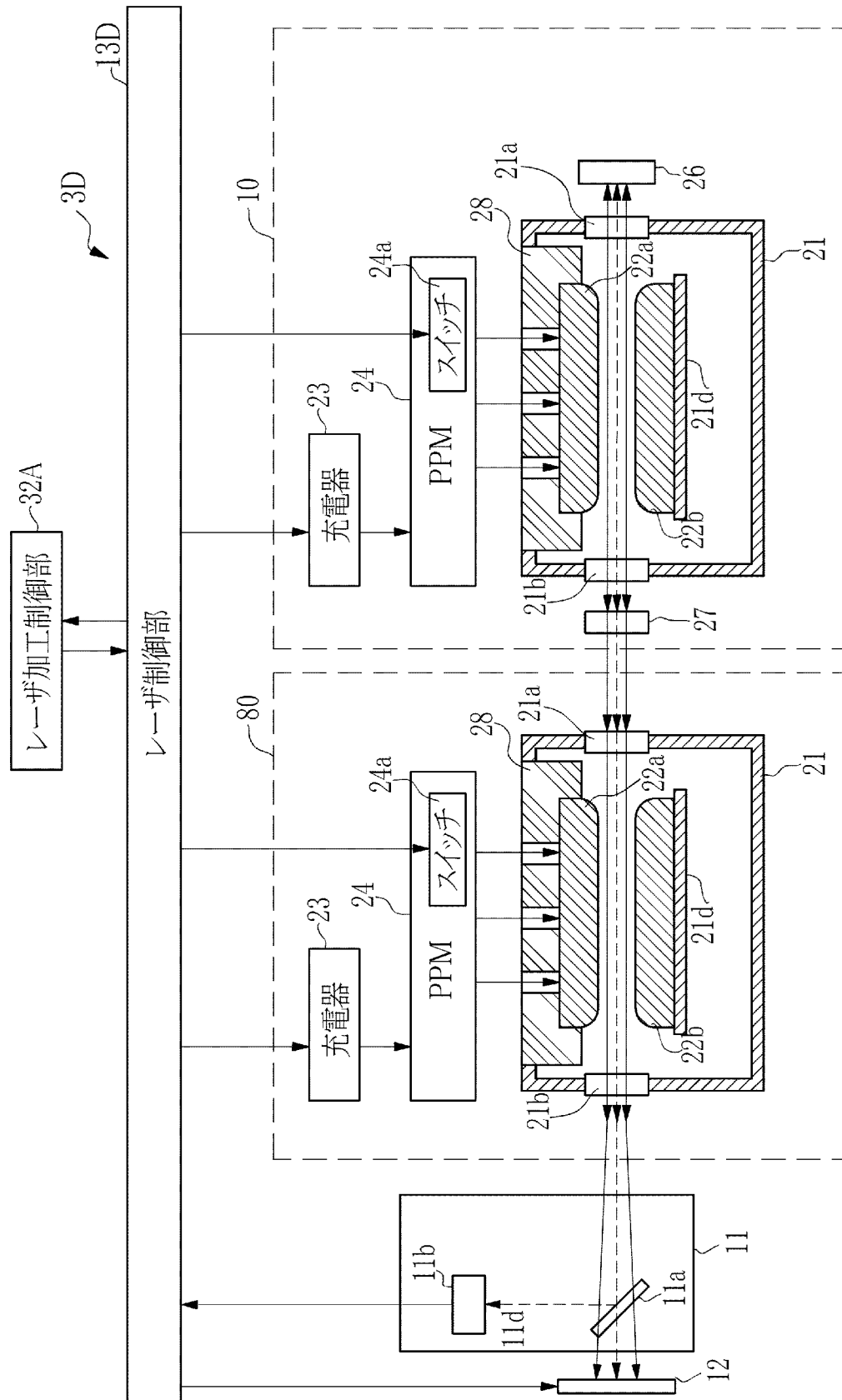
[図14]



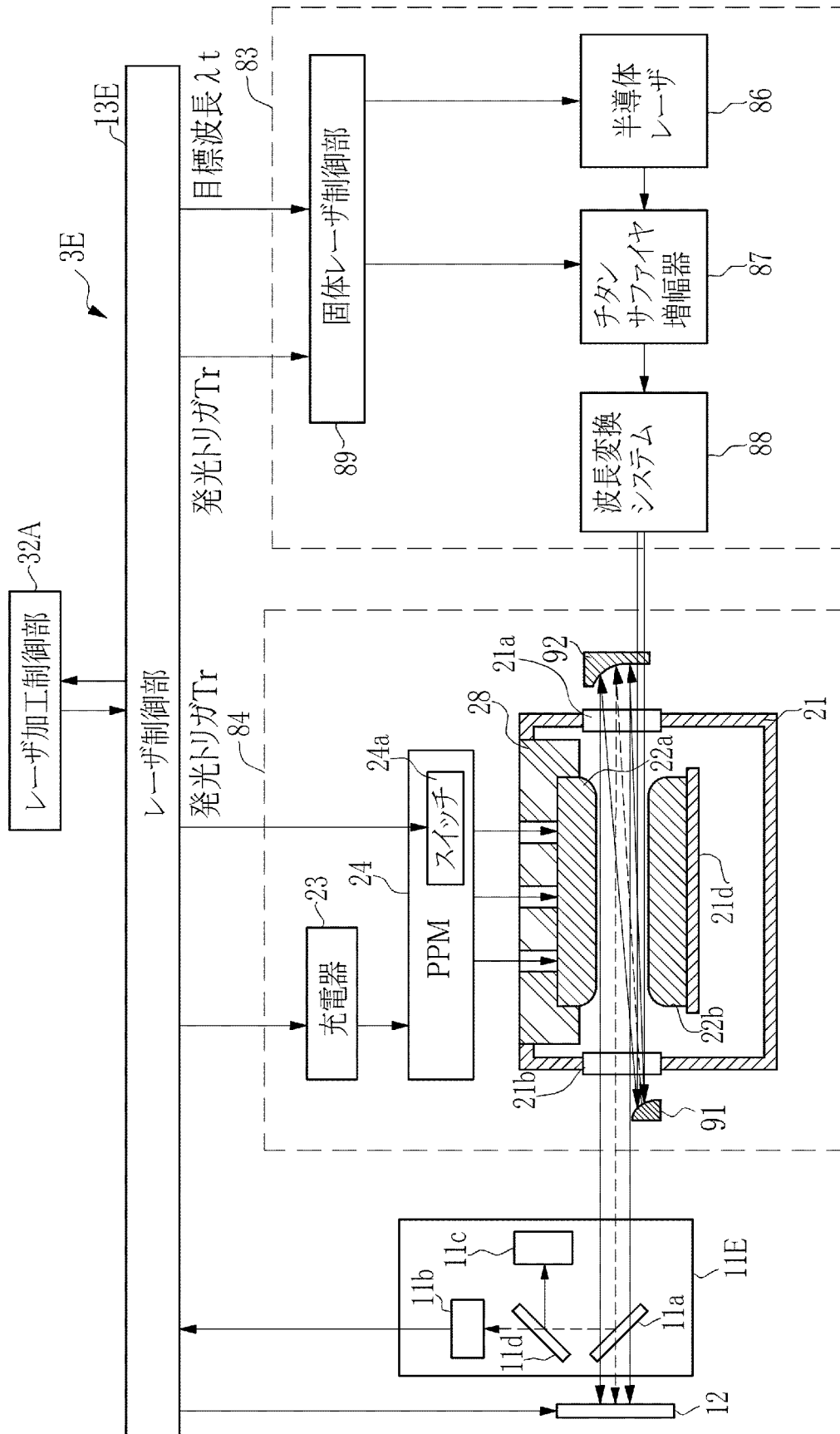
[図15]



[図17]



[図18]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/036130

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER Int. Cl. B23K26/02 (2014.01) i, B23K26/50 (2014.01) i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) Int. Cl. B23K26/02, B23K26/50 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2017 Registered utility model specifications of Japan 1996-2017 Published registered utility model applications of Japan 1994-2017 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2006-297478 A (NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) 02 November 2006, paragraphs [0085]-[0091], fig. 11, 12 (Family: none)	1-20
Y	JP 5-32428 A (HOYA CORP.) 09 February 1993, paragraph [0035] (Family: none)	1-20
Y	JP 10-113780 A (NIKON CORP.) 06 May 1998, paragraph [0054] (Family: none)	8-14
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ 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 "L" 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 "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 27.12.2017		Date of mailing of the international search report 16.01.2018
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan		Authorized officer Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. B23K26/02(2014.01)i, B23K26/50(2014.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. B23K26/02, B23K26/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で利用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2006-297478 A（独立行政法人産業技術総合研究所）2006.11.02, 段落[0085]-[0091], 図 11-12（ファミリーなし）	1-20
Y	JP 5-32428 A（ホーヤ株式会社）1993.02.09, 段落[0035]（ファミリーなし）	1-20
Y	JP 10-113780 A（株式会社ニコン）1998.05.06, 段落[0054]（ファミリーなし）	8-14

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

27.12.2017

国際調査報告の発送日

16.01.2018

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/JP）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

岩見 勤

電話番号 03-3581-1101 内線 3363

3P

6101