

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2020-79939

(P2020-79939A)

(43) 公開日 令和2年5月28日(2020.5.28)

(51) Int.Cl.  
G02F 1/37 (2006.01)

F I  
G02F 1/37

テーマコード(参考)  
2K102

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2019-204261 (P2019-204261)  
 (22) 出願日 令和1年11月11日(2019.11.11)  
 (31) 優先権主張番号 特願2018-213226 (P2018-213226)  
 (32) 優先日 平成30年11月13日(2018.11.13)  
 (33) 優先権主張国・地域又は機関 日本国(JP)

(出願人による申告)平成25年度、独立行政法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業、総括実施型研究、研究プロジェクト名「ERATO美濃島知的シンセサイザプロジェクト」に係る産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 504133110  
 国立大学法人電気通信大学  
 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1  
 (74) 代理人 100107766  
 弁理士 伊東 忠重  
 (74) 代理人 100070150  
 弁理士 伊東 忠彦  
 (72) 発明者 桂川 眞幸  
 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内  
 Fターム(参考) 2K102 AA02 AA06 AA07 BA18 BB02  
 BC01 CA20 CA26 DA01 DC01  
 DC07 DD06 EB01 EB20 EB26  
 EB30

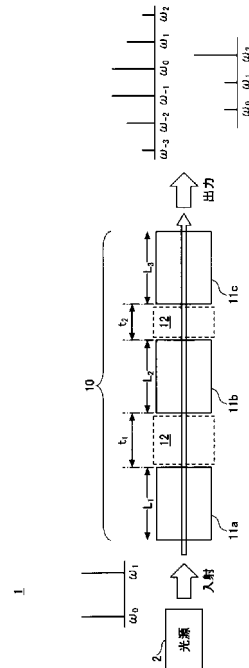
(54) 【発明の名称】 波長変換デバイス、及びこれを用いたレーザ装置

(57) 【要約】

【課題】簡単な構成で、非線形光学作用に関する電磁場の相対位相関係を制御して、高効率の波長変換を実現する。

【解決手段】波長変換デバイスは、2以上に分割された固体の非線形光学媒質と、前記非線形光学媒質の間に介在する分散媒質とを有し、前記非線形光学媒質のそれぞれの長さは、非線形光学現象が進行する過程で所望の結果を得るために位相操作が必要となる相互作用長に設計されており、前記分散媒質の光軸方向の光学長は、前記非線形光学媒質に入射する1以上の周波数成分と前記非線形光学媒質の中で生成される新たな周波数成分との間の相対位相関係が所望の関係となるように可変に調整されている。

【選択図】 図1A



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

2 以上に分割された固体の非線形光学媒質と、  
前記非線形光学媒質の間に介在する分散媒質と、  
を有し、

前記非線形光学媒質のそれぞれの長さは、非線形光学現象が進行する過程で所望の結果を得るために位相操作が必要となる相互作用長に設計されており、

前記分散媒質の光軸方向の光学長は、前記非線形光学媒質に入射する 1 以上の周波数成分と前記非線形光学媒質の中で生成される新たな周波数成分との間の相対位相関係が所望の関係となるように可変に調整されていることを特徴とする波長変換デバイス。 10

## 【請求項 2】

前記分散媒質は空気であり、

前記分散媒質の光軸方向の光学長は、前記非線形光学媒質の位置制御によって設定されていることを特徴とする請求項 1 に記載の波長変換デバイス。

## 【請求項 3】

前記波長変換デバイスを収容する容器、  
をさらに有し、

前記分散媒質は気体または液体であり、

前記容器の内部で前記非線形光学媒質の間隔が所定の間隔に設定されて、前記分散媒質の前記光学長が調整されていることを特徴とする請求項 1 に記載の波長変換デバイス。 20

## 【請求項 4】

前記波長変換デバイスを収容する容器、  
をさらに有し、

前記分散媒質は気体または液体であり、前記容器内の前記気体または前記液体の圧力が所定の値に設定されて前記分散媒質の前記光学長が調整されていることを特徴とする請求項 1 に記載の波長変換デバイス。

## 【請求項 5】

前記波長変換デバイスを収容する容器、  
をさらに有し、

前記分散媒質は、2 種以上の気体の混合気体、または 2 種以上の液体の混合液であり、前記混合気体または前記混合液の混合比率が所定の値に設定されて、前記分散媒質の前記光学長が調整されていることを特徴とする請求項 1 に記載の波長変換デバイス。 30

## 【請求項 6】

前記分散媒質は固体であり、

前記固体の分散媒質の前記光軸方向の厚さが所望の厚さに可変に設定されて前記分散媒質の前記光学長が調整されていることを特徴とする請求項 1 に記載の波長変換デバイス。

## 【請求項 7】

前記分散媒質は、使用波長に対して透明な一对のくさび型パーツで形成され、

前記一对のくさび型パーツの少なくとも一方が前記くさび型パーツの稜線に沿った方向に動かされて前記分散媒質の前記光学長が調整されていることを特徴とする請求項 6 に記載の波長変換デバイス。 40

## 【請求項 8】

前記分散媒質は、使用波長に対して透明なプレートで形成され、

前記プレートが前記光軸方向に対して所定の角度または傾きに設定されて前記分散媒質の前記光学長が調整されていることを特徴とする請求項 6 に記載の波長変換デバイス。

## 【請求項 9】

2 以上に分割された前記非線形光学媒質は、結晶軸の向きが交互に反転するように配置されていることを特徴とする請求項 1 ~ 8 のいずれか 1 項に記載の波長変換デバイス。

## 【請求項 10】

2 以上に分割された前記非線形光学媒質は、隣り合って配置される第 1 の非線形光学媒 50

質と第2の非線形光学媒質を含み、

前記第1の非線形光学媒質と前記第2の非線形光学媒質の間の距離は、前記第2の非線形光学媒質の入射面において、前記第1の非線形光学媒質に入射した前記1以上の周波数成分と、前記第1の非線形光学媒質の中で生成された新たな周波数成分との間で位相整合条件が満たされるように設定されていることを特徴とする請求項1～9のいずれか1項に記載の波長変換デバイス。

【請求項11】

請求項1～10のいずれか1項に記載の波長変換デバイスと、  
前記波長変換デバイスに入射する前記1以上の周波数成分を含む光を出力する光源と、  
を有するレーザ装置。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、波長変換デバイスと、これを用いたレーザ装置に関する。

【背景技術】

【0002】

レーザの発明により非線形光学の研究が進み、非線形光学効果を利用した波長変換、光パルス技術、非線形分光などの技術が普及している。特に波長変換は、レーザの直接発振が得られない波長域でコヒーレント光源を実現する有用な技術である。

【0003】

20

非線形光学現象が進行する過程に関与する複数の電磁場間の位相関係を制御して、非線形光学過程を操作またはデザインする試みが提案されている（たとえば、特許文献1参照）。この提案では、非線形光学媒質の中に1つ以上の透明な分散媒質を配置し、分散媒質の位置と実効的な厚みを調整することで、非線形光学過程を操作する。

【0004】

非線形光学媒質の複屈折が大きい場合、角度位相整合を用いる波長変換では、入射したレーザ光と、波長変換により発生したビームが分離するウォークオフ現象が生じて、十分な変換効率を得ることができない。ウォークオフを補償するために、 $-BBO$  ( $BaB_2O_4$ ; ホウ酸バリウム)の薄片を常温接合したウォークオフ補償構造が知られている（たとえば、非特許文献1参照）。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】再公表特許WO2015/170780号

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】小山修平, "常温接合を用いたウォークオフ補償  $-BaB_2O_4$  デバイスの高効率化に関する研究", 学校法人中央大学 修士論文要旨 (2016年度)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

40

【0007】

公知の非線形光学過程の操作技術では、非線形光学媒質中に分散媒質を配置し、非線形光学媒質内で分散媒質の実効的な厚さを制御している。光波に対する分散媒質の厚さは、分散媒質をくさび形状のペアで構成して一方の挿入厚みを変える、あるいは板状の分散媒質を用いて光軸に対する傾きを変える等によって調整可能である。しかし、非線形光学媒質内で分散媒質の挿入厚みや傾きを制御するため、分散媒質を駆動制御する機構が大掛かりになる。

【0008】

本発明は、簡単な構成で、非線形光学に関与する光波（電磁場）の相対位相関係を制御して、高効率の波長変換を実現することを目的とする。

50

## 【課題を解決するための手段】

## 【0009】

本発明では、2以上に分割した固体の非線形光学媒質の間に分散媒質を配置し、非線形光学媒質を透過する複数の周波数成分の間で所望の位相関係が得られるように、非線形光学媒質間に介在する分散媒質の光軸方向の光学長を調整する。

## 【0010】

分散媒質の光軸方向の光学長は、分散媒質の(実効的な)厚み、または屈折率の少なくとも一方を制御することで調整可能である。

## 【0011】

具体的には、波長変換デバイスは、

2以上に分割された固体の非線形光学媒質と、

前記非線形光学媒質の間に介在する分散媒質と、

を有し、

前記非線形光学媒質のそれぞれの長さは、非線形光学現象が進行する過程で所望の結果を得るために位相操作が必要となる相互作用長に設計されており、

前記分散媒質の光軸方向の光学長は、前記非線形光学媒質に入射する1以上の周波数成分と前記非線形光学媒質の中で生成される新たな周波数成分との間の相対位相関係が所望の関係となるように可変に調整されている。

## 【0012】

良好な構成例では、2以上に分割された前記非線形光学媒質は、その結晶軸が交互に反転するように配置されている。

## 【発明の効果】

## 【0013】

簡単な構成で、非線形光学に関与する複数の光波または電磁場の間の相対位相関係を制御して、多様な波長変換を高効率で実現する。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0014】

【図1A】実施形態の波長変換デバイスを用いたレーザ装置の概略図である。

【図1B】非線形光学媒質の位置制御の例を示す図である。

【図2】変形例の波長変換デバイスを用いたレーザ装置の概略図である。

【図3】さらに別の変形例の波長変換デバイスを用いたレーザ装置の概略図である。

【図4】さらに別の変形例の波長変換デバイスを用いたレーザ装置の概略図である。

【図5】非線形光学媒質間の各周波数成分の伝搬を説明する図である。

【図6】図1の構成にウォークオフ補償機能を持たせた構成例である。

【図7】ウォークオフ補償を説明する図である。

【図8】図7の配置構成での実測データである。

【図9】ウォークオフ補償の測定に用いた別のレーザ装置の模式図である。

【図10】図9の装置におけるウォークオフ補償の概念図である。

【図11】図9の装置における光パラメトリック増幅器の出力プロファイルである。

【図12】実施例の効果を示す図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0015】

図1Aは、実施形態の波長変換デバイス10を用いたレーザ装置1の概略図である。レーザ装置1は、光源2と、波長変換デバイス10を有する。光源2は、1以上の周波数成分を含むレーザ光を発生する。1以上の周波数成分は、たとえば、光源2に周波数コム光源を用いたときの離散的なスペクトル成分であってもよいし、光パラメトリック共振を用いてパルス化された離散スペクトルであってもよい。あるいは出力波長の異なる1以上のレーザダイオードで光源2を形成してもよい。

## 【0016】

波長変換デバイス10は、分散媒質12の中に配置される2以上に分割された固体の非

10

20

30

40

50

線形光学媒質 11 を有する。図 1 A では、分散媒質 12 の中に非線形光学媒質 11 a、11 b、11 c が配置されているが、非線形光学媒質 11 の数は 2 以上の任意の数である。非線形光学媒質 11 に十分な強度を持つ光波が入射することで、非線形光学媒質 11 の内部に入射電場に対して非線形な（2 次以上の）分極が生じ、その分極の振動から入射光と異なる周波数成分が発生する。

【0017】

分散媒質 12 は、その屈折率が周波数または波長に依存する媒質であり、気体、液体、固体を問わない。図 1 A の例では、分散媒質 12 は空気である。

【0018】

図 1 A の例で、光源 2 から波長変換デバイス 10 の 1 番目の非線形光学媒質 11 a に、たとえば角周波数が  $\omega_1$  と  $\omega_2$  の光波が入射する。これらの光波は十分な強度を有しており、非線形光学媒質 11 と相互作用して、電磁場に線形比例しない応答（分極）を生じさせる。

10

【0019】

波長変換デバイス 10 は非線形光学効果を利用しており、波長変換には、和周波または差周波の発生、高調波発生、光パラメトリック増幅、光パラメトリック発振等が含まれる。2 以上に分割された非線形光学媒質 11 を用いることで、電磁波が非線形光学媒質 11 と作用する過程で生じる新たな周波数成分を増強することができる。

【0020】

非線形光学媒質 11 a、11 b、11 c は、分散媒質 12 の中で光軸に沿って配置されている。非線形光学媒質 11 a、11 b、11 c の光軸方向の位置は、これらの非線形光学媒質 11 a ~ 11 c に入射する 1 以上の周波数成分と、非線形光学媒質 11 a ~ 11 c の中で生成される新たな周波数成分との間の相対位相関係が所望の関係となるように調整されている。非線形光学媒質 11 a ~ 11 c の光軸方向の位置が調整されているということは、分散媒質 12 の光軸方向の光学長  $t_1$ 、 $t_2$  が調整されていることを意味する。分散媒質 12 の光軸方向の光学長  $t_1$ 、 $t_2$  は、分散媒質 12 を透過する光の実効光路長であり、分散媒質 12 の屈折率を制御することによっても調整可能である。

20

【0021】

非線形光学媒質 11 a ~ 11 b の光軸方向の長さ  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  は、後述するように非線形光学現象が進行する過程で所望の結果を得るために、複数の周波数成分間の位相関係が所望の値に操作されるべき長さに設定されている。非線形光学媒質 11 の光軸方向の長さ  $L$  もまた、非線形光学媒質 11 を透過する光の実効光路長を指す。

30

【0022】

図 1 A の例では、分割された非線形光学媒質 11 の間には、空気等の分散媒質 12 が存在する。分散媒質 12 の光軸方向の光学長  $t$  の調整は、手動調整、機械及び/または電気駆動による調整、光学的制御など、手段を問わない。

【0023】

図 1 B は、非線形光学媒質 11 の位置制御の例を示す図である。レーザ装置 1 A の波長変換デバイス 10 A は、2 以上に分割された複数の非線形光学媒質 11 a ~ 11 c と、隣り合う非線形光学媒質 11 の間を満たす分散媒質 12 を有する。この例では、波長変換デバイス 10 A の非線形光学媒質 11 a ~ 11 c の位置は、位置調整機構 15 によって制御可能である。位置調整機構 15 の一例として、光軸と平行な方向に延びるレールに、非線形光学媒質 11 a、11 b、11 c を個別に保持する支持体を設け、各支持体の位置を並進アクチュエータ、モータ、MEMS 等の駆動手段によって制御してもよい。

40

【0024】

非線形光学媒質 11 a、11 b、11 c の光軸方向の位置を互いに独立して制御することで、隣り合う非線形光学媒質 11 間の間隔（すなわち、分散媒質 12 の光軸方向の光学長  $t$ ）を調整可能にする。非線形光学媒質 11 の光軸方向の長さ  $L$  は所望の相対位相関係への操作を必要とする長さに設計される。

【0025】

50

非線形光学媒質 11a と 11b の間に介在する分散媒質 12 の光軸方向の光学長  $t_1$ 、及び非線形光学媒質 11b と 11c の間に介在する分散媒質 12 の光軸方向の光学長  $t_2$  は、波長変換デバイス 10A の全体にわたって位相整合条件が維持されるように調整されている。あるいは波長変換デバイス 10A の所望の位置で、所望の相対位相関係が得られるように、調整されていてもよい。

【0026】

分散媒質 12 の光軸方向の光学長  $t_1$ 、 $t_2$  は、非線形光学媒質 11a、11b、11c の少なくとも一部の光軸方向の位置を位置調整機構 15 で調整することで、変更可能である。図 1B の構成は、空気中で、非線形光学媒質 11a ~ 11c を簡単な位置調整機構 15 に保持するだけで実現可能である。

10

【0027】

非線形光学媒質 11 の内部で発生する新たな周波数成分が十分な強度を持つためには、1 以上の入射光成分の間、及び / または入射光と新たに発生する周波数成分との間で位相が整合している必要がある。この位相整合条件は、次の非線形光学媒質 11 に入射する時点でも保たれていることが望ましい。分散媒質 12 の光軸方向の実効的な長さである光学長  $t$  を位置調整機構 15 で高精度に調整して、次の非線形光学媒質 11 への入射位置で位相整合条件が満たされているように制御することで、波長変換デバイス 10A で高い変換効率を達成することができる。

【0028】

さらに、非線形光学媒質 11 の光軸方向の長さ  $L$  を適切な値に設定することで、複数の周波数成分間の位相関係を適切な相互作用長において所望の関係に設計することが可能である。波長変換デバイス 10A のどの位置でどの位相関係にもっているかを自由に設計することができ、波長変換デバイス 10A の最終的な出力として、図 1A 及び図 1B に示すように、所望の周波数プロファイルを得ることができる。

20

【0029】

図 2 は、波長変換デバイス 10B を用いたレーザ装置 1B の概略図である。波長変換デバイス 10B では、隣接する非線形光学媒質 11 間に配置される分散媒質 12 の少なくとも一部に、固体の分散媒質 12a、12b を用いる。固体の分散媒質 12a、12b は、たとえば、使用波長に対して透明なガラス、ケイ酸塩、フッ化カルシウム、フッ化マグネシウム等である。

30

【0030】

図 2 の例では、非線形光学媒質 11a と 11b の間に配置される分散媒質 12a は、一対のくさび型のパーツ 12a<sub>1</sub> と 12a<sub>2</sub> で構成されている。非線形光学媒質 11b と 11c の間に配置される分散媒質 12b は、一対のくさび型のパーツ 12b<sub>1</sub> と 12b<sub>2</sub> で構成されている。分散媒質 12a と 12b のいずれか一方を空気層としてもよい。

【0031】

固体の分散媒質 12a の光軸方向の光学長  $t_1$  を可変に制御する場合、パーツ 12a<sub>1</sub> と 12a<sub>2</sub> の少なくとも一方をくさびの稜線に沿った方向に動かす。分散媒質 12a<sub>1</sub> 及び / または 12a<sub>2</sub> の位置は手動で調整してもよいし、図 1B のように位置調整機構 15 に接続してもよい。同様に、分散媒質 12b の光軸方向の光学長  $t_2$  を可変に制御する場合、パーツ 12b<sub>1</sub> と 12b<sub>2</sub> の少なくとも一方をくさびの稜線に沿った方向に動かす。図 1B のように位置調整機構 15 に接続する場合は、分散媒質 12a と分散媒質 12b を互いに独立して移動可能にしてもよい。パーツ 12a<sub>1</sub> 及び / または 12a<sub>2</sub> の稜線方向への移動量と、パーツ 12b<sub>1</sub> 及び / または 12b<sub>2</sub> の稜線方向への移動量は、非線形光学媒質 11 と空気の屈折率差、及び空気と固体の分散媒質 12a、12b との屈折率差を考慮して計算されてもよい。

40

【0032】

図 3 は、波長変換デバイス 10C を用いたレーザ装置 1C の概略図である。波長変換デバイス 10C では、隣接する非線形光学媒質 11 間に配置される分散媒質 12 の少なくとも一部に、直方体またはプレート状の分散媒質 12c、12d を用いる。固体の分散媒質

50

12c、12dは、たとえば、使用波長に対して透明なガラス、ケイ酸塩、フッ化カルシウム、フッ化マグネシウム等である。分散媒質12cと12dのいずれか一方を空気層としてもよい。

【0033】

固体の分散媒質12cの光軸方向の光学長 $t_1$ 、及び/または分散媒質12dの光軸方向の光学長 $t_2$ を可変に制御する場合、分散媒質12c及び/または分散媒質12dの光軸に対する傾きまたは回転角を変える。分散媒質12c、12dの光軸に対する傾きを、図1Bのように位置調整機構15を用いて調整してもよい。分散媒質12c、12dの傾きまたは回転量は、非線形光学媒質11と空気の屈折率差、及び空気と分散媒質12c、12dとの屈折率差を考慮して計算されてもよい。

10

【0034】

図4は、波長変換デバイス10Dを用いたレーザ装置1Dの概略図である。波長変換デバイス10Dでは、隣り合う非線形光学媒質11の間を満たす分散媒質12として液体、または空気以外の気体を用いる。分散媒質12に空気以外の気体、あるいは液体を用いる場合は、波長変換デバイス10Aの全体が、入射側と出射側に透過窓22と透過窓23をそれぞれ設けた容器21の内部に配置される。

【0035】

空気以外の気体の分散媒質12として、窒素、アルゴンなどの不活性気体、あるいは空気に窒素、アルゴン等の不活性気体を混合したものなどを用いることができる。分散媒質12として液体を用いる場合は、屈折率が周波数または波長に依存する有機溶剤、光学ゲル等を用いることができる。

20

【0036】

容器21内に液体または空気以外の気体を充填する場合、容器21の外部に配置した位置調整機構15を用いて非線形光学媒質11a~11cの位置を制御することで、分散媒質12の光軸方向の光学長 $t_1$ 、 $t_2$ を調整してもよい。

【0037】

あるいは、空気に混合する窒素、アルゴン等の不活性ガスの混合比率、または2種以上の液体の混合比率を変えて分散媒質12の屈折率を変化させることで、分散媒質12の光軸方向の光学長 $t_1$ 、 $t_2$ を調整してもよい。さらに、分散媒質12の圧力を変えることで屈折率を変化させて、分散媒質12の光学長 $t_1$ 、 $t_2$ を調整してもよい。

30

【0038】

図5は、複数の非線形光学媒質11間での各周波数成分の伝搬を説明する図である。波長変換デバイス10で、1番目の非線形光学媒質11aへの入射位置を位置I、非線形光学媒質11aへの入射直後の位置を位置II、非線形光学媒質11aの出射面での位置を位置IIIとする。2番目の非線形光学媒質11bへの入射位置を位置IV、非線形光学媒質11bの入射直後の位置を位置Vとする。

【0039】

非線形光学媒質11aの光軸方向への伝搬長はLである。非線形光学媒質11aと11bの間隔、すなわち分散媒質12の光軸方向への伝搬長(光学長)はtである。波長変換デバイス10に角周波数が $\omega_1$ と $\omega_2$ の周波数成分が入射して、周波数成分 $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ を発生させる波長変換を考える。

40

【0040】

位置Iでの角周波数 $\omega_1$ の光波の位相を $\phi_{I,1}$ 、位置Iでの角周波数 $\omega_2$ の光波の位相を $\phi_{I,2}$ 、位置IIでの角周波数 $\omega_1$ の光波の位相を $\phi_{II,1}$ 、位置IIでの角周波数 $\omega_2$ の光波の位相を $\phi_{II,2}$ とする。

【0041】

位置IIでは、 $\omega_1$ 及び $\omega_2$ の入射光と非線形光学媒質11aとの相互作用により、 $\omega_3$ の周波数成分の発生が開始される。位置IIでの $\omega_3$ の位相を $\phi_{II,3}$ とすると、 $\phi_{II,3} = \phi_{I,1} + \phi_{I,2} + \phi_{II,1} + \phi_{II,2} + \phi_{II,3}$ である。位置Iと位置IIの界面では $\omega_3$ の発生はまだないので、 $\phi_{I,3} = \phi_{II,3} - \phi_{II,1} - \phi_{II,2} - \phi_{II,3} = \phi_{I,1} + \phi_{I,2} - \phi_{II,1} - \phi_{II,2}$ の非線形分極は起きておらず、 $\phi_{I,1} = \phi_{II,1}$ 、 $\phi_{I,2} = \phi_{II,2}$ である

50

。入射直後の位置IIでの光波間の位相差  $\phi_{II}$  は、

$$\phi_{II} = \phi_{II,3} - (\phi_{II,1} + \phi_{II,2} + \pi/2) = 0$$

である。

【0042】

位置IIIまで、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ の周波数成分が光路長Lだけ伝搬すると、位置IIIでの各周波数成分の位相は以下ようになる。

【0043】

$$\phi_{III,1} = k_1 L + \phi_{II,1}$$

$$\phi_{III,2} = k_2 L + \phi_{II,2}$$

$$\phi_{III,3} = k_3 L + \phi_{II,3}$$

ここで、 $k_1$ 、 $k_2$ 、及び $k_3$ は、非線形光学媒質11a中での各周波数成分の波数である。位置III、すなわち非線形光学媒質11aの出射面において、光波間で位相整合がとれているとすると、以下ようになる。

【0044】

$$\begin{aligned} \phi_{III} &= [k_3 - (k_1 + k_2)] L + \phi_{III,3} - (\phi_{III,1} + \phi_{III,2} + \pi/2) \\ &= k L + \phi_{II} = 0 \end{aligned}$$

位置IIIから位置IVまで、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ の周波数成分がそれぞれ波数 $k_1'$ 、 $k_2'$ 、 $k_3'$ で分散媒質12中を距離dだけ伝搬すると、2番目の非線形光学媒質11bの入射面の位置IVでの $\phi_{IV}$ 、および $\phi_{III}$ に相当する位相は、以下ようになる。

【0045】

$$\phi_{IV,1} = k_1' d + \phi_{III,1}$$

$$\phi_{IV,2} = k_2' d + \phi_{III,2}$$

$$\phi_{IV,3} = k_3' d + \phi_{III,3}$$

位置IVでの各周波数成分の位相差は、以下ようになる。

【0046】

$$\phi_{IV} = [k_3' - (k_1' + k_2')] d + \phi_{III} = [k_3' - (k_1' + k_2')] d$$

非線形光学媒質11bの入射直後の位置Vで、非線形光学媒質11bを伝搬する光波について、 $\phi_3 = \phi_1 + \phi_2$ の分極を考えると、位置Vでの各周波数成分の位相は、以下ようになる。

【0047】

$$\phi_{V,3} = \phi_{IV,1} + \phi_{IV,2} + \pi/2$$

このとき、非線形光学媒質11aで発生する周波数成分 $\omega_3$ と非線形光学媒質11bで新たに発生する周波数成分 $\omega_3$ の位相差は、

$$\begin{aligned} \phi_V &= \phi_{V,3} - \phi_{IV,3} = \phi_{IV,3} - (\phi_{IV,1} + \phi_{IV,2} + \pi/2) \\ &= \phi_{IV} = [k_3' - (k_1' + k_2')] d \end{aligned}$$

となる。

【0048】

所望の目的が、長い相互作用長に渡って位相のずれを起こさずに和周波 $\omega_3$ を高強度に発生させたい、ということである場合には、位置Vでの位相差 $\phi_V$ が $2m$  ( $m$ は整数)となるように分散媒質12の光学長 $t$ を調整すればよい。このときに位相のずれを起こさずに(位相整合条件を保って)、和周波 $\omega_3$ を足し合わせることができる。このとき、非線形光学媒質11aと11bの間の距離、すなわち分散媒質12の光軸方向の光学長 $t$ は、 $\phi_V = 2m$  ( $m$ は整数)を満たすように決定される。

【0049】

波数 $k$ 、波長 $\lambda$ 、及び屈折率 $n$ の関係は、 $k = 2\pi n / \lambda$ となるので、位置Vでの位相差 $\phi_V$ は式(1)で表される。

【0050】

10

20

30

40



【数 1】

$$\Delta\varphi_V = 2\pi \left[ \frac{n'_3}{\lambda_3} - \left( \frac{n'_1}{\lambda_1} + \frac{n'_2}{\lambda_2} \right) \right] t \quad (1)$$

分散媒質 1 2 を空気または窒素とする場合、下記の空気と窒素の分散式を用いて、位相  
 10 整合が得られる、すなわち  $v = 2m$  ( $m$  は整数) となる距離  $d$ 、すなわち分散媒質  
 1 2 の光学長  $t$  を計算する。

【0051】

【数 2】

$$n_{\text{air}}(\lambda) = \left( 6432.8 + \frac{2949810}{146 - \frac{1}{(\lambda \times 10^6)^2}} + \frac{25540}{41 - \frac{1}{(\lambda \times 10^6)^2}} \right) \times 10^{-8} + 1$$

(0.2 × 10<sup>-6</sup> < λ < 1.35 × 10<sup>-6</sup> at 20°C)

20

$$n_{\text{nitro}}(\lambda) = \left( 6497.378 + \frac{3073864.9}{144 - \frac{1}{(\lambda \times 10^6)^2}} \right) \times 10^{-8} + 1$$

(at 20°C)

非線形光学媒質 1 1 a、1 1 b が第 2 高調波発生用の結晶の場合、基本波を 7 4 8 . 8  
 8 nm とすると、位相整合条件  $v = 2$  ( $m = 1$ ) を満たす結晶間の距離、すなわち  
 分散媒質 1 2 の光軸方向の光学長  $t$  は、空気 (20、1 気圧) の場合で 4 2 . 0 4 mm  
 30 窒素 (20、1 気圧) の場合で 4 4 . 3 3 mm である。

【0052】

基本波 (7 4 8 . 8 8 nm) と第 2 高調波 (3 7 4 . 4 4 nm) を混合して第 3 高調波  
 (2 4 9 . 6 3 nm) を発生させる結晶の場合は、位相整合条件  $v = 2$  ( $m = 1$ )  
 を満たす結晶間の距離、すなわち分散媒質 1 2 の光軸方向の光学長  $t$  は、空気の場合で  
 2 . 3 3 5 mm、窒素の場合で 1 3 . 5 1 9 mm である。

【0053】

波長変換デバイス 1 0 で用いられる非線形光学媒質 1 1 の間隔、すなわち分散媒質 1 2  
 40 の光軸方向の光学長  $t$  を制御することで、波長変換デバイス 1 0 の全体で位相整合を維持  
 し変換効率を高く維持することができる。

【0054】

&lt;ウォークオフ補償&gt;

図 6 は、実施形態の波長変換デバイス 1 0 E にウォークオフ補償機能を持たせた構成図  
 である。入射光の光軸または伝搬軸を Z 軸、波長変換デバイス 1 0 が配置される面を Y -  
 Z 面、結晶の高さ方向を X 軸とする。図 6 では、非線形光学媒質 1 1 は、その C 軸が Y -  
 Z 面と平行な面内にあるように配置されている。

【0055】

ウォークオフは、非線形光学媒質 1 1 の複屈折性により、伝搬につれて入射レーザ光と  
 50

波長変換により発生したビームが分離する現象をいう。ウォークオフは、結晶軸に対する角度依存性のある光成分で生じる。ウォークオフにより、波長変換デバイス10の出力段でのビームプロファイルがくずれ、変換効率が低下する。

#### 【0056】

図6では、ウォークオフを補償するために、波長変換デバイス10Aで用いられる非線形光学媒質11a~11dのC軸の向きを交互に入れ替えている。たとえば、交互に結晶の上下を逆にして配置することで、結晶のC軸は図中の矢印で示される向きになる。このように配置することで、図7に示すようにウォークオフの方向を反転させて、出射面において波長変換光の基本光からのずれを小さくすることができる。この構成は、非線形光学媒質11の複屈折が大きい場合に有効である。

10

#### 【0057】

##### <実験例>

図7の配置構成で、非線形光学媒質11a、11bとして同じ厚み(光軸方向の光学長 $L = 6 \text{ mm}$ )のLBO( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ :リチウムトリボレート)を配置し、波長 $787 \text{ nm}$ 、エネルギー $14.5 \text{ mJ}$ のナノ秒パルスレーザー光を基本波として、二倍波を発生させる。

#### 【0058】

図8は得られた観測結果である。横軸は結晶間隔 $t_1$ に相当する距離(mm)、縦軸は結晶11bの直後での二倍波出力エネルギー(mJ)である。黒丸が実測値、実線がフィッティングカーブである。この実験で、分散媒質12として空気(22、1気圧)が用いられている。

20

#### 【0059】

図8に見られるように、観測された二倍波出力エネルギーの最大値は $1.35 \text{ mJ}$ 、最小値は $0 \text{ mJ}$ である。一つ目の結晶11a直後での二倍波発生エネルギーは、 $0.4 \text{ mJ}$ である。

#### 【0060】

空気の分散により、基本波( $787 \text{ nm}$ )と二倍波( $393.5 \text{ nm}$ )の間の相対位相関係が変化し、それに応じて2個目の非線形光学結晶11bの透過後の二倍波発生エネルギーが、 $0 \sim 1.35 \text{ mJ}$ まで $0 \sim 100\%$ の幅で周期的に変化する。観測された結晶間隔 $t_1$ の周期は $50.5 \text{ mm}$ であり、分散媒質12である空気の分散から予想される計算値( $50.2 \text{ mm}$ )に測定精度の範囲内で一致することが確認された。

30

#### 【0061】

図9は、ウォークオフ補償の測定に用いた別のレーザー装置1の模式図である。レーザー装置1は、波長変換デバイス10として、光パラメトリック増幅器を構成している。非線形光学媒質11として、KTP( $\text{KTiOPO}_4$ :リン酸チタニルカリウム)を用いる。

#### 【0062】

第1のKTPの光軸方向の長さ $L_1$ は $2.5 \text{ mm}$ 、第2のKTPの光軸方向の長さ $L_2$ は $5 \text{ mm}$ 、第3のKTPの光軸方向の長さ $L_3$ は $5 \text{ mm}$ 、第4のKTPの光軸方向の長さ $L_4$ は $2.5 \text{ mm}$ である。分散媒質12は空気(20、1気圧)である。

#### 【0063】

第1のKTPと第2のKTPの間隔(または分散媒質12の光学長 $t_1$ )は $493.4 \text{ mm}$ 、もしくは $493.4 \text{ mm}$ に比べて十分に小さい距離(たとえば $20 \text{ mm}$ 以下)である。第2のKTPと第3のKTPの間隔(または分散媒質12の光学長 $t_2$ )は $493.4 \text{ mm}$ 、もしくは $493.4 \text{ mm}$ に比べて十分に小さい距離(たとえば $20 \text{ mm}$ 以下)、第3のKTPと第4のKTPの間隔(または分散媒質12の光学長 $t_3$ )は $493.4 \text{ mm}$ 、もしくは $493.4 \text{ mm}$ に比べて十分に小さい距離(たとえば $20 \text{ mm}$ 以下)である。

40

#### 【0064】

目的が、ウォーク補償機構を組み入れることで長い相互作用長に渡って入射レーザー光と波長変換光により発生したビームを空間的に重ね合わせ、光パラメトリック増幅を強く

50

起こさせることにある場合は、光学長  $t_1 \sim t_3$  は、上述したように位相整合条件が満たされるように設定される。位相整合条件  $\nu = 2$  ( $m = 1$ ) を満たすときの間隔 (光学長  $t$ ) の理論値は  $493.4 \text{ mm}$  であるが、図 9 の構成でパラメトリック過程を測定する場合、 $493.4 \text{ mm}$  の間隔は長すぎるので、 $493.4 \text{ mm}$  よりも十分に小さい値 (位相整合条件のずれを無視できる程度に小さい値) に設定して結晶への入射光の強度を維持する。

#### 【0065】

非線形光学媒質 11a ~ 11d として用いられる 4 つの KTP は、図 6 と同様に、Y-Z 面内での C 軸の向き (図中の矢印で示されている) が互い違いに逆方向を向くように配置反転されている。結晶軸の方向を互い違いにしてウォークオフを補償する際は、用いる非線形光学媒質 11 の数を偶数個にして、光軸方向の midpoint に対して対称な配置とするのが望ましい。

10

#### 【0066】

光源 2 から波長変換デバイス 10 に、波長  $1201 \text{ nm}$  のシグナル光パルスと、波長  $801 \text{ nm}$  のポンプ光パルスを入射する。ポンプ光パルスは、非線形光学媒質 11 に大きな非線形分極を誘起させるためのものである。 $1201 \text{ nm}$  のシグナル光パルスは、外部共振器型半導体レーザー (ECDL: External Cavity Diode Laser) で発振させた  $1200 \text{ nm}$  帯の CW (連続波) レーザ光を、周期分極反転リチウム・ナイオベート (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate) 結晶を用いた光パラメトリック共振器によりパルス化して生成される。

20

#### 【0067】

この波長変換デバイス 10 は、波長  $2403 \text{ nm}$  のアイドラー光を生成する。

#### 【0068】

図 10 に示すように、KTP の C 軸の向きを交互に反転することで、波長  $2403 \text{ nm}$  の変換光のウォークオフが補償され、波長変換デバイス 10 の出力面で、基本波からのアイドラー光のビームのずれが最小になっている。

#### 【0069】

1 つ目の非線形光学媒質 11a と 2 つ目の非線形光学媒質 11b の間の間隔、ずなわち分散媒質 12 の光学長  $t$  は、位相整合条件  $= [k_3 - (k_1 + k_2)] t = 2$  ( $m = 1$ ) を満たす値よりも十分に小さく設定されている。

30

#### 【0070】

ここで、 $k_3$  はポンプ光の波数、 $k_1$  はシグナル光の波数、 $k_2$  はアイドラー光の波数である。2 つ目の非線形光学媒質 11b に入射するアイドラー光と、ポンプ光及びシグナル光の位相は整合しており、アイドラー光は強め合う方向に働いて、非線形光学媒質 11b で十分な強度の新たなアイドラー光が生成される。3 つ目以降の非線形光学媒質 11 についても位相整合条件が満たされる配置となっている。

#### 【0071】

図 11 は、図 9 の波長変換デバイス 10 からの出力プロファイルである。図 11 の (A) は結晶の C 軸が存在する面に垂直な方向 (x 軸方向) のプロファイル、図 11 の (B) は、Y 軸方向のプロファイルである。XY 面は伝搬方向 Z と直交する面である。非線形光学媒質 11a ~ 11b の結晶軸の向きが交互に反転するように配置し、かつ波長変換デバイス 10 の全体を通して位相整合条件が満たされるように配置することで、ウォークオフが補償され、x 軸方向と y 軸方向の双方で対称性の高いビームプロファイルが得られる。また、十分な強度のアイドラー光を得ることができ、変換効率を高く維持することができる。

40

#### 【0072】

図 12 は、実施例の効果を示す図である。横軸は結晶の数、縦軸は変換効率 (%) である。変換効率は、基本波エネルギーに対する二倍波の発生エネルギーの比 (二倍波発生エネルギー / 基本波エネルギー) で求める。

#### 【0073】

50

ここでは、光軸に沿って7個の結晶を配置し、波長750nmの単一周波数ナノ秒パルスレーザー光（基本波）の二倍波（波長375nm）を発生させる。二倍波の発生は、図5を参照して説明した和周波発生における、 $2 \times 3 = 1 = 2$ の場合と考えてもよい。

#### 【0074】

二倍波の発生に用いる結晶は、光軸方向の長さ（L）が6mmの、タイプ1のLBOである。同じ形状の7個のLBO結晶を、ウォークオフをキャンセルするようにC軸を交互に反転させて配置し（図6参照）、変換効率を測定する。この条件での最適な結晶間隔、すなわち分散媒質としての空気層の光軸方向の光学長tは、43.1mmである。上述した式（1）と空気の分散式から計算される最適な結晶間隔は42.9mmであるが、図8のように実測値の2の周期で得られる結晶間隔は43.1mmであり、測定精度の範囲内で一致する。

10

#### 【0075】

ラインAは、7個のLBO結晶を最適位置に配置したとき、すなわち隣接する結晶間の間隔、または分散媒質の光軸方向の光学長を最適にしたときの変換効率を示す。ラインBは、7個のLBO結晶のすべてを、最適位置から1mmずれた位置に配置したときの変換効率である。ラインCは、結晶間隔を制御せずに、7個のLBO結晶を4~5cmの間隔で適当に配置したときの変換効率である。

#### 【0076】

非線形光学結晶の配置位置を制御しない場合、ラインCのように結晶の数が3個程度であれば、厳密に位置制御する場合と同じく、50%程度までの変換効率を得られる。結晶の数が3個を超えるとラインCの変換効率は低下し、5個を超えると位相不整合が累積されて、ラインAとの格差が増大する。

20

#### 【0077】

最適位置から1mmずらしたときのラインBは、結晶数が6個まではラインAと同様の傾向を示し、変換効率が単純増加するが、ラインAに比べて変換効率が低い。結晶数が6個を超えると、位相整合条件を維持できなくなり、変換効率が低下する。

#### 【0078】

分割された複数の非線形光学結晶を光軸に沿って配置する場合、結晶の数が多くなるほど変換効率が高くなる。2つ目以降のすべてのLBO結晶の入射面で位相整合条件が保たれるようにLBO結晶を配置することで、二倍波の成分が減衰せずに出力される。7個目のLBO結晶の出力段階では、82%という極めて高いエネルギー変換効率を得られる。

30

#### 【0079】

LBO結晶の光軸方向の長さは、その出射面で位相整合条件が満たされる長さであることが好ましいが、出射面で厳密に位相整合条件が満たされていなくても、結晶間隔を制御して、分散媒質の光学長を制御することで、高いエネルギー変換効率で和周波、差周波、二倍波、三倍波等を発生させることができる。量産された同じ形状の非線形光学結晶を複数用いて、最適な位置に配置するだけで、波長変換デバイスを実現することができる。

#### 【0080】

以上、特定の構成例に基づいて本発明を説明してきたが、本発明は上述した実施形態に限定されない。たとえば、図2の波長変換デバイス10Bと、図3の波長変換デバイス10Cにウォークオフ補償構成を適用することができる。この場合、偶数個の非線形光学媒質11を光軸方向の中心に対して対称に配置し、かつC軸の向きを交互に反転させて配置する。

40

#### 【0081】

非線形光学媒質11としては、LBO、KTP、 $\beta$ -BBO、PPLNの他に、ニオブ酸リチウム（LiNbO<sub>3</sub>）、ホウ酸セシウムリチウム（CLBO）、ホウ酸カリウムアルミニウム（KABO）、リン酸二水素カリウム（KDP）などを用いてもよい。

#### 【0082】

実施形態のレーザー装置は、半導体リソグラフィ光源、短波長加工レーザー、遠隔環境計測レーザー、光学顕微鏡等に好適に適用することができる。

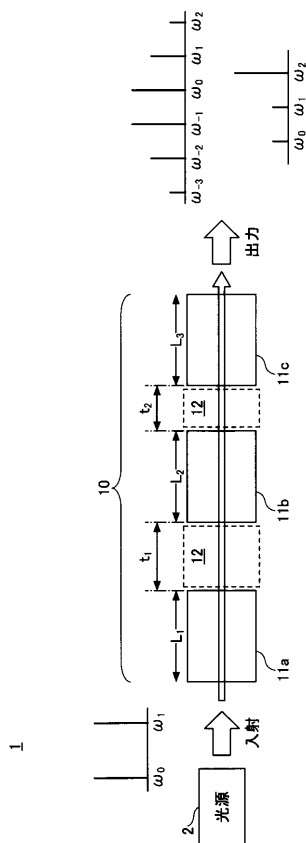
50

【符号の説明】

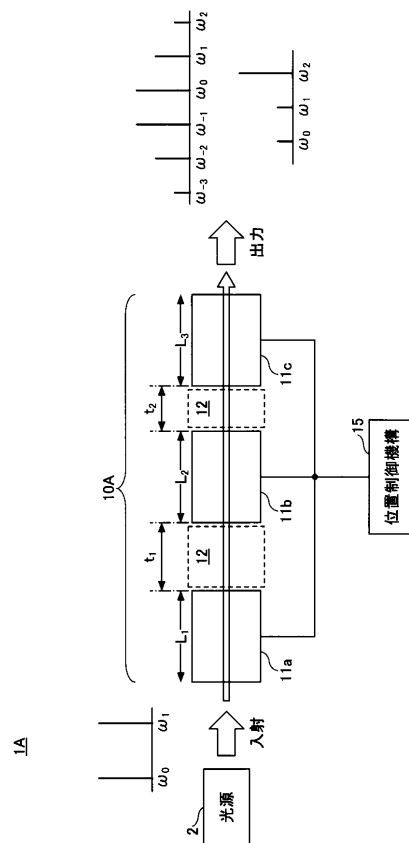
【0083】

- 1、1A～1D レーザ装置
- 2 光源
- 10、10A～10E 波長変換デバイス
- 11、11a～11d 非線形光学媒質
- 12、12a、12b 分散媒質

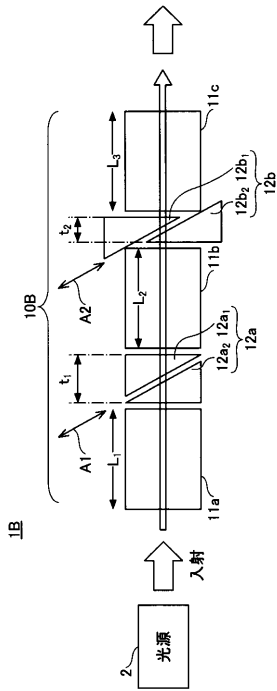
【図1A】



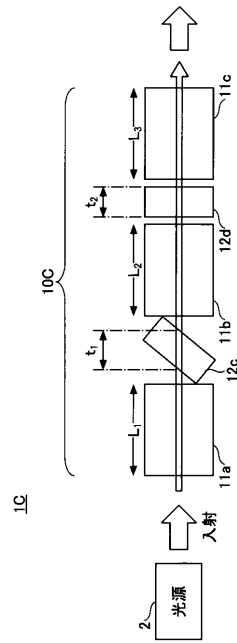
【図1B】



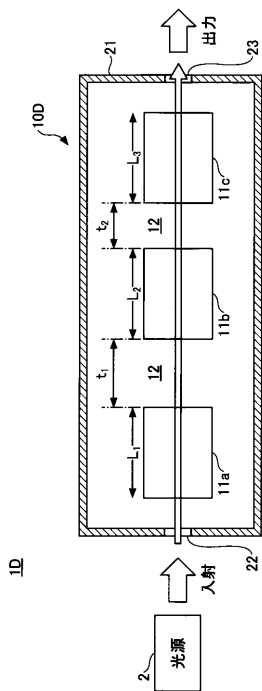
【 図 2 】



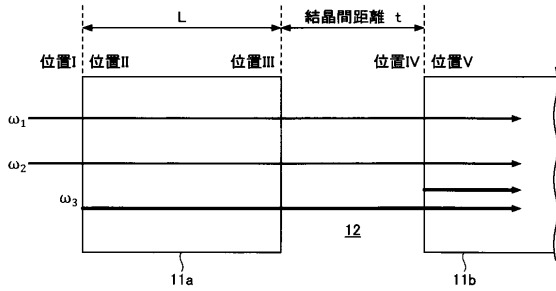
【 図 3 】



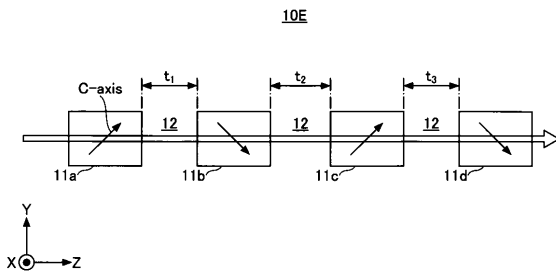
【 図 4 】



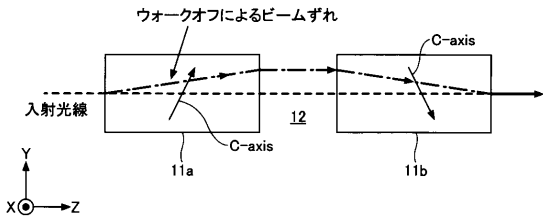
【 図 5 】



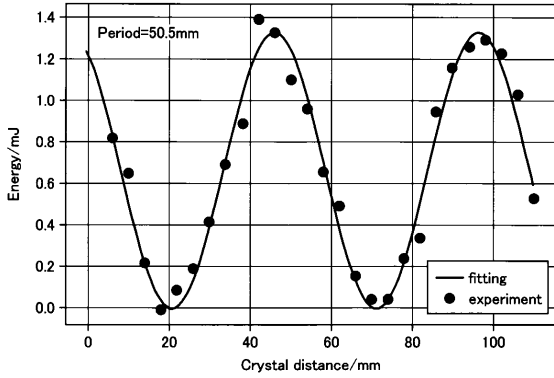
【 図 6 】



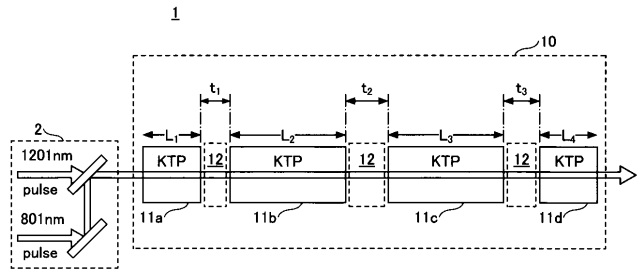
【 図 7 】



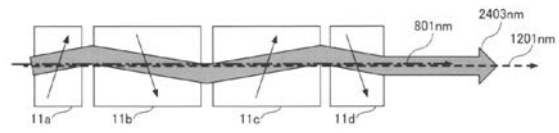
【 図 8 】



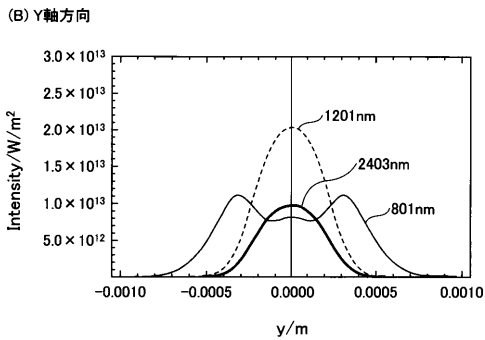
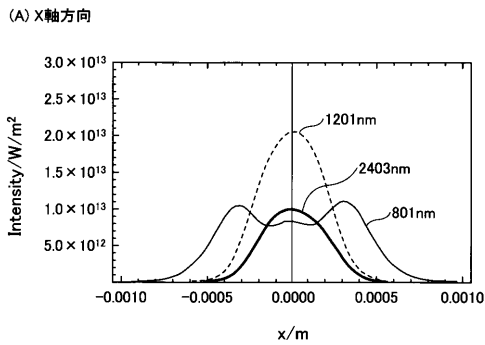
【 図 9 】



【 図 10 】



【 図 11 】



【 図 12 】

