

(明治安田生命ビル) 9階 創英国際特
許法律事務所 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, JO, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
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))

second laser light L2. In the light source unit 10A, the wavelengths of the first laser light L1 and the second laser light L2 are set, or can be set, in advance so that the frequency of the burst pulses becomes 1 GHz or above. Thus, a laser device and a laser light generating method capable of generating burst pulses having a high repetitive frequency of 1 GHz or above can be provided.

(57) 要約: レーザ装置 1 A は、光源部 1 0 A 及び光合波部 2 1 を備える。光源部 1 0 A は、第 1 レーザ光 L 1 及び第 1 レーザ光 L 1 とは波長が異なる第 2 レーザ光 L 2 を、それぞれ異なる光路へ出力する。光合波部 2 1 は、光源部 1 0 A と光学的に結合され、第 1 レーザ光 L 1 と第 2 レーザ光 L 2 とを合波して、第 1 レーザ光 L 1 の波長と第 2 レーザ光 L 2 の波長との差に応じた周波数でもってバーストパルスが発生させる。光源部 1 0 A において、第 1 レーザ光 L 1 及び第 2 レーザ光 L 2 の各波長は、バーストパルスの周波数が 1 G H z 以上となるように予め設定されているか又は設定可能である。これにより、1 G H z 以上の高い繰り返し周波数を有するバーストパルスを生成することが可能なレーザ装置及びレーザ光生成方法が実現される。

明 細 書

発明の名称： レーザ装置及びレーザ光生成方法

技術分野

[0001] 本開示は、レーザ装置及びレーザ光生成方法に関するものである。

背景技術

[0002] 特許文献1には、微細加工用のプログラマブル超高速バーストモードレーザに関する技術が記載されている。この文献に記載されたレーザ装置は、バーストパルスレーザと、一つ又は複数の光増幅器とを備える。バーストパルスレーザは、選択的に整形されたバースト包絡線によって規定された三つ以上のレーザパルスからなるバーストを放出する。バーストパルスレーザは、バースト包絡線内の三つ以上のレーザパルス間の時間間隔と、バースト包絡線の時間幅とを選択的に調整するように構成されている。一つ又は複数の増幅器は、バースト包絡線の所望の形状を得るように三つ以上のレーザパルスからなる群を増幅する。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特表2012-515450号公報

非特許文献

[0004] 非特許文献1：Dong Mao et al., "Flexible high-repetition-rate ultrafast fiber laser", Scientific Reports 3, Art.3223, pp.1-5 (2013)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 従来より、例えばレーザ加工等の用途において、極めて短い（例えば数十～数百ピコ秒といった）時間幅にて強弱を繰り返すバーストパルスを用いることがある。このようなバーストパルスを生成する方式としては、例えば、連続光を出力するレーザ光源からのレーザ光を高速の光スイッチ等により周期的に切り取る方式、或いは、半導体レーザ素子に対して周期的なパルス電

流を供給する方式、などが考えられる。しかしながら、これらの方式では、光スイッチや電流供給回路の動作速度に限界があり、例えば1 GHz以上といった高い繰り返し周波数のバーストパルスを生成することは難しい。

[0006] 実施形態は、1 GHz以上の高い繰り返し周波数を有するバーストパルスを生成することが可能なレーザ装置及びレーザ光生成方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0007] 実施形態は、レーザ装置である。レーザ装置は、第1レーザ光及び第1レーザ光とは波長が異なる第2レーザ光を、それぞれ異なる光路へ出力する光源部と、光源部と光学的に結合され、第1レーザ光と第2レーザ光とを合波して、第1レーザ光の波長と第2レーザ光の波長との差に応じた周波数でもってバーストパルスを発生させる光合波部と、を備え、光源部において、第1レーザ光及び第2レーザ光の各波長は、バーストパルスの周波数が或る周波数（所望の周波数）となるように予め設定されているか又は設定可能であり、或る周波数は1 GHz以上である。

[0008] 実施形態は、レーザ光生成方法である。レーザ光生成方法は、第1レーザ光及び第1レーザ光とは波長が異なる第2レーザ光を、それぞれ異なる光路へ出力する第1ステップと、第1レーザ光と第2レーザ光とを合波して、第1レーザ光の波長と第2レーザ光の波長との差に応じた周波数でもってバーストパルスを発生させる第2ステップと、を含み、第1ステップにおいて、第1レーザ光及び第2レーザ光の各波長を、バーストパルスの周波数が1 GHz以上となるように設定する。

[0009] これらのレーザ装置及びレーザ光生成方法では、光源部から（第1ステップにおいて）出力された第1レーザ光及び第2レーザ光が、光合波部において（第2ステップにおいて）合波される。このとき、第1レーザ光と第2レーザ光とは互いに干渉する。その結果、第1レーザ光と第2レーザ光との波長差に応じた強弱の周期を有する干渉光が生成される。

[0010] 第1レーザ光及び第2レーザ光の波長が例えば近赤外域（700 nm～2

500 nm) といった波長域であっても、第1レーザ光の波長と第2レーザ光の波長との差を例えば数ピコメートル～数十ピコメートル程度とすれば、干渉光の強弱の周期を1ナノ秒以下とすることができる。そして、このような干渉光は、1 GHz以上の繰り返し周波数を有するバーストパルスと見なすことができる。すなわち、上記のレーザ装置及びレーザ光生成方法によれば、1 GHz以上の高い繰り返し周波数を有するバーストパルスを生成することが可能となる。

発明の効果

[0011] 実施形態のレーザ装置及びレーザ光生成方法によれば、1 GHz以上の高い繰り返し周波数を有するバーストパルスを生成することができる。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]図1は、一実施形態に係るレーザ装置1Aの構成を概略的に示す図である。

[図2]図2は、(a)，(b)半導体レーザ素子15の温度変化による出力波長の変化の一実施例を示すグラフである。

[図3]図3は、(a)～(c)合波前のレーザ光L1，L2と、合波後のレーザ光L3とを概念的に示す図である。

[図4]図4は、(a)～(c)レーザ光L1，L2の波形制御の一例を示す図である。

[図5]図5は、(a)，(b)合波後のレーザ光L3の他の例を示すグラフである。

[図6]図6は、一実施形態のレーザ光生成方法を示すフローチャートである。

[図7]図7は、(a)，(b)バーストパルス周波数を1 GHzとするために波長が調整された、レーザ光L1，L2のスペクトルの例を示すグラフである。

[図8]図8は、実施例において生成されたバーストパルスを示すグラフである。

[図9]図9は、(a)，(b)バーストパルス周波数を5 GHzとするために

波長が調整された、レーザ光L1、L2のスペクトルの例を示すグラフである。

[図10]図10は、実施例において生成されたバーストパルスを示すグラフである。

[図11]図11は、(a)、(b)バーストパルス周波数を10GHzとするために波長が調整された、レーザ光L1、L2のスペクトルの例を示すグラフである。

[図12]図12は、実施例において生成されたバーストパルスを示すグラフである。

[図13]図13は、バーストパルスを含むレーザ光L3のスペクトルを示すグラフである。

[図14]図14は、別の実施例におけるレーザ光L1の時間波形を示すグラフである。

[図15]図15は、別の実施例におけるレーザ光L2の時間波形を示すグラフである。

[図16]図16は、別の実施例において生成されたバーストパルスを示すグラフである。

[図17]図17は、別の実施例において生成されたバーストパルスを示すグラフである。

[図18]図18は、第1変形例として、レーザ装置1Bの構成を概略的に示す図である。

[図19]図19は、第2変形例として、光源17の構成を概略的に示す図である。

[図20]図20は、第3変形例として、光源18の構成を概略的に示す図である。

[図21]図21は、(a)、(b)第4変形例として、それぞれ光源19A及び19Bの構成を概略的に示す図である。

[図22]図22は、第5変形例として、光源部10Bの構成を概略的に示す図

である。

[図23]図23は、(a)，(b)第6変形例として、それぞれ光源20A及び20Bの構成を概略的に示す図である。

発明を実施するための形態

[0013] 以下、添付図面を参照しながら、レーザ装置及びレーザ光生成方法の実施の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

[0014] 図1は、一実施形態に係るレーザ装置1Aの構成を概略的に示す図である。レーザ装置1Aは、例えばレーザ加工等に用いられるバーストパルスを生成するための装置である。図1に示すように、レーザ装置1Aは、光源部10A、光合波部21、光検出器22、周波数計測部23、温度制御用コンピュータ24、光ファイバコネクタ25、及びコリメータレンズ26を備える。

[0015] 光源部10Aは、レーザ光L1（第1レーザ光）及びレーザ光L2（第2レーザ光）を出力する。具体的には、光源部10Aは、レーザ光源11，12を有する。レーザ光源11，12は、例えば半導体レーザ素子15を含んで構成される。半導体レーザ素子15は、例えば分布帰還型（Distributed Feedback：DFB）レーザである。DFBレーザは、半導体基板と、半導体基板上に積層された回折格子層および活性層を有する。回折格子層には、光共振方向に沿って周期構造が形成され、該周期構造の周期に応じて発振波長が定まる。このようなDFBレーザによれば、波長帯域が極めて狭いレーザ光を出力することができる。

[0016] 本実施形態の光源部10Aにおいて、レーザ光L1の波長とレーザ光L2の波長とは互いに異なる。波長の相違は、例えば、レーザ光源11，12における回折格子層の周期構造の周期が互いに異なることによって実現される。レーザ光L1の波長とレーザ光L2の波長との差は、例えば周波数差を5GHzとした場合、レーザ光L1，L2が近赤外光（波長700nm～2500nm）であっても、数ピコメートルから100ピコメートル程度といっ

た僅かなものである。

[0017] 光源部 10A は、レーザ光源 11 の半導体レーザ素子 15 を駆動する駆動回路 13 と、レーザ光源 12 の半導体レーザ素子 15 を駆動する駆動回路 14 とを更に有する。駆動回路 13, 14 は、それぞれレーザ光源 11, 12 の半導体レーザ素子 15 のアノード電極およびカソード電極と電氣的に接続されており、半導体レーザ素子 15 を駆動するための電流を出力する。これらの電流は、周期的に強弱を繰り返す強度変調が施されたものではなく、時間的に一定の大きさを有する。なお、半導体レーザ素子 15 の背面光をモニタし、その光強度に基づいて、駆動回路 13, 14 からの出力電流の大きさをフィードバック制御してもよい。

[0018] 本実施形態のレーザ光源 11, 12 は、波長可変レーザを構成する。そのために、レーザ光源 11, 12 は、上述した半導体レーザ素子 15 に加えて、温度制御部 16 を更に有する。温度制御部 16 は、半導体レーザ素子 15 を搭載するペルチェ素子によって構成され、光源部 10A の外部から与えられる電気信号に応じて、半導体レーザ素子 15 の温度を変更する。より好適には、半導体レーザ素子 15 の近傍に温度センサを設け、該温度センサからの信号に基づいて、温度制御部 16 への電気信号の大きさをフィードバック制御してもよい。

[0019] 温度制御部 16 によって半導体レーザ素子 15 の温度が変更されると、回折格子層の膨張または収縮によって周期構造の周期が変化し、その結果、半導体レーザ素子 15 の発振波長が変化し、出力波長が変更される。半導体レーザ素子 15 の温度は例えば 0.01℃単位で変更され、その場合、出力波長は 1 ピコメートル単位で変更可能である。

[0020] 図 2 (a) 及び (b) は、半導体レーザ素子 15 の温度変化による出力波長の変化の一実施例を示すグラフである。これらのグラフにおいて、縦軸は光強度（任意単位）を表し、横軸は波長（単位：ナノメートル）を表している。この実施例では、温度 25.0℃において、図 2 (a) に示すように中心波長が 1064.9 nm となり、また、温度 20.3℃において、図 2 (

b) に示すように中心波長が1064.2nmとなった。なお、光源部10Aの構成はこれに限らず、波長可変であれば如何なる構成を備えてもよい。

[0021] 光源部10Aは、レーザ光源11から出力されたレーザ光L1と、レーザ光源12から出力されたレーザ光L2とを、それぞれ異なる光路（光ファイバ31, 32）へ出力する。具体的には、レーザ光源11の半導体レーザ素子15には光ファイバ31の一端が光学的に結合されており、レーザ光源12の半導体レーザ素子15には光ファイバ32の一端が光学的に結合されている。光ファイバ31, 32の各他端は、光合波部21としての2入力2出力の光カプラの各入力端に接続されている。レーザ光L1, L2は、この光合波部21において互いに合波され、バーストパルスを含むレーザ光L3として、光カプラの一方の出力端から出力される。

[0022] 光合波部21は、レーザ光L1, L2を同軸上にて合波し、レーザ光L1の波長とレーザ光L2の波長との差に応じた周波数をもってバーストパルスを発生させる。ここで、図3(a)～(c)は、合波前のレーザ光L1, L2と、合波後のレーザ光L3とを概念的に示す図である。図3(a)は、合波前のレーザ光L1を光波として示し、図3(b)は、合波前のレーザ光L2を光波として示す。これらの図に示された波形の周期は、レーザ光L1, L2の波長を表す。

[0023] 図3(a), (b)に示すように、レーザ光L1, L2の波長は互いに異なる。これらのレーザ光L1, L2を合波すると、図3(c)に示すようにレーザ光L1, L2が重なり合い、互いに干渉し合う。ここで、レーザ光L1の光強度波形 $e_1(t)$ を下記の数式(1)として表すことができ、レーザ光L2の光強度波形 $e_2(t)$ を下記の数式(2)として表すことができる。なお、数式中において、Aは振幅、 f_1 はレーザ光L1の周波数、 f_2 はレーザ光L2の周波数、 ϕ_1 はレーザ光L1の位相、 ϕ_2 はレーザ光L2の位相である。

[数1]

$$e_1(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) \quad \dots (1)$$

[数2]

$$e_2(t) = A \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \quad \dots (2)$$

[0024] この場合、合波後のレーザ光L 3の光強度波形I (t)は、下記の数式(3)として表される。

[数3]

$$I(t) \propto A^2(1 + \cos\{2\pi(f_2 - f_1)t + (\phi_2 - \phi_1)\}) \quad \dots (3)$$

上記の数式(3)の右辺には、差周波数($f_2 - f_1$)に関する項が含まれている。この差周波数($f_2 - f_1$)が、レーザ光L 3に含まれるバーストパルスのビート周波数となる。従って、レーザ光L 1, L 2の周波数 f_1 , f_2 が近いほどバーストパルスのビート周波数は小さくなり、周波数 f_1 , f_2 が離れるほどバーストパルスのビート周波数は大きくなる。

[0025] 再び図1を参照する。光合波部2 1としての光カプラの一方の出力端は、光ファイバ3 3の一端と光学的に結合されている。光合波部2 1において生成されたレーザ光L 3は、光ファイバ3 3を伝搬する。光ファイバ3 3の他端には光ファイバコネクタ2 5が取り付けられている。光ファイバコネクタ2 5は、光ファイバ3 3を終端する。すなわち、光ファイバ3 3を通過した光は、光ファイバコネクタ2 5に達した後、空間に出力される。

[0026] コリメータレンズ2 6は、空間を介して光ファイバコネクタ2 5と光学的に結合されており、光ファイバコネクタ2 5から放射状に出力された光を平行化(コリメート)する。コリメータレンズ2 6を通過したレーザ光L 3は、レーザ装置1 Aの外部へ出力される。例えばレーザ装置1 Aがレーザ加工装置である場合、平行化されたレーザ光L 3は、加工対象物に照射される。なお、図1では、空間中を伝搬する光を破線で示している。

[0027] 光合波部2 1としての光カプラの他方の出力端は、光ファイバ3 4を介して光検出器2 2と光学的に結合されている。他方の出力端からはレーザ光L 3の一部である光L 3 1が出力され、光L 3 1が光検出器2 2に入力される。光カプラの一方の出力端から出力されるレーザ光L 3の光強度と、光L 3

1の光強度との比は例えば99:1である。光検出器22は、光L31の光強度に応じた電気信号S_{ig}を生成して出力する。光検出器22は、例えばフォトダイオードまたはバイプラナ光電管等によって構成され得る。

[0028] 光検出器22には配線41を介して周波数計測部23が電氣的に接続されており、周波数計測部23は、光検出器22から電気信号S_{ig}を入力して周波数の計測を行う。周波数計測部23は、例えばスペクトルアナライザによって構成され得る。周波数計測部23及びレーザ光源11, 12の温度制御部16には、配線42~44を介して温度制御用コンピュータ24が電氣的に接続されている。温度制御用コンピュータ24は、周波数計測部23により計測された周波数が所望の周波数に近づくように、レーザ光源11, 12の温度制御部16を制御して、差周波数($f_2 - f_1$)を調整する。

[0029] 温度制御用コンピュータ24は、例えば中央演算処理装置(CPU)、主記憶装置(RAM)及び補助記憶装置(ROMまたはハードディスク)を有するコンピュータによって構成され得る。補助記憶装置に温度制御用のプログラムが格納されており、該プログラムをCPUが読み出すことによって所定の温度制御処理が行われる。

[0030] 光源部10Aにおいて、レーザ光L1, L2の各波長(すなわち周波数 f_1 , f_2)は、バーストパルスの周波数が所望の或る周波数(所定周波数)となるように予め設定されているか、又は設定可能である。バーストパルスの周波数が予め設定されている場合、その周波数は温度制御用コンピュータ24の補助記憶装置に予め記憶され、バーストパルスの周波数が該周波数に近づくように温度制御用コンピュータ24が半導体レーザ素子15の温度を制御する。

[0031] また、バーストパルスの周波数が設定可能である場合、その周波数は作業者もしくは周波数設定用コンピュータによって温度制御用コンピュータ24に入力され、バーストパルスの周波数が該周波数に近づくように温度制御用コンピュータ24が半導体レーザ素子15の温度を制御する。したがって、例えばレーザ加工対象の状態によって動的にバーストパルスの周波数を変化

させることもできる。

[0032] 本実施形態において、予め設定された（或いは設定可能な）バーストパルス周波数は1 GHz以上である。1 GHz未満であれば、前述したように、連続光を出力するレーザ光源からのレーザ光を高速の光スイッチ等により周期的に切り取る方式、或いは、半導体レーザ素子に対して周期的なパルス電流を供給する方式などによって実現可能である。本実施形態のレーザ装置1Aは、それらの方式では実現し得ない1 GHz以上のバーストパルス周波数を実現するものである。

[0033] また、予め設定された（或いは設定可能な）バーストパルス周波数は、2000 GHz以下であってもよい。本実施形態のレーザ装置1Aは、極めて近い周波数のレーザ光L1、L2を合波することで、2000 GHz以下といった極めて小さい周波数での干渉光の生成を可能にし、これをバーストパルスとして使用するものである。或いは、予め設定された（或いは設定可能な）バーストパルス周波数は、1000 GHz以下であってもよく、若しくは100 GHz以下であってもよい。本実施形態のレーザ装置1Aによれば、原理的に、このような極めて小さい周波数のバーストパルスを生成可能である。

[0034] 下の表1は、レーザ光L1、L2の波長帯λを1064 nmとした場合、波長差Δλと、差周波数Δf = f₂ − f₁（すなわちバーストパルス周波数）との関係を示す表である。波長をλとすると、周波数fはf = c / λ（但しcは光速）として与えられる。そして、差周波数Δfと波長差Δλとの関係式は、次の数式（4）となる。

[表1]

波長差 Δλ (nm)	差周波数 Δf (GHz)
0.00377	1
0.01887	5
0.03774	10
0.37737	100
3.7737	1000

[数4]

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \cdot \Delta f \quad \cdot \cdot \cdot (4)$$

[0035] 駆動回路13, 14は、本実施形態における波形制御部を兼ねる。すなわち、駆動回路13, 14は、半導体レーザ素子15への供給電流の時間波形を制御することにより、レーザ光L1及びレーザ光L2の合波前の波形を、互いに同一の波形に制御する。そのために、レーザ装置1Aは、駆動回路13, 14の動作を統括して制御する制御部（不図示）を、波形制御部の一部として更に備えてもよい。この制御部は、CPU、RAM、及びROM（またはハードディスク）を有するコンピュータによって構成され得る。ROM（またはハードディスク）にレーザ駆動用のプログラムが格納されており、該プログラムをCPUが読み出すことによって所定のレーザ駆動処理が行われる。

[0036] 図4（a）～（c）は、レーザ光L1, L2の波形制御の一例を示す図である。これらの図において、縦軸は光強度（光パワー）を表し、横軸は時間を表す。レーザ光L1, L2は、例えば図4（a）及び（b）に示すように、急峻な立ち上がり及び立ち下がり、平坦な頂部とを有する矩形波として出力される。レーザ光L1, L2の立ち上がりタイミングは互いに一致（同期）し、立ち下がりタイミングもまた互いに一致（同期）する。また、レーザ光L1, L2のピーク強度Pkは互いに等しくてもよく、或いは互いに異なってもよい。これらのレーザ光L1, L2が合波されると、図4（c）に示すように、矩形波状の包絡線（エンベロープ）B1によって範囲が規定されたバーストパルスを含むレーザ光L3が生成される。

[0037] 図5（a）及び（b）は、合波後のレーザ光L3の他の例を示すグラフである。これらの図において、縦軸は光強度（光パワー）を表し、横軸は時間を表す。例えば図5（a）に示すように、レーザ光L3は、ガウス波状の包絡線B2によって範囲が規定されたバーストパルスを含んでもよい。或いは、図5（b）に示すように、レーザ光L3は、緩慢な立ち上がり及び急峻な

立ち下がりを含む三角波状の包絡線B 3によって範囲が規定されたバーストパルスを含んでもよい。例えばこれらの例のように、本実施形態のレーザ装置1 Aによれば、任意の包絡線を有するバーストパルスを容易に生成することができる。

[0038] 図6は、本実施形態のレーザ光生成方法を示すフローチャートである。このレーザ光生成方法は、例えば上述したレーザ装置1 Aを用いて実現可能である。まず、第1ステップS 1として、レーザ光L 1及びレーザ光L 1とは波長が異なるレーザ光L 2を、それぞれ異なる光路（光ファイバ3 1, 3 2）へ出力する。この第1ステップS 1は、例えば光源部1 0 Aにより行われる。

[0039] 次に、第2ステップS 2として、レーザ光L 1とレーザ光L 2とを合波して、レーザ光L 1の波長とレーザ光L 2の波長との差 $\Delta\lambda$ に応じた周波数 Δf でもって、バーストパルスを発生させる。この第2ステップS 2は、例えば光合波部2 1により行われる。そして、第1ステップS 1では、レーザ光L 1, L 2の各波長を、バーストパルスの周波数 Δf が1 GHz以上となるように設定する。

[0040] 以上に説明した本実施形態のレーザ装置1 A及びレーザ光生成方法によって得られる作用効果について説明する。本実施形態では、光源部1 0 Aから（第1ステップS 1において）出力されたレーザ光L 1, L 2が、光合波部2 1において（第2ステップS 2において）合波される。このとき、レーザ光L 1とレーザ光L 2とは互いに干渉する。その結果、レーザ光L 1とレーザ光L 2との波長差に応じた強弱の周期を有する干渉光が生成される。

[0041] レーザ光L 1, L 2の波長が例えば近赤外域（700 nm～2500 nm）といった波長域であっても、レーザ光L 1の波長とレーザ光L 2の波長との差を例えば数ピコメートル～数十ピコメートル程度とすれば、干渉光の強弱の周期を1ナノ秒以下とすることができる。そして、このような干渉光は、1 GHz以上の繰り返し周波数を有するバーストパルスと見なすことができる。すなわち、本実施形態のレーザ装置1 A及びレーザ光生成方法によれ

ば、 1 GHz 以上の高い繰り返し周波数を有するバーストパルスを生成することが可能となる。

[0042] 本実施形態のように、バーストパルス周波数の繰り返し周波数は、 2000 GHz 以下であってもよく、 1000 GHz 以下であってもよく、或いは、 100 GHz 以下であってもよい。光パルス列の繰り返し周波数が余りに大きいと、もはやバーストパルスではなく連続的な光と見なされるが、光パルス列の繰り返し周波数をこれらの程度に抑えることにより、例えばレーザ加工等に好適に用いられ得るバーストパルスを生成することができる。

[0043] 本実施形態のように、光源部10Aにおいて、レーザ光L1、L2の波長は可変であってもよい。この場合、フィードバック制御によってバーストパルスの繰り返し周波数 Δf を精度良く制御することができる。また、バーストパルスの繰り返し周波数 Δf を可変とすることもでき、レーザ加工等において照射条件を容易に変更することができる。なお、本実施形態ではレーザ光L1、L2の双方の波長が可変となっているが、レーザ光L1、L2のうち一方の波長のみ可変であっても、同様の効果を得ることができる。

[0044] 本実施形態のように、レーザ光源11、12は波長可変レーザであってもよい。これにより、レーザ光L1、L2の波長を可変とする構成を容易に実現することができる。なお、上述したようにレーザ光L1、L2のうち一方の波長のみ可変であってもよく、その場合、レーザ光源11、12のうち一方のみを波長可変レーザとするとよい。すなわち、レーザ光源11、12のうち一方のみに温度制御部16を設けるとよい。

[0045] 本実施形態のように、レーザ光源11、12は、DFBレーザである半導体レーザ素子15と、電気信号に応じて半導体レーザ素子15の温度を変更する温度制御部16とを有してもよい。例えばこのような構成により、波長を1ピコメートル単位で変更可能な波長可変レーザを簡易に実現することができる。

[0046] 本実施形態のように、レーザ装置1Aは、レーザ光L1、L2の合波前の波形を互いに同一の波形に制御する波形制御部（駆動回路13、14）を備

えてもよい。この場合、光合波部 21 から出力されるバーストパルスの包絡線の形状（図 4（c）、図 5（a）及び（b）を参照）を制御することができる。また、本実施形態のように光源部 10A が半導体レーザ素子 15 を含む場合、波形制御部（駆動回路 13, 14）は、半導体レーザ素子 15 への供給電流の時間波形を制御してもよい。これにより、波形を整形するための光学部品が不要となり、レーザ装置 1A の構成を簡易化することができる。

[0047] なお、非特許文献 1 には、モード同期ファイバ発振器の共振器内にマッハツェンダー干渉計（MZI）を組み込み、一方の共振器端に光路長を可変する素子を設けたバーストパルス発生装置が開示されている。光路差を調整することにより、MZI がスペクトルフィルタとして働き、モード同期発振のスペクトル分布（スペクトルのピークが等間隔で並んでいるもの）をフィルタし、パスしたモードの干渉によって高繰り返しパルスを発生させる。

[0048] しかしながら、このように干渉計の光路差を調整してスペクトル間隔を調整する方式では、光路差のわずかな変化によってスペクトル間隔が大きく変動してしまう。その結果、1100GHz を超える領域での精緻な調整は困難となる。一方、本実施形態の構成では、原理的に、1100GHz 以上のバーストパルス周波数であっても精度よく調整することができる。

[0049] また、例えば 1000GHz 以上のバーストパルス周波数をモード同期レーザにより実現しようとする、100 μ m 以下といった極めて短い共振器長が必要となるが、そのような微細な光共振器を実現するのは極めて困難である。また仮に実現できた場合であっても、共振方向における利得媒質の長さが極めて短くなるので、得られる光出力は極めて小さいものとなり、レーザ加工等の応用に適さない。一方、本実施形態の構成では、1000GHz 以上のバーストパルス周波数であっても実現が容易であり、且つ十分な大きさの光出力を得ることができる。

[0050] また、バーストパルスを発生する他の方式として、共振器内にグラフェン等の可飽和吸収素子を設ける方式があるが、共振器長を現実的な寸法で最小化し、さらにグラフェンをフィルム化して用いても、実現可能な繰り返し周

波数はせいぜい10～20GHzである。本実施形態の構成では、20GHzを超えるバーストパルス周波数であっても実現可能である。

[0051] (実施例)

[0052] ここで、上記実施形態の実施例について説明する。図7(a)及び(b)は、バーストパルス周波数を1GHzとするために波長が調整された、レーザ光L1、L2のスペクトルの例を示すグラフである。図7(a)は、レーザ光L1のスペクトルを示し、図7(b)は、レーザ光L2のスペクトルを示す。レーザ光L1の中心波長は1064.755nm(周波数 $f_1=281.755\text{THz}$)であり、レーザ光源11の半導体レーザ素子15の温度は23.37℃であった。また、レーザ光L2の中心波長は1064.751nm(周波数 $f_2=281.756\text{THz}$)であり、レーザ光源12の半導体レーザ素子15の温度は26.01℃であった。

[0053] 図8は、この例において生成されたバーストパルスを示すグラフである。図8において、縦軸は光強度を表し、横軸は時間を表す。このグラフにおいて、バーストパルス周波数 Δf は $f_1 - f_2 = 1\text{GHz}$ であり、パルス幅は500ピコ秒であった。レーザ光L1、L2の時間波形がガウス波状であったため、バーストパルスの包絡線は同様にガウス波状となっている。

[0054] 図9(a)及び(b)は、バーストパルス周波数を5GHzとするために波長が調整された、レーザ光L1、L2のスペクトルの例を示すグラフである。図9(a)は、レーザ光L1のスペクトルを示し、図9(b)は、レーザ光L2のスペクトルを示す。レーザ光L1の中心波長は1064.770nm(周波数 $f_1=281.751\text{THz}$)であり、レーザ光源11の半導体レーザ素子15の温度は23.57℃であった。また、レーザ光L2の中心波長は1064.751nm(周波数 $f_2=281.756\text{THz}$)であり、レーザ光源12の半導体レーザ素子15の温度は26.01℃であった。

[0055] 図10は、この例において生成されたバーストパルスを示すグラフである。図10において、縦軸は光強度を表し、横軸は時間を表す。このグラフにおいて、バーストパルス周波数 Δf は $f_1 - f_2 = 5\text{GHz}$ であり、パルス幅は

100ピコ秒であった。

[0056] 図11(a)及び(b)は、バーストパルス周波数を10GHzとするために波長が調整された、レーザ光L1、L2のスペクトルの例を示すグラフである。図11(a)は、レーザ光L1のスペクトルを示し、図11(b)は、レーザ光L2のスペクトルを示す。レーザ光L1の中心波長は1064.789nm(周波数 $f_1=281.746\text{THz}$)であり、レーザ光源11の半導体レーザ素子15の温度は23.83℃であった。また、レーザ光L2の中心波長は1064.751nm(周波数 $f_2=281.756\text{THz}$)であり、レーザ光源12の半導体レーザ素子15の温度は26.01℃であった。

[0057] 図12は、この例において生成されたバーストパルスを示すグラフである。図12において、縦軸は光強度を表し、横軸は時間を表す。このグラフにおいて、バーストパルス周波数 Δf は $f_1 - f_2 = 10\text{GHz}$ であり、パルス幅は50ピコ秒であった。図13は、このバーストパルスを含むレーザ光L3のスペクトルを示すグラフである。

[0058] 図14及び図15は、別の実施例におけるレーザ光L1、L2の時間波形を示すグラフである。図14は、レーザ光L1の時間波形を示し、図15は、レーザ光L2の時間波形を示す。この例では、レーザ光L1、L2は平坦な頂部を有する矩形波状の時間波形を有し、その時間幅はそれぞれ20ナノ秒であった。

[0059] 図16及び図17は、この例において生成されたバーストパルスを示すグラフである。図16は、差周波数 Δf を5GHzとした場合のバーストパルスを示し、図17は、差周波数 Δf を10GHzとした場合のバーストパルスを示す。図16、図17に示すように、この例では、バーストパルスの包絡線の形状が、レーザ光L1、L2の時間波形に応じて矩形波状となった。

[0060] (第1変形例)

[0061] 図18は、上記実施形態の第1変形例として、レーザ装置1Bの構成を概略的に示す図である。レーザ装置1Bは、上記実施形態のレーザ装置1Aの

構成に加えて、光アイソレータ 5 1, 5 2, 5 3, 及び 5 4 と、光ファイバ増幅器 6 1 と、固体レーザ増幅器 6 2 及び 6 3 と、バンドパスフィルタ 7 1 とを備える。

[0062] 光ファイバ増幅器 6 1 は、例えば E r、Y b などの不純物を添加したガラスからなる光ファイバを有し、レーザ光 L 3 とともに励起光が該光ファイバに入力されることによってレーザ光 L 3 を増幅する。光ファイバ増幅器 6 1 の光入力端と光合波部 2 1 とは、光ファイバを介して光学的に結合されている。光ファイバ増幅器 6 1 と光合波部 2 1 との間には、光アイソレータ 5 1 が介在している。光アイソレータ 5 1 は、光ファイバ増幅器 6 1 から光合波部 2 1 へ光（レーザ光 L 3 及び励起光）が戻ることを防ぐ。これにより、レーザ光源 1 1, 1 2 の半導体レーザ素子 1 5 の損傷を防止できる。

[0063] 光ファイバ増幅器 6 1 の光出力端とバンドパスフィルタ 7 1 とは、光ファイバを介して光学的に結合されている。光ファイバ増幅器 6 1 とバンドパスフィルタ 7 1 との間には、光アイソレータ 5 2 が介在している。光アイソレータ 5 2 は、バンドパスフィルタ 7 1 より後段の光が光ファイバ増幅器 6 1 に戻ることを防ぐ。

[0064] 光ファイバ増幅器 6 1 は、第 1 段の光増幅器であって、光合波部 2 1 から出力されたレーザ光 L 3 を増幅する。光ファイバ増幅器 6 1 の利得は、例えば 2 0 ～ 3 0 d B の範囲内である。バンドパスフィルタ 7 1 は、光ファイバ増幅器 6 1 から出力された光に含まれる、蛍光の波長成分を遮断する。バンドパスフィルタ 7 1 は、例えば誘電体多層膜によって構成され得る。

[0065] バンドパスフィルタ 7 1 は、光ファイバを介して光ファイバコネクタ 2 5 と光学的に結合されている。バンドパスフィルタ 7 1 を通過した光は、光ファイバを伝搬して光ファイバコネクタ 2 5 に達した後、空間に出力される。

[0066] コリメータレンズ 2 6 は、空間を介して光ファイバコネクタ 2 5 と光学的に結合されており、光ファイバコネクタ 2 5 から放射状に出力された光を平行化する。後述する固体レーザ増幅器 6 2 及び 6 3 によって増幅された光の強度は大きいので、ガラス等の光学材料のレーザによる損傷を回避するため

、このように光ファイバコネクタ 25 より後段においては光ファイバではなく空間中を伝搬させる。

[0067] 固体レーザ増幅器 62, 63 は、例えば Nd などの不純物を添加した、ガラス若しくはイットリウム・アルミニウム・ガーネット (YAG) によって構成され得る。固体レーザ増幅器 62, 63 は、レーザ光 L3 とともに励起光が入力されることによってレーザ光 L3 を増幅する。

[0068] 固体レーザ増幅器 62 は、光アイソレータ 53 を介してコリメータレンズ 26 と光学的に結合されている。光アイソレータ 53 は、固体レーザ増幅器 62 の光が固体レーザ増幅器 62 より前段に戻ることを防ぐ。これにより、光ファイバ増幅器 61 の損傷を防止できる。固体レーザ増幅器 62 は、第 2 段の光増幅器であって、光ファイバ増幅器 61 から出力された増幅後のレーザ光 L3 を更に増幅する。固体レーザ増幅器 62 の利得は、例えば 3 ~ 20 dB の範囲内である。

[0069] 固体レーザ増幅器 63 は、光アイソレータ 54 を介して固体レーザ増幅器 62 と光学的に結合されている。すなわち、光ファイバ増幅器 61、固体レーザ増幅器 62 及び 63 は、互いに直列に結合されている。光アイソレータ 54 は、固体レーザ増幅器 63 の光が固体レーザ増幅器 63 より前段に戻ることを防ぐ。これにより、固体レーザ増幅器 62 の損傷を防止できる。固体レーザ増幅器 63 は、第 3 段の光増幅器であって、固体レーザ増幅器 62 から出力された増幅後のレーザ光 L3 を更に増幅する。固体レーザ増幅器 63 の利得は、例えば 3 ~ 10 dB の範囲内である。固体レーザ増幅器 63 によって増幅されたレーザ光 L3 は、レーザ装置 1B の外部へ出力される。

[0070] 本変形例のレーザ装置 1B は、上記実施形態のレーザ装置 1A の構成を全て備える。従って、上記実施形態と同様の作用効果を奏することができる。また、本変形例のレーザ装置 1B は、上記実施形態のレーザ装置 1A の構成に加えて光ファイバ増幅器 61、固体レーザ増幅器 62 及び 63 を備えるので、大パワーのレーザ光 L3 を出力することができる。

[0071] (第 2 変形例)

[0072] 図19は、上記実施形態の第2変形例として、光源17の構成を概略的に示す図である。上記実施形態のレーザ装置1Aまたは第1変形例のレーザ装置1Bにおいて、光源部10Aのレーザ光源11、12の一方又は双方は、本変形例の光源17に置き換えられてもよい。

[0073] 光源17は、注入同期型のQスイッチレーザとしての構成を備える。具体的には、光源17は、種光源としてのレーザ光源171と、アイソレータ172と、偏光子173と、Qスイッチとしての電気光学素子174と、利得媒質175と、全反射ミラー176a及び176bと、部分透過ミラー177と、1/4波長板178とを有する。レーザ光源171は、波長可変レーザであり、上記実施形態のレーザ光源11、12と同様の構成を有する。すなわち、温度制御部171a（例えばペルチェ素子）と、温度制御部171a上に搭載された半導体レーザ素子171bとを含んで構成されている。

[0074] 全反射ミラー176bと部分透過ミラー177とは光共振器を構成している。全反射ミラー176bと部分透過ミラー177との光路上には電気光学素子174、1/4波長板178および利得媒質175が配置され、更に、該光路上には偏光子173が配置されている。偏光子173は、全反射ミラー176a及びアイソレータ172を介して、レーザ光源171の半導体レーザ素子171bと光学的に結合されている。電気光学素子174は、電圧を加えると屈折率が変化する結晶であり、例えばBBO（ベータバリウムボライト）結晶やDKDP（重水素リン酸カリウム）結晶等である。

[0075] レーザ光源171から或る波長の光L4が出力されると、光L4はアイソレータ172及び全反射ミラー176aを介して光共振器内に達する。アイソレータ172は、光共振器において生成されたレーザ光が半導体レーザ素子171bに戻ることを防ぐ。これにより、半導体レーザ素子171bの損傷を防止できる。偏光子173にて偏光された光L4は、電圧が加えられていない状態の電気光学素子174を通過した後、1/4波長板178と全反射ミラー176bを介して往復する。これにより、光L4の偏光方向が90度回転し、光L4は偏光子173を通過して利得媒質175に達する。

[0076] 部分透過ミラー 177 において反射した一部の光は再び 1/4 波長板 178 を往復し、これにより偏光方向が再び 90 度回転し、偏光子 173 を再通過できなくなる。したがって、レーザ共振器が構成されないためレーザ発振は起きない。このような Q 値が低い状態で半導体レーザやランプ等の光励起により反転分布をさせ、エネルギーが十分に蓄えられたときに電気光学素子 174 に電圧を加えると、1/4 波長板 178 との組み合わせにより偏光子 173 を常に透過するようになり、レーザ共振器が構成され Q 値が急増してパルス出力が得られる。

[0077] 本変形例のように、レーザ光源 11, 12 のうち少なくとも一方は Q スイッチレーザであってもよい。そして、この場合、Q スイッチレーザの種光源（光源 171）は波長可変レーザであってもよい。これにより、レーザ光 L1, L2 のうち少なくとも一方の波長を可変とする構成を容易に実現することができる。

[0078] （第 3 変形例）

[0079] 図 20 は、上記実施形態の第 3 変形例として、光源 18 の構成を概略的に示す図である。上記実施形態のレーザ装置 1A または第 1 変形例のレーザ装置 1B において、光源部 10A のレーザ光源 11, 12 の一方又は双方は、本変形例の光源 18 に置き換えられてもよい。

[0080] 光源 18 は、レーザ共振器としての半導体レーザ素子 181 と、体積回折格子（Volume Bragg Grating: VBG）182 とを有する。VBG 182 は、半導体レーザ素子 181 の光出力端と光学的に結合され、レーザ共振器における一方の共振器端を構成する光反射部である。

[0081] VBG 182 の波長—光反射特性は光入射角に応じて可変であり、半導体レーザ素子 181 からの出射光の光軸に対する VBG 182 の角度を変化させると、半導体レーザ素子 181 に戻る波長が変化する。このような性質を利用して、発振させたい波長の光のみが半導体レーザ素子 181 に戻るように VBG 182 の角度を調整することにより、所望の波長のレーザ光 L5 を出力することができる。本変形例によれば、波長可変レーザを簡易に実現す

ることができる。

[0082] (第4変形例)

[0083] 図21(a)及び(b)は、上記実施形態の第4変形例として、それぞれ光源19A及び19Bの構成を概略的に示す図である。上記実施形態のレーザ装置1Aまたは第1変形例のレーザ装置1Bにおいて、光源部10Aのレーザ光源11, 12の一方又は双方は、本変形例の光源19Aまたは19Bに置き換えられてもよい。

[0084] 図21(a)に示す光源19Aは、リトロウ(Littrow)型配置と呼ばれる。光源19Aは、レーザ共振器としての半導体レーザ素子191と、回折格子192とを有する。回折格子192は、集光レンズ193を介して半導体レーザ素子191の背面191bと光学的に結合され、レーザ共振器における一方の共振器端を構成する光反射部である。

[0085] 回折格子192の波長—光反射特性は光入射角に応じて可変であり、半導体レーザ素子191からの背面光の光軸に対する回折格子192の角度を変化させると、半導体レーザ素子191に戻る波長が変化する。このような性質を利用して、発振させたい波長の光のみが半導体レーザ素子191に戻るよう回折格子192の角度を調整することにより、所望の波長のレーザ光L6を共振端面191aから出力することができる。

[0086] 図21(b)に示す光源19Bは、リットマン—メツカル(Littman-Metcalf)型配置と呼ばれる。光源19Bは、上述した光源19Aの構成に加えて、ミラー194を更に有する。ミラー194は、回折格子192と対向して配置され、回折格子192からの回折光を反射する。この場合、半導体レーザ素子191の共振端面191aの光反射率は90%以上とされ、ミラー194の角度を変化させることにより、所望の波長のレーザ光L6が共振端面191aではなく回折格子192から取り出される。

[0087] 上記のように、本変形例の光源19Aまたは19Bのような構成であっても、波長可変レーザを簡易に実現することができる。

[0088] (第5変形例)

[0089] 図22は、上記実施形態の第5変形例として、光源部10Bの構成を概略的に示す図である。上記実施形態のレーザ装置1Aまたは第1変形例のレーザ装置1Bにおいて、光源部10Aは、本変形例の光源部10Bに置き換えられてもよい。

[0090] 図22に示すように、光源部10Bは、モード同期レーザ光源102と、第1バンドパスフィルタ103と、第2バンドパスフィルタ104とを有する。第1バンドパスフィルタ103は、モード同期レーザ光源102と光学的に結合され、モード同期レーザ光源102から出力されるレーザ光L7からレーザ光L1の波長に相当する成分を取り出す。第2バンドパスフィルタ104は、モード同期レーザ光源102と光学的に結合され、モード同期レーザ光源102から出力されるレーザ光L7からレーザ光L2の波長に相当する成分を取り出す。本変形例によれば、互いに波長が異なるレーザ光L1, L2を生成するためのレーザ光源を共通にできるので、光源部を簡易に構成することができる。

[0091] (第6変形例)

[0092] 図23(a)及び(b)は、上記実施形態の第6変形例として、それぞれ光源20A及び20Bの構成を概略的に示す図である。上記実施形態のレーザ装置1Aまたは第1変形例のレーザ装置1Bにおいて、光源部10Aのレーザ光源11, 12の一方又は双方は、本変形例の光源20Aまたは20Bに置き換えられてもよい。

[0093] 図23(a)に示す光源20Aは、固体レーザ発振器112と、波形整形部113とを有する。固体レーザ発振器112は、一対の共振端面114, 115と、該一対の共振端面114, 115の間の光路上に配置された利得媒質116とを含む。

[0094] 一方の共振端面115は、出力結合ミラーであり、波長に応じて透過率が変化する波長一透過特性を有する。この共振端面115の透過波長を可変とすることによって、固体レーザ発振器112からの出力波長を可変にできる。波形整形部113は、共振端面115と光学的に結合されている。固体レ

ーザ発振器 112 から出力されたレーザ光 L8 の時間波形は、波形整形部 113 によって所望の形（矩形波状、ガウス波状など）に整形される。

[0095] 図 23 (b) に示す光源 20B は、ファイバレーザ発振器 117 と、波形整形部 113 とを有する。ファイバレーザ発振器 117 は、一対のファイバブラッググレーティング (FBG) 118, 119 と、該一対の FBG 118, 119 の間に接続された利得媒質を含む光ファイバ 120 とを含む。

[0096] 一方の FBG 119 は、波長に応じて透過率が変化する波長—透過特性を有する。この FBG 119 の透過波長を可変とすることによって、ファイバレーザ発振器 117 からの出力波長を可変にできる。波形整形部 113 は、FBG 119 と光学的に結合されている。ファイバレーザ発振器 117 から出力されたレーザ光 L9 の時間波形は、波形整形部 113 によって所望の形（矩形波状、ガウス波状など）に整形される。

[0097] レーザ装置及びレーザ光生成方法は、上述した実施形態及び構成例に限られるものではなく、他に様々な変形が可能である。

[0098] 例えば、光源部において第 1 レーザ光及び第 2 レーザ光の各波長を可変とするための構成は、上記実施形態および各変形例に限られず、他の様々な方式を適用することができる。また、上記実施形態では、駆動回路 13, 14 がレーザ光 L1, L2 の合波前の波形を互いに同一の波形に制御しているが、この方式に代えて、或いはこの方式とともに、合波後のレーザ光 L3 の波形を、音響光学変調素子や電気光変調素子などの光スイッチによって制御してもよい。

[0099] 上記実施形態によるレーザ装置は、第 1 レーザ光及び第 1 レーザ光とは波長が異なる第 2 レーザ光を、それぞれ異なる光路へ出力する光源部と、光源部と光学的に結合され、第 1 レーザ光と第 2 レーザ光とを合波して、第 1 レーザ光の波長と第 2 レーザ光の波長との差に応じた周波数でもってバーストパルスが発生させる光合波部と、を備え、光源部において、第 1 レーザ光及び第 2 レーザ光の各波長は、バーストパルスの周波数が或る周波数（所望の周波数）となるように予め設定されているか又は設定可能であり、或る周波

数は1 GHz以上である構成としている。

[0100] 上記実施形態によるレーザ光生成方法は、第1レーザ光及び第1レーザ光とは波長が異なる第2レーザ光を、それぞれ異なる光路へ出力する第1ステップと、第1レーザ光と第2レーザ光とを合波して、第1レーザ光の波長と第2レーザ光の波長との差に応じた周波数でもってバーストパルスが発生させる第2ステップと、を含み、第1ステップにおいて、第1レーザ光及び第2レーザ光の各波長を、バーストパルスの周波数が1 GHz以上となるように設定する構成としている。

[0101] 上記のレーザ装置において、或る周波数（所望の周波数）は、2000 GHz以下である構成としても良い。また、上記のレーザ装置において、或る周波数は、1000 GHz以下である構成としても良く、或いは、100 GHz以下である構成としても良い。

[0102] 光パルス列の繰り返し周波数が余りに大きいと、もはやバーストパルスではなく連続的な光と見なされるが、光パルス列の繰り返し周波数をこれらの程度に抑えることにより、例えばレーザ加工等に好適に用いられ得るバーストパルスを生成することができる。

[0103] 上記のレーザ装置では、光源部において、第1レーザ光及び第2レーザ光のうち少なくとも一方の波長が可変である構成としても良い。この場合、フィードバック制御によってバーストパルスの繰り返し周波数を精度良く制御することができる。また、バーストパルスの繰り返し周波数を可変とすることができ、レーザ加工等において照射条件を容易に変更することができる。

[0104] 上記のレーザ装置では、第1レーザ光を発生するレーザ光源、及び第2レーザ光を発生するレーザ光源のうち少なくとも一方が波長可変レーザである構成としても良い。また、上記のレーザ装置では、第1レーザ光を発生するレーザ光源、及び第2レーザ光を発生するレーザ光源のうち少なくとも一方がQスイッチレーザであり、Qスイッチレーザの種光源が波長可変レーザである構成としても良い。これらの構成では、第1レーザ光及び第2レーザ光のうち少なくとも一方の波長を可変とする構成を容易に実現することができる。

る。

[0105] 上記のレーザ装置において、波長可変レーザは、分布帰還型の半導体レーザ素子と、電気信号に応じて半導体レーザ素子の温度を変更する温度制御部と、を有する構成としても良い。また、上記のレーザ装置において、波長可変レーザは、レーザ共振器と、レーザ共振器における一方の共振器端を構成し、波長—光反射特性が可変である光反射部と、を有する構成としても良い。これらの構成によれば、波長可変レーザを簡易に実現することができる。

[0106] 上記のレーザ装置において、光源部は、モード同期レーザ光源と、モード同期レーザ光源と光学的に結合され、モード同期レーザ光源から出力されるレーザ光から第1レーザ光の波長に相当する成分を取り出す第1バンドパスフィルタと、モード同期レーザ光源と光学的に結合され、モード同期レーザ光源から出力されるレーザ光から第2レーザ光の波長に相当する成分を取り出す第2バンドパスフィルタと、を有する構成としても良い。この場合、互いに波長が異なる第1レーザ光及び第2レーザ光を生成するためのレーザ光源を共通にできるので、光源部を簡易に構成することができる。

[0107] 上記のレーザ装置は、第1レーザ光及び第2レーザ光の合波前の波形を互いに同一の波形に制御する波形制御部を更に備える構成としても良い。この場合、光合波部から出力されるバーストパルスの包絡線の形状を制御することができる。また、例えば光源部が半導体レーザ素子を含む場合、波形制御部は半導体レーザ素子への供給電流の時間波形を制御してもよい。これにより、波形を整形するための光学部品が不要となり、レーザ装置の構成を簡易化することができる。

産業上の利用可能性

[0108] 実施形態は、1 GHz以上の高い繰り返し周波数を有するバーストパルスを生成することが可能なレーザ装置及びレーザ光生成方法として利用可能である。

符号の説明

[0109] 1 A, 1 B…レーザ装置、1 O A, 1 O B…光源部、1 1, 1 2…レーザ

光源、13, 14…駆動回路、15…半導体レーザ素子、16…温度制御部、17, 18, 19A, 19B, 20A, 20B…光源、21…光合波部、22…光検出器、23…周波数計測部、24…温度制御用コンピュータ、25…光ファイバコネクタ、26…コリメータレンズ、31～34…光ファイバ、41～44…配線、51～54…光アイソレータ、61…光ファイバ増幅器、62, 63…固体レーザ増幅器、71…バンドパスフィルタ、102…モード同期レーザ光源、103, 104…バンドパスフィルタ、112…固体レーザ発振器、113…波形整形部、114, 115…共振端面、116…利得媒質、117…ファイバレーザ発振器、118, 119…ファイバブラッググレーティング (FBG)、120…光ファイバ、171…レーザ光源、172…アイソレータ、173…偏光子、174…電気光学素子、175…利得媒質、176a, 176b…全反射ミラー、177…部分透過ミラー、178…1/4波長板、171a…温度制御部、171b, 181, 191…半導体レーザ素子、191a…共振端面、191b…背面、192…回折格子、193…集光レンズ、194…ミラー、B1～B3…包絡線、L1～L9…レーザ光、Sig…電気信号。

請求の範囲

- [請求項1] 第1レーザ光及び前記第1レーザ光とは波長が異なる第2レーザ光を、それぞれ異なる光路へ出力する光源部と、
- 前記光源部と光学的に結合され、前記第1レーザ光と前記第2レーザ光とを合波して、前記第1レーザ光の波長と前記第2レーザ光の波長との差に応じた周波数でもってバーストパルスが発生させる光合波部と、
- を備え、
- 前記光源部において、前記第1レーザ光及び前記第2レーザ光の各波長は、前記バーストパルスの周波数が或る周波数となるように予め設定されているか又は設定可能であり、
- 前記或る周波数は1GHz以上である、レーザ装置。
- [請求項2] 前記或る周波数は2000GHz以下である、請求項1に記載のレーザ装置。
- [請求項3] 前記光源部において、前記第1レーザ光及び前記第2レーザ光のうち少なくとも一方の波長が可変である、請求項1または2に記載のレーザ装置。
- [請求項4] 前記第1レーザ光が発生するレーザ光源、及び前記第2レーザ光が発生するレーザ光源のうち少なくとも一方が波長可変レーザである、請求項3に記載のレーザ装置。
- [請求項5] 前記第1レーザ光が発生するレーザ光源、及び前記第2レーザ光が発生するレーザ光源のうち少なくとも一方がQスイッチレーザであり、前記Qスイッチレーザの種光源が波長可変レーザである、請求項3に記載のレーザ装置。
- [請求項6] 前記波長可変レーザは、分布帰還型の半導体レーザ素子と、電気信号に応じて前記半導体レーザ素子の温度を変更する温度制御部と、を有する、請求項4または5に記載のレーザ装置。
- [請求項7] 前記波長可変レーザは、レーザ共振器と、前記レーザ共振器におけ

る一方の共振器端を構成し、波長－光反射特性が可変である光反射部と、を有する、請求項4または5に記載のレーザ装置。

[請求項8]

前記光源部は、

モード同期レーザ光源と、

前記モード同期レーザ光源と光学的に結合され、前記モード同期レーザ光源から出力されるレーザ光から前記第1レーザ光の波長に相当する成分を取り出す第1バンドパスフィルタと、

前記モード同期レーザ光源と光学的に結合され、前記モード同期レーザ光源から出力されるレーザ光から前記第2レーザ光の波長に相当する成分を取り出す第2バンドパスフィルタと、

を有する、請求項1または2に記載のレーザ装置。

[請求項9]

前記第1レーザ光及び前記第2レーザ光の合波前の波形を互いに同一の波形に制御する波形制御部を更に備える、請求項1～8のいずれか1項に記載のレーザ装置。

[請求項10]

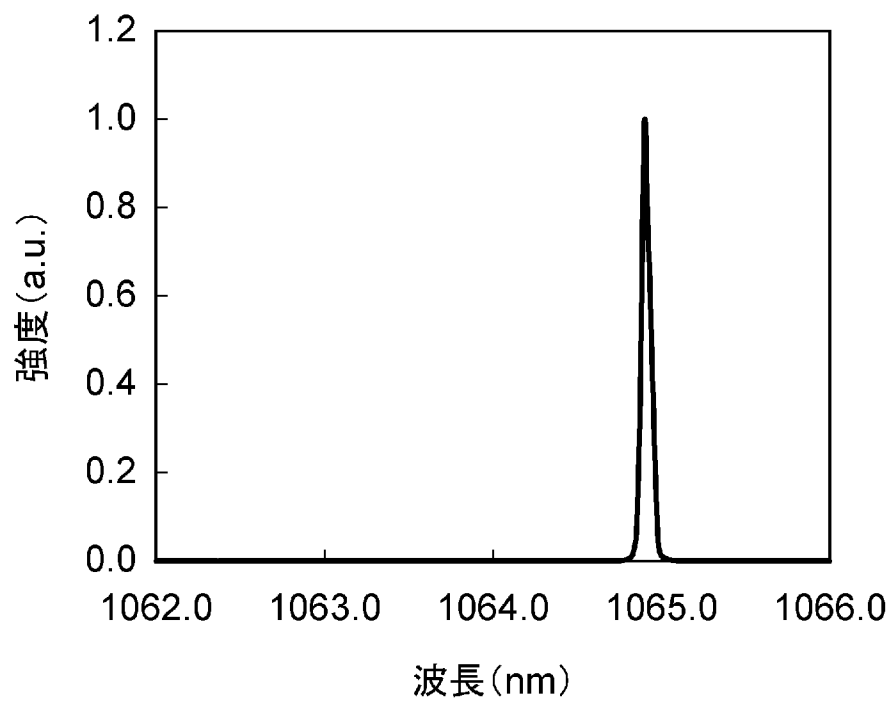
第1レーザ光及び前記第1レーザ光とは波長が異なる第2レーザ光を、それぞれ異なる光路へ出力する第1ステップと、

前記第1レーザ光と前記第2レーザ光とを合波して、前記第1レーザ光の波長と前記第2レーザ光の波長との差に応じた周波数をもってバーストパルスが発生させる第2ステップと、
を含み、

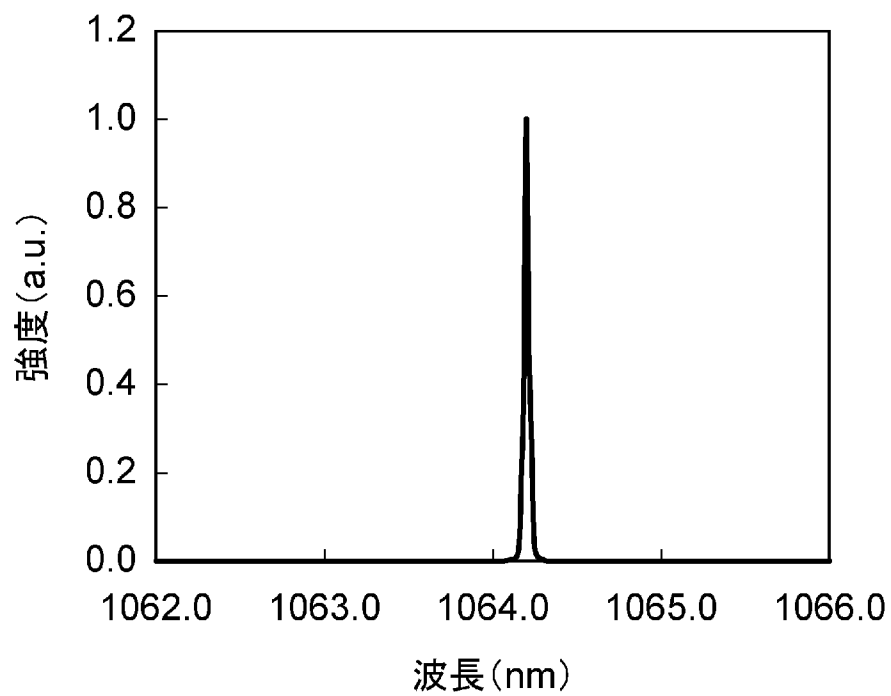
前記第1ステップにおいて、前記第1レーザ光及び前記第2レーザ光の各波長を、前記バーストパルスの周波数が1GHz以上となるように設定する、レーザ光生成方法。

[図2]

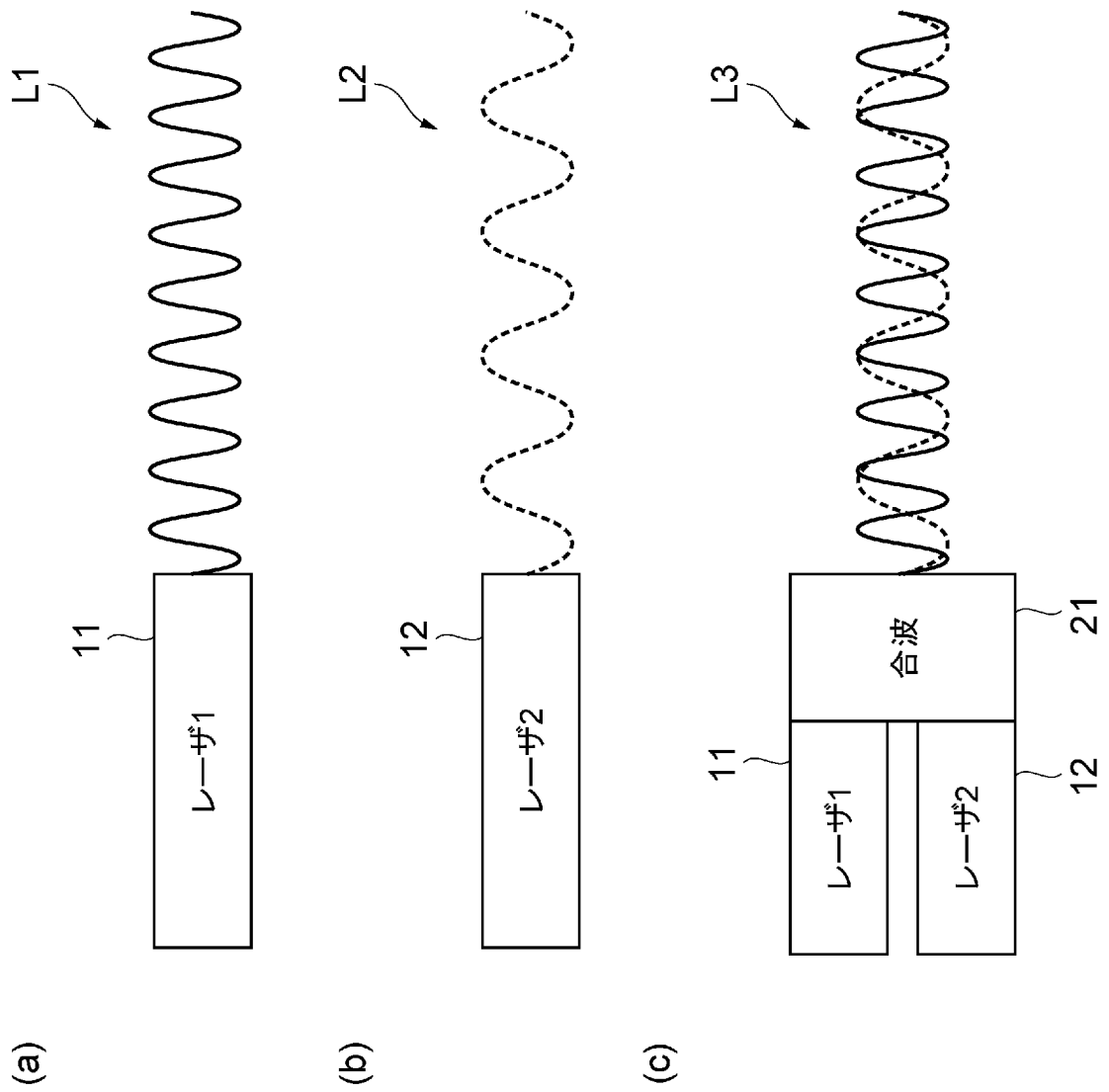
(a)



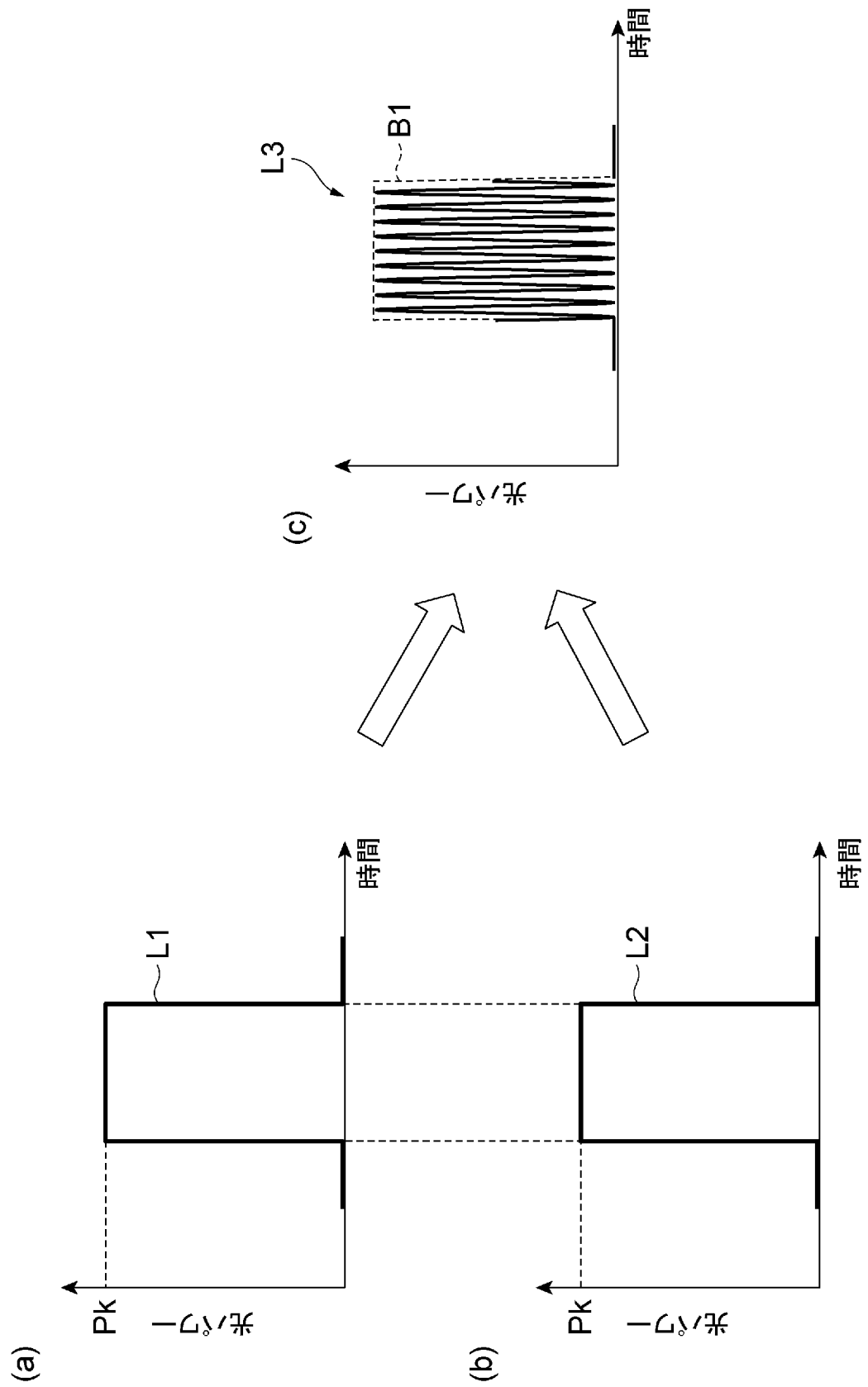
(b)



[図3]

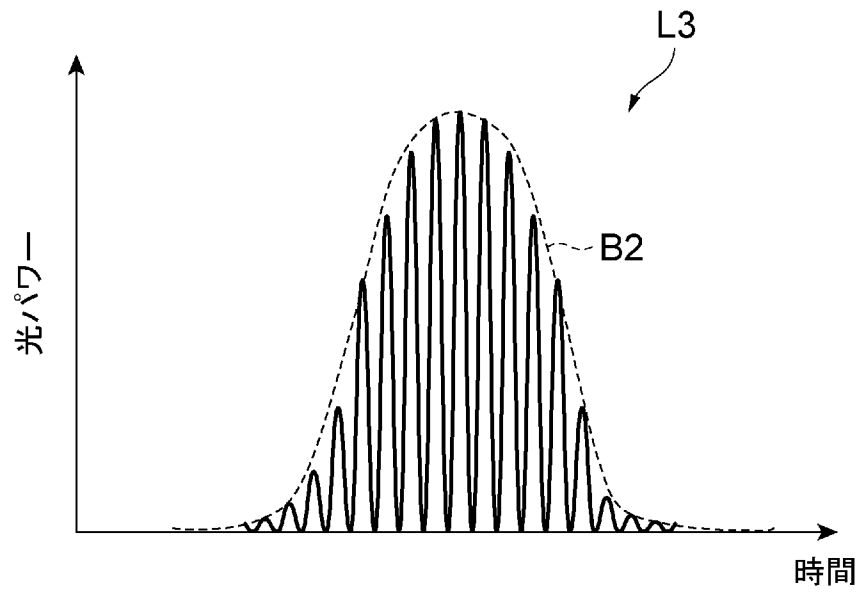


[図4]

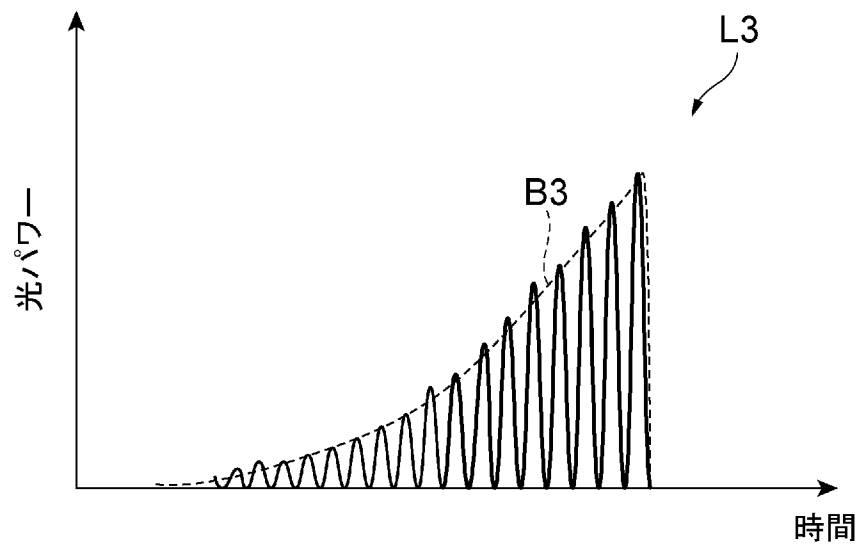


[図5]

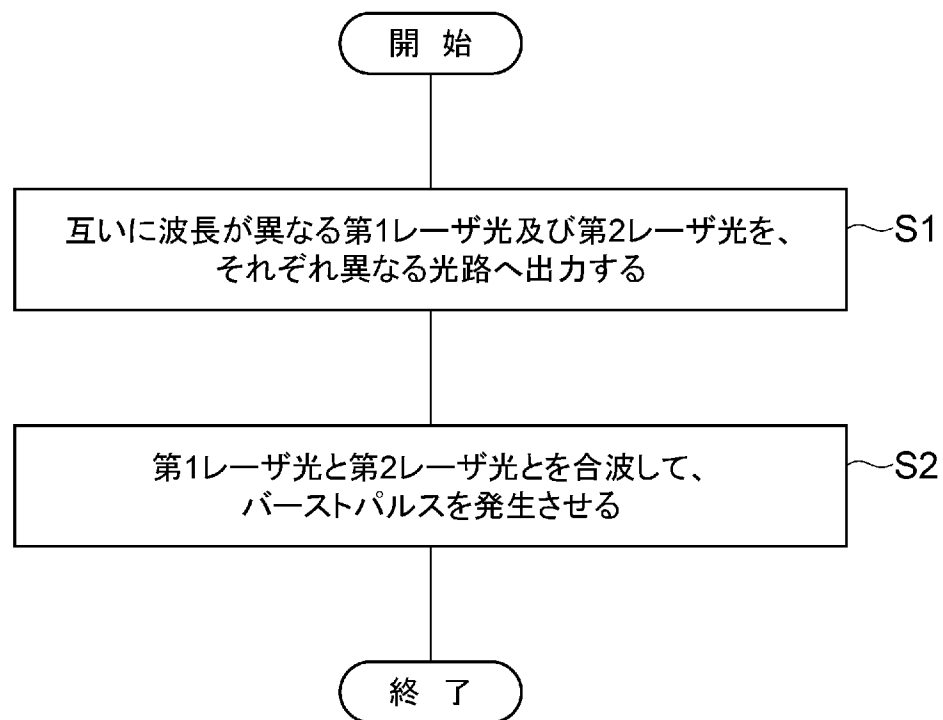
(a)



(b)

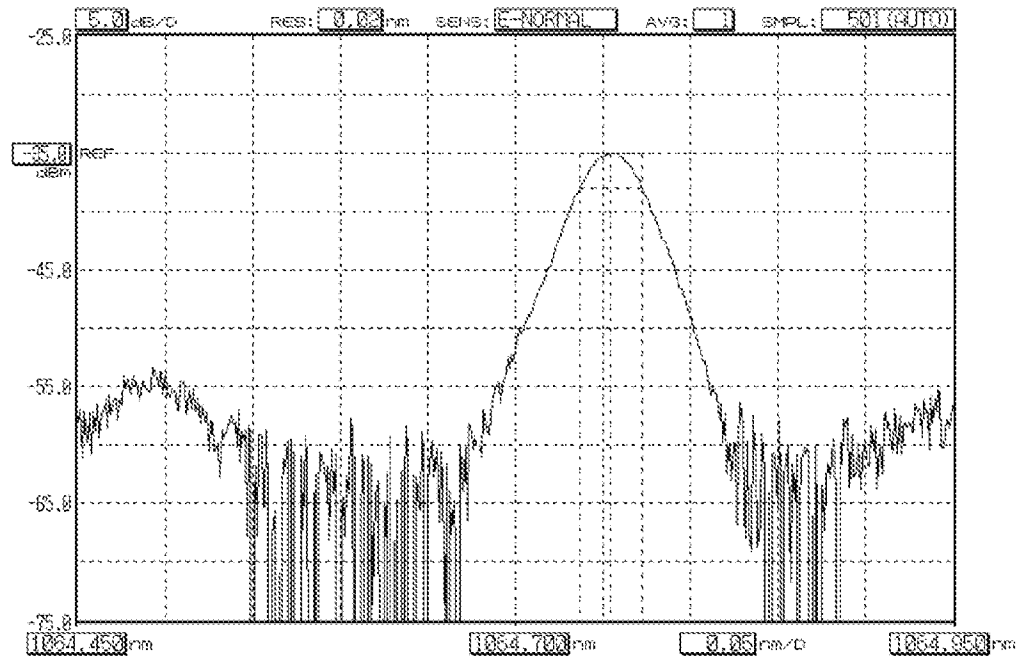


[図6]

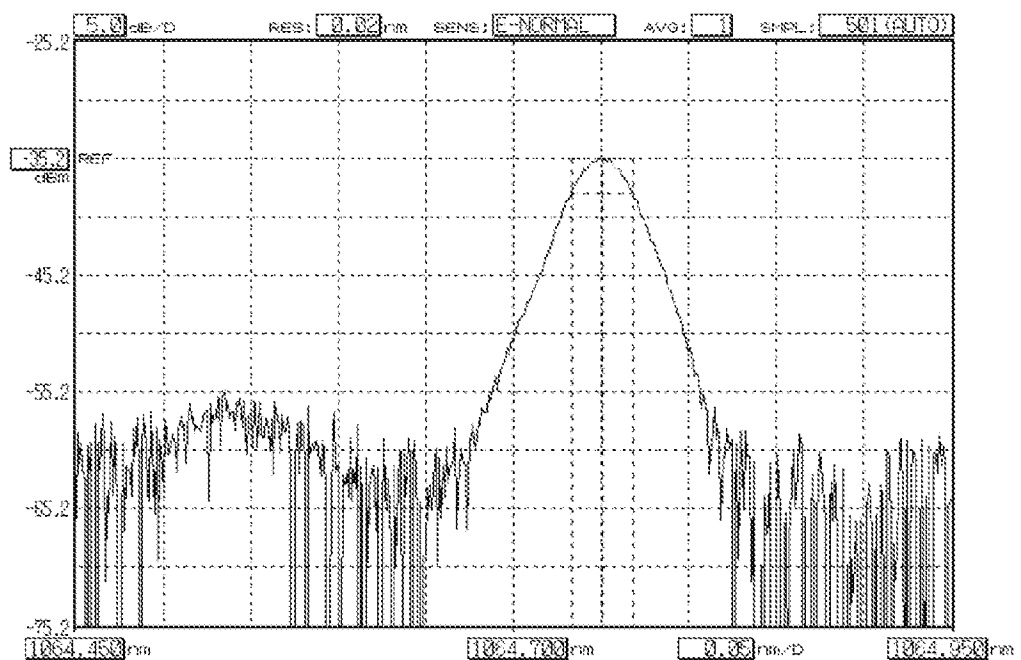


[図7]

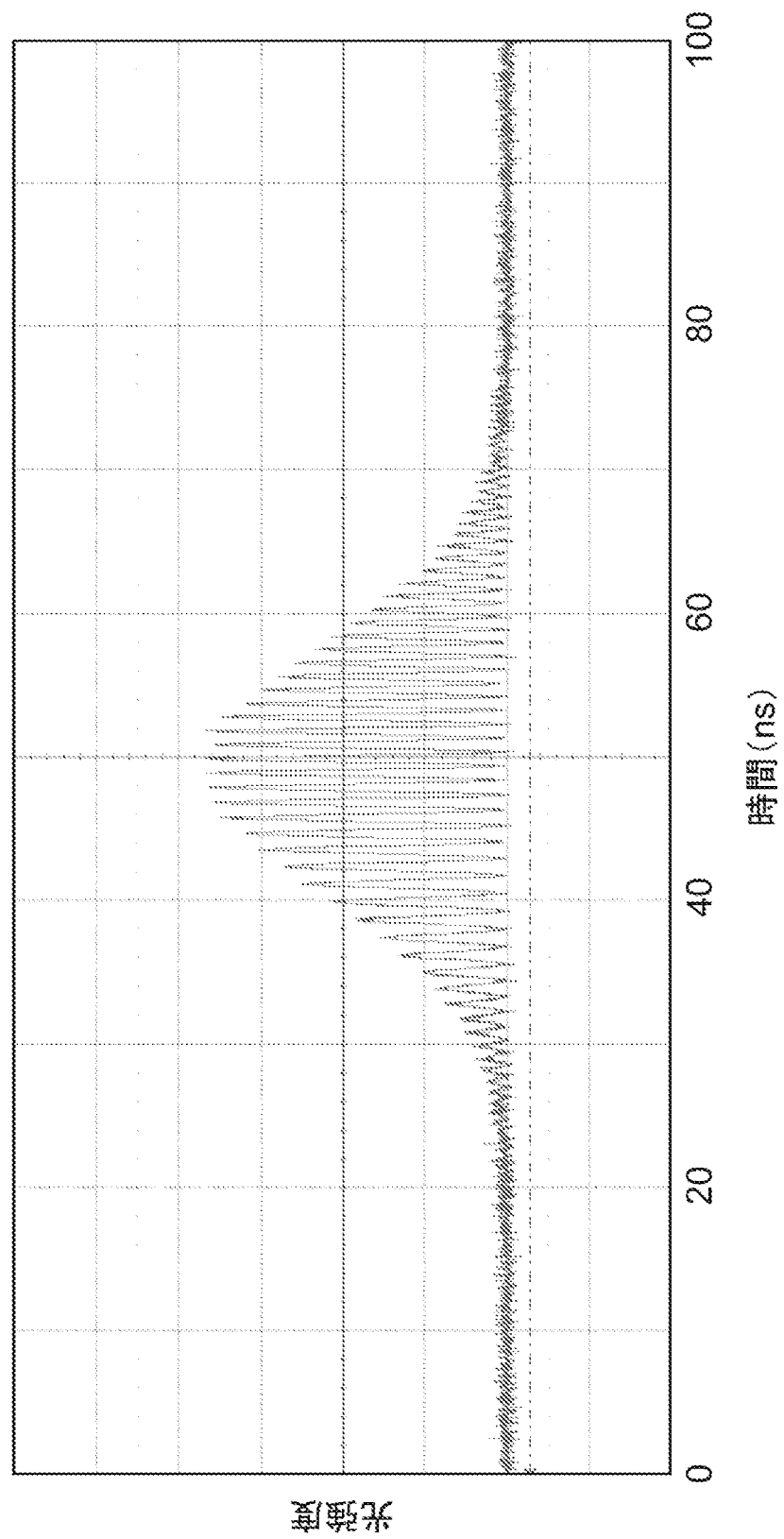
(a)



(b)

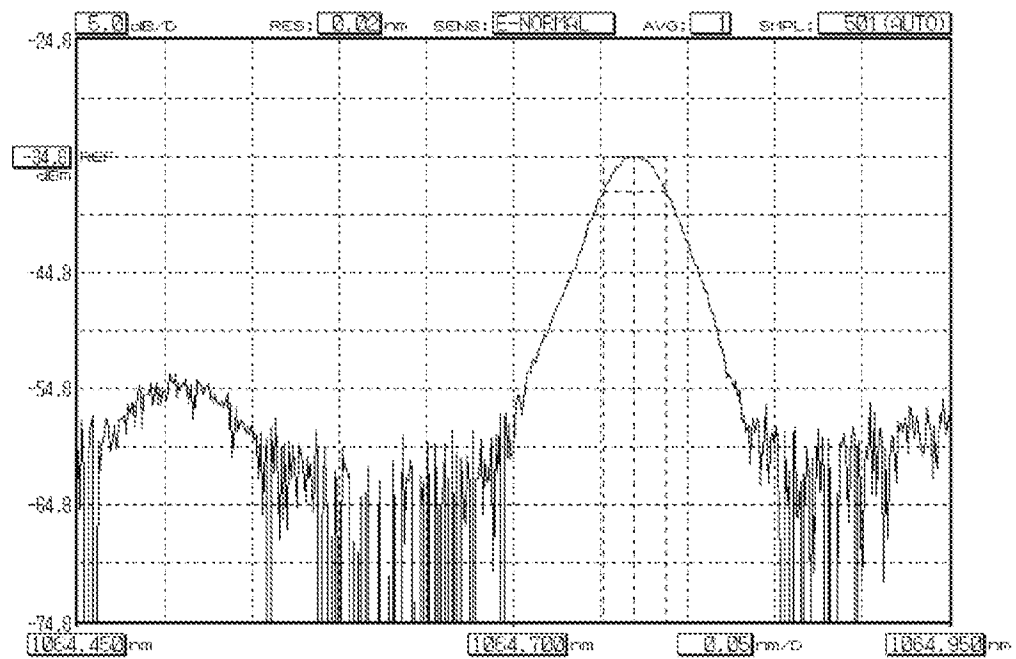


[図8]

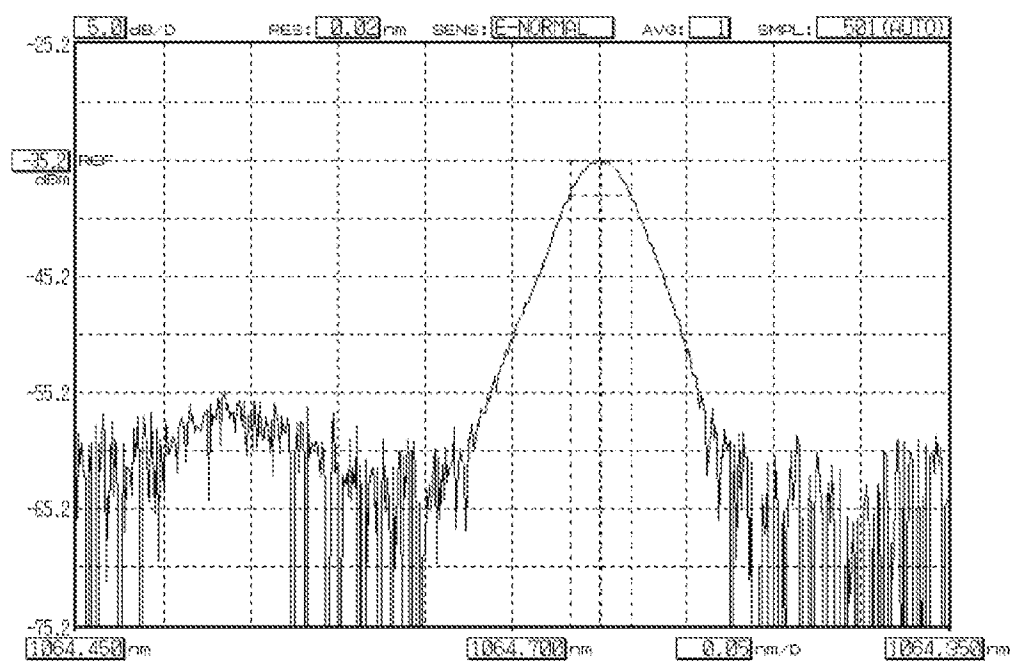


[図9]

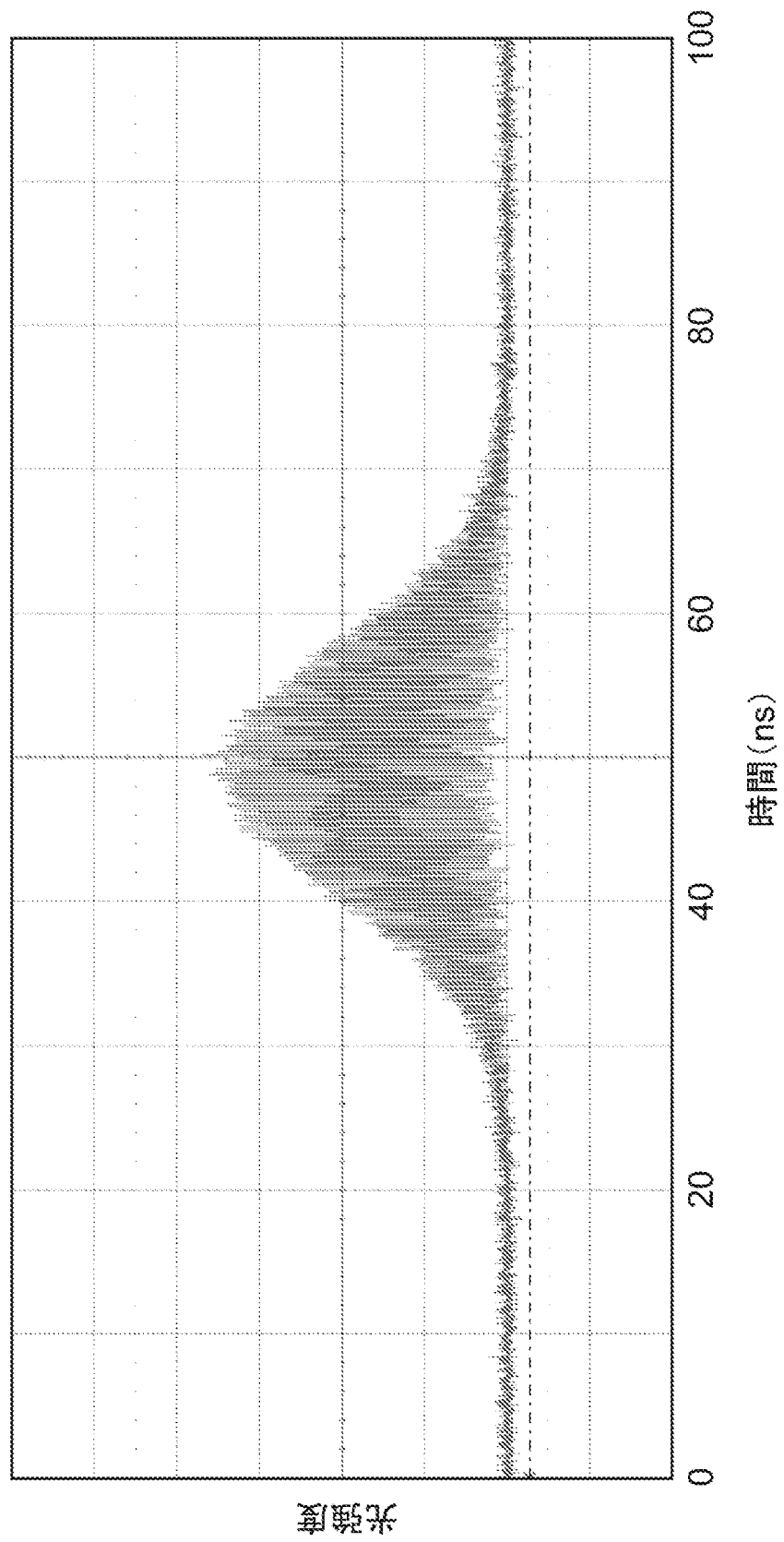
(a)



(b)

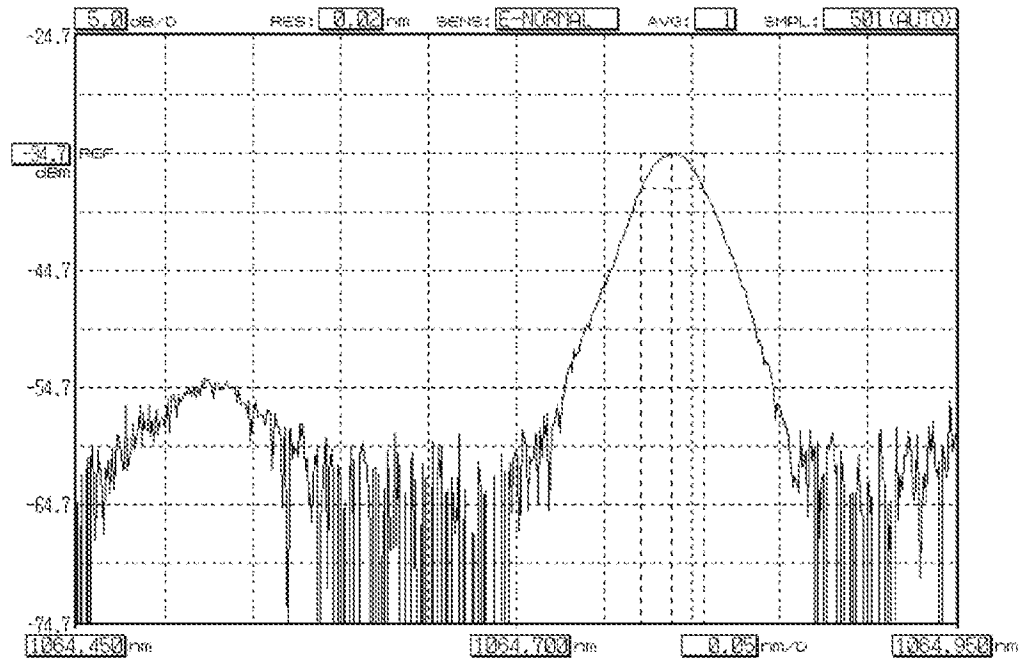


[図10]

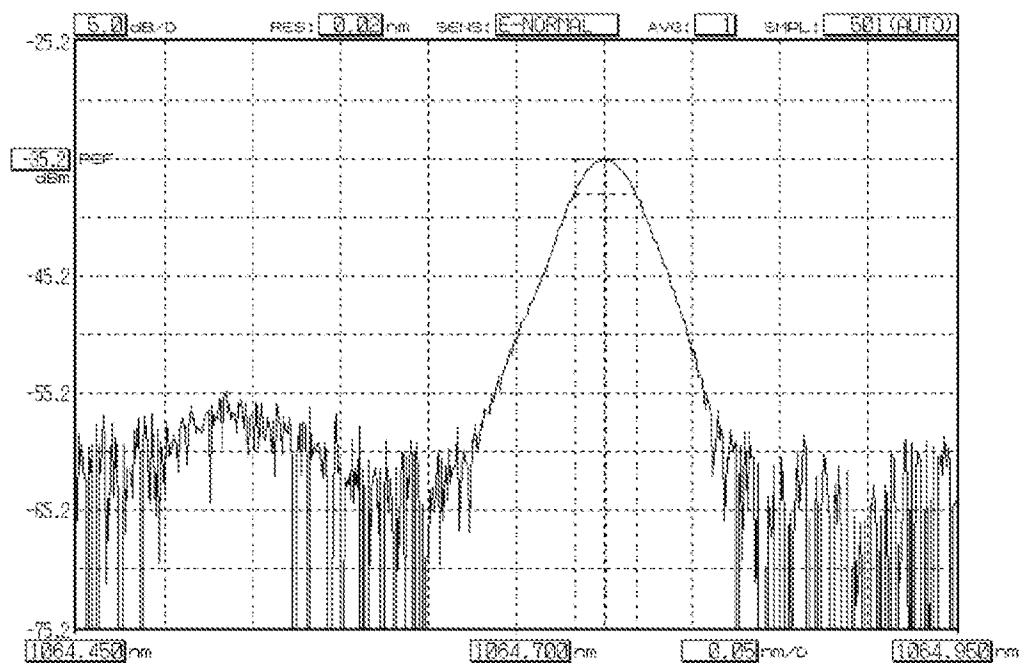


[図11]

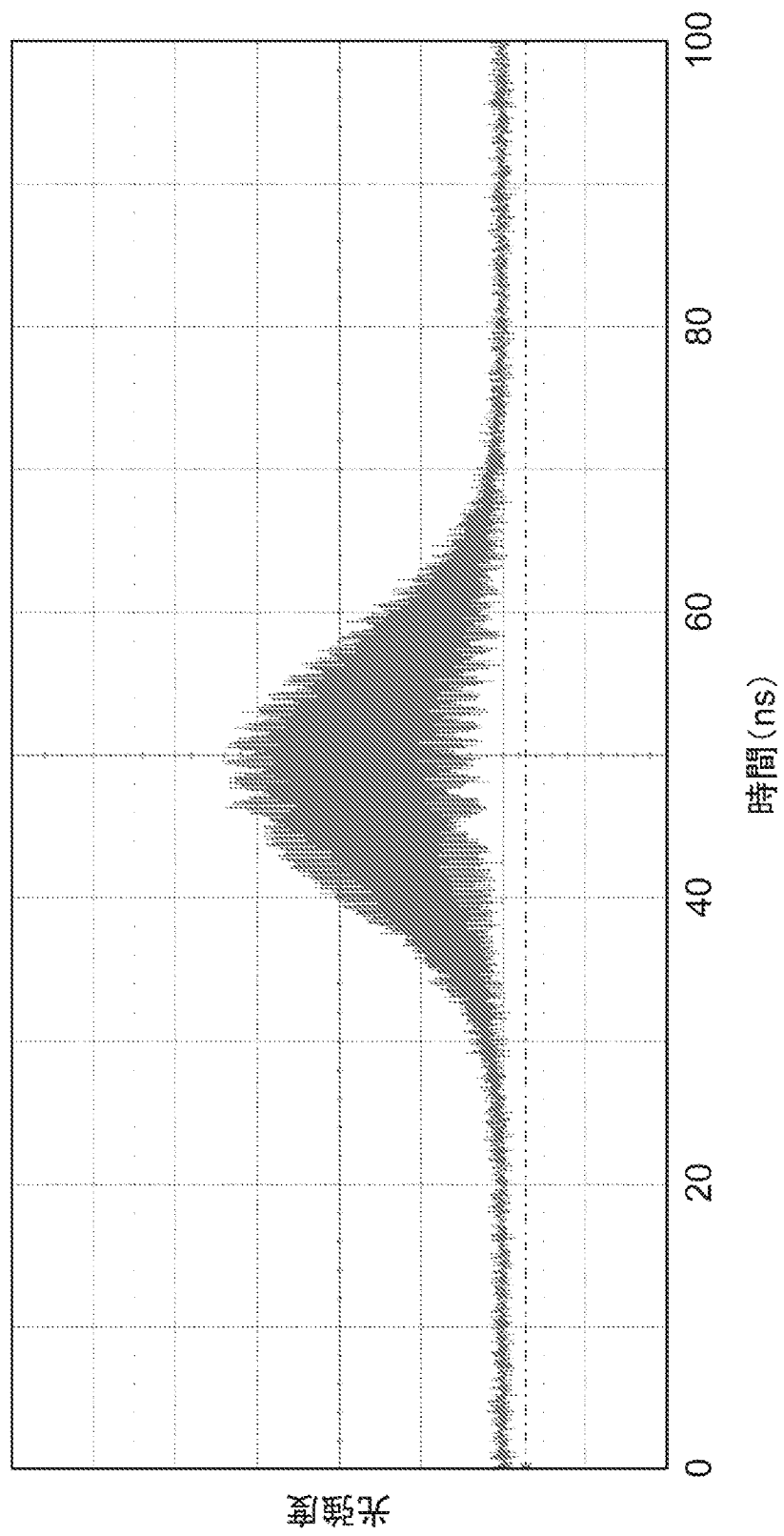
(a)



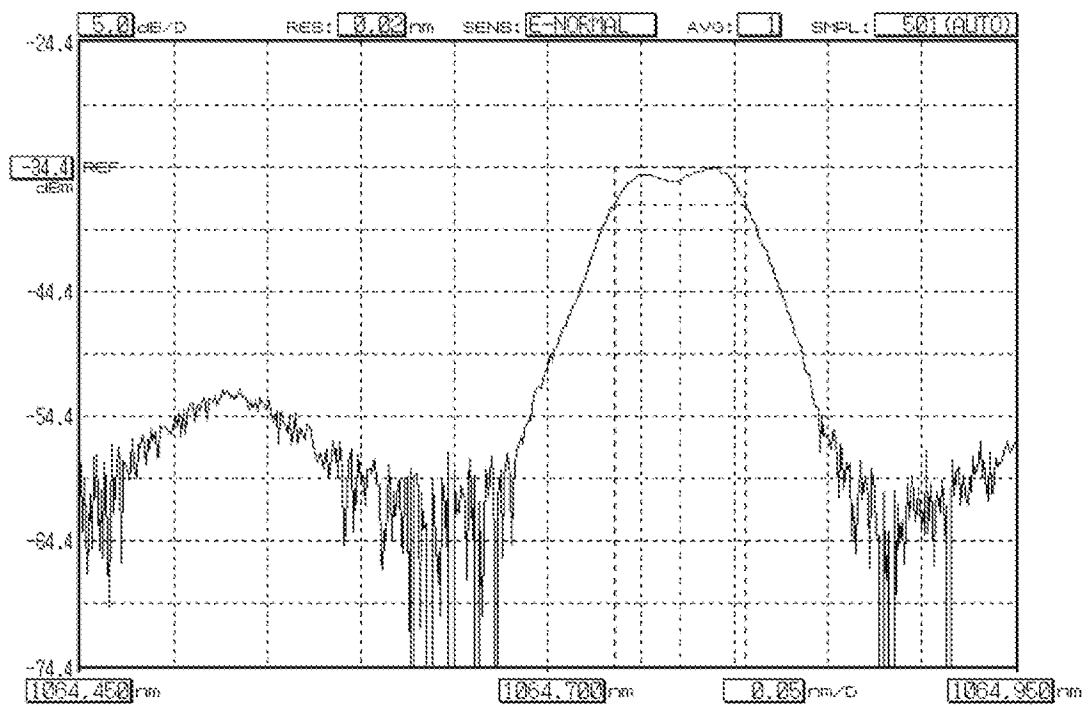
(b)



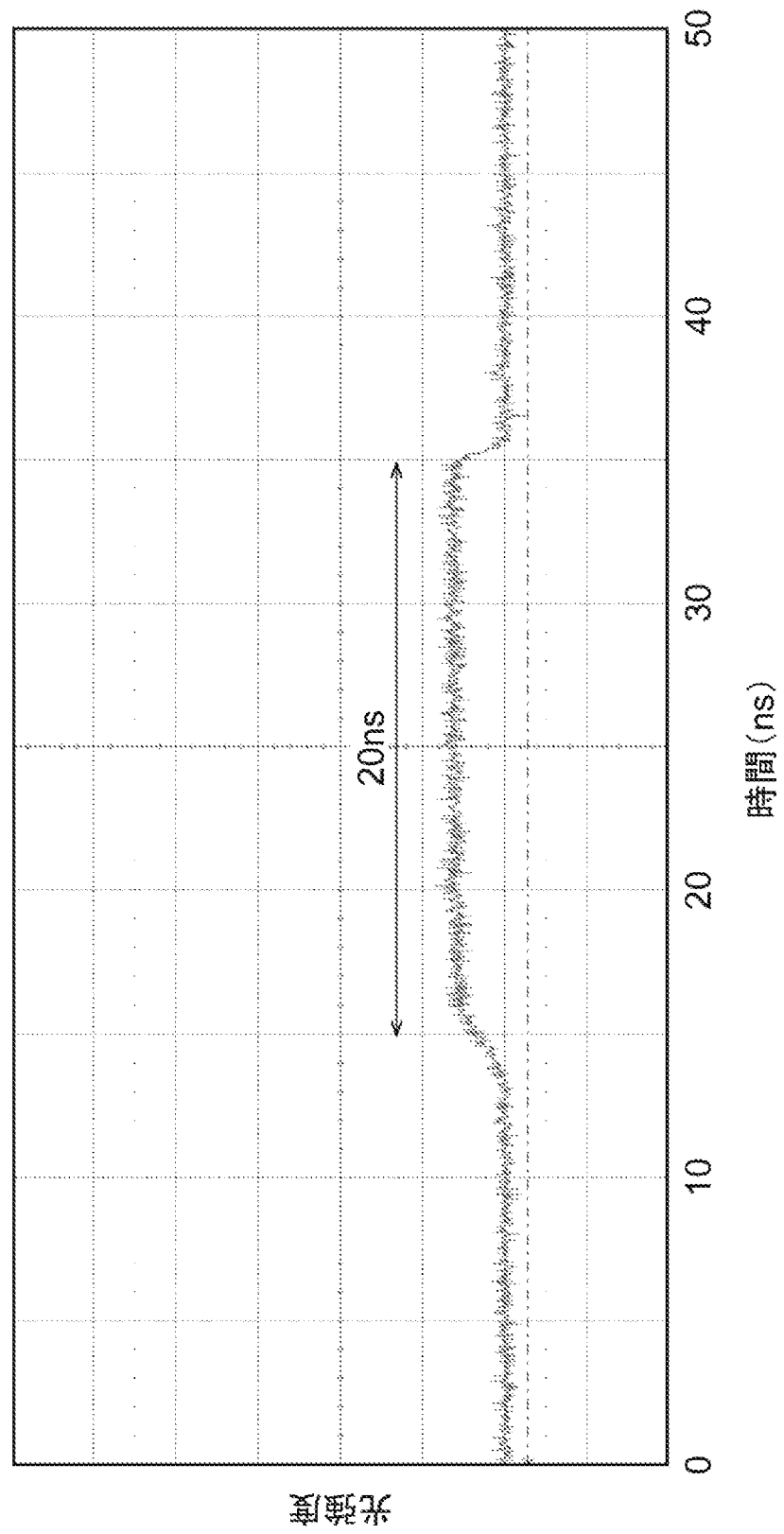
[図12]



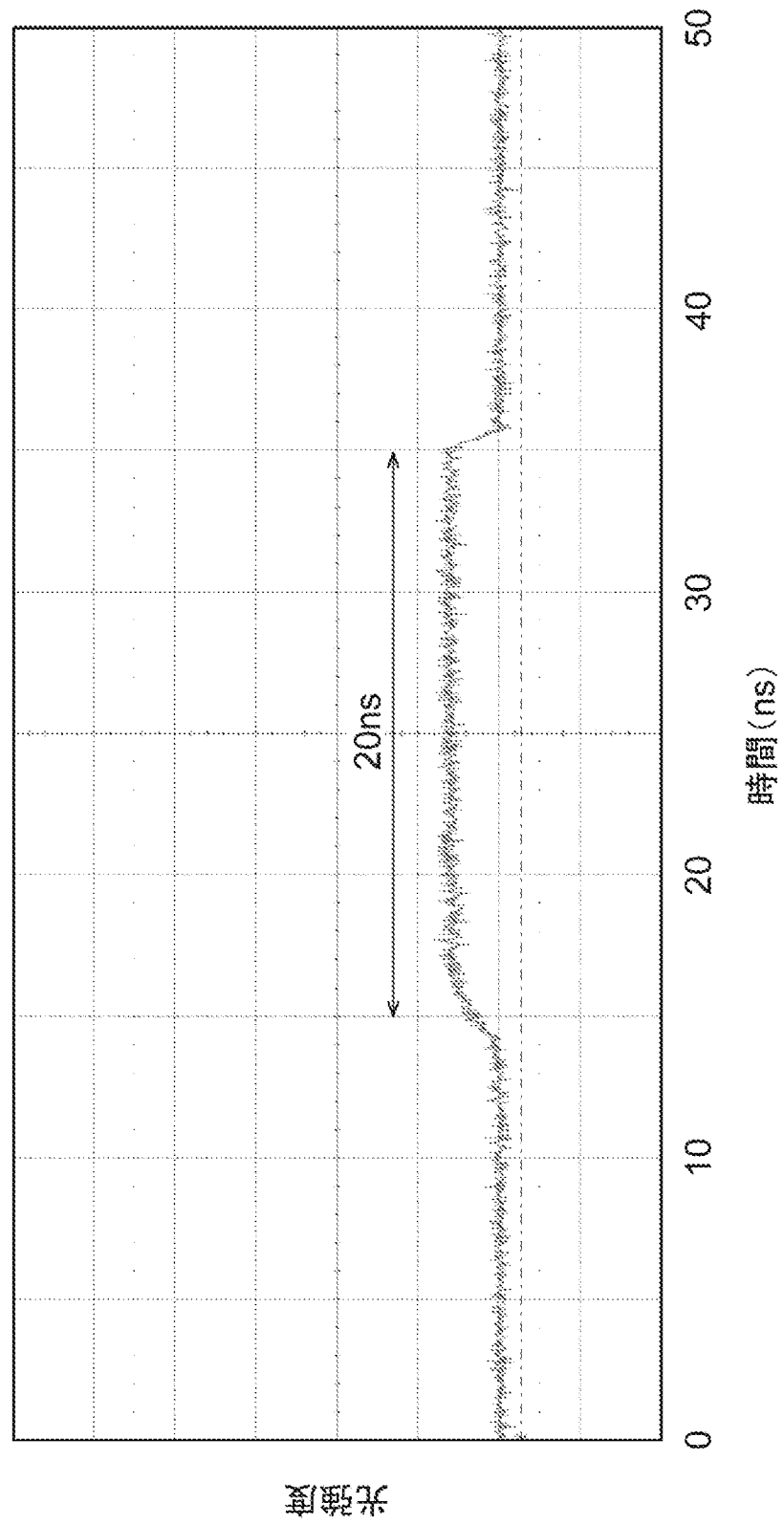
[図13]



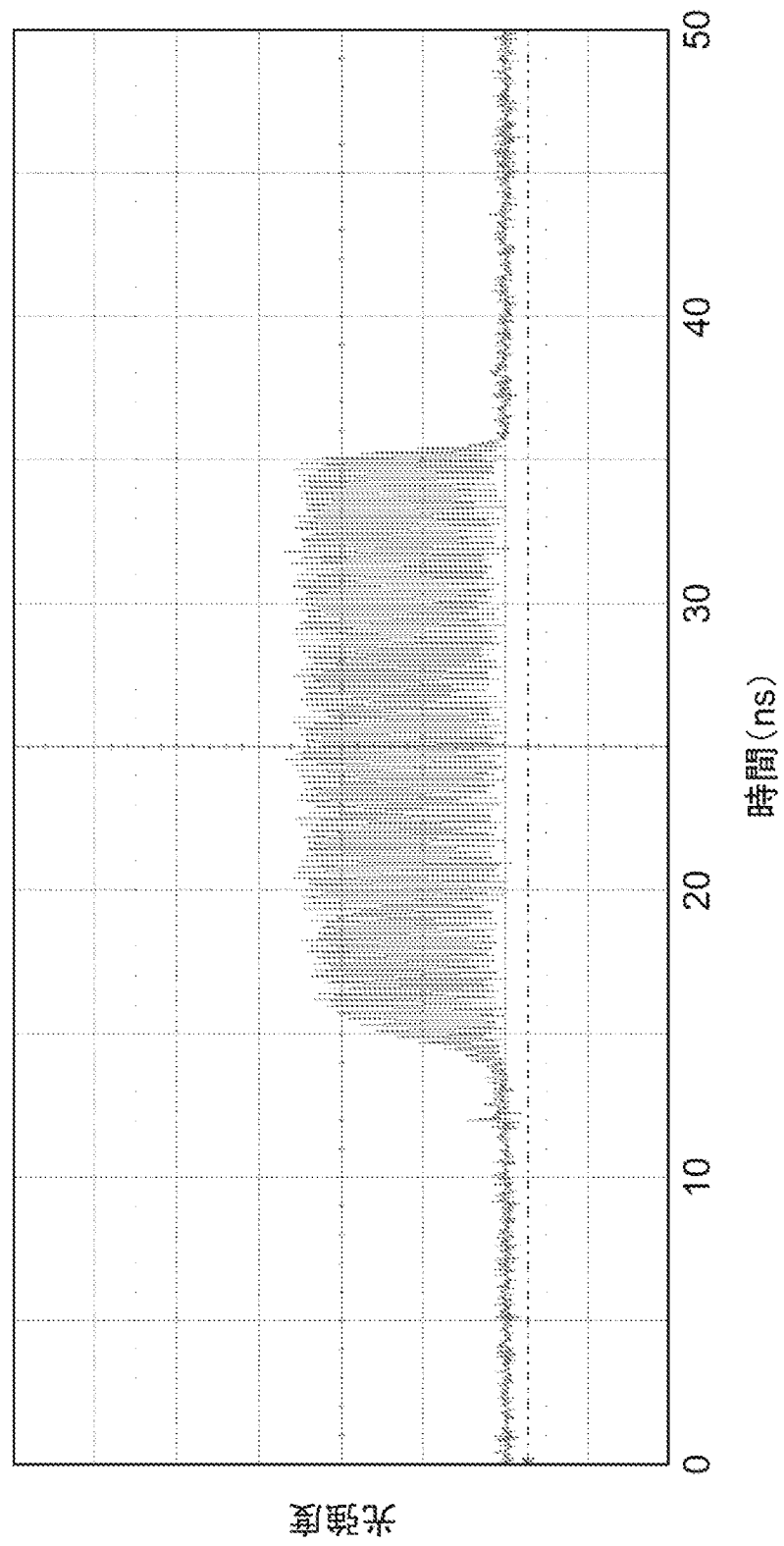
[図14]



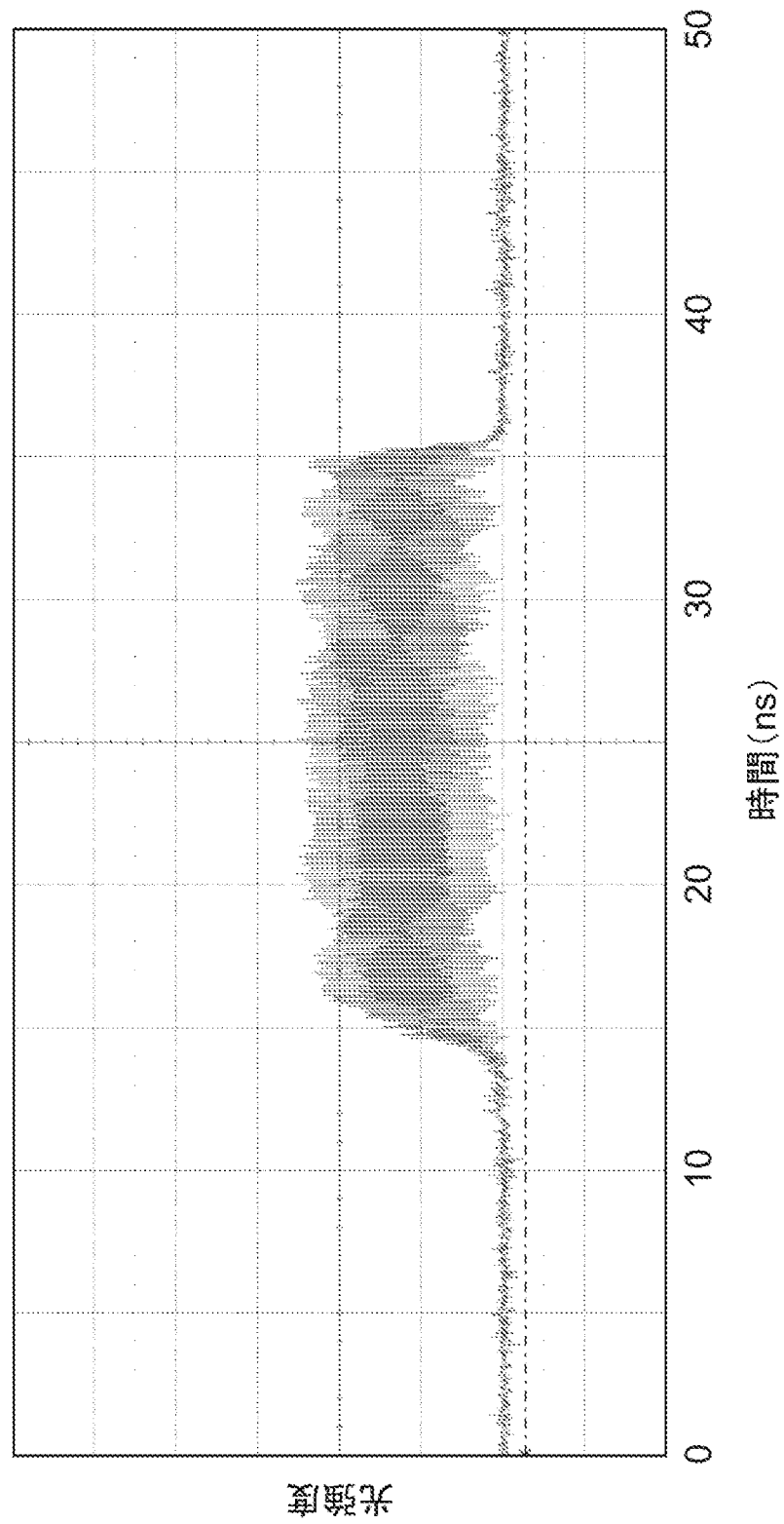
[図15]



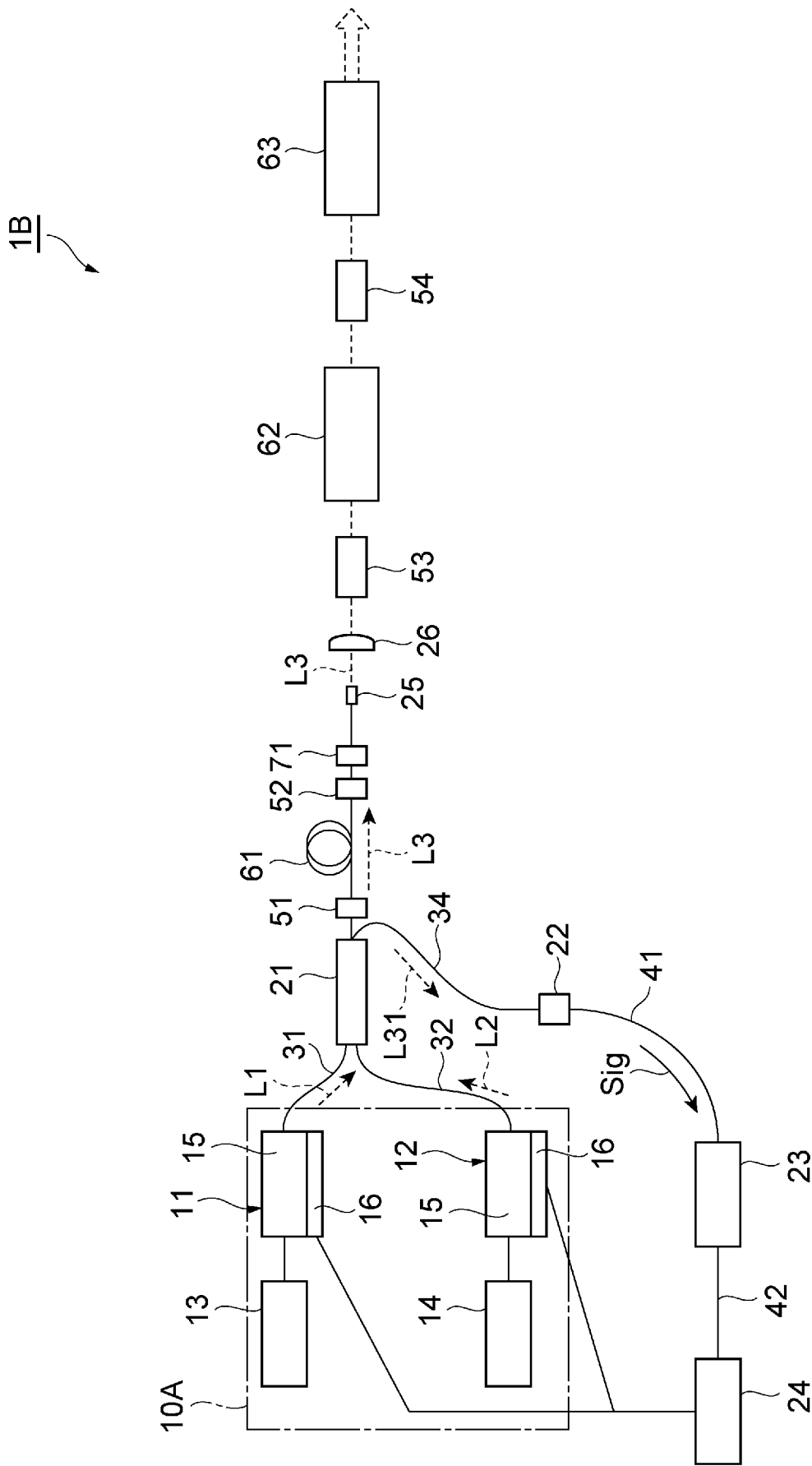
[図16]



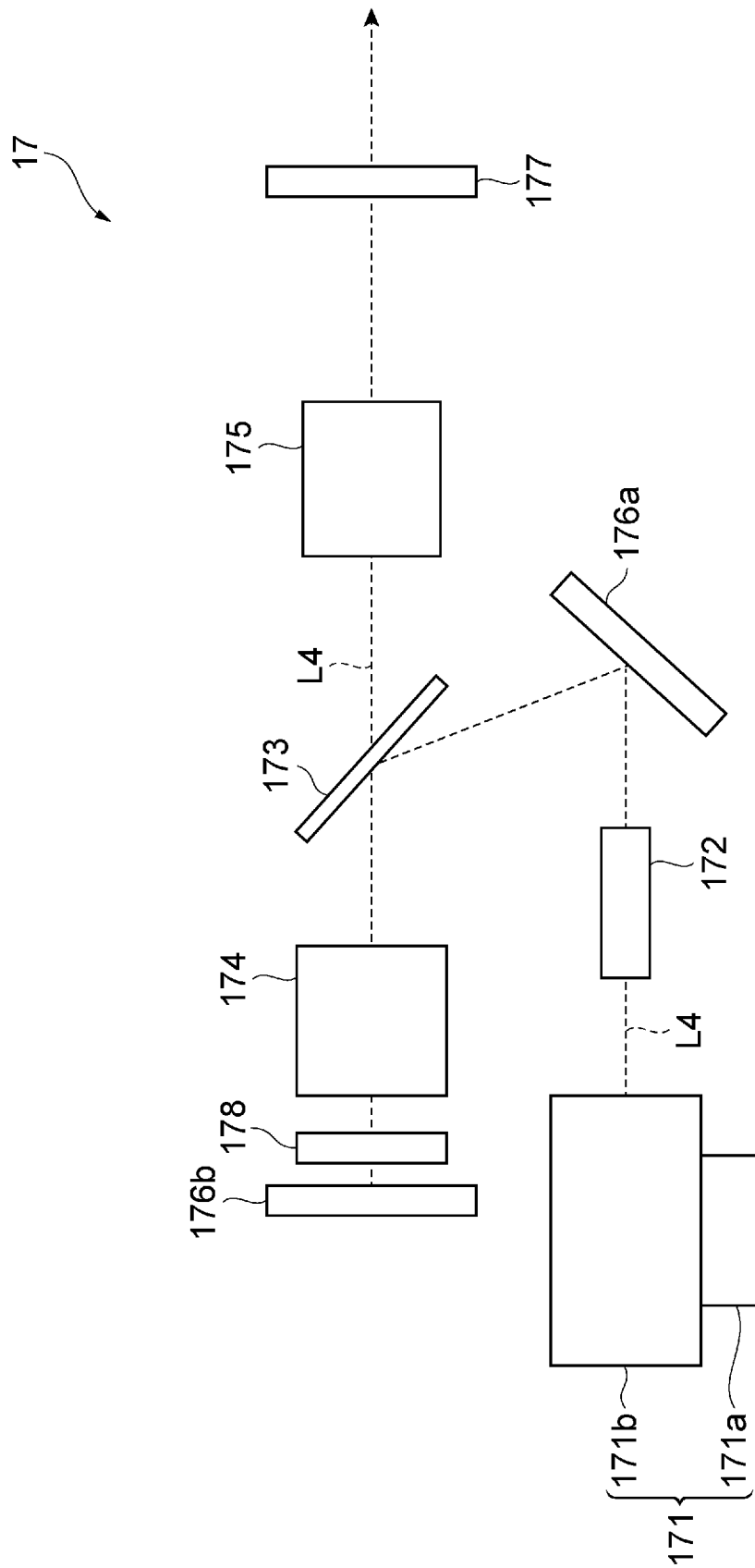
[図17]



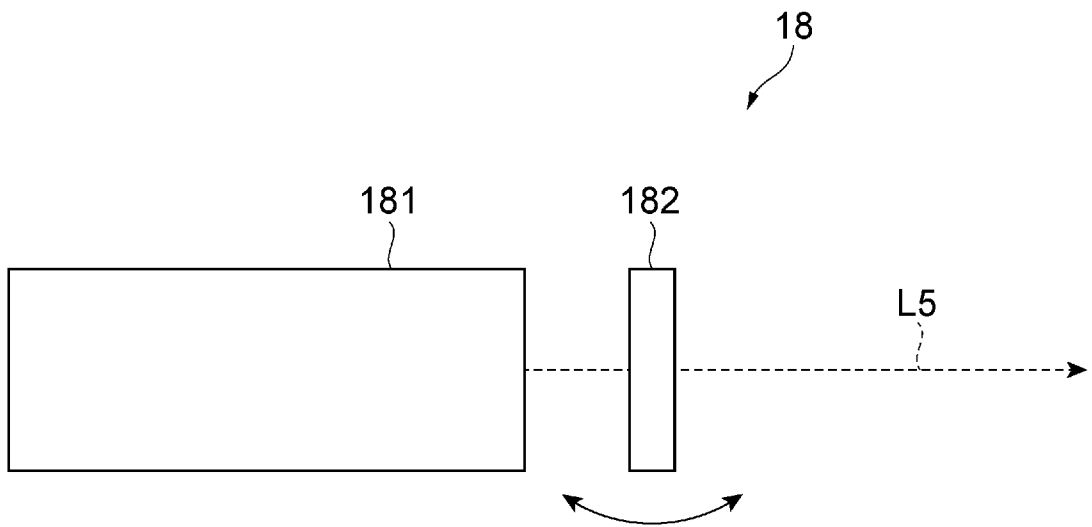
[図18]



[図19]

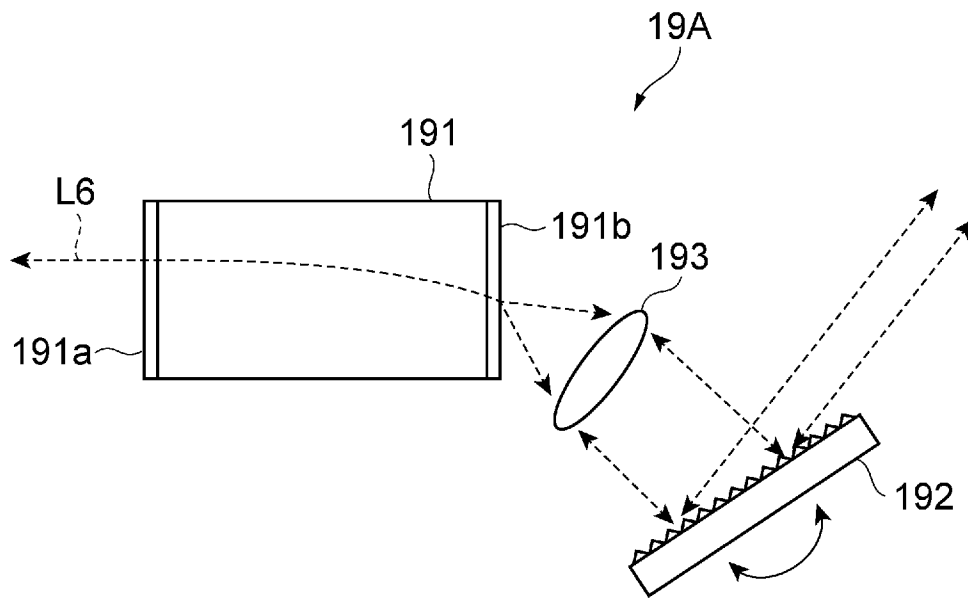


[図20]

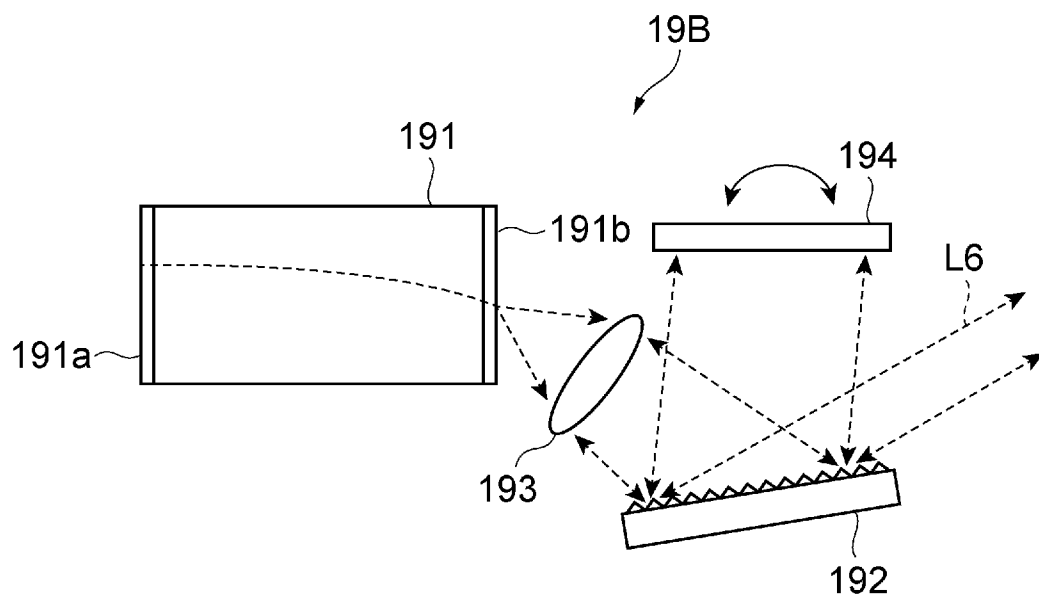


[図21]

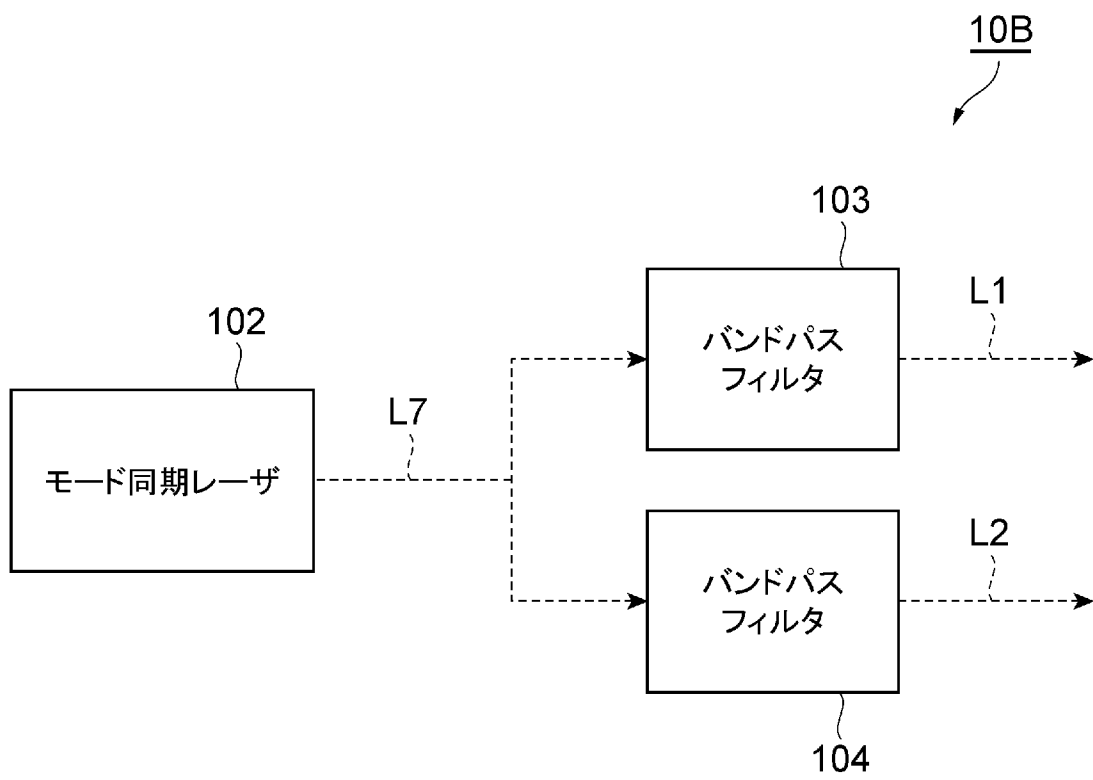
(a)



(b)

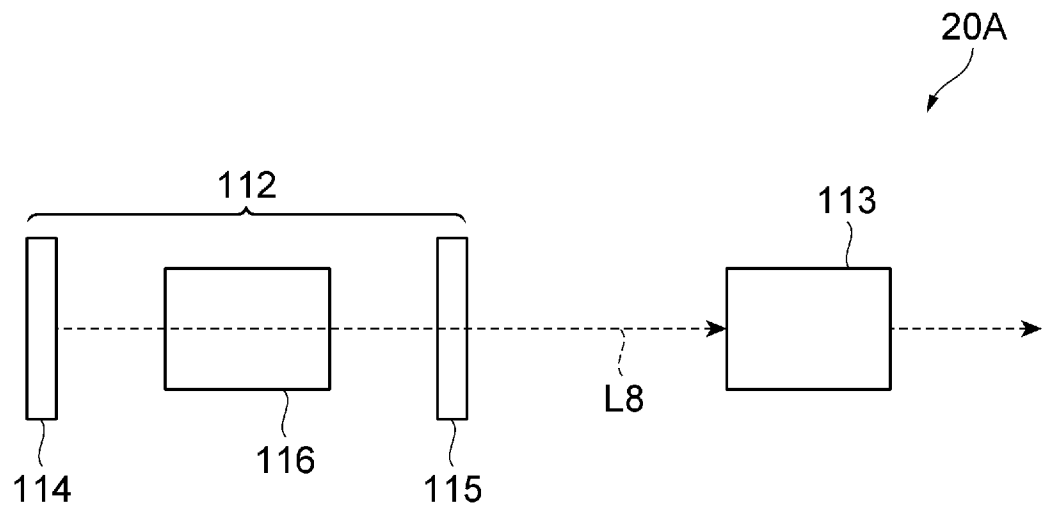


[図22]

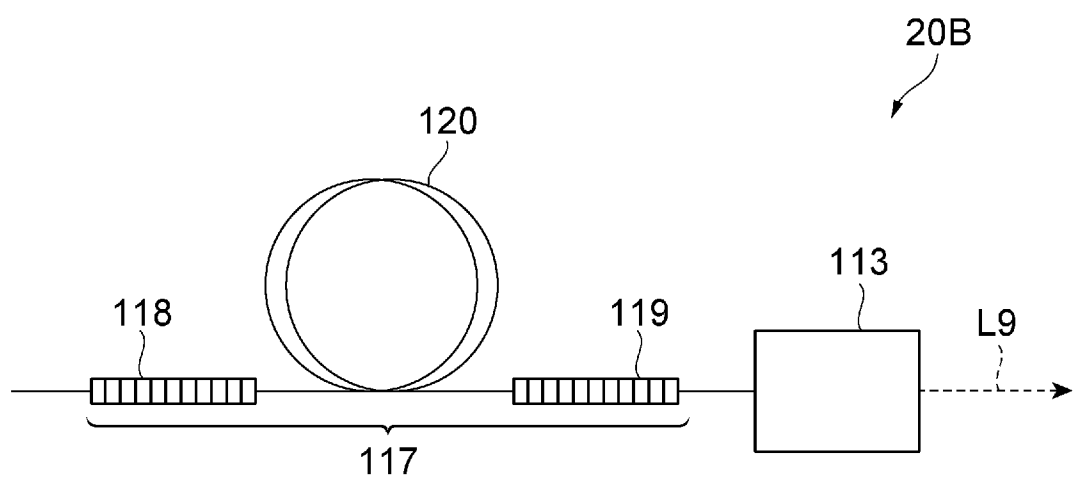


[図23]

(a)



(b)



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/025070

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01S 3/098(2006.01)i; H01S 3/10(2006.01)i; H01S 3/105(2006.01)i; H01S 3/107(2006.01)i; H01S 5/062(2006.01)i
FI: H01S3/10 Z; H01S3/105; H01S3/098; H01S3/107; H01S5/062

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)
H01S3/00-3/30; H01S5/00-5/50; B23K26/00-26/70

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)
IEEE Xplore, OSA Publishing

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2007-242978 A (FUJITSU LTD.) 20.09.2007 (2007-09-20) paragraphs [0014]-[0026], fig. 1-3	1-10
Y	JP 2016-524864 A (GWANGJU INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 18.08.2016 (2016-08-18) paragraphs [0002], [0026]-[0045], fig. 1	1-10
Y	JP 4-352483 A (TOSOH CORP.) 07.12.1992 (1992-12-07) paragraphs [0005]-[0013], fig. 1	5-7, 9
Y	JP 2002-43685 A (ANRITSU CORP.) 08.02.2002 (2002-02-08) paragraph [0010]	7, 9
Y	WO 2018/110222 A1 (HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) 21.06.2018 (2018-06-21) paragraphs [0023]-[0051], fig. 1-13	8-9



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"I" 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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search
07 September 2020 (07.09.2020)

Date of mailing of the international search report
15 September 2020 (15.09.2020)

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/JP2020/025070

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2017-504824 A (CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 09.02.2017 (2017-02-09) entire text, all drawings	1-10
A	JP 6-214266 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORP.) 05.08.1994 (1994-08-05) entire text, all drawings	1-10
A	JP 2007-271925 A (FUJITSU LTD.) 18.10.2007 (2007-10-18) entire text, all drawings	1-10
A	JP 2012-515450 A (ELECTRO SCIENTIFIC INDUSTRIES, INC.) 05.07.2012 (2012-07-05) entire text, all drawings	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2020/025070

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 2007-242978 A	20 Sep. 2007	(Family: none)	
JP 2016-524864 A	18 Aug. 2016	US 2016/0111849 A1 paragraphs [0002], [0027]-[0046], fig. 1	
		WO 2014/193062 A1	
		KR 10-1304424 B1	
JP 4-352483 A	07 Dec. 1992	US 5285460 A column 1, line 41 to column 4, line 53, fig. 1	
		EP 0516116 A2	
JP 2002-43685 A	08 Feb. 2002	(Family: none)	
WO 2018/110222 A1	21 Jun. 2018	EP 3557704 A1 paragraphs [0023]- [0051], fig. 1-13	
		CN 110073558 A	
		KR 10-2019-0093553 A	
JP 2017-504824 A	09 Feb. 2017	US 2015/0236784 A1 entire text, all drawings	
		US 2015/0236789 A1	
		WO 2015/163954 A2	
		WO 2015/160413 A2	
		KR 10-2017-0013197 A	
		KR 10-2017-0013198 A	
		CN 106471685 A	
		CN 107124910 A	
JP 6-214266 A	05 Aug. 1994	(Family: none)	
JP 2007-271925 A	18 Oct. 2007	(Family: none)	
JP 2012-515450 A	05 Jul. 2012	US 2010/0177794 A1	
		WO 2010/083091 A2	
		CA 27 49329 A1	
		KR 10-2011-0112347 A	
		CN 102334249 A	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01S 3/098(2006.01)i; H01S 3/10(2006.01)i; H01S 3/105(2006.01)i; H01S 3/107(2006.01)i; H01S 5/062(2006.01)i FI: H01S3/10 Z; H01S3/105; H01S3/098; H01S3/107; H01S5/062		
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）） H01S3/00-3/30; H01S5/00-5/50; B23K26/00-26/70 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2020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 国際調査で利用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語） IEEE Xplore, OSA Publishing		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2007-242978 A（富士通株式会社）20.09.2007（2007-09-20） [0014]-[0026], 図1-3	1-10
Y	JP 2016-524864 A（クワンジュ・インスティテュート・オブ・サイエンス・アンド・テクノロジー）18.08.2016（2016-08-18） [0002], [0026]-[0045], 図1	1-10
Y	JP 4-352483 A（東ソー株式会社）07.12.1992（1992-12-07） [0005]-[0013], 図1	5-7, 9
Y	JP 2002-43685 A（アンリツ株式会社）08.02.2002（2002-02-08） [0010]	7, 9
Y	WO 2018/110222 A1（浜松ホトニクス株式会社）21.06.2018（2018-06-21） [0023]-[0051], 図1-13	8-9
A	JP 2017-504824 A（カリフォルニア インスティテュート オブ テクノロジー） 09.02.2017（2017-02-09） 全文, 全図	1-10
☒ 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 07.09.2020		国際調査報告の発送日 15.09.2020
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） 百瀬 正之 2K 4084 電話番号 03-3581-1101 内線 3255

C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 6-214266 A (日本電信電話株式会社) 05.08.1994 (1994 - 08 - 05) 全文, 全図	1-10
A	JP 2007-271925 A (富士通株式会社) 18.10.2007 (2007 - 10 - 18) 全文, 全図	1-10
A	JP 2012-515450 A (エレクトロ サイエンティフィック インダストリーズ イン コーポレーテッド) 05.07.2012 (2012 - 07 - 05) 全文, 全図	1-10

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/JP2020/025070

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	2007-242978	A	20.09.2007	(ファミリーなし)	
JP	2016-524864	A	18.08.2016	US 2016/0111849	A1
				[0002], [0027]-	
				[0046], FIG.1	
				WO 2014/193062	A1
				KR 10-1304424	B1
JP	4-352483	A	07.12.1992	US 5285460	A
				第1欄第41行-第4欄第53	
				行, FIG.1	
				EP 0516116	A2
JP	2002-43685	A	08.02.2002	(ファミリーなし)	
WO	2018/110222	A1	21.06.2018	EP 3557704	A1
				[0023]-[0051], FIGs. 1-13	
				CN 110073558	A
				KR 10-2019-0093553	A
JP	2017-504824	A	09.02.2017	US 2015/0236784	A1
				全文, 全図	
				US 2015/0236789	A1
				WO 2015/163954	A2
				WO 2015/160413	A2
				KR 10-2017-0013197	A
				KR 10-2017-0013198	A
				CN 106471685	A
				CN 107124910	A
JP	6-214266	A	05.08.1994	(ファミリーなし)	
JP	2007-271925	A	18.10.2007	(ファミリーなし)	
JP	2012-515450	A	05.07.2012	US 2010/0177794	A1
				WO 2010/083091	A2
				CA 2749329	A1
				KR 10-2011-0112347	A
				CN 102334249	A