

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6033252号  
(P6033252)

(45) 発行日 平成28年11月30日(2016.11.30)

(24) 登録日 平成28年11月4日(2016.11.4)

(51) Int.Cl.	F 1
HO 1 S 3/127 (2006.01)	HO 1 S 3/127
HO 1 S 3/092 (2006.01)	HO 1 S 3/092
HO 1 S 3/00 (2006.01)	HO 1 S 3/00
A 61 B 8/00 (2006.01)	A 61 B 8/00

請求項の数 18 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2014-65958 (P2014-65958)
(22) 出願日	平成26年3月27日 (2014.3.27)
(65) 公開番号	特開2015-191918 (P2015-191918A)
(43) 公開日	平成27年11月2日 (2015.11.2)
審査請求日	平成28年3月9日 (2016.3.9)

(73) 特許権者	306037311 富士フィルム株式会社 東京都港区西麻布2丁目26番30号
(74) 代理人	100073184 弁理士 柳田 征史
(74) 代理人	100090468 弁理士 佐久間 剛
(72) 発明者	村越 大 神奈川県足柄上郡開成町宮台798番地 富士フィルム株式会社内
(72) 発明者	入澤 覚 神奈川県足柄上郡開成町宮台798番地 富士フィルム株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】レーザ装置及びそれを備えた光音響計測装置

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

第1の波長と該第1の波長よりも発光効率が高い第2の波長とに発振波長を有する固体のレーザ媒質と、

前記レーザ媒質を励起する励起部と、

前記第1の波長に対応した共振器であって前記レーザ媒質を内部の光路上に有する第1の共振器と、

前記第2の波長に対応した共振器であって、前記レーザ媒質が配置された光路を含む前記第1の共振器との共通光路を有する第2の共振器と、

少なくとも前記共通光路上に配置されたQ値変更部を含み、前記第1又は第2の波長の光をQスイッチ発振させるQ値変更ユニットと、

前記励起部及び前記Q値変更ユニットを制御する制御部とを備え、

前記励起部は励起光源を含み、

前記制御部は、

発振波長が第1の波長である場合、前記レーザ媒質の励起が開始されてから第1の遅延時間経過時に前記Q値変更ユニットを制御して前記第1の波長の光をQスイッチ発振させ、

発振波長が第2の波長である場合、前記レーザ媒質の励起が開始されてから、前記第2の波長の光の強度が可能最大強度未満となる第2の遅延時間経過時に、前記Q値変更ユニットを制御して前記第2の波長の光をQスイッチ発振させ、

10

20

前記励起部が前記レーザ媒質に与える励起エネルギー量に応じて各前記遅延時間の設定値を変更し、

前記励起光源の使用期間に応じて各前記遅延時間の設定値を変更するレーザ装置。

**【請求項 2】**

前記制御部は、前記使用期間と各前記遅延時間の設定値とが対応付けられた第2の参照テーブルを有し、該第2の参照テーブルに基づいて各前記遅延時間の設定値を変更する請求項1に記載のレーザ装置。

**【請求項 3】**

前記第1及び第2の遅延時間は、各前記光の強度が互いに等しくなる値に設定されている請求項1又は2に記載のレーザ装置。

10

**【請求項 4】**

前記第1の遅延時間は、前記第1の波長の光の強度が可能最大強度となる値に設定されている請求項1から3いずれか1項に記載のレーザ装置。

**【請求項 5】**

前記励起部は励起光源としてフラッシュランプを含み、

前記制御部は、前記フラッシュランプの充電電圧に応じて各前記遅延時間の設定値を変更する請求項1から4いずれか1項に記載のレーザ装置。

**【請求項 6】**

前記制御部は、前記充電電圧と各前記遅延時間の設定値とが対応付けられた第1の参照テーブルを有し、該第1の参照テーブルに基づいて各前記遅延時間の設定値を変更する請求項5に記載のレーザ装置。

20

**【請求項 7】**

前記第1の共振器は、前記レーザ媒質を挟んで互いに対向する第1のミラー及び第2のミラーから構成され、

前記第2の共振器は、前記第1のミラーと、前記レーザ媒質及び前記第2のミラーを挟んで前記第1のミラーに対向する第3のミラーとから構成され、

前記Q値変更ユニットは、前記共通光路上に配置された第1のQ値変更部と、前記第2のミラー及び前記第3のミラーの間に配置された第2のQ値変更部とから構成される請求項1から6いずれか1項に記載のレーザ装置。

**【請求項 8】**

30

前記第1のミラー、前記第2のミラー及び前記第3のミラーの少なくとも1つが光軸方向に沿って移動可能である請求項7に記載のレーザ装置。

**【請求項 9】**

前記制御部は、各前記共振器の長さに応じて各前記遅延時間の設定値を変更する請求項8に記載のレーザ装置。

**【請求項 10】**

前記制御部は、前記第1の共振器の長さと前記第1の遅延時間の設定値とが対応付けられた第3の参照テーブル及び/又は前記第2の共振器の長さと前記第2の遅延時間の設定値とが対応付けられた第4の参照テーブルを有し、各前記参照テーブルに基づいて各前記遅延時間の設定値を変更する請求項9に記載のレーザ装置。

40

**【請求項 11】**

前記制御部は、前記第1及び第2のQ値変更部の駆動状態を、

各前記共振器のQ値が発振しきい値よりも低い低Q状態である第1の駆動状態、

各前記共振器のQ値が発振しきい値よりも高い高Q状態である第2の駆動状態、及び、

前記第1の共振器のQ値が高Q状態でありかつ第2の共振器のQ値が低Q状態にある第3の駆動状態の間で切り替える請求項7から10いずれか1項に記載のレーザ装置。

**【請求項 12】**

前記制御部は、前記レーザ媒質の励起時に前記第1及び第2のQ値変更部の駆動状態を前記第1の駆動状態とする請求項11に記載のレーザ装置。

**【請求項 13】**

50

前記制御部は、前記レーザ媒質の励起後、前記第1及び第2のQ値変更部の駆動状態を、発振波長が第1の波長である場合には前記第1の駆動状態から前記第3の駆動状態へと切り替え、発振波長が第2の波長である場合には前記第1の駆動状態から前記第2の駆動状態へと切り替える請求項1\_2に記載のレーザ装置。

【請求項14】

前記第1のQ値変更部は、印加電圧に応じて前記第1の共振器のQ値を変更する第1のQスイッチを含み、

前記第2のQ値変更部は、印加電圧に応じて前記第2の共振器のQ値を変更する第2のQスイッチを含み、

前記制御部は、各前記印加電圧を制御することで各前記Q値変更部を駆動する請求項7から1\_3いずれか1項に記載のレーザ装置。 10

【請求項15】

請求項1から1\_4いずれか1項に記載のレーザ装置と、

該レーザ装置から出射したレーザ光を利用して被検体内に発生させた光音響波を検出するプローブとを備える光音響計測装置。

【請求項16】

前記プローブで検出した光音響波の信号を処理する信号処理部を備える請求項1\_5に記載の光音響計測装置。 20

【請求項17】

前記信号処理部は、前記光音響波の信号に基づいて光音響画像を生成する音響画像生成部を有する請求項1\_6に記載の光音響計測装置。 20

【請求項18】

前記音響画像生成部は、前記被検体に対して送信された音響波の反射波の信号に基づいて反射音響波画像を生成するものである請求項1\_7に記載の光音響計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザ装置に関し、更に詳しくは、第1の波長の光及び第2の波長の光を出射可能なレーザ装置に関する。また、本発明は、そのようなレーザ装置を備えた光音響計測装置に関する。 30

【背景技術】

【0002】

従来、例えば特許文献1に示されているように、光音響効果を利用して生体の内部を画像化する光音響画像生成装置が知られている。この光音響画像生成装置においては、例えばパルスレーザ光等のパルス光が生体に照射される。このパルス光の照射を受けた生体内では、パルス光のエネルギーを吸収した生体組織が熱によって体積膨張し、音響波が発生する。この音響波を超音波プローブなどで検出し、検出された信号（光音響信号）に基づいて生体内部を画像化することが可能となっている。光音響画像生成方法では、特定の光吸収体において音響波が発生するため、生体における特定の組織、例えば血管等を画像化することができる。 40

【0003】

生体組織の多くは光吸収特性が光の波長に応じて変わり、また一般に、その光吸収特性も組織ごとに特有のものとなっている。例えば図14に、ヒトの動脈に多く含まれる酸素化ヘモグロビン（酸素と結合したヘモグロビン:oxy-Hb）と、静脈に多く含まれる脱酸素化ヘモグロビン（酸素と結合していないヘモグロビンdeoxy-Hb）の光波長ごとの分子吸収係数を示す。動脈の光吸収特性は、酸素化ヘモグロビンのそれに対応し、静脈の光吸収特性は、脱酸素化ヘモグロビンのそれに対応する。この波長に応じた光吸収率の違いを利用して、互いに異なる2種の波長の光を血管部分に照射し、動脈と静脈とを区別して画像化する光音響画像生成方法が知られている（例えば特許文献2を参照）。 50

【0004】

例えば特許文献3及び4には、上記のような2種の波長の光を出射可能な可変波長レーザ装置が記載されている。これらのレーザ装置は、フラッシュランプを励起起源とするアレキサンドライトレーザ光源であり、波長755nmと波長800nmのレーザ発振が可能である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2005-21380号公報

【特許文献2】特開2010-46215号公報

【特許文献3】特開2013-89680号公報

【特許文献4】特開2013-214703号公報

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

アレキサンドライトレーザ光源では、波長755nmの光と波長800nmの光の発光効率が異なる。図15は、アレキサンドライトをレーザ媒質としたときの発振波長と発光効率(利得)との関係を示すグラフである。このグラフから分かるように、例えばアレキサンドライトの発光効率は、波長755nm付近で最大となり、波長755nmを超える波長範囲では波長が長くなるにつれて低下していく。

【0007】

20

このように発光効率が異なる2つの発振波長(例えば、発光効率の低い方の波長を「第1の波長」、発光効率の高い方の波長を「第2の波長」とする。)を有するレーザ媒質を使用する場合には、一般的に、異なる強度のレーザ光が発振されることになる。ここで、例えば第1の波長の光について充分な強度を確保しようとすると、第2の波長の光の強度が装置の損傷閾値を超えてしまう場合もある。この点、発振波長が第2の波長である場合にのみ、第2の波長の光の強度を下げるためにレーザ媒質の励起エネルギーを下げることができればよいが、励起光源の特性や装置の構成上、励起エネルギーの下げ幅にも限界があり、また下げるこど自体が好ましくない場合もある。その他、第2の波長の光の強度を下げる方法としては、例えば第2の波長の光のみを減光フィルタに通す方法が考えられる。しかしながらこの方法では、減光フィルタや光の分岐構造が必要になる等、装置の部品点数が増加し、コストの増加を招いてしまう。

30

【0008】

そこで、例えばこのような場合において、装置の部品点数を増加させることなく、各波長の強度を独立して制御できる方法が望まれている。

【0009】

本発明は上記要望に鑑みてなされたものであり、発光効率が異なる2つの発振波長を有するレーザ媒質を使用するレーザ装置において、装置の部品点数を増加させることなく、各波長の光の強度を独立して制御可能とするレーザ装置及びそれを備えた光音響計測装置を提供することを目的とするものである。

【課題を解決するための手段】

40

【0010】

上記課題を解決するために、本発明のレーザ装置は、

第1の波長と第1の波長よりも発光効率が高い第2の波長とに発振波長を有する固体のレーザ媒質と、

レーザ媒質を励起する励起部と、

第1の波長に対応した共振器であってレーザ媒質を内部の光路上に有する第1の共振器と、

第2の波長に対応した共振器であって、レーザ媒質が配置された光路を含む第1の共振器との共通光路を有する第2の共振器と、

少なくとも共通光路上に配置されたQ値変更部を含み、第1又は第2の波長の光をQス

50

イッチ発振させるQ値変更ユニットと、

励起部及びQ値変更ユニットを制御する制御部とを備え、

制御部は、

発振波長が第1の波長である場合、レーザ媒質の励起が開始されてから第1の遅延時間経過時にQ値変更ユニットを制御して第1の波長の光をQスイッチ発振させ、

発振波長が第2の波長である場合、レーザ媒質の励起が開始されてから、第2の波長の光の強度が可能最大強度未満となる第2の遅延時間経過時に、Q値変更ユニットを制御して第2の波長の光をQスイッチ発振させるものである。

#### 【0011】

そして、本発明のレーザ装置において、第1及び第2の遅延時間は、各前記光の強度が互いに等しくなる値に設定されていることが好ましい。 10

#### 【0012】

また、本発明のレーザ装置において、第1の遅延時間は、第1の波長の光の強度が可能最大強度となる値に設定されていることが好ましい。

#### 【0013】

また、本発明のレーザ装置において、制御部は、励起部がレーザ媒質に与える励起エネルギー量に応じて各遅延時間の設定値を変更することが好ましい。この場合において、励起部は光源としてフラッシュランプを含み、制御部は、フラッシュランプの充電電圧に応じて各遅延時間の設定値を変更するものであることが好ましい。ここで、制御部は、充電電圧と各遅延時間の設定値とが対応付けられた第1の参照テーブルを有し、第1の参照テーブルに基づいて各遅延時間の設定値を変更するものである構成を採用できる。さらに、励起部は励起光源を含み、制御部は、励起光源の使用期間に応じて各遅延時間の設定値を変更するものであることが好ましい。ここで、制御部は、上記使用期間と各遅延時間の設定値とが対応付けられた第2の参照テーブルを有し、第2の参照テーブルに基づいて各遅延時間の設定値を変更するものである構成を採用できる。 20

#### 【0014】

また、本発明のレーザ装置において、第1の共振器は、レーザ媒質を挟んで互いに対向する第1のミラー及び第2のミラーから構成され、第2の共振器は、第1のミラーと、レーザ媒質及び第2のミラーを挟んで第1のミラーに対向する第3のミラーとから構成され、Q値変更ユニットは、共通光路上に配置された第1のQ値変更部と、第2のミラー及び第3のミラーの間に配置された第2のQ値変更部とから構成されることが好ましい。 30

#### 【0015】

この場合において、第1のミラー、第2のミラー及び第3のミラーの少なくとも1つが光軸方向に沿って移動可能であることが好ましく、さらに制御部は、各共振器の長さに応じて各遅延時間の設定値を変更するものであることが好ましい。ここで、制御部は、第1の共振器の長さと第1の遅延時間の設定値とが対応付けられた第3の参照テーブル及び/又は第2の共振器の長さと第2の遅延時間の設定値とが対応付けられた第4の参照テーブルを有し、各参照テーブルに基づいて各遅延時間の設定値を変更するものであることが好ましい。

#### 【0016】

また、本発明のレーザ装置において、制御部は、第1及び第2のQ値変更部の駆動状態を、各共振器のQ値が発振しきい値よりも低い低Q状態である第1の駆動状態、各共振器のQ値が発振しきい値よりも高い高Q状態である第2の駆動状態、及び、第1の共振器のQ値が高Q状態でありかつ第2の共振器のQ値が低Q状態にある第3の駆動状態の間で切り替えるものであることが好ましい。この場合において、制御部は、レーザ媒質の励起時に第1及び第2のQ値変更部の駆動状態を第1の駆動状態とするものであることが好ましい。さらに、制御部は、レーザ媒質の励起後、第1及び第2のQ値変更部の駆動状態を、発振波長が第1の波長である場合には第1の駆動状態から第3の駆動状態へと切り替え、発振波長が第2の波長である場合には第1の駆動状態から第2の駆動状態へと切り替えるものであることが好ましい。 40

## 【0017】

また、本発明のレーザ装置において、第1のQ値変更部は、印加電圧に応じて第1の共振器のQ値を変更する第1のQスイッチを含み、第2のQ値変更部は、印加電圧に応じて第2の共振器のQ値を変更する第2のQスイッチを含み、制御部は、各印加電圧を制御することで各Q値変更部を駆動するものであることが好ましい。

## 【0018】

本発明の光音響計測装置は、上記に記載のレーザ装置と、  
レーザ装置から出射したレーザ光を利用して被検体内に発生させた光音響波を検出する  
プローブとを備えるものである。

## 【0019】

そして、本発明の光音響計測装置は、プローブで検出した光音響波の信号を処理する信号処理部を備えることが好ましい。

## 【0020】

また、本発明の光音響計測装置において、信号処理部は、光音響波の信号に基づいて光音響画像を生成する音響画像生成部を有することが好ましく、音響画像生成部は、被検体に対して送信された音響波の反射波の信号に基づいて反射音響波画像を生成するものであることが好ましい。

## 【発明の効果】

## 【0021】

本発明のレーザ装置及び光音響計測装置は、第1の波長と第1の波長よりも発光効率が高い第2の波長とに発振波長を有する固体のレーザ媒質と、励起部と、第1の波長に対応した共振器であってレーザ媒質を内部の光路上に有する第1の共振器と、第2の波長に対応した共振器であって、レーザ媒質が配置された光路を含む第1の共振器との共通光路を有する第2の共振器と、少なくとも共通光路上に配置されたQ値変更部を含み、第1又は第2の波長の光をQスイッチ発振させるQ値変更ユニットと、励起部及びQ値変更ユニットを制御する制御部とを備える。そして、制御部は、発振波長が第1の波長である場合、レーザ媒質の励起が開始されてから第1の遅延時間経過時にQ値変更ユニットを制御して第1の波長の光をQスイッチ発振させ、発振波長が第2の波長である場合、レーザ媒質の励起が開始されてから、第2の波長の光の強度が可能最大強度未満となる第2の遅延時間経過時に、Q値変更ユニットを制御して第2の波長の光をQスイッチ発振させる。これにより、発光効率が異なる2つの発振波長を有するレーザ媒質を使用するレーザ装置において、装置の部品点数を増加させることなく、各波長の光の強度を独立して制御可能となる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0022】

【図1】第1の実施形態に係るレーザ装置の構成を示す概略図である。

【図2】励起エネルギーとレーザ光のパルス幅との関係を共振器長ごとに示したグラフである。

【図3】励起エネルギーとレーザ光の強度との関係を共振器長ごとに示したグラフである。

【図4】励起エネルギーとレーザ光のパルス幅との関係をミラー反射率ごとに示したグラフである。

【図5】励起エネルギーとレーザ光の強度との関係をミラー反射率ごとに示したグラフである。

【図6】励起エネルギーとレーザ光の強度との関係を発振波長ごとに示したグラフである。

【図7】遅延時間とレーザ光の強度との関係を示すタイミングチャートである。

【図8】遅延時間に応じて励起エネルギーとレーザ光の強度との関係が変化する様子を示したグラフである。

【図9】励起ランプの発光、Qスイッチに印加する電圧及びレーザ光の出力に関するタイ

10

20

30

40

50

ミングチャートである。

【図10】第2の実施形態に係るレーザ装置の構成を示す概略図である。

【図11】第3の実施形態に係るレーザ装置の構成を示す概略図である。

【図12】実施形態に係る光音響計測装置の構成を示す概略図である。

【図13】光音響計測装置の動作手順を示すフローチャートである。

【図14】酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの光波長ごとの分子吸収係数を示すグラフである。

【図15】アレキサンドライトの利得曲線を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0023】

10

以下、本発明の実施形態について図面を用いて説明するが、本発明はこれに限られるものではない。なお、視認しやすくするため、図面中の各構成要素の縮尺等は実際のものとは適宜異ならせてある。

【0024】

「レーザ装置の第1の実施形態」

レーザ装置の第1の実施形態について説明する。図1は、本実施形態に係るレーザ装置1の構成を示す概略図である。図1に示されるように、レーザ装置1は、レーザロッド51、フラッシュランプ52、第1のミラー53、第2のミラー54、第3のミラー55、第1のQ値変更部56、第2のQ値変更部57及び制御回路62を有する。第1のQ値変更部56及び第2のQ値変更部57が全体として本発明におけるQ値変更ユニットに相当する。レーザ装置1は、第1の波長及び第2の波長を含む複数の波長のレーザ光Lを出射する。例えば本明細書においては、レーザ発振についての第2の波長における利得（発光効率）は第1の波長における利得よりも高いものとする。

20

【0025】

レーザロッド51は、レーザ媒質である。レーザロッド51は、800nmと755nmに発振波長を有する。レーザロッド51には、例えばアレキサンドライト結晶を用いることができる。アレキサンドライトのレーザ発振についての利得は、前述の通り、波長755nm付近でピークとなる。利得は、波長755nmよりも短い波長の範囲では波長が短くなるに連れて単調に減少していく。また、波長755nmよりも長い波長の範囲では波長が長くなるに連れて単調に減少していく。アレキサンドライト結晶の波長800nmにおける利得は、波長755nmにおける利得よりも低い。

30

【0026】

例えば、第1の波長（中心波長）として約800nmを考え、第2の波長として約755nmを考える。先に説明した図14を参照すると、ヒトの動脈に多く含まれる酸素化ヘモグロビンの波長755nmにおける分子吸収係数は、波長800nmにおける分子吸収係数よりも低い。一方、静脈に多く含まれる脱酸素化ヘモグロビンの波長755nmにおける分子吸収係数は、波長800nmにおける分子吸収係数よりも高い。この性質を利用し、波長800nmで得られた光音響信号に対して、波長755nmで得られた光音響信号が相対的に大きいのか小さいのかを調べることで、動脈からの光音響信号と静脈からの光音響信号とを判別することができる。あるいは、酸素飽和度を計測することができる。

40

【0027】

なお、第1の波長と第2の波長の選択に関しては、理論上、選択される二波長において光吸収係数に差があればどのような二波長の組み合わせでもよく、上記した約755nmと約800nmの組み合わせには限定されない。扱いやすさなどを考えると、選択される2つの波長は、酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンとで光吸収係数が同じになる波長約800nm（正確には798nm）と、脱酸素化ヘモグロビンの光吸収係数が極大値となる波長約755nm（正確には757nm）との組み合わせが好ましい。第1の波長は、正確に798nmである必要はなく、例えば793nm～802nmの範囲にあれば実用上問題はない。また、第2の波長は、正確に757nmである必要はなく、例えば極大値（757nm）付近のピークの半値幅である748～770nmの範囲にあれば実

50

用上問題はない。

【0028】

フラッシュランプ52は、本発明における励起部としての励起光源であり、レーザロッド51に励起光を照射する。フラッシュランプ52は間欠的に駆動される。フラッシュランプ52は、制御回路62から送信されるフラッシュランプトリガに連動して点灯する。フラッシュランプ52以外の光源を、励起光源として用いてもよい。

【0029】

第1のミラー53、第2のミラー54、及び第3のミラー55は、レーザロッド51の光軸上に沿って並べられている。第1のミラー53及び第2のミラー54は、レーザロッド51を挟んで互いに対向する。第3のミラー55は、第2のミラー54から見てレーザロッド51とは反対側に配置され、レーザロッド51及び第2のミラー54を挟んで第1のミラー53と対向する。

【0030】

第1のミラー53は、波長800nmの光及び波長755nmの光の出力ミラーである。第1のミラー53の波長800nmの光に対する反射率は、波長755nmの光に対する反射率よりも高い。例えば、第1のミラー53の波長800nmの光に対する反射率は80%であり、波長755nmの光に対する反射率は70%である。利得が低い波長800nmの光に対する反射率を高く設定することで、発振(投入)エネルギーしきい値が下がり、利得が増加する。これにより、パルスレーザ光の短パルス化が可能である。

【0031】

第2のミラー54は、波長800nmの光を反射し、波長755nmの光を透過する。例えば、第2のミラー54の波長800nmの光に対する反射率は99.8%以上であり、波長755nmの光に対する反射率は0.5%以下である。第3のミラー55は、波長755nmの光を反射する。第3のミラー55の波長755nmの光に対する反射率は例えば99.8%以上である。

【0032】

レーザロッド51から出射した光のうち、波長800nmの光は第2のミラー54で反射し、第1のミラー53と第2のミラー54との間を往復する。第1のミラー53と第2のミラー54とにより、波長800nmの光を発振する第1の共振器C1が構成される。一方、レーザロッド51から出射した波長755nmの光は第2のミラー54を透過して第3のミラー55で反射し、第1のミラー53と第3のミラー55との間を往復する。第1のミラー53と第3のミラー55とにより、波長755nmの光を発振する第2の共振器C2が構成される。第1の共振器C1の共振器長は、第2の共振器C2の共振器長よりも短い。第1のミラー53から第2のミラー54までの光路は、第1の共振器C1と第2の共振器C2とに共通の光路であり、レーザロッド51はこの共通光路上に配置されている。

【0033】

第1のQ値変更部56は、第1の共振器C1と第2の共振器C2との共通光路上に配置され、第1の共振器C1及び第2の共振器C2のQ値を制御する。第1のQ値変更部56は、例えば第1のミラー53とレーザロッド51との間に配置される。これに代えて、レーザロッド51と第2のミラー54との間に第1のQ値変更部56を配置してもよい。第1のQ値変更部56は、第1のQスイッチ58と偏光子59とを含む。第1のQスイッチ58は、印加電圧に応じて、第1の共振器C1及び第2の共振器C2のQ値を変化させる。第1のQスイッチ58には、印加電圧に応じて通過する光の偏光状態を変化させる電気光学素子を用いることができる。

【0034】

第1のQスイッチ58には例えばポッケルスセルが用いられる。第1のQスイッチ58は、印加電圧がQスイッチオフに対応した第1の電圧のとき第1の共振器C1及び第2の共振器C2を低Q状態にする。低Q状態とは、共振器のQ値がレーザ発振しきい値よりも低い状態を指す。第1の電圧は、例えば第1のQスイッチ58が1/4波長板として機能

10

20

30

40

50

する電圧である。第1のQスイッチ58は、印加電圧がQスイッチオンに対応した第2の電圧のとき、第1の共振器C1及び第2の共振器C2を高Q状態にする。高Q状態とは、共振器のQ値がレーザ発振しきい値よりも高い状態を指す。第2の電圧の絶対値は、第1の電圧の絶対値よりも小さく、電圧は正の電圧であっても負の電圧であってもよい。第2の電圧は、例えば0V(電圧印加なし)であり、このとき第1のQスイッチ58を透過する光の偏光状態は変化しない。なお、ポッケルスセルが1/4波長板として働く電圧は波長に依存して変化するため、Qスイッチオンに対応した第2の電圧は、波長800nmの発振時と波長755nmの発振時とで異なる。すなわち、波長800nmの発振時と波長755nmの発振時とで、ポッケルスセルへの印加電圧が異なる。このため、ポッケルスセルへの印加電圧0VがQスイッチオンに対応する構成に比べて、そうでない構成の場合には、Qスイッチの制御回路やその制御手法がやや複雑になる。従って、第1のQ値変更部56は、印加電圧0VがQスイッチオンに対応する構成とすることが好みしい。

#### 【0035】

偏光子59は、レーザロッド51と第1のQスイッチ58との間に配置される。偏光子59は、所定方向の直線偏光のみを透過させる。偏光子59には、例えば、所定方向の直線偏光(例えばp偏光)を透過し、この所定方向に直交する方向(例えばs偏光)を反射するビームスプリッタを用いることができる。なお、レーザロッド51にアレキサンダライト結晶を用いた場合など、レーザロッド51が射出する光がp偏光であれば、偏光子59は省略してもよい。

#### 【0036】

具体的には、第1のQスイッチ58に第1の電圧が印加されたとき、第1のQスイッチ58は1/4波長板として機能する。このとき、偏光子59から第1のQスイッチ58に入射したp偏光の光は、第1のQスイッチ58を通過する際に円偏光となる。その後、光は、第1のミラー53で反射して第1のQスイッチ58に逆向きに入射する。第1のQスイッチ58に逆向きに入射した円偏光の光は、第1のQスイッチ58を通過する際にs偏光となる。その後、光は、s偏光を反射する偏光子59で反射して共振器の光路外へ放出される。一方、第1のQスイッチ58への印加電圧が0V(第2の電圧)のとき、偏光子59から第1のQスイッチ58に入射したp偏光の光は、p偏光のまま第1のQスイッチ58を透過し、第1のミラー53で反射する。第1のミラー53で反射したp偏光の光は、p偏光のまま第1のQスイッチ58を透過し、p偏光を透過する偏光子59を透過してレーザロッド51に入射する。

#### 【0037】

第2のQ値変更部57は、第2のミラー54と第3のミラー55との間の第2の共振器C2の光路上に配置され、第2の共振器C2のQ値を制御する。第2のQ値変更部57は、第2のQスイッチ60と1/4波長板61とを含む。第2のQスイッチ60は、印加電圧に応じて第2の共振器C2のQ値を変化させる。第2のQスイッチ60には、印加電圧に応じて通過する光の偏光状態を変化させる電気光学素子を用いることができる。1/4波長板61は、第2のQスイッチ60と第3のミラー55との間に配置される。

#### 【0038】

第2のQスイッチ60には例えばポッケルスセルが用いられる。第2のQスイッチ60は、印加電圧がQスイッチオフに対応した第3の電圧のとき第2の共振器C2を低Q状態にする。第3の電圧は、例えば0V(電圧印加なし)であり、このとき第2のQスイッチ60を透過する光の偏光状態は変化しない。第2のQスイッチ60は、印加電圧がQスイッチオンに対応した第4の電圧のとき第2の共振器C2を高Q状態にする。第4の電圧の絶対値は第3の電圧の絶対値よりも大きく、電圧は正の電圧であっても負の電圧であってもよい。第4の電圧は、例えば第2のQスイッチ60が1/4波長板として機能する電圧である。

#### 【0039】

具体的には、第2のQスイッチ60への印加電圧が0V(第3の電圧)のとき、レーザロッド51側から第2のミラー54を通して第2のQスイッチ60に入射したp偏光の光

10

20

30

40

50

は、p 偏光のまま第2のQスイッチ60を通過し、1/4波長板61を通過する際に円偏光となって第3のミラー55で反射する。第3のミラー55で反射した円偏光の光は、1/4波長板61を逆向きに通過する際にs偏光となり、第2のQスイッチ60をs偏光のまま通過してレーザロッド51へ戻る。ここで、第2のミラー54は波長800nmの光を反射し、波長755nmの光を透過する。このため、第2のミラー54と第3のミラー55との間を進行する光は波長755nmの光であり、波長800nmの光は第2のミラー54から第3のミラー55側には進行しない。一方、第2のQスイッチ60に第4の電圧が印加されたとき、第2のQスイッチ60は1/4波長板として機能する。このとき、レーザロッド51側から第2のミラー54を通して第2のQスイッチ60に入射したp偏光の光は、第2のQスイッチ60を通過する際に円偏光となり、更に1/4波長板61を通過する際にs偏光となる。その後、第3のミラー55で反射した光は、1/4波長板61を逆向きに通過する際に円偏光となり、更に第2のQスイッチ60を通過する際にp偏光となり、レーザロッド51へ戻る。

【0040】

制御回路62は、本発明における制御部に相当し、第1のQ値変更部56及び第2のQ値変更部57を駆動する。制御回路62は、第1の共振器C1及び第2の共振器C2の駆動状態を、各共振器のQ値が共に発振しきい値よりも低い低Q状態となる第1の駆動状態、各共振器のQ値が共に発振しきい値よりも高い高Q状態となる第2の駆動状態、及び、第1の共振器C1が高Q状態となりかつ第2の共振器C2が低Q状態となる第3の駆動状態の間で切り替える。制御回路62は、第1のQスイッチ58への印加電圧を制御することで第1のQ値変更部56を駆動し、第2のQスイッチ60への印加電圧を制御することで第2のQ値変更部57を駆動する。制御回路62は、第1のQ値変更部及び/又は第2のQ値変更部にQスイッチトリガを送信し、上記3つの駆動状態の切り替えを利用してレーザ光を発振させる。また、制御回路62は、フラッシュランプ52の点灯を指示するフラッシュランプトリガを送信して、フラッシュランプ52の駆動も行う。

【0041】

第1の駆動状態では、第1のQスイッチ58に第1の電圧が印加され、第1のQスイッチ58は1/4波長板として機能する。また、第1の駆動状態では、第2のQスイッチ60への印加電圧は0V(第3の電圧)であり、第2のQスイッチ60を通過する光の偏光状態は変化しない。したがって、第1のQスイッチ58が1/4波長板として機能することで、第1のミラー53で反射した光はレーザロッド51に入射しない。また、第2のQスイッチ60を通過する光の偏光状態が変化しないことで、第3のミラー55で反射した波長755nmの光はs偏光でレーザロッド51へ入射する。その結果、第1の共振器C1及び第2の共振器C2は低Q状態となり、波長800nmと波長755nmの双方について、レーザ発振が起こらない。なお、第1のQスイッチ58は共通光路上に配置されており、第1のQスイッチ58に第1の電圧を印加することで第2の共振器C2を低Q状態にすることができます。このため、第1の駆動状態において、第2のQスイッチ60への印加電圧は特に第3の電圧には限定されず、第2のQスイッチ60に第4の電圧を印加し、第2のQスイッチ60を1/4波長板として働かせていてもよい。

【0042】

第2の駆動状態では、第1のQスイッチ58への印加電圧は0V(第2の電圧)であり、第1のQスイッチ58を通過する光の偏光状態は変化しない。また、第2の駆動状態では、第2のQスイッチ60に第4の電圧が印加され、第2のQスイッチ60は1/4波長板として機能する。したがって、第1のQスイッチ58を通過する光の偏光状態が変化しないことで、第1のミラー53で反射した光はp偏光でレーザロッド51に入射する。また、第2のQスイッチ60が1/4波長板として機能することで、第3のミラー55で反射した波長755nmの光はp偏光でレーザロッド51へ入射する。その結果、第1の共振器C1及び第2の共振器C2は高Q状態となり、レーザ発振が起こる。波長800nmと波長755nmとでは、波長755nmの利得の方が波長800nmの利得よりも高いため、発振波長は利得が高い755nmとなる。

10

20

30

40

50

## 【0043】

第3の駆動状態では、第1のQスイッチ58への印加電圧は0V(第2の電圧)であり、第1のQスイッチ58を通過する光の偏光状態は変化しない。また、第3の駆動状態では、第2のQスイッチ60への印加電圧は0V(第3の電圧)であり、第2のQスイッチ60を通過する光の偏光状態を変化させない。第1のQスイッチ58を通過する光の偏光状態が変化しないことで、第1のミラー53で反射した光はp偏光でレーザロッド51に入射する。また、第2のQスイッチ60を通過する光の偏光状態が変化しないことで、第3のミラー55で反射した波長755nmの光はs偏光でレーザロッド51へ入射する。その結果、第1の共振器C1は高Q状態でかつ第2の共振器C2は低Q状態となり、第1の共振器C1でレーザ発振が起こる。第1の共振器C1は波長800nmの共振器であり、発振波長は800nmとなる。 10

## 【0044】

制御回路62は、レーザロッド51の励起時には、第1のQ値変更部56及び第2のQ値変更部57の駆動状態を第1の駆動状態とする。すなわち、第1の共振器C1及び第2の共振器C2が低Q状態の下でフラッシュランプ52が点灯し、レーザロッド51の励起が行われる。制御回路62は、レーザロッド51の励起後、発振波長が800nmである場合には、第1のQ値変更部56及び第2のQ値変更部57の駆動状態を第1の駆動状態から第3の駆動状態へと切り替える。第3の駆動状態では、第1の共振器C1が高Q状態でかつ第2の共振器C2が低Q状態であるため、発振波長は波長800nmとなる。第1の共振器C1のQ値を低Q状態から高Q状態へ急激に変化させることで、波長800nmのパルスレーザ光を得ることができる。すなわち、第1のQ値変更部56の駆動をきっかけに光のQスイッチ発振が実現するため、この場合、制御回路62による第1のQ値変更部56への駆動指示がQスイッチトリガとなる。 20

## 【0045】

制御回路62は、レーザロッド51の励起後、発振波長が755nmである場合には、第1のQ値変更部56及び第2のQ値変更部57の駆動状態を第1の駆動状態から第2の駆動状態へと切り替える。このとき制御回路62は、第2の共振器C2が高Q状態となるように第2のQ値変更部57を駆動するのと同時に第1の共振器が高Q状態となるように第1のQ値変更部56を駆動する。あるいは、制御回路62は、第2の共振器C2が高Q状態となるように第2のQ値変更部57を駆動した後に第1の共振器が高Q状態となるように第1のQ値変更部56を駆動してもよい。第2の駆動状態では、双方の共振器が高Q状態となるが、発振波長は、波長800nmと波長755nmのうちで利得が高い755nmとなる。第1の共振器及び第2の共振器C2(特に第2の共振器C2)のQ値を低Q状態から高Q状態へ急激に変化させることで、波長755nmのパルスレーザ光を得ることができる。すなわち、第2のQ値変更部57の駆動をきっかけに光のQスイッチ発振が実現するため、この場合、制御回路62による第2のQ値変更部57への駆動指示がQスイッチトリガとなる。 30

## 【0046】

また、制御回路62は、レーザ媒質の励起が開始されてから光がQスイッチ発振するまでの時間(遅延時間)に関して、波長ごとに設定された遅延時間を有し、各遅延時間に従って各波長の光をQスイッチ発振させる。より具体的には、制御回路62は、発振波長が第1の波長(本実施形態においては波長800nm)である場合、レーザロッド51の励起が開始されてから第1の遅延時間経過時に第1のQ値変更部56及び第2のQ値変更部57を制御して第1の波長の光をQスイッチ発振させ、発振波長が第2の波長(本実施形態においては波長755nm)である場合、レーザロッド51の励起が開始されてから、第2の波長の光の強度が可能最大強度未満(例えば可能最大強度の90%、80%又は50%)となる第2の遅延時間経過時に、第1のQ値変更部56及び第2のQ値変更部57を制御して第2の波長の光をQスイッチ発振させる。可能最大強度とは、ある励起エネルギーでレーザ媒質を励起した場合に、潜在的能力として出力することが可能な光の最大強度をいう。このように遅延時間を波長ごとに独立して設定することにより、各波長の光強 40 50

度を独立して制御することが可能となる。なお、遅延時間を波長ごとに独立して設定したが、結果的に遅延時間が同じ値になることはありうる。遅延時間の設定による光強度の制御についての詳細は後述する。

【0047】

図2は、励起エネルギーとレーザ光のパルス幅との関係を共振器長ごとに示したグラフである。同図には、2つの共振器長について、励起エネルギーとパルス幅との関係が示されている。グラフ(a)は共振器長が短い共振器を用いた場合の励起エネルギーとパルス幅との関係を示し、グラフ(b)は共振器長が長い共振器を用いた場合の励起エネルギーとパルス幅との関係を示す。グラフ(a)とグラフ(b)を参照すると、励起エネルギーを一定とした場合、共振器長が短い方が、共振器長が長い場合に比べてパルス幅を短くできることがわかる。レーザ装置1では、第1の共振器C1は第2の共振器C2よりも共振器長が短いため、波長800nmのパルスレーザ光のパルス幅を、波長755nmのパルスレーザ光のパルス幅よりも短くできる。

10

【0048】

図3は、励起エネルギーとレーザ光の強度との関係を共振器長ごとに示したグラフである。同図には、2つの共振器長について、励起エネルギーとレーザ光の強度との関係が示されている。グラフ(a)は共振器長が短い共振器を用いた場合の励起エネルギーと強度との関係を示し、グラフ(b)は共振器長が長い共振器を用いた場合の励起エネルギーと強度との関係を示す。グラフ(a)とグラフ(b)を参照すると、励起エネルギーを一定とした場合、共振器長が短い方が、共振器長が長い場合に比べてレーザ出力を上げることができることがわかる。レーザ装置1では、第1の共振器C1は第2の共振器C2よりも共振器長が短く、双方の共振器の共振器長を同じにした場合に比べて、波長800nmの光のレーザ出力を上げることができる。

20

【0049】

図4は、励起エネルギーとレーザ光のパルス幅との関係をミラー反射率ごとに示したグラフである。同図において、グラフ(a)は、出力ミラーである第1のミラー53の反射率を80%とした場合の励起エネルギーとパルス幅との関係を示し、グラフ(b)は第1のミラー53の反射率を60%とした場合の励起エネルギーとパルス幅との関係を示す。グラフ(a)とグラフ(b)を参照すると、励起エネルギーを一定とした場合、出力ミラーの反射率が高い方が、出力ミラーの反射率を低くした場合に比べてパルス幅を短くできることがわかる。第1のミラー53の波長800nmの光に対する反射率を、波長755nmの光に対する反射率よりも高くすることで、波長800nmのパルスレーザ光のパルス幅を、波長755nmのパルスレーザ光のパルス幅よりも短くできる。

30

【0050】

図5は、励起エネルギーとレーザ光の強度との関係をミラー反射率ごとに示したグラフである。同図において、グラフ(a)は、第1のミラー53の反射率を80%とした場合の励起エネルギーと強度との関係を示し、グラフ(b)は第1のミラー53の反射率を60%とした場合の励起エネルギーと強度との関係を示す。グラフ(a)とグラフ(b)を参照すると、励起エネルギーを一定とした場合、出力ミラーの反射率が高い方が、出力ミラーの反射率を低くした場合に比べてレーザ出力を上げることができることがわかる。第1のミラー53の波長800nmの光に対する反射率を、波長755nmの光に対する反射率よりも高くすることで、双方の波長の反射率を同じにした場合に比べて、波長800nmの光のレーザ出力を上げることができる。

40

【0051】

遅延時間の設定による光強度の制御について説明する。図6は、励起エネルギーとレーザ光の強度との関係を発振波長ごとに示したグラフである。図6のXは利得の低い第1の波長の光に関するグラフであり、図6のYは利得の高い第2の波長の光に関するグラフである。図6の(a)に示されるように、同じ励起エネルギーE<sub>0</sub>でレーザロッド51を励起する場合、第1の波長の光の強度I<sub>1</sub>を確保するため励起エネルギーを大きくしようとすると、第2の波長の光の強度I<sub>2</sub>が、レーザ装置1内のレンズやミラー等の損傷閾値I

50

$t_h$  を超えてしまうという場合がある。そこで、本発明者らは、遅延時間の設定により第2の波長の光のみの利得を下げ、図6の(b)のように、グラフYを左側にシフトさせる方法を見出した。この方法によれば、第1の波長の光の強度  $I_1$  を下げずに、第2の波長の光の強度  $I_2$  を損傷閾値  $I_{t_h}$  未満に下げることが可能となる。

#### 【0052】

具体的には以下の通りである。図7は、遅延時間とレーザ光の強度との関係を示すタイミングチャートである。図7の(a)はフラッシュランプ(FL)トリガのタイミングを示し、(b)はフラッシュランプの発光強度の時間変化を示し、(c)はレーザロッド内における反転分布状態密度の時間変化を示す。また、(d)はQスイッチ(Qsw)トリガのタイミングを示し、(e)はQスイッチトリガの各タイミングに対応して出力されるパルスレーザ光を示す。すなわち(d)及び(e)は、遅延時間D1のタイミングT1でQスイッチトリガが出された場合にはパルスレーザ光P1が出力され、遅延時間D2のタイミングT2でQスイッチトリガが出された場合にはパルスレーザ光P2が出力され、遅延時間D3のタイミングT3でQスイッチトリガが出された場合にはパルスレーザ光P3が出力され、遅延時間D4のタイミングT4でQスイッチトリガが出された場合にはパルスレーザ光P4が出力されることを示す。

10

#### 【0053】

まず、制御回路62からフラッシュランプトリガが送信されると、それに連動してフラッシュランプが発光する。フラッシュランプの発光強度は、発光後しばらく増加し、ある時刻でピークに達するとその後は減少に転じる。フラッシュランプからの光を受けたレーザロッド内では、吸収した光量に応じて反転分布が形成されるため、この反転分布の状態密度も時間の経過と共に増加し、ある時刻でピークに達するとその後は緩やかに減少し、その後大きく減少する。すなわち、反転分布の状態密度は時間の経過と共に変化しているため、どのタイミングでQスイッチトリガを出すかによってレーザ発振する光の強度が異なってくる。例えば、図7の(e)では、反転分布状態密度が最も大きくなるタイミングT2で最大強度のパルスレーザ光P2が得られ、反転分布状態密度が小さいタイミングになるほどパルスレーザ光の強度( $P1 < P4 < P3$ )が減少している。つまり、遅延時間D2が、光の強度が可能最大強度となる遅延時間であり、遅延時間D1、D3及びD4が、光の強度が可能最大強度未満となる遅延時間である。一般的に遅延時間D2はおよそ150~200μsであり、本実施形態において隣接するQスイッチトリガ同士の時間差(つまり、遅延時間D1及びD2の差、遅延時間D2及びD3の差並びに遅延時間D3及びD4の差)は例えば数十μsである。なお、上記の図7の説明では、簡略化のために、フラッシュランプ及び各Q値変更部が制御回路62からのトリガに対して瞬時に応答するものとして説明したが、実際にはトリガを受けてから応答するまでの間には若干の遅延時間(これは、前述の励起から発振までの遅延時間とは異なる)が存在する。したがって、実際にはこのトリガ受信から応答までの遅延時間を考慮してフラッシュランプトリガ及びQスイッチトリガを出力する必要がある。

20

#### 【0054】

図8は、遅延時間に応じて励起エネルギーとレーザ光の強度との関係が変化する様子を示したグラフである。図8において、D1からD4は第2の波長の光の強度を示すグラフであり、Xは第1の波長の光の強度を示すグラフである。具体的には、D1は遅延時間D1のときの光の強度を示すグラフであり、D2は遅延時間D2のときの光の強度を示すグラフであり、D3は遅延時間D3のときの光の強度を示すグラフであり、D4は遅延時間D4のときの光の強度を示すグラフである。なお、D2のグラフは、各励起エネルギーに対する最大強度  $I_{max}$  を与えるグラフである。図8の(a)より、例えば遅延時間D4又はD1のタイミングでQスイッチトリガを出せば、第2の波長の光の強度  $I_2$  を、可能最大強度未満の範囲で制御でき、さらに損傷閾値  $I_{t_h}$  未満に下げることが可能となる。なお、本実施形態では、波長切り替えを可能にするべく、第2の波長が第1の波長よりも常に高利得でなければならない。したがって、第2の波長に関する発振閾値励起エネルギー  $E_2$  が第1の波長に関する発振閾値励起エネルギー  $E_1$  よりも小さくなるように遅延時

30

40

50

間を設定する。

【0055】

また、例えば図8の(b)のように、各波長の光の強度を揃えたいが、励起エネルギーに下限  $E_{min}$  があるために通常の設定(例えば遅延時間D2)では励起エネルギーを下げただけでは、各波長の光の強度が揃わない場合もある。そこで、このような場合でも、例えば遅延時間の設定をD2からD4へ変更すれば、 $E_{min}$  以上の励起エネルギー  $E_3$  及び  $E_0$  で各波長の光の強度  $I_1$  及び  $I_2$  を等しくすることができる。なお、本明細書において、各波長の光の強度が揃う又は等しいとは、各波長の光の強度差が第1の波長の光強度を基準にして10%以内であることをいう。なお、上記では第2の波長の光の発振に関する遅延時間の設定を変更することについて説明したが、第1の波長の光の発振に関する遅延時間の設定を変更してもよい。

10

【0056】

以下、図9を用いてQ値変更部の動作と発振波長の切り替えについて説明する。図9は、励起ランプの発光、Qスイッチに印加する電圧及びレーザ光の出力に関するタイミングチャートである。制御回路62は、フラッシュランプトリガを送信して時刻t1でフラッシュランプ52を点灯させる(a)。制御回路62は、フラッシュランプ52が点灯する前に、第1のQスイッチ58(Q-s w1)に第1の電圧を印加し(b)、第2のQスイッチ60(Q-s w2)への印加電圧を0V(第3の電圧)とする(c)。第1のQスイッチ58に第1の電圧を印加する時刻は、時刻t1よりも少し前の時刻でよい。あるいは、前回のパルスレーザ光出射の後から第1のQスイッチ58に第1の電圧を印加し続けてよい。第1のQスイッチ58に第1の電圧を印加することで、第1のQスイッチ58は1/4波長板として機能する。また、第2のQスイッチ60への電圧印加を行わないことで、第2のQスイッチ60を通過する光の偏光状態は変化しない。

20

【0057】

時刻t1でレーザロッド51が励起されると、レーザロッド51からはp偏光の光が射出する。しかしながら、レーザロッド51から第1のミラー53方向に出射した光は、1/4波長板として機能する第1のQスイッチ58を往復して偏光方向が90°回転し、偏光子59を通過することができず、レーザロッド51に帰還しない。また、レーザロッド51から第2のミラー54方向に出射した光のうち、波長755nmの光は、1/4波長板61を往復して偏光方向が90°回転するため、所定の偏光軸を持つレーザロッド51のレーザ発振に寄与しない。従って、第1の共振器C1及び第2の共振器C2のQ値は低Q状態となり、第1の共振器C1及び第2の共振器C2は発振しない。

30

【0058】

制御回路62は、Qスイッチトリガとして第1のQスイッチ58の印加電圧を変更する指示を送信して、時刻t1から遅延時間Dxが経過した時刻t2で、第1のQスイッチ58への印加電圧を第1の電圧から0V(第2の電圧)に変化させる(b)。このとき、制御回路62は、第2のQスイッチ60への印加電圧を0Vのまま変化させない(c)。第1のQスイッチ58への印加電圧を0Vに変化させることで、第1の共振器C1のQ値は低Q状態から高Q状態へと変化する。一方で、第2の共振器C2のQ値は低Q状態に保たれる。第1の共振器C1のみが高Q状態となることで、波長800nmでレーザ発振が起こり、第1のミラー53から波長800nmのパルスレーザ光が出射する(d)。ここで、遅延時間Dxは、波長800nmの光の発振用に設定された遅延時間であり、例えば利得が低い波長800nmの光の強度が可能最大強度となるように設定される。

40

【0059】

制御回路62は、波長800nmのパルスレーザ光の出射後、フラッシュランプトリガを送信して時刻t3でフラッシュランプ52を点灯させる(a)。制御回路62は、時刻t3よりも前の時刻に第1のQスイッチ58に第1の電圧を印加しており(b)、第1の共振器C1及び第2の共振器C2のQ値は低Q状態となっている。制御回路62は、時刻t3から遅延時間Dyが経過した時刻t4で、第1のQスイッチ58の印加電圧を第1の電圧から0Vに変化させ、第2のQスイッチ60の印加電圧を0Vから第4の電圧に変化

50

させる。第1のQスイッチ58の印加電圧と第2のQスイッチ60の印加電圧とを同時に変化させるか、又は第2のQスイッチ60の印加電圧を先に変化させてから第1のQスイッチ58の印加電圧を変化させると、波長800nmと波長755nmとのうち利得が高い波長755nmでレーザ発振が起こり、第1のミラー53から波長755nmのパルスレーザ光が出射する(d)。ここで、遅延時間Dyは、波長755nmの光の発振用に遅延時間Dxとは独立して設定された遅延時間であり、例えば利得が高い波長755nmの光の強度が可能最大強度未満でかつ波長800nmの光の強度と等しくなるように設定される。

#### 【0060】

なお、第1のQ値変更部56及び第2のQ値変更部57は、上記第1、第2及び第3の駆動状態の3つの状態を切り替えられればよく、第1のQ値変更部56及び第2のQ値変更部57の具体的な構成は上記したものには限定されない。例えば第1のQ値変更部56を、第2のQ値変更部57と同様に、ポッケルスセルと1/4波長板とを組み合わせたもので構成としてもよいし、第2のQ値変更部57を、第1のQ値変更部56と同様に、ポッケルスセルと偏光子とを組み合わせたもので構成してもよい。

10

#### 【0061】

また、制御回路62は、フラッシュランプ52がレーザロッド51に与える励起エネルギー量に応じて、第1の波長又は第2の波長の光の発振に関して設定する各遅延時間の設定値を自動で変更する構成を採用できる。これにより、例えば、出力される光の目標強度が決まっている場合であって、励起エネルギーを変更しなければならない或いは励起エネルギーが安定しないような場合に、制御回路62が、その励起エネルギーの変化を相殺するように遅延時間の設定値を変更すれば、その目標強度を維持することが容易となる。例えば、励起光源がフラッシュランプ52である場合、制御回路62は、フラッシュランプ52の充電電圧と励起エネルギー量の関係に基づき、フラッシュランプの充電電圧に応じて各遅延時間の設定値を変更することができる。この場合、制御回路62は、充電電圧と第1又は第2の遅延時間の設定値(或いはその変更量)とが対応付けられた参照テーブル(第1の参照テーブル)を持っていてもよいし、それらが関係付けられた関係式を持っていてもよい。制御回路62は、例えば、充電電圧を計測して又は充電電圧の設定値を読み取って充電電圧の値を取得し、上記第1の参照テーブルを参照して、取得した充電電圧に対応した第1又は第2の遅延時間の設定値(或いはその変更量)を読み取り、読み取った設定値を新たに第1又は第2の遅延時間に設定する(或いは読み取った変更量を第1又は第2の遅延時間の設定値に適用する)。また、制御回路62は、フラッシュランプ52等の励起光源の使用期間(使用時間を含む)と励起エネルギー量の関係に基づき、励起光源の使用期間に応じて各遅延時間の設定値を変更することもできる。この場合、制御回路62は、使用期間と第1又は第2の遅延時間の設定値(或いはその変更量)とが対応付けられた参照テーブル(第2の参照テーブル)を持っていてもよいし、それらが関係付けられた関係式を持っていてもよい。制御回路62は、例えば、使用期間を計測してその長さを取得し、上記第2の参照テーブルを参照して、取得した使用期間に対応した第1又は第2の遅延時間の設定値(或いはその変更量)を読み取り、読み取った設定値を新たに第1又は第2の遅延時間に設定する(或いは読み取った変更量を第1又は第2の遅延時間の設定値に適用する)。

20

30

40

#### 【0062】

また、第1のミラー53、第2のミラー54及び第3のミラー55のうちの少なくとも1つを、光軸方向に沿って移動可能としてもよい。3つのミラーのうちの少なくとも1つを光軸方向に沿って移動可能とすることで、ミラー間の相対間隔が調整可能であり、第1の共振器C1の共振器長や第2の共振器C2の共振器長が変更可能である。第1の共振器C1の共振器長及び第2の共振器C2の共振器長の少なくとも一方を変更することで、波長800nmのパルスレーザ光のパルス幅及び波長755nmのパルスレーザ光のパルス幅の少なくとも一方を変更することができる。この仕組みにより、例えば、ミラーの反射率によるパルス幅の変化を補正することもできる。この場合、制御回路62は、第1の共

50

振器 C 1 の長さと遅延時間 D x の設定値（或いはその変更量）とが対応付けられた参照テーブル（第 3 の参照テーブル）及び / 又は第 2 の共振器 C 2 の長さと遅延時間 D y の設定値（或いはその変更量）とが対応付けられた参照テーブル（第 4 の参照テーブル）を持っているてもよいし、それらが関係付けられた関係式を持っていてもよい。制御回路 6 2 は、例えば、各ミラーの移動量から各共振器の長さを取得し、上記第 3 及び / 又は第 4 の参照テーブルを参照して、取得した共振器長に対応した第 1 又は第 2 の遅延時間の設定値（或いはその変更量）を読み取り、読み取った設定値を新たに第 1 又は第 2 の遅延時間に設定する（或いは読み取った変更量を第 1 又は第 2 の遅延時間の設定値に適用する）。

#### 【 0 0 6 3 】

以上のように、本実施形態に係るレーザ装置 1 は、第 1 の波長（800 nm）と第 1 の波長よりも発光効率が高い第 2 の波長（755 nm）とに発振波長を有する固体のレーザ媒質（レーザロッド 5 1）と、励起部（フラッシュランプ 5 2）と、第 1 の波長に対応した共振器であってレーザ媒質を内部の光路上に有する第 1 の共振器 C 1 と、第 2 の波長に対応した共振器であって、レーザ媒質が配置された光路を含む第 1 の共振器との共通光路を有する第 2 の共振器 C 2 と、少なくとも共通光路上に配置された Q 値変更部を含み、第 1 又は第 2 の波長の光を Q スイッチ発振させる Q 値変更ユニット（第 1 の Q 値変更部 5 6 及び第 2 の Q 値変更部 5 7）と、励起部及び Q 値変更ユニットを制御する制御部（制御回路 6 2）とを備える。そして、制御部は、発振波長が第 1 の波長である場合、レーザ媒質の励起が開始されてから第 1 の遅延時間経過時に Q 値変更ユニットを制御して第 1 の波長の光を Q スイッチ発振させ、発振波長が第 2 の波長である場合、レーザ媒質の励起が開始されてから、第 2 の波長の光の強度が可能最大強度未満となる第 2 の遅延時間経過時に、Q 値変更ユニットを制御して第 2 の波長の光を Q スイッチ発振させる。つまり、レーザ装置 1 には、第 1 の波長の光を発振させる際の遅延時間 D x と第 2 の波長の光を発振させる際の遅延時間 D y とが互いに独立して設定されている。これにより、発光効率が異なる 2 つの発振波長を有するレーザ媒質を使用するレーザ装置において、装置の部品点数を増加させることなくこれらの遅延時間の調整により、各波長の光の強度を独立して制御可能となる。

#### 【 0 0 6 4 】

また、本実施形態では、第 1 のミラー 5 3 と第 2 のミラー 5 4 とで波長 800 nm の光を発振する第 1 の共振器 C 1 を構成し、第 1 のミラー 5 3 と第 3 のミラー 5 5 とで波長 755 nm の光を発振する第 2 の共振器 C 2 を構成する。レーザロッド 5 1 は波長 800 nm と波長 755 nm とに発振波長を有し、波長 755 nm の発光効率は波長 800 nm の発光効率よりも高い。第 1 の共振器 C 1 と第 2 の共振器 C 2 とに共通の部分に第 1 の Q 値変更部 5 6 を配置し、第 2 のミラー 5 4 と第 3 のミラー 5 5 との間に第 2 の Q 値変更部 5 7 を配置する。第 1 の Q 値変更部 5 6 を駆動することで、第 1 の共振器 C 1 及び第 2 の共振器 C 2 の Q 値を制御することができる。また、第 2 の Q 値変更部 5 7 を駆動することで、第 2 の共振器 C 2 の Q 値のみを制御することができる。

#### 【 0 0 6 5 】

本実施形態では、利得が低い波長 800 nm 用の第 1 の共振器 C 1 には第 1 の Q スイッチ 5 8 が挿入される。一方で、利得が高い波長 755 nm 用の第 2 の共振器 C 2 には、第 1 の Q スイッチ 5 8 と第 2 の Q スイッチ 6 0 とが挿入される。特許文献 3 では、双方の波長の共振器にポッケルスセルが 2 つ挿入されており、特に利得が低い波長 800 nm において出力の低下が問題となつた。本実施形態では、第 1 の共振器 C 1 に挿入されるポッケルスセルは 1 つでよく、第 1 の共振器 C 1 内に光の偏光状態を変化させる素子を複数個配置する必要がないため、特にレーザ出力が低い波長 800 nm について、複数のポッケルスセルが挿入されることに伴うレーザ出力の低下を抑制することができる。

#### 【 0 0 6 6 】

また、本実施形態では、波長 800 nm の光及び波長 755 nm の光の光軸が平行となるよう、第 1 の共振器 C 1 と第 2 の共振器 C 2 とを一軸上に構成している。このようにすることで、ミラーや Q 値変更部の光学部材を波長 800 nm の光及び波長 755 nm の光

10

20

30

40

50

で共通に用いることができる。更に本実施形態では、第2のミラー54よりもレーザロッド51から見て遠い側に第3のミラー55が配置されており、第1の共振器C1の共振器長が第2の共振器C2の共振器長よりも短い。第1の共振器C1の共振器長を短くすることで、利得が低い波長800nmにおいてパルスレーザ光の短パルス化が可能である。

#### 【0067】

##### 「レーザ装置の第2の実施形態」

次に、レーザ装置の第2の実施形態について説明する。図10は、第2の実施形態に係るレーザ装置2の構成を示す概略図である。本実施形態に係るレーザ装置2は、透過波長が相互に異なる複数のバンドパスフィルタを含む波長選択部を共振器内に有し、この波長選択部によって発振する波長を選択する。

10

#### 【0068】

具体的には、レーザ装置2は、共振器を構成する2つのミラー70及び71、レーザロッド72、フラッシュランプ73、電源回路74、Qスイッチ75、制御回路76並びに波長選択部77を有する。レーザロッド72はレーザ媒質であり、レーザロッド72としては第1の実施形態と同様に例えばアレキサンドライト結晶を用いることができる。本実施形態においても、例えば、利得が低い第1の波長は800nmであり、利得が高い第2の波長は755nmである。フラッシュランプ73は、電源回路74が接続された励起光源であり、レーザロッド72に励起光を照射する。フラッシュランプ73以外の光源を励起光源として用いてもよい。

#### 【0069】

20

ミラー70及び71は、レーザロッド72を挟んで互いに対向しており、これらのミラーにより共振器が構成される。本実施形態では、この共振器が第1及び第2の波長の両方に対応する。例えばミラー70が出力側である。共振器内の光路上にはQスイッチ75及び波長選択部77が配置されている。Qスイッチ75により、共振器のQ値が変更される。Qスイッチとしては例えばポッケルスセルを使用することができる。

#### 【0070】

波長選択部77は、発振波長を第1の波長と第2の波長との間で切り替える際に使用される。波長選択部77は、透過波長が相互に異なる複数のバンドパスフィルタ(BPF: Band Pass Filter)78及びロングパスフィルタ78を回転駆動する駆動部79を含む。波長選択部77は、複数のバンドパスフィルタ78のうち特定のバンドパスフィルタを共振器の光路上に選択的に挿入する。波長選択部77は、例えば中心波長が755nmの光を透過させる第1のバンドパスフィルタと、中心波長が800nmの光を透過させる第2のバンドパスフィルタとを含む。第1及び第2のバンドパスフィルタは、例えば、0°から180°の角度範囲及び180°から360°の角度範囲に分けて配置された回転体で構成されており、回転変位に伴って透過する光が変化するように構成されている。これにより、上記回転体を回転させながら、共振器の光路上に第1のバンドパスフィルタを挿入することで発振波長を755nmとすることことができ、共振器の光路上に第2のバンドパスフィルタを挿入することで発振波長を800nmとすることができます。

30

#### 【0071】

駆動部79は、共振器の光路上に挿入されるバンドパスフィルタが順次切り替わるよう、回転体で構成された複数のバンドパスフィルタ78を回転駆動する。また、どのバンドパスフィルタが光路上にあるかという回転状態は、例えば図示しないロータリーエンコーダによって検出される。

40

#### 【0072】

制御回路76は、フラッシュランプ73の発光を制御するためのフラッシュランプトリガを送信し、フラッシュランプ73からレーザロッド72に励起光を照射させる。制御回路76は、BPFの状態をモニタリングし、その状態に基づいて、フラッシュランプトリガを送信する。例えば制御回路76は、BPFの状態が、出射すべき光の波長に対応したバンドパスフィルタが光路上に挿入される回転体の駆動位置から、レーザ媒質の励起からQスイッチ発振するまでの遅延時間の間に回転体が変位する量を差し引いた位置になると

50

フラッシュランプトリガを送信する。この遅延時間は、出射すべき光の波長ごとに設定される。例えば、波長 800 nm についての遅延時間は、光の強度が可能最大強度となるよう 10 に設定され、波長 755 nm についての遅延時間は、光の強度が可能最大強度未満となるよう に設定される。制御回路 76 は、フラッシュランプトリガの送信後、出射すべき光の波長ごとに設定された遅延時間の経過時に Qスイッチ 75 に Qスイッチトリガを送信する。Qスイッチ 75 が、Qスイッチトリガに応答して共振器を低Q状態から高Q状態に急激に変化させることで (Qスイッチがオンすることで) 出力側のミラー 70 から光が出力される。

#### 【0073】

以上のように、本実施形態に係るレーザ装置 2 は、第1の波長 (800 nm) と第1の波長よりも発光効率が高い第2の波長 (755 nm) とに発振波長を有する固体のレーザ媒質 (レーザロッド 72) と、励起部 (フラッシュランプ 73) と、第1の波長に対応した共振器であってレーザ媒質を内部の光路上に有する第1の共振器 (ミラー 70 及び 71) と、第2の波長に対応した共振器であって、レーザ媒質が配置された光路を含む第1の共振器との共通光路を有する第2の共振器 (ミラー 70 及び 71) と、少なくとも共通光路上に配置されたQ値変更部を含み、第1又は第2の波長の光をQスイッチ発振させるQ値変更ユニット (Qスイッチ 75) と、励起部及びQ値変更ユニットを制御する制御部 (制御回路 76) とを備える。そして、制御部は、発振波長が第1の波長である場合、レーザ媒質の励起が開始されてから第1の遅延時間経過時にQ値変更ユニットを制御して第1の波長の光をQスイッチ発振させ、発振波長が第2の波長である場合、レーザ媒質の励起が開始されてから、第2の波長の光の強度が可能最大強度未満となる第2の遅延時間経過時に、Q値変更ユニットを制御して第2の波長の光をQスイッチ発振させる。つまり、レーザ装置 2 には、第1の波長の光を発振させる際の遅延時間と第2の波長の光を発振させる際の遅延時間とが互いに独立して設定されている。これにより、発光効率が異なる2つの発振波長を有するレーザ媒質を使用するレーザ装置において、装置の部品点数を増加させることなくこれらの遅延時間の調整により、各波長の光の強度を独立して制御可能となる。

#### 【0074】

##### 「レーザ装置の第3の実施形態」

次に、レーザ装置の第3の実施形態について説明する。図11は、第3の実施形態に係るレーザ装置 3 の構成を示す概略図である。本実施形態に係るレーザ装置 3 は、分岐用偏光子と共振光路選択部とを用いて複数波長の発振を行う。

#### 【0075】

具体的には、レーザ装置 3 は、出力側ミラー 80、偏光子 81、第1の反射プリズム 82、第2の反射プリズム 83、レーザロッド 84、フラッシュランプ 85、2つのポッケルスセル 86 及び 87、1/4 波長板 88 及びトリガ制御部 89 を有する。

#### 【0076】

ミラー 80 と偏光子 81 の間には、レーザロッド 84 及びフラッシュランプ 85 が配置されている。レーザロッド 84 はレーザ媒質であり、レーザロッド 84 としては第1の実施形態と同様に例えばアレキサンドライト結晶を用いることができる。本実施形態においても、例えば、利得が低い第1の波長は 800 nm であり、利得が高い第2の波長は 755 nm である。フラッシュランプ 85 は、励起光源であり、制御回路 89 から送信されたフラッシュランプトリガに連動してレーザロッド 84 に励起光を照射する。フラッシュランプ 85 以外の光源を励起光源として用いてもよい。

#### 【0077】

レーザロッド 84 と偏光子 81 の間には、共振光路選択部を構成するポッケルスセル 87 が配置されている。ポッケルスセル 87 には、波長 800 nm を発振する際には入射した直線偏光の偏光方向を 90° 回転させる電圧が印加され、波長 755 nm を発振する際には電圧は印加されない。光路分岐部である偏光子 81 は、p 偏光を透過し s 偏光を反射する。偏光子 81 を透過した光は、第1の分岐光路 L2 を進み、第1の反射プリズム 82

10

20

30

40

50

で反射する。一方、偏光子 8 1 で反射した光は、第 2 の分岐光路 L 3 を進み、第 2 の反射プリズム 8 3 で反射する。

【 0 0 7 8 】

第 1 の反射プリズム 8 2 は、入射光に対してプリュースター角となるように配置される。第 1 の反射プリズム 8 2 は、波長 755 nm の光を選択的に反射する誘電体反射膜を有する。第 2 の反射プリズム 8 3 は、波長 800 nm の光を選択的に反射する誘電体反射膜を有する。ミラー 8 0 と第 2 の反射プリズム 8 3 とにより、波長 800 nm の共振器（第 1 の共振器）が構成される。また、ミラー 8 0 と第 1 の反射プリズム 8 2 とにより、波長 755 nm の共振器（第 2 の共振器）が構成される。これらの共振器は共通光路 L 1 を有する。

10

【 0 0 7 9 】

共通光路 L 1 上には、ポッケルスセル 8 6 及び 1/4 波長板 8 8 により構成される Q スイッチも配置されている。ポッケルスセル 8 6 の印加電圧は制御回路 8 9 によって制御される。フラッシュランプ 8 5 を点灯するとき、Q スイッチを構成するポッケルスセル 8 6 には電圧が印加されず、Q スイッチはオフしている。フラッシュランプ 8 5 の点灯後、所定の遅延時間の経過時に Q スイッチをオンにする。これにより、ポッケルスセル 8 7 の状態に応じて、第 1 の共振器又は第 2 の共振器でレーザ発振が起こり、ミラー 8 0 から光が出力する。上記遅延時間は、出射すべき光の波長ごとに設定される。例えば、波長 800 nm についての遅延時間は、光の強度が可能最大強度となるように設定され、波長 755 nm についての遅延時間は、光の強度が可能最大強度未満となるように設定される。

20

【 0 0 8 0 】

共振光路選択部を構成するポッケルスセル 8 7 に電圧が印加されてない場合、レーザロッド 8 4 から出射した p 偏光の光は、ポッケルスセル 8 7 を p 偏光のまま透過し、p 偏光を透過する偏光子 8 1 を透過して第 1 の分岐光路 L 2 を通り、第 1 の反射プリズム 8 2 で反射する。第 1 の反射プリズム 8 2 で反射した光は、偏光子 8 1 及びポッケルスセル 8 7 を p 偏光のまま逆向きに通り、レーザロッド 8 4 に入射して、レーザ発振が起こり、レーザ光 L 4 が出力される。第 1 の反射プリズム 8 2 が波長 755 nm の光を選択的に反射することで、波長 755 nm の光が発振する。

【 0 0 8 1 】

ポッケルスセル 8 7 に入射光の偏光方向を 90° 回転させる電圧が印加される場合、レーザロッド 8 4 から出射した p 偏光の光は、ポッケルスセル 8 7 を透過する際に偏光方向が 90° 回転して s 偏光となる。s 偏光となった光は、偏光子 8 1 で反射して第 2 の分岐光路 L 3 を通り、第 2 の反射プリズム 8 3 で反射する。第 2 の反射プリズム 8 3 で反射した光は、偏光子 8 1 を逆向きに通り、ポッケルスセル 8 7 に逆向きに入射する。ポッケルスセル 8 7 に s 偏光で入射した光は、ポッケルスセル 8 7 を通過する際に偏光方向が 90° 回転され、p 偏光となってレーザロッド 8 4 に入射して、レーザ発振が起こり、レーザ光 L 4 が出力される。第 2 の反射プリズム 8 3 が波長 800 nm の光を選択的に反射することで、波長 800 nm の光が発振する。

30

【 0 0 8 2 】

以上のように、本実施形態に係るレーザ装置 3 は、第 1 の波長（800 nm）と第 1 の波長よりも発光効率が高い第 2 の波長（755 nm）とに発振波長を有する固体のレーザ媒質（レーザロッド 8 4）と、励起部（フラッシュランプ 8 5）と、第 1 の波長に対応した共振器であってレーザ媒質を内部の光路上に有する第 1 の共振器（ミラー 8 0 及び反射プリズム 8 3）と、第 2 の波長に対応した共振器であって、レーザ媒質が配置された光路を含む第 1 の共振器との共通光路を有する第 2 の共振器（ミラー 8 0 及び反射プリズム 8 2）と、少なくとも共通光路上に配置された Q 値変更部を含み、第 1 又は第 2 の波長の光を Q スイッチ発振させる Q 値変更ユニット（Q スイッチ 8 6）と、励起部及び Q 値変更ユニットを制御する制御部（制御回路 8 9）とを備える。そして、制御部は、発振波長が第 1 の波長である場合、レーザ媒質の励起が開始されてから第 1 の遅延時間経過時に Q 値変更ユニットを制御して第 1 の波長の光を Q スイッチ発振させ、発振波長が第 2 の波長であ

40

50

る場合、レーザ媒質の励起が開始されてから、第2の波長の光の強度が可能最大強度未満となる第2の遅延時間経過時に、Q値変更ユニットを制御して第2の波長の光をQスイッチ発振させる。つまり、レーザ装置3には、第1の波長の光を発振させる際の遅延時間と第2の波長の光を発振させる際の遅延時間とが互いに独立して設定されている。これにより、発光効率が異なる2つの発振波長を有するレーザ媒質を使用するレーザ装置において、装置の部品点数を増加させることなくこれらの遅延時間の調整により、各波長の光の強度を独立して制御可能となる。

【0083】

なお、第2及び第3の実施形態においても、制御部が、励起エネルギー量や共振器長に応じて、第1の波長又は第2の波長の光の発振に関して設定する各遅延時間の設定値を自動で変更する構成を採用できる。

10

【0084】

「光音響計測装置の実施形態」

次に、光音響計測装置の実施形態について説明する。図12は、実施形態に係る光音響計測装置10の構成を示す概略図である。光音響計測装置10は、超音波探触子（プローブ）11と、超音波ユニット12と、本発明のレーザ装置を含むレーザ光源ユニット13とを備える。レーザ光源ユニット13は、被検体に照射されるパルスレーザ光を出射する。レーザ光源ユニット13は、第1の波長及び第2の波長を含む複数の波長のレーザ光を出射する。

【0085】

20

レーザ光源ユニット13は、例えば第1の実施形態に係るレーザ装置1及びレーザ装置1から出射したレーザ光を導光する導光手段（例えば光ファイバ等）を有する。レーザ光源ユニット13から出射したレーザ光は、導光手段を用いてプローブ11まで導光され、プローブ11から被検体に向けて照射される。レーザ光の照射位置は特に限定されず、プローブ11以外の場所からレーザ光の照射を行ってもよい。被検体内では、光吸収体が照射されたレーザ光のエネルギーを吸収することで超音波（光音響波）が生じる。プローブ11は、超音波検出器を含む。プローブ11は、例えば一次元的に配列された複数の超音波検出器素子（超音波振動子）を有し、その一次元配列された超音波振動子により、被検体内からの音響波（光音響信号）を検出する。

【0086】

30

超音波ユニット12は、受信回路21、AD変換手段22、受信メモリ23、複素数化手段24、光音響画像再構成手段25、位相情報抽出手段26、強度情報抽出手段27、検波・対数変換手段28、光音響画像構築手段29、トリガ制御回路30、及び制御手段31を有する。受信回路21は、プローブ11が検出した光音響信号を受信する。AD変換手段22は検出手段であり、受信回路21が受信した光音響信号をサンプリングし、デジタルデータである光音響データを生成する。AD変換手段22は、ADクロック信号に同期して、所定のサンプリング周期で光音響信号のサンプリングを行う。

【0087】

AD変換手段22は、光音響データを受信メモリ23に格納する。AD変換手段22は、レーザ光源ユニット13から出射されるパルスレーザ光の各波長に対応した光音響データを受信メモリ23に格納する。つまり、AD変換手段22は、被検体に第1の波長のパルスレーザ光が照射されたときにプローブ11で検出された光音響信号をサンプリングした第1の光音響データと、第2の波長のパルスレーザ光が照射されたときにプローブ11で検出された光音響信号をサンプリングした第2の光音響データとを、受信メモリ23に格納する。

40

【0088】

複素数化手段24は、受信メモリ23から第1の光音響データと第2の光音響データとを読み出し、何れか一方を実部、他方を虚部とした複素数データを生成する。以下では、複素数化手段24が、第1の光音響データを虚部とし、第2の光音響データを実部とした複素数データを生成するものとして説明する。

50

## 【0089】

光音響画像再構成手段25は、複素数化手段24から複素数データを入力する。光音響画像再構成手段25は、入力された複素数データから、フーリエ変換法(FTA法)により画像再構成を行う。フーリエ変換法による画像再構成には、例えば文献"Photoacoustic Image Reconstruction-A Quantitative Analysis" Jonathan I. Sperl et al. SPIE-OSA Vol. 6631 663103 等に記載されている従来公知の方法を適用することができる。光音響画像再構成手段25は、再構成画像を示すフーリエ変換のデータを位相情報抽出手段26と強度情報抽出手段27とに入力する。

## 【0090】

位相情報抽出手段26は、各波長に対応した光音響データ間の相対的な信号強度の大小関係を抽出する。本実施形態では、位相情報抽出手段26は、光音響画像再構成手段25で再構成された再構成画像を入力データとし、複素数データである入力データから、実部と虚部とを比較したときに、相対的に、どちらがどれくらい大きいかを示す位相情報を生成する。位相情報抽出手段26は、例えば複素数データが $X + iY$ で表わされるとき、 $= \tan^{-1}(Y/X)$ を位相情報として生成する。なお、 $X = 0$ の場合は $= 90^\circ$ とする。実部を構成する第2の光音響データ( $X$ )と虚部を構成する第1の光音響データ( $Y$ )とが等しいとき、位相情報は $= 45^\circ$ となる。位相情報は、相対的に第2の光音響データが大きいほど $= 0^\circ$ に近づいていき、第1の光音響データが大きいほど $= 90^\circ$ に近づいていく。

## 【0091】

強度情報抽出手段27は、各波長に対応した光音響データに基づいて信号強度を示す強度情報を生成する。本実施形態では、強度情報抽出手段27は、光音響画像再構成手段25で再構成された再構成画像を入力データとし、複素数データである入力データから、強度情報を生成する。強度情報抽出手段27は、例えば複素数データが $X + iY$ で表わされるとき、 $(X^2 + Y^2)^{1/2}$ を、強度情報として抽出する。検波・対数変換手段28は、強度情報抽出手段27で抽出された強度情報を示すデータの包絡線を生成し、次いでその包絡線を対数変換してダイナミックレンジを広げる。

## 【0092】

光音響画像構築手段29は、位相情報抽出手段26から位相情報を入力し、検波・対数変換手段28から検波・対数変換処理後の強度情報を入力する。光音響画像構築手段29は、入力された位相情報と強度情報に基づいて、光吸收体の分布画像である光音響画像を生成する。光音響画像構築手段29は、例えば入力された強度情報に基づいて、光吸收体の分布画像における各画素の輝度(階調値)を決定する。また、光音響画像構築手段29は、例えば位相情報に基づいて、光吸收体の分布画像における各画素の色(表示色)を決定する。光音響画像構築手段29は、例えば例えば位相 $0^\circ$ から $90^\circ$ の範囲を所定の色に対応させたカラーマップに用いて、入力された位相情報に基づいて各画素の色を決定する。

## 【0093】

ここで、位相 $0^\circ$ から $45^\circ$ の範囲は、第2の光音響データが第1の光音響データよりも大きい範囲であるため、光音響信号の発生源は、波長 $798\text{ nm}$ に対する吸収よりも波長 $755\text{ nm}$ に対する吸収の方が大きい脱酸素化ヘモグロビンを主に含む血液が流れている静脈であると考えられる。一方、位相 $45^\circ$ から $90^\circ$ の範囲は、第1の光音響データが第2の光音響データよりも大きい範囲であるため、光音響信号の発生源は、波長 $798\text{ nm}$ に対する吸収よりも波長 $755\text{ nm}$ に対する吸収の方が小さい酸素化ヘモグロビンを主に含む血液が流れている動脈であると考えられる。

## 【0094】

そこで、カラーマップとして、例えば位相が $0^\circ$ が青色で、位相が $45^\circ$ に近づくに連れて無色(白色)になるように色が徐々に変化すると共に、位相 $90^\circ$ が赤色で、位相が $45^\circ$ に近づくに連れて白色になるように色が徐々に変化するようなカラーマップを用いる。この場合、光音響画像上で、動脈に対応した部分を赤色で表わし、静脈に対応した部

10

20

30

40

50

分を青色で表わすことができる。強度情報を用いずに、階調値は一定として、位相情報に従って動脈に対応した部分と静脈に対応した部分との色分けを行うだけでもよい。画像表示手段14は、光音響画像構築手段29が生成した光音響画像を表示画面上に表示する。

#### 【0095】

制御手段31は、超音波ユニット12内の各部の制御を行う。トリガ制御回路30は、レーザ光源ユニット13に、フラッシュランプ52(図1を参照)の発光を制御するためのフラッシュランプトリガを出力する。レーザ光源ユニット13の制御回路62は、トリガ制御回路30からのフラッシュランプトリガを受けると、フラッシュランプトリガをフラッシュランプ52に送信してフラッシュランプ52を点灯し、フラッシュランプ52からレーザロッド51に励起光を照射させる。レーザ光源ユニット13の制御回路62は、10 フラッシュランプトリガの出力後、波長ごとに設定された遅延時間の経過時に第1のQ値変更部56又は第2のQ値変更部57にQスイッチトリガを出力する。制御回路62は、発振波長が800nmのときは第1の共振器のQ値を低Q状態から高Q状態に変化させる。発振波長が755nmのときは第1の共振器及び第2の共振器のQ値を低Q状態から高Q状態に変化させる。

#### 【0096】

トリガ制御回路30は、Qスイッチトリガのタイミング、すなわちパルスレーザ光の出射タイミングに合わせて、AD変換手段22にサンプリングトリガ(ADトリガ)を出力する。AD変換手段22は、サンプリングトリガにと基づいて光音響信号のサンプリングを開始する。20

#### 【0097】

次いで動作手順について説明する。図13は、光音響計測装置10の動作手順を示す。トリガ制御回路30は、光音響信号の受信準備が整うと、第1の波長(800nm)のパルスレーザ光を出射させるために、レーザ光源ユニット13にフラッシュランプトリガを出力する(ステップS1)。レーザ光源ユニット13の制御回路62は、フラッシュランプトリガを受け取る前に、第1のQスイッチ58に第1の電圧を印加し、第1の共振器C1及び第2の共振器C2を低Q状態にしている。制御回路62は、トリガ制御回路30からのフラッシュランプトリガに応答してフラッシュランプ52を点灯し、レーザロッド51を励起させる(ステップS2)。

#### 【0098】

制御回路62は、フラッシュランプトリガの出力後、波長ごとに設定された遅延時間の経過時にQスイッチトリガを第1のQ値変更部56又は第2のQ値変更部57に出力し、第1のQスイッチ58の印加電圧を第1の電圧から0Vに変化させる(ステップS3)。このとき制御回路62は、第2のQスイッチ60には0Vを印加しており、第1の共振器C1は高Q状態、第2の共振器C2は低Q状態に制御される。第1の共振器及び第2の共振器のうち、第1の共振器のみが高Q状態となることで、レーザ光源ユニット13は、波長800nmのパルスレーザ光を出射する。また、制御回路62は、Qスイッチトリガをトリガ制御回路30にも送信し、Qスイッチのタイミングを伝える。30

#### 【0099】

レーザ光源ユニット13から出射した波長800nmのパルスレーザ光は、例えはプローブ11まで導光され、プローブ11から被検体に照射される。被検体内では、光吸収体が照射されたパルスレーザ光のエネルギーを吸収することで、光音響信号が発生する。プローブ11は、被検体内で発生した光音響信号を検出する。プローブ11で検出された光音響信号は、受信回路21にて受信される。40

#### 【0100】

トリガ制御回路30は、Qスイッチのタイミングに合わせて、AD変換手段22にサンプリングトリガを出力する。AD変換手段22は、受信回路21で受信された光音響信号を、所定のサンプリング周期でサンプリングする(ステップS4)。AD変換手段22でサンプリングされた光音響信号は、受信メモリ23に第1の光音響データとして格納される。50

## 【0101】

トリガ制御回路30は、次の光音響信号の受信準備が整うと、第2の波長(755nm)のパルスレーザ光を出射させるために、レーザ光源ユニット13にフラッシュランプトリガを出力する(ステップS5)。制御回路62は、フラッシュランプトリガを受け取る前に、第1のQスイッチ58に第1の電圧を印加し、第1の共振器及び第2の共振器を低Q状態にしている。制御回路62は、トリガ制御回路30からのフラッシュランプトリガに応答してフラッシュランプ52を点灯し、レーザロッド51を励起させる(ステップS6)。

## 【0102】

制御回路62は、フラッシュランプトリガの出力後、波長ごとに設定された遅延時間の経過時にQスイッチトリガを第1のQ値変更部56又は第2のQ値変更部57に出力する。そして、制御回路62は、第1のQスイッチ58の印加電圧を第1の電圧から0Vに変化させ、第2のQスイッチ60への印加電圧を0Vから第4の電圧に変化させる(ステップS7)。このとき制御回路62は、第1のQスイッチ58と第2のQスイッチ60とで同時に印加電圧を変化させるか、又は、先に第2のQスイッチ60の印加電圧を変化させてから第1のQスイッチ58の印加電圧を変化させる。第1のQスイッチ58及び第2のQスイッチ60の印加電圧を変化させることで、第1の共振器C1及び第2の共振器C2は共に高Q状態となる。双方の共振器が高Q状態のときレーザ利得が高い波長755nmで発振し、レーザ光源ユニット13は、波長755nmのパルスレーザ光を出射する。

## 【0103】

レーザ光源ユニット13から出射した波長755nmのパルスレーザ光は、例えばプローブ11まで導光され、プローブ11から被検体に照射される。被検体内では、光吸収体が照射されたパルスレーザ光のエネルギーを吸収することで、光音響信号が発生する。プローブ11は、被検体内で発生した光音響信号を検出する。プローブ11で検出された光音響信号は、受信回路21にて受信される。

## 【0104】

トリガ制御回路30は、Qスイッチのタイミングに合わせて、AD変換手段22にサンプリングトリガを出力する。AD変換手段22は、受信回路21で受信された光音響信号を、所定のサンプリング周期でサンプリングする(ステップS88)。AD変換手段22でサンプリングされた光音響信号は、受信メモリ23に第2の光音響データとして格納される。

## 【0105】

第1及び第2の光音響データが受信メモリに格納されることで、1フレーム分の光音響画像の生成に必要なデータが揃う。なお、光音響画像を生成する範囲が複数の部分領域に分割されているような場合は、部分領域ごとに、ステップS1からS8までの処理を実行すればよい。

## 【0106】

複素数化手段24は、受信メモリ23から第1の光音響データと第2の光音響データとを読み出し、第1の光音響画像データを虚部とし、第2の光音響画像データを実部とした複素数データを生成する(ステップS9)。光音響画像再構成手段25は、ステップS9で複素数化された複素数データから、フーリエ変換法(FTA法)により画像再構成を行う(ステップS10)。

## 【0107】

位相情報抽出手段26は、再構成された複素数データ(再構成画像)から位相情報を抽出する(ステップS11)。位相情報抽出手段26は、例えば再構成された複素数データが $X + iY$ で表わされるとき、 $\theta = \tan^{-1}(Y/X)$ を位相情報として抽出する(ただし、 $X = 0$ の場合は $\theta = 90^\circ$ )。強度情報抽出手段27は、再構成された複素数データから強度情報を抽出する(ステップS12)。強度情報抽出手段27は、例えば再構成された複素数データが $X + iY$ で表わされるとき、 $(X^2 + Y^2)^{1/2}$ を強度情報として抽出する。

10

20

30

40

50

## 【0108】

検波・対数変換手段28は、ステップS12で抽出された強度情報に対して検波・対数変換処理を施す。光音響画像構築手段29は、ステップS11で抽出された位相情報と、ステップS12で抽出された強度情報に対して検波・対数変換処理を施したものに基づいて、光音響画像を生成する(ステップS13)。光音響画像構築手段29は、例えば強度情報に基づいて光吸収体の分布画像における各画素の輝度(階調値)を決定し、位相情報に基づいて各画素の色を決定することで、光音響画像を生成する。生成された光音響画像は、画像表示手段14に表示される。

## 【0109】

なお、上記では波長800nmの光と波長755nmの光とを交互に被検体に照射することとしているが、これには限定されない。波長800nmの発振の繰り返し周波数を、波長755nmの発振の繰り返し周波数よりも高くしてもよい。例えばレーザ光源ユニット13から波長755nmの光を出射した後、波長800nmの光を複数回続けて出射してもよい。この場合、波長800nmの光に対する光音響信号を複数回取得し、複数回の光音響信号に対して加算平均などの処理を行ってもよい。そのようにすることで、波長800nmの光音響画像の信号対雑音比を高めることができる。結果として、波長755nmの光に対する光音響信号とのコントラスト差を利用して得られる動脈/静脈の分離抽出の画質を向上でき、或いは酸素飽和度の演算精度を向上できる。

10

## 【0110】

以上のように、本実施形態に係る光音響計測装置10は、第1の実施形態に係るレーザ装置1を使用しているから、第1の実施形態と同様の効果を奏する。

20

## 【0111】

また、本実施形態では、2つの波長で得られた第1の光音響データと、第2の光音響データとの何れか一方を実部、他方を虚部とした複素数データを生成し、その複素数データからフーリエ変換法により再構成画像を生成している。このようにする場合、第1の光音響データと第2の光音響データとを別々に再構成する場合に比して、再構成を効率的に行うことができる。複数の波長のパルスレーザ光を照射し、各波長のパルスレーザ光を照射したときの光音響信号(光音響データ)を用いることで、各光吸収体の光吸収特性が波長に応じて異なることを利用した機能イメージングを行うことができる。

## 【0112】

30

なお、本実施形態に係る光音響計測装置10において、プローブ11から被検体に対して超音波を送信し、送信された音響波の反射波の信号に基づいて反射音響波画像を生成するように構成してもよい。光音響画像に加えて超音波画像を生成することにより、超音波画像を参照することで、光音響画像では画像化することができない部分を観察することができる。

## 【符号の説明】

## 【0113】

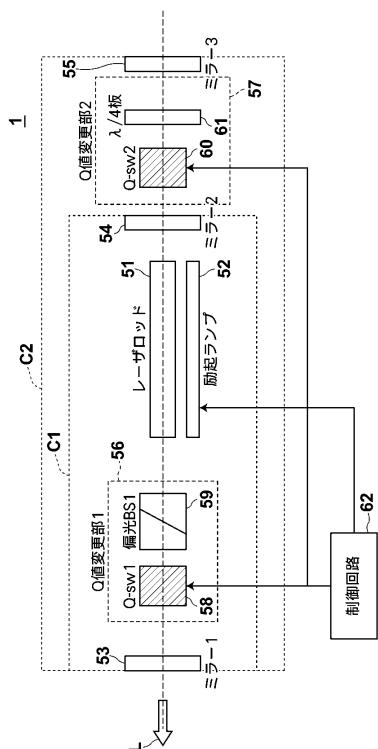
- 1、2、3 レーザ装置
- 10 光音響計測装置
- 11 プローブ
- 12 超音波ユニット
- 13 レーザ光源ユニット
- 14 画像表示手段
- 21 受信回路
- 22 変換手段
- 23 受信メモリ
- 24 複素数化手段
- 25 光音響画像再構成手段
- 26 位相情報抽出手段
- 27 強度情報抽出手段

40

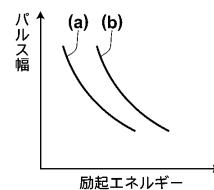
50

- 2 8 検波・対数変換手段  
 2 9 光音響画像構築手段  
 3 0 トリガ制御回路  
 3 1 制御手段  
 5 1 レーザロッド  
 5 2 フラッシュランプ  
 5 3、5 4、5 5 ミラー  
 5 6、5 7 Q値変更部  
 6 2 制御回路  
 C 1 共振器  
 C 2 共振器  
 L レーザ光 10

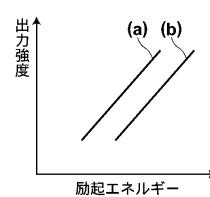
【図1】



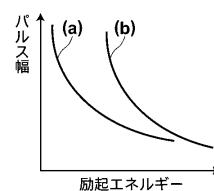
【図2】



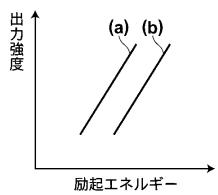
【図3】



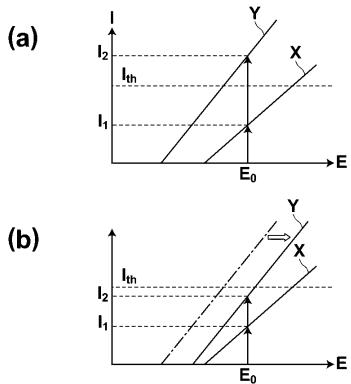
【図4】



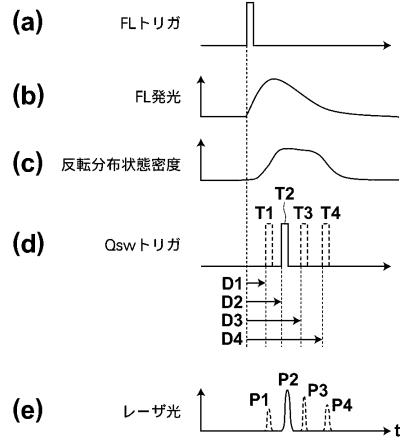
【図5】



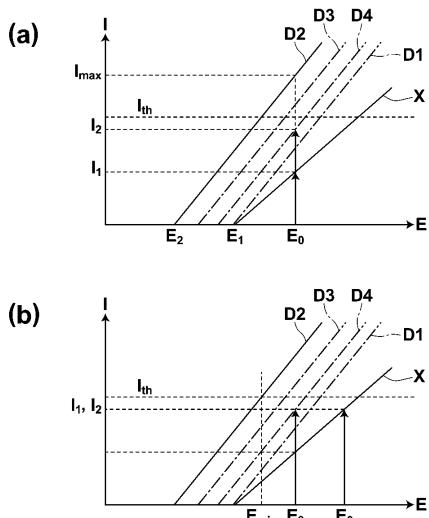
【図6】



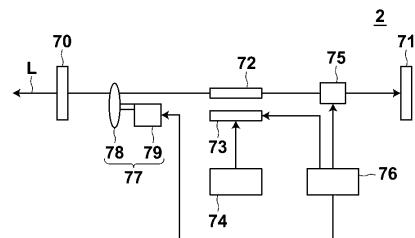
【図7】



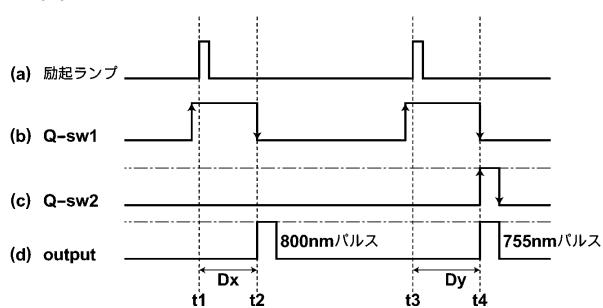
【図8】



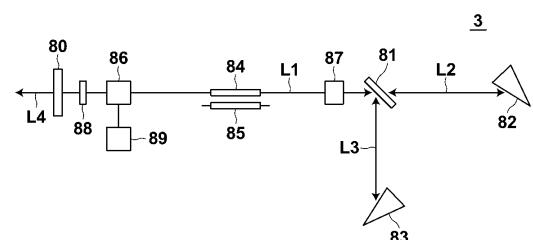
【図10】



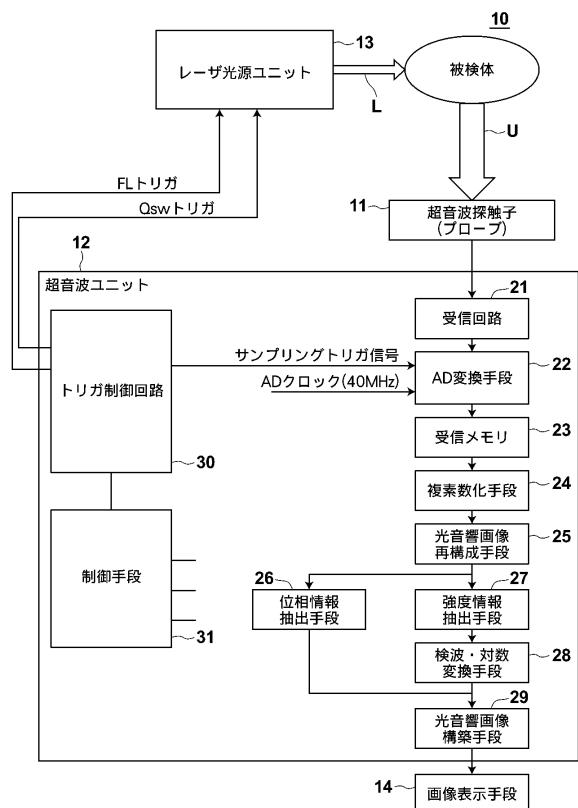
【図9】



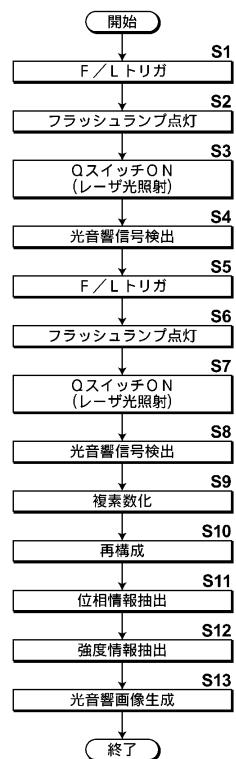
【図11】



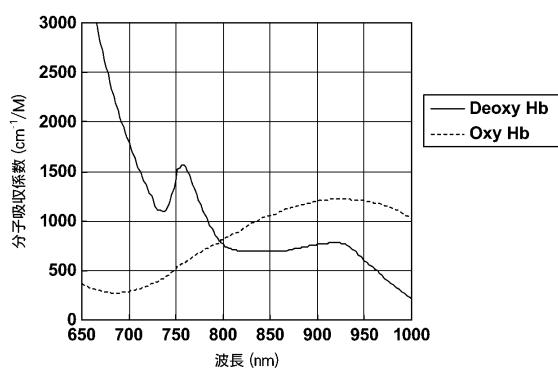
【図12】



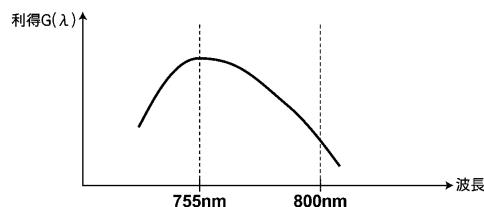
【図13】



【図14】



【図15】



---

フロントページの続き

(72)発明者 多田 拓司

神奈川県足柄上郡開成町宮台 798番地 富士フィルム株式会社内

審査官 小濱 健太

(56)参考文献 特開2013-214703 (JP, A)

特開2013-89680 (JP, A)

特開2005-158790 (JP, A)

特開2005-72131 (JP, A)

米国特許第6078606 (US, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 1/00 - 4/00