

(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
2018年7月26日(26.07.2018)



(10) 国際公開番号

WO 2018/134868 A1

(51) 国際特許分類:
B23K 26/53 (2014.01) *H01L 21/301* (2006.01)

木県小山市大字横倉新田 4 0 0 番地 ギガ
フォトン株式会社内 Tochigi (JP).

(21) 国際出願番号: PCT/JP2017/001346

(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 2 3 階 私書箱第 1 7 6 号
新都心国際特許事務所 Tokyo (JP).

(22) 国際出願日: 2017年1月17日(17.01.2017)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

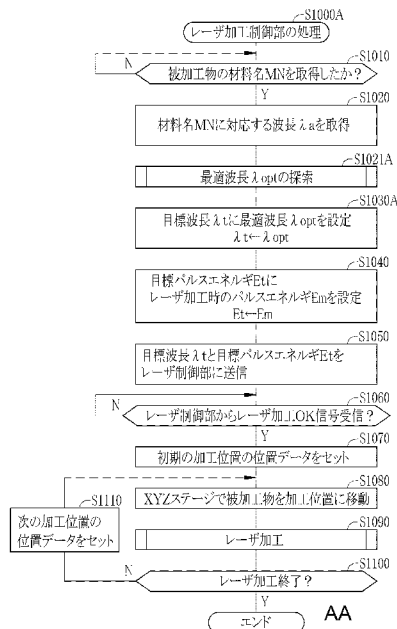
(71) 出願人: ギガフォトン株式会社(GIGAPHOTON
INC.) [JP/JP]; 〒3238558 栃木県小山市大字横
倉新田 4 0 0 番地 Tochigi (JP).

(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, 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,

(72) 発明者: 柿 崎 弘 司 (KAKIZAKI, Kouji);
〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田 4 0 0
番地 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP). 若
林 理(WAKABAYASHI, Osamu); 〒3238558 栃

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

(54) 発明の名称: レーザ加工システム及びレーザ加工方法



S1000A Processing by laser processing control unit
S1010 Workpiece material name MN acquired?
S1020 Acquire wavelength λ_a corresponding to material name MN
S1021A Find optimal wavelength λ_{opt}
S1030A Set target wavelength λ_t to optimal wavelength λ_{opt}
S1040 Set target pulse energy E_t to pulse energy E_m during laser processing
S1050 Send target wavelength λ_t and target pulse energy E_t to laser control unit
S1060 Laser processing OK signal received from laser control unit?
S1070 Set position data for initial processing position
S1080 Move workpiece to processing position with XYZ stage
S1090 Laser processing
S1100 End laser processing?
S1110 Set position data for next processing position
AA End

(57) Abstract: A laser processing system is provided with the following: A. a wavelength variable laser device, which is a laser device for outputting pulse laser light, capable of varying the wavelength of the pulse laser light; B. an optical system for irradiating a workpiece with pulse laser light output by the wavelength variable laser device; C. a reference wavelength acquisition unit for acquiring a reference wavelength corresponding to photon absorption and in accordance with the material of the workpiece; D. a laser processing control unit, which is a control unit for controlling the wavelength variable laser device so as to execute preprocessing of the workpiece before the execution of main processing, for executing



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:

- 国際調査報告 (条約第21条(3))

preprocessing for finding a wavelength at a plurality of wavelengths while varying the wavelength of the pulse laser light output by the wavelength variable laser device in a prescribed range that includes the reference wavelength; E. a processing state measuring instrument for measuring the processing state for each wavelength in the preprocessing for finding a wavelength, which is carried out with a plurality of wavelengths; and F. an optimal wavelength determining unit for determining an optimal wavelength for use in the main processing by evaluating the processing state for each wavelength.

(57) 要約: レーザ加工システムは、以下を備える: A. パルスレーザー光を出力するレーザー装置であって、パルスレーザー光の波長を変化させることが可能な波長可変レーザー装置; B. 波長可変レーザー装置から出力されたパルスレーザー光を被加工物に照射する光学システム; C. 被加工物の材料に応じた光子吸収に対応する基準波長を取得する基準波長取得部; D. 波長可変レーザー装置を制御して、被加工物に対して本加工を施す前にプレ加工を実行する制御部であって、基準波長を含む所定範囲内で波長可変レーザー装置が出力するパルスレーザー光の波長を変化させながら、複数の波長で波長探索用プレ加工を実行するレーザー加工制御部; E. 複数の波長で行った波長探索用プレ加工の波長毎の加工状態を計測する加工状態計測器; 及び F. 波長毎の加工状態を評価して、本加工に使用する最適波長を決定する最適波長決定部。

明 細 書

発明の名称： レーザ加工システム及びレーザ加工方法

技術分野

[0001] 本開示は、レーザ加工システム及びレーザ加工方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、レーザ加工分野において、パルス幅が非常に短い超短パルスのパルスレーザ光を使用したレーザ加工が注目されている。たとえば、ピコ秒やフェムト秒のパルス幅のパルスレーザ光を被加工材料に照射することによって、被加工材料の表面において光子吸収が起こり、非熱加工による綺麗な加工ができることが知られている。

[0003] また、出力するパルスレーザ光の波長を変化させることができる波長可変レーザ装置を用いて、被加工物に応じた適切な波長のパルスレーザ光を選択してレーザ加工を行うことが試みられている。例えば、被加工物が結晶材料である場合は、適切な波長として、材料のバンドギャップに対応して理論的に決まる光の吸収波長が選択される。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2002-273581号公報

特許文献2：特表2008-503032号公報

特許文献3：WO2003/076151号公報

概要

[0005] 本開示の1つの観点に係る、被加工物にパルス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は、以下を備える：

A. パルスレーザ光を出力するレーザ装置であって、パルスレーザ光の波長を変化させることが可能な波長可変レーザ装置；

B. 波長可変レーザ装置から出力されたパルスレーザ光を被加工物に照射する光学システム；

C. 被加工物の材料に応じた光子吸収に対応する基準波長を取得する基準波長取得部；

D. 波長可変レーザ装置を制御して、被加工物に対して本加工を施す前にプレ加工を実行する制御部であって、基準波長を含む所定範囲内で波長可変レーザ装置が出力するパルスレーザ光の波長を変化させながら、複数の波長で波長探索用プレ加工を実行するレーザ加工制御部；

E. 複数の波長で行った波長探索用プレ加工の波長毎の加工状態を計測する加工状態計測器；及び

F. 波長毎の加工状態を評価して、本加工に使用する最適波長を決定する最適波長決定部。

[0006] 本開示の1つの観点に係る、被加工物にパルスレーザ光を照射してレーザ加工を行うレーザ加工方法は、以下のステップを備える：

A. 被加工物の材料に応じた光子吸収に対応する基準波長を取得する基準波長取得ステップ；

B. パルスレーザ光の波長を変化させることが可能な波長可変レーザ装置を用い、基準波長を含む所定範囲内で波長可変レーザ装置が出力するパルスレーザ光の波長を変化させながら、複数の波長で波長探索用プレ加工を実行する波長探索用プレ加工ステップ；

C. 複数の波長で行った波長探索用プレ加工の波長毎の加工状態を計測する加工状態計測ステップ；及び

D. 波長毎の加工状態を評価して、本加工に使用する最適波長を決定する最適波長決定ステップ。

図面の簡単な説明

[0007] 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]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図である。

[図2]比較例のレーザ加工制御部の処理手順を示すフローチャートである。

[図3]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]比較例のレーザ制御部の処理手順を示すフローチャートである。

[図5]第1波長選択テーブルの説明図である。

[図6]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である。

[図7]第1実施形態のレーザ加工制御部の処理手順を示すフローチャートである。

[図8]第1実施形態の最適波長の探索の処理手順を示すフローチャートである。

[図9]波長検索用フルエンスを決定する処理手順を示すフローチャートの前半である。

[図10]波長検索用フルエンスを決定する処理手順を示すフローチャートの後半である。

[図11]フルエンス評価値テーブルの説明図である。

[図12]波長探索処理手順を示すフローチャートの前半である。

[図13]波長探索処理手順を示すフローチャートの後半である。

[図14]第1評価値テーブルの説明図である。

[図15]最適波長の決定の処理手順を示すフローチャートである。

[図16]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である。

[図17]加工深さの説明図である。

[図18]第2実施形態のレーザ加工制御部の処理手順を示すフローチャートである。

[図19]第2実施形態の最適波長の探索の処理手順を示すフローチャートの前半である。

[図20]第1実施形態の最適波長の探索の処理手順を示すフローチャートの後半である。

[図21]加工状態の計測と第2波長評価値の記録の処理手順を示すフローチャートである。

[図22]第2評価値テーブルの説明図である。

[図23]材料Aの特性図である。

[図24]材料Bの特性図である。

[図25]第3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である。

[図26]第2波長選択テーブルの説明図である。

[図27]第3実施形態のレーザ加工制御部の処理手順を示すフローチャートである。

[図28]基準波長 λ_a の選択とパルス幅 ΔT_a の決定の手順を示すフローチャートである。

[図29]第3実施形態のレーザ制御部の処理手順を示すフローチャートである。

[図30]第4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である。

[図31]第4実施形態のレーザ加工制御部の処理手順を示すフローチャートの前半である。

[図32]第4実施形態のレーザ加工制御部の処理手順を示すフローチャートの後半である。

[図33]最適パルス幅の探索手順を示すフローチャートの前半である。

[図34]最適パルス幅の探索手順を示すフローチャートの後半である。

[図35]加工状態の計測とパルス幅評価値の記録の手順を示すフローチャートである。

[図36]パルス幅評価値テーブルの説明図である。

[図37]波長可変レーザ装置の具体例を示す説明図である。

[図38]転写光学系を有するレーザ加工装置の説明図である。

[図39]反射型の集光光学系の説明図である。

[図40]反射型の転写光学系の説明図である。

実施形態

[0008] <内容>

1. 概要

2. 比較例に係るレーザ加工システム

2. 1 レーザ加工システムの構成

- 2. 2 レーザ加工システムの動作
- 2. 3 課題
- 3. 第1実施形態のレーザ加工システム
 - 3. 1 構成
 - 3. 2 動作
 - 3. 3 作用
 - 3. 4 変形例
- 4. 第2実施形態のレーザ加工システム
 - 4. 1 構成
 - 4. 2 動作
 - 4. 3 作用
- 5. 第3実施形態のレーザ加工システム
 - 5. 1 構成
 - 5. 2 動作
 - 5. 3 作用
 - 5. 4 変形例
- 6. 第4実施形態のレーザ加工システム
 - 6. 1 構成
 - 6. 2 動作
 - 6. 3 作用
- 7. 波長可変レーザ装置の具体例
 - 7. 1 構成
 - 7. 2 動作
 - 7. 3 変形例
- 8. レーザ加工装置の変形例
 - 8. 1 構成
 - 8. 2 動作
- 9. 反射型の光学系

9. 1 反射型の集光光学系

9. 2 反射型の転写光学系

[0009] 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。

[0010] 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に関する。

[0011] 2. 比較例に係るレーザ加工システム

2. 1 レーザ加工システムの構成

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。

[0012] レーザ装置3は、固体レーザ装置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、パルスレーザ光を出力するレーザ装置であって、パルスレーザ光の波長を変化させることが可能な波長可変レーザ装置である。

[0013] 固体レーザ装置10は、波長可変チタンサファイヤ発振器16と、チタンサファイヤ増幅器17と、波長変換システム18と、ポンピングレーザ装置19とを含んでいる。波長可変チタンサファイヤ発振器16は、チタンサファイヤ結晶と波長選択素子と出力結合ミラーからなる光共振器を含む。ポンピングレーザ装置19から出力されたパルスレーザ光により、チタンサファイヤ結晶がパルス状に励起される。この波長可変チタンサファイヤ発振器16から出力されるシード光は、光共振器中の波長選択素子によって、波長選択され、650nm～1100nmの範囲のパルスレーザ光を出力する。こ

ここで波長選択素子の具体例としては、たとえば、グレーティングである。

[0014] チタンサファイヤ増幅器 17 は、チタンサファイヤ結晶とマルチパス増幅するための光学系と、を含む。シード光がチタンサファイヤ結晶に入射するのと同期して、ポンピングレーザ装置 19 から出力されたパルスレーザ光により、パルス状に励起される。その結果、チタンサファイヤ増幅器 17 において、パルスレーザ光であるシード光は増幅され、増幅されたパルスレーザ光が出力される。

[0015] 増幅されたパルスレーザ光のパルス幅は、ポンピングレーザ装置 19 から出力される励起用のパルスレーザ光のパルス幅に依存する。例えば、被加工物 41 の材料において 1 光子の光子吸収が生じるパルス幅となるように励起用のパルスレーザ光のパルス幅が設定されており、具体的には、被加工物 41 に照射されるパルスレーザ光のパルス幅は 1 ns 以上 100 ns 以下の範囲となるように励起用のパルスレーザ光のパルス幅が設定されている。

[0016] ポンピングレーザ装置 19 は、例えば、励起光として、YLF レーザの第 2 高調波光のパルスレーザ光を出力するレーザ装置である。ポンピングレーザ装置 19 は、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 及びチタンサファイヤ増幅器 17 に励起光を入力する。

[0017] 波長変換システム 18 は、チタンサファイヤ増幅器 17 で増幅されたシード光の波長を変換する。波長変換システム 18 において、シード光は、第 2 高調波 (325 nm ~ 550 nm)、第 3 高調波 (217 nm ~ 367 nm)、及び第 4 高調波 (162 nm ~ 275 nm) のいずれかに選択的に変換される。固体レーザ装置 10 は、波長変換システム 18 で波長変換されたパルスレーザ光を出力する。

[0018] モニタモジュール 11 は、固体レーザ装置 10 が出力する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、波長モニタ 11c とを含んでいる。

[0019] ビームスプリッタ 11a は、固体レーザ装置 10 が出力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

光の一部をビームスプリッタ 11 d に向けて反射する。ビームスプリッタ 11 d は、ビームスプリッタ 11 a の反射光路上であって、光センサ 11 b との間に配置される。ビームスプリッタ 11 d は、ビームスプリッタ 11 a 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 11 d を透過した透過光は、光センサ 11 b に入射し、ビームスプリッタ 11 d を反射した反射光は波長モニタ 11 c に入射する。

[0020] 光センサ 11 b 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。

[0021] 波長モニタ 11 c は、例えば、グレーティング等の波長分散素子を含み、その回折像をイメージセンサで検出し、検出した回折像に基づいて波長を検出する分光器である。

[0022] レーザ制御部 13 は、レーザ加工装置 4 のレーザ加工制御部 32 との間で各種の信号を送受信する。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 、目標波長 λ_t のデータ等を受信する。

[0023] レーザ制御部 13 は、モニタモジュール 11 の光センサ 11 b からパルスエネルギーのデータを受信する。レーザ制御部 13 は、受信したパルスエネルギーのデータに基づいてポンピングレーザ装置 19 から出力される励起用パルスレーザ光のパルスエネルギーを制御する。ポンピングレーザ装置 19 は、励起用パルスレーザ光を、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 及びチタンサファイヤ増幅器 17 に出力する。励起用パルスレーザ光のパルスエネルギーを制御することにより、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 及びチタンサファイヤ増幅器 17 が出力するパルスレーザ光のパルスエネルギーが制御される。

[0024] シャッタ 12 は、モニタモジュール 11 のビームスプリッタ 11 a 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 の開信号と同期して、パルスレーザ光の発光トリガ T_r の受信が可能となったことを表すレーザ加工 OK 信号を、レーザ加工制御部 32 に送信する。

[0025] 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。

[0026] 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、例えば、結晶材料である。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、光学システム 36 から出射するパルスレーザ光が照射されるように被加工物 41 の位置を調整する。

[0027] 光学システム 36 は、例えば、高反射ミラー 36a～36c と、集光光学系としての集光レンズ 36d と、アッテネータ 52 とを備えている。高反射ミラー 36a～36c、集光レンズ 36d 及びアッテネータ 52 は、それぞれが図示しないホルダに固定されており、筐体 37 内において所定の位置に配置されている。

[0028] 高反射ミラー 36a～36c は、パルスレーザ光を高い反射率で反射する。高反射ミラー 36a 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 36b に向けて反射し、高反射ミラー 36b は、パルスレーザ光を、高反射ミラー 36c に向けて反射する。高反射ミラー 36c は、パルスレーザ光を集光レンズ 36d に向けて反射する。高反射ミラー 36a～36c 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。

[0029] 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 5 2 a 及び 5 2 b と、これらの部分反射ミラーの回転ステージ 5 2 c 及び 5 2 d とを含んでいる。2 枚の部分反射ミラー 5 2 a 及び 5 2 b は、パルスレーザ光の入射角度によって、透過率 T が変化する光学素子である。部分反射ミラー 5 2 a 及び部分反射ミラー 5 2 b 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 T となるように、回転ステージ 5 2 c 及び回転ステージ 5 2 d によって傾斜角度が調整される。

[0030] アッテネータ 5 2 は、レーザ加工制御部 3 2 の制御信号に基づいて透過率 T が制御される。アッテネータ 5 2 は、透過率 T の制御により、入射するパルスレーザ光のパルスエネルギーを所望のパルスエネルギーに調節する。

[0031] 集光レンズ 3 6 d は、入射したパルスレーザ光を、ウィンドウ 4 2 を介して被加工物 4 1 の表面に集光するように配置される。集光レンズ 3 6 d は、例えば、合成石英と CaF_2 結晶など材料の異なるレンズを組み合わせた色収差補正レンズである。色収差補正範囲は、例えば、波長可変レーザ装置であるレーザ装置 3 から出力されるパルスレーザ光の波長範囲に応じて設定される。

[0032] ウィンドウ 4 2 は、集光レンズ 3 6 d 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。

[0033] 筐体 3 7 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 3 7 には、窒素ガスを筐体 3 7 に吸入する吸入ポート（図示せず）と、筐体 3 7 から窒素ガスを外部に排出する排出ポート（図示せず）が設けられている。吸入ポート及び排出ポートは、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。吸入ポート及び排出ポートは、吸気管や排出管を接続した状態では、筐体 3 7 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。

。吸入ポートには、窒素ガス供給源（図示せず）が接続される。

[0034] 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 との接続部分と、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。

[0035] なお、筐体 3 7 内に窒素ガスを流す目的は、紫外領域の光が大気に一部吸収される特性を有しているため、このような大気を筐体 3 7 内から排出することにある。したがって、パルスレーザ光の波長が紫外領域でない場合は、筐体 3 7 内に窒素ガスを流さなくてもよい。また、筐体 3 7 において、筐体 3 7 内への大気の流入を抑制するウインドウ 4 2 が配置されているが、パルスレーザ光の波長が紫外領域でない場合は、ウインドウ 4 2 を配置しなくてもよい。

[0036] 2. 2 レーザ加工システムの動作

図 2 ～図 4 のフローチャートを参照しながら、レーザ加工システム 2 の動作を説明する。図 2 に示す S 1 0 0 0 は、レーザ加工装置 4 のレーザ加工制御部 3 2 の処理を示すフローチャートであり、図 4 に示す S 2 0 0 0 は、レーザ装置 3 のレーザ制御部 1 3 の処理を示すフローチャートである。

[0037] まず、レーザ加工を行う場合には、被加工物 4 1 が X Y Z ステージ 3 4 のテーブル 3 3 にセットされる。そして、図 2 に示すように、まず、S 1 0 1 0 において、レーザ加工制御部 3 2 は、セットされた被加工物 4 1 の材料名 M N の入力を待機する。材料名 M N の入力は、例えば、オペレータによる操作パネルを通じた材料名 M N のマニュアル入力や、外部装置から送信される材料名 M N のデータを受信することにより行われる。外部装置としては、例えば、レーザ加工システム 2 が設置される工場の工場管理システムなどの操作端末である。

[0038] レーザ加工制御部 3 2 は、被加工物 4 1 の材料名 M N を取得すると（S 1 0 1 0 で Y）、S 1 0 2 0 において、材料名 M N に対応する波長 λa を取得する。具体的には、レーザ加工制御部 3 2 は、図 5 に示す第 1 波長選択テーブル 5 6 から、材料名 M N に対応する波長 λa を読み出す。第 1 波長選択テ

ーブル56は、ダイヤモンド（Diamond）や窒化シリコン（SiC）などの被加工物41の各種の材料毎に予め設定された波長 λ_a を記録したテーブルデータである。

[0039] 第1波長選択テーブル56は、例えば、レーザ加工制御部32の内部メモリに記憶される。なお、第1波長選択テーブル56を記憶する記憶部としては、レーザ加工制御部32の内部メモリに限らず、レーザ加工システム2内に設けられるデータストレージでもよい。また、レーザ加工システム2と通信可能に接続されたコンピュータなどの外部記憶装置でもよい。

[0040] 波長 λ_a は、被加工物41の材料に応じた光子吸収に対応する基準波長である。より具体的には、基準波長 λ_a は、材料において光子吸収が生じる吸収波長として想定される波長である。光子吸収とは、材料が光子を吸収して電子が励起される過程をいう。吸収波長は、材料が結晶材料である場合は、結晶材料のバンドギャップに応じて決まる。具体的には、バンドギャップが大きいほど、光子吸収を生じさせるために大きなエネルギーが必要になるため、1光子吸収波長は短くなる。基準波長 λ_a は、理論上は、加工速度が最大となり、レーザ加工に使用する波長として最適な波長である。ここで、加工速度とは、材料に照射するパルスレーザ光の1パルス当たりの加工深さDepthであり、下記式（1）で定義される。

$$PS = \text{Depth} / Nm \cdots \cdots (1)$$

ここで、PSは加工速度、Nmはパルス数である。

[0041] 第1波長選択テーブル56は、材料名MN毎に、基準波長 λ_a として、1光子吸収波長のデータを記録したテーブルである。図5において、第1波長選択テーブル56には、1光子吸収波長に加えて、バンドギャップのデータも記録されている。図5において、バンドギャップのデータが記録されているのは、1光子吸収波長との相関関係を示すためであり、バンドギャップのデータを第1波長選択テーブル56に記録しなくてもよい。バンドギャップの単位は[eV]であり、1光子吸収波長の単位は[nm]である。

[0042] S1030において、レーザ加工制御部32は、目標波長 λ_t に、取得し

た基準波長 λ_a を設定し、S1040において、目標パルスエネルギー E_t に、レーザ加工時のパルスエネルギー E_m を設定する。次に、S1050において、レーザ加工制御部32は、設定した目標波長 λ_t と目標パルスエネルギー E_t のデータを、レーザ制御部13に送信する。

[0043] S1060において、レーザ加工制御部32は、レーザ装置3において準備動作が完了するまでの間、レーザ制御部13からのレーザ加工OK信号の受信を待機する。レーザ加工OK信号は、レーザ装置3において発光トリガTrの受信準備が完了したことを表す信号であり、レーザ制御部13がレーザ加工制御部32に送信する信号である。

[0044] レーザ加工制御部32は、レーザ制御部13からレーザ加工OK信号を受信すると（S1060でY）、S1070において、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。S1080において、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を初期のレーザ加工位置に移動する。具体的には、被加工物41は、XY平面内の位置と、Z軸方向の位置が位置決めされる。Z軸方向の位置については、集光レンズ36dから出射するパルスレーザ光が、被加工物41の表面において所望の照射径で集光される位置に、被加工物41が移動される。ここで、パルスレーザ光の照射径は、被加工物41の表面に照射されるパルスレーザビームの直径である。

[0045] レーザ加工制御部32は、被加工物41の位置決めが終了すると、S1090において、レーザ制御部13に対して発光トリガTrを送信して、被加工物41のレーザ加工を実行する。発光トリガTrに同期してレーザ装置3からパルスレーザ光が出力される。パルスレーザ光はレーザ加工装置4に入射する。

[0046] 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36a、アッテネータ52、及び高反射ミラー36b、36cを経由して集光レンズ36dに入射する。パルスレーザ光はアッテネータ52を透過する際にパルスエネルギーが調節される。集光レンズ36dを透過したパルスレーザ光は、ウ

インドウ 4 2 を介して被加工物 4 1 の表面に集光されて照射される。このレーザー照射により、被加工物 4 1 に対してレーザー加工が施される。

[0047] 初期の加工位置に対するレーザー加工が終了した後は、レーザー加工制御部 3 2 は、次の加工位置がある場合（S 1 1 0 0 で N）には、S 1 1 1 0 において、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。そして、S 1 0 8 0 において、X Y Z ステージ 3 4 で被加工物 4 1 が次の加工位置に移動される。S 1 0 9 0 において、次の加工位置で、被加工物 4 1 に対してレーザー加工が行われる。次の加工位置が無い場合は、レーザー加工が終了する（S 1 1 0 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ー加工が終了するまで繰り返される。

[0048] S 1 0 9 0 のレーザー加工は、図 3 に示すフローチャートに従って行われる。レーザー加工制御部 3 2 は、被加工物 4 1 の表面に照射されるパルスレーザー光が、レーザー加工に必要な所望のフルーエンス F L m となるようにパルスエネルギーを制御する。

[0049] ここで、フルーエンス F L とは、パルスレーザー光が照射される被加工物 4 1 の表面における、パルスレーザー光のエネルギー密度であり、光学システム 3 6 の光損失が無視できる場合は、下記式（2）で定義される。

$$F L = E t / S \text{ [m J / c m}^2\text{]} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、S は照射面積であり、照射径を D とすると、 $S = \pi (D / 2)^2 \text{ [c m}^2\text{]}$ となる。

[0050] そして、レーザー加工時の照射面積を S m、レーザー加工時に必要な目標パルスエネルギー E t を E m とすると、レーザー加工に必要なフルーエンス F L m は、下記式（3）で定義される。

$$F L m = E m / S m \text{ [m J / c m}^2\text{]} \dots\dots\dots (3)$$

[0051] レーザー加工制御部 3 2 は、目標パルスエネルギー E t を通じたパルスレーザー光のフルーエンス F L の制御に加えて、アッテネータ 5 2 の透過率 T を制御して、パルスレーザー光のフルーエンス F L を制御する。アッテネータ 5 2 の透過率 T によるフルーエンス F L の制御は、レーザー装置 3 においてパルスエ

エネルギーを大きく変更できない場合に有効である。

[0052] アッテネータ 52 の透過率 T は、光学システム 36 の光損失が無い場合、下記式 (4) に基づいて求められる。

$$T = \pi (D/2)^2 (FL/E_t) \cdots \cdots (4)$$

ここで、 FL はフルーエンス、 E_t は目標パルスエネルギー、 D は被加工物 41 の表面におけるパルスレーザ光の照射径である。レーザ加工に必要なフルーエンス FL_m を得るための透過率 T を求める場合には、 $T = \pi (D/2)^2 (FL_m/E_m)$ となる。

[0053] レーザ加工制御部 32 は、S1091 において透過率 T を設定した後、S1092 において、レーザ加工に必要な所定の繰り返し周波数 f_m と所定のパルス数 N_m で規定される発光トリガ T_r を、レーザ制御部 13 に送信する。これにより、発光トリガ T_r に応じたレーザ照射が行われる。

[0054] 図 4 に示すように、S2010 において、レーザ制御部 13 は、レーザ加工制御部 32 から目標波長 λ_t と目標パルスエネルギー E_t のデータを受信すると、S2020 において、レーザ加工 NG 信号をレーザ加工制御部 32 に送信する。レーザ加工 NG 信号は、レーザ加工制御部 32 からの発光トリガ T_r の送信を禁止する信号である。レーザ制御部 13 は、レーザ加工 NG 信号を送信した後、S2030 において、シャッタ 12 を閉じる。これにより、レーザ制御部 13 は、目標波長 λ_t と目標パルスエネルギー E_t に応じたパルスレーザ光の出力をするための準備動作を開始する。

[0055] レーザ制御部 13 は、S2040 において、固体レーザ装置 10 が出力するパルスレーザ光が目標波長 λ_t 及び目標パルスエネルギー E_t となるように、図示しない内部発光トリガに基づいて、所定の繰り返し周波数で固体レーザ装置 10 に調整発振を行わせる。

[0056] モニタモジュール 11 は、固体レーザ装置 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と波長の実測値を計測する。レーザ制御部 13 は、パルスエネルギーの実測値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、ポンピングレーザ装置 19 の励起光のパルス

エネルギーを制御する。また、レーザ制御部 13 は、波長の実測値と目標波長 λ_t との差 $\Delta\lambda$ が 0 に近づくように、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 の波長選択素子の選択波長を制御することによって、出力波長を制御する。具体的には、レーザ制御部 13 は、 ΔE が許容範囲になるように励起光のパルスエネルギーを制御し、かつ、 $\Delta\lambda$ が許容範囲になるように波長可変チタンサファイヤ発振器 16 の波長選択素子の選択波長を制御することによって、パルスレーザ光のパルスエネルギーと波長を制御することができる。

[0057] レーザ制御部 13 は、 ΔE 及び $\Delta\lambda$ が許容範囲となった場合、調整発振を停止する。そして、S2050において、シャッタ 12 を開けて、かつ、S2060において、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表すレーザ加工 OK 信号を送信する。

[0058] レーザ制御部 13 は、レーザ加工 OK 信号を送信した後、発光トリガ T_r を受信する。S2070において、レーザ加工制御部 32 からの発光トリガ T_r に基づいて、固体レーザ装置 10 にレーザ発振を行わせる。レーザ制御部 13 は、発光トリガ T_r によるレーザ発振中において、モニタモジュール 11 からの実測値に基づいてフィードバック制御を行う。レーザ制御部 13 は、パルスエネルギー及び波長の実測値が許容範囲に無い場合（S2080で N）、S2020に戻り、S2020からS2070のステップを実行する。これにより、パルスエネルギー及び波長の実測値が許容範囲になるようにフィードバック制御が行われる。

[0059] また、レーザ制御部 13 は、レーザ発振中において、レーザ加工制御部 32 からの目標波長 λ_t 又は目標パルスエネルギー E_t の変更要求を受け付ける（S2090）。レーザ制御部 13 は、目標波長 λ_t 又は目標パルスエネルギー E_t のいずれかの変更要求が有った場合は（S2090で Y）、S2010に戻り、上記ステップを繰り返す。レーザ制御部 13 は、レーザ加工制御部 32 からの次の発光トリガ T_r が有る場合（S2100で Y）には、レーザ発振を継続する。レーザ制御部 13 は、次の発光トリガ T_r の送信が終了するまで（S2100で N）、上記ステップを繰り返す。

[0060] 2. 3 課題

比較例のレーザ加工システム 2 は、被加工物 4 1 の材料のバンドギャップに対応する基準波長 λ_a のパルスレーザ光でレーザ加工を行う。上述のとおり、基準波長 λ_a は、理論的には、加工速度 PS が最大となる最適な波長と考えられる。しかし、レーザ加工において、加工速度 PS を改善するために基準波長 λ_a に合わせても、実際には、加工速度 PS が改善しない場合があった。その理由は、実際に加工される被加工物 4 1 の材料においては、不純物等の影響で、理論的なバンドギャップとは多少異なるバンドギャップとなる場合があるためと考えられる。

[0061] 3. 第 1 実施形態のレーザ加工システム

3. 1 構成

図 6 は、第 1 実施形態に係るレーザ加工システム 2 A 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 2 A は、図 1 に示す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 4 A を備えている。第 1 実施形態のレーザ装置 3 は、比較例のレーザ装置 3 と同様である。第 1 実施形態の以下の説明において、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する。

[0062] レーザ加工システム 2 A は、被加工物 4 1 に対するレーザ加工に使用する最適波長 λ_{opt} を探索する機能を備えている。第 1 実施形態のレーザ加工装置 4 A は、比較例のレーザ加工制御部 3 2 に代えて、レーザ加工制御部 3 2 A を備えている。レーザ加工制御部 3 2 A の内部メモリには、レーザ加工制御部 3 2 と同様に、第 1 波長選択テーブル 5 6 が記憶されている。

[0063] レーザ加工制御部 3 2 A は、最適波長 λ_{opt} の探索処理を実行する。最適波長 λ_{opt} の探索は、被加工物 4 1 に対してレーザ加工の本加工を行う前にプレ加工を行って、プレ加工の加工状態を評価することにより行われる。レーザ加工制御部 3 2 A は、レーザ制御部 1 3 を介してレーザ装置 3 を制御して、プレ加工を実行する。第 1 実施形態のレーザ加工装置 4 A は、比較例のレーザ加工装置 4 に加えて、観察装置 6 6 を備えている。

[0064] 観察装置 66 は、被加工物 41 の表面を撮像して、複数の波長で行ったプレ加工の波長毎の加工状態を表す観察画像を記録する。観察画像 66 は、観察画像を記録することにより、加工状態として、少なくとも加工が施されたか否を計測する。本例において、観察装置 66 は、加工状態計測器として機能する。観察装置 66 は、ハーフミラー 66 a、コリメータレンズ 66 b、照明光源 66 c、結像レンズ 66 d 及びイメージセンサ 66 e を備える。また、高反射ミラー 36 c としては、パルスレーザ光を高反射し、かつ、照明光源 66 c が発光する可視光を透過するミラーが使用される。

[0065] 照明光源 66 c は、被加工物 41 の表面を照明する照明光を発光する。照明光はコリメータレンズ 66 b によってコリメートされる。コリメートされた照明光の光路上に、ハーフミラー 66 a、高反射ミラー 36 c 及び集光レンズ 36 d が配置される。これにより、照明光が被加工物 41 に照射される。

[0066] また、ハーフミラー 66 a は、テーブル 33 上の被加工物 41 の表面において反射され、集光レンズ 36 d 及び高反射ミラー 36 c を透過した反射光を、結像レンズ 66 d に反射するように配置されている。結像レンズ 66 d は、レーザ加工が実行される加工位置にある被加工物 41 の表面の像が観察できるように配置されている。具体的には、結像レンズ 66 d は、被加工物 41 の表面で反射して、入射した反射光がイメージセンサ 66 e の受光面で結像するように配置されている。

[0067] 3. 2 動作

図 7 から図 15 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。図 7 の S1000 A に示すレーザ加工制御部 32 A の処理のフローチャートにおいて、図 2 に示す S1000 の比較例の処理と異なるのは、1 つは、S1020 の直後に、S1021 A の最適波長 λ_{opt} を探索する処理が追加されている点である。

[0068] もう 1 つは、図 2 に示す比較例の S1030 が S1030 A に変更されている点である。具体的には、比較例の S1030 においては、目標波長 λ_t

に、基準波長 λ_a そのものを設定している。これに対して、第1実施形態のS1030Aでは、目標波長 λ_t に、探索処理において決定した最適波長 λ_{opt} を設定する。これにより、第1実施形態においては、最適波長 λ_{opt} を使用してレーザ加工の本加工が行われる。その他の各ステップは、図2に示す比較例と同様である。

[0069] 図8に示すように、S1021Aの最適波長 λ_{opt} の探索は、SR110の波長探索用フルエンス $FLth$ を決定する処理と、SR120の決定された波長探索用フルエンス $FLth$ を使用して最適波長 λ_{opt} を探索する波長探索処理とを含む。SR110の波長探索用フルエンス $FLth$ を決定する処理と、SR120の波長探索処理のどちらも、被加工物41に対してプレ加工を施すことにより実行される。

[0070] 各処理のプレ加工を区別するために、第1実施形態においては、波長探索用フルエンス $FLth$ を決定する処理において実行されるフルエンス決定用のプレ加工を第1プレ加工と呼び、波長探索用フルエンス $FLth$ を使用して行う波長探索用プレ加工を第2プレ加工と呼ぶ。レーザ加工制御部32Aは、第2プレ加工において使用される波長探索用フルエンス $FLth$ を決定する波長探索用フルエンス決定部として機能する。

[0071] 図9及び図10は、本例の波長探索用フルエンス $FLth$ の決定処理（SR110）のフローチャートを示す。SR110において、レーザ加工制御部32Aは、目標波長 λ_t を基準波長 λ_a に固定した状態で、フルエンスを変化させながら、複数のフルエンスで第1プレ加工を実行する。

[0072] 図9に示すSR1101において、レーザ加工制御部32Aは、目標波長 λ_t に基準波長 λ_a を設定し、SR1102において、目標パルスエネルギー E_t にレーザ加工時のパルスエネルギー E_m を設定する。次に、SR1103において、レーザ加工制御部32Aは、設定した目標波長 λ_t と目標パルスエネルギー E_t のデータを、レーザ制御部13に送信する。

[0073] レーザ加工制御部32Aは、SR1104において、レーザ加工OK信号の受信を待機する。レーザ制御部13からレーザ加工OK信号を受信した場

合には（SR1104でY）、SR1105において、レーザ加工制御部32Aは、第1プレ加工において使用するフルーエンスFLp（N）の値を初期化する。具体的には、SR1105において、初期値Fm0を、第1プレ加工で使用する1番目のフルーエンスFLp（1）にセットする。そして、SR1106において、使用するフルーエンスFLp（N）の番号Nに「1」をセットして、FLp（1）を選択する。

[0074] レーザ加工制御部32Aは、SR1107において、初期のプレ加工位置の位置データをセットする。SR1108において、レーザ加工制御部32Aは、セットした位置データに基づいて、XYZステージ34で被加工物41を初期のプレ加工位置に移動する。被加工物41の表面において、プレ加工が行われる領域は、例えば、被加工物41の周縁領域など、被加工物41において本加工が行われる部分以外の領域である。プレ加工位置は、この領域とパルスレーザ光の照射位置が一致する位置である。

[0075] レーザ加工制御部32Aは、SR1109において、目標フルーエンスFLtにフルーエンスFLp（N）を設定する。フルーエンスFLp（N）の番号Nに「1」がセットされている場合には、目標フルーエンスFLtに、1番目のフルーエンスFLp（1）である初期値FLp0が設定される。図10に示すように、SR1110において、レーザ加工制御部32Aは、目標フルーエンスFLtとなるようにアッテネータ52の透過率Tを設定する。SR1111において、レーザ加工制御部32Aは、レーザ加工に必要な繰り返し周波数fmとパルス数Nmとで規定される発光トリガTrをレーザ制御部13に送信する。これにより、レーザ装置3からパルスレーザ光が出力されて、被加工物41のプレ加工位置に対して第1プレ加工が実行される。

[0076] フルーエンスFLp（N）による第1プレ加工が実行されると、SR1112において、観察装置66は、第1プレ加工の加工状態を計測する。観察装置66は、イメージセンサ66eで被加工物41の表面を撮像して、フルーエンスFLp（N）による第1プレ加工の加工状態を表す観察画像を記録

する。観察画像は図示しないメモリなどのデータストレージに格納される。レーザ加工制御部32Aは、記録された観察画像に基づいて、フルーエンス $FLp(N)$ による第1プレ加工の加工状態を評価する。

[0077] 具体的には、フルーエンス $FLp(N)$ による第1プレ加工により、被加工物41のプレ加工位置に加工が施されたか否かを判定する。例えば、第1プレ加工により、被加工物41の表面に丸い穴を形成する場合、穴が形成された場合は、加工が施されたと判定し、穴が形成されていない場合には、加工が施されていないと判定する。そして、レーザ加工制御部32Aは、判定結果 $Dok(N)$ を、フルーエンス評価値として、図11に示すフルーエンス評価値テーブル67に記録する。番号 N が「1」の場合は、1番目のフルーエンス $FLp(1)$ による第1プレ加工の判定結果 $Dok(1)$ が、フルーエンス評価値として、フルーエンス評価値テーブル67に記録される。

[0078] 1つのフルーエンス $FLp(N)$ についてフルーエンス評価値の記録が終了した場合には、SR1113において、レーザ加工制御部32Aは、番号 N に1を加算する。SR1114において、レーザ加工制御部32Aは、 $FLp(N-1)$ のフルーエンスの値に ΔFLs を加算した値を、 $FLp(N)$ のフルーエンスの値として設定する。例えば、 $FLp(1)$ のフルーエンス評価値の記録が終了したら、 N に1を加算する。初期のプレ加工位置の第1プレ加工が終了した段階では、 $N=1$ なので、1を加算すると $N=2$ となる。そして、 $N=2$ であるため、SR1114において、 $N-1=2-1=1$ となる。従って、 $FLp(1)$ の値に ΔFLs を加算した値が、 $FLp(2)$ のフルーエンスの値として設定される。 $FLp(1)$ の値は、初期値 $FLp0$ であるため、 $FLp(2)=FLp0+\Delta FLs$ となる。

[0079] SR1114で設定した $FLp(N)$ の値が $FLpmax$ 以下の場合には（SR1115で N ）、レーザ加工制御部32Aは、次のプレ加工位置の位置データをセットする（SR1117）。そして、SR1108において、レーザ加工制御部32Aは、XYZステージ34を制御して被加工物41を次のプレ加工位置に移動する。次のプレ加工位置において、SR1109か

らSR1114のステップが実行される。レーザ加工制御部32Aは、SR1112において、 $FLp(N) = FLp(2)$ の場合は、 $FLp(2)$ の判定結果 $Dok(2)$ をフルエンス評価値として、フルエンス評価値テーブル67に記録する。こうした処理が、 $FLp(N)$ の値が $FLpmax$ を超えるまで(SR1115でY)、繰り返される。

[0080] 図11に示すように、フルエンス評価値テーブル67は、第1プレ加工において使用した複数のフルエンス $FLp(N)$ の値と、各 $FLp(N)$ に対応するフルエンス評価値である判定結果 $Dok(N)$ とを対応付けて記録したテーブルである。第1プレ加工により、被加工物41の表面に穴を形成する場合、フルエンス $FLp(N)$ の値が小さすぎると、穴が形成されないが、 $FLp(N)$ の値を大きくしていくと、ある値で穴が形成される。穴が形成されない場合は、レーザ加工制御部32Aは、加工が施されないと判定して、判定結果 $Dok(N)$ として、加工が施されないことを表す「加工NG」を記録する。一方、穴が形成された場合は、加工が施されたと判定して、判定結果 $Dok(N)$ として、加工が施されたことを表す「加工OK」を記録する。

[0081] フルーエンス評価値テーブル67には、第1プレ加工において、 $FLp(N)$ の値を ΔFLp ずつ段階的に大きくした場合のそれぞれの判定結果 $Dok(N)$ がフルエンス評価値として記録される。

[0082] 図10のSR1116において、レーザ加工制御部32Aは、フルエンス評価値テーブル67を参照して、フルエンス評価値が「加工NG」のフルエンス $FLp(N)$ の最大値を、波長探索用フルエンス $FLth$ として決定する。フルエンス評価値が「加工NG」のフルエンス $FLp(N)$ の最大値は、言い換えれば、被加工物41に対して加工が施される直前のフルエンス $FLp(N)$ の最大値である。図11に示す例では、ハッチングで示した $FLp(5)$ の値が、 $FLth$ として決定される。こうして決定した波長探索用フルエンス $FLth$ を使用して、最適波長 λopt の波長探索処理が行われる。

- [0083] 図12のSR120の波長探索処理において、レーザ加工制御部32Aは、フルーエンスを波長探索用フルーエンス FL_{th} に固定した状態で、波長を変化させながら、複数の波長で第2プレ加工を実行する。
- [0084] SR1201において、レーザ加工制御部32Aは、目標パルスエネルギー E_t にレーザ加工時のパルスエネルギー E_m を設定する。次に、SR1202において、レーザ加工制御部32Aは、設定した目標パルスエネルギー E_t のデータを、レーザ制御部13に送信する。そして、レーザ加工制御部32Aは、SR1203において、目標フルーエンス FL_t に波長探索用フルーエンス FL_{th} を設定し、SR1204において、目標フルーエンス FL_t となるようにアッテネータ52の透過率 T を設定する。
- [0085] SR1205において、レーザ加工制御部32Aは、第2プレ加工において使用する波長 $\lambda_p(N)$ の値を初期化する。具体的には、SR1205において、初期値である最小波長 λ_{pmin} を、第2プレ加工で使用する1番目の波長 $\lambda_p(1)$ にセットする。SR1206において、使用する波長 $\lambda_p(N)$ の番号 N に「1」をセットして、 $\lambda_p(1)$ を選択する。
- [0086] ここで、最小波長 λ_{pmin} は、第2プレ加工において使用する波長範囲の下限值である。第2プレ加工において使用する波長範囲は、基準波長 λ_a を含む所定範囲である。最小波長 λ_{pmin} は、基準波長 $\lambda_a - \Delta\lambda_L$ で求められる。 $\Delta\lambda_L$ は、基準波長 λ_a と最小波長 λ_{pmin} の差である。
- [0087] レーザ加工制御部32Aは、SR1207において、初期のプレ加工位置の位置データをセットする。SR1208において、レーザ加工制御部32Aは、セットした位置データに基づいて、XYZステージ34で被加工物41を初期のプレ加工位置に移動する。第2プレ加工のプレ加工位置は、第1プレ加工のプレ加工位置と同様に本加工が行われる部分以外の領域であるが、第1プレ加工のプレ加工位置とは異なる領域に設定される。
- [0088] 図13に示すように、レーザ加工制御部32Aは、SR1209において、目標波長 λ_t に、波長 $\lambda_p(N)$ を設定する。波長 $\lambda_p(N)$ の番号 N に「1」がセットされている場合には、目標波長 λ_t に、1番目の波長 $\lambda_p($

1) である最小波長 λ_{pmin} が設定される。そして、SR1210において、目標波長 λ_t をレーザ制御部13に送信する。

[0089] SR1211において、レーザ加工制御部32Aは、レーザ制御部13からのレーザ加工OK信号を待機する。レーザ加工制御部32Aは、レーザ加工OK信号を受信した場合（SR1211でY）には、SR1212において、レーザ加工に必要な繰り返し周波数 f_m とパルス数 N_m とで規定される発光トリガ T_r をレーザ制御部13に送信する。これにより、レーザ装置3からパルスレーザ光が出力されて、被加工物41のプレ加工位置に対して第2プレ加工が実行される。

[0090] 波長 $\lambda_p(N)$ による第2プレ加工が実行されると、SR1213において、観察装置66は、第2プレ加工の波長毎の加工状態を計測する。観察装置66は、イメージセンサ66eで被加工物41の表面を撮像して、波長 $\lambda_p(N)$ による第2プレ加工の加工状態を表す観察画像を記録する。これにより、レーザ加工制御部32Aは、記録された観察画像に基づいて、波長 $\lambda_p(N)$ による第2プレ加工の加工状態を評価する。

[0091] 具体的には、波長 $\lambda_p(N)$ による第2プレ加工により、被加工物41のプレ加工位置に加工が施されたか否かを判定する。例えば、第2プレ加工により、被加工物41の表面に丸い穴を形成する場合、穴が形成された場合は、加工が施されたと判定し、穴が形成されていない場合には、加工が施されていないと判定する。そして、レーザ加工制御部32Aは、判定結果 $Dok(N)$ を、第1波長評価値として、図14に示す第1波長評価値テーブル69に記録する。番号Nが「1」の場合は、1番目の波長 $\lambda_p(1)$ による第2プレ加工の判定結果 $Dok(1)$ が、第1波長評価値として、第1波長評価値テーブル69に記録される。

[0092] 1つの波長 $\lambda_p(N)$ について第1波長評価値の記録が終了した場合には、SR1214において、レーザ加工制御部32Aは、番号Nに1を加算する。SR1215において、レーザ加工制御部32Aは、 $\lambda_p(N-1)$ の波長の値に $\Delta\lambda_s$ を加算した値を、 $\lambda_p(N)$ の波長の値として設定する。

例えば、 $\lambda_p(1)$ の第1波長評価値の記録が終了したら、 N に1を加算する。初期のプレ加工位置の第2プレ加工が終了した段階では、 $N=1$ なので、1を加算すると $N=2$ となる。そして、 $N=2$ であるため、SR1215において、 $N-1=2-1=1$ となる。従って、 $\lambda_p(1)$ の値に $\Delta\lambda_s$ を加算した値が、 $\lambda_p(2)$ の波長の値として設定される。 $\lambda_p(1)$ の値は、初期値である最小波長 λ_{pmin} であるため、 $\lambda_p(2)=\lambda_{pmin}+\Delta\lambda_s$ となる。

[0093] SR1215で設定した $\lambda_p(N)$ の値が最大波長 λ_{pmax} 以下の場合には(SR1216で N)、レーザ加工制御部32Aは、次のプレ加工位置の位置データをセットする(SR1218)。最大波長 λ_{pmax} は、第2プレ加工において使用する波長範囲の上限値である。最大波長 λ_{pmax} は、基準波長 $\lambda_a+\Delta\lambda_U$ で求められる。 $\Delta\lambda_U$ は、基準波長 λ_a と最大波長 λ_{pmax} の差である。

[0094] SR1218において位置データをセットした後、SR1208において、レーザ加工制御部32Aは、XYZステージ34を制御して被加工物41を次のプレ加工位置に移動する。次のプレ加工位置において、SR1209からSR1215のステップが実行される。レーザ加工制御部32Aは、SR1213において、 $\lambda_p(N)=\lambda_p(2)$ の場合は、 $\lambda_p(2)$ の判定結果 $Dok(2)$ を第1波長評価値として、第1波長評価値テーブル69に記録する。

[0095] こうした処理が、 $\lambda_p(N)$ の値が λ_{pmax} を超えるまで(SR1216で Y)、繰り返される。このようにして、レーザ加工制御部32Aは、基準波長 λ_a を含む所定の波長範囲内でパルスレーザ光の波長を変化させながら、複数の波長で波長探索用プレ加工である第2プレ加工を実行する。

[0096] 図14に示すように、第1波長評価値テーブル69は、第2プレ加工において使用した複数の波長 $\lambda_p(N)$ の値と、各 $\lambda_p(N)$ に対応する第1波長評価値である判定結果 $Dok(N)$ とを対応付けて記録したテーブルである。上述のとおり、第2プレ加工においては、基準波長 λ_a を使用した場合

に、加工が施される直前のフルーエンスの最大値が使用される。基準波長 λ_a と最適波長 λ_{opt} が異なっている場合には、基準波長 λ_a よりも、最適波長 λ_{opt} の方が、加工速度 PS が大きいと考えられる。そのため、第2プレ加工においては、基準波長 λ_a を使用した場合に「加工NG」であっても、基準波長 λ_a とは異なる波長を使用した場合に、「加工OK」となる場合がある。

[0097] 例えば、図14に示すように、基準波長 λ_a が $\lambda_p(10)$ の場合、第2プレ加工では、波長探索用フルーエンス FL_{th} が使用されるため、 $\lambda_p(10)$ の第1波長評価値は「加工NG」である。波長探索用フルーエンス FL_{th} は、被加工物41に対して加工が施される直前のフルーエンス FL であるからである。一方、 $\lambda_p(10)$ よりも長波長側の $\lambda_p(12)$ から $\lambda_p(15)$ までは、第1評価値が「加工OK」となっている。 $\lambda_p(12)$ は「加工OK」の波長の最小値 λ_{okmin} であり、 $\lambda_p(15)$ は「加工OK」の波長の最大値 λ_{okmax} となる。最適波長 λ_{opt} は、最小値 λ_{okmin} から最大値 λ_{okmax} の範囲から決定される。

[0098] 図13のSR1217Aにおいて、レーザ加工制御部32Aは、第1波長評価値テーブル69に基づいて、最適波長 λ_{opt} を決定する。本例において、レーザ加工制御部32Aは、波長毎の加工状態を評価して、本加工に使用する最適波長 λ_{opt} を決定する最適波長決定部に相当する。図15は、SR1217Aの最適波長 λ_{opt} の決定処理のフローチャートである。

[0099] SR1217A1において、レーザ加工制御部32Aは、第2プレ加工を行って第1波長評価値を記録した第1波長評価値テーブル69を読み込む。レーザ加工制御部32Aは、SR1217A2において、第1波長評価値テーブル69から、第1波長評価値である判定結果 DoK が「加工OK」の波長 $\lambda_p(N)$ の範囲を読み出す。そして、「加工OK」の波長 $\lambda_p(N)$ の範囲から、「加工OK」の波長の最小値 λ_{okmin} と、「加工OK」の波長の最大値 λ_{okmax} とを求める。レーザ加工制御部32Aは、SR1217A3において、 $\lambda_{opt} = (\lambda_{okmin} + \lambda_{okmax}) / 2$ を計算

して、最適波長 λ_{opt} を求める。すなわち、最小値 λ_{okmin} と、最大値 λ_{okmax} の中間値を最適波長 λ_{opt} として決定する。図7のS1030Aにおいて示したように、レーザ加工の本加工は、最適波長 λ_{opt} を使用して実行される。

[0100] 3. 3 作用

レーザ加工システム2Aは、レーザ加工においては、パルスレーザ光の波長として、最適波長 λ_{opt} を使用する。レーザ加工制御部32Aは、基準波長 λ_a を含む所定の波長範囲内でパルスレーザ光の波長を変化させながら、複数の波長で波長探索用プレ加工を行い、プレ加工の加工状態を評価して最適波長 λ_{opt} を決定する。このように、本例においては、実際にプレ加工を行って最適波長 λ_{opt} を決定する。そのため、加工される被加工物41の材料において、不純物等の影響により、理論上の最適波長である基準波長 λ_a と実際の最適波長 λ_{opt} とが異なる場合でも、実際の最適波長 λ_{opt} を正確に求めることができる。そして、最適波長 λ_{opt} を使用してレーザ加工を行うため、被加工物41において効率よくパルスレーザ光が吸収される。これにより、加工速度PSを改善することができる。

[0101] 本例においては、レーザ加工装置4Aに搭載されている観察装置66を用いて、テーブル33上の被加工物41の加工状態を観察している。このため、観察装置66がレーザ加工装置4とは別に設けられている場合と比較して、加工状態の計測及び評価を短時間で行うことができる。このため、最適波長 λ_{opt} の探索を比較的短時間で行うことができる。

[0102] 被加工物41の材料は、図5の第1波長選択テーブル56に示した結晶材料であることが好ましい。なお、被加工物41の材料は、結晶材料でなくもよく、光子吸収が生じる吸収波長が予め判明しているガラス材料や有機材料等であってもよい。このような材料の場合は、予め判明している吸収波長を基準波長 λ_a として、最適波長 λ_{opt} の探索が行われる。

[0103] 3. 4 変形例

上記例では、第1波長選択テーブル56から基準波長 λ_a を読み出して、

図12のSR1205及び図13のSR1215に示すように、基準波長 λ_a に基づいて波長を変化させる所定の波長範囲を計算により求めている。こうした例に限らず、第1波長選択テーブル56に、波長を変化させる所定の波長範囲であって、基準波長 λ_a を含む波長範囲のデータを記録しておいてもよい。この場合、レーザ加工制御部32Aは、第1波長選択テーブル56から、材料名MNに対応する波長範囲のデータを取得する。これによれば、所定の波長範囲を求める計算が不要となる。

[0104] 上記例では、レーザ加工制御部32Aが、入力された材料名MNに基づいて第1波長選択テーブル56から基準波長 λ_a を求めており、レーザ加工制御部32が基準波長取得部に相当する。基準波長取得部は、材料名MNの代わりに、直接、被加工物41に応じた基準波長 λ_a の入力を受け付けてもよい。基準波長 λ_a の入力は、上述したマニュアル入力や外部装置からの入力であってもよい。基準波長 λ_a が直接入力される場合には、第1波長選択テーブル56を用いなくてもよい。

[0105] もちろん、第1波長選択テーブル56のように材料名MNと基準波長 λ_a との対応関係を記録した波長選択テーブルを用いることで、材料名MNを入力するだけで基準波長 λ_a を特定できるので、操作が簡便である。そのため、第1波長選択テーブル56のような波長選択テーブルを用いることが好ましい。

[0106] また、材料名MNは、材料の種類を特定する材料識別情報である。材料識別情報としては、材料名MNの他に、材料の種類を特定するコード情報などを使用することも可能である。

[0107] 4. 第2実施形態のレーザ加工システム

4. 1 構成

図16から図22は、第2実施形態のレーザ加工システム2Bを示す。図16に示すように、第2実施形態のレーザ加工システム2Bは、レーザ装置3と、レーザ加工装置4B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4Bは、第1実施形態のレーザ加工装置4A

の構成に加えて、加工深さ計測器 70 を備えている。レーザ加工制御部 32 B は、第 1 実施形態とは異なる方式の最適波長探索機能を備えている。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。

[0108] 加工深さ計測器 70 は、例えば、筐体 37 に取り付けられており、テーブル 33 上の被加工物 41 の表面を計測可能な位置に配置される。加工深さ計測器 70 は、被加工物 41 の表面の加工状態を計測する加工状態計測器の 1 つの態様であって、加工状態として加工深さ Depth を計測する。加工深さ計測器 70 は、例えば、共焦点型のレーザ顕微鏡である。

[0109] 図 17 において、符号 71 は、レーザ加工により、被加工物 41 の表面に形成された穴 71 である。図 17 A は、被加工物 41 の平面図であり、図 17 B は、図 17 A における A-A 断面を示す断面図である。加工深さ計測器 70 は、図 17 B において示される、穴 71 の加工深さ Depth を計測する。

[0110] また、図 16 に示すように、レーザ加工装置 4 B には、加工深さ計測器 70 に加えて、第 1 実施形態のレーザ加工装置 4 A と同様に観察装置 66 が設けられている。後述するように、レーザ加工装置 4 B においては、プレ加工の加工状態を計測する加工状態計測器としては、専ら加工深さ計測器 70 が機能し、観察装置 66 は加工状態計測には用いられない。しかし、観察装置 66 は、被加工物 41 の位置決め用途として有効であるため、レーザ加工装置 4 B においても設けられている。

[0111] 4. 2 動作

図 18 から図 21 を参照しながら、レーザ加工システム 2 B の動作を説明する。図 18 の S1000 B に示すように、第 2 実施形態のレーザ加工制御部 32 B の処理において、図 7 の第 1 実施形態の S1000 A の処理と異なるのは、最適波長 λ_{opt} の探索の方式である。第 2 実施形態では、S1021 A が、S1021 B に変更されている。その他の各ステップは、図 7 に示す第 1 実施形態と同様である。

- [0112] 図19及び図20に示すように、第2実施形態のS1021Bの最適波長 λ_{opt} の探索は、第1実施形態と異なり、波長探索用フルエンス FL_{th} を使用しない。そのため、第2実施形態のS1021Bにおいては、第1実施形態のように波長探索用フルエンス FL_{th} を決定する処理はない。第2実施形態のS1021Bは、レーザ加工の本加工に使用するフルエンス FL_m を用いて、波長探索用プレ加工を実行する方式の波長探索処理である。
- [0113] 図19及び図20に示す第2実施形態のS1021Bは、第1実施形態の図12及び図13のSR120と類似しており、同一のステップには同一の符号を付し、説明を省略する。まず、図19に示す第2実施形態のS1021Bにおいては、図12に示す第1実施形態のSR1203と異なり、SR1203Bにおいて、目標フルエンス FL_t にレーザ加工に使用するフルエンス FL_m を設定する点異なる。
- [0114] 図19及び図20に示す第2実施形態のS1021Bにおいて、SR1204からSR1212までの各ステップ、SR1214からSR1216の各ステップ、及びSR1218のステップは、図12及び図13に示す第1実施形態と同様である。第1実施形態においては、図13に示すように、SR1212とSR1214の間に、プレ加工の加工状態を計測して第1波長評価値を記録するステップであるSR1213が挿入されている。このため、第1実施形態では、波長を変化させる毎にプレ加工の加工状態を計測している。
- [0115] これに対して第2実施形態においては、図20に示すように、SR1212とSR1214の間に、プレ加工の加工状態を計測して評価値を記録するステップは挿入されていない。代わりに、SR1216の後に、プレ加工の加工状態を計測して、第2波長評価値を第2波長評価値テーブルに記録するステップであるSR1216-2が挿入されている。このため、第2実施形態では、複数の波長によるプレ加工を実行した後、複数のプレ加工位置の加工状態をまとめて計測する。

- [0116] 第2実施形態のSR1216-2において、レーザ加工制御部32Bは、複数の波長の加工状態を計測し、各プレ加工位置の第2波長評価値を、図22に示す第2波長評価値テーブル72に記録する。そして、SR1217Bにおいて、レーザ加工制御部32Bは、第2波長評価値テーブル72を参照して、最適波長 λ_{opt} を決定する。
- [0117] SR1216-2の手順を示す図21において、レーザ加工制御部32Bは、まず、SR1216-21において、番号Nに「1」をセットして初期化する。SR1216-22において、レーザ加工制御部32Bは、XYZステージ34を制御して、加工深さ計測器70の計測位置に被加工物41のN番目のプレ加工位置を位置決めする。N=1の場合は、1番目の加工位置を計測位置に位置決めする。SR1216-23において、加工深さ計測器70によって、加工状態として、加工深さDepth(N)を計測する。SR1216-24において、加工深さDepth(N)から、第2波長評価値として加工速度PS(N)を計算する。加工速度PS(N)は、上記式(1)で示したように、加工深さDepthをパルス数Nmで割った値であり、 $PS(N) = \text{Depth}(N) / N_m$ で計算される。
- [0118] SR1216-25において、レーザ加工制御部32Bは、プレ加工に使用した波長 $\lambda_p(N)$ と加工速度PS(N)とを対応付けて、図22に示すように、第2波長評価値テーブル72に記録する。SR1216-26において、レーザ加工制御部32Bは、番号Nに「1」を加算する。番号Nが最大値 N_{max} 以下の場合には(SR1216-27でN)、レーザ加工制御部32Bは、次のプレ加工位置が有ると判定する。最大値 N_{max} は、加工状態の評価対象となるプレ加工位置の総数である。レーザ加工制御部32Bは、次のプレ加工位置が有ると判定した場合には、SR1216-22に戻り、次のプレ加工位置に対して、SR1216-25までの処理を繰り返して、次のプレ加工位置の第2波長評価値を記録する。
- [0119] レーザ加工制御部32Bは、番号Nが最大値 N_{max} を超えるまで(SR1216-27でY)、すなわち、すべてのプレ加工位置の加工状態の評価

が終了するまで、SR1216-22からSR1216-26までの処理を繰り返す。

[0120] 図20のSR1217Bにおいて、レーザ加工制御部32Bは、第2波長評価値テーブル72を参照して、加工速度PS(N)が最大の波長 $\lambda_p(N)$ を最適波長 λ_{opt} として決定する。

[0121] 4.3 作用

このように、第2実施形態において、レーザ加工制御部32Bは、本加工に使用するフルーエンスFL_mを目標フルーエンスFL_tに設定して、波長探索用プレ加工を実行する。そして、最適波長決定部として機能するレーザ加工制御部32Bは、複数の波長で行ったプレ加工の加工深さDepthから加工速度PSを求めて、加工速度PSが最大の波長を最適波長 λ_{opt} として決定する。第1実施形態と同様に、実際にプレ加工を行って最適波長 λ_{opt} を決定するため、実際の最適波長 λ_{opt} を正確に求めることができる。これにより、加工速度PSを改善することができる。

[0122] また、レーザ加工装置4Bに搭載されている加工深さ計測器70を用いて、テーブル33上の被加工物41の加工状態を観察できるため、第1実施形態と同様に、加工状態の計測及び評価を短時間で行うことができる。このため、最適波長 λ_{opt} の探索を比較的短時間で行うことができる。また、加工状態計測器として加工深さ計測器70を使用するため、加工深さDepthから加工速度PSを評価値として使用できる。そのため、加工深さDepthまで計測することができない観察装置66を使用する場合と比較して高精度な評価が可能となる。これにより、最適波長 λ_{opt} の探索を高精度に行うことができる。

[0123] また、第2実施形態は、第1実施形態と異なり、次のような効果が得られる。図23及び図24は、被加工物41のそれぞれの材料A、Bにおける、フルーエンスFLと加工深さDepthとの関係について、パルスレーザ光の波長依存性を示すグラフである。ここで、加工深さDepthは、加工に必要なパルス数Nmのパルスレーザ光を照射した場合の値である。また、図

23及び図24のグラフは、 $\lambda_a < \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4 < \lambda_5$ 関係にある5つの波長のパルスレーザ光で材料A及びBを加工した場合の例であり、いずれも、基準波長である λ_a よりも長波長側に最適波長 λ_{opt} が存在する例である。

[0124] 図23及び図24に示すように、材料の種類に拘わらず、一般に、パルスレーザ光の波長が同じ場合は、フルーエンス FL の値が大きいほど、加工深さ $Depth$ の値は増加する。また、上述のとおり、フルーエンス FL_{th} は、波長 λ_a を使用した場合に被加工物41に対して加工が施される直前のフルーエンス FL の最大値と定義される。そのため、図23及び図24に示すように、材料の種類に拘わらず、波長 λ_a においては、フルーエンス FL_{th} で加工した場合は、「加工NG」となり、加工深さ $Depth$ は「0」である。

[0125] 図23の材料Aでは、波長 λ_a に加えて、 λ_1 及び λ_5 においても、フルーエンス FL_{th} で加工した場合に「加工NG」となり、加工深さ $Depth$ は「0」である。つまり、図23の材料Aにおいては、波長 λ_a に加えて、波長 λ_1 及び λ_5 においても、フルーエンス FL_{th} では、「加工OK」となる加工閾値のフルーエンス FL に達していない。一方、波長 λ_2 、 λ_3 及び λ_4 においては、フルーエンス FL_{th} が加工閾値のフルーエンス FL に達しており、加工深さ $Depth$ は「0」を超える。すなわち、波長 λ_2 、 λ_3 及び λ_4 においては、「加工OK」となる。

[0126] したがって、図23の材料Aの場合、波長探索用フルーエンス FL_{th} を使用して最適波長 λ_{opt} を探索する第1実施形態の方式では、「加工OK」の波長 $\lambda_2 \sim \lambda_4$ の範囲内に存在する波長であって、フルーエンス FL と加工深さ $Depth$ との関係を表す曲線が点P1を通過する波長が、最適波長 λ_{opt} として決定される。点P1は、「加工OK」の波長の最大値 λ_{okmax} である波長 λ_4 と、「加工OK」の波長の最小値 λ_{okmin} である波長 λ_2 の中間値となる。この中間値は、波長 λ_3 に近くなる。

[0127] また、図23の材料Aの場合、レーザ加工時のフルーエンス FL_m を使用

し、かつ、加工速度 PS を求めることにより最適波長 λ_{opt} を探索する第2実施形態の方式では、フルーエンス FL_m において、点 P_2 を通過する波長 λ_3 の加工深さ $Depth$ が最大となり、加工速度 PS も最大となる。そのため、第2実施形態の方式では、波長 λ_3 が最適波長 λ_{opt} として決定される。以上のように材料 A を加工する場合は、第1の実施形態と第2の実施形態で決定される最適波長 λ_{opt} は略一致する。

[0128] 図24の材料 B では、図23の材料 A の場合と同様に、波長 λ_a 、 λ_1 及び λ_5 において、フルーエンス FL_{th} で加工した場合に「加工 NG 」となり、加工深さ $Depth$ は「0」である。つまり、図24の材料 B も、図23の材料 A と同様に、波長 λ_a 、 λ_1 及び λ_5 において、フルーエンス FL_{th} では、「加工 OK 」となる加工閾値のフルーエンス FL に達していない。一方、波長 λ_2 、 λ_3 及び λ_4 においては、フルーエンス FL_{th} が加工閾値のフルーエンス FL に達しており、加工深さ $Depth$ は「0」を超える。すなわち、波長 λ_2 、 λ_3 及び λ_4 においては、「加工 OK 」となる。

[0129] したがって、図24の材料 B の場合、波長探索用フルーエンス FL_{th} を使用して最適波長 λ_{opt} を探索する第1実施形態の方式では、「加工 OK 」の波長 $\lambda_2 \sim \lambda_4$ の範囲内に存在する波長であって、フルーエンス FL と加工深さ $Depth$ との関係を表す曲線が点 P_3 を通過する波長が、最適波長 λ_{opt} として決定される。点 P_3 は、「加工 OK 」の波長の最大値 λ_{okmax} である波長 λ_4 と、「加工 OK 」の波長の最小値 λ_{okmin} である波長 λ_2 の中間値となる。この中間値は、波長 λ_3 に近くなる。

[0130] ところが、図24の材料 B の場合、レーザ加工時のフルーエンス FL_m を使用し、かつ、加工速度 PS を求めることにより最適波長 λ_{opt} を探索する第2実施形態の方式では、フルーエンス FL_m において、点 P_4 を通過する波長 λ_4 の加工深さ $Depth$ が最大となり、加工速度 PS も最大となる。そのため、第2実施形態の方式では、波長 λ_4 が最適波長 λ_{opt} として決定される。以上のように、材料 A と異なり、フルーエンス FL_{th} とフルーエンス FL_m において加工深さ $depth$ の波長依存特性が変化する材料

Bを加工する場合は、第1の実施形態と第2の実施形態で決定される最適波長 λ_{opt} は大きく異なることがある。

[0131] 最適波長 λ_{opt} としては、レーザ加工に使用するフルーエンス F_{Lm} において加工速度 PS が最大となる波長が選択されるのが適切である。図23の特性を持つ材料Aの場合には波長 λ_3 が選択されるのが適切であり、図24の特性を持つ材料Bの場合は、波長 λ_4 が選択されるのが適切である。第1実施形態の方式と異なり、第2実施形態の方式では、図23及び図24に示すように各材料A、Bの特性に違いがあっても、常に適切な最適波長 λ_{opt} を決定することが可能である。このため、第1実施形態と比較して、第2実施形態の方式が好ましい。

[0132] 上記例では、図20に示すSR1216-2において、複数の波長でプレ加工を行った後、各波長の加工状態の計測及び評価をまとめて行っている。そのため、図13に示す第1実施形態のSR1213のように、1つの波長でプレ加工を行う毎に加工状態の計測及び評価を行う場合と比べて、計測及び評価を効率的に行うことができる。もちろん、第2実施形態においても、第1実施形態のように1つの波長でプレ加工を行う毎に加工状態の計測及び評価を行ってもよい。

[0133] また、加工深さ計測器70としては、レーザ顕微鏡の他に、レーザ変位計や原子間力顕微鏡（AFM: Atomic Force Microscope）などを使用することが可能である。

[0134] 5. 第3実施形態のレーザ加工システム

5. 1 構成

図25から図29に示す第3実施形態のレーザ加工システム2Cは、レーザ装置3Cとレーザ加工装置4Cとを備えている。第3実施形態のレーザ装置3Cは、レーザ装置3の固体レーザ装置10に代えて固体レーザ装置10Cを備えている。また、レーザ制御部13がレーザ制御部13Cに変更されている。固体レーザ装置10Cは、固体レーザ装置10の構成に加えて、同期回路81、パルス波形調節器82、及び光シャッタ83が追加されており

、パルスレーザ光のパルス幅 ΔT を変化させるパルス幅可変機能を備えている。レーザ装置3Cの他の構成は、レーザ装置3の構成と同様である。以下、レーザ装置3Cについて、レーザ装置3との相違点を中心に説明する。

[0135] 同期回路81は、発光トリガTrまたは図示しない内部発光トリガが入力されるタイミングと同期して、ポンピングレーザ装置19に第1のトリガを送信し、かつ、パルス波形調節器82に対して、第1のトリガに対して遅延されたタイミングで第2のトリガを送信するように構成されている。光シャッタ83は、波長可変チタンサファイヤ発振器16とチタンサファイヤ増幅器17の間の光路上に配置されている。光シャッタ83は、高速の光シャッタであり、EOポッケルスセルと、偏光子と、EOポッケルスセルに高電圧を印加する電源とを含む。光シャッタ83は、電源に対して矩形波電圧であるパルス信号が加えられると、入力された光の波形を、電圧波形に対応する光パルスに整形する。パルス波形調節器82は、レーザ加工制御部32Cから送信されるパルス幅 ΔT のデータを、レーザ制御部13Cを介して受信する。そして、受信したパルス幅 ΔT に基づいて、光シャッタ83を駆動する。パルス波形調節器82は、受信したパルス幅 ΔT のパルス信号を光シャッタ83の電源に入力することで、パルス幅 ΔT に対応するパルス波形を有するパルスレーザ光を生成する。

[0136] ここで、同期回路81からポンピングレーザ装置19に第1のトリガが入力されると、ポンピングレーザ装置19からチタンサファイヤ発振器16に励起用パルスレーザ光が出力される。チタンサファイヤ発振器16において、励起用パルスレーザ光が入力されると、チタンサファイヤ発振器16のチタンサファイヤ結晶が励起され、励起用パルスレーザ光の入力タイミングに対して遅れてレーザ発振する。同期回路81は、チタンサファイヤ発振器16から出力されるパルスレーザ光が光シャッタ83によって光整形されて所望のパルス波形となるように、第1のトリガに対して所定時間遅延して第2のトリガをパルス波形調節器82に出力するように設定される。これにより、チタンサファイヤ発振器16がレーザ発振してパルスレーザ光を出力する

タイミングに合わせて、光シャッタ 8 3 が動作する。

[0137] レーザ加工装置 4 C は、レーザ加工装置 4 A のレーザ加工制御部 3 2 A に代えて、レーザ加工制御部 3 2 C を備えている。他の構成はレーザ加工装置 4 A と同様である。レーザ加工制御部 3 2 C は、レーザ加工制御部 3 2 A と同様に基準波長取得部として機能する。レーザ加工制御部 3 2 C は、図 2 6 に示す第 2 波長選択テーブル 8 4 を参照して、被加工物 4 1 の材料に応じた基準波長 λ_a を取得する。第 2 波長選択テーブル 8 4 は、例えば、レーザ加工制御部 3 2 C の内部メモリに記憶される。

[0138] 第 2 波長選択テーブル 8 4 は、図 5 に示す第 1 波長選択テーブル 5 6 と異なり、1 光子吸収波長に加えて、2 光子の吸収波長である 2 光子吸収波長が材料毎に記録されたテーブルである。2 光子吸収は、材料が 2 つの光子を同時に吸収して、2 つの光子で 1 つの電子が励起される過程をいう。2 光子吸収では、1 つの光子当たりのエネルギーが 1 光子吸収の半分となる。そのため、光子の振動数 ν が $1/2$ となり、2 光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ は 1 光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ の倍になる。

[0139] レーザ加工制御部 3 2 C は、第 2 波長選択テーブル 8 4 を参照して、材料に応じた基準波長 λ_a として、1 光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ に加えて、2 光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ を取得する。そして、レーザ加工制御部 3 2 C は、1 光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ が所定値以上の場合に、プレ加工に使用する基準波長 λ_a として 2 光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ を選択する波長選択部として機能する。さらに、レーザ加工制御部 3 2 C は、2 光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ が選択された場合において、パルス幅 ΔT を、1 光子吸収波長が選択された場合の第 1 パルス幅 $\Delta T_{1h\nu}$ よりも短い第 2 パルス幅 $\Delta T_{2h\nu}$ に設定するパルス幅設定部として機能する。

[0140] 5. 2 動作

図 2 7 に示す第 3 実施形態の S 1 0 0 0 C のフローチャートは、第 3 実施形態のレーザ加工制御部 3 2 C の処理手順を示す。第 3 実施形態の S 1 0 0 0 C は、図 7 に示す第 1 実施形態の S 1 0 0 0 A の変形例である。第 3 実施

形態のS1000Cにおいて、第1実施形態のS1000Aと異なる点は、S1020がS1020Cに、S1021AがS1021Cに、S1050がS1050Cに、それぞれ変更されている点であり、他のステップは同様である。以下、相違点を中心に説明する。

[0141] レーザ加工制御部32Cは、材料名MNを取得すると（S1010でY）、S1020Cにおいて、プレ加工に使用する基準波長 λ_a の選択と、パルス幅 ΔT_a の決定を行う。レーザ加工制御部32Cは、S1021Cにおいて、図12及び図13に示す第1実施形態の波長探索処理と同様の手順で、プレ加工を行って最適波長 λ_{opt} の探索を行う。S1021Cにおいて、レーザ加工制御部32Cは、プレ加工の目標波長 λ_t に、選択した基準波長 λ_a を設定し、決定したパルス幅 ΔT_a を、プレ加工のパルス幅 ΔT に設定し、設定したデータをレーザ制御部13Cに送信する。これにより、基準波長 λ_a 及びパルス幅 ΔT_a を使用して最適波長 λ_{opt} の探索が行われる。最適波長 λ_{opt} の探索では、第1実施形態と同様に、波長探索用フルエンス FL_{th} を決定し、波長探索用フルエンス FL_{th} を使用して最適波長 λ_{opt} を決定する。

[0142] S1030Aにおいて、レーザ加工制御部32Cは、決定した最適波長 λ_{opt} を目標波長 λ_t に設定して、レーザ加工の本加工を行う。S1050Cにおいて、レーザ加工制御部32Cは、S1020Cにおいて、決定したパルス幅 ΔT_a をパルス幅 ΔT に設定して、レーザ制御部13Cに送信する。これにより、パルス幅 ΔT_a が本加工のパルス幅 ΔT としても使用される。

[0143] 図28は、図27のS1020Cの処理手順を示す。レーザ加工制御部32Cは、まず、S1021C1において、第2波長選択テーブル84を参照して、材料名に対応する基準波長 λ_a として、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ と2光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ を取得する。次に、S1020C2において、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ が所定値 λ_z 以上か否かを判定する。

[0144] 1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ が所定値 λ_z 以上の場合（S1020C2でY）、

レーザ加工制御部32Cは、S1020C3において、基準波長 λ_a として1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ を選択する。また、レーザ加工制御部32Cは、S1020C3において、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ に対応する第1パルス幅 $\Delta T_{1h\nu}$ をパルス幅 ΔT_a として決定する。

[0145] 一方、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ が所定値 λ_z 未満の場合（S1020C2でN）、レーザ加工制御部32Cは、S1020C4において、基準波長 λ_a として2光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ を選択する。また、レーザ加工制御部32Cは、S1020C4において、2光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ に対応する第2パルス幅 $\Delta T_{2h\nu}$ をパルス幅 ΔT_a として決定する。S1020C5において、レーザ加工制御部32Cは、レーザ制御部13Cに送信するパルス幅 ΔT に、パルス幅 ΔT_a を設定する。

[0146] 所定値 λ_z は、例えば、220nmである。220nmという波長は、第2波長選択テーブル84において、ダイヤモンドとSiO₂のそれぞれの1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ の間に位置する。そのため、レーザ加工制御部32Cは、被加工物41の材料がダイヤモンドの場合は、基準波長 λ_a として、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ を選択し、SiO₂の場合は、基準波長 λ_a として、2光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ を選択する。所定値 $\lambda_z = 220\text{nm}$ の場合は、第2波長選択テーブル84において、材料に応じてハッチングで示す吸収波長が、基準波長 λ_a として選択される。

[0147] また、第2パルス幅 $\Delta T_{2h\nu}$ は、第1パルス幅 $\Delta T_{1h\nu}$ よりも短い。例えば、第1パルス幅 $\Delta T_{1h\nu}$ は、 $1\text{ns} \leq \Delta T_{1h\nu} \leq 50\text{ns}$ の範囲内で設定され、第2パルス幅 $\Delta T_{2h\nu}$ は、 $0.01\text{ns} \leq \Delta T_{2h\nu} < 1\text{ns}$ の範囲内で設定される。

[0148] 図29に示すS2000Cは、第3実施形態のレーザ制御部13Cの処理手順を示すフローチャートである。S2000Cは、図4に示す比較例のS2000の処理手順と同様である。相違点は、レーザ加工制御部32Cからパルス幅 ΔT が送信されることに伴って、図4に示すS2010とS2090の各ステップが、それぞれS2010C及びS2090Cに変更されてい

る点と、S 2 0 1 1 Cが追加される点である。レーザ加工制御部3 2 Cは、S 2 0 1 0 Cにおいて、目標波長 λ_t と目標パルスエネルギー E_t パルス幅 ΔT に加えて、パルス幅 ΔT を受信する。S 2 0 1 1 Cにおいて、受信したパルス幅 ΔT がパルス波形調節器8 2にパルス幅 ΔT が送信される。S 2 0 9 0 Cにおいて、レーザ加工制御部3 2 Cは、目標波長 λ_t と目標パルスエネルギー E_t に加えて、パルス幅 ΔT の変更要求を待機する。

[0149] 5. 3 作用

第3実施形態において、レーザ加工制御部3 2 Cは、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ が所定値 λ_z よりも短い場合、基準波長 λ_a として2光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ を選択する。材料のバンドギャップが比較的小さく、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ が長い場合には、固体レーザ装置1 0から出力されるパルスレーザ光として、第2高調波（3 2 5 nm～5 5 0 nm）または第3高調波（2 1 7 nm～3 6 7 nm）を使用することができる。第2高調波または第3高調波であれば、波長変換効率が比較的高いため、高いパルスエネルギーを確保することができる。パルスエネルギーが高いと、効率よく光子吸収を生じさせることができるため、加工速度PSが改善する。

[0150] これに対して、材料のバンドギャップが比較的大きく、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ が短い場合には、固体レーザ装置1 0から出力されるパルスレーザ光として、第4高調波（1 6 2 nm～2 7 5 nm）を使用することになる。第4高調波は、第2または第3高調波と比較して、波長変換効率が低いため、パルスエネルギーが低下する。パルスエネルギーが低いと、効率よく光子吸収を生じさせることができないため、加工速度PSが低下する。

[0151] このため、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ が短い場合には、1光子吸収波長 $\lambda_{1h\nu}$ に代えて2光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ を基準波長 λ_a として選択すれば、第2または第3高調波を使用することができる。これにより、波長変換効率が改善するため、加工速度PSも改善できる。ただし、2光子吸収は、2つの光子を同時に吸収させる必要があるため、1光子吸収よりも吸収効率が低い。そのため、レーザ加工制御部3 2 Cは、2光子吸収波長 $\lambda_{2h\nu}$ を選択し

た場合には、第1パルス幅 $\Delta T1$ よりも短い第2パルス幅 $\Delta T2$ をパルス幅 ΔTa に決定する。これにより、2光子吸収の吸収効率の改善が期待できる。また、2光子吸収の吸収効率を向上するために、2光子吸収波長 $\lambda2$ を選択した場合には、1光子吸収波長 $\lambda1$ を選択した場合よりも、パルスレーザ光のピークパワーを上げることが好ましい。

[0152] 5. 4 変形例

上記例において、図27に示すS1021Cの最適波長 λopt の探索を、波長探索用フルエンス $FLth$ を使用する第1実施形態の方式で行う例で説明したが、波長探索用フルエンス $FLth$ を使用しない第2実施形態の方式で行ってもよい。この場合には、第2実施形態のレーザ加工装置4Bと同様に、レーザ加工装置4Cに加工深さ計測器70が設けられる。

[0153] 6. 第4実施形態のレーザ加工システム

6. 1 構成

図30から図36に示す第4実施形態のレーザ加工システム2Dは、レーザ装置3Cと、レーザ加工装置4Dとを備えている。レーザ加工システム2Dにおいて、図25に示す第3実施形態のレーザ加工システム2Cと異なる点は、レーザ加工装置4Cに代えて、レーザ加工装置4Dを備えている点である。その他の点は第3実施形態のレーザ加工システム2Cと同様である。

[0154] レーザ加工装置4Dは、加工深さ計測器70を備えている。また、レーザ加工装置4Cのレーザ加工制御部32Cに代えて、レーザ加工制御部32Dを備えている。レーザ加工制御部32Dは、レーザ加工制御部32Cと同様に、1光子吸収波長 $\lambda1$ が所定値 λz 未満の場合に2光子吸収波長 $\lambda2$ を基準波長 λa として選択する波長選択部として機能する。第4実施形態においても、第2波長選択テーブル84を使用する。第2波長選択テーブル84は、レーザ加工制御部32Cと同様に、レーザ加工制御部32Dの内部メモリ等に記憶されている。

[0155] また、レーザ加工制御部32Dは、パルス幅設定部として機能する点はレーザ加工制御部32Cと同様である。すなわち、レーザ加工制御部32Dは

、1光子吸収波長 $\lambda_1 h\nu$ が選択された場合に、第1パルス幅 $\Delta T_1 h\nu$ をパルス幅 ΔT_a に設定し、2光子吸収波長 $2 h\nu$ が選択された場合に、第2パルス幅 $\Delta T_2 h\nu$ をパルス幅 ΔT_a に設定する。加えて、レーザ加工制御部32Dは、設定したパルス幅 ΔT_a を基準パルス幅として、パルス幅 ΔT_a を含む所定範囲のパルス幅の中から、本加工に使用する最適パルス幅 ΔT_{opt} を決定する最適パルス幅決定部として機能する。

[0156] 6. 2 動作

図31及び図32に示す第4実施形態のS1000Dのフローチャートは、第4実施形態のレーザ加工制御部32Dの処理手順を示す。図18に示すS1000Bや図27に示す第3実施形態のS1000Cと同じステップについては、説明を省略し、以下相違点を中心に説明する。

[0157] 図31に示すように、第4実施形態のS1000Dにおいて、図27に示す第3実施形態のS1000Cと同様に、レーザ加工制御部32Dは、S1020Cの基準波長 λ_a の選択とパルス幅 ΔT_a の決定を行う。また、図18に示す第2実施形態のS1000Bと同様に、レーザ加工制御部32Dは、S1021Bの最適波長 λ_{opt} の探索を行う。

[0158] 加えて、レーザ加工制御部32Dは、S1020Cにおいて決定したパルス幅 ΔT_a を基準パルス幅として、S1022Dにおいて、基準パルス幅を含む所定範囲のパルス幅の中から、本加工に使用する最適パルス幅 ΔT_{opt} を決定する。

[0159] レーザ加工制御部32Dは、S1031Dにおいて、レーザ制御部13Cに送信されるパルス幅 ΔT に最適パルス幅 ΔT_{opt} を設定する。そして、図32に示すS1050Cにおいて、レーザ加工制御部32Dは、最適波長 λ_{opt} が設定された目標波長 λ_t に加えて、最適パルス幅 ΔT_{opt} が設定されたパルス幅 ΔT をレーザ制御部13Cに送信する。これにより、図32のS1090において、最適波長 λ_{opt} 及び最適パルス幅 ΔT_{opt} のパルスレーザ光でレーザ加工が実行される。

[0160] 図33及び図34において、S1022Dの最適パルス幅 ΔT_{opt} の探

索の処理手順を示す。図33のS1022Dの最適パルス幅 ΔT_{opt} の探索において、レーザ加工制御部32Dは、図19及び図20に示す第2実施形態のS1021Bと同様に、レーザ加工の本加工に使用するフルーエンス FL_m を用いて、パルス幅探索用プレ加工を実行する。

[0161] 第4実施形態の図31に示すS1022Dは、最適パルス幅 ΔT_{opt} を求めるか、最適波長 λ_{opt} を求めるかについて異なるものの、全体の処理の流れとしては、第2実施形態の図19及び図20のS1021Bと類似する。

[0162] 図33に示すように、まず、レーザ加工制御部32Dは、SR1301において目標パルスエネルギー E_t に、レーザ加工時のパルスエネルギー E_m を設定し、SR1302において、目標パルスエネルギー E_t をレーザ制御部13Cに送信する。SR1303において、目標フルーエンス FL_t にレーザ加工時のフルーエンス FL_m を設定する。レーザ加工制御部32Dは、SR1304において、目標フルーエンス FL_t となるようにアッテネータ52の透過率 T を設定する。

[0163] SR1305において、レーザ加工制御部32Dは、パルス幅探索用プレ加工において使用する $\Delta T_p(N)$ の値を初期化する。具体的には、SR1305において、初期値である最小パルス幅 ΔT_{pmin} を、パルス幅探索用プレ加工で使用する1番目のパルス幅 $\Delta T(1)$ にセットする。そして、SR1306において、使用するパルス幅 $\Delta T_p(N)$ の番号 N に「1」をセットして、 $\Delta T_p(1)$ を選択する。

[0164] ここで、最小パルス幅 ΔT_{pmin} は、パルス幅探索用プレ加工において使用する範囲の下限值である。パルス幅探索用プレ加工において使用する範囲は、基準パルス幅として設定されたパルス幅 ΔT_a を含む所定範囲である。最小パルス幅 ΔT_{pmin} は、パルス幅 $\Delta T_a - \Delta TL$ で求められる。 ΔTL は、パルス幅 ΔT_a と最小パルス幅 ΔT_{pmin} の差である。

[0165] レーザ加工制御部32Dは、SR1307において、初期のプレ加工位置の位置データをセットする。SR1308において、レーザ加工制御部32

Dは、セットした位置データに基づいて、XYZステージ34で被加工物41を初期のプレ加工位置に移動する。

[0166] 図34に示すように、レーザ加工制御部32Dは、SR1309において、パルス幅 ΔT に、 $\Delta T_p(N)$ を設定する。 $\Delta T_p(N)$ の番号Nに「1」がセットされている場合には、パルス幅 ΔT に、1番目のパルス幅 $\Delta T_p(1)$ である最小パルス幅 ΔT_{pmin} が設定される。そして、SR1310において、パルス幅 ΔT をレーザ制御部13Cに送信する。

[0167] SR1311において、レーザ加工制御部32Dは、レーザ制御部13からのレーザ加工OK信号を待機する。レーザ加工制御部32Dは、レーザ加工OK信号を受信した場合（SR1311でY）には、SR1312において、レーザ加工に必要な繰り返し周波数 f_m とパルス数 N_m とで規定される発光トリガ T_r をレーザ制御部13に送信する。これにより、レーザ装置3からパルスレーザ光が出力されて、被加工物41のプレ加工位置に対してパルス幅探索用プレ加工が実行される。

[0168] 1つのパルス幅 $\Delta T_p(N)$ についてパルス幅探索用プレ加工が終了した場合には、SR1314において、レーザ加工制御部32Dは、番号Nに1を加算する。SR1315において、レーザ加工制御部32Dは、パルス幅 $\Delta T_p(N-1)$ の値に ΔT_s を加算した値を、 $\Delta T_p(N)$ のパルス幅の値として設定する。例えば、 $\Delta T_p(1)$ のプレ加工が終了したら、Nに1を加算する。初期のプレ加工位置のプレ加工が終了した段階では、 $N=1$ なので、1を加算すると $N=2$ となる。そして、 $N=2$ であるため、SR1315において、 $N-1=2-1=1$ となる。従って、 $\Delta T_p(1)$ の値に ΔT_s を加算した値が、 $\Delta T_p(2)$ のパルス幅の値として設定される。 $\Delta T_p(1)$ の値は、初期値である最小パルス幅 ΔT_{pmin} であるため、 $\Delta T_p(2) = \Delta T_{pmin} + \Delta T_s$ となる。

[0169] SR1315で設定した $\Delta T_p(N)$ の値が最大パルス幅 ΔT_{pmax} 以下の場合には（SR1316でN）、レーザ加工制御部32Dは、次のプレ加工位置の位置データをセットする（SR1318）。最大パルス幅 ΔT_p

$m a x$ は、パルス幅探索用プレ加工において使用する波長範囲の上限値である。最大パルス幅 $\Delta T p m a x$ は、パルス幅 $\Delta T a + \Delta T U$ で求められる。 $\Delta T U$ は、パルス幅 $\Delta T a$ と最大パルス幅 $\Delta T p m a x$ の差である。

[0170] $S R 1 3 1 6 - 2$ において、レーザ加工制御部 3 2 D は、複数の波長の加工状態を計測し、各プレ加工位置のパルス幅評価値を、図 3 6 に示すパルス幅評価値テーブル 8 6 に記録する。そして、 $S R 1 3 1 7$ において、レーザ加工制御部 3 2 D は、パルス幅評価値テーブル 8 6 を参照して、最適パルス幅 $\Delta T o p t$ を決定する。

[0171] 図 3 5 は、 $S R 1 3 1 6 - 2$ の処理手順を示すフローチャートである。 $S R 1 3 1 6 - 2$ は、図 2 1 の第 2 実施形態の $S R 1 2 1 6 - 2$ の処理手順とほぼ同様である。図 3 5 に示すように、レーザ加工制御部 3 2 D は、まず、 $S R 1 3 1 6 - 2 1$ において、番号 N に「1」をセットして初期化する。 $S R 1 3 1 6 - 2 2$ において、レーザ加工制御部 3 2 D は、加工深さ計測器 7 0 の計測位置に被加工物 4 1 の N 番目のプレ加工位置を位置決めする。 $N = 1$ の場合は、1 番目の加工位置を計測位置に位置決めする。 $S R 1 3 1 6 - 2 3$ において、加工深さ計測器 7 0 によって、加工状態として、加工深さ $D e p t h (N)$ を計測する。 $S R 1 3 1 6 - 2 4$ において、加工深さ $D e p t h (N)$ から、パルス幅評価値として加工速度 $P S (N)$ を計算する。加工速度 $P S (N)$ は、上記式 (1) で示したように、 $P S (N) = D e p t h (N) / N m$ で計算される。

[0172] $S R 1 3 1 6 - 2 5$ において、レーザ加工制御部 3 2 D は、パルス幅探索用プレ加工に使用したパルス幅 $\Delta T p (N)$ と加工速度 $P S (N)$ とを対応付けて、図 3 6 に示すように、パルス幅評価値テーブル 8 6 に記録する。 $S R 1 3 1 6 - 2 6$ において、レーザ加工制御部 3 2 D は、番号 N に「1」を加算する。番号 N が最大値 $N m a x$ 以下の場合には ($S R 1 3 1 6 - 2 7$ で N)、レーザ加工制御部 3 2 D は、次のプレ加工位置があると判定する。最大値 $N m a x$ は、加工状態の評価対象となるプレ加工位置の総数である。レーザ加工制御部 3 2 D は、次のプレ加工位置があると判定した場合には、 S

R 1 3 1 6 - 2 2 に戻り、次のプレ加工位置に対して、S R 1 3 1 6 - 2 5 までの処理を繰り返して、次のプレ加工位置のパルス幅評価値を記録する。

[0173] レーザ加工制御部 3 2 D は、番号 N が最大値 N_{max} を超えるまで (S R 1 3 1 6 - 2 7 で Y)、すなわち、すべてのプレ加工位置の加工状態の評価が終了するまで、S R 1 3 1 6 - 2 2 から S R 1 3 1 6 - 2 6 までの処理を繰り返す。

[0174] 図 3 4 の S R 1 3 1 7 において、レーザ加工制御部 3 2 D は、パルス幅評価値テーブル 8 6 を参照して、加工速度 $PS(N)$ が最大のパルス幅 $\Delta T_p(N)$ を最適パルス幅 ΔT_{opt} として決定する。

[0175] 6. 3 作用

第 4 実施形態において、レーザ加工制御部 3 2 D は、パルスレーザ光のパルス幅を変化させながら、複数のパルス幅でパルス幅探索用プレ加工を実行し、パルス幅毎の加工状態を計測し、パルス幅毎の加工状態を評価して、最適パルス幅 ΔT_{opt} を決定する。このため、最適波長 λ_{opt} に加えて、最適パルス幅 ΔT_{opt} でレーザ加工できるため、光子の吸収効率のさらなる改善と、加工速度 PS の向上が期待できる。特に、2 光子吸収は、1 光子吸収よりも吸収効率が低いので、本例は有効である。

[0176] 7. 波長可変レーザ装置の具体例

7. 1 構成

図 3 7 において、第 3 実施形態及び第 4 実施形態で使用される波長可変レーザ装置であるレーザ装置 3 C の具体例を示す。上述したとおり、レーザ装置 3 C は、固体レーザ装置 1 0 C と、モニタモジュール 1 1 と、レーザ制御部 1 3 C とを備えている。

[0177] 固体レーザ装置 1 0 C において、波長可変チタンサファイヤ発振器 1 6 は、出力結合ミラー 1 6 A、チタンサファイヤ結晶 1 6 B、ビームエキスパンダ 1 6 C と、グレーティング 1 6 D と、回転ステージ 1 6 E とを備えている。

[0178] 光共振器は、出力結合ミラー 1 6 A とグレーティング 1 6 D とで構成され

る。出力結合ミラー 16 A は、約 650 nm ~ 1100 nm の波長範囲で部分反射する膜がコートされている。光共振器の光路上にチタンサファイヤ結晶 16 B と、ビームエキスパンダ 16 C とが配置されている。

[0179] ビームエキスパンダ 16 C は、プリズムを含んでおり、チタンサファイヤ結晶 16 B から出射された光のビーム幅を拡大して、その光をグレーティング 16 D に入射させるように配置される。また、ビームエキスパンダ 16 C は、グレーティング 16 D からの反射光のビーム幅を縮小させるとともに、その光を、チタンサファイヤ結晶 16 B 及び出力結合ミラー 16 A に戻す。

[0180] グレーティング 16 D は、表面の物質が高反射率の材料によって構成され、表面に多数の溝が所定間隔で形成されている。グレーティング 16 D は、分散光学素子である。各溝は、例えば、断面形状が直角三角形の溝である。ビームエキスパンダ 16 C からグレーティング 16 D に入射した光は、これらの溝によって反射されるとともに、光の波長に応じた方向に回折させられる。グレーティング 16 D は、ビームエキスパンダ 16 C からグレーティング 16 D に入射する光の入射角と、所望波長の回折光の回折角とが一致するようにリトロ配置されている。これにより、所望の波長付近の光がビームエキスパンダ 16 C を介してチタンサファイヤ結晶 16 B 及び出力結合ミラー 16 A に戻される。

[0181] 回転ステージ 16 E は、グレーティング 16 D を支持しており、X 軸回りに回転することにより、グレーティング 16 D への光の入射角度を変更する。グレーティング 16 D を回転させることにより、グレーティング 16 D からビームエキスパンダ 16 C を介して出力結合ミラー 16 A に戻る光の波長を選択することができる。

[0182] 光シャッタ 83 は、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 と、チタンサファイヤ増幅器 17 との間の光路上に配置される。上述のとおり、光シャッタ 83 は、EO ポッケルスセルと、偏光子と、EO ポッケルスセルに高電圧を印加する電源とを含む。チタンサファイヤ増幅器 17 は、図示しないチタンサファイヤ結晶と複数のミラーとを含む。光シャッタ 83 によってパルス波

形整形されたパルスレーザ光は、チタンサファイヤ増幅器 17 に入射する。

チタンサファイヤ増幅器 17 において、図示しない複数のミラーは、チタンサファイヤ結晶をマルチパスするように配置されている。

[0183] 波長変換システム 18 は、 LBO (LiB_3O_5) 結晶 18A、 CLBO ($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$) 結晶 18B、及び KBBF ($\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$) 結晶 18C の 3 つの非線形結晶と、複数の回転ステージ 18D と、1 軸ステージ 18E と、ステージ制御部 18F とを備えている。各回転ステージ 18D は、 LBO 結晶 18A、 CLBO 結晶 18B、 KBBF 結晶 18C のそれぞれを支持している。各回転ステージ 18D は、X 軸回りに回転して、各結晶 18A、18B、18C を回転させる。

[0184] 1 軸ステージ 18E は、 CLBO 結晶 18B と KBBF 結晶 18C とを回転ステージ 18D とともに支持し、 CLBO 結晶 18B と KBBF 結晶 18C とを Z 軸方向に移動する。1 軸ステージ 18E は、 LBO 結晶 18A の出射光路上に、 CLBO 結晶 18B または KBBF 結晶 18C のいずれかを挿入する挿入位置、及び出射光路から両方の非線形結晶を退避する退避位置との間で移動自在である。ステージ制御部 18F は、回転ステージ 18D の回転及び 1 軸ステージ 18E の移動を制御する。

[0185] ポンピングレーザ装置 19 は、YLF レーザの第 2 高調波であって、励起用パルスレーザ光を出力する。ポンピングレーザ装置 19 の出射光路上には図示しないビームスプリッタが配置されている。ビームスプリッタは、励起用パルスレーザ光を分岐させて、波長可変サファイヤ発振器 16 とチタンサファイヤ増幅器 17 に入射させる。

[0186] 7. 2 動作

レーザ制御部 13C は、レーザ加工制御部 32C から、目標波長 λ_t 、目標パルスエネルギー E_t 、パルス幅 ΔT 、及び発光トリガ T_r のデータを受信する。レーザ制御部 13C は、シャッタ 12 を閉じて、レーザ加工 NG 信号をレーザ加工制御部 32C に送信する。レーザ制御部 13C は、パルス幅 ΔT のデータをパルス波形調節器 82 に送信する。

- [0187] レーザ制御部 13C は、ステージ制御部 18F に、目標波長 λ_t のデータを送信する。ステージ制御部 18F は、目標波長 λ_t に基づいて、CLBO 結晶 18B または KBBF 結晶 18C のどちらの結晶を使用するかを決定し、1 軸ステージ 18E を制御して、使用する結晶を LBO 結晶 18A の出射光路上に挿入する。また、ステージ制御部 18F は、目標波長 λ_t に基づいて、LBO 結晶 18A の入射角度と、CLBO 結晶 18B または KBBF 結晶 18C のうち使用する非線形結晶の入射角度を決定し、決定した入射角度になるように各回転ステージ 18D を制御する。
- [0188] ステージ制御部 18F は、例えば、次のように、目標波長 λ_t の波長範囲に応じて使用する非線形結晶を選定する。第 1 に、第 2 高調波（325 nm ～ 550 nm）の波長範囲内の目標波長 λ_t が選択された場合は、LBO 結晶 18A のみが使用される。この場合、ステージ制御部 18F は、1 軸ステージ 18E を退避位置に移動して、CLBO 結晶 18B と KBBF 結晶 18C の両方を LBO 結晶 18A の出射光路から退避させる。
- [0189] 第 2 に、第 3 高調波（217 nm ～ 367 nm）の波長範囲内の目標波長 λ_t が選択された場合は、LBO 結晶 18A と CLBO 結晶 18B が使用される。この場合、ステージ制御部 18F は、CLBO 結晶 18B の挿入位置に 1 軸ステージ 18E を移動する。第 3 に、第 4 高調波（162 nm ～ 275 nm）の波長範囲内の目標波長 λ_t が選択された場合は、KBBF 結晶 18C が使用される。ステージ制御部 18F は、KBBF 結晶 18C の挿入位置に 1 軸ステージ 18E を移動する。
- [0190] レーザ制御部 13C は、ポンピングレーザ装置 19 へパルスエネルギーの初期値を送信する。ここで、第 1 ～ 第 3 高調波のいずれかの高調波を第 m 高調波と表記する。第 m 高調波が目標波長 λ_t として選択された場合において、レーザ制御部 13C は、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 が目標波長 λ_t の m 倍に近い波長で発振するように、回転ステージ 16E を制御して、グレーティング 16D の入射角度を調節する。
- [0191] また、レーザ制御部 13C は、図示しない内部発光トリガを同期回路 81

に送信する。同期回路 18 は、内部発光トリガに同期して、ポンピングレーザ装置 19 に第 1 のトリガを出力し、かつ、パルス波形調節器 82 に、第 1 のトリガに対して所定時間遅延させて第 2 のトリガを出力する。ポンピングレーザ装置 19 からの励起用パルスレーザ光は、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 とチタンサファイヤ増幅器 17 のそれぞれのチタンサファイヤ結晶に入射する。これにより、それぞれのチタンサファイヤ結晶が励起される。

[0192] グレーティング 16D の入射角度は、目標波長 λ_t の m 倍に対応する角度に設定されているため、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 において、約 $\lambda_t \cdot m$ 倍の波長のパルスレーザ光が出力される。このパルスレーザ光は、光シャッタ 83 によって、パルス幅 ΔT となるようにパルス整形される。パルス整形されたパルスレーザ光はチタンサファイヤ増幅器 17 によって、マルチパス増幅される。増幅されたパルスレーザ光は、波長変換システム 18 によって、第 m 高調波光であるパルスレーザ光が出力される。

[0193] レーザ制御部 13C は、モニタモジュール 11 の光センサ 11b によって、波長変換後のパルスレーザ光のパルスエネルギーの実測値 E を検出する。レーザ制御部 13C は、実測値 E と目標パルスエネルギー E_t との差 $\Delta E = E - E_t$ が「0」に近づくように、ポンピングレーザ装置 19 から出力される励起用パルスレーザのパルスエネルギーを制御する。

[0194] また、レーザ制御部 13C は、モニタモジュール 11 の波長モニタ 11c によって、波長変換後のパルスレーザ光の波長の実測値 λ を検出する。レーザ制御部 13C は、実測値 λ と目標波長 λ_t との差 $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_t$ が「0」に近づくように、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 のグレーティング 16D の入射角度を、回転ステージ 16E を通じて制御する。さらに、レーザ制御部 13C は、 ΔE 及び $\Delta \lambda$ が許容範囲となったら、内部発光トリガを停止して、シャッタ 12 を開ける。

[0195] レーザ制御部 13C は、レーザ加工制御部 32C にレーザ加工 OK 信号を送信する。レーザ制御部 13C は、レーザ加工制御部 32C からの発光トリ

が T_r を同期回路 81 に入力する。その結果、パルス幅 ΔT 、目標波長 λ_t 、目標パルスエネルギー E_t のパルスレーザ光がレーザ加工装置 4C に入射する。

[0196] 7. 3 変形例

図 37 に示すレーザ装置 3C から、同期回路 81、パルス波形調節器 82 及び光シャッタ 83 を取り除くと、図 1 に示す比較例、図 6 に示す第 1 実施形態、図 16 に示す第 2 実施形態の各レーザ装置 3 として使用することができる。この場合は、パルス幅は 1 ns から数十 ns のパルスレーザ光が出力されるため、2 光子吸収の割合は殆どなくなる。

[0197] 図 37 に示すように、波長可変レーザ装置であるレーザ装置 3C として、波長可変チタンサファイヤ発振器 16 と、チタンサファイヤ増幅器 17 と、波長変換システム 18 とを備えた例で示したが、この例に限定されない。波長約 200 nm ~ 500 nm の範囲内、またはその一部の範囲内において、波長可変を行うことができるレーザ装置であればよい。他の波長可変レーザ装置の例としては、特開 2002-273581 に記載の短パルス波長可変ラマンレーザ装置や、オプティカルパラメトリックオシレータ (OPO: optical parametric oscillator) による波長可変レーザ装置等がある。

[0198] 8. レーザ加工装置の変形例

8. 1 構成

上記各実施形態のレーザ加工装置において、集光光学系として機能する光学システムを備えた例で説明したが、図 38 に示すレーザ加工装置 4E のように、被加工物 41 に対して像を転写できる転写光学系として機能する光学システム 93 を備えていてもよい。光学システム 93 は、ビームホモジナイザ 91 と、可変スリット 92 と、転写レンズ 94 とを備えている。ここで、転写レンズ 94 は、硝材が異なる複数枚のレンズの組み合わせで構成され、波長可変レーザ装置の波長可変範囲において色収差補正を行うことが可能な色収差補正レンズである。複数枚のレンズとしては、たとえば、合成石英レンズと CaF_2 結晶レンズの組合せレンズが使用される。

[0199] ビームホモジナイザ 9 1 及び可変スリット 9 2 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 9 1 は、フライアイレンズ 9 1 a とコンデンサレンズ 9 1 b とを備えている。ビームホモジナイザ 9 1 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、可変スリット 9 2 をケーラ照明するように配置される。可変スリット 9 2 は、光を透過するスリットを有し、スリットの大きさを変更することが可能である。可変スリット 9 2 は、被加工物 4 1 への加工寸法に応じて、スリットの大きさを調節することができる。可変スリット 9 2 のスリットの大きさは、レーザ加工制御部 3 2 A が制御する。

[0200] また、レーザ加工装置 4 E は、観察装置 6 6 に代えて、観察装置 9 6 を備えている。観察装置 9 6 は、観察装置 6 6 の構成から、コリメータレンズ 6 6 b と結像レンズ 6 6 d を削除した構成である。イメージセンサ 6 6 e は、加工面の像が転写レンズ 9 4 によって結像する位置に配置されている。

[0201] 8. 2 動作

高反射ミラー 3 6 b によって反射したパルスレーザ光は、ビームホモジナイザ 9 1 によって光強度が空間的に均一化されて、可変スリット 9 2 に入射する。可変スリット 9 2 のスリットをパルスレーザ光が透過すると、スリットの形状に応じた像光が形成される。この像光は、高反射ミラー 3 6 c を介して転写レンズ 9 4 に入射する。転写レンズ 9 4 は、ウィンドウ 4 2 A を介して、可変スリット 9 2 のスリットの形状に応じたスリット像を被加工物 4 1 の表面に結像させて、スリット像を転写する。これにより、被加工物 4 1 の表面の加工形状を、可変スリット 9 2 のスリットに応じた形状にすることができる。

[0202] 照明光源 6 6 c から出た照明光は、ハーフミラー 6 6 a と高反射ミラー 3 6 c を介して、転写レンズ 9 4 によって、被加工物 4 1 の加工面を照明する。加工面を照明した光は反射して、転写レンズ 9 4 によって、高反射ミラー 3 6 c とハーフミラー 6 6 a を介して、イメージセンサ 6 6 e 上に結像する。その結果、被加工物 4 1 の加工面の加工状態をイメージセンサ 6 6 e によ

って計測できる。

[0203] 本例において、可変スリット 9 2 の代わりに、例えば、所望の形状の複数の穴が形成されたマスクを配置してもよい。この場合は、被加工物 4 1 の表面に対して、複数の穴の加工を同時に行うことができる。

[0204] 9. 反射型の光学系

上記実施形態において、集光光学系や転写光学系として機能する光学システムは、集光レンズ 3 6 d や転写レンズ 9 4 などのレンズを使用する例で説明したが、光学システムにおいて、レンズの代わりに反射型の光学系を使用してもよい。

[0205] 9. 1 反射型の集光光学系

図 3 9 に示す反射型の集光光学系 1 0 1 は、集光レンズ 3 6 d の代わりに使用することが可能である。集光光学系 1 0 1 は、平面ミラー 1 0 1 a と軸外放物面の凹面ミラー 1 0 1 b とを備えている。集光光学系 1 0 1 は、平面ミラー 1 0 1 a と凹面ミラー 1 0 1 b の反射によって光を集光する。平面ミラー 1 0 1 a と凹面ミラー 1 0 1 b は、反射面に、波長可変レーザ装置の波長可変範囲の光を高反射する高反射コーティングが施されている。この高反射コーティングは、例えば、A l 膜の上に M g F₂ をコートしたもの、または、波長可変レーザ装置の波長可変範囲においてある程度の高い反射率を有する誘電体多層膜のコートである。

[0206] 集光光学系 1 0 1 は、レンズを用いない反射型であるため、波長可変レーザ装置 3 から出力されるパルスレーザ光の波長が変化しても、色収差の影響を受けない。また、フレネルロスなどの光損失も少ないため、集光効率もよい。また、観察装置 6 6 を用いる場合は、集光光学系 1 0 1 には可視光の照明光も入射するが、照明光についても、パルスレーザ光と同様に、色収差の影響を回避できるとともに、集光効率もよい。波長可変レーザ装置のように波長を可変させる場合には、色収差の影響が無視できない場合もある。そのため、反射型の集光光学系 1 0 1 は、波長可変レーザ装置に用いた場合に、特に有効である。

[0207] 9. 2 反射型の転写光学系

図40に示す転写光学系102は、図38に示す転写レンズ94の代わりに使用することが可能である。転写光学系102は、周知のSchwarzschildタイプの光学系であり、中央に開口が形成された球面凹面ミラー102bと、球面凸面ミラー102aとを備えている。マスク103を透過した像光は、球面凹面ミラー102bの開口に入射して、球面凸面ミラー102aと球面凹面ミラー102bとで反射することにより、被加工物41の加工面に結像する。

[0208] 球面凹面ミラー102bと、球面凸面ミラー102aは、反射面に、波長可変レーザ装置の波長可変範囲の光を高反射する高反射コーティングが施されている。この高反射コーティングは、例えば、Al膜の上に MgF_2 をコートしたもの、または、波長可変レーザ装置の波長可変範囲においてある程度の高い反射率を有する誘電体多層膜のコートである。

[0209] 転写光学系102は、集光光学系101と同様に、レンズを用いない反射型であるため、色収差の影響を受けず、集光効率もよい。また、転写光学系102は、集光光学系101と同様に、波長可変レーザ装置に用いる場合に、特に有効である。

[0210] 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。

[0211] 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] 被加工物にパルス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であって、以下を備える：
- A. 前記パルスレーザ光を出力するレーザ装置であって、前記パルスレーザ光の波長を変化させることが可能な波長可変レーザ装置；
 - B. 前記波長可変レーザ装置から出力された前記パルスレーザ光を前記被加工物に照射する光学システム；
 - C. 前記被加工物の材料に応じた光子吸収に対応する基準波長を取得する基準波長取得部；
 - D. 前記波長可変レーザ装置を制御して、前記被加工物に対して本加工を施す前にプレ加工を実行する制御部であって、前記基準波長を含む所定範囲内で前記波長可変レーザ装置が出力する前記パルスレーザ光の波長を変化させながら、複数の波長で波長探索用プレ加工を実行するレーザ加工制御部；
 - E. 複数の波長で行った前記波長探索用プレ加工の波長毎の加工状態を計測する加工状態計測器；及び
 - F. 波長毎の前記加工状態を評価して、前記本加工に使用する最適波長を決定する最適波長決定部。
- [請求項2] 請求項1に記載のレーザ加工システムであって、
- 前記レーザ加工制御部は、前記本加工を行う際に、前記波長可変レーザ装置が出力する前記パルスレーザ光の目標波長として前記最適波長を設定する。
- [請求項3] 請求項1に記載のレーザ加工システムであって、さらに、以下を備える；
- G. 前記被加工物の材料毎に前記基準波長を記録した波長選択テーブルを記憶する記憶部；
- ここで、前記基準波長取得部は、入力された材料識別情報を受け付けて、前記波長選択テーブルを参照して、入力された前記材料識別情報

報に応じた前記基準波長を取得する。

[請求項4]

請求項3に記載のレーザ加工システムであって、

前記波長選択テーブルには、前記基準波長を含む所定範囲のデータが記録されており、

前記基準波長取得部は、前記基準波長を含む所定範囲のデータを取得する。

[請求項5]

請求項1に記載のレーザ加工システムであって、

前記加工状態計測器は、前記加工状態として、少なくとも加工が施されたか否かを計測する。

[請求項6]

請求項5に記載のレーザ加工システムであって、さらに、以下を備える；

H. 前記パルスレーザ光の前記被加工物におけるフルーエンスであって、前記波長探索用プレ加工において使用される波長探索用フルーエンスを決定する波長探索用フルーエンス決定部。

[請求項7]

請求項6に記載のレーザ加工システムであって、

前記レーザ加工制御部は、目標波長を前記基準波長に固定した状態で、フルーエンスを変化させながら、複数のフルーエンスで、フルーエンス決定用のプレ加工である第1プレ加工を実行する；

前記加工状態計測器は、複数のフルーエンスで行った前記第1プレ加工のフルーエンス毎の加工状態を計測する；

前記波長探索用フルーエンス決定部は、複数のフルーエンス毎の前記加工状態を評価して、前記被加工物に対して加工が施される直前のフルーエンスの最大値を前記波長探索用フルーエンスとして決定する。

[請求項8]

請求項7に記載のレーザ加工システムであって、

前記レーザ加工制御部は、前記第1プレ加工の後に、目標フルーエンスを前記波長探索用フルーエンスに固定した状態で、前記波長探索用プレ加工を第2プレ加工として実行し、

前記加工状態計測器は、複数の波長で行った前記第2プレ加工の波長毎の加工状態を計測し、

前記最適波長決定部は、前記第2プレ加工の波長毎の加工状態を評価して、加工が施された波長を前記最適波長として決定する。

[請求項9] 請求項1に記載のレーザ加工システムであって、

前記加工状態計測器は、前記加工状態として、加工深さを計測する加工深さ計測器である。

[請求項10] 請求項9に記載のレーザ加工システムであって、

前記加工深さ計測器は、レーザ顕微鏡、レーザ変位計、及び原子間力顕微鏡のいずれかを含む。

[請求項11] 請求項9に記載のレーザ加工システムであって、

前記レーザ加工制御部は、本加工に使用するフルエンスを目標フルエンスに設定して、前記波長探索用プレ加工を実行する；

前記最適波長決定部は、複数の波長で行った前記波長探索用プレ加工の加工深さから加工速度を求め、前記加工速度が最大の波長を前記最適波長として決定する。

[請求項12] 請求項1に記載のレーザ加工システムであって、

前記基準波長取得部は、前記材料毎の前記基準波長として、1光子で光子吸収が生じる吸収波長である1光子吸収波長を取得する。

[請求項13] 請求項1に記載のレーザ加工システムであって、

前記基準波長取得部は、前記材料毎の前記基準波長として、前記1光子吸収波長に加えて、2光子で光子吸収が生じる吸収波長である2光子吸収波長を取得する。

[請求項14] 請求項13に記載のレーザ加工システムであって、

前記波長可変レーザ装置は、前記パルスレーザ光のパルス幅が可変である。

[請求項15] 請求項14に記載のレーザ加工システムであって、さらに、以下を含む；

I. 前記1光子吸収波長が所定値未満の場合に、前記プレ加工に使用する前記基準波長として前記2光子吸収波長を選択する波長選択部；及び

J. 前記2光子吸収波長が選択された場合において、前記パルス幅を、前記1光子吸収波長が選択された場合の第1パルス幅より短い第2パルス幅に設定するパルス幅設定部。

[請求項16] 請求項15に記載のレーザ加工システムは、さらに、以下を含む。

K. 前記パルス幅設定部が設定した前記パルス幅を基準パルス幅として、前記基準パルス幅を含む所定範囲の中から、本加工に使用する最適パルス幅を決定する最適パルス幅決定部。

[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、

前記レーザ加工制御部は、前記基準パルス幅を含む所定範囲内で前記波長可変レーザ装置が出力する前記パルスレーザ光のパルス幅を変化させながら、複数のパルス幅でパルス幅探索用プレ加工を実行する；

前記加工状態計測器は、複数のパルス幅で行った前記パルス幅探索用プレ加工のパルス幅毎の加工状態を計測する；及び

前記最適パルス幅決定部は、前記パルス幅探索用プレ加工のパルス幅毎の加工状態を評価して、前記最適パルス幅を決定する。

[請求項18] 請求項1に記載のレーザ加工システムであって、

前記基準波長は、前記被加工物の材料が結晶材料である場合は、前記結晶材料のバンドギャップに応じた吸収波長である。

[請求項19] 請求項1に記載のレーザ加工システムであって、さらに、以下を含む；

L. 前記被加工物の表面を撮像して観察画像を記録する観察装置。

[請求項20] 被加工物にパルスレーザ光を照射してレーザ加工を行うレーザ加工方法であって、以下のステップを備える：

A. 前記被加工物の材料に応じた光子吸収に対応する基準波長を取

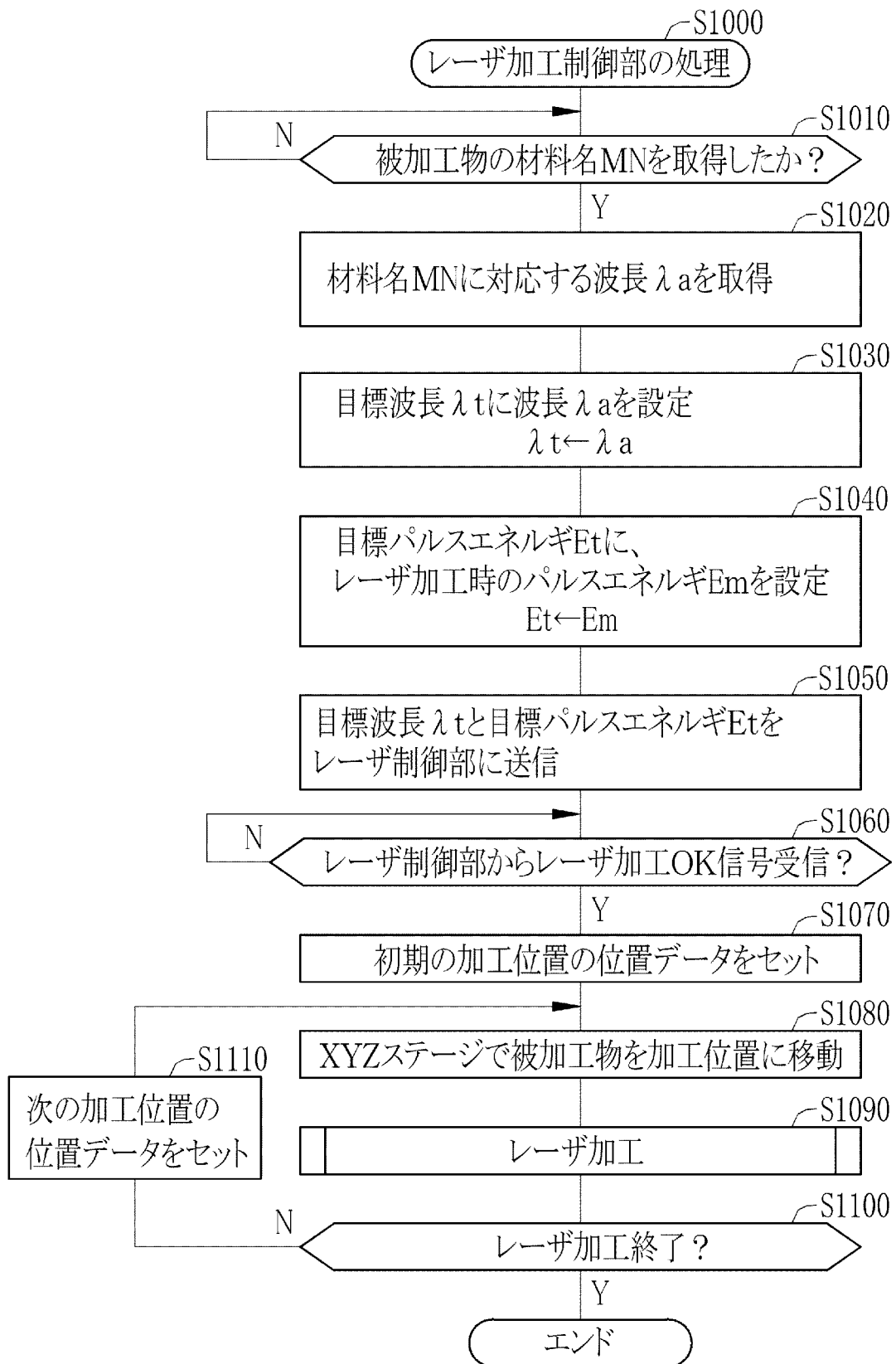
得する基準波長取得ステップ；

B．前記パルスレーザ光の波長を変化させることが可能な波長可変レーザ装置を用い、前記基準波長を含む所定範囲内で前記波長可変レーザ装置が出力する前記パルスレーザ光の波長を変化させながら、複数の波長で波長探索用プレ加工を実行する波長探索用プレ加工ステップ；

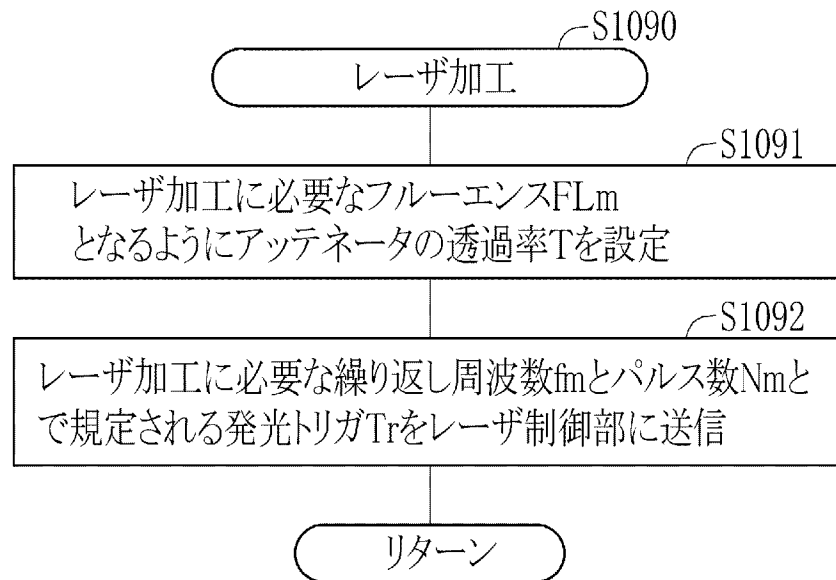
C．前記複数の波長で行った前記波長探索用プレ加工の波長毎の加工状態を計測する加工状態計測ステップ；及び

D．波長毎の前記加工状態を評価して、本加工に使用する最適波長を決定する最適波長決定ステップ。

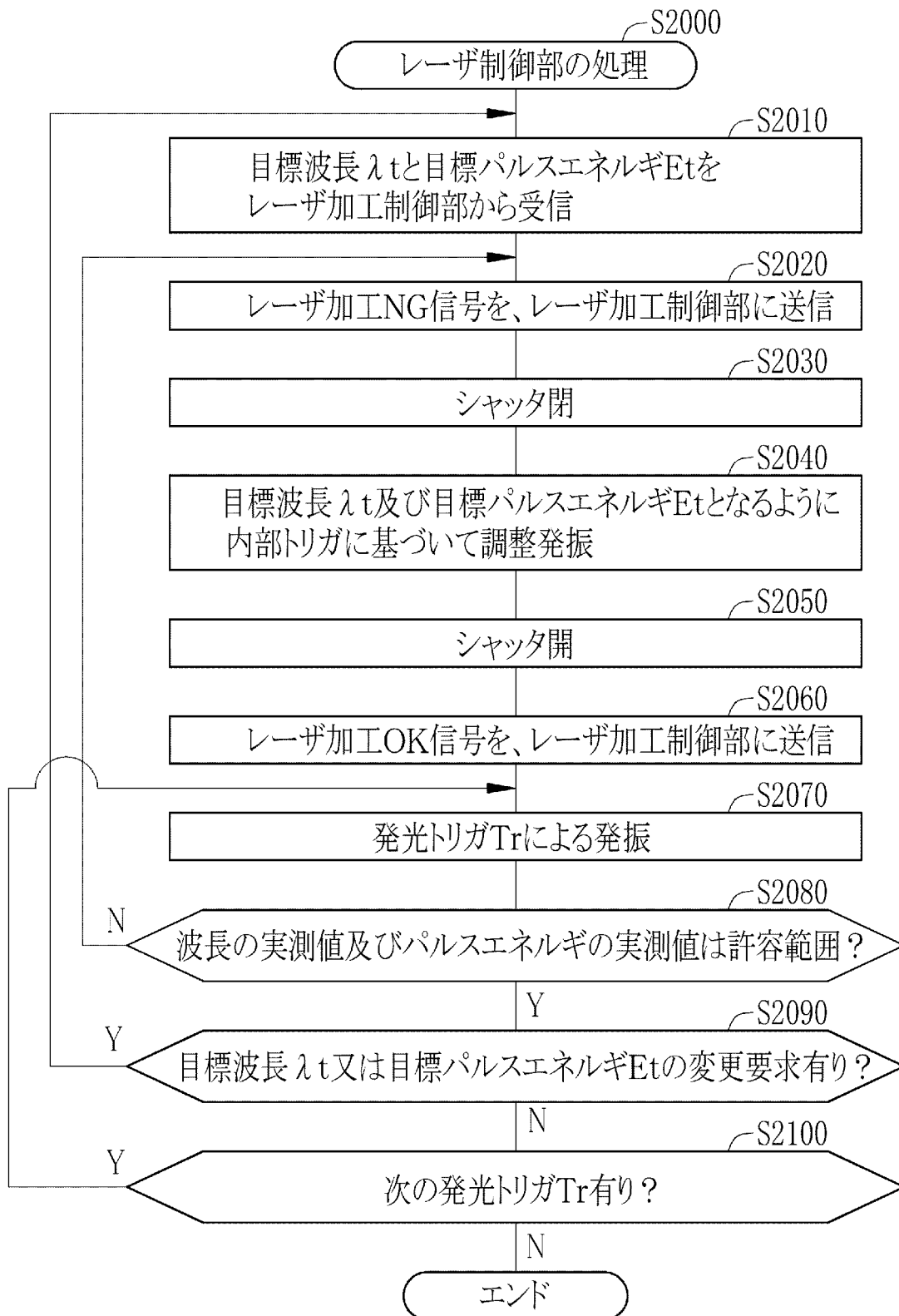
[図2]



[図3]



[図4]

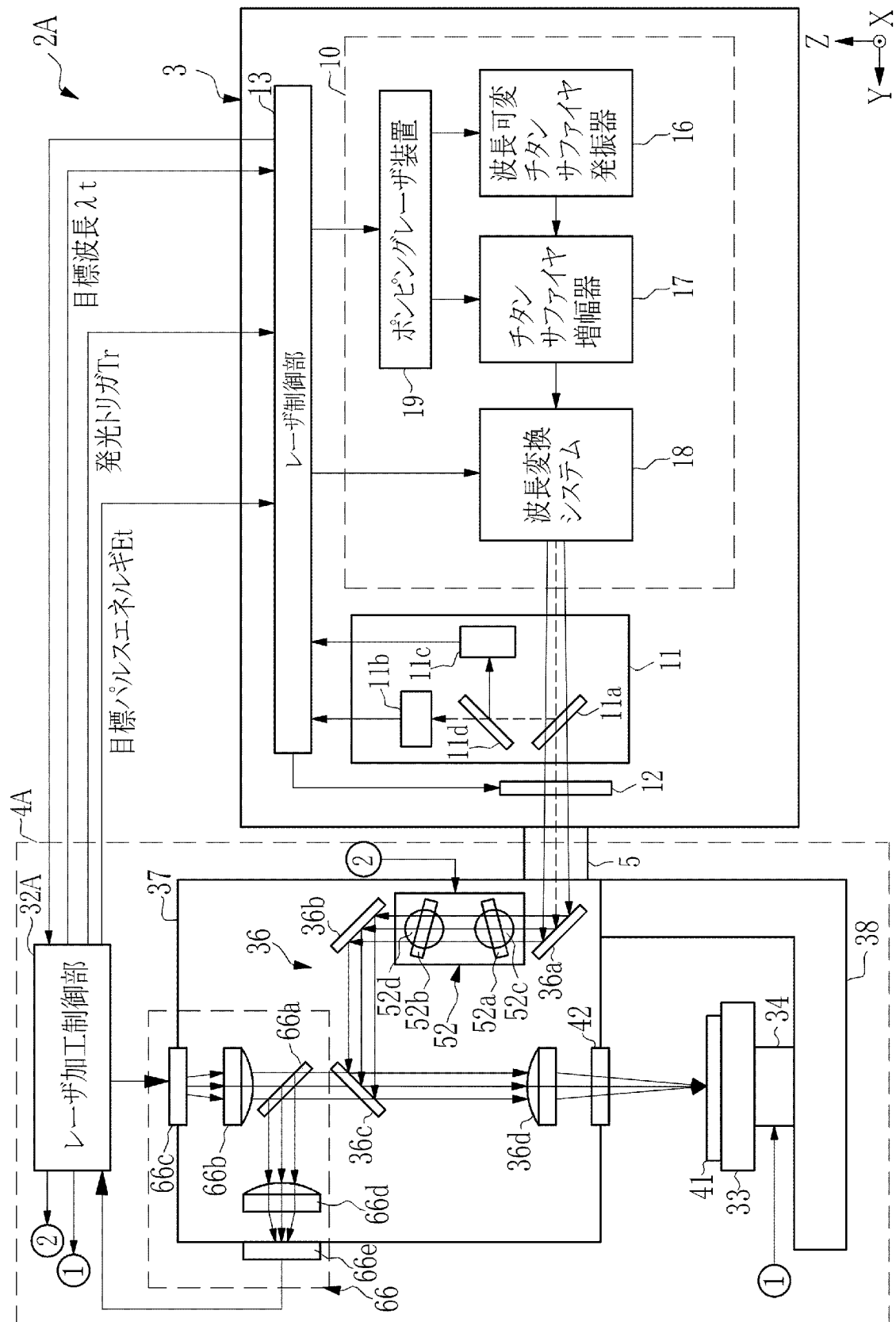


[図5]

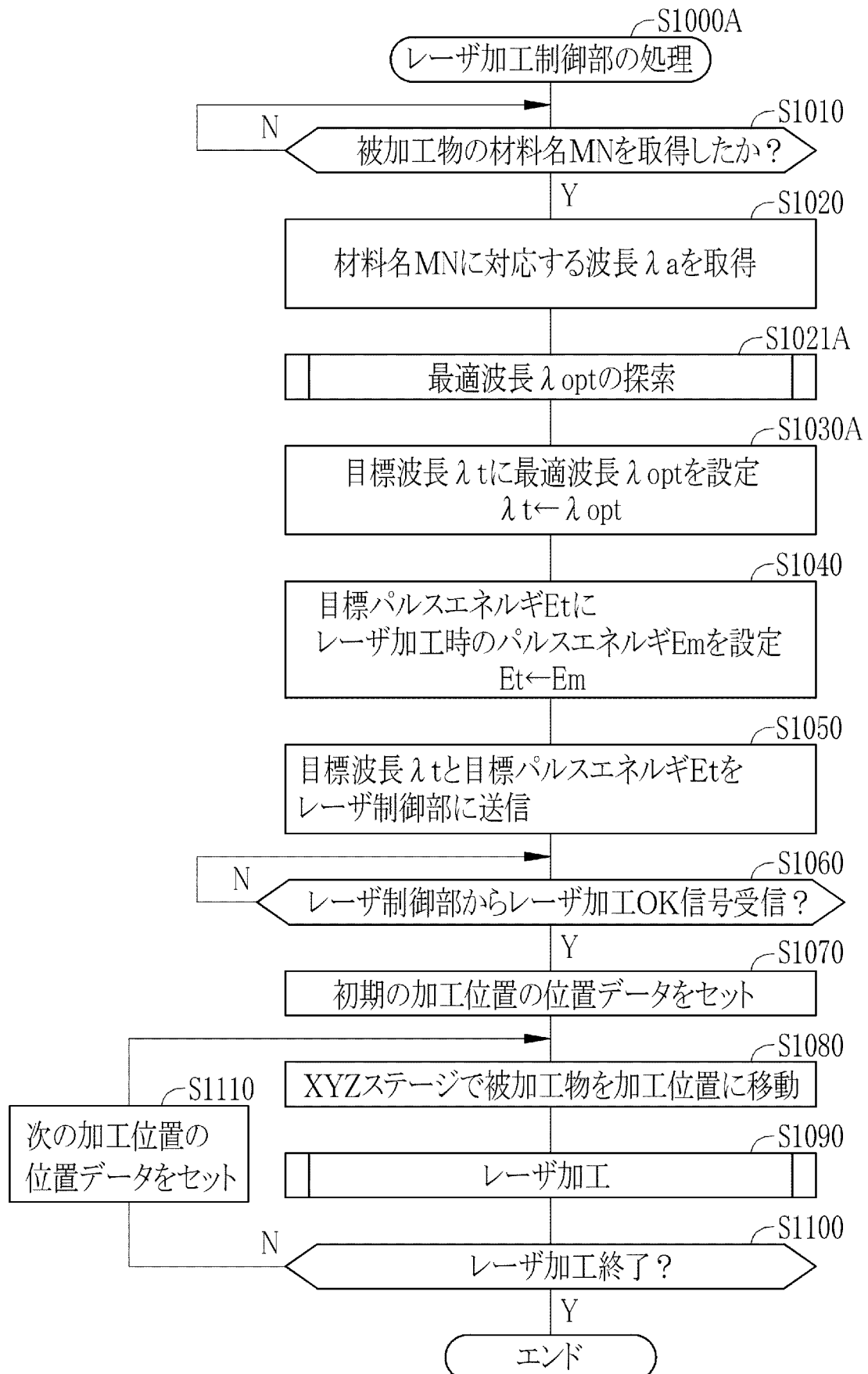
第1波長選択テーブル		
材料名 MN	バンドギャップ [eV]	1光子吸収波長 [nm]
GaP	2.26	548.7
CdS	2.42	512.4
AlP	2.45	506.1
GaS	2.5	496.0
ZnSe	2.7	459.3
SiC	2.86	433.6
6H-SiC	2.93	423.2
4H-SiC	3.26	380.4
ZnO	3.37	368.0
GaN	3.4	364.7
ZnS	3.6	344.4
Ga ₂ O ₃	4.9 ~ 5.3	234.0 ~ 253.1
Diamond	5.5	225.5
SiO ₂	5.8	213.8
cBN	6.2	200.0
AlN	6.0 ~ 6.3	196.8 ~ 206.7
Sapphire	7.0 ~ 8.4	147.6 ~ 177.1

~56

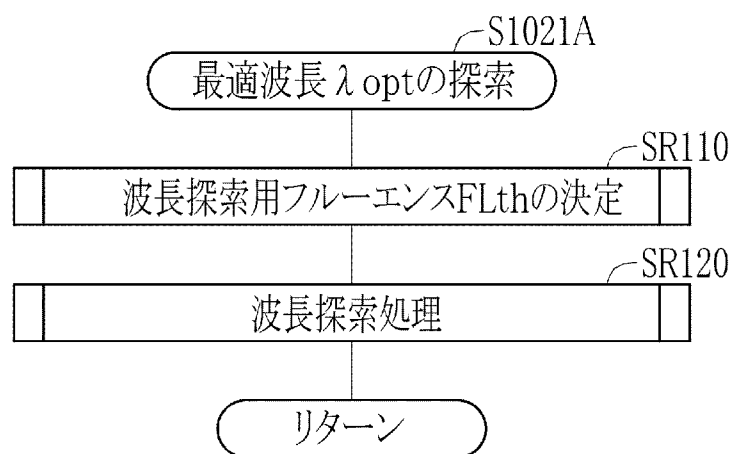
[図6]



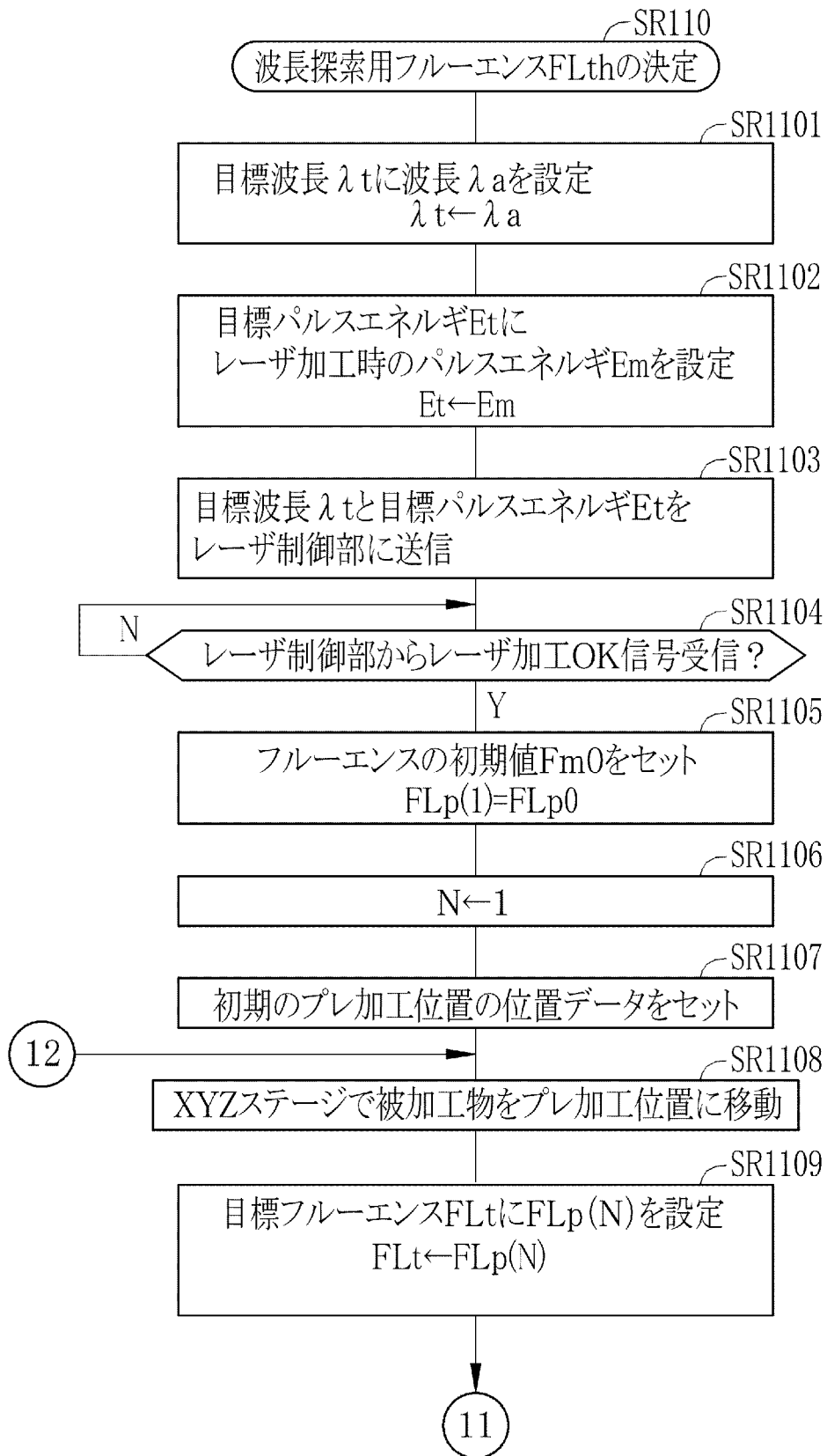
[図7]



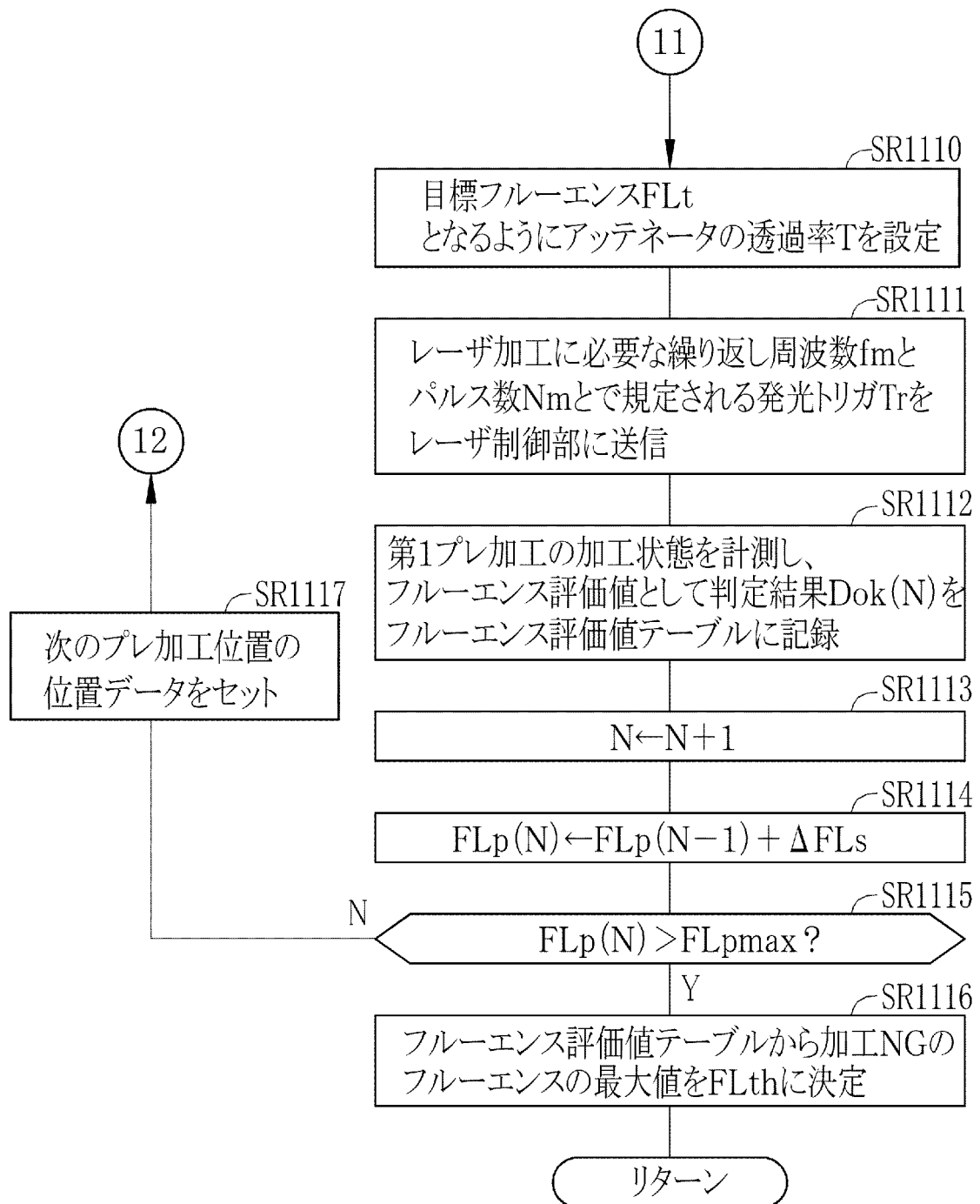
[図8]



[図9]



[図10]



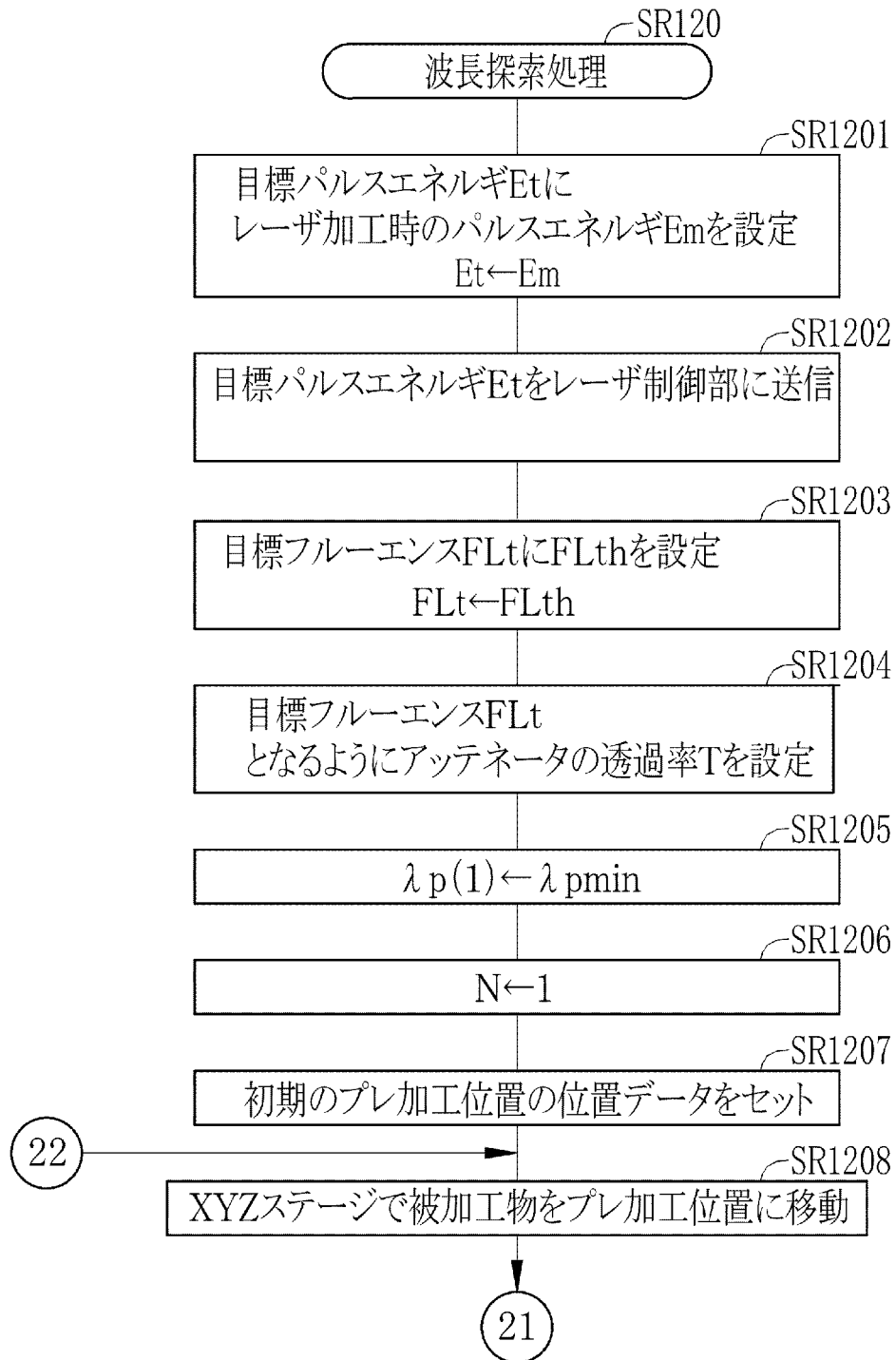
[図11]

67
5

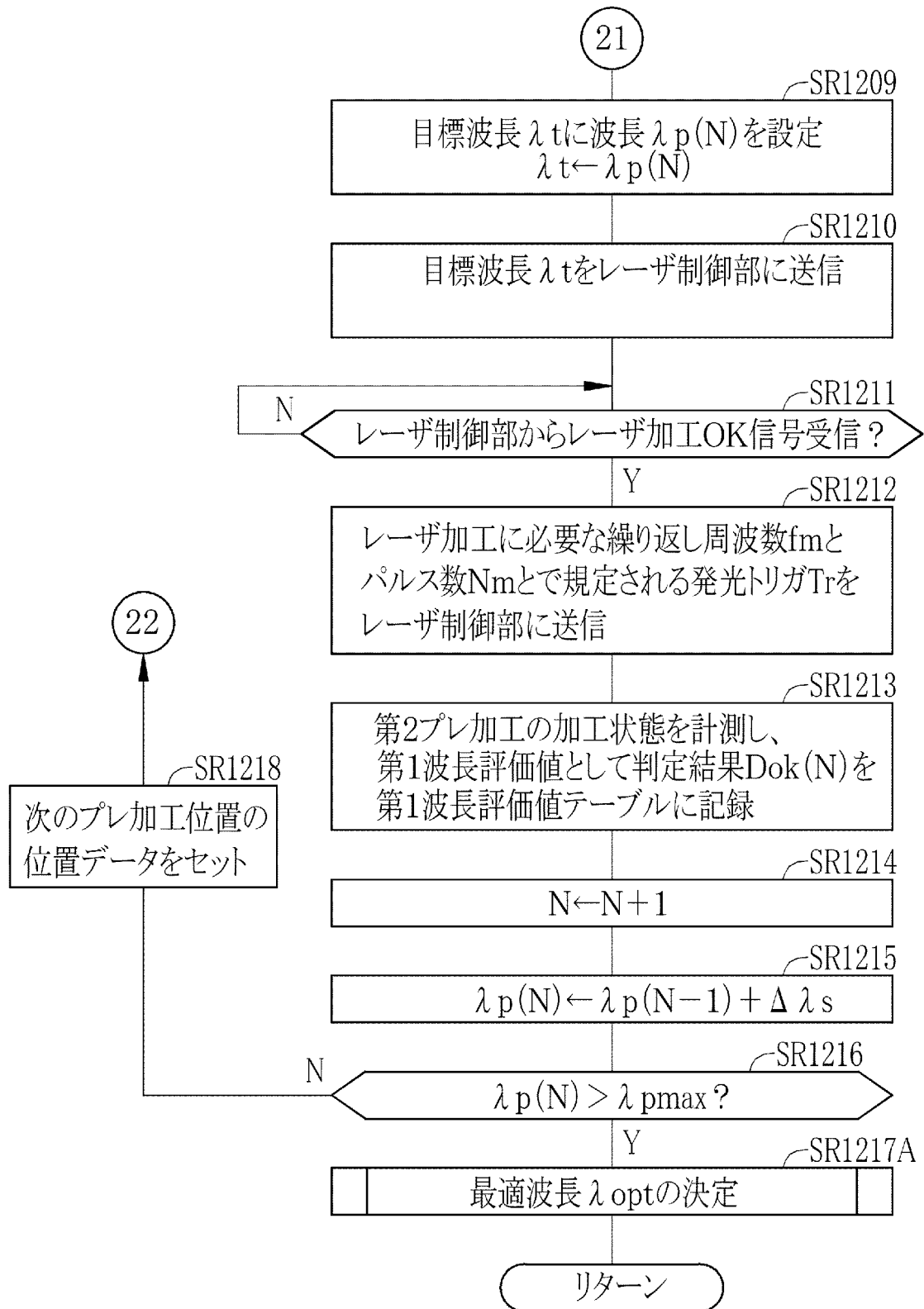
フルーエンス評価値テーブル		
N	FLp(N)	Dok(N)
N=1	FLp(1)	加工NG
N=2	FLp(2)	加工NG
N=3	FLp(3)	加工NG
N=4	FLp(4)	加工NG
N=5	FLp(5)	加工NG
N=6	FLp(6)	加工OK
N=7	FLp(7)	加工OK
N=8	FLp(8)	加工OK
N=9	FLp(9)	加工OK
N=10	FLp(10)	加工OK

→ FLth

[図12]



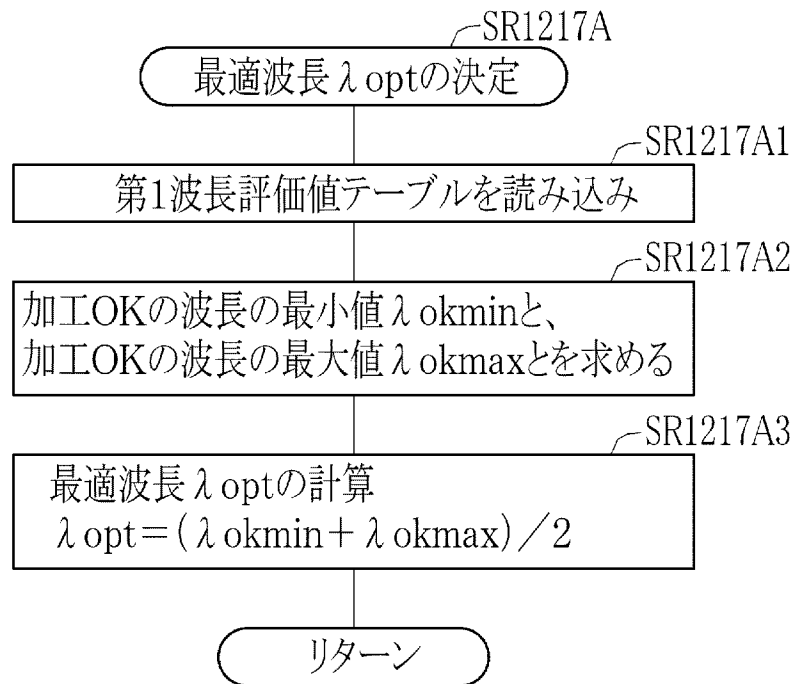
[図13]



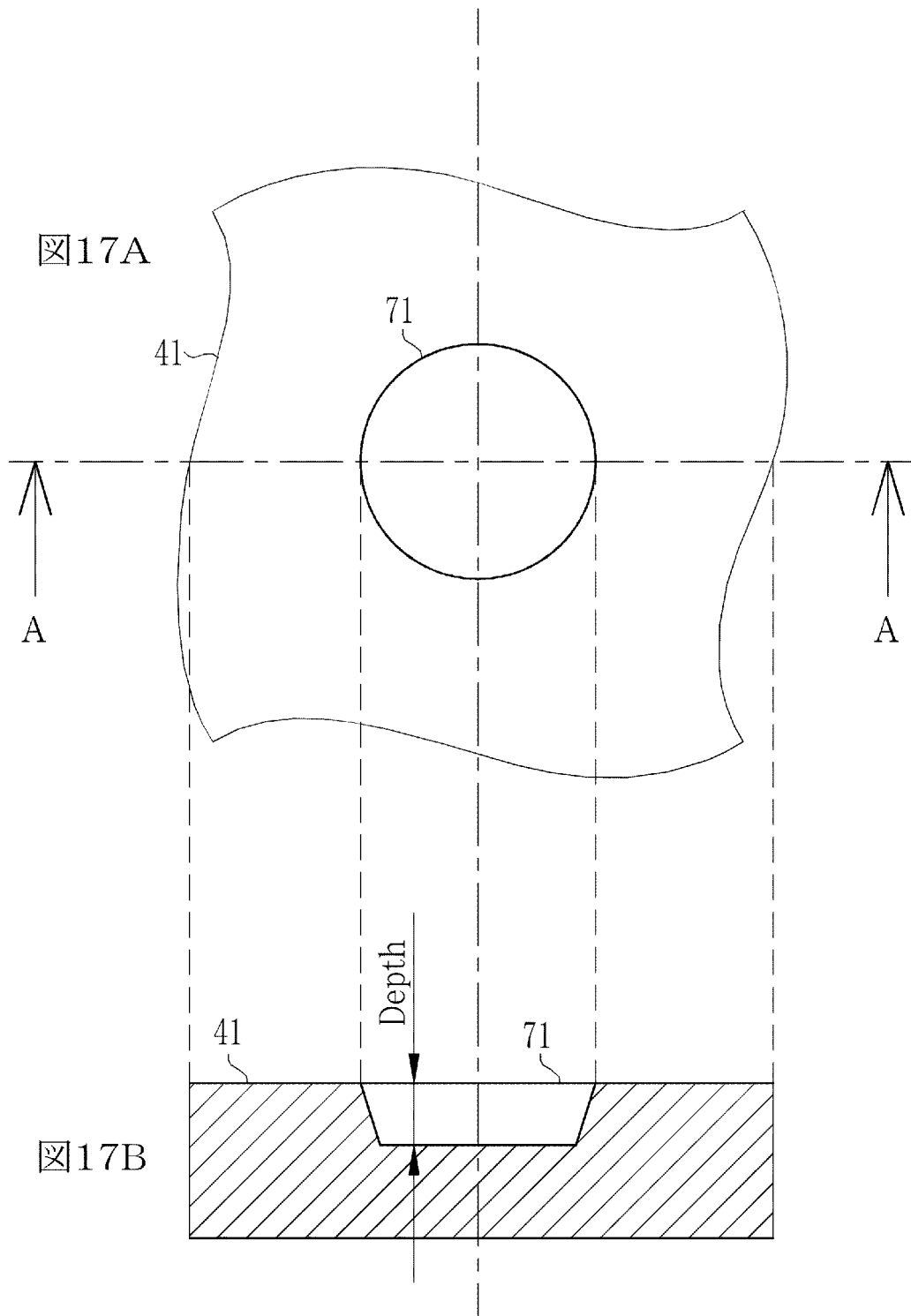
[図14]

第1波長評価値テーブル			69
N	$\lambda_p(N)$	Dok(N)	
N=1	$\lambda_p(1)$	加工NG	
N=2	$\lambda_p(2)$	加工NG	
N=3	$\lambda_p(3)$	加工NG	
N=4	$\lambda_p(4)$	加工NG	
N=5	$\lambda_p(5)$	加工NG	
N=6	$\lambda_p(6)$	加工NG	
N=7	$\lambda_p(7)$	加工NG	
N=8	$\lambda_p(8)$	加工NG	
N=9	$\lambda_p(9)$	加工NG	
N=10	$\lambda_p(10)$	加工NG	λ_a
N=11	$\lambda_p(11)$	加工NG	
N=12	$\lambda_p(12)$	加工OK	λ_{okmin}
N=13	$\lambda_p(13)$	加工OK	
N=14	$\lambda_p(14)$	加工OK	
N=15	$\lambda_p(15)$	加工OK	λ_{okmax}
N=16	$\lambda_p(16)$	加工NG	
N=17	$\lambda_p(17)$	加工NG	
N=18	$\lambda_p(18)$	加工NG	
N=19	$\lambda_p(19)$	加工NG	
N=20	$\lambda_p(20)$	加工NG	

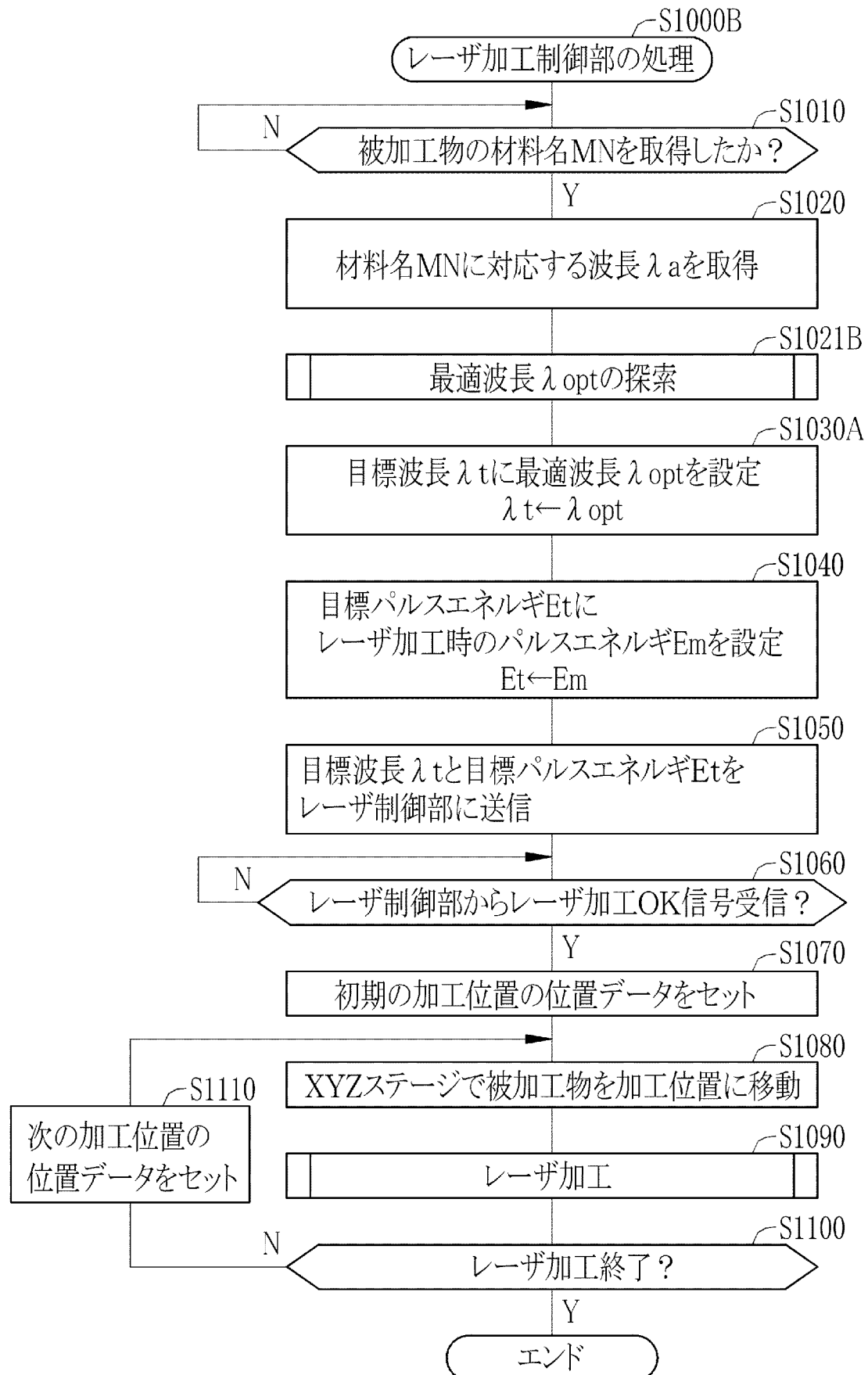
[図15]



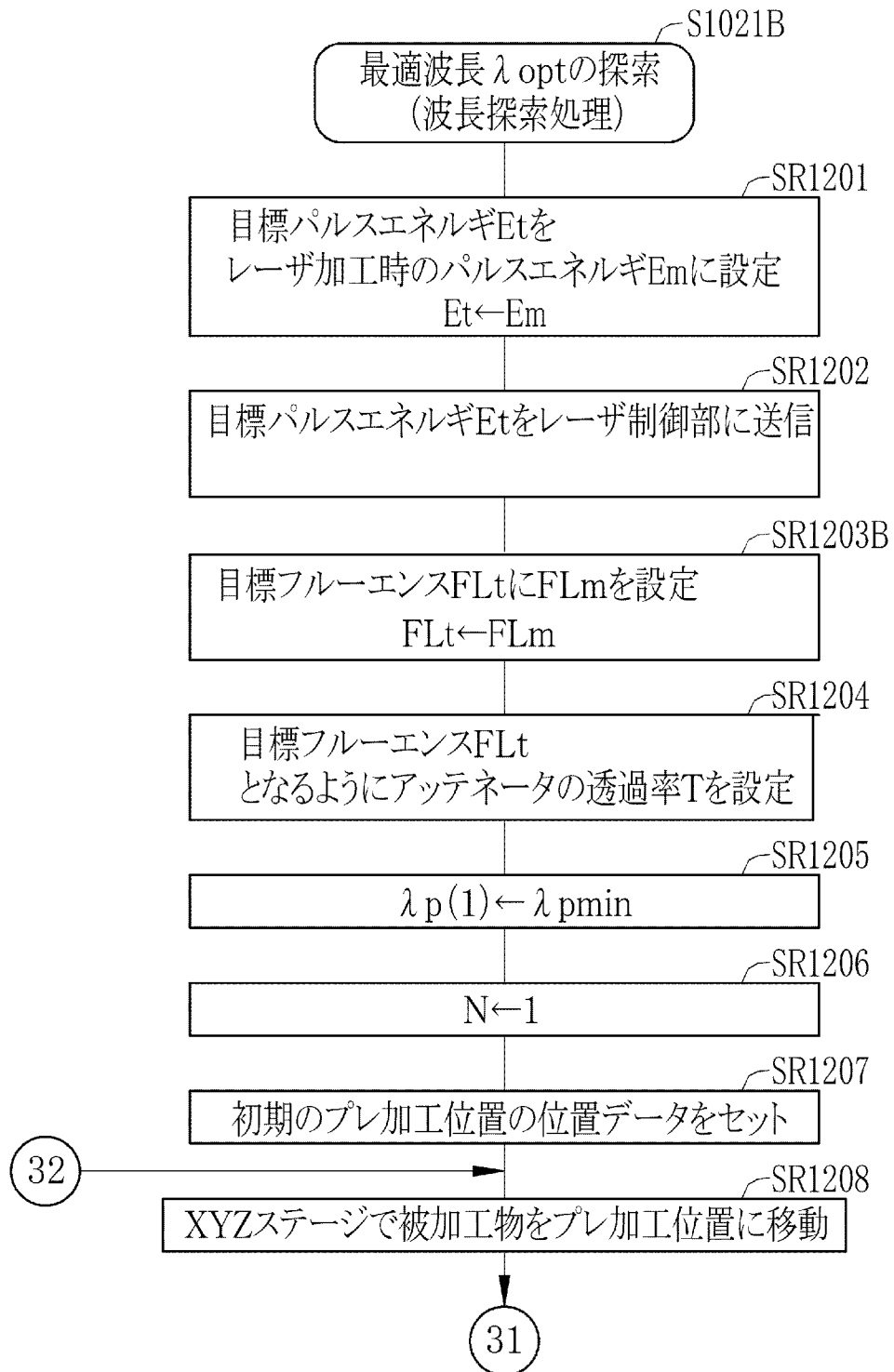
[図17]



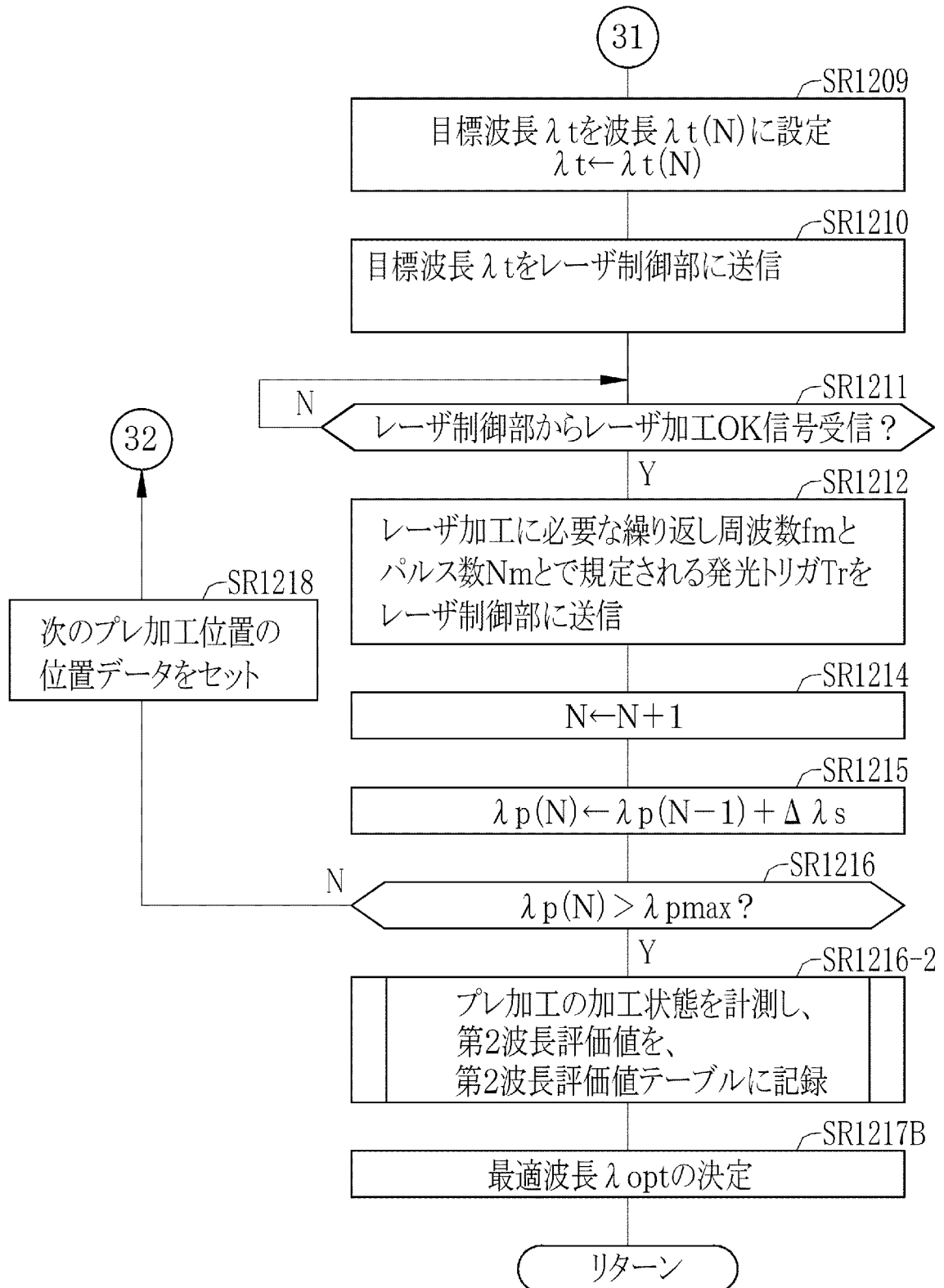
[図18]



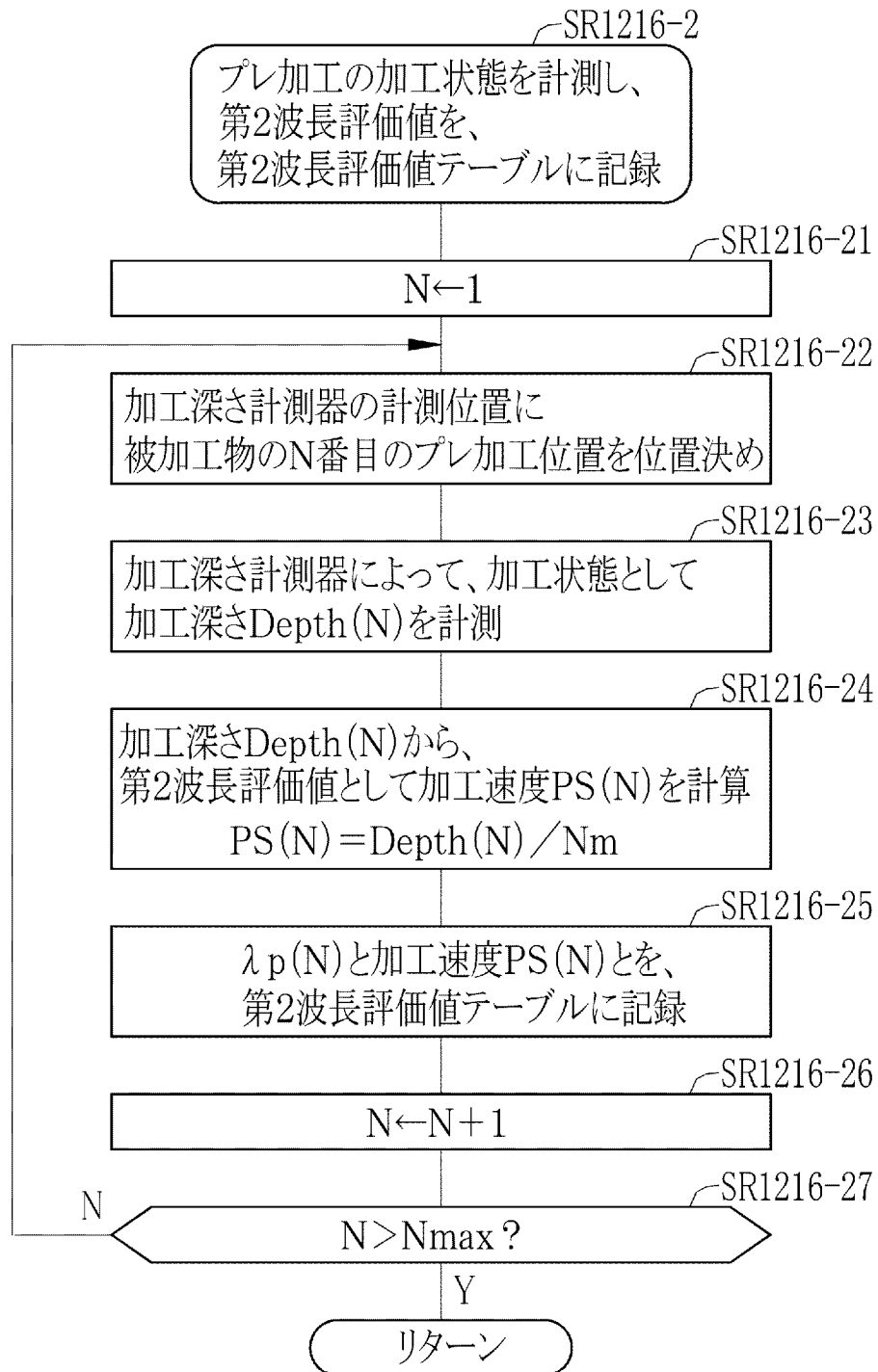
[図19]



[図20]



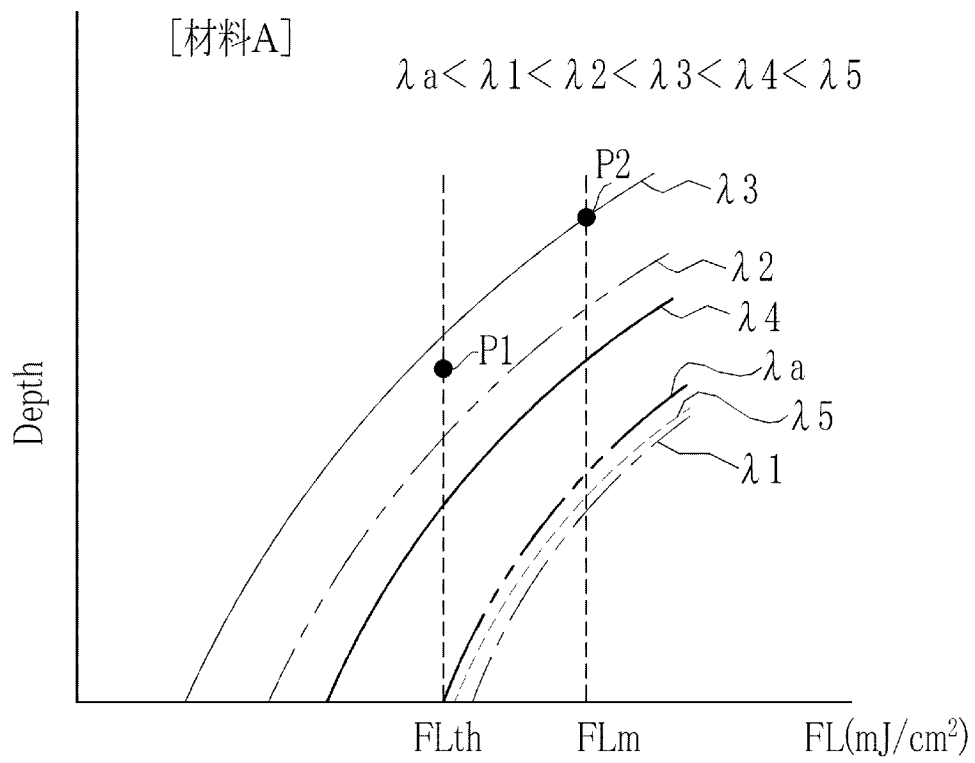
[図21]



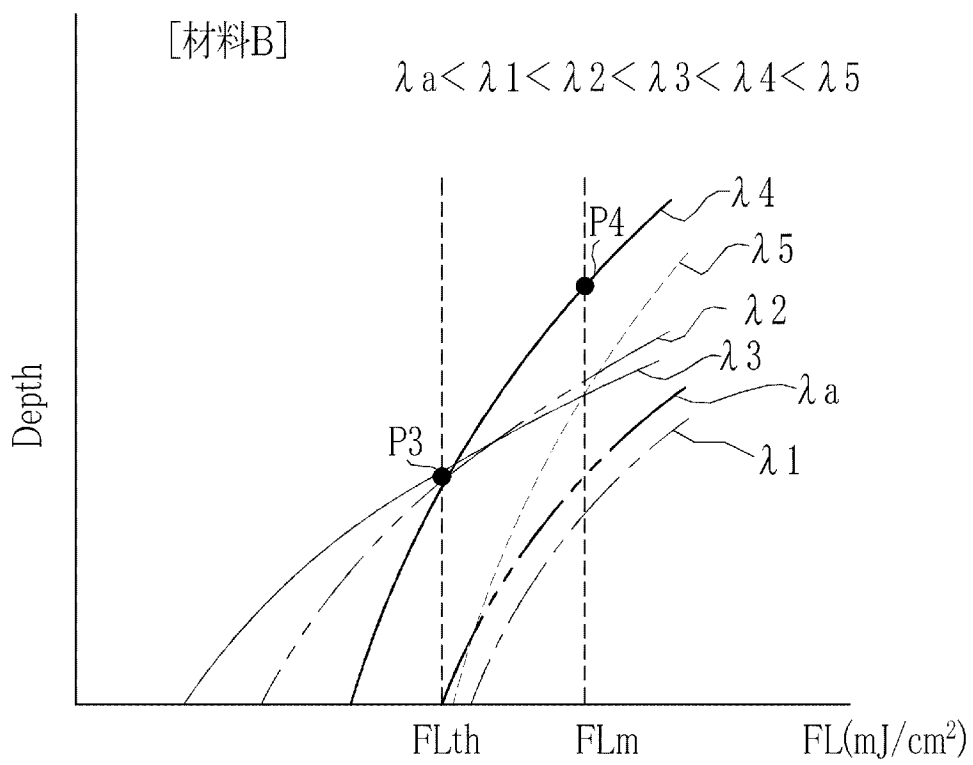
[図22]

第2波長評価値テーブル			72
N	$\lambda_p(N)$	PS (N)	
N=1	$\lambda_p(1)$	PS (1)	
N=2	$\lambda_p(2)$	PS (2)	
N=3	$\lambda_p(3)$	PS (3)	
N=4	$\lambda_p(4)$	PS (4)	
N=5	$\lambda_p(5)$	PS (5)	
N=6	$\lambda_p(6)$	PS (6)	
N=7	$\lambda_p(7)$	PS (7)	
N=8	$\lambda_p(8)$	PS (8)	
N=9	$\lambda_p(9)$	PS (9)	
N=10	$\lambda_p(10)$	PS (10)	

[図23]



[図24]



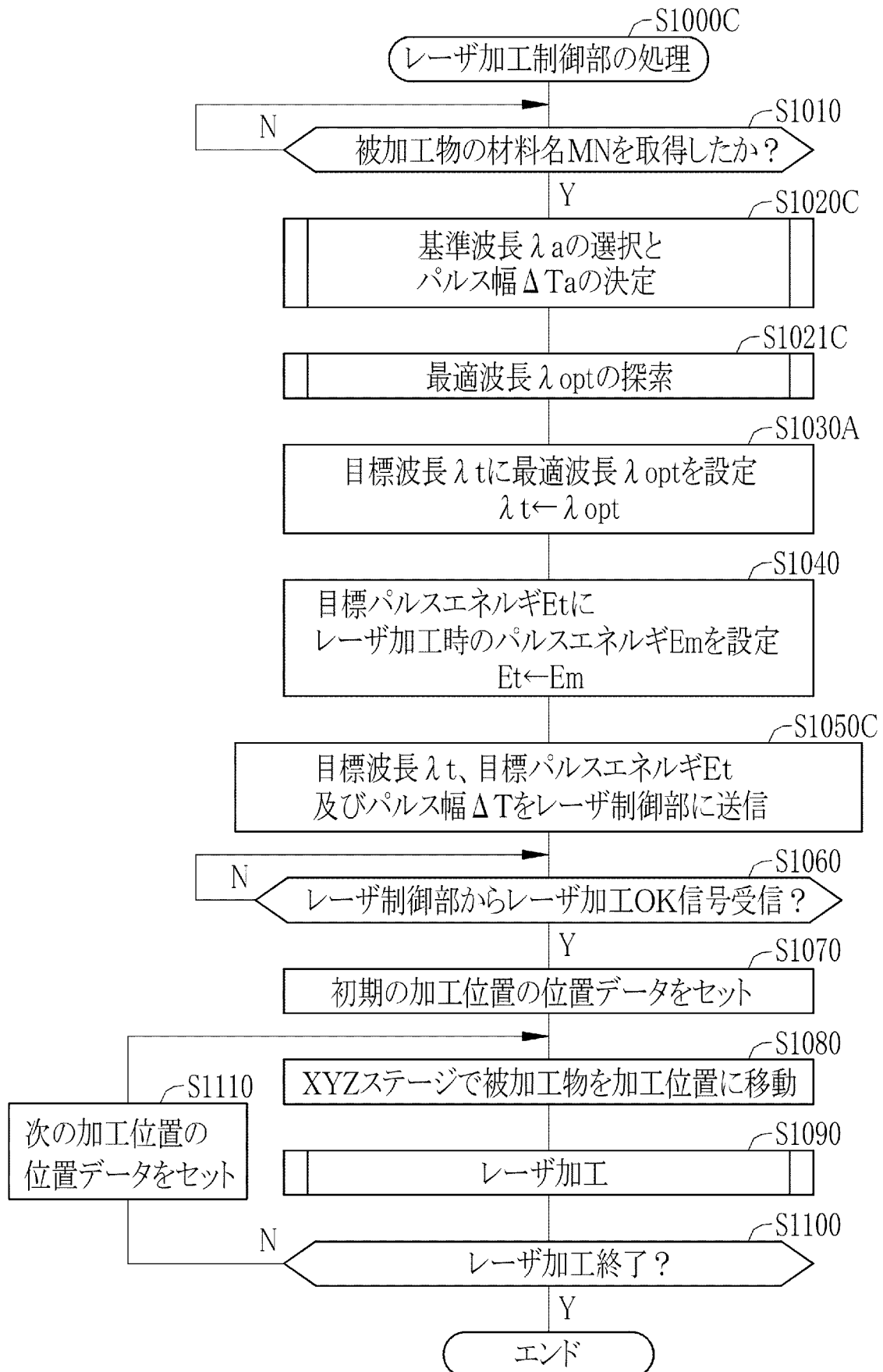
The schematic diagram illustrates a laser processing system. At the top left, a 'レーザ加工制御部' (Laser Processing Control Unit) receives inputs from a '目標パルスエネルギーEt' (Target Pulse Energy Et) and a '発光トリガTr' (Emission Trigger Tr), and outputs a 'パルス幅ΔT' (Pulse Width ΔT) signal to the 'レーザ制御部' (Laser Control Unit). The 'レーザ制御部' (Laser Control Unit) also receives a '目標波長λt' (Target Wavelength λt) signal and manages the laser's operation. The laser beam path starts from the 'レーザ制御部', passes through a series of mirrors and lenses (labeled 66a, 66b, 66c, 66d, 66e, 36a, 36b, 36c, 36d, 52a, 52b, 52c, 52d), and is focused onto a workpiece (11). The workpiece is mounted on a stage (12) which can move along X, Y, and Z axes. A feedback loop (13-15) monitors the laser output and provides feedback to the 'レーザ制御部'. The feedback loop consists of a '波長変換システム' (Wavelength Conversion System) (18), a 'チタンサファイヤ増幅器' (Titanium:Sapphire Amplifier) (17), a 'パルス波形調節器' (Pulse Waveform Regulator) (82), and a '同期回路' (Synchronization Circuit) (81). The '同期回路' (81) also receives a 'ポンピングレーザー装置' (Pumping Laser Device) (19) signal. The 'ポンピングレーザー装置' (19) is connected to a '波長可変チタンサファイヤ発振器' (Wavelength-Tunable Titanium:Sapphire Oscillator) (16). The entire system is controlled by a 'レーザ加工制御部' (Laser Processing Control Unit) (1) which also receives a '目標' (Target) signal.

[図26]

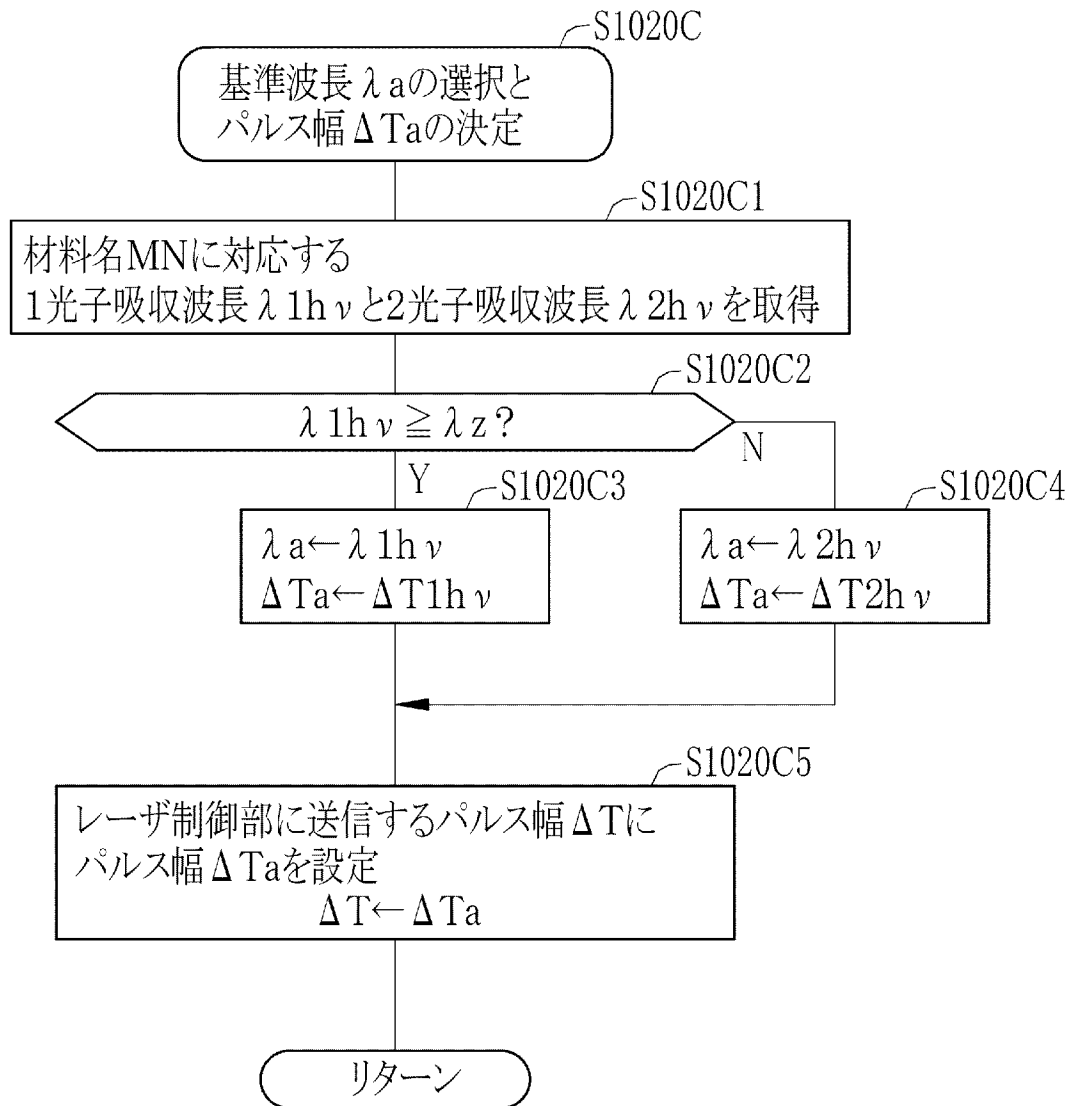
第2波長選択テーブル			
材料名 MN	バンドギャップ [eV]	1光子吸収波長 $\lambda \text{ } 1h\nu$ [nm]	2光子吸収波長 $\lambda \text{ } 2h\nu$ [nm]
GaP	2.26	548.7	1097.3
CdS	2.42	512.4	1024.8
AlP	2.45	506.1	1012.2
GaS	2.5	496.0	992.0
ZnSe	2.7	459.3	918.5
SiC	2.86	433.6	867.1
6H-SiC	2.93	423.2	846.4
4H-SiC	3.26	380.4	760.7
ZnO	3.37	368.0	735.9
GaN	3.4	364.7	729.4
ZnS	3.6	344.4	688.9
Ga ₂ O ₃	4.9 ~ 5.3	234.0 ~ 253.1	467.9 ~ 506.1
Diamond	5.5	225.5	450.9
SiO ₂	5.8	213.8	427.6
cBN	6.2	200.0	400.0
AlN	6.0 ~ 6.3	196.8 ~ 206.7	393.7 ~ 413.3
Sapphire	7.0 ~ 8.4	147.6 ~ 177.1	295.2 ~ 354.3

~84

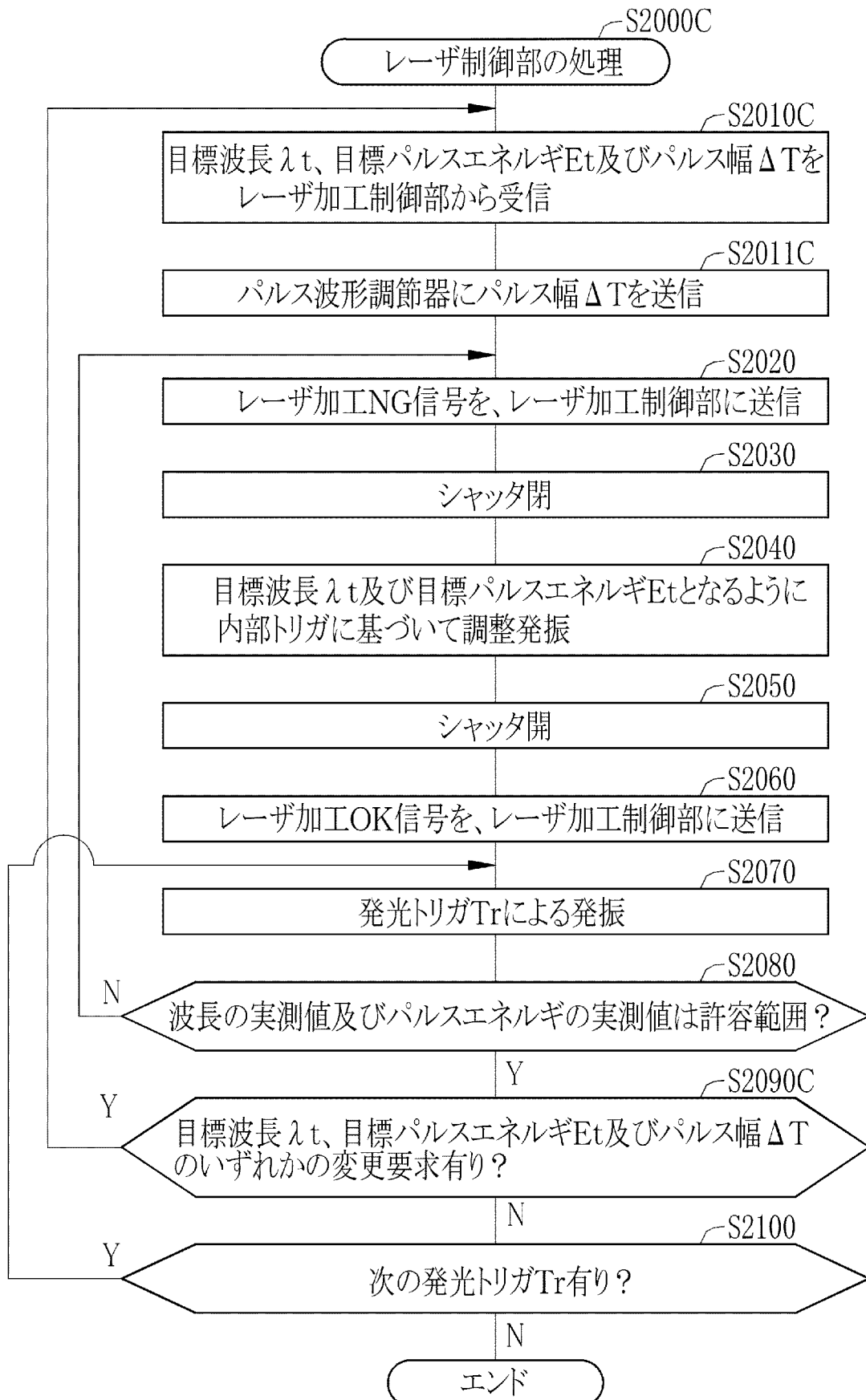
[図27]



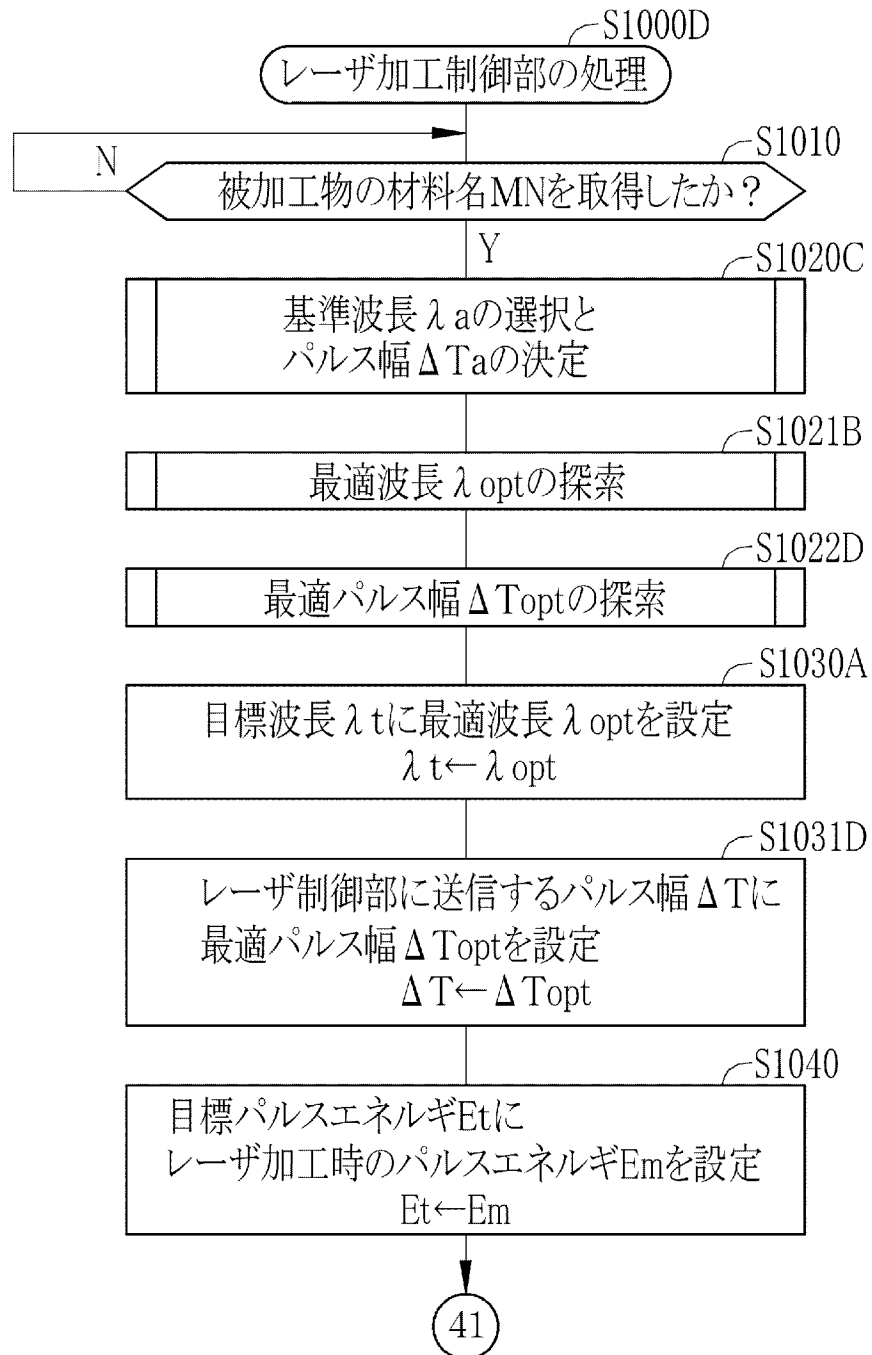
[図28]



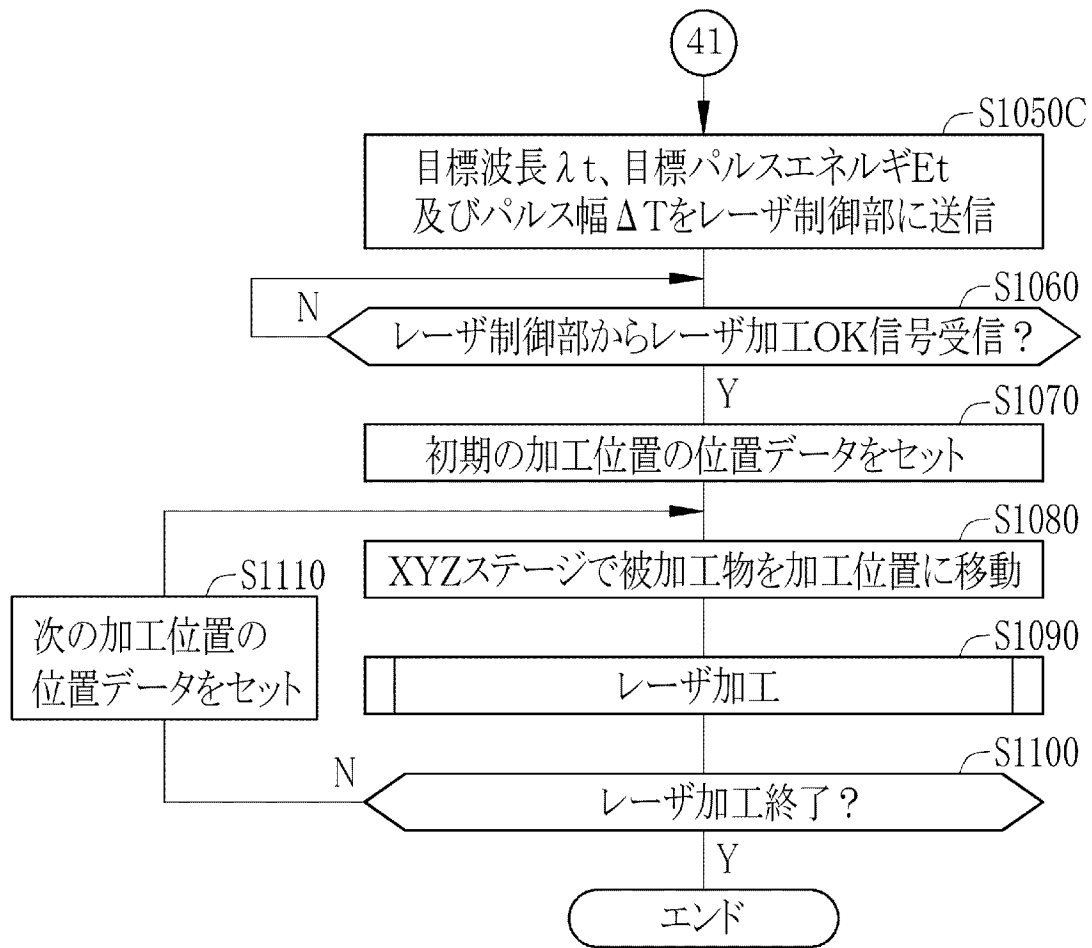
[図29]



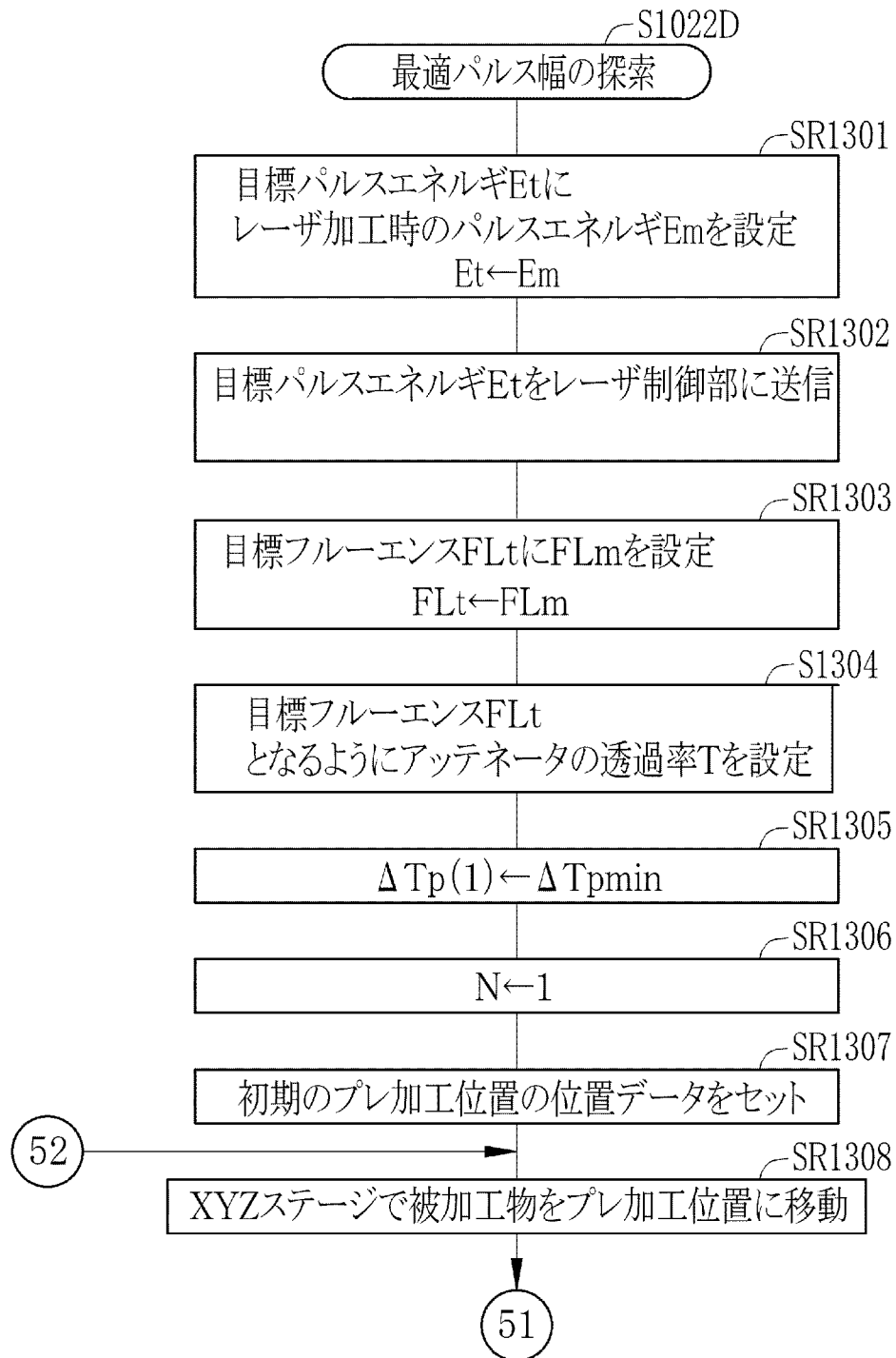
[図31]



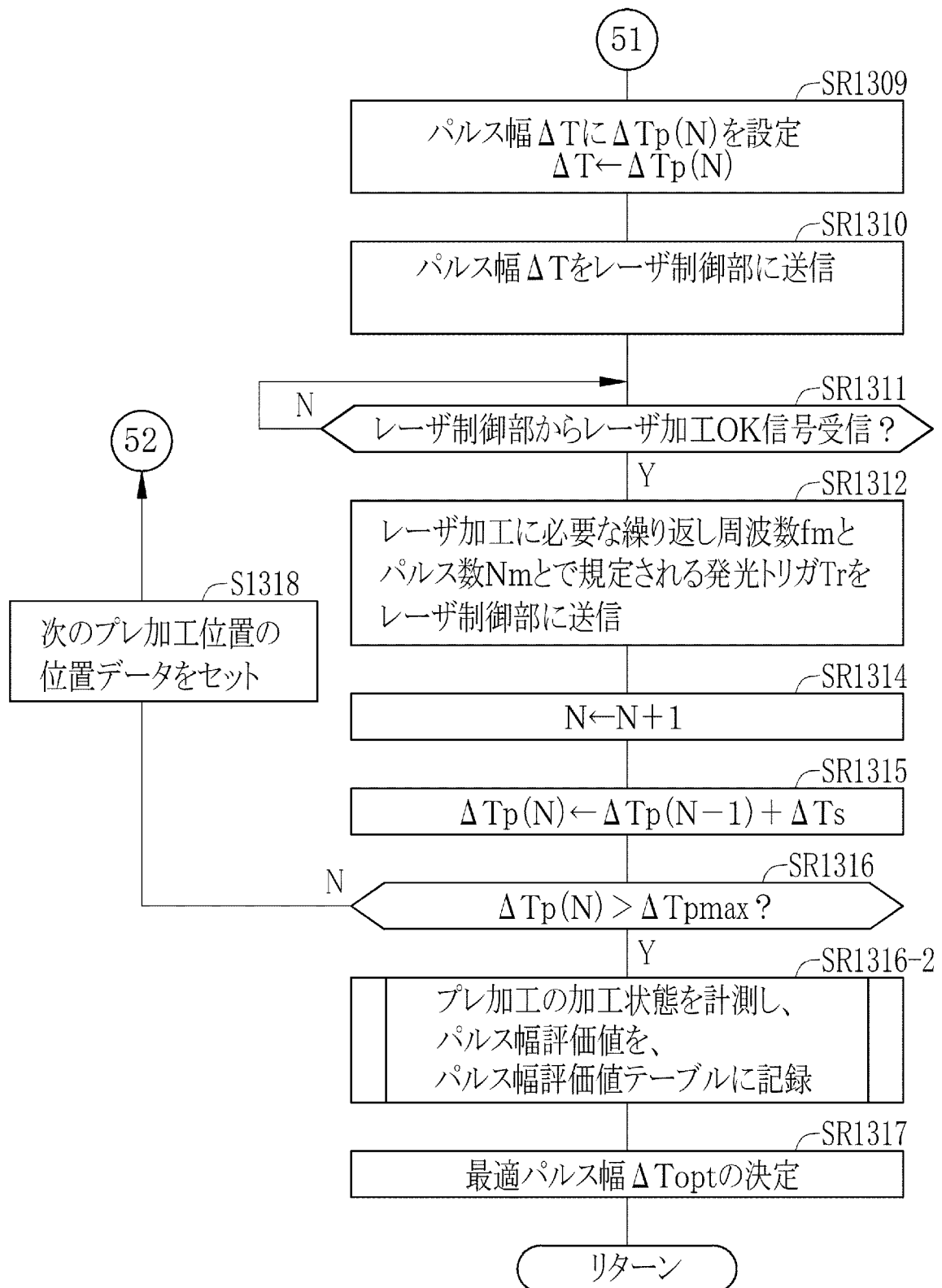
[図32]



[図33]



[図34]



[図35]

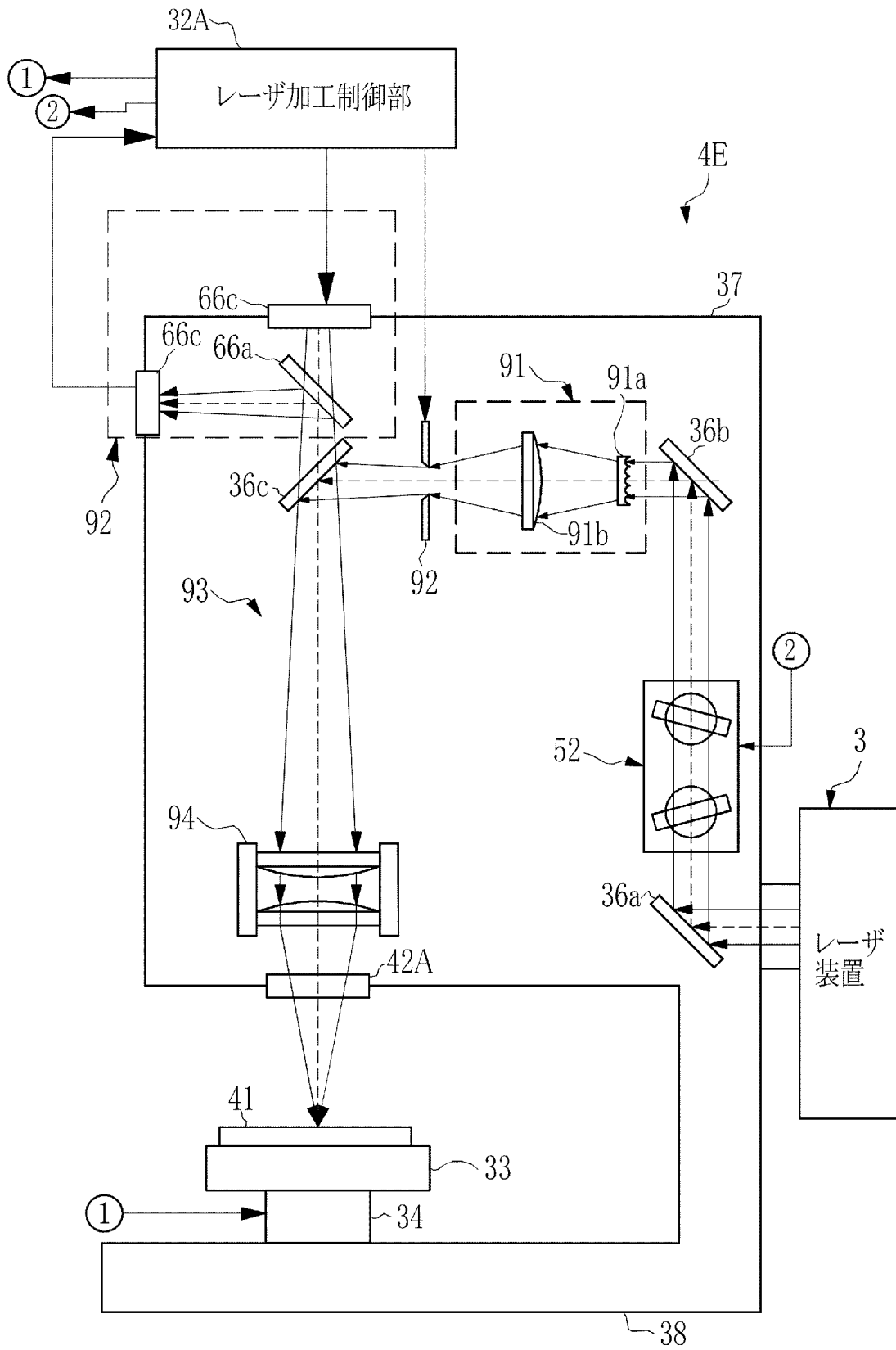


[図36]

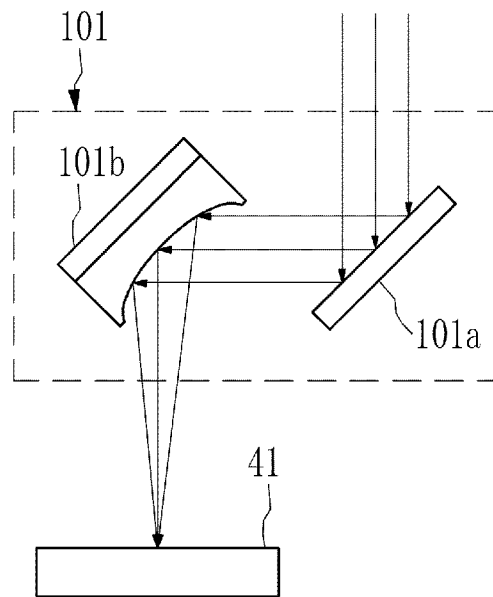
パルス幅評価値テーブル			86
N	$\Delta T_p(N)$	PS (N)	
N=1	$\Delta T_p(1)$	PS (1)	
N=2	$\Delta T_p(2)$	PS (2)	
N=3	$\Delta T_p(3)$	PS (3)	
N=4	$\Delta T_p(4)$	PS (4)	
N=5	$\Delta T_p(5)$	PS (5)	
N=6	$\Delta T_p(6)$	PS (6)	
N=7	$\Delta T_p(7)$	PS (7)	
N=8	$\Delta T_p(8)$	PS (8)	
N=9	$\Delta T_p(9)$	PS (9)	
N=10	$\Delta T_p(10)$	PS (10)	

[illegible]

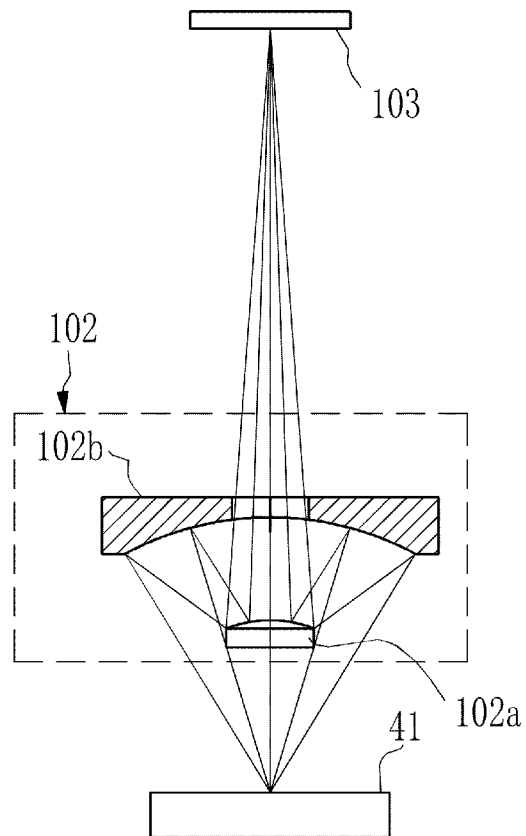
[図38]



[図39]



[図40]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/001346

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B23K26/53(2014.01)i, H01L21/301(2006.01)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)

B23K26/53, H01L21/301

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	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.
A	JP 2007-165839 A (Denso Corp.), 28 June 2007 (28.06.2007), paragraphs [0012] to [0013]; fig. 1 & US 2007/0111477 A1 paragraphs [0021] to [0022]; fig. 1	1-20
A	JP 2004-186200 A (Sekisui Chemical Co., Ltd.), 02 July 2004 (02.07.2004), paragraphs [0049] to [0050] (Family: none)	1-20
A	JP 2010-158686 A (Disco Inc.), 22 July 2010 (22.07.2010), paragraphs [0039] to [0041] (Family: none)	1-20

☐ 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
15 February 2017 (15.02.17)

Date of mailing of the international search report
28 February 2017 (28.02.17)

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. B23K26/53 (2014.01) i, H01L21/301 (2006.01) 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. B23K26/53, H01L21/301

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

国際調査で使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
A	JP 2007-165839 A (株式会社デンソー) 2007.06.28, 段落 [0012] - [0013], [図1] & US 2007/0111477 A1 (段落 [0021] - [0022], [FIG. 1])	1-20
A	JP 2004-186200 A (積水化学工業株式会社) 2004.07.02, 段落 [0049] - [0050] (ファミリーなし)	1-20
A	JP 2010-158686 A (株式会社ディスコ) 2010.07.22, 段落 [0039] - [0041] (ファミリーなし)	1-20

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、国際出願日以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

15.02.2017

国際調査報告の発送日

28.02.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

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)

青木 正博

3 P

3935

電話番号 03-3581-1101 内線 3363