

(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2017-107073

(P2017-107073A)

(43) 公開日 平成29年6月15日(2017.6.15)

(51) Int.Cl.  
G02F 1/39 (2006.01)

F I  
G02F 1/39

テーマコード (参考)  
2K102

審査請求 未請求 請求項の数 16 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2015-240843 (P2015-240843)  
(22) 出願日 平成27年12月10日 (2015.12.10)

(71) 出願人 000001007  
キヤノン株式会社  
東京都大田区下丸子3丁目30番2号  
(74) 代理人 100094112  
弁理士 岡部 譲  
(74) 代理人 100096943  
弁理士 臼井 伸一  
(74) 代理人 100101498  
弁理士 越智 隆夫  
(74) 代理人 100107401  
弁理士 高橋 誠一郎  
(74) 代理人 100106183  
弁理士 吉澤 弘司  
(74) 代理人 100128668  
弁理士 齋藤 正巳

最終頁に続く

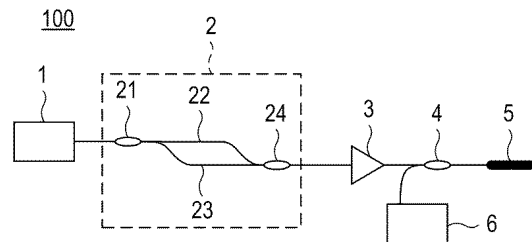
(54) 【発明の名称】 光源装置およびそれを用いた情報取得装置

(57) 【要約】

【課題】 スペクトル形状に歪みが少ない光パルスを得る。

【解決手段】 第1の波長を有するポンプ光パルスを導入する導入部と、ポンプ光パルスの波形を整形する整形部と、光パラメトリック過程により、整形部で整形されたポンプ光パルスから、第1の波長とは異なる第2の波長を有する波長変換光パルスを発生する非線形導波路と、を備え、整形部は、整形されたポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値が、整形部により整形される前のポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値よりも小さくなるように、ポンプ光パルスの波形を整形する。

【選択図】 図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

第 1 の波長を有するポンプ光パルスを導入する導入部と、  
前記ポンプ光パルスの波形を整形する整形部と、  
光パラメトリック過程により、前記整形部で整形されたポンプ光パルスから、前記第 1 の波長とは異なる第 2 の波長を有する波長変換光パルスを発生する非線形導波路と、を備え、

前記整形部は、前記整形されたポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値が、前記整形部により整形される前の前記ポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値よりも小さくなるように、前記ポンプ光パルスの波形を整形することを特徴とする光源装置。

10

**【請求項 2】**

請求項 1 に記載の光源装置において、

前記整形部は、前記整形されたポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値が、前記整形される前の前記ポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値よりも小さく、かつ、前記整形されたポンプ光パルスの半値点における波形の時間変化率の絶対値が、前記整形される前の前記ポンプ光パルスの半値点における波形の時間変化率の絶対値よりも大きくなるように、前記ポンプ光パルスの波形を整形することを特徴とする光源装置。

20

**【請求項 3】**

請求項 1 に記載の光源装置において、

前記整形部は、整形前と整形後とでポンプ光パルスの半値全幅が一致するように前記ポンプ光パルスの波形が相似変換されたとして、前記整形されたポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値が、前記整形される前の前記ポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値よりも小さくなるように、前記ポンプ光パルスの波形を整形することを特徴とする光源装置。

**【請求項 4】**

請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、

前記整形部は、前記波長変換光パルスの波形と前記ポンプ光パルスの波形とが重ならない期間において、前記整形されたポンプ光パルスの強度が、前記整形される前の前記ポンプ光パルスの強度よりも小さくなるように前記ポンプ光パルスを整形することを特徴とする光源装置。

30

**【請求項 5】**

請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、

前記波長変換光パルスのシード光を導入するシード光導入部と、

前記シード光導入部によって導入された前記波長変換光パルスのシード光と前記整形部によって整形されたポンプ光パルスとを合波して前記非線形導波路に導波する合波部と、  
を更に備え、

前記非線形導波路は、前記整形されたポンプ光パルスから前記波長変換光パルスへのエネルギー変換を誘起することにより、前記波長変換光パルスを増幅することを特徴とする光源装置。

40

**【請求項 6】**

請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、

前記非線形導波路において発生した前記波長変換光パルスの一部をフィードバックするフィードバック部と、

前記フィードバック部によってフィードバックされた前記波長変換光パルスと前記整形部によって整形されたポンプ光パルスとを合波して前記非線形導波路に導波する合波部と

、

を更に備え、

前記非線形導波路は、光パラメトリック過程により、前記整形されたポンプ光パルスを

50

前記波長変換光パルスに波長変換することを特徴とする光源装置。

【請求項 7】

請求項 1 から 6 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、

前記ポンプ光パルスのパルス幅を  $t_p$ 、前記波長変換光パルスのパルス幅を  $t_r$ 、前記非線形導波路における前記波長変換光パルスの前記ポンプ光パルスに対するウォークオフ時間を  $t_{wo}$  とするとき、前記ポンプ光パルスが、

$$t_r + t_{wo} < t_p$$

を満たすことを特徴とする光源装置。

【請求項 8】

請求項 5 または 6 に記載の光源装置において、

前記ポンプ光パルスのパルス幅を  $t_p$ 、前記波長変換光パルスのパルス幅を  $t_r$ 、前記合波部から前記光源装置の出力端までにおける前記波長変換光パルスの前記ポンプ光パルスに対するウォークオフ時間を  $t_{wo}$  とするとき、前記ポンプ光パルスが、

$$t_r + t_{wo} < t_p$$

を満たすことを特徴とする光源装置。

【請求項 9】

請求項 6 に記載の光源装置において、

前記非線形導波路の出力の一部を取り出して前記光源装置の外部に出力する取り出し部を更に備え、

前記ポンプ光パルスのパルス幅を  $t_p$ 、前記波長変換光パルスのパルス幅を  $t_r$ 、前記合波部から前記取り出し部の出力端までにおける前記波長変換光パルスの前記ポンプ光パルスに対するウォークオフ時間を  $t_{wo}$  とするとき、前記ポンプ光パルスが、

$$t_r + t_{wo} < t_p$$

を満たすことを特徴とする光源装置。

【請求項 10】

請求項 7 から 9 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、

前記ポンプ光パルスが、

$$t_r + t_{wo} < t_p < 2(t_r + t_{wo})$$

を満たすことを特徴とする光源装置。

【請求項 11】

請求項 7 から 10 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、

前記ポンプ光パルスの強度を  $P(t)$ 、前記非線形導波路の長さを  $L$ 、前記非線形導波路の非線形係数を  $\chi$  とするとき、前記ポンプ光パルスが、前記ポンプ光パルスの波形中心の  $t_r + t_{wo}$  の期間において、

$$\left| \frac{dP(t)}{dt} \right| < 1 \text{ THz} / L$$

を満たすことを特徴とする光源装置。

【請求項 12】

請求項 1 から 11 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、

前記整形部は、

前記ポンプ光パルスを複数の分波光に分波する分波部と、

前記分波されたそれぞれの分波光を導波する互いに光路長が異なる複数の導波部と、

前記複数の導波部からの前記複数の分波光を合波する合波部と、

を含むことを特徴とする光源装置。

【請求項 13】

請求項 1 から 12 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、

前記整形部は、空間光位相変調器を含むことを特徴とする光源装置。

【請求項 14】

請求項 1 から 13 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、

前記整形部は、ファイバブラッググレーティングを含むことを特徴とする光源装置。

【請求項 15】

10

20

30

40

50

請求項 1 から 1 4 のいずれか 1 項に記載の光源装置において、  
前記整形部は、テーパ形状に加工した少なくとも 2 つのテーパ部を有する光導波路を含むことを特徴とする光源装置。

【請求項 1 6】

請求項 1 から 1 5 のいずれか 1 項に記載の光源装置の出力を光源として用いることを特徴とする情報取得装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光源装置およびそれを用いた情報取得装置に関し、特に、光パラメトリック過程を利用した波長変換および増幅技術に関するものである。 10

【背景技術】

【0002】

近年の分子イメージングにおいて、短パルス光を励起光として用いて観察を行う技術の開発が進められている。特に、2光子吸収に伴う蛍光や誘導ラマン散乱 ( Stimulated Raman Scattering ) の強度を検出することによって、分子種を選別したイメージングを行う研究が盛んに行われている。これらのイメージングでは、観察対象に合わせた波長を有する光パルスを励起光として用いる。

【0003】

非線形導波路内を光パルスが伝搬する際に生じる非線形効果による光パルスの波長変換や増幅を利用することによって、さまざまな波長の光パルスを発生することが可能となる。例えば、非特許文献 1 には、狭線幅で高出力の光パルスへの波長変換を実現する手段として、非線形導波路内での四光波混合における光パラメトリック過程を利用する方法が報告されている。 20

【0004】

四光波混合による波長変換では、ポンプ光パルスよりも長波長の光パルスであるアイドラー光と、短波長の光パルスであるシグナル光の 2 つの波長変換光パルスが同時に発生し、そのいずれかの波長変換光パルスが出力パルスとして取り出される。このとき、アイドラー光またはシグナル光のいずれかの波長変換光をシード光としてポンプ光パルスと同期して入力することにより、エネルギー変換の効率を高めることができる。これを、ファイバ光パラメトリック増幅 ( FOPA : Fiber Optical Parametric Amplification ) と呼ぶ。 30

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献 1】 Optics Letters , Vol . 38 , No . 20 , pp . 4154 - 4157 , 15 October 2013

【非特許文献 2】 Journal of Lightwave Technology , Vol . 28 , No . 6 , pp . 876 - 881 , 15 March 2010

【発明の概要】 40

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

非線形導波路を用いた分子イメージングでは、光源として用いる光パルスのピーク強度を高くすることによって信号強度を高めることができる。このためには、波長変換光のパルス幅 ( 半値全幅 ) を、10 ps ( ピコ秒 ) 程度以下に短くすることが有用である。また、波長変換光のパルス幅がポンプ光パルスのパルス幅に対して短いと、光パラメトリック過程における波長変換効率が低下してしまうので、ポンプ光パルスのパルス幅も合わせて同程度に短くすることが望ましい。

【0007】

しかし、ポンプ光パルスのパルス幅を短くすると、非線形導波路における相互位相変調 50

(XPM: Cross-Phase modulation)が大きくなり、波長変換光パルスのスペクトル形状に歪みが生じてしまう。この結果、光源として用いる光パルスのスペクトル形状が歪み、分子イメージングにおける分解能が悪化してしまうという課題があった。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る光源装置は、第1の波長を有するポンプ光パルスを導入する導入部と、ポンプ光パルスの波形を整形する整形部と、光パラメトリック過程により、整形部で整形されたポンプ光パルスから、第1の波長とは異なる第2の波長を有する波長変換光パルスを発生する非線形導波路と、を備え、整形部は、整形されたポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値が、整形部により整形される前のポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値よりも小さくなるように、ポンプ光パルスの波形を整形することを特徴とする。

10

【発明の効果】

【0009】

本発明の光源装置によれば、スペクトル形状に歪みが少ない光パルスを得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】本発明の第1の実施形態に係る光源装置の構成を示す模式図である。

20

【図2】ポンプ光パルスおよび波長変換光パルスが非線形導波路を伝搬する様子を示す模式図である。

【図3】ポンプ光パルスの形状と相互位相変調(XPM)の大きさとの関係を示す模式図である。

【図4】ポンプ光パルスの形状と波長変換効率との関係を示す模式図である。

【図5】本発明の第1の実施形態に係る光源装置における光波形整形部により、XPMが抑制されて波長変換効率が向上することを示すシミュレーション結果である。

【図6】本発明の第2の実施形態に係る光源装置の構成を示す模式図である。

【図7】本発明の第3の実施形態に係る光源装置における光波形整形部の構成を示す模式図である。

30

【図8】本発明の第4の実施形態に係る光源装置における光波形整形部の構成を示す模式図である。

【図9】本発明の第5の実施形態に係る光源装置における光波形整形部の構成を示す模式図である。

【図10】本発明の第6の実施形態に係る情報取得装置の構成を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

以下、本発明の実施形態について図面を用いて説明する。なお、本発明は以下の実施形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において適宜変更可能である。また、以下で説明する図面において、同じ機能を有するものは同一の符号を付し、その説明を省略又は簡潔にすることもある。

40

【0012】

(第1の実施形態)

本発明の第1実施形態による光源装置について、図1～図5を用いて説明する。図1は、本発明の第1の実施形態に係る光源装置100の構成を示す模式図である。光源装置100は、ポンプ光導入部1、光波形整形部2、光増幅部3、合波部4、非線形導波路5、およびシード光導入部6を備えて構成される。ここで、光波形整形部2は、分波部21、導波部22、23、および合波部24を有している。

【0013】

ポンプ光導入部1は、シングルモードファイバ等からなり、ポンプ光源(不図示)から

50

のポンプ光パルスを光波形整形部 2 へ導入する。ポンプ光源としては、例えば、Ybドープファイバを利得媒質とするLD励起モードロックパルスレーザーを用いることができる。本実施形態では、ポンプ光導入部 1 は、波長が 1035 nm、パルスエネルギーが 0.1 nJ、パルス幅が 4.1 ps の光パルスを導入する。光波形整形部 2 へのポンプ光パルスの導入は、例えばシングルモード光ファイバ等を用いて行う。あるいは、ポンプ光パルスが空間系を伝搬している場合は、レンズを用いて光波形整形部 2 へカップリングしてもよい。また、ミラー等の光学系を用いて空間系から光波形整形部 2 へ直接ポンプ光パルスを導入することにより、ポンプ光導入部 1 に光ファイバを用いた際に引き起こされる非線形過程を低減することも可能である。この場合、当該ミラー等の光学系がポンプ光導入部 1 となる。

10

#### 【0014】

光波形整形部 2 は、ポンプ光導入部 1 から導入されるポンプ光パルスの波形を、後述の図 2 (c) に示すようなフラットトップ形状に整形する。本実施形態の光波形整形部 2 は、まず、ポンプ光導入部 1 から導入されたポンプ光パルスを、光カプラ等の分波部 2 1 によって 2 つの分波光に分波する。次に、分波されたそれぞれの分波光を、互いに光路長が異なる光ファイバ等の導波部 2 2、2 3 を導波させることにより、分波光間に位相差を与える。そして、位相差が生じた 2 つの分波光を、光カプラ等の合波部 2 4 によって再び合波する。このとき、導波部 2 2、2 3 の光路長差は、合波される 2 つの分波光のピーク位置が 5 ps 程度ずれ、かつ 2 つの分波光がもっとも建設的に干渉した状態で合波されるように調節される。なお、光路長差の微調整を行うため、また、実験環境の変化に合わせて光路長差の動的調整を行うために、導波部 2 2、2 3 のいずれかに外力を与えることによって光路長差を僅かに調節する機構を組み込んでもよい。これにより、ポンプ光パルスを、後述の図 5 (a) に示すような、フラットトップ形状に類するダブルハンプ形状に整形することができる。

20

#### 【0015】

光増幅部 3 は、光波形整形部 2 で整形されたポンプ光パルスを増幅する。光増幅部 3 としては、例えば、LD の出力光で励起された Ybドープファイバを用いることができる。光増幅部 3 により、ポンプ光パルスはダブルハンプ形状を保持したまま 10 nJ に増幅される。なお、光波形整形部 2 からのポンプ光パルスの出力パワーが十分である場合は、光増幅部 3 は省略してもよい。

30

#### 【0016】

シード光導入部 6 は、シングルモードファイバ等からなり、シード光源からのシード光パルスを、合波部 4 を介して非線形導波路 5 へ導入する。本実施形態では、波長変換光パルスのシード光として、中心波長が 823 nm、スペクトル幅が 0.5 nm、パルスエネルギーが 0.1 nJ の光パルスを導入する。合波部 4 は、光増幅部 3 で増幅されたポンプ光パルスと、シード光導入部 6 から導入される波長変換光パルスのシード光とを合波する。合波部 4 としては、例えば、光ファイバに接続された WDM を用いることができる。波長変換光パルスのシード光が空間系を伝搬して導入される場合は、合波部 4 としてダイクロミックミラーを用いてもよい。

40

#### 【0017】

非線形導波路 5 は、光パラメトリック過程により、波長変換光パルスを発生する。非線形導波路 5 としては、例えば、非線形係数の高い光ファイバを用いることができる。本実施形態では、ゼロ分散波長が 1054 nm、2 次分散定数が  $1.64 \times 10^{-3} \text{ ps}^2 / \text{m}$ 、3 次分散定数が  $6.55 \times 10^{-5} \text{ ps}^3 / \text{m}$ 、4 次分散定数が  $-9.40 \times 10^{-8} \text{ ps}^4 / \text{m}$ 、長さが 30 cm のフォトリック結晶ファイバを用いる。

#### 【0018】

図 2 は、ポンプ光パルスおよび波長変換光パルスが非線形導波路 5 を伝搬する様子を示す模式図である。図 2 には、非線形導波路 5 の光入射端および光射出端における、(a) ポンプ光パルス、(b) 波長変換光パルス、および (c) 光波形整形部 2 によって整形されたポンプ光パルスを示している。本実施形態の光波形整形部 2 は、図 2 (a) に示すポ

50

ンプ光パルスの波形を、図 2 ( c ) に示すフラットトップ形状に整形する。

【 0 0 1 9 】

前述のように、F O P A 等を用いた分子イメージングにおいて、光源として用いる光パルスのピーク強度を高めるためには、波長変換光のパルス幅（半値全幅）を、10 ps（ピコ秒）程度以下に短くすることが有用である。また、光パルスを高効率に波長変換または増幅するためには、ポンプ光パルスのパルス幅も合わせて同程度に短くすることが望ましい。

【 0 0 2 0 】

しかし、波長変換光パルスは、非線形導波路 5 を伝搬する際において、ポンプ光パルスの強度  $P(t)$  の時間変化に比例した X P M を受ける。このとき、波長変換光パルスに生じる周波数変化量  $\nu_r(t)$  は、下式 ( 1 ) で表される。

$$\nu_r(t) = -dP(t)/dt \quad (1)$$

【 0 0 2 1 】

図 3 は、ポンプ光パルスの形状と相互位相変調 ( X P M ) の大きさとの関係を示す模式図である。図 3 ( a ) には、s e c h 形状を有するポンプ光パルスの例を示している。一方、図 3 ( b ) には、本実施形態の光波形整形部 2 によって整形されたフラットトップ形状を有するポンプ光パルスの例を示している。

【 0 0 2 2 】

上式 ( 1 ) で与えられる波長変換光パルスの周波数変化量  $\nu_r(t)$  は、図 3 に示すように、ポンプ光パルスの前半部分 (  $t < 0$  ) では負の値となり、後半部分 (  $t > 0$  ) では正の値となる。そして、ポンプ光パルスの強度  $P(t)$  がピーク値の半値となる半値点  $t_{0.5}$  付近において、その絶対値が最大となる。図 3 には、光パルスの前半部分におけるパルスの立ち上がり時の半値点  $t_{0.5}^-$  と、光パルスの後半部分におけるパルスの立ち下がり時の半値点  $t_{0.5}^+$  を示している。

【 0 0 2 3 】

ここで、波長変換光パルスは時間的な広がりを持つため、波長変換光パルス内の各時刻における周波数変化量  $\nu_r(t)$  は一様ではない。この結果として波長変換光パルスのスペクトルには歪みや広がりが生じてしまう。この影響は、ポンプ光パルスのパルス幅が 10 ps 程度以下となる場合に顕著となる。図 3 には、このような X P M が大きくなる領域を斜線で示している。この斜線領域に波長変換光パルスが重なると、波長変換光パルスのスペクトルが歪んでしまう。

【 0 0 2 4 】

そこで、光波形整形部 2 は、このような X P M によるスペクトル形状の歪みが低減されるように、ポンプ光パルスの波形を整形する。具体的には、光波形整形部 2 は、ポンプ光パルスの波形を、図 3 ( b ) に示すように、ピーク付近における時間変化が s e c h 形状やガウシアン形状等と比較して緩やかで、かつ裾部分が少ないフラットトップ形状、またはそれに類する形状に整形する。本実施形態では、光波形整形部 2 によって整形された後のこのような波形形状を、「フラットトップ形状」と呼ぶ。なお、このフラットトップ形状は、図 3 ( b ) に示す波形に限定されるものではない。フラットトップ形状は、波長変換光パルスの波形とポンプ光パルスの波形とが重なる期間において、ポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化が小さくなっていけばよい。より具体的には、フラットトップ形状は、例えば以下のように規定される。

規定例 1 : フラットトップ形状は、ピークにおける波形の時間変化率の絶対値が、整形前のポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値よりも小さい。そして、半値点における波形の時間変化率の絶対値が、整形前のポンプ光パルスの半値点における波形の時間変化率の絶対値よりも大きい。

規定例 2 : 整形前と整形後とでポンプ光パルスの半値全幅が一致するようにポンプ光パルスの波形を相似変換したとする。この場合に、フラットトップ形状は、ピークにおける波形の時間変化率の絶対値が、整形前のポンプ光パルスのピークにおける波形の時間変化率の絶対値よりも小さい。

10

20

30

40

50

これにより、XPMによる波長変換光パルスのスペクトル形状の歪みを低減することができる。また、更に、波長変換光パルスの波形とポンプ光パルスの波形とが重ならない期間において、整形後のポンプ光パルスの強度が、整形前のポンプ光パルスの強度より小さくなっていれば、光パルスを高効率に波長変換または増幅することができる。このようなフラットトップ形状としては、例えば、ダブルハンプ形状またはスーパーガウシアン形状を用いることができる。

【0025】

図3(b)に示すフラットトップ形状のポンプ光パルスでは、XPMの影響が大きくなる斜線領域がピーク付近において解消されている。したがって、波長変換光パルスを、フラットトップ形状のポンプ光パルスのピーク付近に配置することにより、波長変換光パルスに対するXPMを抑制することができる。

10

【0026】

図4は、ポンプ光パルスの形状と波長変換効率との関係を示す模式図である。図4(a)と図4(b)は、それぞれ、光波形整形部2がない場合と光波形整形部2がある場合の、非線形導波路5におけるポンプ光パルスおよび波長変換光パルスを示している。図4(b)に示す波長変換光パルスは、XPMの影響が抑えられるフラットトップ形状のポンプ光パルスのピーク付近に配置されている。

【0027】

波長変換光パルスのパルス幅  $t_r$  は、図4に示すように、非線形導波路5を伝搬する過程においてポンプ光パルスに対してウォークオフ時間  $t_{wo}$  (の半分) だけピーク位置がずれる。ここで、ウォークオフ時間  $t_{wo}$  とは、非線形導波路5におけるポンプ光パルスと波長変換光パルスの群速度の違いにより、非線形導波路5に同時に入射したポンプ光パルスと波長変換光パルスとの間に生じる導波時間の差である。ウォークオフ時間  $t_{wo}$  は、非線形導波路5の長さを  $L$ 、非線形導波路5のポンプ光パルスに対する群屈折率を  $n_p$ 、非線形導波路5の波長変換光パルスに対する群屈折率を  $n_r$ 、真空中の光速度を  $c$  とするとき、下式(2)で表される。

20

$$t_{wo} = L |n_r - n_p| / c \quad (2)$$

上式(2)では、非線形導波路5内でのウォークオフ量を示しているが、合波部4～非線形導波路5間、非線形導波路5～出力端間での光導波路内でも、XPMは生じる。そして、光導波路の形状や材質、あるいはポンプパルス光の強度に応じて、XPMによって波長変換光パルスの形状が変化する。そのような場合には、上式(2)に光導波路等の長さ  
と屈折率を導入したウォークオフ時間  $t_{wo}$  を算出する。

30

【0028】

図4において、波長変換光パルスの波形がポンプ光パルスの波形と重なる期間は、波長変換光パルスのパルス幅  $t_r$  にウォークオフ時間  $t_{wo}$  を加算した  $t_r + t_{wo}$  となる。光波形整形部2は、下式(3)が満たされるようにポンプ光パルスの波形をフラットトップ形状に整形する。

$$t_r + t_{wo} \leq t_p \quad (3)$$

【0029】

これにより、波長変換光パルスが、図4(b)に示すように、ポンプ光パルスのフラットトップ形状のピーク付近に配置されるので、波長変換光パルスに対するXPMの影響を抑制することができる。

40

【0030】

また、光波形整形部2は、ポンプ光パルスの強度を  $P(t)$ 、非線形導波路5の長さを  $L$ 、非線形導波路5の非線形係数を  $\chi^{(3)}$  とするとき、波長変換光パルスが、 $t_r + t_{wo}$  の期間において下式(4)を満たすようにポンプ光パルスの波形を整形する。

$$\left| \frac{dP(t)}{dt} \right| \leq 1 \text{ THz} / L \quad (4)$$

【0031】

これにより、XPMによる波長変換光パルスの周波数変化量  $\Delta \omega_r(t)$  を、分光用途に求められる周波数幅である  $1 \text{ THz}$  以下に抑えることができる。一例として、 $823 \text{ nm}$

50

mの波長変換光パルスを用いる場合の周波数変化量  $\Delta \nu_r(t)$  は0.7 nmの波長変化量に相当し、波長変換光パルスが分光用途に用いられる場合に求められるスペクトル幅である1 nmと同程度となる。

【0032】

図4には、ポンプ光パルスと波長変換光パルスとが重ならずに波長変換効率が低くなっている期間を斜線で示している。光波形整形部2は、更に、このような波長変換効率が低くなるポンプ光パルスの波形の裾部分を減らすために、波長変換光パルスと波形が重ならない期間におけるポンプ光パルスの強度を抑制する。このとき、光波形整形部2は、上式(3)に加えて下式(5)が満たされるようにポンプ光パルスの波形を整形する。具体的には、フラットトップ形状のポンプ光パルスのパルス幅  $t_p$  (半値全幅)が、ウォークオフ時間  $t_w$  と波長変換光パルスのパルス幅  $t_r$  (半値全幅)の和  $t_r + t_w$  の1倍以上2倍以下となるように設定する。

$$t_r + t_w \leq t_p \leq 2(t_r + t_w) \quad (5)$$

【0033】

これにより、ポンプ光パルスの波形中心の  $t_r + t_w$  の期間において、上式(4)を満たさないポンプ光パルスの成分を減らして波長変換効率を向上させることができる。この結果、ポンプ光パルスの全エネルギー  $I_p$  に対して、(5)式を満たす領域におけるポンプ光パルスのエネルギーを  $I_p'$  とするとき、下式(6)を満たすポンプ光パルスを得ることができる。

$$I_p' / I_p \geq 0.5 \quad (6)$$

【0034】

すなわち、ポンプ光パルスの1/2以上のエネルギーを波長変換に用いることができる。このように、図4に斜線で示す波長変換効率が低い裾部分を減らして、ポンプ光パルスから波長変換光パルスへのエネルギー変換効率を向上させつつ、波長変換光パルスのパルス幅を短く維持することができる。

【0035】

図5は、本発明の第1の実施形態に係る光源装置における光波形整形部2により、XPMが抑制されて波長変換効率が向上することを示すシミュレーション結果である。図5(a)には、光波形整形部2を有しない場合の、非線形導波路5の光入射端(input)および光射出端(output)におけるポンプ光パルス波形のシミュレーション結果を示している。一方、図5(b)には、光波形整形部2を有しない場合のシミュレーション結果を示している。図5に実線で示すように、光波形整形部2を有する図5(a)の方が、光波形整形部2を有しない図5(b)よりも、非線形導波路5の光射出端における波長変換光のスペクトル形状の歪みが低減されていることが分かる。また、変換効率についても同様に、光波形整形部2を有する図5(a)の方が向上していることが分かる。このように、ポンプ光パルスの波形を、フラットトップ形状に類するダブルハンプ形状とすることにより、XPMによる波長変換光パルスのスペクトルの歪みを低減することができる。また、同時に、ポンプ光パルスからシグナル光やアイドラー光の波長変換光パルスへの変換効率を向上させることができる。

【0036】

以上のように、本実施形態では、非線形導波路におけるポンプ光パルスの波形をフラットトップ形状に整形するポンプ光整形部を備えている。また、非線形導波路は、整形されたポンプ光パルスから波長変換光パルスへのエネルギー変換を誘起することにより、波長変換光パルスを増幅する。これにより、スペクトル形状に歪みが少ない光パルスを高効率に増幅することができる。

【0037】

また、本実施形態では、光波形整形部が、合波部、分波部、および分波されたそれぞれの分波光を導波する互いに光路長が異なる複数の導波部を含んでいる。これにより、ポンプ光パルスの波形を、フラットトップ形状に類するダブルハンプ形状に整形することができる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 3 8 】

なお、図 1 では、ポンプ光パルスをもつ 2 つの分波光に分波する光波形整形部 2 の構成を示したが、このような構成に限定されるものではない。例えば、ポンプ光パルスを 3 以上の複数の分波光に分波して、それぞれ位相差を調整した上で合波することで、ポンプ光パルスの波形をよりフラットトップ形状に近い波形に整形することが可能である。また、後述するように、光波形整形部 2 を、複数の光カブラの組み合わせや、回折格子と空間光位相変調器からなる光波形整形部、ファイバブラッググレーティングやテーパ加工した光ファイバ等を用いて構成することも可能である。

## 【 0 0 3 9 】

(第 2 の実施形態)

本発明の第 2 の実施形態における光源装置について図 6 を用いて説明する。図 6 は、本発明の第 2 の実施形態に係る光源装置 100b の構成を示す模式図である。光源装置 100b は、ポンプ光導入部 1、光波形整形部 2、光増幅部 3、合波部 4、非線形導波路 5、取り出し部 7、およびフィードバック部 8 を備えて構成される。ポンプ光導入部 1、光波形整形部 2、光増幅部 3、合波部 4、および非線形導波路 5 については、第 1 の実施形態と同様であるので説明は省略する。本実施形態の光源装置 100b は、第 1 の実施形態と比較してシード光導入部 6 を備えていない。すなわち、本実施形態においては波長変換光パルスのシード光は導入されない。代わりに、本実施形態では、非線形導波路 5 の出力の 90% を取り出し部 7 で外部に取り出して出力するとともに、残りの 10% をフィードバック部 8 で合波部 4 へフィードバックする。これにより、本実施形態では、光波長変換のための光共振器が構成される。

なお、上式 (2) では、非線形導波路 5 内でのウォークオフ量を示したが、合波部 4 ~ 非線形導波路 5 間、非線形導波路 5 ~ 取り出し部 7 間、及び取り出し部 7 ~ 出力端間での光導波路内においても、XPM は生じる。そのような場合には、光導波路の形状や材質、あるいはポンプパルス光の強度に応じて、ウォークオフ時間  $t_w$  を、上式 (2) の算出と同様の手法を用いて算出する。

## 【 0 0 4 0 】

本実施形態では、取り出し部 7 として、ファイバに接続された光カブラを用いる。また、フィードバック部 8 としてシングルモードファイバを用いる。フィードバック部 8 は波長変換光パルスを導波する導波路であればよく、ミラーを用いて空間系で構成してもよい。合波部 4 は、フィードバック部 8 からフィードバックされる波長変換光パルスと、光増幅部 3 から出力されるポンプ光パルスをタイミング同期して合波する。合波されたポンプ光パルスおよび波長変換光パルスは、再び非線形導波路 5 を伝搬し、量子ノイズに起因する波長変換光パルスが増幅されて、取り出し部 7 から出力される。波長変換光パルスの中心波長は、ポンプ光パルスの波長、強度および非線形導波路 5 の分散パラメータによって定まる位相整合条件によって決まり、本実施形態では 823nm となる。なお、フィードバック部 8 には、タイミングを同期するための遅延ラインを挿入してもよい。また、出力する波長変換光パルスのスペクトル線幅や中心波長を調整するために、フィードバック部 8 に波長フィルタを挿入してもよい。

## 【 0 0 4 1 】

以上のように、本実施形態では、非線形導波路におけるポンプ光パルスの波形をフラットトップ形状に整形するポンプ光整形部を備えている。また、非線形導波路は、光パラメトリック過程により、整形されたポンプ光パルスを波長変換光パルスに波長変換する。これにより、波長変換光パルスのシード光を用いることなく、スペクトル形状に歪みが少ない光パルスを高効率に波長変換することができる。

## 【 0 0 4 2 】

(第 3 の実施形態)

本発明の第 3 の実施形態における波長変換装置について説明する。図 7 は、本発明の第 3 の実施形態に係る光源装置 100 における光波形整形部 2b の構成を示す模式図である。本実施形態の光源装置 100 の構成は、図 1 に示す第 1 の実施形態と同様の構成である

10

20

30

40

50

。本実施形態は、第1の実施形態と比較して、光波形整形部2が、空間光位相変調器 (Spatial Light Modulator) を含む点が異なっている。その他については第1の実施形態と同じであるので説明は省略する。

【0043】

本実施形態では、光波形整形部2bとして、図7に示すような2つの回折格子25a、25bと、空間光位相変調器26を用いる。回折格子25aで波長成分毎に分けられたポンプ光パルスは、レンズ27aによってコリメート(平行光化)されたのち、空間光位相変調器26によって、波長成分ごとに強度および位相の変調が与えられる。与える変調の量は外部で任意に制御される。レンズ27bおよび回折格子25bは、変調が与えられた各波長成分を、再び1つのパルスとすることにより、ポンプ光パルスを任意の形状に整形することができる。なお、光波形整形器の構成は図7のものに限定されず、反射型の空間光位相変調器を用いることや、集光レンズの代わりに集光ミラーを用いることによって構成を変え、光学素子の数を減らすことも可能である。

10

【0044】

以上のように、本実施形態では、光波形整形部が、空間光位相変調器を含んでいる。これにより、第1の実施形態よりもさらに長方形に近い波形の形状を持つポンプ光パルスを作ることができ、XPMの影響をさらに抑えることが可能となる。

【0045】

(第4の実施形態)

本発明の第4の実施形態における波長変換装置について説明する。図8は、本発明の第4の実施形態に係る光源装置100における光波形整形部2cの構成を示す模式図である。本実施形態の光源装置100の構成は、図1に示す第1の実施形態と同様の構成である。本実施形態は、第1の実施形態と比較して、光波形整形部2が、ファイバブラッググレーティング (Fiber Bragg Grating) を含む点が異なっている。その他については第1の実施形態と同じであるので説明は省略する。

20

【0046】

本実施形態では、光波形整形部2cとして、図8に示すようなファイバブラッググレーティング28を用いた光波形整形器を用いる。ファイバブラッググレーティング28は、透過光がフラットトップ形状となるように、導入されるポンプ光パルスの時間形状、スペクトル形状に合わせて設計されたものである。

30

【0047】

以上のように、本実施形態では、光波形整形部が、ファイバブラッググレーティングを含んでいる。これにより、第1の実施形態よりも外部環境の変化の影響を受けずに、空間系を用いることなくポンプ光パルスの時間波形を整形することができる。

【0048】

(第5の実施形態)

本発明の第5の実施形態における波長変換装置について説明する。図9は、本発明の第5の実施形態に係る光源装置100における光波形整形部2dの構成を示す模式図である。本実施形態の光源装置100の構成は、図1に示す第1の実施形態と同様の構成である。本実施形態は、第1の実施形態と比較して、光波形整形部2が、テーパ形状に加工した光導波路を含む点が異なっている。その他については第1の実施形態と同じであるので説明は省略する。

40

【0049】

本実施形態では、光波形整形部2dとして、図9に示すようなテーパ形状に加工した光ファイバ29を用いた光波形整形器を用いる。光ファイバ29を伝搬するポンプ光パルスの一部は、第1のテーパ部30aにおいて高次の伝搬モードへ遷移し、第2のテーパ部30bにおいて1次の伝搬モードへ戻る。このとき、光パルスの群速度は伝搬モードの次数によって異なるため、第2のテーパ部30bにおいて高次の伝搬モードから1次の伝搬モードへ戻る成分は、高次の伝搬モードへ遷移することなく伝搬する成分と時間遅延を持って重ね合わせられる。この結果、出力されるパルスの1次の伝搬モードは時間波形がダブ

50

ルハンプ形状となる（例えば、非特許文献 2 参照）。

【 0 0 5 0 】

以上のように、本実施形態では、光波形整形部が、テーパ形状に加工した少なくとも 2 つのテーパ部を有する光導波路を含む。これにより、ファイバブラッググレーティング等の特別なデバイスを使用することなく、光ファイバの安価な加工のみでポンプ光パルスの波形をダブルハンプ形状とすることができる。

【 0 0 5 1 】

（第 6 の実施形態）

本発明の第 6 の実施形態における波長変換装置について説明する。図 10 は、本発明の第 6 の実施形態に係る情報取得装置 1000 の構成を示す模式図である。本実施形態の情報取得装置 1000 は、第 1 ~ 第 5 の実施形態の光源装置に、更に検出器 18 を備えて構成される。本実施形態の光源装置 100 は、図 1 に示す第 1 の実施形態と同じであるので説明は省略する。

10

【 0 0 5 2 】

第 1 ~ 第 5 の実施形態に記載の光源装置 100 により、中心波長 823 nm で歪みの無いスペクトル形状の波長変換光パルス出力を得る。得られた光パルスはビームコリメータ 11、X スキャンミラー 12、Y スキャンミラー 13 を経由し、ダイクロイックミラー 14、対物レンズ 15 によりステージ 16 に固定された被検体 17 に集光照射される。被検体 17 では、光パルスを集光照射した部分において 2 光子吸収に起因する蛍光が起こる。この蛍光は対物レンズ 15 によって取りこまれ、ダイクロイックミラー 14 を透過して検出器 18 で検出される。

20

【 0 0 5 3 】

このとき、X スキャンミラー 12 を駆動すると、集光点が被検体 17 内部を X 方向へスキャンすることができ、Y スキャンミラー 13 を駆動すると、集光点が被検体 17 内部を X 方向と垂直な Y 方向へスキャンすることができる。従って、X スキャンミラー 12、Y スキャンミラー 13 によって集光点を被検体 17 上で走査すれば、二次元画像を取得することができる。さらに、一回の二次元スキャン終了後、ステージ 16 を動かして集光点を光軸方向に所定距離だけ移動させ、同様の 2 次元スキャンを繰り返すことで、被検体 17 の三次元画像を得ることが可能となる。

30

【 0 0 5 4 】

以上のように、本実施形態では、第 1 ~ 第 5 の実施形態の光源装置からの出力を光源として使用する。これにより、スペクトル形状に歪みが低減された光パルスを励起光として用いることができるので、波長分解能の高いイメージングを行うことができる 2 光子顕微鏡を得ることが可能となる。

【 0 0 5 5 】

なお、本実施形態では、光パルスを被検体に照射し、被検体にて反射・透過または発光する光の少なくとも 1 つを検出し、被検体の情報を取得する情報取得装置として、2 光子顕微鏡を例にとって説明した。しかし、これに限定されるものではなく、誘導ラマン散乱顕微鏡、内視鏡などの情報取得装置にも、本実施形態と同様に第 1 ~ 第 5 の実施形態のいずれかに記載された装置を用いることができる。

40

【 0 0 5 6 】

（その他の実施形態）

本発明は、上記実施形態に限らず種々の変形が可能である。例えば、上記実施形態に記載の構成は、一例を示したものであり、本発明を適用可能な波長変換装置、光源装置、および情報取得装置は、上記実施形態の説明に用いた図に限定されるものではない。また、上記実施形態 1 ~ 6 の構成は、任意に組み合わせて実施することも可能である。本発明はその技術思想、又はその主要な特徴から逸脱することなく、様々な形で実施することができる。

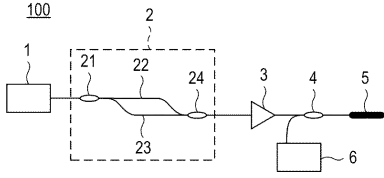
【 符号の説明 】

【 0 0 5 7 】

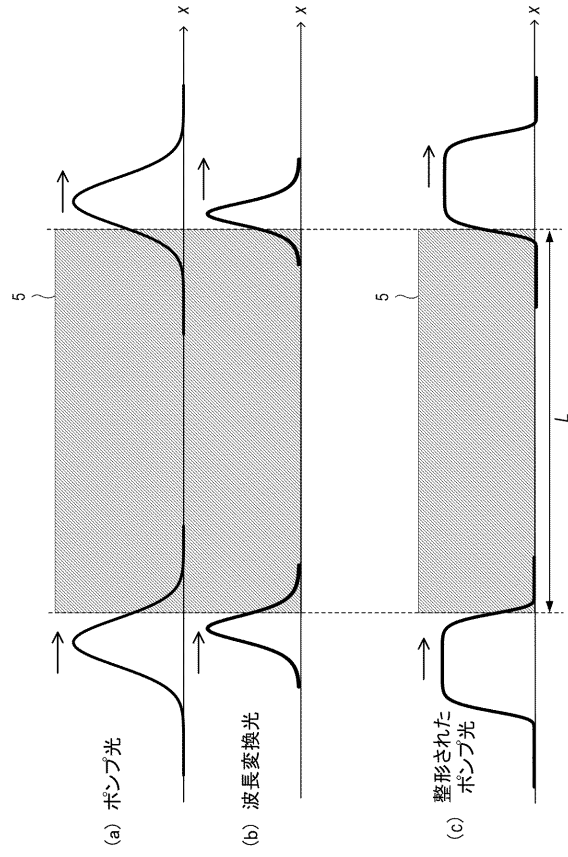
50

1	: ポンプ光導入部 ( 導入部 )	
2	: 光波形整形部 ( 整形部 )	
3	: 光増幅部	
4	: 合波部	
5	: 非線形導波路	
6	: シード光導入部	
7	: 取り出し部	
8	: フィードバック部	
1 1	: ビームコリメータ	
1 2	: Xスキャンミラー	10
1 3	: Yスキャンミラー	
1 4	: ダイクロイックミラー	
1 5	: 対物レンズ	
1 6	: ステージ	
1 7	: 被検体	
1 8	: 検出器	
2 1	: 分波部	
2 2、2 3	: 導波部	
2 4	: 合波部	
2 5	: 回折格子	20
2 6	: 空間光位相変調器	
2 7	: レンズ	
2 8	: ファイバブラッググレーティング	
2 9	: 光ファイバ	
3 0	: テーパ部	
1 0 0	: 光源装置	
1 0 0 0	: 情報取得装置	

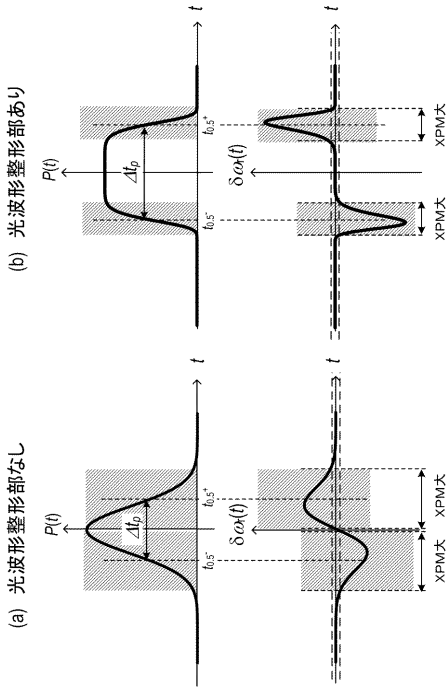
【図1】



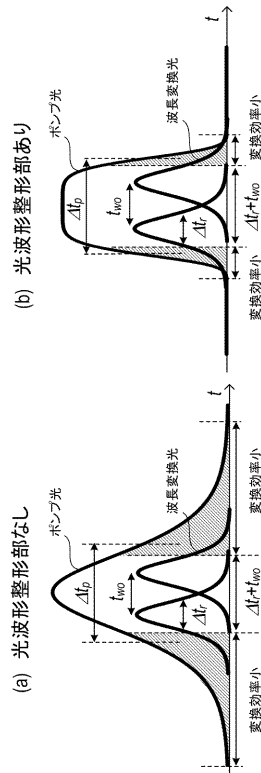
【図2】



【図3】

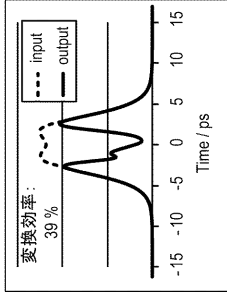


【図4】

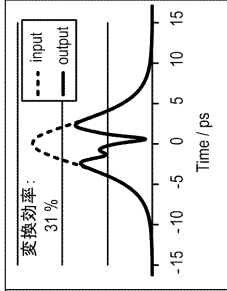


【 図 5 】

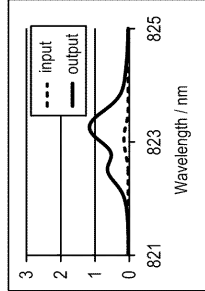
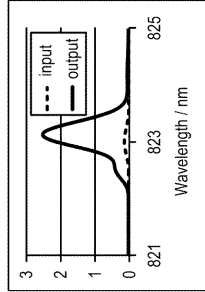
(a) 光波形整形部あり



(b) 光波形整形部なし

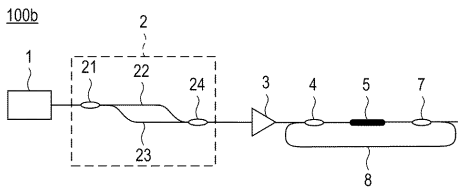


ポンプ光の波形

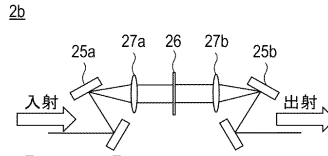


波長変換光のスペクトル

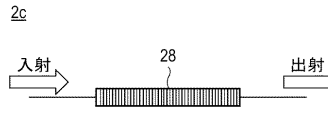
【 図 6 】



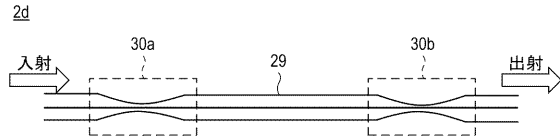
【 図 7 】



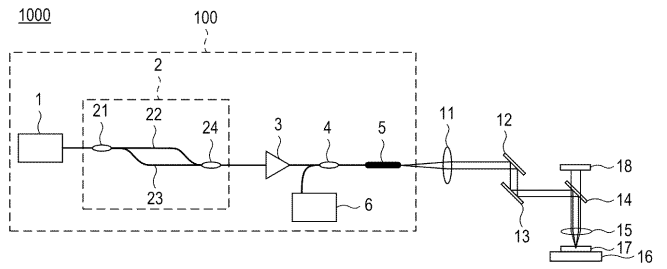
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】



---

フロントページの続き

(74)代理人 100134393

弁理士 木村 克彦

(74)代理人 100174230

弁理士 田中 尚文

(72)発明者 三浦 瞬

東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内

Fターム(参考) 2K102 AA06 BA05 BA18 BA22 BB01 BB02 BC02 BD09 DA06 DB02

EB02 EB06 EB08 EB10 EB16 EB20