

(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
2022年3月10日(10.03.2022)



(10) 国際公開番号

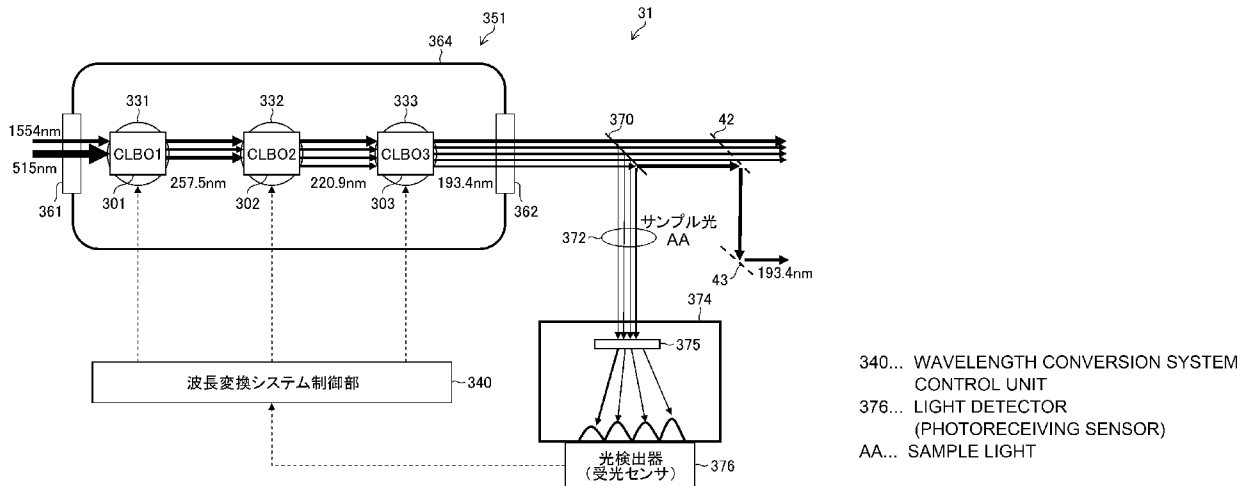
WO 2022/049692 A1

- (51) 国際特許分類:
H01S 3/10 (2006.01) *G02F 1/37* (2006.01)
H01S 5/022 (2021.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2020/033415
- (22) 国際出願日: 2020年9月3日(03.09.2020)
- (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: 田中 洋平(TANAKA, Yohei); 〒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). 曲 晨(QU, Chen); 〒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 新都心国際特許事務所 Tokyo (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, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,

(54) Title: SOLID-STATE LASER SYSTEM, PHASE ADJUSTING METHOD, AND ELECTRONIC DEVICE MANUFACTURING METHOD

(54) 発明の名称: 固体レーザシステム、位相整合方法及び電子デバイスの製造方法

[図3]



(57) Abstract: A solid-state laser system according to an aspect of the present disclosure is provided with: a first non-linear crystal for generating a first wavelength-converted light on the basis of first laser light output from a first laser device; a first adjusting unit for phase-matching the first wavelength-converted light in the crystal of the first non-linear crystal; a second non-linear crystal for generating second wavelength-converted light on the basis of second laser light output from a second laser device and the first wavelength-converted light; a second adjusting unit for phase-matching the second wavelength-converted light in the crystal of the second non-linear crystal; a light detecting unit for detecting light of a wavelength selected by a wavelength selecting element disposed on the optical path of light output from the second non-linear crystal; and a processor which controls the first adjusting unit on the basis of the intensity of at least one of the first wavelength-converted light and the first laser light detected by the light detecting unit, and which controls the second adjusting unit on the basis of the intensity of at least one of the second wavelength-converted light and the first

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,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, 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))

wavelength-converted light detected by the light detecting unit.

(57) 要約: 本開示の一観点に係る固体レーザシステムは、第1のレーザ装置から出力された第1のレーザ光に基づいて第1の波長変換光を生成する第1の非線形結晶と、第1の非線形結晶の結晶内で第1の波長変換光を位相整合させる第1の調整部と、第2のレーザ装置から出力された第2のレーザ光と第1の波長変換光とに基づいて第2の波長変換光を生成する第2の非線形結晶と、第2の非線形結晶の結晶内で第2の波長変換光を位相整合させる第2の調整部と、第2の非線形結晶から出力される光の光路上に配置された波長選択素子で選択された波長の光を検出する光検出部と、光検出部で検出された第1の波長変換光及び第1のレーザ光の少なくとも1つの強度に基づいて第1の調整部を制御し、光検出部で検出された第2の波長変換光及び第1の波長変換光の少なくとも1つの強度に基づいて第2の調整部を制御するプロセッサとを備える。

明 細 書

発明の名称：

固体レーザシステム、位相整合方法及び電子デバイスの製造方法

技術分野

[0001] 本開示は、固体レーザシステム、位相整合方法及び電子デバイスの製造方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、半導体露光装置においては、半導体集積回路の微細化及び高集積化につれて、解像力の向上が要請されている。このため、露光用光源から放出される光の短波長化が進められている。例えば、露光用のガスレーザ装置としては、波長約248nmのレーザ光を出力するKrFエキシマレーザ装置、並びに波長約193nmのレーザ光を出力するArFエキシマレーザ装置が用いられる。

[0003] KrFエキシマレーザ装置及びArFエキシマレーザ装置の自然発振光のスペクトル線幅は、350～400pmと広い。そのため、KrF及びArFレーザ光のような紫外線を透過する材料で投影レンズを構成すると、色収差が発生してしまう場合がある。その結果、解像力が低下し得る。そこで、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、色収差が無視できる程度となるまで狭帯域化する必要がある。そのため、ガスレーザ装置のレーザ共振器内には、スペクトル線幅を狭帯域化するために、狭帯域化素子（エタロンやグレーティング等）を含む狭帯域化モジュール（Line Narrow Module：LNM）が備えられる場合がある。以下では、スペクトル線幅が狭帯域化されるガスレーザ装置を狭帯域化ガスレーザ装置という。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2006-30594号公報

特許文献2：特開2015-155933号公報

概要

[0005] 本開示の1つの観点に係る固体レーザシステムは、第1のレーザ光を出力する第1のレーザ装置と、第2のレーザ光を出力する第2のレーザ装置と、第1のレーザ光に基づいて第1の波長変換光を生成する第1の非線形結晶と、第1の非線形結晶の結晶内で第1の波長変換光を位相整合させる第1の調整部と、第1の波長変換光の光路上に配置され、第1の波長変換光と第2のレーザ光とに基づいて第2の波長変換光を生成する第2の非線形結晶と、第2の非線形結晶の結晶内で第2の波長変換光を位相整合させる第2の調整部と、第2の非線形結晶から出力される光の光路上に配置される波長選択素子と、波長選択素子を通過することにより選択された波長の光を検出する光検出部と、第2の非線形結晶を通過して光検出部で検出された第1の波長変換光及び第1のレーザ光の少なくとも1つの強度に基づいて第1の調整部を制御し、光検出部で検出された第2の波長変換光及び第2の非線形結晶を通過して光検出部で検出された第1の波長変換光の少なくとも1つの強度に基づいて第2の調整部を制御するプロセッサとを備える。

[0006] 本開示の他の1つの観点に係る位相整合方法は、第1のレーザ光に基づいて第1の波長変換光を生成する第1の非線形結晶と、第1の非線形結晶から出力された第1の波長変換光と第2のレーザ光とに基づいて第2の波長変換光を生成する第2の非線形結晶とを備えた波長変換システムの位相整合方法であって、第2の非線形結晶を通過した第1の波長変換光及び第1のレーザ光の少なくとも1つを検出する工程と、検出された第1の波長変換光及び第1のレーザ光の少なくとも1つの強度に基づいて、第1の非線形結晶の結晶内で第1の波長変換光を位相整合させる工程と、第1の非線形結晶の結晶内で第1の波長変換光を位相整合させる調整を実施した後に、第2の非線形結晶から出力された第2の波長変換光及び第2の非線形結晶を通過した第1の波長変換光の少なくとも1つを検出する工程と、検出された第2の波長変換光及び第1の波長変換光の少なくとも1つの強度に基づいて、第2の非線形結晶の結晶内で第2の波長変換光を位相整合させる工程とを含む。

[0007] 本開示の他の1つの観点に係る電子デバイスの製造方法は、第1のレーザ光を出力する第1のレーザ装置と、第2のレーザ光を出力する第2のレーザ装置と、第1のレーザ光に基づいて第1の波長変換光を生成する第1の非線形結晶と、第1の非線形結晶の結晶内で第1の波長変換光を位相整合させる第1の調整部と、第1の波長変換光の光路上に配置され、第1の波長変換光と第2のレーザ光とに基づいて第2の波長変換光を生成する第2の非線形結晶と、第2の非線形結晶の結晶内で第2の波長変換光を位相整合させる第2の調整部と、第2の非線形結晶から出力される光の光路上に配置される波長選択素子と、波長選択素子を通過することにより選択された波長の光を検出する光検出部と、第2の非線形結晶を透過して光検出部で検出された第1の波長変換光及び第1のレーザ光のうち少なくとも1つの強度に基づいて第1の調整部を制御し、光検出部で検出された第2の波長変換光及び第2の非線形結晶を透過して光検出部で検出された第2のレーザ光のうち少なくとも1つの強度に基づいて第2の調整部を制御するプロセッサと、を備える固体レーザシステムを用いて第3のレーザ光を生成し、第3のレーザ光を露光装置に出力し、電子デバイスを製造するために、露光装置内で感光基板上に第3のレーザ光を露光することを含む。

図面の簡単な説明

[0008] 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、固体レーザシステムの構成を概略的に示す図である。

[図2]図2は、比較例に係る波長変換システムの構成例を概略的に示す。

[図3]図3は、実施形態1に係る固体レーザシステムに適用される波長変換システムの構成を概略的に示す。

[図4]図4は、非線形結晶への入射角度と変換波長出力との関係を示すグラフである。

[図5]図5は、初期アライメントのメインルーチンの例を示すフローチャートである。

[図6]図6は、変換光発見ルーチンの例を示すフローチャートである。

[図7]図7は、変換光発見ルーチンの動作イメージを示すグラフである。

[図8]図8は、変換光のピーク値探索ルーチンの例を示すフローチャートである。

[図9]図9は、変換光のピーク値探索ルーチンの動作イメージを示すグラフである。

[図10]図10は、実施形態2に係る波長変換システムに適用される波長測定部の構成を概略的に示す。

[図11]図11は、実施形態3に係る波長変換システムの構成を概略的に示す。

[図12]図12は、実施形態4に係る波長変換システムの構成を概略的に示す。

[図13]図13は、実施形態5に係る波長変換システムの構成を概略的に示す。

[図14]図14は、未変換光と変換光との出力の関係を模式的に示すグラフである。

[図15]図15は、実施形態5に適用される初期アライメントのメインルーチンの例を示すフローチャートである。

[図16]図16は、第3のCLBO結晶への入射角度と第1の和周波光（未変換光）出力との関係を模式的に示すグラフである。

[図17]図17は、第3のCLBO結晶の第1の和周波光出力測定に基づく第2の和周波光発見ルーチンの例を示すフローチャートである。

[図18]図18は、第1の和周波光出力測定に基づく第2の和周波光発見ルーチンの動作イメージを示すグラフである。

[図19]図19は、第1の和周波光（未変換光）のボトム値探索ルーチンの例を示すフローチャートである。

[図20]図20は、未変換光のボトム値探索ルーチンの動作イメージを示すグラフである。

[図21]図 2 1 は、実施形態 6 に係る固体レーザシステムに適用される波長変換システムの構成を概略的に示す。

[図22]図 2 2 は、複数の測定結果からフィッティング処理によってピーク位置を予測する演算処理の概念図である。

[図23]図 2 3 は、実施形態 6 に適用される変換光のピーク値探索ルーチンの例を示すフローチャートである。

[図24]図 2 4 は、実施形態 7 に係る波長変換システムの構成を概略的に示す。

[図25]図 2 5 は、実施形態 8 に係る波長変換システムの構成を概略的に示す。

[図26]図 2 6 は、露光装置の構成を概略的に示す。

実施形態

[0009] ー目次ー

1. 固体レーザシステムの概要

1. 1 構成

1. 2 動作

2. 課題

3. 実施形態 1

3. 1 構成

3. 2 動作

3. 3 初期アライメントの制御例 1

3. 3. 1 初期アライメントメインルーチン

3. 3. 2 変換光発見ルーチン

3. 3. 3 変換光のピーク値探索ルーチン

3. 4 作用・効果

4. 実施形態 2

4. 1 構成

4. 2 動作

4. 3 作用・効果

5. 実施形態3

5. 1 構成

5. 2 動作

5. 3 作用・効果

6. 実施形態4

6. 1 構成

6. 2 動作

6. 3 作用・効果

7. 実施形態5

7. 1 構成

7. 2 動作

7. 3 初期アライメントの制御例2

7. 3. 1 初期アライメントメインルーチン

7. 3. 2 第2の和周波光発見ルーチン

7. 3. 3 未変換光のボトム値探索ルーチン

7. 4 作用・効果

7. 5 変形例

8. 実施形態6

8. 1 構成

8. 2 動作

8. 3 変換光のピーク値探索ルーチン

8. 4 作用・効果

8. 5 変形例

9. 実施形態7

9. 1 構成

9. 2 動作

9. 3 作用・効果

10. 実施形態8

10.1 構成

10.2 動作

10.3 作用・効果

11. 非線形結晶の位相整合について

12. 電子デバイスの製造方法

13. その他

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. 固体レーザシステムの概要

1.1 構成

図1は、固体レーザシステム1の構成を概略的に示す図である。図1に示すように、固体レーザシステム1は、第1のパルスレーザ光を出力する第1の固体レーザ装置10と、第2のパルスレーザ光を出力する第2の固体レーザ装置20と、波長変換システム30と、第1の高反射ミラー41と、ダイクロイックミラー51と、第2の高反射ミラー42と、第3の高反射ミラー43と、固体レーザシステム制御部60とを含む。

[0011] 第1の高反射ミラー41は、第2の固体レーザ装置20から出力される第2のパルスレーザ光を高反射するミラーである。第1の高反射ミラー41は、第2のパルスレーザ光を高反射して、ダイクロイックミラー51に入射させるように配置される。

[0012] ダイクロイックミラー51は、第1の固体レーザ装置10と波長変換システム30との間の光路上に配置され、第1のパルスレーザ光の光路と第2のパルスレーザ光の光路とが一致するように配置される。ダイクロイックミラ

ー51は、波長約515nmの第1のพัスレーザ光を高透過し、かつ波長約1554nmの第2のพัスレーザ光を高反射する膜がコートされている。ダイクロイックミラー51は、第1のพัスレーザ光と第2のพัスレーザ光とが互いの光路軸を一致させた状態で波長変換システム30に入射するように配置される。

[0013] 波長変換システム30は、第1のพัスレーザ光と第2のพัスレーザ光とに基づいて第3のพัスレーザ光を出力するように、ダイクロイックミラー51を透過した第1のพัスレーザ光とダイクロイックミラー51で反射された第2のพัスレーザ光との光路上に配置される。

[0014] 第2の高反射ミラー42及び第3の高反射ミラー43は、波長変換システム30から出力される波長約193.4nmの第3のพัスレーザ光を高反射する膜が基板にコートされている。第2の高反射ミラー42及び第3の高反射ミラー43を構成する基板は、例えば石英であってもよいし、CaF₂であってもよい。

[0015] 第1の固体レーザ装置10は、波長約515nmの第1のพัスレーザ光を出力するレーザ装置であって、第1の半導体レーザ101と、第1の半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier : SOA) 111と、Ybファイバ増幅器120と、固体増幅器124と、LBO (LiB₃O₅) 結晶126とを含む。なお、図1及び以降の図面において、例えば「半導体レーザ1」や「SOA#1」等の数値を付した表記は、それぞれ第1の半導体レーザ、第1の半導体光増幅器 (SOA) 等を表す。

[0016] 第1の半導体レーザ101は、波長約1030nmでシングル縦モードのレーザ光をCW (Continuous Wave) 発振する分布帰還型 (Distributed Feedback : DFB) の半導体レーザである。分布帰還型半導体レーザを「DFBレーザ」という。DFBレーザは、電流制御及び／又は温度制御により発振波長を変更することができる。第1の半導体レーザ101から出力されるCWレーザ光を「第1のCWレーザ光」という。

[0017] 第1の半導体光増幅器111は、第1の半導体レーザ101の下流側に配

置され、半導体素子にパルス電流を流すことによって、第1のCWレーザ光をパルス増幅する増幅器である。第1の半導体光増幅器111から出力される増幅パルスレーザ光を「第1の増幅パルスレーザ光」という。

[0018] Ybファイバ増幅器120は、第1の半導体光増幅器111の下流側に配置される光ファイバ増幅器である。Ybファイバ増幅器120は、Ybがドープされた光ファイバに、図示しないCW励起半導体レーザから励起光を入力することによって、第1の増幅パルスレーザ光をさらにパルス増幅する。Ybファイバ増幅器120から出力される増幅パルスレーザ光を「第1のファイバ増幅パルスレーザ光」という。

[0019] 固体増幅器124は、Ybファイバ増幅器120の下流側に配置される。固体増幅器124は、例えば、YAG (Yttrium Aluminum Garnet) 結晶に、Ybがドープされた固体増幅器であり、図示しない励起光源からの励起光によって、第1のファイバ増幅パルスレーザ光をさらに、パルス増幅する増幅器である。固体増幅器124から出力される増幅パルスレーザ光を「第1の固体増幅パルスレーザ光」という。

[0020] LBO結晶126は、固体増幅器124の下流側に配置され、波長約1030nmの第1の固体増幅パルスレーザ光から波長約515nmの第2高調波光を生成する非線形結晶である。「非線形結晶」という用語は「非線形光学結晶」と同義である。LBO結晶126から波長約515nmの第1のパルスレーザ光が出力される。

[0021] 第2の固体レーザ装置20は、波長約1554nmの第2のパルスレーザ光を出力するレーザ装置であって、第2の半導体レーザ202と、第2の半導体光増幅器212と、Erファイバ増幅器220とを含む。

[0022] 第2の半導体レーザ202は、波長約1554nmでシングル縦モードのレーザ光をCW発振するDFBレーザである。第2の半導体レーザ202から出力されるCWレーザ光を「第2のCWレーザ光」という。

[0023] 第2の半導体光増幅器212は、第2の半導体レーザ202の下流側に配置され、半導体素子にパルス電流を流すことによって、第2のCWレーザ光

をパルス増幅する増幅器である。第2の半導体光増幅器212から出力される増幅パルスレーザ光を「第2の増幅パルスレーザ光」という。

[0024] Erファイバ増幅器220は、第2の半導体光増幅器212の下流側に配置される光ファイバ増幅器である。Erファイバ増幅器220は、Erがドープされた光ファイバに、図示しないCW励起半導体レーザから励起光を入力することによって、第2の増幅パルスレーザ光をさらにパルス増幅する。Erファイバ増幅器220から波長約1554nmの第2のパルスレーザ光が出力される。

[0025] 波長変換システム30は、非線形結晶である第1のCLBO (CsLiB₆O₁₀) 結晶301と、第2のCLBO結晶302と、第3のCLBO結晶303と、第1のビームスプリッタ311と、第2のビームスプリッタ312と、第3のビームスプリッタ313とを含む。また、波長変換システム30は、第1の光センサ321と、第2の光センサ322と、第3の光センサ323と、第1の回転ステージ331と、第2の回転ステージ332と、第3の回転ステージ333と、波長変換システム制御部340とを含む。

[0026] 第1のCLBO結晶301、第1のビームスプリッタ311、第2のCLBO結晶302、第2のビームスプリッタ312、第3のCLBO結晶303及び第3のビームスプリッタ313は、ダイクロイックミラー51によって同軸となるように結合された第1のパルスレーザ光及び第2のパルスレーザ光のレーザ光路上に、この順番で配置される。

[0027] 第1のCLBO結晶301は、第1の回転ステージ331上に配置され、波長約515nmの光の第2高調波光（波長約257.5nm）を生成するように配置される。

[0028] 第1のビームスプリッタ311は、第1のCLBO結晶301と第2のCLBO結晶302との間の光路上に配置され、第1のビームスプリッタ311による反射光が第1の光センサ321に入射するように配置される。

[0029] 第1のビームスプリッタ311は、第2のパルスレーザ光と、波長約257.5nmの第2高調波光とを高透過する基板に、第2のパルスレーザ光を

高透過し、波長約257.5 nmの第2高調波光の一部を反射する膜がコートされている。

[0030] 第2のCLBO結晶302は、第2の回転ステージ332上に配置され、波長約515 nmの第1のパルスレーザ光と第2のパルスレーザ光との和周波光である第1の和周波光（波長約220.9 nm）を生成するように配置される。

[0031] 第2のビームスプリッタ312は、第2のCLBO結晶302と第3のCLBO結晶303との間の光路上に配置され、第2のビームスプリッタ312により反射された第1の和周波光が第2の光センサ322に入射するように配置される。

[0032] 第2のビームスプリッタ312は、第2のパルスレーザ光を高透過し、波長約220.9 nmの第1の和周波光を高透過する基板に、第2のパルスレーザ光を高透過し、波長約220.9 nmの第1の和周波光の一部を反射する膜がコートされている。

[0033] 第3のCLBO結晶303は、第3の回転ステージ333上に配置され、波長約220.9 nmの第1の和周波光と第2のパルスレーザ光との和周波光である第2の和周波光（波長約193.4 nm）を生成するように配置される。

[0034] 第3のビームスプリッタ313は、第3のCLBO結晶303の下流の光路上に配置され、第3の反射した第2の和周波光が光センサ3に入射するように配置される。

[0035] 第3のビームスプリッタ313は、波長約193.4 nmの第2の和周波光を高透過する基板に、波長約193.4 nmの第2の和周波光を高透過し、波長約193.4 nmの第2の和周波光の一部を反射する膜がコートされている。

[0036] 第1の光センサ321、第2の光センサ322及び第3の光センサ323のそれぞれは、パルスエネルギーを検出できるセンサであればよく、例えば、高速に応答するフォトダイオードや光電管や、平均パワーを測定するカロリ

ーメータであってもよい。

[0037] CLBO結晶は、大気中に配置すると空気中の水分を吸収して劣化するため、第1のCLBO結晶301、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303は、CLBO結晶と反応しにくい不活性ガス（例えば、Arガス）雰囲気中で、約120℃に温度制御されている。

[0038] すなわち、第1のCLBO結晶301、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303のそれぞれは、図示しないヒータと温度センサとを含む結晶ホルダに固定され、第1のビームスプリッタ311、第2のビームスプリッタ312及び第3のビームスプリッタ313と、第1の回転ステージ331、第2の回転ステージ332及び第3の回転ステージ333と、第1の光センサ321、第2の光センサ322及び第3の光センサ323と共に、不活性ガスをパージしたガスセル内に配置される。ガスセルは、「CLBOセルボックス」、「CLBOセル」又は単に「セル」と呼ばれる場合がある。

[0039] 第1の回転ステージ331、第2の回転ステージ332及び第3の回転ステージ333のそれぞれはステージを回転させる図示しないアクチュエータを含む。

[0040] 固体レーザシステム制御部60と波長変換システム制御部340とのそれぞれは、プロセッサを用いて構成される。本開示のプロセッサとは、制御プログラムが記憶された記憶装置と、制御プログラムを実行するCPU（Central Processing Unit）とを含む処理装置である。プロセッサは本開示に含まれる各種処理を実行するために特別に構成又はプログラムされている。

[0041] 固体レーザシステム制御部60と波長変換システム制御部340とのそれぞれは、1台又は複数台のコンピュータのハードウェア及びソフトウェアの組み合わせによって実現することが可能である。ソフトウェアはプログラムと同義である。プログラマブルコントローラはコンピュータの概念に含まれる。

[0042] コンピュータは、例えば、CPU及び記憶装置を含んで構成され得る。記

憶装置は、有体物たる非一時的なコンピュータ可読媒体であり、例えば、主記憶装置であるメモリ及び補助記憶装置であるストレージを含む。コンピュータ可読媒体は、例えば、半導体メモリ、ハードディスクドライブ（Hard Disk Drive：HDD）装置、若しくはソリッドステートドライブ（Solid State Drive：SSD）装置又はこれらの複数の組み合わせであってよい。プロセッサが実行するプログラムはコンピュータ可読媒体に記憶されている。

[0043] また、固体レーザシステム制御部60と波長変換システム制御部340などの各種の制御装置や処理装置の機能の一部又は全部は、FPGA（Field Programmable Gate Array）やASIC（Application Specific Integrated Circuit）に代表される集積回路を用いて実現してもよい。

[0044] 1. 2 動作

固体レーザシステム制御部60は、波長変換システム制御部340に、波長変換準備信号を送信する。波長変換システム制御部340は、波長変換準備信号を受信すると、不活性ガスのパージを制御し、かつ、第1のCLBO結晶301、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303の各結晶の温度が約120℃となるように各結晶ホルダのヒータを制御する。

[0045] 固体レーザシステム制御部60は、第1の半導体レーザ101に発振波長 λ_{c1} （1030nm）のレーザ光をCW発振させ、かつ、第2の半導体レーザ202に発振波長 λ_{c2} （1554nm）のレーザ光をCW発振させる。

[0046] 固体レーザシステム制御部60は、第1の半導体レーザ101及び第2の半導体レーザ202の両方から波長OK信号を受信した場合に、固体レーザシステム制御部60は、第1の固体レーザ装置10から出力される第1のパルスレーザ光と第2の固体レーザ装置20から出力される第2のパルスレーザ光とが第1のCLBO結晶301において、同じタイミングで入射するように、第1の半導体光増幅器111及び第2の半導体光増幅器212のそれぞれにトリガタイミングを設定する。

[0047] ここで、固体レーザシステム1の目標中心波長 λ_{ct} が193.4nmで

あって、第1の固体レーザ装置10の目標中心波長 λ_{1ct} が515nm、第2の固体レーザ装置20の目標中心波長 λ_{2ct} が1554nmである場合について具体的に説明する。

[0048] 第1の固体レーザ装置10においては、第1の半導体レーザ101から中心波長1030nmのCW発振のレーザ光（第1のCWレーザ光）が出力される。

[0049] 第1のCWレーザ光は、第1の半導体光増幅器111によってパルス増幅されて、第1の増幅パルスレーザ光が生成される。

[0050] 第1の半導体光増幅器111から出射された第1の増幅パルスレーザ光は、Ybファイバ増幅器120と固体増幅器124とによって増幅されて、LBO結晶126に入射する。

[0051] LBO結晶126では、入射したパルスレーザ光が波長1030nmの光の第2高調波光（波長515nm）である第1のパルスレーザ光に波長変換される。LBO結晶126によって波長変換された第1のパルスレーザ光は、ダイクロイックミラー51を介して波長変換システム30に入射する。

[0052] 一方、第2の固体レーザ装置20においては、第2の半導体レーザ202から中心波長1554nmのCW発振のレーザ光（第2のCWレーザ光）が出力される。

[0053] 第2のCWレーザ光は、第2の半導体光増幅器212によってパルス増幅されて、パルスレーザ光（第2の増幅パルスレーザ光）を生成する。

[0054] 第2の増幅パルスレーザ光は、Erファイバ増幅器220によって増幅され、第2のパルスレーザ光として出力される。

[0055] 第2のパルスレーザ光は、第1の高反射ミラー41とダイクロイックミラー51とを介して、第1のパルスレーザ光と空間的に同じ光路に結合されて波長変換システム30に入射する。

[0056] 固体レーザシステム制御部60は、第1のパルスレーザ光が一定のパルスエネルギーとなるように、第1の固体レーザ装置10のYbファイバ増幅器120と固体増幅器124とを制御する。

- [0057] 固体レーザシステム制御部60は、第2のパルスレーザ光が一定のパルスエネルギーとなるように、第2の固体レーザ装置20のErファイバ増幅器220を制御する。
- [0058] 固体レーザシステム制御部60は、波長変換システム制御部340に制御命令を送信する。
- [0059] 波長変換システム30においては、第1のパルスレーザ光(515nm)は、第1のCLBO結晶301によって、第2高調波光に変換されて波長257.5nmのパルスレーザ光を生成する。
- [0060] 第1のビームスプリッタ311では、波長257.5nmのパルスレーザ光の一部はサンプルされ、第1の光センサ321に入射して、波長257.5nmのパルスレーザ光のパルスエネルギーが検出される。
- [0061] 波長変換システム制御部340は、第1の光センサ321での検出値が最大となるように、第1の回転ステージ331を操作して第1のCLBO結晶301への入射角度を制御する。
- [0062] 次に、波長257.5nmの第2高調波光と波長1554nmの第2のパルスレーザ光とは、第1のビームスプリッタ311を介して第2のCLBO結晶302に入射する。
- [0063] 第2のCLBO結晶302においては、波長257.5nmの第2高調波光と波長1554nmの第2のパルスレーザ光との和周波である波長220.9nmの第1の和周波光を生成する。
- [0064] 第2のビームスプリッタ312では、波長220.9nmの第1の和周波光の一部はサンプルされ、第2の光センサ322に入射して、波長220.9nmの第1の和周波光のパルスエネルギーが検出される。
- [0065] 波長変換システム制御部340は、第2の光センサ322での検出値が最大となるように、第2の回転ステージ332を操作して第2のCLBO結晶302への入射角度を制御する。
- [0066] 第3のCLBO結晶303においては、波長220.9nmの第1の和周波光と波長1554nmの第2のパルスレーザ光との和周波である波長19

3. 4 nmの第2の和周波光を生成する。

[0067] 第3のビームスプリッタ313では、波長193.4 nmの第2の和周波光の一部はサンプルされ、第3の光センサ323に入射して、波長193.4 nmの第2の和周波光のパルスエネルギーが検出される。また、第3のビームスプリッタ313を透過した第2の和周波光は第3のパルスレーザ光として固体レーザシステム1から出力される。

[0068] 波長変換システム制御部340は、第3の光センサ323での検出値が最大となるように、第3の回転ステージ333を操作して第3のCLBO結晶303への入射角度を制御する。

[0069] 波長変換システム制御部340は、第1の光センサ321、第2の光センサ322及び第3の光センサ323のそれぞれの検出値が最大値付近に制御されると、固体レーザシステム制御部60に波長変換システム制御OKの信号を送信する。

[0070] 2. 課題

図2は、比較例に係る波長変換システム30の構成例を概略的に示す。本開示の比較例とは、出願人のみによって知られていると出願人が認識している形態であって、出願人が自認している公知例ではない。

[0071] 波長変換システム30は、CLBOセルボックス350を含む。CLBOセルボックス350は、入射ウィンドウ361と出射ウィンドウ362とを備えた容器364を含み、容器364内に第1のCLBO結晶301、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303と、第1のビームスプリッタ311、第2のビームスプリッタ312及び第3のビームスプリッタ313と、第1の回転ステージ331、第2の回転ステージ332及び第3の回転ステージ333と、第1の光センサ321、第2の光センサ322及び第3の光センサ323とが収容される。なお、第1の回転ステージ331、第2の回転ステージ332及び第3の回転ステージ333と、第1の光センサ321、第2の光センサ322及び第3の光センサ323とについては、それぞれの一部が容器364の外側に出てもよい。

[0072] CLBO結晶は、吸湿性があり、セル内部で120℃程度に加熱して、温度を維持した状態で使用する必要がある。

[0073] そのため、第1のCLBO結晶301、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303は、1つのセル中に配置し、波長変換効率を改善するために、結晶間の距離をできるだけ小さくする必要がある。

[0074] また、第1のCLBO結晶301、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303は、波長変換が発生し、かつその変換効率が最大となるように、各結晶の角度（それぞれの結晶への光の入射角度）を制御する必要がある。

[0075] 3. 実施形態1

3. 1 構成

図3は、実施形態1に係る固体レーザシステム1に適用される波長変換システム31の構成を概略的に示す。実施形態1では、図2に示した波長変換システム30の代わりに、図3に示す波長変換システム31が適用される。図3に示す構成について、図2と異なる点を説明する。

[0076] 波長変換システム31は、CLBOセルボックス350に代えて、CLBOセルボックス351を備える。CLBOセルボックス351は、図2で説明した第1のビームスプリッタ311、第2のビームスプリッタ312及び第3のビームスプリッタ313と、第1の光センサ321、第2の光センサ322及び第3の光センサ323とを備えておらず、容器364内において、第1のCLBO結晶301、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303がこの順で一行に並んで配置されており、各結晶に対応する第1の回転ステージ331、第2の回転ステージ332及び第3の回転ステージ333が配置されている。容器364内には、図示しないガス供給口から不活性ガスが供給される。

[0077] 波長変換システム31は、図2における第1のビームスプリッタ311、第2のビームスプリッタ312及び第3のビームスプリッタ313と、第1の光センサ321、第2の光センサ322及び第3の光センサ323との代

わりに、分配光学素子 370 と、レンズ 372 と、波長測定部 374 とを備える。波長測定部 374 は、波長分散素子 375 と光検出器 376 とを含む。

[0078] 分配光学素子 370 は、ビームスプリッタなどの分配ミラーであってよい。分配光学素子 370 として、例えば、ビームサンプラースプリッタやダイクロイックミラーなどを用いることができる。

[0079] 波長分散素子 375 は、波長分散するためのグレーティングや回折格子等を用いてもよいし、フィルタ等を用いてもよい。

[0080] 光検出器 376 は、波長分散された各波長の光強度を検出する受光センサを含む。光検出器 376 は、波長によって感度が異なるラインセンサや CCD 素子、フィルタと感知型の素子とを組み合わせ用いてもよい。

[0081] 波長約 515 nm の第 1 のパルスレーザ光は本開示における「第 1 のレーザ光」の一例である。第 1 の固体レーザ装置 10 は本開示における「第 1 のレーザ装置」の一例である。波長約 1554 nm の第 2 のパルスレーザ光は本開示における「第 2 のレーザ光」の一例である。第 2 の固体レーザ装置 20 は本開示における「第 2 のレーザ装置」の一例である。第 1 の CLBO 結晶 301 は本開示における「第 1 の非線形結晶」の一例である。第 1 の回転ステージ 331 は本開示における「第 1 の調整部」及び「第 1 の角度調整機構」の一例である。第 2 の CLBO 結晶 302 は本開示における「第 2 の非線形結晶」の一例である。第 2 の回転ステージ 332 は本開示における「第 2 の調整部」及び「第 2 の角度調整機構」の一例である。第 3 の CLBO 結晶 303 は本開示における「第 3 の非線形結晶」の一例である。第 3 の回転ステージ 333 は本開示における「第 3 の調整部」の一例である。波長分散素子 375 は本開示における「波長選択素子」の一例である。光検出器 376 は本開示における「光検出部」の一例である。光検出器 376 に適用されるラインセンサは本開示における「複数の光検出素子」の一例である。波長変換システム制御部 340 は本開示における「プロセッサ」の一例である。波長変換システム 31 から出力される波長約 193.4 nm のパルスレーザ

光は本開示における「第3のレーザ光」の一例である。

[0082] 3. 2 動作

C L B Oセルボックス351の内部に並べた第1のC L B O結晶301、第2のC L B O結晶302及び第3のC L B O結晶303によって波長変換を行い、出射ウインドウ362を介して出力された光の一部を分配光学素子370で分配する。波長変換の動作は図1で説明したとおりである。分配光学素子370によって分配されたサンプル光は、レンズ372を介して波長測定部374に入射する。波長測定部374では波長分散素子375によって波長分散し、ラインセンサ等の光検出器376を用いて各波長の強度を測定する。

[0083] 第1のパルスレーザ光(515nm)の測定は、第1のパルスレーザ光の出力の安定性の確認や第2高調波光の変換量を確認するために必要である。第1のパルスレーザ光の出力を測定しておくことにより、第2高調波光の出力が変動した場合に、その原因が第1のパルスレーザ光由来なのか、第1のC L B O結晶301由来なのかを分別することができる。

[0084] 第2のパルスレーザ光(1554nm)についても同様に出力を測定することが可能であるが、測定結果を利用していない場合は光検出器376において検出しなくてもよい。一部未変換光は、C L B Oセルボックス351を透過しているので検出は可能である。

[0085] 波長変換システム制御部340は、各波長の強度を最適化するため、第1のC L B O結晶301、第2のC L B O結晶302及び第3のC L B O結晶303のそれぞれに対応する第1の回転ステージ331、第2の回転ステージ332及び第3の回転ステージ333を操作して、回転角度を変化させることにより各C L B O結晶の調整(アライメント)を行う。波長変換システム制御部340は、それぞれの結晶による変換後の波長の光出力を最大化することで結晶角度位置の初期調整(初期アライメント)を行う。波長変換によって発生する変換後の波長の光出力を「変換波長出力」といい、変換後の波長の光を「変換光」という。

[0086] 3. 3 初期アライメントの制御例 1

3. 3. 1 初期アライメントメインルーチン

実施形態 1 に係る波長変換システム 3 1 に適用される位相整合方法の例を説明する。CLBO 結晶の初期アライメントでは、各 CLBO 結晶の角度を、発生する各変換光（第 2 高調波光、第 1 の和周波光及び第 2 の和周波光）の出力増減から判断し、最適な結晶角度に調整する。

[0087] 図 4 は、非線形結晶への入射角度と変換波長出力との関係を示すグラフである。図 4 のように、変換波長出力が最大となる入射角度となるように各 CLBO 結晶の角度調整が行われる。

[0088] 各 CLBO 結晶の角度調整は、光が入射する順番ごとに行う。つまり、最初に、第 1 の CLBO 結晶 3 0 1 について角度調整を行い、第 1 の CLBO 結晶 3 0 1 が適正な角度に調整された状態で、次に、第 2 の CLBO 結晶 3 0 2 について角度調整を行い、第 1 の CLBO 結晶 3 0 1 及び第 2 の CLBO 結晶 3 0 2 が適正な角度に調整された状態で、最後に、第 3 の CLBO 結晶 3 0 3 について角度調整を行う。

[0089] それぞれの CLBO 結晶について、角度を変更しながら対象波長の強度を測定し、変換光の発生までを探索する変換光発見ルーチンを実施後、変換波長出力の最大値を探索するピーク値探索ルーチンを実施することにより、最適な角度に調整する。

[0090] 図 5 は、初期アライメントのメインルーチンの例を示すフローチャートである。図 5 に示す各ステップの処理は、例えば、波長変換システム制御部 3 4 0 として機能するプロセッサがプログラムの命令を実行することにより実現される。

[0091] 初期アライメントが開始されると、ステップ S 1 1 において、波長変換システム制御部 3 4 0 は第 1 の CLBO 結晶 3 0 1 の第 2 高調波光発見ルーチンを実施する。第 1 の CLBO 結晶 3 0 1 の第 2 高調波光発見ルーチンでは、第 1 の CLBO 結晶 3 0 1 により生成される第 2 高調波光（257.5 nm）の光強度が閾値以上となる角度位置が見つかるまで第 1 の CLBO 結晶

301 についての角度変更の操作が行われる。ステップS11の工程は、本開示における「第1の波長変換光を発見する工程」の一例である。

[0092] 波長変換システム制御部340は、第2高調波光の光強度が閾値以上となる角度位置が見つかりとステップS12に進む。

[0093] ステップS12において、波長変換システム制御部340は第1のCLBO結晶301の第2高調波光ピーク値探索ルーチンを実施する。第1のCLBO結晶301の第2高調波光ピーク値探索ルーチンでは、第2高調波光の光強度が最大値となるように第1のCLBO結晶301の角度調整が行われる。

[0094] 次に、ステップS13において、波長変換システム制御部340は第2のCLBO結晶302の第1の和周波光発見ルーチンを実施する。第2のCLBO結晶302の第1の和周波光発見ルーチンでは、第2のCLBO結晶302により生成される第1の和周波光（220，9nm）の光強度が閾値以上となる角度位置が見つかるまで第2のCLBO結晶302についての角度変更の操作が行われる。ステップS13の工程は、本開示における「第2の波長変換光を発見する工程」の一例である。

[0095] 波長変換システム制御部340は、第1の和周波光の光強度が閾値以上となる角度位置が見つかりとステップS14に進む。

[0096] ステップS14において、波長変換システム制御部340は第2のCLBO結晶302の第1の和周波光ピーク値探索ルーチンを実施する。第2のCLBO結晶302の第1の和周波光ピーク値探索ルーチンでは、第1の和周波光の光強度が最大値となるように第2のCLBO結晶302の角度調整が行われる。

[0097] 次に、ステップS15において、波長変換システム制御部340は第3のCLBO結晶303の第2の和周波光発見ルーチンを実施する。第3のCLBO結晶303の第2の和周波光発見ルーチンでは、第3のCLBO結晶303により生成される第2の和周波光（193，4nm）の光強度が閾値以上となる角度位置が見つかるまで第3のCLBO結晶303についての角

度変更の操作が行われる。波長変換システム制御部340は、第2の和周波光の光強度が閾値以上となる角度位置が見つかりとステップS16に進む。

[0098] ステップS16において、波長変換システム制御部340は第3のCLBO結晶303の第2の和周波光ピーク値探索ルーチンを実施する。第3のCLBO結晶303の第2の和周波光ピーク値探索ルーチンでは、第2の和周波光の光強度が最大値となるように第3のCLBO結晶303の角度調整が行われる。ステップS16の処理が終わると、図5のフローチャートを終了する。

[0099] 3. 3. 2 変換光発見ルーチン

図6は、変換光発見ルーチンの例を示すフローチャートである。図6に示すフローチャートは、図5のステップS11、ステップS13及びステップS15に適用される。

[0100] 変換光発見ルーチンが開始されると、ステップS21において波長変換システム制御部340は変換光の出力を測定する。波長変換システム制御部340は、光検出器376から対象波長の光強度情報を取得する。

[0101] 次に、ステップS22において、波長変換システム制御部340は変換光の出力測定値と、波長変換発生判定用の閾値とを比較する。ステップS22における比較の結果、出力測定値が閾値に満たない場合、波長変換システム制御部340はステップS23に進む。

[0102] ステップS23において、波長変換システム制御部340は結晶角度が移動範囲限界に達したかどうかを判定する。ステップS23の判定結果がNo判定である場合、つまり、結晶角度が移動範囲限界に達していない場合、波長変換システム制御部340はステップS25に進む。

[0103] ステップS25において、波長変換システム制御部340は対象とするCLBO結晶の角度を変更し、ステップS21に戻る。

[0104] その一方、ステップS23の判定結果がYes判定である場合、つまり、結晶角度が移動範囲限界に達している場合、波長変換システム制御部340はステップS24に進む。

- [0105] ステップS 2 4 において、波長変換システム制御部 3 4 0 は、移動範囲などのパラメータを変更した後、ステップS 2 5 に進み、ステップS 2 1 に戻る。変換光の出力測定値が閾値を満たすまで、ステップS 2 1 ～ステップS 2 5 が繰り返される。
- [0106] ステップS 2 2 における比較の結果、出力測定値が閾値以上になると、図 6 のフローチャートを終了し、図 5 のメインルーチンに復帰する。
- [0107] 図 7 は、変換光発見ルーチンの動作イメージを示すグラフである。図 7 の横軸は非線形結晶への入射角度、縦軸は変換波長出力を表す。波長変換後の変換光の光強度は、非線形結晶への入射角度に対して sinc 関数（ジंक関数）的に変化する。その一方で、図 7 においてパターン A スタート地点やパターン B スタート地点で示すように、波長変換が発生していない入射角度では変換光の光出力がないため、変換光発見ルーチンを実施して、波長変換による変換光の出力が所定の閾値以上となる角度を探索する必要がある。
- [0108] 変換光発見ルーチンでは、変換光の出力（強度）を測定し、対象波長が波長変換によって発生したとみなす強度に対応する閾値を満たしているか比較される。この閾値に対応する強度は、変換光発見ルーチンの後に実施される変換光のピーク値探索ルーチンが問題なく機能するために十分な強度である必要がある。
- [0109] 変換光の強度が閾値を満たしていない場合は、設定された移動範囲限界内で結晶の角度を大きな幅で変更して変換光の出力を測定し、閾値を満たすまで角度変更の移動を繰り返す。移動範囲限界内で閾値を満たす角度が見つからない場合は、再度範囲などのパラメータを変更して継続する。この変更は手動や係数処理による半自動処理でもよい。
- [0110] 変換光の出力が安定するまでの静定時間を経過した後の測定値を採用したり、所定の時間間隔で複数回測定して得られた測定値の平均値を採用したりすることでシステムや測定系のノイズ除去を行うことが好ましい。
- [0111] 3. 3. 3 変換光のピーク値探索ルーチン
変換光発見ルーチンによって波長変換の発生を確認した後、変換光の波長

の強度を最大化するための「変換光のピーク値探索ルーチン」に移行する。

[0112] 図8は、変換光のピーク値探索ルーチンの例を示すフローチャートである。図8に示すフローチャートは、図5のステップS12、ステップS14及びステップS16に適用される。

[0113] ステップS31において、波長変換システム制御部340は変換光の出力測定1（第1の出力測定工程）を行う。この第1の出力測定工程により、角度変更前（移動前）の変換光の光強度が測定される。

[0114] 次いで、ステップS32において、波長変換システム制御部340は対象のCLBO結晶について所定の角度変更量で角度変更を行う。

[0115] ステップS33において、波長変換システム制御部340は変換光の出力測定2（第2の出力測定工程）を行う。この第2の出力測定工程により、角度変更後（移動後）の変換光の光強度が測定される。ステップS33の工程は本開示における「第1の波長変換光を検出する工程」、「第2の波長変換光を検出する工程」及び「第3の波長変換光を検出する工程」の一例である。また、ステップS33による測定結果は本開示における「第1の波長変換光の検出結果」及び「第2の波長変換光の検出結果」の一例である。

[0116] 次いで、ステップS34において、波長変換システム制御部340は変換光の強度測定値が最大値を更新したか否かを判定する。ここでいう「最大値」は、変換光のピーク値探索ルーチンの実行中に測定された強度測定値の中で最も大きな値として波長変換システム制御部340のメモリに記録される暫定的な最大値である。図8のフローチャートを開始する際に、最大値の記録はリセットされ、その後、ステップS33における測定結果に基づき、ステップS35において最大値として記録される値が更新処理される。

[0117] ステップS34の判定の結果、強度測定値が最大値を超えた場合、波長変換システム制御部340はステップS35に進み、最大値の更新処理を行ってから、ステップS36に進む。

[0118] 一方、ステップS34の判定の結果、強度測定値が最大値を超えない場合、波長変換システム制御部340はステップS36に進む。

- [0119] ステップS 3 6において、波長変換システム制御部3 4 0は角度変更の前後における変換光の強度測定結果の増減比較を行う。角度変更の前後で変換光の強度測定値が増加した場合、波長変換システム制御部3 4 0はステップS 3 2に戻り、ステップS 3 2～S 3 6を繰り返す。
- [0120] その一方で、ステップS 3 6の判定の結果、角度変更の前後で変換光の強度測定値が減少した場合、波長変換システム制御部3 4 0はステップS 3 7に進み、折り返し数判定を行う。折り返し数は、角度の移動方向を変更（反転）した回数である。折り返し数について、予め判定基準値が定められており、折り返し数と判定基準値とが比較される。折り返し数が判定基準値未満である場合、波長変換システム制御部3 4 0はステップS 3 8に進む。
- [0121] ステップS 3 8において、波長変換システム制御部3 4 0は移動方向を変更し角度変更の幅（角度変更量）を減少させて、ステップS 3 2に戻る。
- [0122] その一方、ステップS 3 7の判定の結果、折り返し数が判定基準値以上である場合、波長変換システム制御部3 4 0はステップS 4 0に進む。ステップS 4 0において、波長変換システム制御部3 4 0は最大値を記録した座標（角度位置）付近まで角度を移動させ、変換光の出力測定を行う。ステップS 3 5及びステップS 4 0の工程は本開示における「第1の波長変換光の強度の最大値を特定する工程」及び「第2の波長変換光の強度の最大値を特定する工程」の一例である。
- [0123] 次に、ステップS 4 1において、波長変換システム制御部3 4 0は変換光の出力が設定閾値を満たしているか否かを判定する。変換光の強度測定値と設定閾値とを比較して強度測定値が設定閾値以上である場合は、設定閾値を満たすと判定される。変換光の出力が設定閾値を満たす場合、波長変換システム制御部3 4 0は図8のフローチャートを終了して図5のメインルーチンに復帰する。
- [0124] 一方、ステップS 4 1の判定の結果、変換光の出力が設定閾値を満たさない場合、波長変換システム制御部3 4 0はステップS 4 2に進み、パラメータを変更してステップS 3 1に戻り、変換光のピーク値探索ルーチンを繰り返す。

返す。

[0125] 図9は、変換光のピーク値探索ルーチンの動作イメージを示すグラフである。ここでは折り返し動作が3回まで許容されている例が示されている。横軸は、結晶への入射角度を表し、縦軸は変換波長出力を表す。図9の例では、点Cで示す角度位置から探索ルーチンが開始され、4回の角度変更で点Dまで移動する（1回目の走査）。点Dにて移動方向が反転され、角度変更の幅を小さくして2回目の走査が行われる。2回目の走査において、点Dから点Eまで4回の角度変更により移動する。点Eにて移動方向が再び反転され、角度変更の幅をさらに小さくして3回目の走査が行われる。3回目の走査において、点Eから点Fまで、3回の角度変更で移動する。点Fに到来すると、折り返し数の許容上限に達したため、4回目の走査は実施せずに、点Fから最大値付近（点G）に移動させる。

[0126] このように、変換光のピーク値探索ルーチンは、変換光の出力測定と、CLBO結晶の角度変更とを行い、その対象波長の強度の増減判定の結果に基づいて、移動方向を反転させ、角度変更の間隔（角度変更量）を狭めながら、所定の折り返し回数だけ走査を繰り返す。その際に最大値と、最大値を記録した座標（角度位置）とを関連付けて記録しておき、角度変更の繰り返しの後に、最大値を記録した座標付近に移動させる。最大値を記録した座標付近での変換光の光出力の測定強度が設定閾値を満たす場合は調整完了とし、満たしていない場合は再度パラメータを変更し、ルーチンを繰り返す。

[0127] 強度の増減判定は移動前の測定強度と移動後の測定強度を比較するが、さらに移動前々などの複数の測定結果から判定することもある。例えば、2点比較や3点以上の多点比較であってもよい。

[0128] 3. 4 作用・効果

実施形態1に係る波長変換システム31によれば、変換光の光強度を測定するための測定系が3つのCLBO結晶の配列における最終段のみに設けられており、図2に示す比較例に比べて、CLBO結晶間にダイクロイックミラーなどの光学素子がなく、光の透過ロスが少ない。よって、実施形態1に

係る波長変換システム 31 によれば、図 2 に示す比較例に比べて、波長変換効率を高めることができる。

[0129] また、実施形態 1 によれば、CLBO 結晶間に光学素子を配置する必要がないことから、図 2 に示す比較例に比べて、第 1 の CLBO 結晶 301、第 2 の CLBO 結晶 302 及び第 3 の CLBO 結晶 303 を収容する CLBO セルボックス 351 の大きさを小型化することができる。

[0130] 4. 実施形態 2

4. 1 構成

図 10 は、実施形態 2 に係る波長変換システムに適用される波長測定部 380 の構成を概略的に示す。図 3 で説明した波長測定部 374 に代えて、図 10 に示す波長測定部 380 が適用されてもよい。

[0131] 波長測定部 380 は、ツェルニターナ型分光器 381 と、ラインセンサ 386 とを含む。ツェルニターナ型分光器 381 は、入射スリット 382 と、第 1 の凹面ミラー 383 と、グレーティング 384 と、第 2 の凹面ミラー 385 とを含む。ラインセンサ 386 はフォトダイオードアレイ素子 387 を含む。ラインセンサ 386 の受光信号は波長変換システム制御部 340 に送られる。

[0132] 4. 2 動作

分配光学素子 370（図 3 参照）によって分配されたサンプル光はレンズ 372 によって集光されて入射スリット 382 から入射され、コリメータミラーとなる第 1 の凹面ミラー 383 によって収束される。収束された光はグレーティング 384 に当たり、個々の波長（色）毎に、横方向に分散される。分散された光は、フォーカスミラーとなる第 2 の凹面ミラー 385 によってラインセンサ 386 で結像される。グレーティング 384 は本開示における「波長選択素子」の一例である。

[0133] 4. 3 作用・効果

実施形態 2 における波長測定部 380 は、実施形態 1 における波長測定部 374 に比べてシステムの構築は複雑で高価になるものの、複数の波長の出

力測定値を一度に取得することが可能である。また、波長測定部 380 によれば、各波長のスペクトル形状も取得可能である。

[0134] 5. 実施形態 3

5. 1 構成

図 11 は、実施形態 3 に係る波長変換システム 33 の構成を概略的に示す。実施形態 3 では、図 3 に示した波長変換システム 31 の代わりに、図 11 に示す波長変換システム 33 が適用される。図 11 に示す構成について、図 3 と異なる点を説明する。

[0135] 波長変換システム 33 は、図 3 における波長測定部 374 に代えて、波長測定部 390 を含む。波長測定部 390 は、複数のダイクロイックミラー 391、392、393 と、光強度を検出する複数の強度センサ 401、402、403 と、ダンパー 406 とを含む。すなわち、波長ごとの光強度を測定するための測定系として、複数のダイクロイックミラー 391、392、393 と、光強度を検出する複数の強度センサ 401、402、403 とを組み合わせ使用してもよい。波長測定部 390 は、ダイクロイックミラー 391、392、393 のそれぞれにおいて、対象波長以外を反射若しくは透過させ、対象波長の出力を強度センサ 401、402、403 にて感知する。

[0136] ダイクロイックミラー 391 は、分配光学素子 370 とダンパー 406 との間の光路上に配置される。ダイクロイックミラー 391 は、波長約 515 nm の第 1 のパルスレーザ光を高透過し、かつ波長約 257.5 nm の第 2 高調波光、波長約 220.9 nm の第 1 の和周波光及び波長約 193.4 nm の第 2 の和周波光を高反射する膜がコートされている。

[0137] ダイクロイックミラー 392 は、ダイクロイックミラー 391 と強度センサ 401 との間の光路上に配置される。ダイクロイックミラー 392 は、波長約 257.5 nm の第 2 高調波光を高透過し、かつ波長約 220.9 nm の第 1 の和周波光及び波長約 193.4 nm の第 2 の和周波光を高反射する膜がコートされている。

[0138] ダイクロイックミラー393は、ダイクロイックミラー392と強度センサ403との間の光路上に配置される。ダイクロイックミラー393は、波長約220.9nmの第1の和周波光を高透過し、かつ波長約193.4nmの第2の和周波光を高反射する膜がコートされている。

[0139] ダイクロイックミラー393は、ダイクロイックミラー393で反射した波長約193.4nmの第2の和周波光が強度センサ402に入射するように配置される。

[0140] 強度センサ401、402、403は、波長変換システム制御部340と接続される。複数の強度センサ401、402、403は、本開示における「光検出部」の一例である。ダイクロイックミラー391、392、393は本開示における「波長選択素子」の一例である。

[0141] 5.2 動作

分配光学素子370によって分配されたサンプル光は、ダイクロイックミラー391に入射する。ダイクロイックミラー391を透過した波長約515nmの第1のパルスレーザ光は、ダンパー406に吸収される。ダイクロイックミラー391で反射され、ダイクロイックミラー392を透過した波長約257.5nmの第2高調波光は、強度センサ401に入射する。強度センサ401によって波長約257.5nmの第2高調波光の出力が測定される。

[0142] ダイクロイックミラー391、392でそれぞれ反射され、ダイクロイックミラー393を透過した波長約220.9nmの第1の和周波光は、強度センサ403に入射する。強度センサ403によって波長約220.9nmの第1の和周波光の出力が測定される。

[0143] ダイクロイックミラー391、392、393でそれぞれ反射された波長約193.4nmの第2の和周波光は、強度センサ402に入射する。強度センサ402によって波長約193.4nmの第2の和周波光の出力が測定される。

[0144] 強度センサ401、402、403のそれぞれが検出した光強度情報は、

波長変換システム制御部 340 に送られる。

[0145] 5. 3 作用・効果

実施形態 3 における波長測定部 390 は、単体の強度センサ 401、402、403 と、ダイクロイックミラー 391、392、393 との組み合わせで構成されるため、構築が簡単にできる。また、各センサには分離された波長の光が入射するため、分離されていない波長の光を 1 つのセンサに入射させる場合と比べて、高精度かつ容易に波長を検出することができるため、CLBO 結晶の角度調整を高精度かつ容易にできる。

[0146] 6. 実施形態 4

6. 1 構成

図 12 は、実施形態 4 に係る波長変換システム 34 の構成を概略的に示す。実施形態 4 では、図 3 に示した波長変換システム 31 の代わりに、図 12 に示す波長変換システム 34 が適用される。図 12 に示す構成について、図 3 と異なる点を説明する。

[0147] 波長変換システム 34 は、図 3 における波長測定部 374 に代えて、波長測定部 410 を含む。波長測定部 410 は、複数の分配光学素子 411、412 と、複数の波長フィルタ 421、422、423 と、複数の強度センサ 431、432、433 とを含む。すなわち、波長ごとの光強度を測定するための測定系として、分配光学素子 411、412 と、波長フィルタ 421、422、423 との組み合わせを使用してもよい。

[0148] 波長測定部 410 は、複数の分配光学素子 411、412 にて、複数の混合波長光を分配し、対象波長以外は波長フィルタ 421、422、423 で分離し、それぞれの対象波長の出力を強度センサ 431、432、433 にて感知する。

[0149] 分配光学素子 411 と、分配光学素子 412 と、波長フィルタ 423 とは、この順番で、分配光学素子 370 と強度センサ 433 との間の光路上に配置される。

[0150] 分配光学素子 411 は、分配光学素子 370 によって反射されたサンプル

光の一部を反射して、その反射光が波長フィルタ 4 2 1 に入射するように配置される。

[0151] 波長フィルタ 4 2 1 は、分配光学素子 4 1 1 と強度センサ 4 3 1 との間の光路上に配置される。波長フィルタ 4 2 1 は、入射する混合波長光のうち波長約 2 5 7 . 5 n m の第 2 高調波光を選択的に透過する。強度センサ 4 3 1 は、波長フィルタ 4 2 1 を透過した第 2 高調波光を受光するように配置される。

[0152] 分配光学素子 4 1 2 は、分配光学素子 4 1 1 を透過した混合波長光の一部を反射してその反射光が波長フィルタ 4 2 2 に入射するように配置される。

[0153] 波長フィルタ 4 2 2 は、分配光学素子 4 1 2 と強度センサ 4 3 2 との間の光路上に配置される。波長フィルタ 4 2 2 は、入射する混合波長光のうち波長約 2 2 0 . 9 n m の第 1 の和周波を選択的に透過する。強度センサ 4 3 2 は、波長フィルタ 4 2 2 を透過した第 1 の和周波光を受光するように配置される。

[0154] 波長フィルタ 4 2 3 は、分配光学素子 4 1 2 を透過した混合波長光のうち波長約 1 9 3 . 4 n m の第 2 の和周波光を選択的に透過する。強度センサ 4 3 3 は、波長フィルタ 4 2 3 を透過した第 2 の和周波光を受光するように配置される。

[0155] 強度センサ 4 3 1 、 4 3 2 、 4 3 3 は、波長変換システム制御部 3 4 0 と接続される。

[0156] 6 . 2 動作

分配光学素子 3 7 0 によって分配されたサンプル光は、分配光学素子 4 1 1 に入射する。分配光学素子 4 1 1 で反射されたサンプル光は波長フィルタ 4 2 1 に入射する。波長フィルタ 4 2 1 を透過した波長約 2 5 7 . 5 n m の第 2 高調波光は、強度センサ 4 3 1 に入射する。強度センサ 4 3 1 によって波長約 2 5 7 . 5 n m の第 2 高調波光の出力が測定される。

[0157] 分配光学素子 4 1 1 を透過して分配光学素子 4 1 2 で反射されたサンプル光は波長フィルタ 4 2 2 に入射する。波長フィルタ 4 2 2 を透過した波長約

220.9 nmの第1の和周波光は強度センサ432に入射する。強度センサ432によって波長約220.9 nmの第1の和周波光の出力が測定される。

[0158] 分配光学素子411、412を透過したサンプル光は波長フィルタ423に入射する。波長フィルタ423を透過した波長約193.4 nmの第2の和周波光は、強度センサ433に入射する。強度センサ433によって波長約193.4 nmの第2の和周波光の出力が測定される。

[0159] 強度センサ431、432、433のそれぞれが検出した光強度情報は、波長変換システム制御部340に送られる。

[0160] 6.3 作用・効果

実施形態4における波長測定部410は、単体の強度センサ431、432、433と、波長フィルタ421、422、423との組み合わせで構成されるため、システムの構築が簡単にできる。また、各センサには分離された波長の光が入射するため、分離されていない波長の光を1つのセンサに入射させる場合と比べて、高精度かつ容易に波長を検出することができるため、CLBO結晶の角度調整を高精度かつ容易にできる。

[0161] 7. 実施形態5

7.1 構成

図13は、実施形態5に係る波長変換システム35の構成を概略的に示す。図13に示す構成について、図3と異なる点を説明する。実施形態1～4では、変換光の強度を測定し、測定された変換光の強度に基づいてCLBO結晶の角度を調整する例を説明したが、このような構成に限らず、未変換光の強度を測定し、測定された未変換光の強度に基づいてCLBO結晶の角度を調整することも可能である。

[0162] 実施形態5に係る波長変換システム35は、図3の分配光学素子370に代えて、ダイクロイックミラー371を備え、第2の和周波光（波長約193.4 nm）の損失を最小限にするため、ダイクロイックミラー371にて第2の和周波光以外の他の波長だけを透過させ、このうち未変換分の第1の

和周波光（波長約 220.9 nm）の強度比を用いて第 3 の CLBO 結晶 303 の角度を調整する構成となっている。

[0163] なお、図 13 では、ダイクロイックミラー 371 にて第 2 の和周波光以外の他の波長だけを透過させる構成を例示するが、かかる構成に代えて、ダイクロイックミラー 371 にて第 2 の和周波光以外の他の波長だけを反射する構成を採用してもよい。

[0164] 図 13 に示すダイクロイックミラー 371 は、第 2 の和周波光（波長約 193.4 nm）を高反射し、他の波長を高透過する膜がコートされている。波長変換システム 35 における第 3 の高反射ミラー 43 は、ダイクロイックミラー 371 で反射された第 2 の和周波光を反射するように配置される。

[0165] 波長変換システム 35 は、図 3 の波長測定部 374 に代えて、波長測定部 450 を含む。波長測定部 450 は、波長分散素子 452 とラインセンサ 454 とを含み、ダイクロイックミラー 371 の透過光が波長分散素子 452 に入射するように配置される。

[0166] 7. 2 動作

ダイクロイックミラー 371 を透過した光は、波長測定部 450 の波長分散素子 452 に入射する。波長測定部 450 では波長分散素子 452 によって波長分散し、ラインセンサ 454 を用いて各波長の強度を測定する。

[0167] ラインセンサ 454 を用いて第 1 のパルスレーザ光（波長約 515 nm）、第 2 高調波光（波長約 257.5 nm）及び第 1 の和周波光（波長約 220.9 nm）の各波長の強度を測定する点は実施形態 1 と同様であり、第 1 の CLBO 結晶 301 及び第 2 の CLBO 結晶 302 についての角度の調整動作は、実施形態 1 と同様である。

[0168] 波長変換システム 35 では、第 3 の CLBO 結晶 303 の角度を調整する際に、第 1 の和周波光の未変換光の強度を利用する。

[0169] 図 14 は、未変換光と変換光との出力の関係を模式的に示すグラフである。図 14 の横軸は CLBO 結晶への入射角度を表し、縦軸は光出力の強度を表す。CLBO 結晶での変換光が増大すると、その分未変換光の出力は減少

する。そのため、測定光路や損失又は感度の関係で変換光の出力を参照できない場合に、未変換光の強度や挙動を参照することでＣＬＢＯ結晶の角度を調整することも可能である。

[0170] 例えば、実施形態５では、波長約１９３．４ｎｍの第２の和周波光の出力を直接的に測定できない構造のため、第１のＣＬＢＯ結晶３０１と第２のＣＬＢＯ結晶３０２とのそれぞれの角度調整は変換光の出力を測定して、変換光の最大化を行うが、第３のＣＬＢＯ結晶３０３の角度調整を行う場合は、波長約２２０．９ｎｍの第１の和周波光の出力（未変換光の出力）が最小化するように角度を調整する。

[0171] この場合、波長変換の発見ルーチンとピーク値探索ルーチンの判定などの符号を逆転させて用いる。

[0172] ７．３ 初期アライメントの制御例２

７．３．１ 初期アライメントメインルーチン

図１５は、実施形態５に適用される初期アライメントのメインルーチンの例を示すフローチャートである。図１５示すフローチャートについて、図５のフローチャートと異なる点を説明する。

[0173] 図１５に示すフローチャートは、図５のステップＳ１５及びステップＳ１６に代えて、ステップＳ１７及びステップＳ１８を含む。すなわち、第２のＣＬＢＯ結晶３０２までのアライメント（ステップＳ１１～ステップＳ１４）は実施形態１と同じである。ここでは第３のＣＬＢＯ結晶３０３のアライメントについて説明する。第３のＣＬＢＯ結晶３０３のアライメントは未変換光である第１の和周波光の強度に基づいて行われる。

[0174] ステップＳ１４の後、ステップＳ１７において、波長変換システム制御部３４０は第３のＣＬＢＯ結晶３０３の第１の和周波光出力測定に基づく第２の和周波光発見ルーチンを行う。波長変換システム制御部３４０は、第１の和周波光（未変換光）の強度が閾値以下になるまで第３のＣＬＢＯ結晶３０３を調整する。未変換光である第１の和周波光の強度が閾値以下になることは、変換光である第２の和周波光の強度がある閾値以上であることに相当す

る。第1の和周波光の強度を判定するための閾値は、第2の和周波光の強度を判定するための閾値との関係から定められる。ステップS17の工程は、本開示における「第3の非線形結晶を通過した第2の波長変換光を検出する工程」の一例である。

[0175] 第1の和周波光の強度が閾値以下となった場合、ステップS18において、波長変換システム制御部340は第3のCLBO結晶303から出力される第1の和周波光のボトム値探索ルーチンを行う。波長変換システム制御部340は、第1の和周波光の強度のボトム値が検出されるまで第3のCLBO結晶303を調整する。

[0176] ステップS18の後、波長変換システム制御部340は図15のフローチャートを終了する。

[0177] なお、ボトム値探索ルーチンは、第1のCLBO結晶301や第2のCLBO結晶302での第1のパルスレーザ光（波長約515nm）や第2高調波光（波長約257.5nm）で適用してもよい。

[0178] 図16は、第3のCLBO結晶303への入射角度と第1の和周波光（未変換光）出力との関係を模式的に示すグラフである。図16に示すように、第1の和周波光（未変換光）の出力が最小値となるように第3のCLBO結晶303の角度調整が行われる。

[0179] 7. 3. 2 第2の和周波光発見ルーチン

図17は、第3のCLBO結晶303の第1の和周波光出力測定に基づく第2の和周波光発見ルーチンの例を示すフローチャートである。図17に示すフローチャートは、図15のステップS17に適用される。

[0180] 第3のCLBO結晶303の第1の和周波光出力測定に基づく第2の和周波光発見ルーチンが開始されると、ステップS51において波長変換システム制御部340は第1の和周波光（未変換光）の出力を測定する。波長変換システム制御部340は、ラインセンサ454から対象波長（波長約220.9nm）の光強度情報を取得する。

[0181] 次いで、ステップS52において、波長変換システム制御部340は未変

換光の出力測定値と、波長変換発生判定用の閾値とを比較する。ステップS 2 2における比較の結果、出力測定値が閾値を超えている場合、波長変換システム制御部3 4 0はステップS 5 3に進む。

[0182] ステップS 5 3において、波長変換システム制御部3 4 0は結晶角度が移動範囲限界に達したかどうかを判定する。ステップS 5 3の判定結果がN o判定である場合、つまり、結晶角度が移動範囲限界に達していない場合、波長変換システム制御部3 4 0はステップS 5 5に進む。

[0183] ステップS 5 5において、波長変換システム制御部3 4 0は第3のC L B O結晶3 0 3の角度を変更し、ステップS 5 1に戻る。

[0184] その一方、ステップS 5 3の判定結果がY e s判定である場合、つまり、結晶角度が移動範囲限界に達している場合、波長変換システム制御部3 4 0はステップS 5 4に進む。

[0185] ステップS 5 4において、波長変換システム制御部3 4 0は、移動範囲などのパラメータを変更した後、ステップS 5 5に進み、その後ステップS 5 1に戻る。未変換光の出力測定値が閾値以下になるまで、ステップS 5 1～ステップS 5 5が繰り返される。

[0186] ステップS 5 2における比較の結果、出力測定値が閾値以下になったら、図1 7のフローチャートを終了し、図1 5のメインルーチンに復帰する。

[0187] 図1 8は、第1の和周波光出力測定に基づく第2の和周波光発見ルーチンの動作イメージを示すグラフである。図1 8の横軸は非線形結晶への入射角度、縦軸は第1の和周波光（未変換光）の強度を表す。

[0188] 初期の配置では第3のC L B O結晶3 0 3で波長変換が発生しないため、第1の和周波光は消費されないまま第3のC L B O結晶3 0 3から出力される。この特性を利用して、まずは第3のC L B O結晶3 0 3を調整しながら第1の和周波光の出力強度を測定して波長変換の発生有無を判定する。

[0189] 図1 8においてパターンAスタート地点やパターンBスタート地点で示すように、波長変換が発生していない入射角度では変換光の光出力がないため、第2の和周波光発見ルーチンを実施して、未変換光の出力が所定の閾値以

下となる角度を探索する。

[0190] 未変換光の強度測定に基づく第2の和周波光発見ルーチンでは、未変換光の光強度（出力）を測定し、対象波長が波長変換によって発生したとみなす光強度に対応する閾値を満たしているか比較される。

[0191] 未変換光の光強度が閾値よりも大きい場合は、設定された移動範囲限界内で結晶の角度を大きな幅で変更して未変換光の出力を測定し、閾値以下になるまで角度変更の移動を繰り返す。移動範囲限界内で閾値を満たす角度が見つからない場合は、範囲などのパラメータを変更して継続する。

[0192] そして、未変換光（第1の和周波光）の出力が閾値以下になったら波長変換が発生して第2の和周波光が出力されていると仮定して、次のステップ（第1の和周波光ボトム値探索ルーチン）に移行する。

[0193] 7. 3. 3 未変換光のボトム値探索ルーチン

第2の和周波光発見ルーチンによって波長変換の発生を確認した後、第1の和周波光（未変換光）の強度を最小値にするための第1の和周波光（未変換光）のボトム値探索ルーチンに移行する。

[0194] 図19は、第1の和周波光（未変換光）のボトム値探索ルーチンの例を示すフローチャートである。図19に示すフローチャートは、図15のステップS18に適用される。

[0195] ステップS61において、波長変換システム制御部340は未変換光である第1の和周波光の出力測定1（第1の出力測定工程）を行う。第1の出力測定工程により、角度変更前（移動前）の未変換光の光強度が測定される。

[0196] 次いで、ステップS62において、波長変換システム制御部340は第3のCLBO結晶303について所定の角度変更量で角度変更を行う。

[0197] ステップS63において、波長変換システム制御部340は第1の和周波光の出力測定2（第2の出力測定）を行う。第2の出力測定により、角度変更後（移動後）の未変換光の光強度が測定される。

[0198] 次いで、ステップS64において、波長変換システム制御部340は未変換光の強度測定値が最小値を更新したか否かを判定する。ここでいう「最小

値」は、未変換光のボトム値探索ルーチンの実行中に測定された強度測定値の中で最も小さな値として波長変換システム制御部340のメモリに記録される暫定的な最小値である。「最小値」はボトム値と同義である。図19のフローチャートを開始する際に、最小値の記録はリセットされ、その後、ステップS63における測定結果に基づき、ステップS65において最小値として記録される値が更新処理される。

[0199] ステップS64の判定の結果、強度測定値が最小値を下回った場合、波長変換システム制御部340はステップS65に進み、最小値の更新処理を行ってから、ステップS66に進む。

[0200] 一方、ステップS64の判定の結果、強度測定値が最小値を下回らない場合、波長変換システム制御部340はステップS66に進む。

[0201] ステップS66において、波長変換システム制御部340は角度変更の前後で未変換光の強度測定結果の増減比較を行う。角度変更の前後で未変換光の強度測定値が減少した場合、波長変換システム制御部340はステップS62に戻り、ステップS62～S66を繰り返す。

[0202] その一方で、ステップS66の判定の結果、角度変更の前後で未変換光の強度測定値が増加した場合、波長変換システム制御部340はステップS67に進み、折り返し数判定を行う。ステップS67の判定の結果、折り返し数が判定基準値未満である場合、波長変換システム制御部340はステップS68に進む。

[0203] ステップS68において、波長変換システム制御部340は移動方向を変更し角度変更の幅（角度変更量）を減少させて、ステップS62に戻る。

[0204] その一方、ステップS67の判定の結果、折り返し数が判定基準値以上である場合、波長変換システム制御部340はステップS70に進む。ステップS70において、波長変換システム制御部340は最小値を記録した座標（角度位置）付近まで角度を移動させ、未変換光の出力測定を行う。

[0205] 次いで、ステップS71において、波長変換システム制御部340は未変換光の出力が設定閾値を満たしているか否かを判定する。未変換光の強度測

定値と設定閾値とを比較して強度測定値が設定閾値以下である場合は、設定閾値を満たすと判定される。未変換光の出力が設定閾値を満たす場合、波長変換システム制御部340は図19のフローチャートを終了して図15のメインルーチンに復帰する。

[0206] 一方、ステップS71の判定の結果、未変換光の出力が設定閾値を満たさない場合、波長変換システム制御部340はステップS72に進み、パラメータを変更してステップS61に戻り、未変換光のボトム値探索ルーチンを繰り返す。

[0207] 図20は、未変換光のボトム値探索ルーチンの動作イメージを示すグラフである。ここでは折り返し動作が3回まで許容されている例が示されている。横軸は、結晶への入射角度を表し、縦軸は変換波長出力を表す。図20の例では、点Jで示す角度位置から探索ルーチンが開始され、4回の角度変更で点Kまで移動する（1回目の走査）。点Kにて移動方向が反転され、角度変更の幅を小さくして2回目の走査が行われる。2回目の走査において、点Kから点Lまで4回の角度変更により移動する。点Lにて移動方向が再び反転され、角度変更の幅をさらに小さくして3回目の走査が行われる。3回目の走査において、点Lから点Mまで、3回の角度変更で移動する。点Mに到来すると、折り返し数の許容上限に達したため、4回目の走査は実施せずに、点Mから最小値付近（点N）に移動させる。

[0208] このように、未変換光のボトム値探索ルーチンは、第1の和周波光の出力測定と、第3のCLBO結晶303の角度変更とを行い、第1の和周波光の出力強度の増減判定を経て移動方向の反転と、角度変更の間隔（角度変更量）を狭めながら所定の折り返し回数だけ繰り返す。その際にボトム値と、そのボトム値を記録した座標（角度位置）とを関連付けて記録しておき、角度変更の繰り返し後に、ボトム値を記録した座標付近に角度を移動させる。ボトム値を記録した座標付近で未変換光の出力強度が設定閾値を満たす場合は調整完了とし、満たしていない場合は再度パラメータを変更し、ルーチンを繰り返す。実施形態5におけるボトム値（最小値）は本開示における「第2

の波長変換光の最低強度」の一例である。

[0209] 強度の増減判定は移動前の測定強度と移動後の測定強度を比較するが、さらに移動前々などの複数の測定結果から判定することもある。例えば、2点比較や3点以上の多点比較であってもよい。

[0210] 7. 4 作用・効果

実施形態5に係る波長変換システム35によれば、第2の和周波光（193.4 nm）の損失を最小限にすることができ、変換効率が向上する。

[0211] 7. 5 変形例

実施形態5では、第3のCLBO結晶303について未変換光の測定結果を利用して角度調整を実施したが、第1のCLBO結晶301及び第2のCLBO結晶302のそれぞれについても未変換光の測定結果を利用して角度調整を実施してもよい。また、変換光の測定結果と未変換光の測定結果とを両方使用して角度調整を実施してもよい。

[0212] 8. 実施形態6

8. 1 構成

図21は、実施形態6に係る固体レーザシステム1に適用される波長変換システム36の構成を概略的に示す。実施形態6では、図3に示した波長変換システム31の代わりに、図21に示す波長変換システム36が適用される。図21に示す構成について、図3と異なる点を説明する。

[0213] 実施形態1～5では各CLBO結晶の波長変換の状態を多点実測することで、CLBO結晶の角度調整を行っている。しかしながら、CLBO結晶への入射角度と波長変換の変換効率は理論上 $\sin c$ 関数の関係であるため、CLBO結晶の角度位置情報、すなわち、回転ステージの回転位置情報の出力と、回転ステージの回転位置制御が可能なエンコーダ機能付きのアクチュエータと、エンコーダから得られる複数の位置情報をフィッティング処理する機能及びフィッティング処理の結果に基づいてアクチュエータを制御する機能を備える波長変換システム制御部340Gとを用いてより短い調整時間で調整可能である。

[0214] 第1の回転ステージ331、第2の回転ステージ332及び第3の回転ステージ333のそれぞれは、第1のエンコーダ461、第2のエンコーダ462及び第3のエンコーダ463を備える。

[0215] 第1のエンコーダ461、第2のエンコーダ462及び第3のエンコーダ463のそれぞれは、波長変換システム制御部340Gに接続されている。第1のエンコーダ461、第2のエンコーダ462及び第3のエンコーダ463のそれぞれは、波長変換システム制御部340Gからの指令に基づいて、対応する回転ステージの状態に基づく現在の各CLO結晶の座標情報等の位置情報を波長変換システム制御部340Gに出力する。

[0216] 波長変換システム制御部340Gは、フィッティング処理部342を備える。フィッティング処理部342は、第1のエンコーダ461、第2のエンコーダ462及び第3のエンコーダ463のそれぞれの出力と各波長の強度とを関連付けたデータをフィッティング処理する。

[0217] 8. 2 動作

図22は、複数の測定結果からフィッティング処理によってピーク位置を予測する演算処理の概念図である。図22の横軸はCLO結晶の角度位置を表し、縦軸は変換光の光強度を表す。図22中の点x1、x2及びx3は、それぞれ測定結果をプロットした点である。例えば、増減変化のある複数点を測定した後に、測定結果から増減カーブをフィッティングで計算処理して、頂点（ピーク）となる座標角度位置を割り出すことにより、測定回数や移動回数を少なくして初期アライメントを行うことが可能である。

[0218] また、波長変換システム制御部340Gは、ピーク位置だけでなく、安定した所望の出力位置の位置関係も割り出すことが可能なため、システムの安定化を図ることが可能である。

[0219] 8. 3 変換光のピーク値探索ルーチン

図23は、実施形態6に適用される変換光のピーク値探索ルーチンの例を示すフローチャートである。図8で説明したフローチャートに代えて、図23に示すフローチャートが適用される。

- [0220] ステップS 8 1において、波長変換システム制御部3 4 0 Gは変換光の出力測定1を行う。ステップS 8 1では、角度変更前（移動前）の変換光の光強度が測定される。
- [0221] 次に、ステップS 8 2において、波長変換システム制御部3 4 0 Gは対象のC L B O結晶について所定の角度変更量で角度変更を行う。
- [0222] ステップS 8 3において、波長変換システム制御部3 4 0 Gは変換光の出力測定を行う。ステップS 8 1では、角度変更後（移動後）の変換光の光強度が測定される。ステップS 8 2とステップS 8 3とをn回繰り返すことにより、複数の（n点の）測定点で測定を行う。nは3以上の整数であることが好ましい。nはフィッティングの精度を確保できる範囲でなるべく小さい値に設定することが好ましい。例えば、nは3以上6以下であってもよい。
- [0223] 波長変換システム制御部3 4 0 Gは、ステップS 8 2及びステップS 8 3をn回繰り返した後、ステップS 8 4に進む。
- [0224] ステップS 8 4において、波長変換システム制御部3 4 0 Gはn個の測定点の測定結果を基に、出力変動と移動座標量とからフィッティングの演算処理を行う。ステップS 8 4は、増減カーブのフィッティングに基づき、ピーク値に対応する角度位置（座標）を特定する演算を含む。
- [0225] 次に、ステップS 8 5において、波長変換システム制御部3 4 0 GはステップS 8 4の演算結果のピーク位置の座標にC L B O結晶の角度を移動させる。
- [0226] 次に、ステップS 8 6において、波長変換システム制御部3 4 0 Gは、ピーク位置の座標で変換光の出力測定を行う。
- [0227] 次に、ステップS 8 7において、波長変換システム制御部3 4 0 Gは変換光の出力が設定閾値を満たしているか否かを判定する。変換光の強度測定値と設定閾値とを比較して強度測定値が設定閾値以上である場合（変換光の出力が設定閾値を満たす場合）、波長変換システム制御部3 4 0 Gは図2 3のフローチャートを終了して図5のメインルーチンに復帰する。
- [0228] 一方、ステップS 8 7の判定の結果、変換光の出力が設定閾値を満たさな

い場合、波長変換システム制御部340GはステップS88に進み、パラメータを変更してステップS81に戻り、変換光のピーク値探索ルーチンを繰り返す。

[0229] 以上のように、実施形態6では、複数の測定点で変換光の光強度を測定後、角度位置の座標と測定値からフィッティング演算を行い、予測されるピーク値の座標に移動させる。その座標にて測定された光強度の値が設定閾値以上であればアライメントが完了する。

[0230] 8. 4 作用・効果

エンコーダ非搭載の構成ではCLBO結晶の角度を示す位置座標系の数値が参照できないため、CLBO結晶の角度を変化させながら光強度の増減判定を行い、移動方向と角度変更量を変えて、移動範囲を何度も行き来して最適な位置を絞っていたが、実施形態6のようにエンコーダ搭載の構成では数点の測定点の位置座標系の数値と、光強度の測定値とからピークの位置を演算して予測できるため、測定や移動の回数を大幅に省略できる。

[0231] 8. 5 変形例

図22及び図23では変換光の出力を測定する例を説明したが、実施形態5で説明したように、未変換光の出力を測定する場合についても同様にフィッティング処理を利用してボトム値に対応する位置を予測してもよい。

[0232] 9. 実施形態7

9. 1 構成

図24は、実施形態7に係る波長変換システム37の構成を概略的に示す。実施形態7では、図3に示した波長変換システム30の代わりに、図24に示す波長変換システム37が適用される。図24に示す構成について、図3と異なる点を説明する。

[0233] 図3では、CLBOセルボックス351に対して、波長約515nmの第1のパルスレーザ光と、波長約1554nmの第2のパルスレーザ光とを同じ方向から入射させる構成としたが、図24に示す波長変換システム37では、CLBOセルボックス357に対して、波長約515nmの第1のパル

スレーザ光と、波長約1554nmの第2のパルスレーザ光とをそれぞれ別の方向から入射させる構成となっている。

[0234] すなわち、波長変換システム37は、図3のCLBOセルボックス351に代えて、CLBOセルボックス357を含む。CLBOセルボックス357は、第1の入射ウインドウ361Aと、第2の入射ウインドウ361Bと、出射ウインドウ362とを備えた容器365を含み、容器365内に、第1のCLBO結晶301、ダイクロイックミラー470、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303が配置される。

[0235] 第1の入射ウインドウ361Aは、波長約515nmのパルスレーザ光を入射させるウインドウである。第1のCLBO結晶301は、第1の入射ウインドウ361Aを透過した第1のパルスレーザ光が入射するように配置される。

[0236] 第2の入射ウインドウ361Bは、波長約1554nmの第2のパルスレーザ光を入射させるウインドウである。ダイクロイックミラー470は、第1のCLBO結晶301と第2のCLBO結晶302との間の光路上に配置される。ダイクロイックミラー470は、波長約1554nmの第2のパルスレーザ光を高反射し、波長約515nmの第1のパルスレーザ光と波長約257.5nmの第2高調波光とを高透過する膜がコートされている。ダイクロイックミラー470は、第2の入射ウインドウ361Bを透過した第2のパルスレーザ光と、第1のCLBO結晶301から出射された第1のパルスレーザ光及び第2高調波光とが互いの光路軸を一致させた状態で第2のCLBO結晶302に入射するように配置される。図3に示す構成と同様である。

[0237] 9. 2 動作

CLBOセルボックス357の内部に配置された第1のCLBO結晶301、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303のそれぞれの角度調整の方法は、実施形態1と同様である。

[0238] 実施形態7において第1のCLBO結晶301から出力される波長約25

7. 5 nmのパルスレーザ光は本開示における「第1のレーザ光」の一例であり、第1の固体レーザ装置10と第1のCLBO結晶301との組み合わせが本開示における「第1のレーザ装置」の一例である。また、図24に示す第2のCLBO結晶302は本開示における「第1の非線形結晶」の一例であり、第3のCLBO結晶303は本開示における「第2の非線形結晶」の一例である。第2のCLBO結晶302から出力される第1の和周波光（波長約220.9 nm）は本開示における「第1の波長変換光」の一例であり、第3のCLBO結晶303から出力される第2の和周波光（波長約193.4 nm）は本開示における「第2の波長変換光」の一例である。

[0239] 9. 3 作用・効果

実施形態7に係る波長変換システム37は、装置構造上にレイアウト制限がある場合などに使用することができる。実施形態7によれば、実施形態1と同様に、図2の構成と比較して、CLBO結晶間における光学素子が少なく、光の透過ロスが少ない。

[0240] また、図2に示す比較例に比べて、CLBOセルボックス357の大きさを小型化することができる。

[0241] 10. 実施形態8

10. 1 構成

図25は、実施形態8に係る波長変換システム38の構成を概略的に示す。図24に示した実施形態7に係る波長変換システム37の代わりに、図25に示す波長変換システム38が適用されもよい。図25に示す構成について、図24と異なる点を説明する。

[0242] 波長変換システム38は、図24に示すCLBOセルボックス357に代えて、CLBOセルボックス358を含む。CLBOセルボックス358は、第1の入射ウインドウ361Cと、第2の入射ウインドウ361Dと、出射ウインドウ362とを備えた容器366を含み、容器366内に、第1のCLBO結晶301、ダイクロイックミラー472、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303が配置される。

[0243] 第1の入射ウインドウ361Cは、波長約515nmのパルスレーザ光を入射させるウインドウである。第1のCLBO結晶301は、第1の入射ウインドウ361Cを透過した第1のパルスレーザ光が入射するように配置される。

[0244] 第2の入射ウインドウ361Bは、波長約1554nmの第2のパルスレーザ光を入射させるウインドウである。ダイクロイックミラー472は、第2の入射ウインドウ361Dと第2のCLBO結晶302との間の光路上に配置される。ダイクロイックミラー472は、波長約1554nmの第2のパルスレーザ光を高透過し、波長約515nmの第1のパルスレーザ光と波長約257.5nmの第2高調波光とを高反射する膜がコートされている。ダイクロイックミラー472は、第2の入射ウインドウ361Dを透過した第2のパルスレーザ光と、第1のCLBO結晶301から出射された第1のパルスレーザ光及び第2高調波光とが互いの光路軸を一致させた状態で第2のCLBO結晶302に入射するように配置される。その他の構成は、図24に示す構成と同様である。

[0245] 10.2 動作

CLBOセルボックス358の内部に配置された第1のCLBO結晶301、第2のCLBO結晶302及び第3のCLBO結晶303のそれぞれの角度調整の方法は、実施形態1と同様である。

[0246] 実施形態8において第1のCLBO結晶301から出力される波長約257.5nmのパルスレーザ光は本開示における「第1のレーザ光」の一例であり、第1の固体レーザ装置10と第1のCLBO結晶301との組み合わせが本開示における「第1のレーザ装置」の一例である。また、図25に示す第2のCLBO結晶302は本開示における「第1の非線形結晶」の一例であり、第3のCLBO結晶303は本開示における「第2の非線形結晶」の一例である。

[0247] 10.3 作用・効果

実施形態8に係る波長変換システム38は、装置構造上にレイアウト制限

がある場合などに使用することができる。実施形態 8 によれば、実施形態 1 と同様に、図 2 の構成と比較して、CLBO 結晶間における光学素子が少なく、光の透過ロスが少ない。

[0248] また、図 2 に示す比較例に比べて、CLBO セルボックス 358 の大きさを小型化することができる。

[0249] 11. 非線形結晶の位相整合について

CLBO 結晶などの非線形結晶に基本波の光を入力した場合、結晶内の各所で基本波から波長変換されて発生する高調波の位相は、通常は揃っていないため、結晶内において発生した高調波同士で相殺されてしまう。このように、結晶内の各所で発生する高調波の位相がずれていることで、基本波と高調波との進む速度の違いと、基本波と高調波との屈折率の違いが生じる。

[0250] 高調波を効率的に発生させるには、結晶内の各所で発生する高調波の位相を揃える必要がある。基本波と高調波とで屈折率を同じにすれば位相ずれは解消される。具体的には非線形結晶の温度や非線形結晶への入射角度を調整して、屈折率を変化させることで位相を揃える。このように、非線形結晶の結晶内で発生する変換光の位相を整合させることを位相整合という。

[0251] 非線形結晶は複屈折であるため、偏向方向によって屈折率が異なる。基本波の常光線と高調波の異常光線との屈折率を合わせることが角度位相整合という。

[0252] 非線形結晶への入射角度を調整することによって位相整合を実現する場合に限らず、非線形結晶の温度を調整によって位相整合を実現してもよく、これらを組み合わせて位相整合を実現してもよい。

[0253] 上記の説明は、高調波発生に限らず、和周波発生の場合についても同様であり、結晶内の各所で発生する和周波（変換光）の位相を整合させることにより、波長変換効率を高めることができる。非線形結晶の温度制御によって位相整合させる場合には、それぞれの非線形結晶を個別に温調する構成を採用すればよい。例えば、第 1 の CLBO 結晶 301、第 2 の CLBO 結晶 302 及び第 3 の CLBO 結晶 303 をそれぞれ個別に温度制御するためのヒ

ータ等を含む温調装置は、本開示における「第１の調整部」、「第２の調整部」及び「第３の調整部」の一例である。また、各結晶についての個別の温調装置と、角度調整用の回転ステージとを併用してもよい。

[0254] １２．電子デバイスの製造方法

図２６は、露光装置６００の構成例を概略的に示す。電子デバイスの製造方法は、固体レーザシステム１、エキシマ増幅器５００及び露光装置６００を用いて実施される。なお、エキシマ増幅器５００を省略した構成も可能である。

[0255] エキシマ増幅器５００は、例えば固体レーザシステム１から出力されたパルスレーザ光を増幅するＡｒＦエキシマレーザ装置であってよい。固体レーザシステム１とエキシマ増幅器５００との組み合わせにより、ハイブリッドレーザ装置が構成される。エキシマ増幅器５００によって増幅されたパルスレーザ光は、露光装置６００に入力され、露光光として用いられる。

[0256] 露光装置６００は、照明光学系６０４と投影光学系６０６とを含む。照明光学系６０４は、エキシマ増幅器５００から入射したエキシマレーザ光によって、レチクルステージＲＴのレチクルパターンを照明する。投影光学系６０６は、レチクルを透過したレーザ光を、縮小投影してワークピーステーブルＷＴ上に配置された図示しないワークピースに結像させる。ワークピースはフォトリソが塗布された半導体ウエハ等の感光基板である。

[0257] 露光装置６００は、レチクルステージＲＴとワークピーステーブルＷＴとを同期して平行移動させることにより、レチクルパターンを反映したレーザ光をワークピース上に露光する。以上のような露光工程によって半導体ウエハにレチクルパターンを転写後、複数の工程を経ることで半導体デバイスを製造できる。半導体デバイスは本開示における「電子デバイス」の一例である。固体レーザシステム１は、各実施形態１～８で説明した波長変換システム３１、３３～３８のいずれかを含む構成であってよい。エキシマ増幅器５００によって増幅されたパルスレーザ光は本開示における「第３のレーザ光」の一例である。

[0258] 13. その他

上記の説明は、制限ではなく単なる例示を意図している。したがって、特許請求の範囲を逸脱することなく本開示の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る。また、本開示の実施形態や変形例を組み合わせで使用することも当業者には明らかである。

[0259] 本明細書及び特許請求の範囲全体で使用される用語は、明記が無い限り「限定的でない」用語と解釈されるべきである。例えば、「含む」、「有する」、「備える」、「具備する」などの用語は、「記載されたもの以外の構成要素の存在を除外しない」と解釈されるべきである。また、修飾語「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。また、「A、B及びCの少なくとも1つ」という用語は、「A」「B」「C」「A+B」「A+C」「B+C」又は「A+B+C」と解釈されるべきである。さらに、それらと「A」「B」「C」以外のものとの組み合わせも含むと解釈されるべきである。

請求の範囲

[請求項1]

第1のレーザ光を出力する第1のレーザ装置と、
第2のレーザ光を出力する第2のレーザ装置と、
前記第1のレーザ光に基づいて第1の波長変換光を生成する第1の非線形結晶と、
前記第1の非線形結晶の結晶内で前記第1の波長変換光を位相整合させる第1の調整部と、
前記第1の波長変換光の光路上に配置され、前記第1の波長変換光と前記第2のレーザ光とに基づいて第2の波長変換光を生成する第2の非線形結晶と、
前記第2の非線形結晶の結晶内で前記第2の波長変換光を位相整合させる第2の調整部と、
前記第2の非線形結晶から出力される光の光路上に配置される波長選択素子と、
前記波長選択素子を通過することにより選択された波長の光を検出する光検出部と、
前記第2の非線形結晶を通過して前記光検出部で検出された前記第1の波長変換光及び前記第1のレーザ光の少なくとも1つの強度に基づいて前記第1の調整部を制御し、前記光検出部で検出された前記第2の波長変換光及び前記第2の非線形結晶を通過して前記光検出部で検出された前記第1の波長変換光の少なくとも1つの強度に基づいて前記第2の調整部を制御するプロセッサと、
を備える固体レーザシステム。

[請求項2]

請求項1に記載の固体レーザシステムであって、
前記第1の波長変換光は、前記第1のレーザ光の第2高調波光であり、
前記第2の波長変換光は、前記第2高調波光と前記第2のレーザ光との和周波である波長の第1の和周波光である、

固体レーザシステム。

[請求項3]

請求項1に記載の固体レーザシステムであって、

さらに、

前記第2の非線形結晶と前記波長選択素子との間の光路上に配置され、前記第2の波長変換光と前記第2のレーザ光とに基づいて第3の波長変換光を生成する第3の非線形結晶と、

前記第3の非線形結晶の結晶内で前記第3の波長変換光を位相整合させる第3の調整部と、を備え、

前記第3の非線形結晶から出力された光が前記波長選択素子を介して前記光検出部に入射され、

前記プロセッサは、

前記光検出部で検出された前記第3の波長変換光及び前記第3の非線形結晶を透過して前記光検出部で検出された前記第2の波長変換光の少なくとも1つの強度に基づいて前記第3の調整部を制御する、

固体レーザシステム。

[請求項4]

請求項3に記載の固体レーザシステムであって、

前記第3の波長変換光は、前記第2の波長変換光と前記第2のレーザ光との和周波である波長の第2の和周波光である、

固体レーザシステム。

[請求項5]

請求項3に記載の固体レーザシステムであって、

前記光検出部は、前記第3の非線形結晶を透過した前記第2の波長変換光を検出し、

前記プロセッサは、前記第2の波長変換光の最低強度に基づいて前記第3の調整部を制御する、

固体レーザシステム。

[請求項6]

請求項3に記載の固体レーザシステムであって、

さらに、前記第3の非線形結晶と前記波長選択素子との間の光路上に配置され、前記第3の非線形結晶を透過した光の一部を前記光検出

部に導く分配光学素子を備える、
固体レーザシステム。

[請求項7] 請求項6に記載の固体レーザシステムであって、
前記分配光学素子は、ビームスプリッタ及びダイクロイックミラー
の少なくとも1つを含む、
固体レーザシステム。

[請求項8] 請求項1に記載の固体レーザシステムであって、
前記第1の調整部は、前記第1の非線形結晶への光の入射角度を変
更する第1の角度調整機構を含み、
前記第2の調整部は、前記第2の非線形結晶への光の入射角度を変
更する第2の角度調整機構を含む、
固体レーザシステム。

[請求項9] 請求項8に記載の固体レーザシステムであって、
さらに、
前記第1の角度調整機構及び前記第2の角度調整機構のそれぞれの
角度位置を検出するエンコーダを備え、
前記プロセッサは、
前記エンコーダによって検出される角度位置と前記光検出部によっ
て検出される強度の測定値とを関連付けて記録した複数の測定結果を
基に、光強度が最大となる角度位置及び光強度が最小となる角度位置
の少なくとも1つを特定する演算を行う、
固体レーザシステム。

[請求項10] 請求項1に記載の固体レーザシステムであって、
前記波長選択素子は、グレーティング、ダイクロイックミラー及び
波長フィルタの少なくとも1つを含む、
固体レーザシステム。

[請求項11] 請求項1に記載の固体レーザシステムであって、
前記光検出部は、前記波長選択素子を用いて選択する複数の波長に

対応する複数の光検出素子を含む、
固体レーザシステム。

[請求項12] 請求項1に記載の固体レーザシステムであって、
さらに、前記第1の非線形結晶と前記第2の非線形結晶とを含む複数の非線形結晶を収容する容器を備え、前記容器内に不活性ガスが供給される、

固体レーザシステム。

[請求項13] 請求項1に記載の固体レーザシステムであって、
前記第1の波長変換光は、前記第1のレーザ光と前記第2のレーザ光との和周波である波長の第1の和周波光であり、
前記第2の波長変換光は、前記第1の和周波光と前記第2のレーザ光との和周波である波長の第2の和周波光である、

固体レーザシステム。

[請求項14] 第1のレーザ光に基づいて第1の波長変換光を生成する第1の非線形結晶と、前記第1の非線形結晶から出力された前記第1の波長変換光と第2のレーザ光とに基づいて第2の波長変換光を生成する第2の非線形結晶とを備えた波長変換システムの位相整合方法であって、

前記第2の非線形結晶を通過した前記第1の波長変換光及び前記第1のレーザ光の少なくとも1つを検出する工程と、

検出された前記第1の波長変換光及び前記第1のレーザ光の少なくとも1つの強度に基づいて、前記第1の非線形結晶の結晶内で第1の波長変換光を位相整合させる工程と、

前記第1の非線形結晶の結晶内で前記第1の波長変換光を位相整合させる調整を実施した後に、前記第2の非線形結晶から出力された前記第2の波長変換光及び前記第2の非線形結晶を通過した前記第1の波長変換光の少なくとも1つを検出する工程と、

検出された前記第2の波長変換光及び前記第1の波長変換光の少なくとも1つの強度に基づいて、前記第2の非線形結晶の結晶内で第2

の波長変換光を位相整合させる工程と、
を含む位相整合方法。

[請求項15]

請求項14に記載の位相整合方法であって、
前記第1の波長変換光及び前記第1のレーザ光の少なくとも1つを検出する工程は、
前記第2の非線形結晶を通過した前記第1の波長変換光を検出する工程と、
前記第1の波長変換光の検出結果から、前記第1の波長変換光の強度の最大値を特定する工程と、を含む、
位相整合方法。

[請求項16]

請求項14に記載の位相整合方法であって、
前記第2の波長変換光及び前記第2の非線形結晶を通過した前記第1の波長変換光の少なくとも1つを検出する工程は、
前記第2の非線形結晶から出力された前記第2の波長変換光を検出する工程と、
前記第2の波長変換光の検出結果から、前記第2の波長変換光の強度の最大値を特定する工程と、を含む、
位相整合方法。

[請求項17]

請求項14に記載の位相整合方法であって、
前記波長変換システムは、さらに、
前記第2の波長変換光と前記第2のレーザ光とに基づいて第3の波長変換光を生成する第3の非線形結晶を含み、
前記第2の非線形結晶の結晶内で前記第2の波長変換光を位相整合させる調整を実施した後に、前記第3の非線形結晶から出力された前記第3の波長変換光及び前記第3の非線形結晶を通過した前記第2の波長変換光の少なくとも1つを検出する工程と、
検出された前記第3の波長変換光及び前記第2の波長変換光の少なくとも1つの強度に基づいて、前記第3の非線形結晶の結晶内で第3

の波長変換光を位相整合させる工程と、

をさらに含む、

位相整合方法。

[請求項18]

請求項17に記載の位相整合方法であって、

前記第3の波長変換光及び前記第3の非線形結晶を通過した前記第2の波長変換光の少なくとも1つを検出する工程は、

前記第3の非線形結晶を通過した前記第2の波長変換光を検出する工程と、

前記第2の波長変換光の検出結果から、前記第2の波長変換光の強度の最小値を特定する工程と、を含む、

位相整合方法。

[請求項19]

請求項14に記載の位相整合方法であって、

前記第1の波長変換光及び前記第1のレーザ光の少なくとも1つを検出する工程の前に、前記第1の波長変換光を発見する工程をさらに含む、

前記第2の波長変換光及び前記第2の非線形結晶を通過した前記第1の波長変換光の少なくとも1つを検出する工程の前に、前記第2の波長変換光を発見する工程をさらに含む、

位相整合方法。

[請求項20]

電子デバイスの製造方法であって、

第1のレーザ光を出力する第1のレーザ装置と、

第2のレーザ光を出力する第2のレーザ装置と、

前記第1のレーザ光に基づいて第1の波長変換光を生成する第1の非線形結晶と、

前記第1の非線形結晶の結晶内で前記第1の波長変換光を位相整合させる第1の調整部と、

前記第1の波長変換光の光路上に配置され、前記第1の波長変換光と前記第2のレーザ光とに基づいて第2の波長変換光を生成する第2

の非線形結晶と、

前記第 2 の非線形結晶の結晶内で前記第 2 の波長変換光を位相整合させる第 2 の調整部と、

前記第 2 の非線形結晶から出力される光の光路上に配置される波長選択素子と、

前記波長選択素子を通過することにより選択された波長の光を検出する光検出部と、

前記第 2 の非線形結晶を透過して前記光検出部で検出された前記第 1 の波長変換光及び前記第 1 のレーザ光のうち少なくとも 1 つの強度に基づいて前記第 1 の調整部を制御し、前記光検出部で検出された前記第 2 の波長変換光及び前記第 2 の非線形結晶を透過して前記光検出部で検出された前記第 2 のレーザ光のうち少なくとも 1 つの強度に基づいて前記第 2 の調整部を制御するプロセッサと、

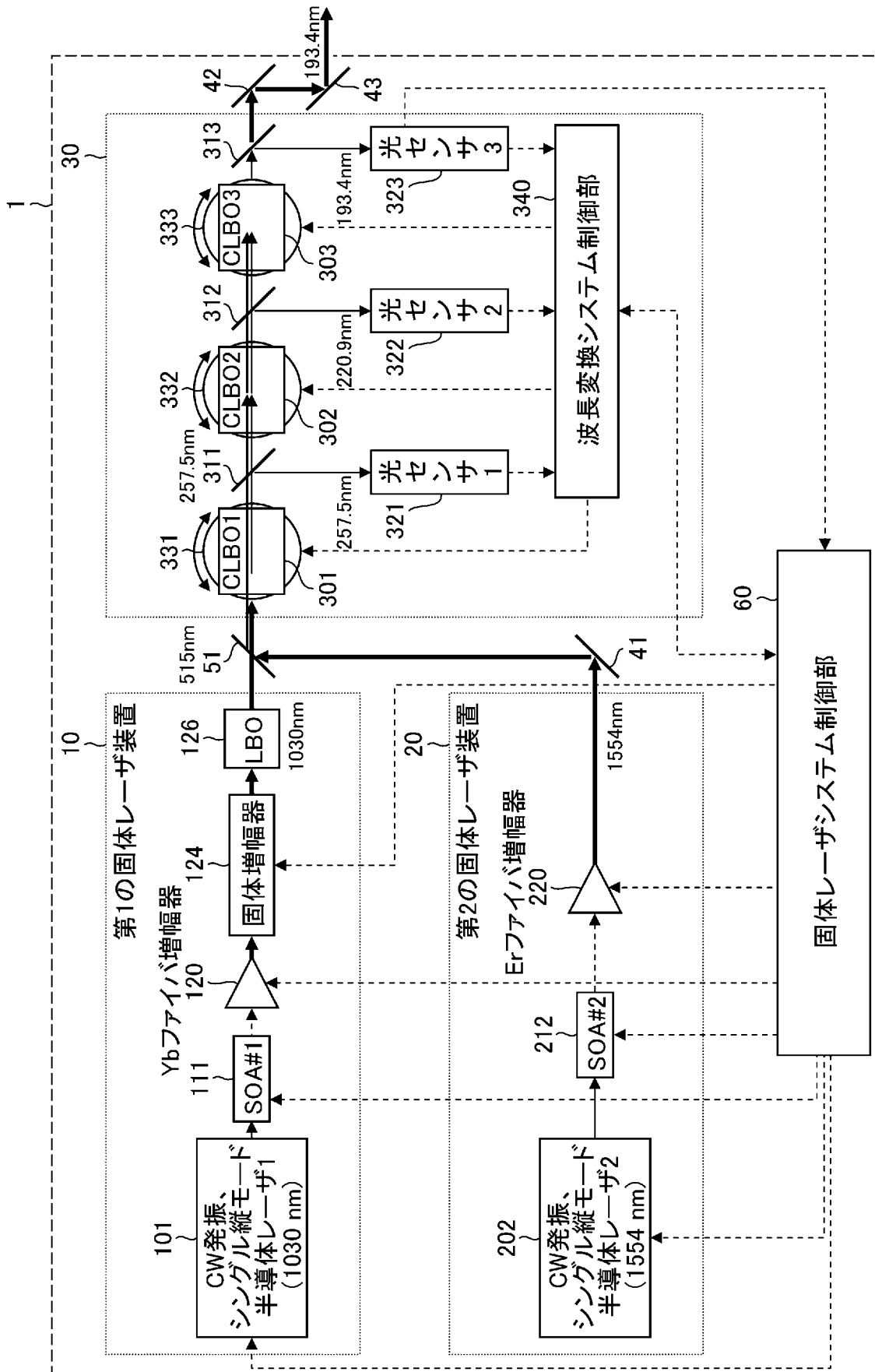
を備える固体レーザシステムを用いて第 3 のレーザ光を生成し、

前記第 3 のレーザ光を露光装置に出力し、

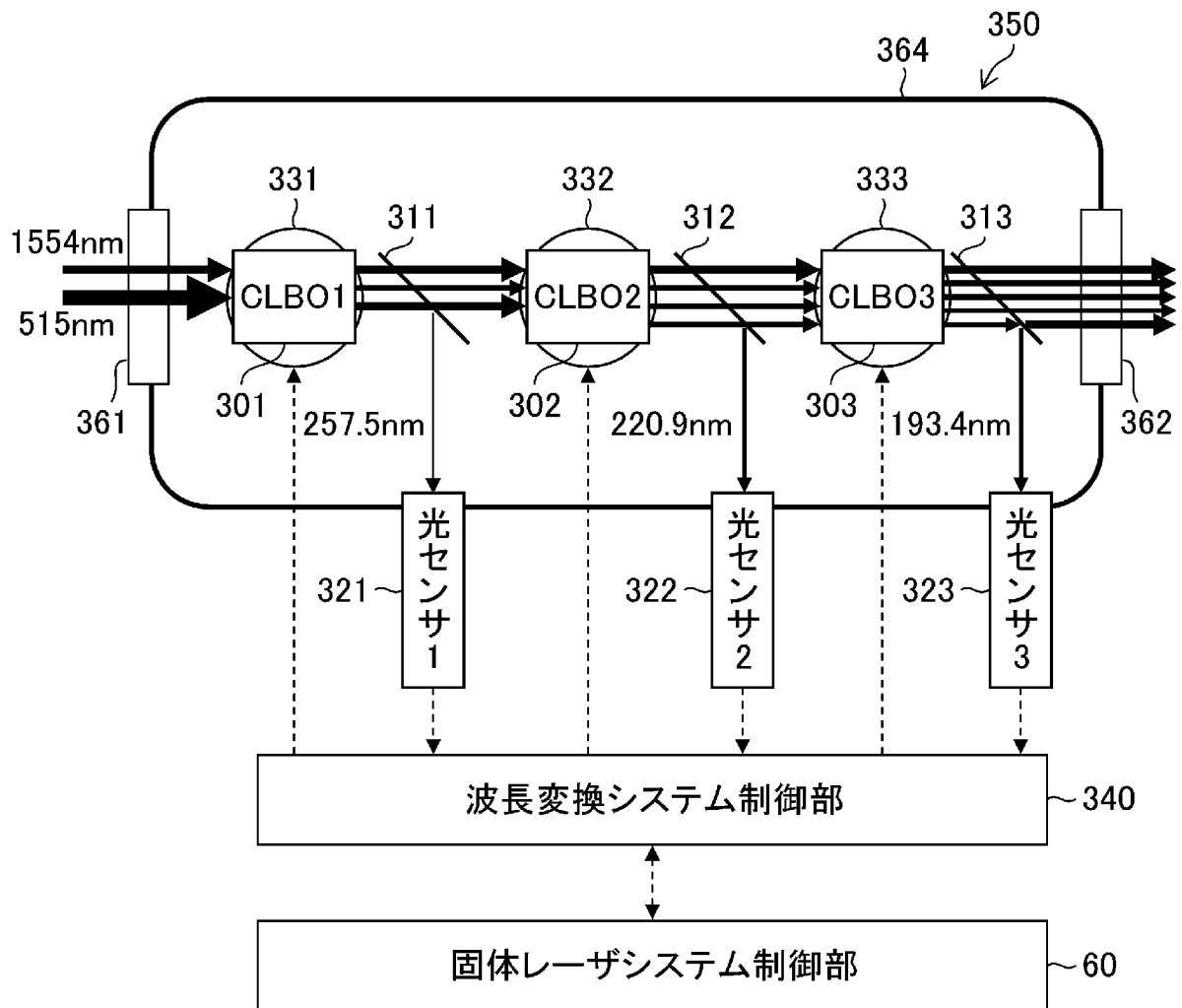
電子デバイスを製造するために、前記露光装置内で感光基板上に前記第 3 のレーザ光を露光すること

を含む電子デバイスの製造方法。

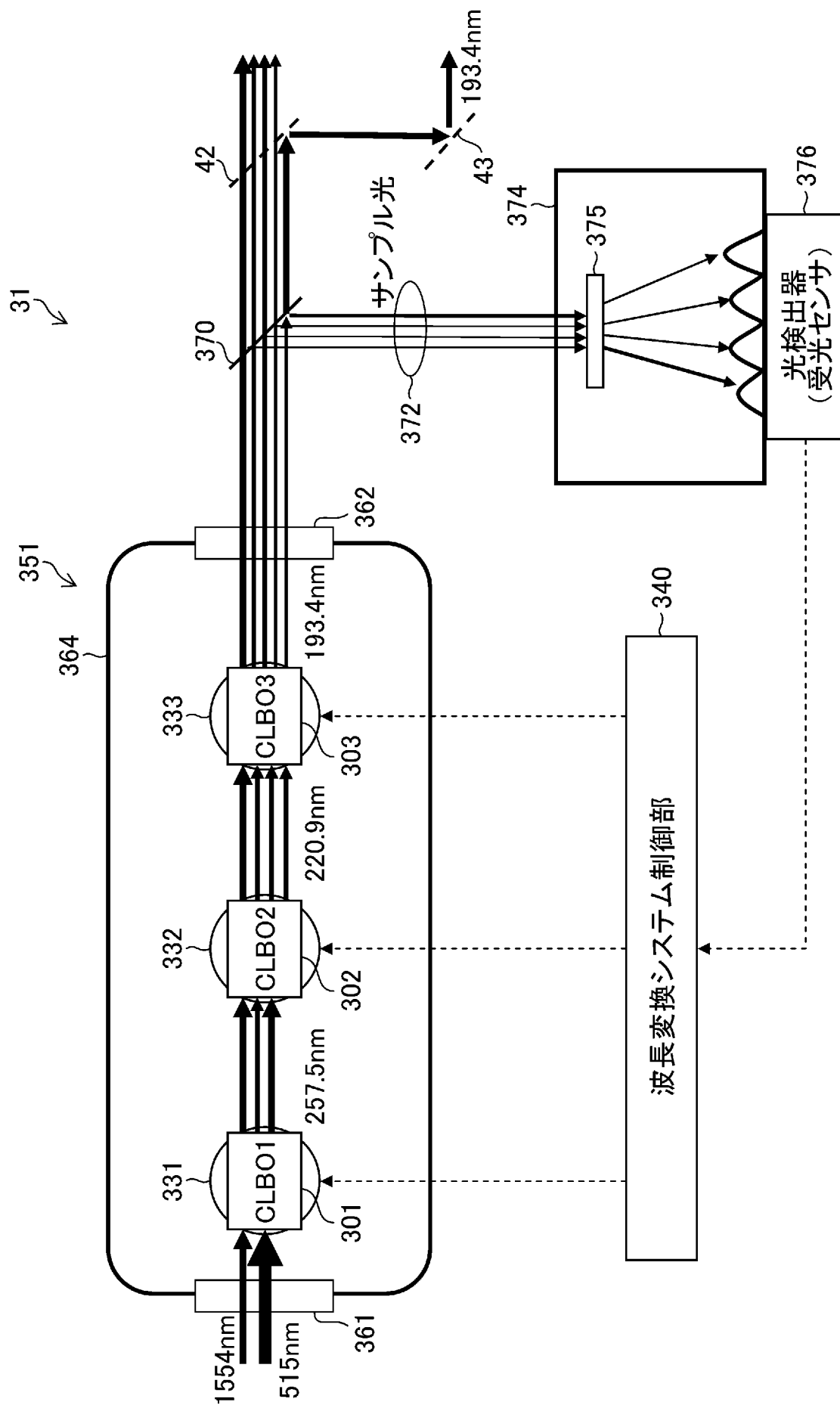
[図1]



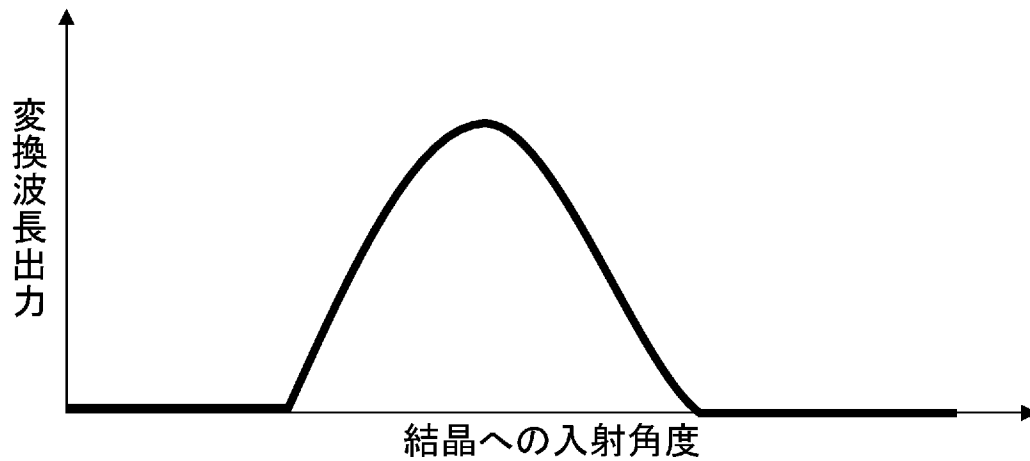
[図2]



[図3]



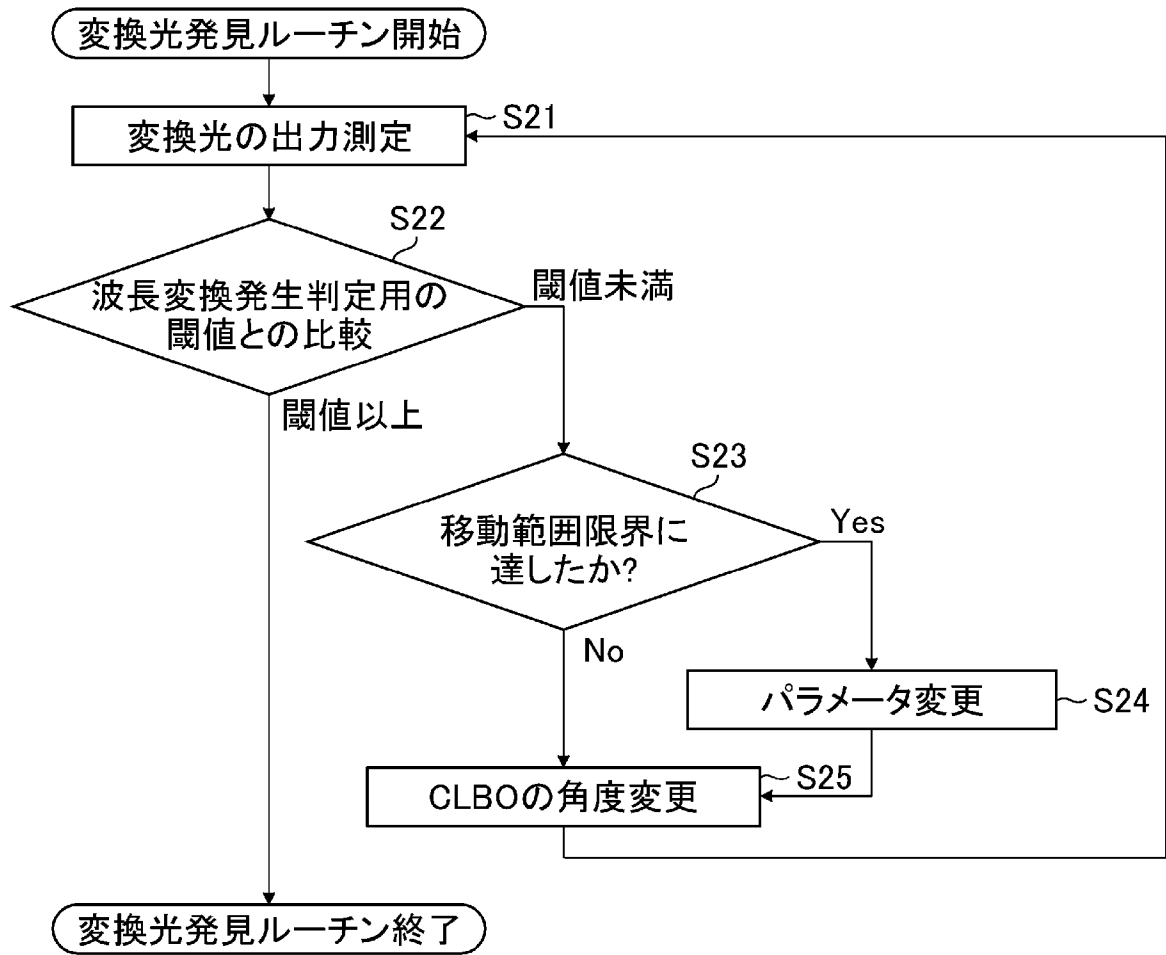
[図4]



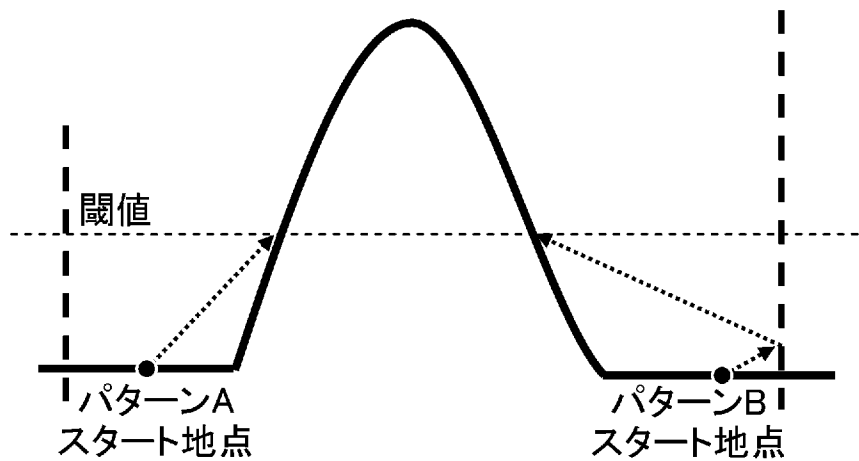
[図5]



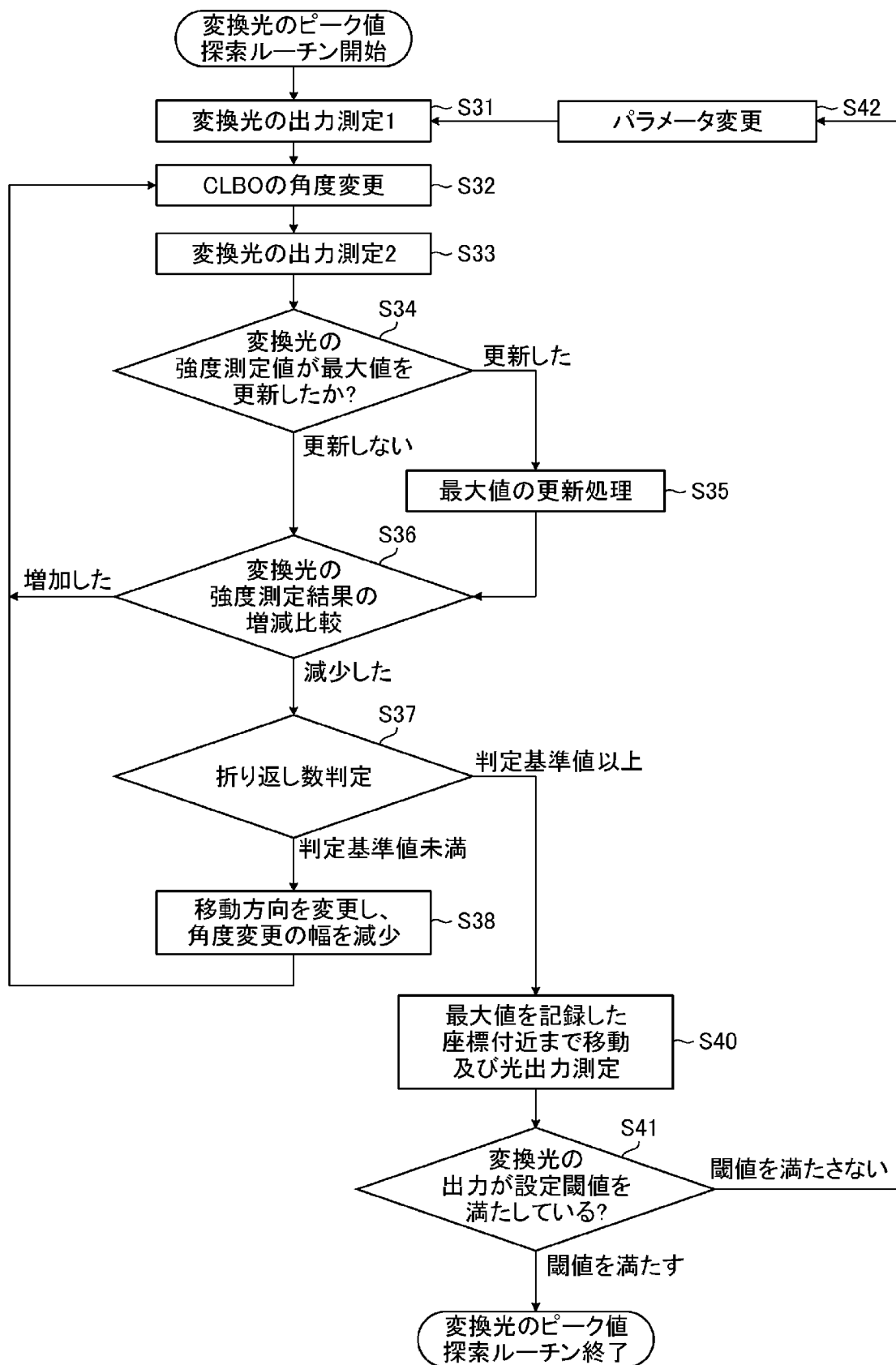
[図6]



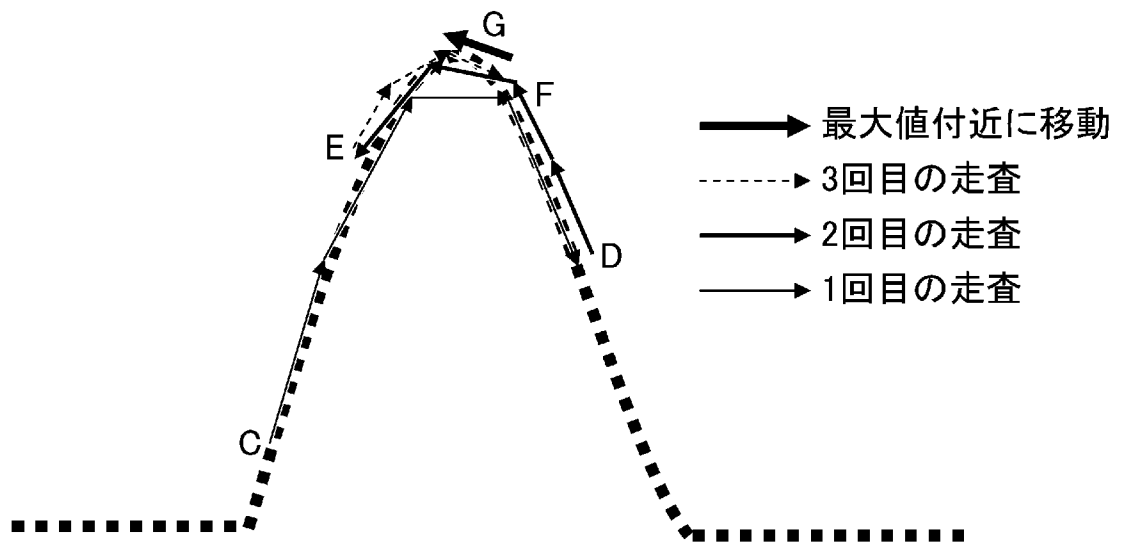
[図7]



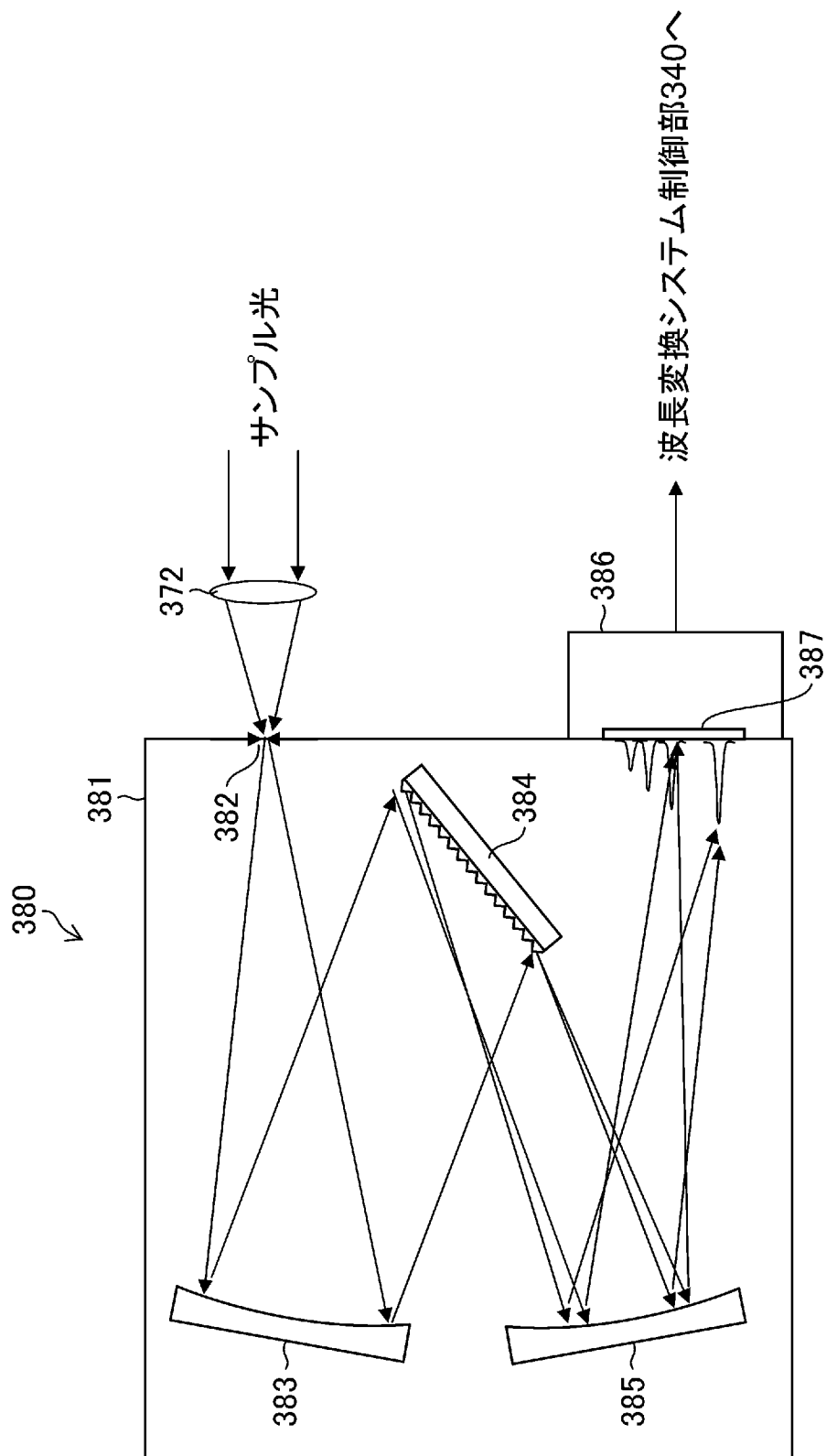
[図8]



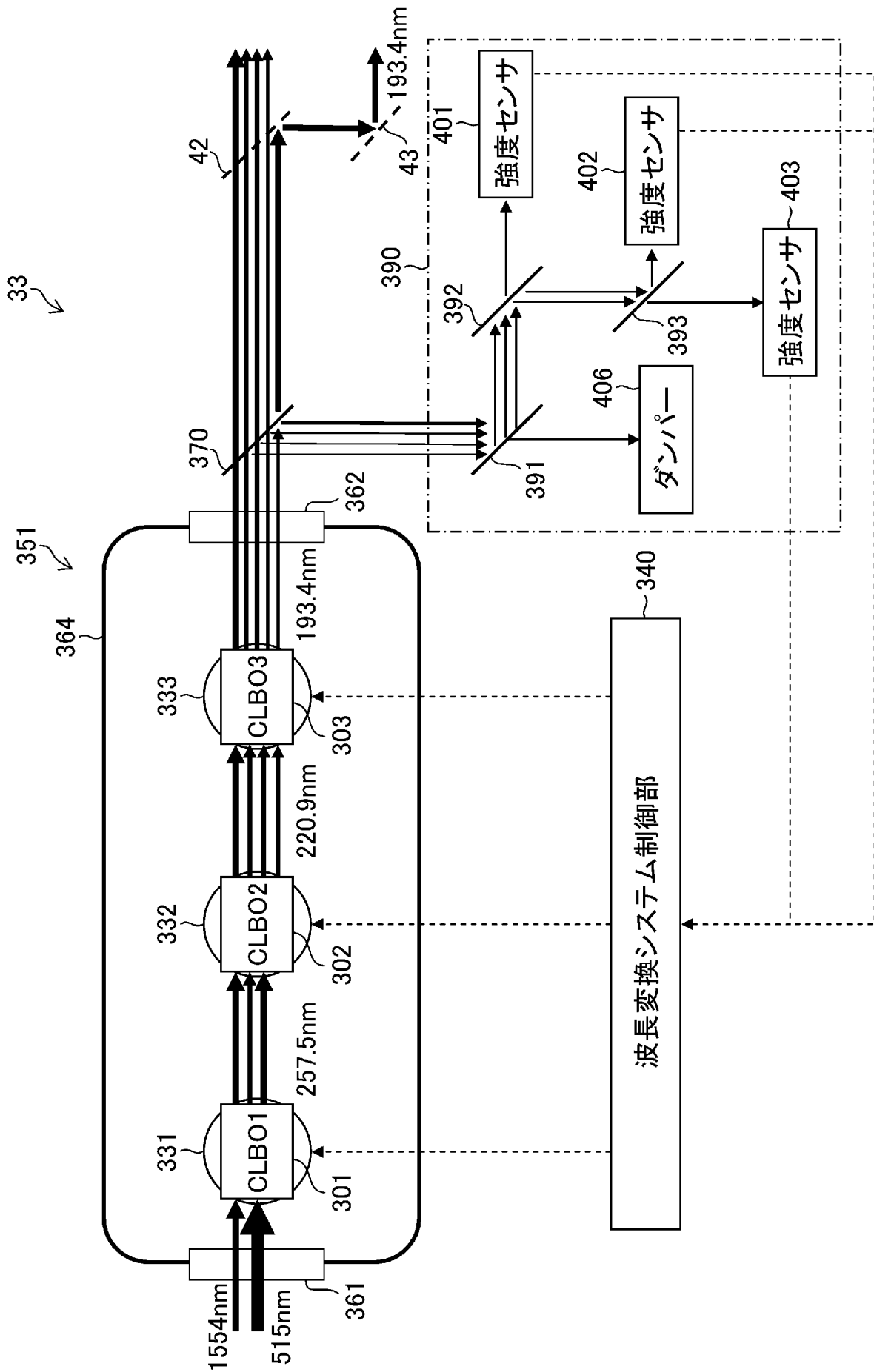
[図9]



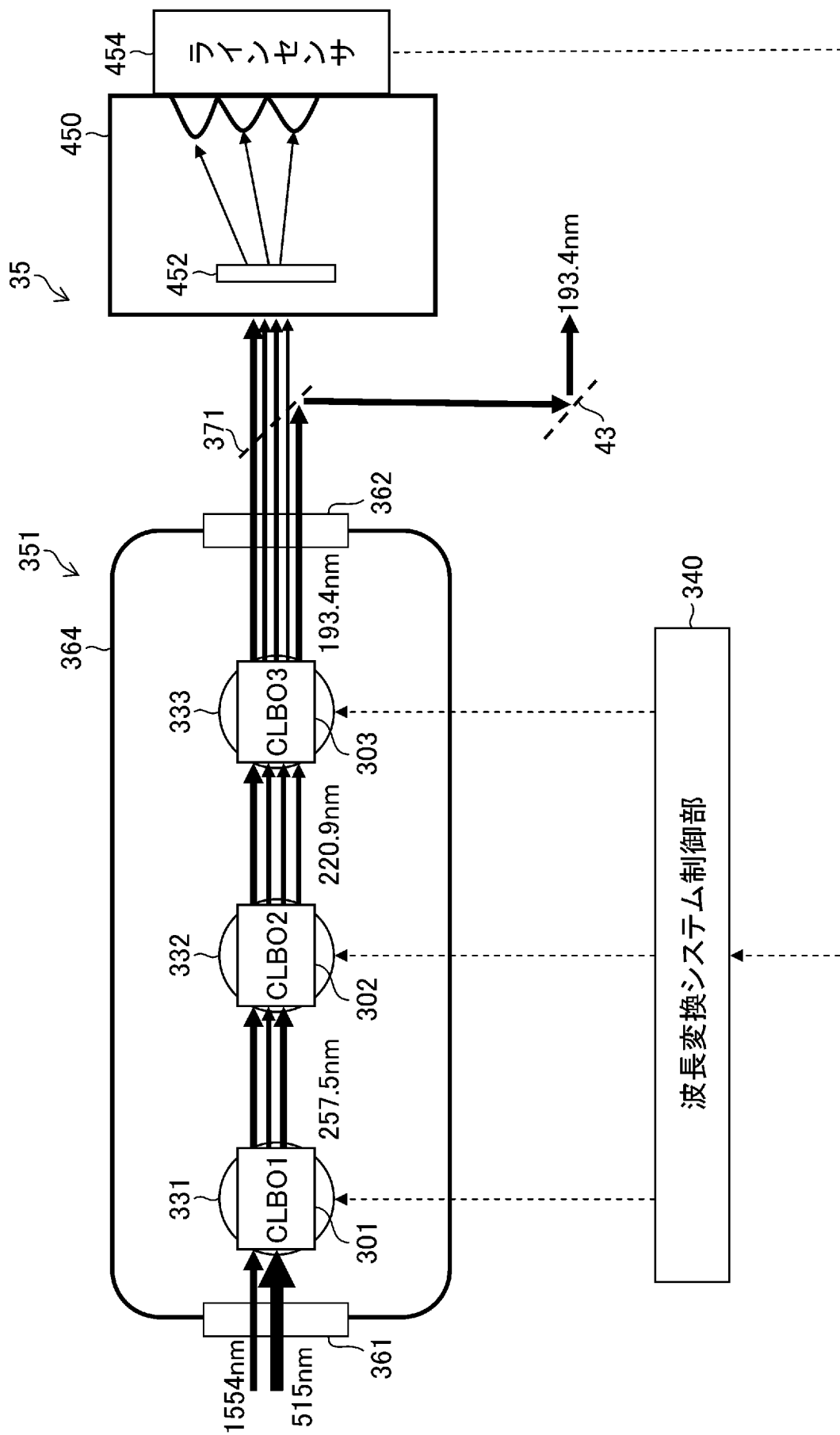
[図10]



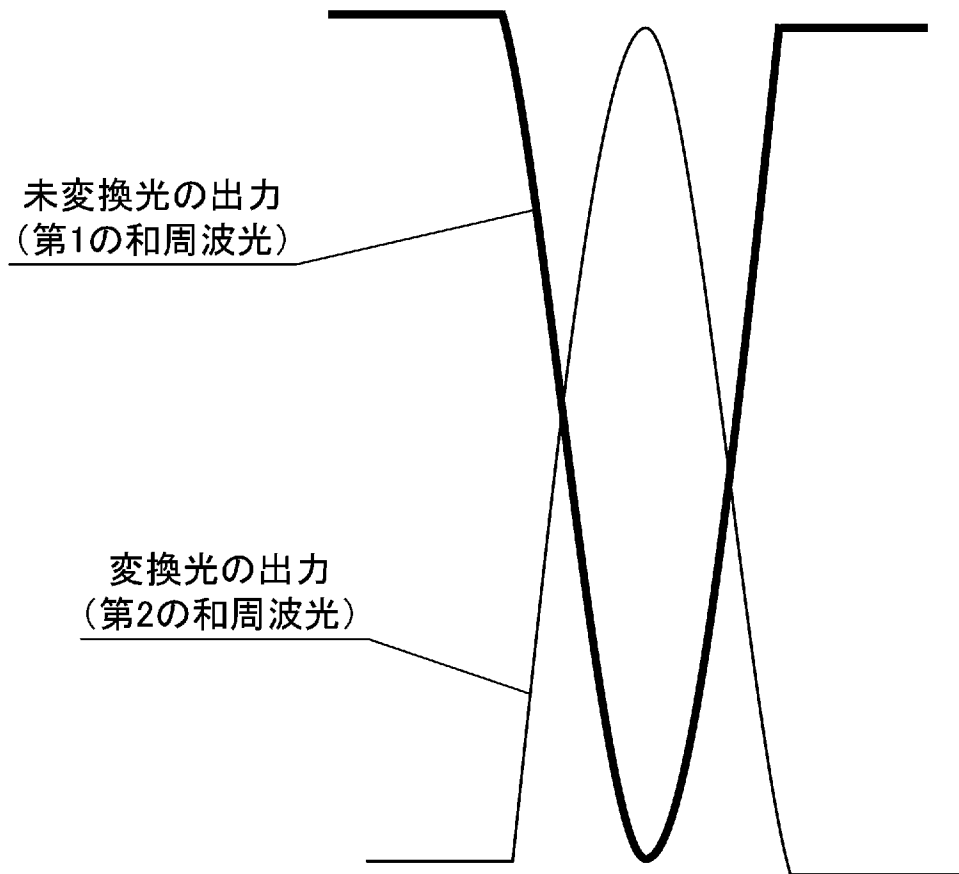
[図11]



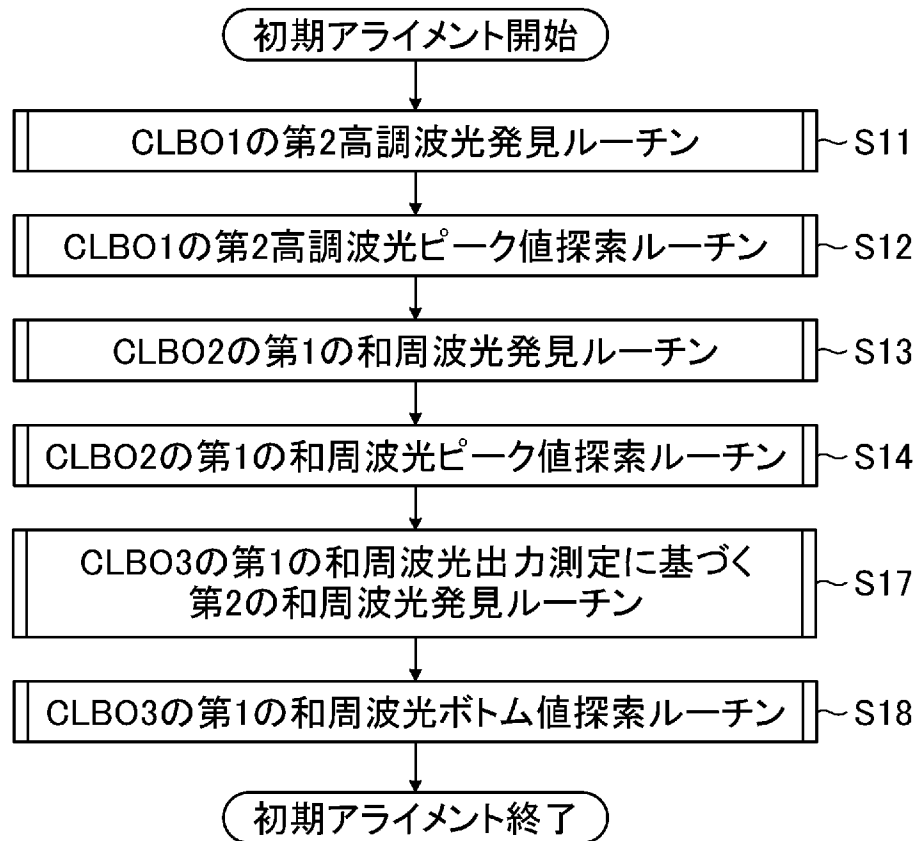
[図13]



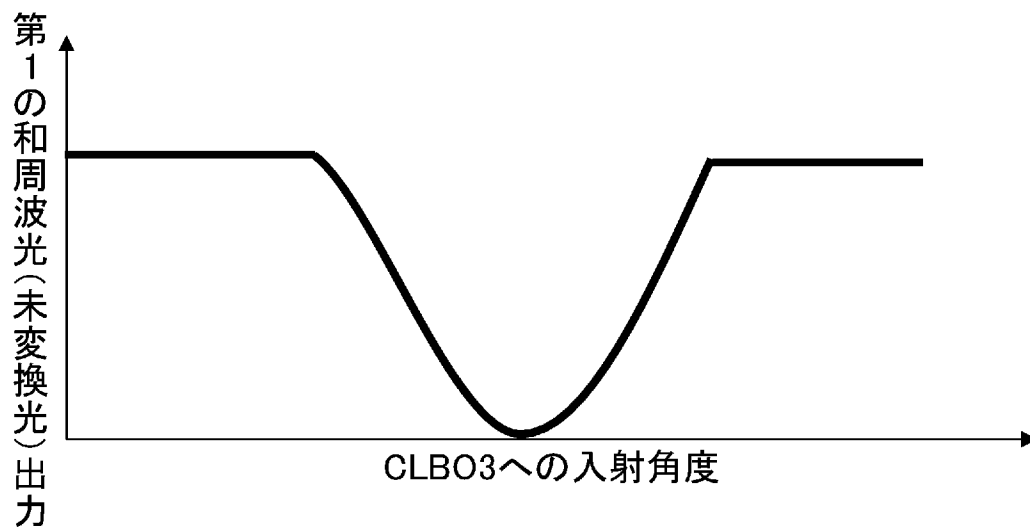
[図14]



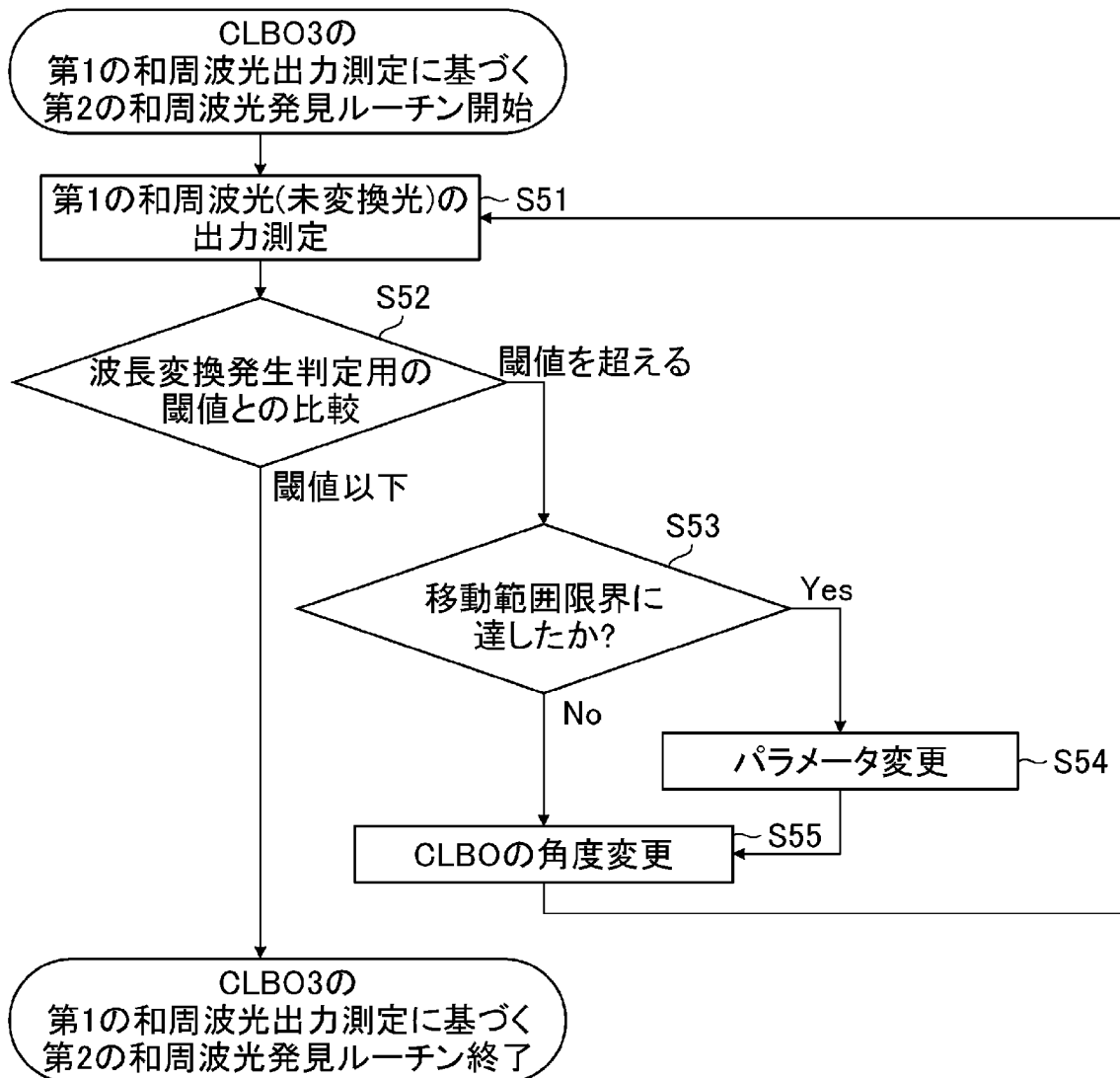
[図15]



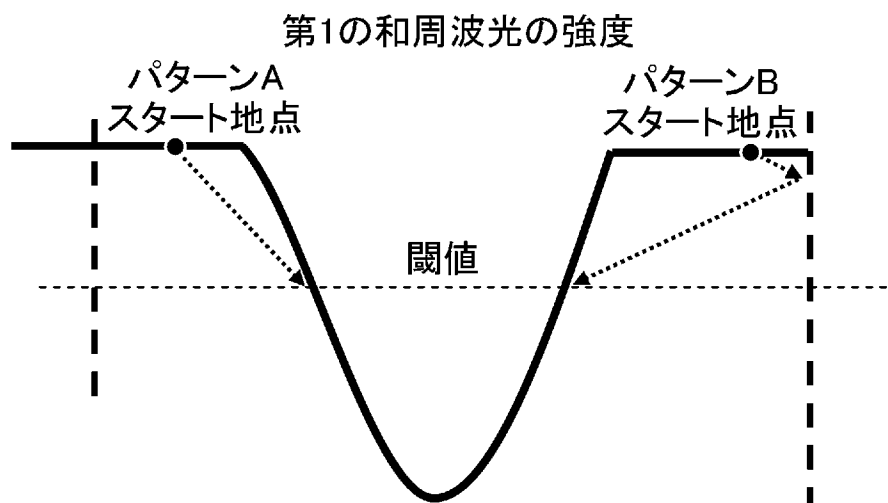
[図16]



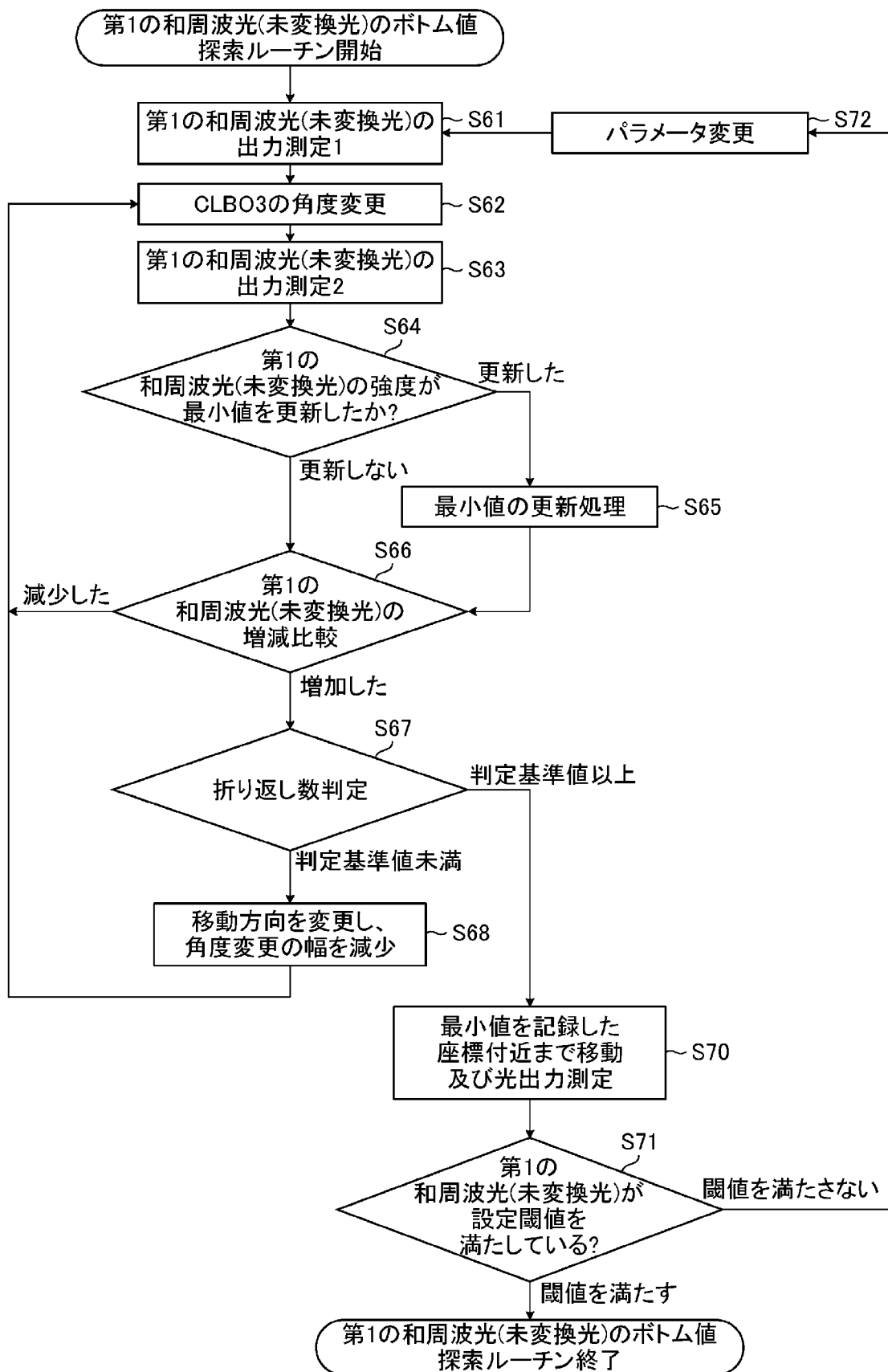
[図17]



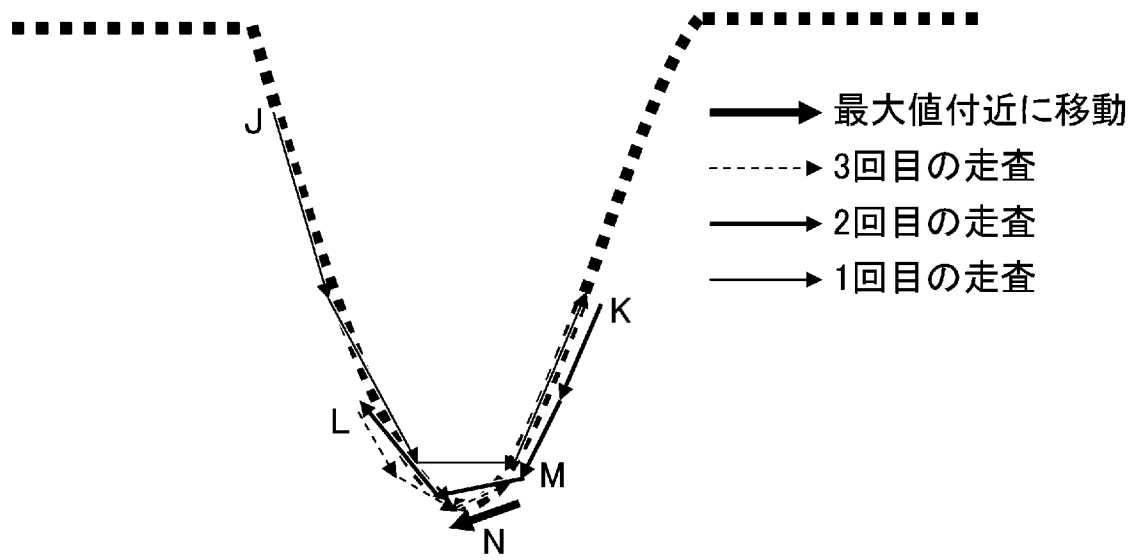
[図18]



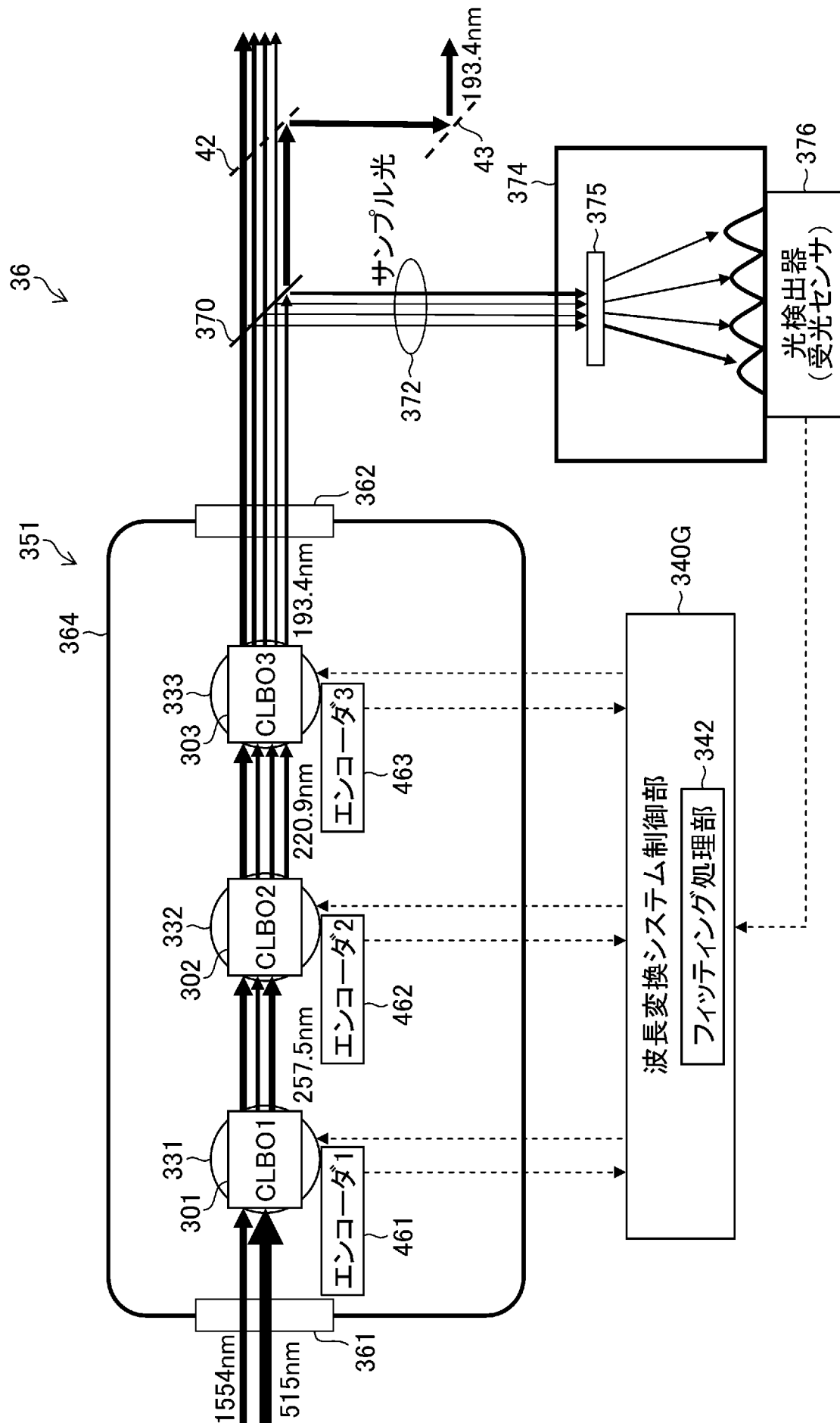
[図19]



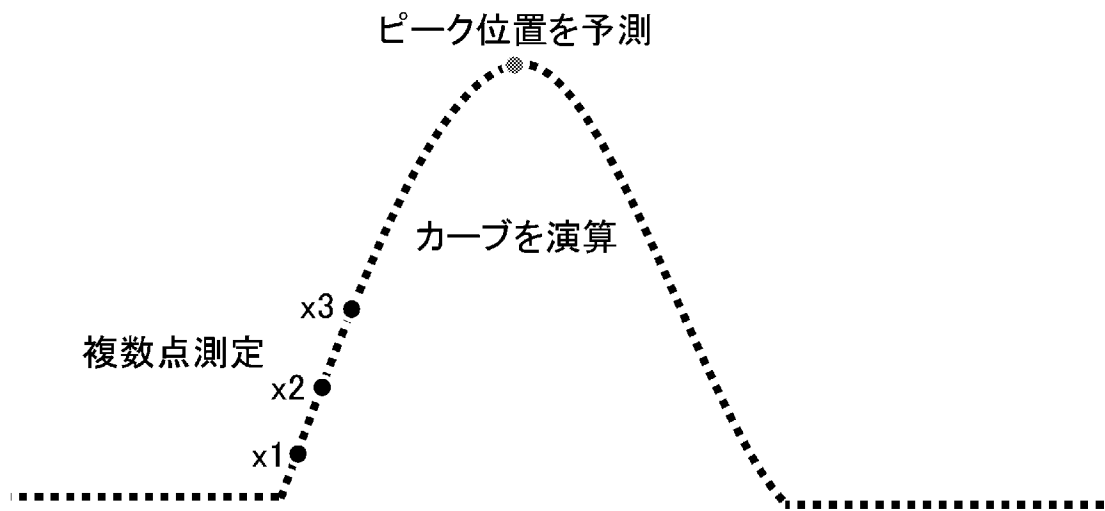
[図20]



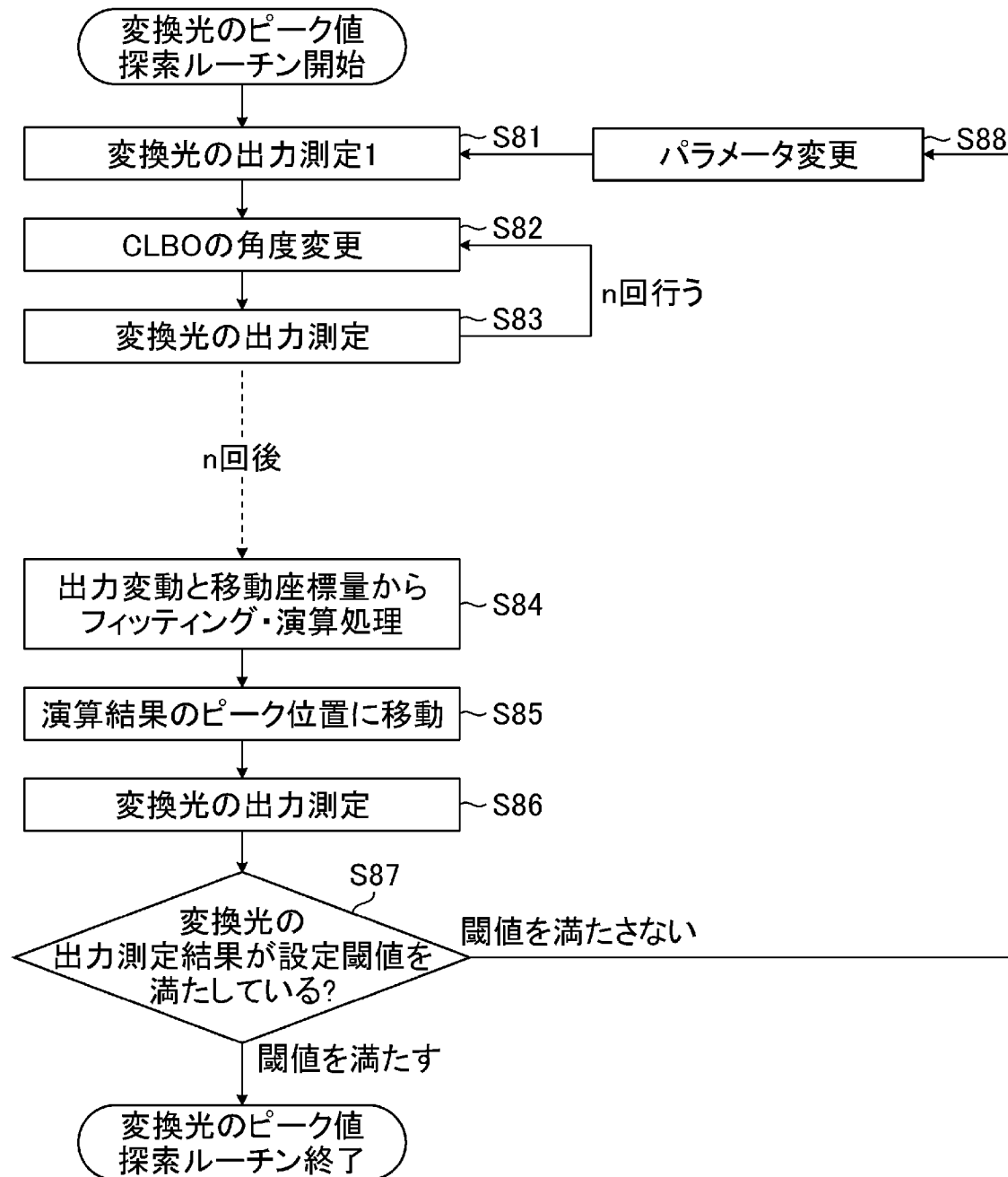
[図21]



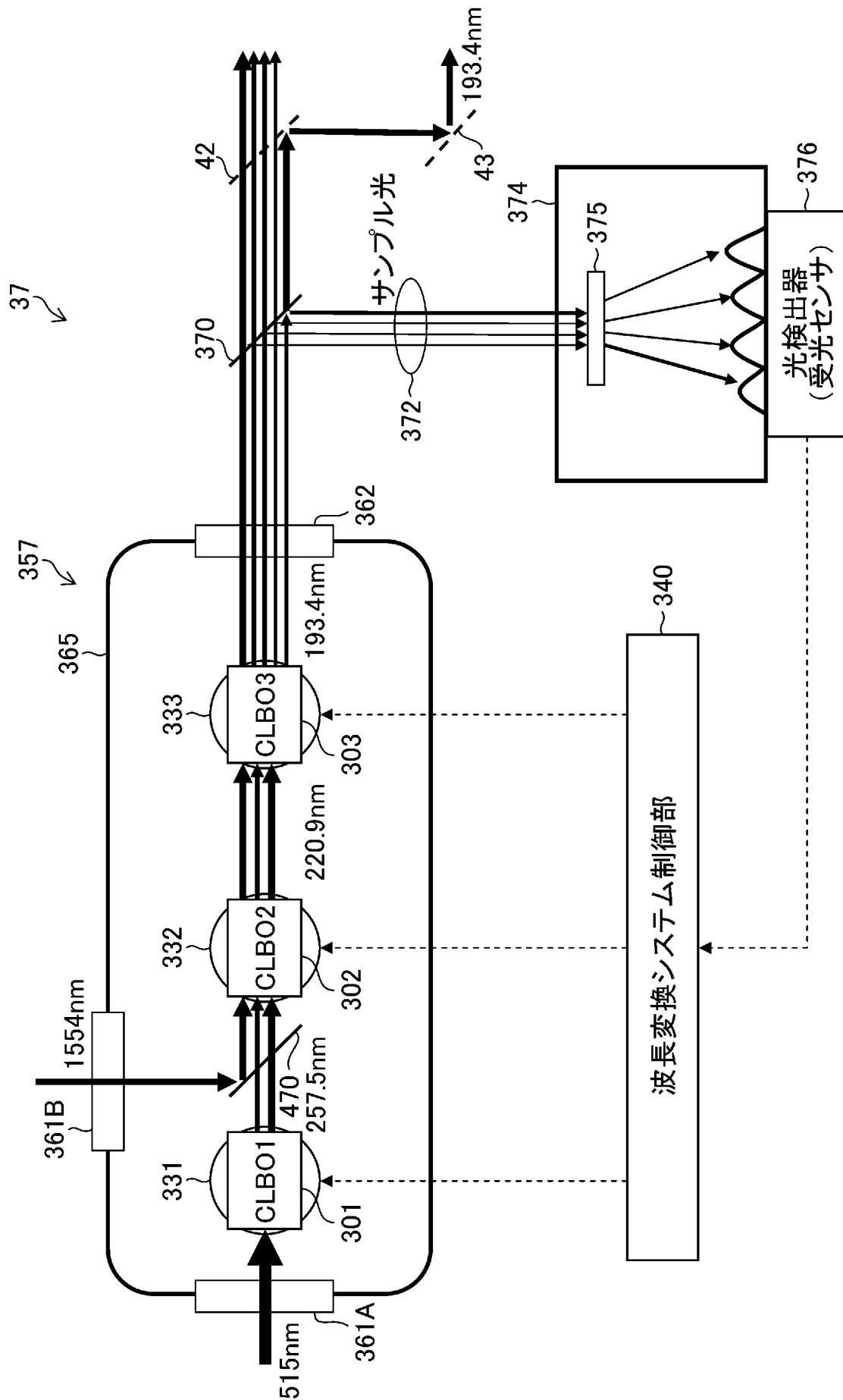
[図22]



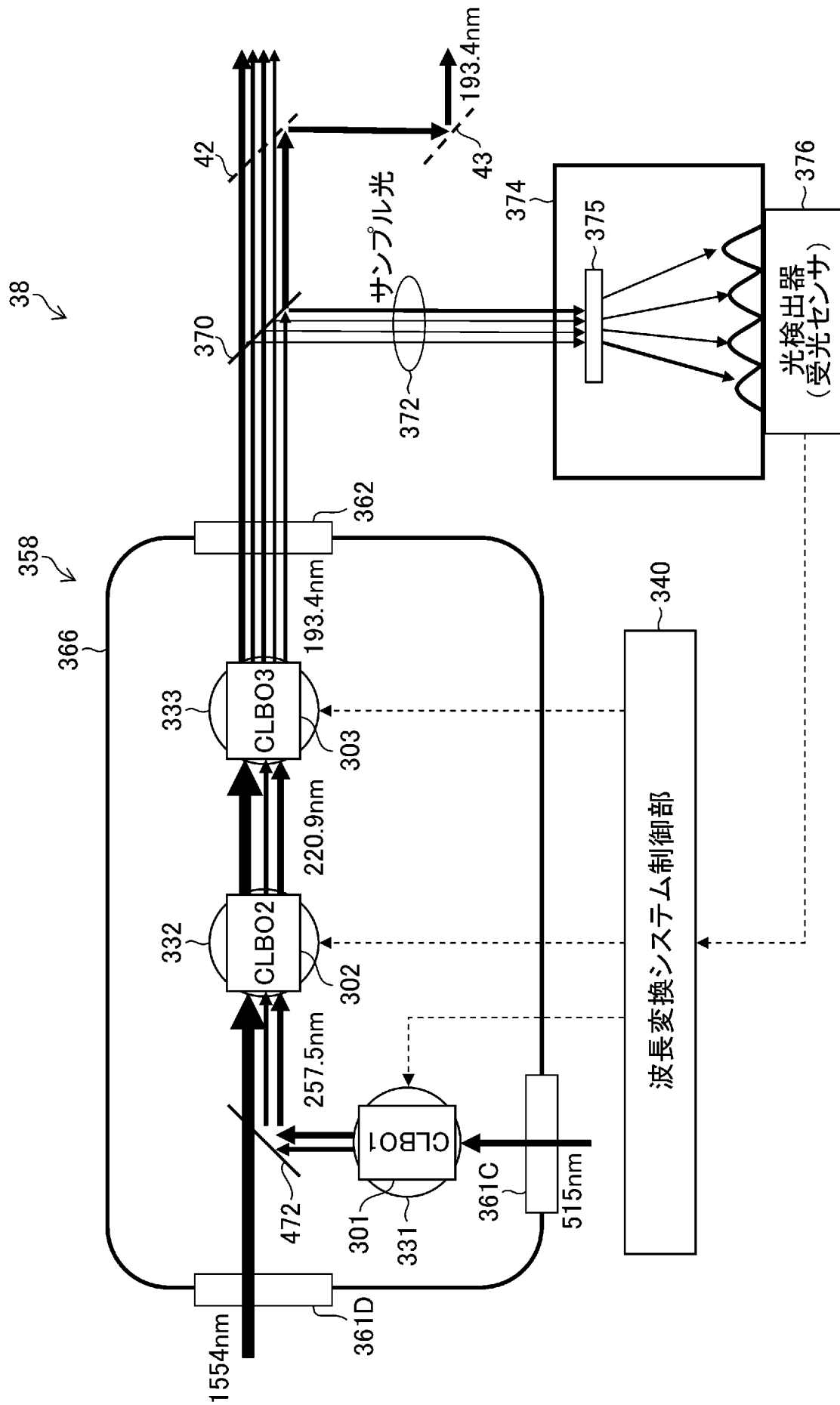
[図23]



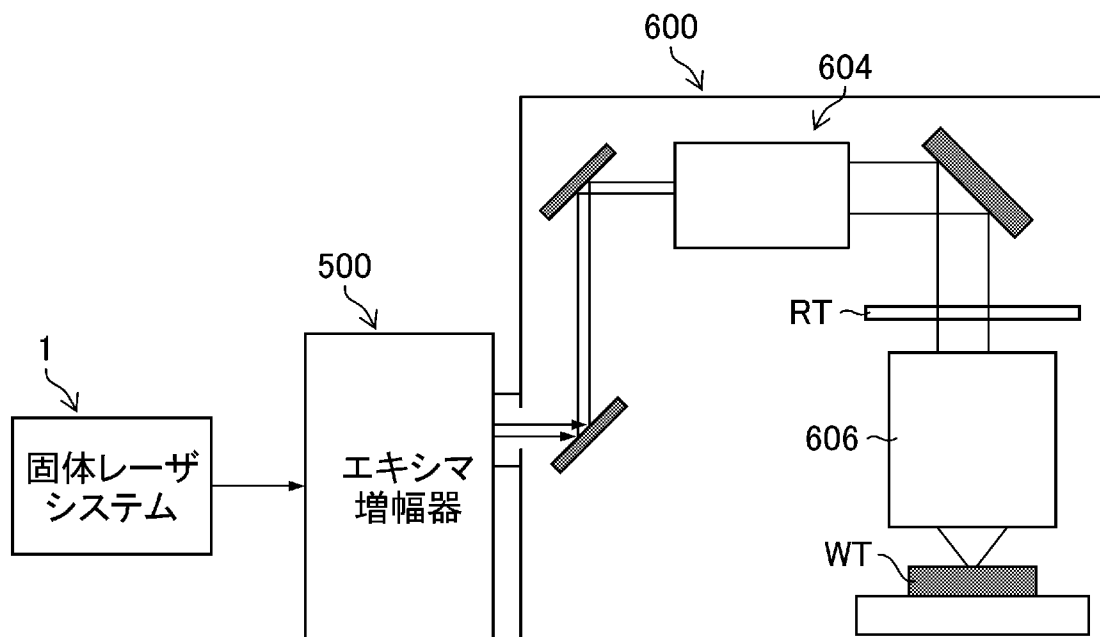
[図24]



[図25]



[図26]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/033415

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. H01S3/10 (2006.01) i, H01S5/022 (2021.01) i, G02F1/37 (2006.01) i
FI: G02F1/37, H01S3/10 Z, H01S5/022

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. G02F1/00-1/125, G02F1/21-7/00, H01S3/00-5/50

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 1971-2020

Registered utility model specifications of Japan 1996-2020

Published registered utility model applications of Japan 1994-2020

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	WO 2016/142996 A1 (GIGAPHOTON INC.) 15 September 2016, paragraphs [0043]-[0046], [0054]-[0114], fig. 2, 8	1-20
Y	JP 2010-256784 A (LASERTEC CORP.) 11 November 2010, paragraphs [0046], [0069]-[0079], [0084]-[0089], fig. 4, 6	1-20
Y	JP 03-252186 A (NIKON CORP.) 11 November 1991, p. 4, lower right column, line 7 to p. 5, upper left column, line 12, fig. 3	11
Y	JP 2003-315859 A (SHIMADZU CORP.) 06 November 2003, paragraphs [0019]-[0029], fig. 1	11

☒ 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
11.11.2020

Date of mailing of the international search report
24.11.2020

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/033415

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2011-059324 A (NIKON CORP.) 24 March 2011, paragraphs [0031], [0037], fig. 3, 4	12
Y	JP 08-211433 A (MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL CO., LTD.) 20 August 1996, paragraphs [0116], [0117], fig. 8	19
A	US 2007/0286248 A1 (SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.) 13 December 2007, paragraphs [0049], [0050], fig. 1, 5	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2020/033415

Patent Documents referred to in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
WO 2016/142996 A1	15.09.2016	US 2017/0338619 A1 paragraphs [0089]- [0092], [0100]- [0165], fig. 2, 8 CN 107210576 A	
JP 2010-256784 A	11.11.2010	(Family: none)	
JP 03-252186 A	11.11.1991	(Family: none)	
JP 2003-315859 A	06.11.2003	(Family: none)	
JP 2011-059324 A	24.03.2011	(Family: none)	
JP 08-211433 A	20.08.1996	US 5936985 A column 15, lines 27- 42, fig. 8 EP 703649 A2	
US 2007/0286248 A1	13.12.2007	KR 10-2007-0118467 A CN 101089717 A	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01S 3/10(2006.01)i; H01S 5/022(2021.01)i; G02F 1/37(2006.01)i FI: G02F1/37; H01S3/10 Z; H01S5/022										
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）） G02F1/00-1/125; G02F1/21-7/00; H01S3/00-5/50										
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 <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2020年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2020年	日本国実用新案登録公報	1996-2020年	日本国登録実用新案公報	1994-2020年
日本国実用新案公報	1922-1996年									
日本国公開実用新案公報	1971-2020年									
日本国実用新案登録公報	1996-2020年									
日本国登録実用新案公報	1994-2020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								
Y	WO 2016/142996 A1（ギガフォトン株式会社）15.09.2016（2016-09-15） [0043]-[0046], [0054]-[0114], 図2, 8	1-20								
Y	JP 2010-256784 A（レーザーテック株式会社）11.11.2010（2010-11-11） [0046], [0069]-[0079], [0084]-[0089], 図4, 6	1-20								
Y	JP 03-252186 A（株式会社ニコン）11.11.1991（1991-11-11） 第4頁右下欄第7行-第5頁左上欄第12行, 第3図	11								
Y	JP 2003-315859 A（株式会社島津製作所）06.11.2003（2003-11-06） [0019]-[0029], 図1	11								
Y	JP 2011-059324 A（株式会社ニコン）24.03.2011（2011-03-24） [0031], [0037], 図3-4	12								
Y	JP 08-211433 A（松下電器産業株式会社）20.08.1996（1996-08-20） [0116]-[0117], 図8	19								
A	US 2007/0286248 A1（SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.）13.12.2007（2007-12-13） [0049]-[0050], 図1, 5	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、一般的な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抵触するものではなく、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 11.11.2020		国際調査報告の発送日 24.11.2020								
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 奥村 政人 2L 4752 電話番号 03-3581-1101 内線 3295								

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2020/033415

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO	2016/142996	A1	15.09.2016	US 2017/0338619 A1 [0089]-[0092], [0100]- [0165], 図2, 8 CN 107210576 A	
JP	2010-256784	A	11.11.2010	(ファミリーなし)	
JP	03-252186	A	11.11.1991	(ファミリーなし)	
JP	2003-315859	A	06.11.2003	(ファミリーなし)	
JP	2011-059324	A	24.03.2011	(ファミリーなし)	
JP	08-211433	A	20.08.1996	US 5936985 A 第15欄第27-42行, 図8 EP 703649 A2	
US	2007/0286248	A1	13.12.2007	KR 10-2007-0118467 A CN 101089717 A	