

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6134065号  
(P6134065)

(45) 発行日 平成29年5月24日(2017.5.24)

(24) 登録日 平成29年4月28日(2017.4.28)

(51) Int.Cl.		F I	
<b>GO2F</b>	<b>1/39</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>GO2F</b> 1/39
<b>HO1S</b>	<b>3/067</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>HO1S</b> 3/067

請求項の数 29 (全 35 頁)

(21) 出願番号	特願2016-525461 (P2016-525461)	(73) 特許権者	000001007
(86) (22) 出願日	平成26年7月9日(2014.7.9)		キヤノン株式会社
(65) 公表番号	特表2016-525230 (P2016-525230A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公表日	平成28年8月22日(2016.8.22)		
(86) 国際出願番号	PCT/US2014/046011		
(87) 国際公開番号	W02015/006486		
(87) 国際公開日	平成27年1月15日(2015.1.15)		
審査請求日	平成28年3月14日(2016.3.14)		
(31) 優先権主張番号	61/845,767		
(32) 優先日	平成25年7月12日(2013.7.12)		
(33) 優先権主張国	米国(US)		
(31) 優先権主張番号	61/953,434		
(32) 優先日	平成26年3月14日(2014.3.14)		
(33) 優先権主張国	米国(US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 散逸ソリトンモードにおけるファイバ型光パラメトリック発振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ポンプ波長において第1のパルス時間幅を有する光ポンプパルスを受信する入力ポートと、

共振キャビティであって、

前記光ポンプパルス共振キャビティに結合する第1のカプラと、

線形光ファイバ利得媒質から出射した前記光ポンプパルスの強度を増加し且つ第1のポンプパルス時間幅を第2のポンプパルス時間幅に増加する負の波長分散を有する線形光ファイバ利得媒質と、

前記線形光ファイバ利得媒質から出射した光にパラメトリック利得を提供し、前記線形光ファイバ利得媒質から出射した前記光ポンプパルスからのエネルギーを非線形光ファイバ利得媒質から出射した第1の信号パルス時間幅を有する信号パルスに伝達する正の波長分散を有する非線形光ファイバ利得媒質と、

前記非線形光ファイバ利得媒質から出射した光を受信するパワースプリッタであり、

前記非線形光ファイバ利得媒質から出力ポートに出射して前記共振キャビティから出射する前記光の第1の部分と、

前記非線形光ファイバ利得媒質から出射して、前記共振キャビティにフィードバックされて前記線形光ファイバ利得媒質を通過する前記光の第2の部分とを提供するパワースプリッタと、を備える共振キャビティと、を備え、

10

20

前記線形光ファイバ利得媒質は、前記線形光ファイバ利得媒質から出射した第 1 のパルス時間幅を有する前記信号パルスのパルス時間幅を第 2 の信号パルス時間幅に増加することを特徴とする光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 2】

前記共振キャビティの平均波長分散は正常分散範囲内であることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 3】

前記共振キャビティは、光利得を提供せず且つ前記非線形光ファイバ利得媒質の前記波長分散より大きい波長分散を有する非利得ファイバを更に備えることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

10

【請求項 4】

前記共振キャビティは、

前記信号パルスを含む第 1 の波長範囲を有する信号光とアイドラ波長が前記第 1 の波長範囲と異なる第 2 の波長範囲を有するアイドラ光とに共振キャビティ内の前記光を分割する第 1 の波長分割多重化装置と、

前記信号光と前記アイドラ光とを組み合わせ、前記組み合わせられた光が共に前記共振キャビティを通過して戻る第 2 の波長分割多重化装置と、

前記第 1 の波長分割多重化装置からの信号を前記第 2 の波長分割多重化装置に結合する第 1 のファイバと、

前記第 1 の波長分割多重化装置からの信号を前記第 2 の波長分割多重化装置に結合する第 2 のファイバと、

20

を更に備えることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 5】

前記出力ポートから出射する前記光のピーク波長は、前記光ポンプパルスの繰返し率、前記光ポンプパルスの中心波長、前記光ポンプパルスのピークパワー、前記光ポンプパルスの繰返し周波数のうち少なくとも 1 つを変更することにより変更されることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 6】

前記信号パルスはソリトンであり、パルスブレイキングは前記共振キャビティにおける散逸ソリトンモード同期により防止されることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

30

【請求項 7】

前記出力ポートから出射する前記光のピーク波長は、前記共振キャビティの長さを変更することにより変更され、共振キャビティ内にスペクトルフィルタが存在しないことを特徴とする請求項 6 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 8】

ポンプ波長においてポンプパルス光を受信する入力ポートと、

共振キャビティであって、

前記ポンプパルス光を共振キャビティに結合する第 1 のカプラと、

前記ポンプパルス光からのエネルギーを、前記ポンプ波長を含まない第 1 の波長範囲を有する第 1 のパルス光に伝達する非線形光ファイバ利得媒質と、

40

前記非線形光ファイバ利得媒質から出射した光を受信するパワースプリッタであって、

前記非線形光ファイバ利得媒質から出力ポートに出射して前記共振キャビティから出射する前記光の第 1 の部分と、

前記非線形光ファイバ利得媒質から出射して、前記共振キャビティにフィードバックされる前記光の第 2 の部分とを提供するパワースプリッタと、を備える共振キャビティと、

を備え、

前記共振キャビティの平均波長分散は前記第 1 の波長範囲においてゼロ分散でないこと

50

を特徴とする光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 9】

前記共振キャビティの平均波長分散は前記第 1 の波長範囲において正常分散範囲内であることを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 10】

前記共振キャビティの平均波長分散は前記第 1 の波長範囲において異常分散範囲内であることを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 11】

前記非線形光ファイバ利得媒質は、前記ポンプパルス光からのエネルギーを、前記第 1 のパルス光と、前記ポンプ波長を含まず、かつ、前記第 1 の波長範囲でない第 2 の波長範囲を有する第 2 のパルス光と、に伝達することを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

10

【請求項 12】

前記共振キャビティの平均波長分散は前記第 2 の波長範囲においてゼロ分散でないことを特徴とする請求項 11 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 13】

前記共振キャビティの平均波長分散は前記第 1 の波長範囲および前記第 2 の波長範囲において正常分散範囲内であることを特徴とする請求項 12 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 14】

20

前記共振キャビティの平均波長分散は前記第 1 の波長範囲において異常分散範囲内であり、

前記共振キャビティの平均波長分散は前記第 2 の波長範囲において正常分散範囲内であることを特徴とする請求項 12 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 15】

前記第 1 のカブラは波長分割多重化装置を備えることを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 16】

前記共振キャビティ内の前記光を、前記第 1 のパルス光および第 2 のパルス光に分割する第 1 の波長分割多重化装置と、

30

前記第 1 のパルス光と前記第 2 のパルス光とを組み合わせ、前記組み合わせられた光が共に前記共振キャビティを通して戻る第 2 の波長分割多重化装置と、

前記第 1 の波長分割多重化装置からの前記第 1 のパルス光を前記第 2 の波長分割多重化装置に結合する第 1 のファイバと、

前記第 1 の波長分割多重化装置からの前記第 2 のパルス光を前記第 2 の波長分割多重化装置に結合する第 2 のファイバと、

を更に備えることを特徴とする請求項 11 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 17】

前記第 1 のパルス光はアイドラ光であり、前記第 2 のパルス光は信号光であることを特徴とする請求項 11 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

40

【請求項 18】

前記第 1 のパルス光の波長は前記第 2 のパルス光の波長よりも長いことを特徴とする請求項 11 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 19】

前記第 1 のパルス光の波長は前記ポンプ波長よりも長いことを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

【請求項 20】

前記共振キャビティは、前記非線形光ファイバ利得媒質の波長分散とは異なる波長分散を有する光ファイバを更に備えることを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

50

## 【請求項 2 1】

前記パワースプリッタにより提供される前記非線形光ファイバ利得媒質から出射した前記光の前記第 2 の部分は、前記第 1 のカプラを介して前記共振キャビティにフィードバックされることを特徴とする請求項 1 または 8 に記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

## 【請求項 2 2】

前記光ポンプパルスを提供するシードレーザを更に備えることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

## 【請求項 2 3】

前記ポンプパルス光を提供するシードレーザを更に備えることを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

10

## 【請求項 2 4】

前記シードレーザは、前記光ポンプパルスの繰返し率、前記シードレーザの波長および前記光ポンプパルスのピークパワーのうち少なくとも 1 つを変更することによって、前記出力ポートから射出した光のピーク波長を変更するように構成されていることを特徴とする請求項 2 2 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

## 【請求項 2 5】

前記シードレーザは、前記ポンプパルス光の繰返し率、前記シードレーザの波長および前記ポンプパルス光のピークパワーのうち少なくとも 1 つを変更することによって、前記出力ポートから射出した光のピーク波長を変更するように構成されていることを特徴とする請求項 2 3 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

20

## 【請求項 2 6】

前記共振キャビティは、光遅延線を更に備えることを特徴とする請求項 1 または 8 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

## 【請求項 2 7】

前記光遅延線は、前記光遅延線の長さを変更することによって前記出力ポートから射出する光のピーク波長を変更するように構成されていることを特徴とする請求項 2 6 記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

## 【請求項 2 8】

前記第 1 のファイバの長さは、前記第 2 のファイバの長さとは異なることを特徴とする請求項 4 または 1 6 に記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

30

## 【請求項 2 9】

前記第 1 のファイバの材料特性は、前記第 2 のファイバの材料特性とは異なることを特徴とする請求項 4 または 1 6 に記載の光ファイバパラメトリック増幅器。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、一般に、ファイバを用いる光パラメトリック発振器に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

光パラメトリック相互作用に基づく光源は、電子遷移に基づく既存の利得材料が提供できないレーザ波長を使用できるようにするため、関心を持たれる。光パラメトリック発振器（OPO）は、種々の結晶における<sup>(2)</sup>非線形光応答又は光ファイバにおける<sup>(3)</sup>非線形応答を利用することにより実現可能である。

40

## 【0003】

光ファイバ型の OPO（FOPPO）は、低コストでアライメントフリーの小型レーザシステムを実現する一方で非常に広い波長可変範囲及び高出力動作を提供する潜在能力を有するため特に魅力的である。

## 【0004】

FOPPO の動作は、基本的に、2 つのポンプ光子がファイバと相互作用して信号光子及びアイドラ光子を生成する縮退四波混合（FWM）に基づく。信号光子及びアイドラ光子

50

の実際の周波数は、ポンプレーザの波長、ピークパワー、並びに光ファイバの分散プロファイルに依存する位相整合条件により定義される。OPOをポンピングする2つの一般的な方法が存在する。第1の方法は連続ポンピングであり、その場合、ポンプレーザは連続波レーザであるか、あるいはOPOキャビティのラウンドトリップ時間に比較して長いパルス生成するレーザである。第2の方法は、パルスポンプレーザの同期ポンピングに基づく。第2の方法において、ポンプレーザはOPOキャビティと同期される。

#### 【0005】

超高速同期ポンプFOPPO (Ultrafast synchronously pumped FOPPOs)が過去に示された。しかし、過去のFOPPOの出力パルスエネルギー及びピークパワーは非常に小さかった。出力パルスエネルギー及びピークパワーに関して最良である過去に生成された超高速FOPPOは、パルスエネルギーが最大で2 nJでありピークパワーが~12 kWであった。これを達成するために使用された技術は、ファイバ長が2 cmと短く、キャビティの残りの部分は自由空間光学系を使用するものであった。本実現例は、非線形効果の悪影響を回避したが、大部分で自由空間構成要素を使用する必要があるため、自由空間のアライメントが必要であり、そのようなシステムに伴う問題を有した。全て又は大部分がファイバのレーザキャビティにおける高出力超高速FOPPOが必要とされる。高出力パルスエネルギーを提供しつつFOPPOの放出波長を広範囲にわたり調節させる機能が更に必要とされる。

#### 【発明の概要】

#### 【0006】

本発明の一実施形態は、ポンプ波長において第1のパルス時間幅を有する光ポンプパルスを受信する入力ポートと、共振キャビティとを備える光ファイバパラメトリック増幅器である。共振キャビティは、光ポンプパルスを共振キャビティに結合する第1のカプラと、線形光ファイバ利得媒質から出射したポンプパルスの強度を増加し且つ第1のポンプパルス時間幅を第2のポンプパルス時間幅に増加する負の波長分散を有する線形光ファイバ利得媒質と、線形光ファイバ利得媒質から出射した光にパラメトリック利得を提供し、線形光利得媒質から出射したポンプパルスからのエネルギーを非線形光ファイバ利得媒質から出射した第1の信号パルス時間幅を有する信号パルスに伝達する正の波長分散を有する非線形光ファイバ利得媒質と、パワースプリッタとを備える。パワースプリッタは、非線形光ファイバ利得媒質から出射した光を受信し、非線形光ファイバ利得媒質から出力ポートに出射して共振キャビティから出射する光の第1の部分と、非線形光ファイバ利得媒質から出射して、共振キャビティにフィードバックされて線形光ファイバ利得媒質を通過する光の第2の部分とを提供する。線形光ファイバ利得媒質は、線形光ファイバ利得媒質から出射した第1のパルス時間幅を有する信号パルスのパルス時間幅を第2の信号パルス時間幅に増加する。

#### 【0007】

他の一実施形態において、共振キャビティの平均波長分散は正常分散範囲内である。

#### 【0008】

他の一実施形態において、パワースプリッタにより提供される非線形光ファイバ利得媒質から出射した光の第2の部分は、第1のカプラを介して共振キャビティにフィードバックされる。

#### 【0009】

他の一実施形態において、光ポンプパルスを提供するシードレーザを更に備える。

#### 【0010】

他の一実施形態において、共振キャビティは光遅延線を更に備える。

#### 【0011】

他の一実施形態において、線形利得媒質はエルビウム添加光ファイバ増幅器である。

#### 【0012】

他の一実施形態において、共振キャビティは、光利得を提供せず且つ非線形光ファイバ利得媒質の波長分散より大きい波長分散を有する非利得ファイバを更に備える。

## 【 0 0 1 3 】

他の一実施形態において、出力ポートから出射する光のピーク波長は、ポンプパルスの繰返し率を変更することにより変更される。

## 【 0 0 1 4 】

他の一実施形態において、共振キャビティは、信号パルスを含む第1の波長範囲を有する信号光とアイドラ波長が第1の波長範囲と異なる第2の波長範囲を有するアイドラ光とに共振キャビティ内の光を分割する第1の波長分割多重化装置と、信号光とアイドラ光とを組み合わせ、組み合わせられた光が共に共振キャビティを通過して戻る第2の波長分割多重化装置と、第1の波長分割多重化装置からの信号を第2の波長分割多重化装置に結合する第1のファイバと、第1の波長分割多重化装置からの信号を第2の波長分割多重化装置に結合する第2のファイバとを更に備える。

10

## 【 0 0 1 5 】

他の一実施形態において、第1のファイバの長さは第2のファイバの長さと異なる。

## 【 0 0 1 6 】

他の一実施形態において、第1のファイバの材料特性は第2のファイバの材料特性と異なる。

## 【 0 0 1 7 】

他の一実施形態において、出力ポートから出射する光のピーク波長は、ポンプパルスの繰返し率、ポンプパルスの中心波長、ポンプパルスのピークパワー、ポンプパルスの繰返し周波数からなる群から選択されるポンプパルスの少なくとも2つの特性を変更することにより変更される。

20

## 【 0 0 1 8 】

他の一実施形態において、信号パルスはソリトンであり、パルスブレイキングは共振キャビティにおける散逸ソリトンモード同期により防止される。

## 【 0 0 1 9 】

他の一実施形態において、出力ポートから出射する光のピーク波長は共振キャビティの長さを変更することにより変更され、共振キャビティ内にスペクトルフィルタが存在しない。

## 【 0 0 2 0 】

更なる特徴及び態様は、添付の図面を参照して例示的な実施形態の以下の詳細な説明を読むことにより明らかになるだろう。

30

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 2 1 】

本明細書に組み込まれ且つ本明細書の一部を構成する添付の図面は、例示的な実施形態を示す。

【図1】FOPPOの第1の例示的な実施形態を示す図である。

【図2】第1の例示的な実施形態に対する信号波長及びアイドラ波長を示す図である。

【図3】第1の例示的な実施形態に対する分散マップを示す図である。

【図4】第1の例示的な実施形態のパワー及びスペクトルを示す図である。

【図5】分散シフトファイバにおける光パワーの変化を示す図である。

40

【図6】共振キャビティ内を伝搬するパルスのエネルギー及び時間幅の変化を示す図である。

【図7】FOPPOの第2の実施形態を示す図である。

【図8】高非線形ファイバである導波管におけるポンプ光とパラメトリック利得スペクトルとの間の関係を示す図である。

【図9A】利得スペクトル幅の変化のシミュレーション結果を示す図である。

【図9B】利得スペクトル幅の変化のシミュレーション結果を示す図である。

【図10】FOPPOの第6の実施形態を示す図である。

【図11】FOPPOの第10の実施形態を示す図である。

【図12A】実験結果を示す図である。

50

【図 1 2 B】実験結果を示す図である。

【図 1 2 C】実験結果を示す図である。

【図 1 3】F O P O の第 1 1 の実施形態を示す図である。

【図 1 4 A】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 4 B】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 4 C】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 4 D】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 5】F O P O の第 1 3 の実施形態を示す図である。

【図 1 6 A】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 6 B】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 6 C】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 6 D】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 6 E】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 6 F】波長可変範囲を示す図である。

【図 1 7】F O P O において使用されるファイバの分散を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 2 】

添付の図面を参照して、実施形態を以下に説明する。

【 0 0 2 3 】

パルスブレイキングの原因となる非線形歪みは、希土類添加利得ファイバに基づく一般的な超高速ファイバレーザにおいて出力ピークパワー及びパルスエネルギーを制限する主要な要因である。O P O のレーザキャビティにおける非線形歪みを減少するために、共振器内で高いチャープパルスを持するように設計されてもよい。このことは、キャビティ内部のピークパワーを効果的に低減し、パルスエネルギーをスケーリングする機能を提供する。O P O を正常分散レジームで動作することは、ポンプ、アイドラ及び信号のうちの 1 つ以上又は全てに対して O P O のレーザキャビティにおいてチャープパルスが形成されることを保証するのに役立つ。正常分散レジームは、O P O の共振キャビティ全体の長さ平均分散が  $\text{ps} / \text{nm} / \text{km}$  の単位で 0 を下回る場合を示す。異常分散レジームは、O P O の共振キャビティ全体の長さ平均分散が  $\text{ps} / \text{nm} / \text{km}$  の単位で 0 を上回る場合を示す。

【 0 0 2 4 】

第 1 の例示的な実施形態

第 1 の例示的な実施形態は、正常分散レジームで動作する同期ポンピング光ファイバパラメトリック発振器 ( F O P O ) である。F O P O は、出力においてチャープパルスを生成することにより、パルスブレイキングを発生させずに多くのパルスエネルギーをスケーリングできるようにする。1 6 0 0 nm における F O P O の平均出力は  $\sim 60 \text{ mW}$  であり、これは 1 . 4 5 n J のパルスエネルギー及び  $\sim 55\%$  のスローブパワー変換効率に対応する。F O P O から直接出力されるパルスは高くチャープされ ( $\sim 3 \text{ ps}$  の時間幅)、異常分散を有する一般的な光ファイバ圧縮器を使用することによりキャビティの外側で 1 8 0 fs に圧縮可能であった。

【 0 0 2 5 】

第 1 の例示的な実施形態 1 0 0 は、正常分散レジームで動作する同期ポンピング F O P O であり、図 1 に示すように小型 E r 添加フェムト秒ファイバレーザであってもよいポンプ源 ( シードレーザ、ポンプレザ ) 1 0 2 によりポンピングされる。F O P O は、出力 1 0 4 においてチャープパルスを生成することにより、パルスブレイキングを発生させずに多くのパルスエネルギーをスケーリングできるようにした。1 6 0 0 nm において F O P O から取得された平均出力は  $\sim 60 \text{ mW}$  であり、これは  $\sim 1 . 45 \text{ nJ}$  のパルスエネルギー ( 4 2 MHz の繰返し率を考慮する ) 及び  $\sim 55\%$  のスローブパワー変換効率に対応する。F O P O から直接出力されるパルスは、 $\sim 3 \text{ ps}$  の時間幅で高くチャープされたが、F O P O キャビティの外側で  $\sim 180 \text{ fs}$  に圧縮可能であった ( 異常分散を有する一般

10

20

30

40

50

的な光ファイバを使用することにより)。

【0026】

図1は、正常分散FOPOCapacitorを概略的に示す図である。ポンプ源は、ファイバレーザがカーボンナノチューブ/ポリマ合成可飽和吸収体に埋め込まれた1560nmで動作するEr添加フェムト秒ファイバレーザであった。本実施形態におけるレーザの繰返し率は、約4.9mのキャビティ長さに対応する42MHzである。シードレーザ102は、400fsのパルス時間幅及び約1mWの平均出力で略変換限界パルスを放出した。シードレーザ102は、第1の偏光制御器106aに結合された。第1の偏光制御器106aは、波長分割多重化装置(WDM)カプラ108aのCポートに接続されてもよい。第1のWDMカプラ108aは、C/Lバンド溶融ファイバカプラであってもよい。

10

【0027】

シードレーザからのパルス列は、第1のWDMカプラ108aを使用してFOPOCapacitorに結合される。第1のWDMカプラ108aの多重ポートは、第2のWDMカプラ108bの信号ポートに接続される。第2のWDMカプラ108bは、980/1550溶融ファイバカプラであってもよい。第1の980nmポンプレーザ110aは、第2のWDMカプラ108bのポンプポートに接続される。溶融ファイバカプラの多重ポートは、Er添加ファイバ(EDF)112に結合される。EDF112は、第3のWDMカプラ108cの多重ポートに接続される。第3のWDMカプラ108cは、980/1550溶融ファイバカプラであってもよい。第2の980nmポンプレーザ110bは、第3の溶融ファイバカプラ108cのポンプポートに接続される。

20

【0028】

シードレーザからのパルス列は、FOPOCapacitorの内部に配置された上述のEr添加ファイバ増幅器(EDFA)により増幅される。パルスは、EDFAにシードとして入射し、ポンプとして出射する。EDF112の長さは24mであり、上述したように両側からポンピングされた。EDFの分散は、1560nmにおいて約-20ps/nm/kmであり、1600nmにおいて-17ps/nm/kmである。EDFAの後の増幅されたポンパルス列の最大平均パワーは約175mWであると測定された(使用可能な980nmのポンプパワーにより制限された)。

【0029】

EDFAの出力は第3のWDM108cの信号ポートから出射し、当該信号ポートは、パラメトリック利得媒質として使用される分散シフトファイバ(DSF)114に接続される。DSF114は、Corning Inc.によりパラメトリック利得媒質(長さ~5m)として製造される一般的なDSFであってもよい。DSF114の零分散波長(ZDW)は1548nmであってもよい。DSF114のZDWにおける分散スロープは0.07ps<sup>2</sup>/nm/kmであった。DSF114の出力は、パワースプリッタ116の入力ポートに接続される。パワースプリッタ116は、溶融ファイバカプラであってもよい。パワースプリッタは、90%/10%の分割比を有する。90%出力ポートは、出力信号104を生成する。10%出力ポートは、光遅延線(ODL)118に接続される。キャビティ長は、ファイバ結合型ODL118を使用して数cm以内で調節されてもよい。ODL118の出力は偏光制御器106bに接続されて、偏光制御器106bは第1のWDMカプラ108aのLポートに接続される。このようにして、FOPOCapacitorに対する共振リングキャビティが完成する。

30

40

【0030】

パラメトリック位相整合条件の理論に基づいて、生成された信号波長及びアイドラ波長はそれぞれ、図2に示すように約1510nm及び約1610nmであると計算された。

【0031】

図3は、OPOCapacitorの分散マップを示す図である。アイドラ波長(1600nm)における平均キャビティ分散は、約-9ps/nm/kmであると推定され、これは正常分散レジームである。残留ポンプ光を除去してFOPOCapacitorの安定性を向上するために、ダイクロイックフィルタがODL118において更に挿入されてもよい。ダイクロイックフ

50



フィルタは、生成された信号波も阻止するため、アイドラ波のみが共振リングキャビティ内をラウンドトリップして共振する。当該キャビティにおいて必要なEDF及びDSFが長い場合、ポンプレーザのキャビティ長の7倍でFOPPOを動作した(EDF及びDSF以外のキャビティの残りの部分は、一般的なSMF-28ファイバで構成した)。従って、キャビティ内を同時に循環する7つのアイドラパルスが存在した。

#### 【0032】

他の一実施形態において、キャビティの全長を短くしてキャビティのラウンドトリップ毎に1つのアイドラパルスのみが存在するようにするために、キャビティは短いEDF 112を使用してもよい。

#### 【0033】

2つの偏光制御器106a及び106bは、ポンプ及び共振アイドラ波の偏光状態を最適化して最良の変換効率を達成するために使用された。他の一実施形態において、偏光維持ファイバが全体を通して使用されてもよい。

#### 【0034】

FOPPOキャビティ内にEDFAを導入することは、複数の重要な利点を提供する新規の特徴である。EDFは、チャープパルスの動作に対して必要な正常分散を提供する。1560nmポンプパルスも、EDFを通して伝搬することにより同様の正のチャープを取得した。利得、カー非線形性及び正常分散の相互作用により、ポンプパルスはピコ秒の範囲に広げられた。これは、適切なチャープ同期及びキャビティ内の共振アイドラとの時間重複を保証する。FOPPOのキャビティ長は、ポンプを阻止するダイクロイックフィルタを除去し且つ外部のポンプパルス列をオフにすることで、EDFにより提供された利得からFOPPO自体(約1570nm)にレーザを当てられるようにすることにより、正確に測定可能である。その場合、レーザキャビティ長に直接接続される正確な縦モード間隔は、高速光検知器及びRFスペクトル分析器を使用することにより測定可能である。一般に、OPOはキャビティ長の完全な一致が達成される場合のみ発振するため、OPOのキャビティ長とポンプレーザのキャビティ長とを一致させるには非常に時間がかかる。本方法により、迅速で正確なキャビティ長の推定が可能になり、FOPPOを構成するのに必要な時間が短縮される。

#### 【0035】

他の一実施形態は、リングキャビティが一方向に動作することを保証するためにアイソレータを含む。アイソレータは、第1のWDMカプラ108aと第2のWDMカプラ108bとの間に位置するファイバ結合型アイソレータであってもよい。アイソレータは、ODL118内に位置する自由空間アイソレータであってもよい。アイソレータは、パワースプリッタ116の10%ポートと第1のWDMカプラ108aとの間に位置してもよい。アイソレータは、Cバンド、C+Lバンド又はLバンドに対して最適化されてもよい。アイソレータは、ダイクロイックフィルタを含んでもよい。

#### 【0036】

##### 第1の例示的な実施形態の実験結果

FOPPO100の動作中、ポンプパワーが約65mWの閾値レベルを上回って増加され次第、アイドラパルスが生成される。ポンプパワーの関数であるFOPPOの出力104の変化を図4に示す。異なるポンピングパワー(70mW、120mW及び175mW)におけるポンプ波、信号波及びアイドラ波の光スペクトルの変化を図4に更に示す。FOPPOのアイドラ波の明確な矩形スペクトル形状が観察された。これは、正常分散レジームで動作しているモード同期レーザに対する通常のスペクトル形状である。最高使用可能ポンプパワーにおいて、FOPPOの半値全幅(FWHM)スペクトル帯域幅は20nmであると測定された。これは、デチャープ後の~170fsパルスをサポートできる。高ポンプパワーにおいて、複数のFWMピーク(信号波/ポンプ波とアイドラ波/ポンプ波の相互作用による)が更に観察された。DSFのZDWが1548nmであり、1560nmポンプの短波長側における位相整合に好ましくなるため、短波長側におけるFWMピークは更に顕著であった。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 3 7 】

～ 1 7 5 m W のポンプパワーにおいて、アイドラのみの生成された最高出力は～ 6 0 m W であると測定された ( 1 5 6 0 n m の残留ポンプ光及び～ 1 5 2 5 n m の生成された信号光を除去するためにダイクロイックフィルタを使用した後 ) 。これは、4 2 M H z の繰返し率を考慮した場合の～ 1 . 4 5 n J のアイドラパルスエネルギーに対応する。変換された出力と総ポンプパワーとの比として定義される最大パワー変換効率は、1 7 5 m W ポンプパワーにおいて 3 4 % であると計算された。推定スロープ変換効率は～ 5 5 % であった。この達成された高変換効率は、縮退 F W M 利得 ( ポンプからアイドラ / 信号へ ) 及び追加 F W M 利得 ( ポンプ及びアイドラから信号へ ) に起因すると考えられる。次節において、これを更に明確にする。

10

## 【 0 0 3 8 】

キャビティの離調に対する F O P O の頑強性を調べるために、キャビティ長を調節して出力スペクトルシフトを観察した。F O P O のキャビティ長は全体で 6 m m まで変更でき、十分なパワー出力が依然として観察された。共振アイドラ信号波長は、調節範囲全体に対して 1 5 8 5 n m から 1 6 1 5 n m にシフトした。出力スペクトルの包絡線は、D S F 利得スペクトルの計算された形状を適切に反映した。

## 【 0 0 3 9 】

アイドラパルスは、F O P O の出力において高くチャープされた。累積チャープを補償する ( 又はデチャープする ) ために、一般的なシングルモードファイバ ( S M F - 2 8 ) を使用した。F O P O の出力付近のパルス時間幅は～ 3 p s であった。パルスは、～ 1 0 m の S M F - 2 8 を使用して、フーリエ限界パルス幅 ( transform limited duration ) である～ 1 8 0 f s 付近に圧縮可能であった。ピークパワーは、1 . 4 5 n J パルスエネルギーの場合に約 8 k W であると推定された。

20

## 【 0 0 4 0 】

## 第 2 の例示的な実施形態

図 7 を参照して、第 2 の例示的な実施形態 7 0 0 を説明する。第 1 の例示的な実施形態 1 0 0 と共通の構成を第 1 の例示的な実施形態と同一の図中符号で示し、説明を省略する。

## 【 0 0 4 1 】

第 2 の例示的な実施形態 7 0 0 は、E D F A を含まないことを除いて、第 1 の例示的な実施形態 1 0 0 と同一である。第 2 の例示的な実施形態 7 0 0 は、シングルモードファイバ 7 2 0 を更に含む。

30

## 【 0 0 4 2 】

## 第 1 の例示的な実施形態の数値シミュレーション

F O P O キャビティ周辺のアイドラパルスの形成及び変化をシミュレートするために、現実的な実験パラメータを使用する数値シミュレーションを使用できる。モデルは、非線形シュレディンガー方程式に基づいて作成されてもよい。式を数値的に解くために、相互作用表示における 4 次ルンゲ・クッタ ( R K 4 - I P ) 法が使用されてもよい。ポンプパルスはガウス形状を有すると仮定した。共振アイドラ波長は、D S F を推定するための位相整合曲線を使用して計算されてもよい。その場合、ポンプパルスとアイドラパルスとの間の遅延は、キャビティ同期条件を満たすためにキャビティにおいて使用される全てのファイバの分散プロファイルを使用して計算されてもよい。ポンプパワーに依存して、F O P O キャビティにおける共振アイドラ波は約 1 0 0 回のラウンドトリップ後に定常状態に到達した。1 7 5 m W のポンプパワーを使用した場合、時間幅 3 . 7 p s のアイドラ波のきれいなガウス時間プロファイルがシミュレートされた F O P O の出力において取得された。その波長は～ 1 6 0 0 n m であった。本出願人は、これらの結果は実験結果と十分に一致することを確認した。

40

## 【 0 0 4 3 】

ポンプパワーの関数である F O P O の出力の変化及び 3 つの異なる出力に対応する出力スペクトルは、上記の実験から観察されたものと十分に一致する。高い変換効率は、補助

50

ラマン過程により達成可能である。しかし、本出願人は、上記の実験結果及び数値結果を得るためにキャビティ内フィルタが使用されなかったこと、並びに石英ファイバにおけるラマン利得のピークは約 1 6 7 0 n m である ( 1 5 6 0 n m でポンピングされた場合 ) が本例における生成されたアイトラ ( 1 6 0 0 n m ) はラマン利得のピークから非常に離れていたことから、補助ラマン過程は第 1 の例示的な実施形態 1 0 0 に当てはまらなると判定した。本出願人は、新しいメカニズムが第 1 の例示的な実施形態の設定に関係すると結論付けた。実験結果及びシミュレーション結果を精査することにより、本出願人は、アイトラにおける光子数と信号における光子数とが同一でないと判定した。本出願人は、観察された高い変換効率はポンプ光子と生成された信号光子との間で生じる追加 F W M 過程によるものであり、これが実際にアイトラ波に追加エネルギーを供給したと結論付けた。この新しいメカニズムを確認するために、ポンプパワーが 1 7 5 m W に固定された場合の D S F ファイバにおけるポンプ波、信号波、アイトラ波及び生成された F W M 波に含まれるパルスエネルギーのシミュレートされた変化を図 5 に示す。D S F の最初の 1 m において、縮退 F W M がポンプパルスにより発生し、信号 / アイトラ波が徐々に成長した。D S F の約 1 . 5 m 以降、ポンプ波と信号波との間に別の F W M 過程が出現したため、アイトラの成長速度は信号より速かった。D S F の 1 . 5 m ~ 3 m において、信号波が成長し、第 1 の F W M 波及び約 1 6 0 0 n m における信号に同時にエネルギーを伝達していた。D S F の 3 m 以降、信号波の成長は止まった。ポンプから受け取ったエネルギーの全ては、すぐに信号波及び第 1 の F W M 波に伝達された。これにより、D S F の終端においてアイトラ波が信号波よりはるかに高いエネルギーを有する理由が説明される。

#### 【 0 0 4 4 】

F O P O キャビティ周辺のレーザパルスの変化を更に理解するために、キャビティ周辺の生成されたアイトラ波及びポンプ波のパルスエネルギー及びパルス時間幅を図 6 に示す。点 A、点 B 及び点 C における 1 5 6 0 n m 及び 1 6 0 0 n m のパルスプロファイルを示す。結果は、E D F を点 A から点 B に通過した場合、生成されたアイトラパルス及びポンプパルスの双方が非常に大きくチャープされ且つ時間に関して広がったことを示す。E D F を通って点 A から点 B に伝搬したことにより、アイトラパルスの時間幅 ( F W H M における ) は 2 . 7 p s から 8 . 5 p s に増加し、ポンプパルスは 0 . 4 p s から 5 . 5 p s に広がった。数値シミュレーションでは、本段階において E D F の利得によりポンプパルスのみが大幅に増幅された。点 B から点 C の D S F において、ポンプエネルギーはパラメトリック相互作用を介してアイトラに伝達した。D S F の前半部分において、アイトラを中心部分が他の部分より速く成長したため、パルス幅は狭くなった ( 8 . 5 p s から 3 . 5 p s に減少した ) 。それに対して、ポンプパルス時間幅は、ポンプの中心部分が低下したため増加した。D S F の後半部分において、ポンプの中心部分がエネルギーの大部分をアイトラに伝達した際に、アイトラの前縁及び後縁がパルスの中心部分より増幅されたため、アイトラの時間幅は僅かに増加し始めた。当該区間において、ポンプ時間幅は僅かに減少した。D S F の終端において、ポンプの中心部分はアイトラ波に完全に変換されるため、点 C におけるパワープロファイルにより示されるように時間プロファイルに穴が形成され、増幅されたアイトラ波の時間プロファイルはガウス形状に非常に近かった。D S F の後、アイトラの 9 0 % がキャビティの出力に結合された。S M F - 2 8 において、アイトラの 1 0 % のみが伝搬する。S M F - 2 8 の異常分散のため、その時間幅は 3 . 7 p s から 2 . 7 p s に減少する。同一の変化が次のラウンドトリップにおいて再度繰り返した。

#### 【 0 0 4 5 】

F O P O の出力の波長調節 ( wavelength tuning )

多くの場合、第 1 の例示的な実施形態 1 0 0 及び第 2 の実施形態 7 0 0 で説明したような波長調節可能な F O P O を作成することが望ましい。それにより、F O P O の出力波長は調節可能である。従来技術の波長調節方法は、共振キャビティ内にフィルタを配置することを含む。本出願人は、F O P O を波長調節させるために使用できる種々の波長調節方法を発見した。波長調節は、F O P O の共振キャビティの長さ、シードパルスの繰返し率

又はポンプパルスの波長を変更することにより達成可能である。これらの方法は、別個に又は互いに組み合わせて使用可能である。

【 0 0 4 6 】

パラメトリック利得のために使用されるファイバの長さが長いほどパラメトリック利得が狭いため、長いファイバはスペクトルフィルタとして機能する。その場合、波長調節は、シードパルスの波長又はパワーを変更することにより達成可能である。

【 0 0 4 7 】

通常、F O P O において使用されるポンプパルスは非常に狭く、式 ( 0 ) で説明される。

【 0 0 4 8 】

10

$$P_0 = P_0(t) \quad (0)$$

しかし、スペクトル幅が十分に狭い場合、パルスを連続波として扱うことができる。従って、以下の説明において、ポンプ光をCW光源として扱うことができる。式 ( 1 ) ~ ( 5 ) において、信号又はアイドラに対する利得を  $G_i$  により説明する。以下に説明する導波管の一例はD S F 1 1 4 である。

【 0 0 4 9 】

【数 1】

$$G_i(L) = \left( \frac{\gamma \cdot P_0}{g} \sinh(gL) \right)^2 \quad (1) \quad 20$$

【 0 0 5 0 】

【数 2】

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega_p}{c \cdot A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi \cdot n_2}{A_{\text{eff}} \cdot \lambda_p} \quad (2)$$

【 0 0 5 1 】

【数 3】

$$g^2 = -\Delta\beta \cdot \left( \frac{\Delta\beta}{4} + \gamma P_0 \right) \quad (3) \quad 30$$

【 0 0 5 2 】

【数 4】

$$\Delta\beta = \beta_2 \cdot (\Delta\omega)^2 + \frac{1}{12} \beta_4 \cdot (\Delta\omega)^4 \quad (4)$$

【 0 0 5 3 】

【数 5】

$$\Delta\omega = |\omega_s - \omega_p|, \Delta\omega = |\omega_i - \omega_p| \quad (5) \quad 40$$

【 0 0 5 4 】

：導波管 1 1 4 の非線形係数

$P_0$  : ポンプパワー

$L$  : 導波管 1 1 4 の長さ

$n_2$  : 導波管 1 1 4 の非線形指数

$A_{\text{eff}}$  : 導波管 1 1 4 の有効範囲

$\beta_2, \beta_4$  : 導波管 1 1 4 の 2 次分散パラメータ及び 4 次分散パラメータ

$\omega_p$  : ポンプ光の中心波長

$\omega_p$  : ポンプ光の角周波数

50

$s$  : 信号光の角周波数

$i$  : アイドラ光の角周波数。

【 0 0 5 5 】

パラメータ  $g$  は有理数であると仮定するのが適切であるため、 に対する制限は、式 ( 3 ) から式 ( 6 ) であると導出されてもよい。

【 0 0 5 6 】

【 数 6 】

$$-4\gamma P_0 < \Delta\beta < 0 \quad (6)$$

10

【 0 0 5 7 】

従って、式 ( 7 ) に列挙する以下の条件において、最大利得  $G_i$  及びエッジにおける利得  $G_i$  が生じる。

【 0 0 5 8 】

【 数 7 】

$$\begin{aligned} G_{i,\max} \text{ at } \Delta\beta &= -2\gamma P_0; g = \gamma \cdot P_0; G_{i,\max}(L) = \sinh^2(\gamma \cdot P_0 \cdot L) \\ G_{i,\text{edge}1} \text{ at } \Delta\beta &= 0; g = 0; G_{i,\text{edge}1}(L) = 0 \\ G_{i,\text{edge}2} \text{ at } \Delta\beta &= -4\gamma P_0; g = 0; G_{i,\text{edge}2}(L) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

20

【 0 0 5 9 】

式 ( 7 ) 及び式 ( 4 ) に従って、最大利得及び利得エッジにおけるポンプと信号又はアイドラとの間の周波数差 は以下のように計算される。式 ( 8 ) は、最大利得における周波数差  $\Delta\omega_{\max}$  を説明する。式 ( 9 ) は、一方の利得エッジにおける周波数差  $\Delta\omega_{\text{edge}1}$  を説明する。式 ( 10 ) は、一方の利得エッジにおける周波数差  $\Delta\omega_{\text{edge}2}$  を説明する。

【 0 0 6 0 】

【 数 8 】

$$\begin{aligned} G_{i,\max} \text{ at } \Delta\beta &= -2 \cdot \gamma \cdot P_0 \\ \beta_2 \cdot (\Delta\omega)^2 + \frac{1}{12} \cdot \beta_4 \cdot (\Delta\omega)^4 &= -2 \cdot \gamma \cdot P_0 \\ \Delta\omega_{\max} &= \pm \sqrt{6 \frac{-\beta_2 \pm \sqrt{\beta_2^2 - \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \beta_4 \cdot \gamma \cdot P_0}}{\beta_4}} \end{aligned} \quad (8)$$

30

【 0 0 6 1 】

【 数 9 】

$$\begin{aligned} G_{i,\text{edge}1} \text{ at } \Delta\beta &= 0 \\ \beta_2 \cdot (\Delta\omega)^2 + \frac{1}{12} \cdot \beta_4 \cdot (\Delta\omega)^4 &= 0 \\ \Delta\omega_{\text{edge}1} &= \pm \sqrt{6 \frac{-\beta_2 \pm \sqrt{\beta_2^2}}{\beta_4}} \end{aligned} \quad (9)$$

40

【 0 0 6 2 】

【数 1 0】

$$G_{i,edge2} \text{ at } \Delta\beta = -4 \cdot \gamma \cdot P_0$$

$$\beta_2 \cdot (\Delta\omega)^2 + \frac{1}{12} \cdot \beta_4 \cdot (\Delta\omega)^4 = -4 \cdot \gamma \cdot P$$

$$\Delta\omega = \pm \sqrt{6 \frac{-\beta_2 \pm \sqrt{\beta_2^2 - \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \beta_4 \cdot \gamma \cdot P_0}}{\beta_4}}$$
(10)

【0063】

10

式(1)で説明するように、利得スペクトルは導波管の長さの関数である。導波管の長さが増加するにつれて、利得スペクトル幅は減少する。しかし、ポンプ光の強度が一定に維持される場合、パラメータ「g」が変更されないため、利得スペクトルのピーク波長は変化しない。

【0064】

それに対して、半値全幅における利得スペクトル幅は以下の式(11)及び(12)により計算可能である。式(11)により計算されるエッジ波長は、式(6)～(10)により計算されるエッジ波長より中心波長に近い。

【0065】

【数 1 1】

20

$$\frac{1}{2} (\sinh(\gamma \cdot P_0 \cdot L))^2 = \left( \frac{\gamma \cdot P_0}{g} \cdot \sinh(g \cdot L) \right)^2$$
(11)

【0066】

【数 1 2】

$$\frac{1}{2} G_{i,max} = \frac{1}{2} (\sinh(\gamma \cdot P_0 \cdot L))^2, \text{ at } g = -2 \cdot \gamma \cdot P_0$$
(12)

30

【0067】

図8は、導波管114におけるポンプ光とパラメトリック利得スペクトルとの間の関係を示す図である。利得スペクトル領域は、式(6)～(10)により制限される。そのため、式(11)及び(12)により計算されるエッジ波長は、式(6)～(10)により計算される波長より中心波長から遠い。これは、スペクトルに対する可能な矩形形状を示す。それに加えて、ポンプ光の波長が導波管114の零分散波長に近い場合、ポンプパルスの波形は維持される。パルスの強度は導波管114に沿って小さくなり、エネルギーはポンプから信号及び/又はアイドラに伝達されると予想される。

【0068】

信号又はアイドラパルスのスペクトル、FOPPOの総分散及びポンプパルスの繰返し率の間の関係を導出するために、1次分散を考慮する。第2の実施形態200のようなファイバパラメトリック発振器の場合、信号及びアイドラパルスのラウンドトリップ時間は式(13)により推定される。

40

【0069】

【数 1 3】

$$T_{\text{round-trip}} = \left( \frac{n_{\text{HNL F}}(\omega_{0,\text{HNL F}})}{c} + \beta_{1,\text{HNL F}}(\omega_{s/i}) \right) \cdot L_{\text{HNL F}} + \left( \frac{n_{\text{ODCF}}(\omega_{0,\text{ODCF}})}{c} + \beta_{1,\text{ODCF}}(\omega_{s/i}) \right) \cdot L_{\text{ODCF}} \quad (13)$$

【0070】

$n_{\text{HNL F}}$  ( ) : パラメトリック利得に対する高非線形ファイバ (HNL F) 114 の周波数 における指数 10

$n_{\text{ODCF}}$  ( ) : 発振器を作成するための発振器分散制御ファイバ (ODCF) 720 の周波数 における指数

$1, \text{HNL F}$  ( ) : 高非線形ファイバ (HNL F) の周波数 における 1 次分散。1 次分散は群速度に等しく、すなわち導波管におけるパルス伝搬速度に等しい

$1, \text{ODCF}$  ( ) : 発振器分散制御ファイバ (ODCF) の周波数 における 1 次分散。この場合、ODCF は、キャビティ全体の分散を制御するために HNL F と組み合わせられて使用されるもう 1 つのファイバである

$c$  : 真空中の光速

$\omega_0$  : 導波管の零分散における角周波数

20

$s/i$  : 信号光 / アイドラ光の角周波数

$L_{\text{HNL F}}$  : HNL F の長さ

$L_{\text{ODCF}}$  : ODCF の長さ。

【0071】

指数  $n$  ( ) と分散 ( ) との関係は、式 (14) により説明される。この場合、指数  $n$  ( ) は、線形項及び非線形項の双方を含む総屈折率である。

【0072】

【数 1 4】

$$\beta(\omega) = n(\omega) \cdot \frac{\omega}{c} = \beta_0|_{\omega_0} + \sum \left[ \frac{1}{i!} \cdot \left\{ \left( \frac{d}{d\omega} \right)^i \beta(\omega) \right\} \right]_{\omega_0} \cdot (\omega - \omega_0)^i \quad (14) \quad 30$$

【0073】

従って、式 (13) は、式 (15) で説明するように、 に関して書くように変換可能である。

【0074】

【数 1 5】

$$T_{\text{round-trip}} = \left( \frac{\beta_{\text{HNL F}}(\omega_{0,\text{HNL F}})}{\omega_{0,\text{HNL F}}} + \beta_{1,\text{HNL F}}(\omega_{s/i}) \right) \cdot L_{\text{HNL F}} + \left( \frac{\beta_{\text{ODCF}}(\omega_{0,\text{ODCF}})}{\omega_{0,\text{ODCF}}} + \beta_{1,\text{ODCF}}(\omega_{s/i}) \right) \cdot L_{\text{ODCF}} \quad (15) \quad 40$$

【0075】

ODCF の場合、ODCF は複数の種類のファイバから構成可能である。従って、式 (15) の第 2 項を式 (16) で説明する。式 (16) で説明されるように、複数の種類及び長さの複数のファイバが存在する。

【0076】

50

【数 16】

$$\left( \frac{\beta_{ODCF}(\omega_{0,ODCF})}{\omega_{0,ODCF}} + \beta_{1,ODCF}(\omega_{s/i}) \right) \cdot L_{ODCF}$$

$$= \sum_{ODCFk} \left( \left( \frac{\beta_{ODCFk}(\omega_{0,ODCFk})}{\omega_{0,ODCFk}} + \beta_{1,ODCFk}(\omega_{s/i}) \right) \cdot L_{ODCFk} \right)$$

(16)

10

【0077】

ポンプ源 102 により生成されるポンプパルスは繰返し率  $f_{rep}$  及び時間幅 を有すると仮定する。利得パルスは、ポンプパルス幅 と同一の時間幅を有する。また、 $\beta_{1,HNLF}(\omega_{s/i})$  の 1 次分散が  $\beta_{1,HNLF}(\omega_p)$  と異なる場合でも、約  $\omega_{s/i}$  の光角周波数における利得パルスは  $1 / (\beta_{1,HNLF}(\omega_p))$  のポンプパルスと同一の速度で移動する。従って、HNLF の長さは、式 (17) で説明されるように、パルス、信号及びアイドラが重複する期間に基づいて計算される。

【0078】

【数 17】

$$L_{HNLF} \leq \frac{2 \cdot \Delta\tau}{\beta_{1,HNLF}(\omega_{s/i}) - \beta_{1,HNLF}(\omega_p)}$$

(17)

20

【0079】

しかし、利得スペクトル領域は式 (6) ~ (10) により制限され、式 (17) で計算されるように長さにより制限される。非線形ファイバが長い場合、ポンプ、信号及びアイドラは重複せず、その場合、式 (6) ~ (10) は関係なくなる。

繰返し率と FOPPO におけるラウンドトリップとの関係

利得パルスの時間幅は であると仮定する。従って、発振パルスの増幅を説明するために、式 (18) を導出できる。

30

【0080】

【数 18】

$$\frac{1}{f_{rep}} - \frac{1}{2} \cdot \Delta\tau \leq T_{round-trip} \leq \frac{1}{f_{rep}} + \frac{1}{2} \cdot \Delta\tau$$

(18)

【0081】

式 (15)、(16) 及び (18) に従って、式 (19) は発振パルスの増幅を更に説明する。

【0082】

40



【数 19】

$$\frac{1}{f_{rep}} - \frac{\Delta\tau}{2} \leq \left\{ \left( \frac{\beta_{HNLf}(\omega_{0,HNLf})}{\omega_{0,HNLf}} + \beta_{1,HNLf}(\omega_{s/i}) \right) \cdot L_{HNLf} \right. \\ \left. + \sum_{ODCFk} \left( \left( \frac{\beta_{ODCFk}(\omega_{0,ODCFk})}{\omega_{0,ODCFk}} + \beta_{1,ODCFk}(\omega_{s/i}) \right) \cdot L_{ODCFk} \right) \right\} \leq \frac{1}{f_{rep}} + \frac{\Delta\tau}{2} \quad (19)$$

10

【0083】

式(19)から、信号パルス又はアイドラパルスの中心波長及びエッジ波長を式(20)～(22)で説明するように計算できる。

【0084】

【数20】

$$\left\{ \left( \frac{\beta_{HNLf}(\omega_{0,HNLf})}{\omega_{0,HNLf}} + \beta_{1,HNLf}(\omega_{s/i\_c}) \right) \cdot L_{HNLf} \right. \\ \left. + \sum_{ODCFk} \left( \left( \frac{\beta_{ODCFk}(\omega_{0,ODCFk})}{\omega_{0,ODCFk}} + \beta_{1,ODCFk}(\omega_{s/i\_c}) \right) \cdot L_{ODCFk} \right) \right\} = \frac{1}{f_{rep}} \Delta\tau \quad (20)$$

20

【0085】

【数21】

$$\left\{ \left( \frac{\beta_{HNLf}(\omega_{0,HNLf})}{\omega_{0,HNLf}} + \beta_{1,HNLf}(\omega_{s/i\_fwhm1}) \right) \cdot L_{HNLf} \right. \\ \left. + \sum_{ODCFk} \left( \left( \frac{\beta_{ODCFk}(\omega_{0,ODCFk})}{\omega_{0,ODCFk}} + \beta_{1,ODCFk}(\omega_{s/i\_fwhm1}) \right) \cdot L_{ODCFk} \right) \right\} = \frac{1}{f_{rep}} - \frac{\Delta\tau}{2} \quad (21)$$

30

【0086】

【数22】

$$\left\{ \left( \frac{\beta_{HNLf}(\omega_{0,HNLf})}{\omega_{0,HNLf}} + \beta_{1,HNLf}(\omega_{s/i\_fwhm2}) \right) \cdot L_{HNLf} \right. \\ \left. + \sum_{ODCFk} \left( \left( \frac{\beta_{ODCFk}(\omega_{0,ODCFk})}{\omega_{0,ODCFk}} + \beta_{1,ODCFk}(\omega_{s/i\_fwhm2}) \right) \cdot L_{ODCFk} \right) \right\} = \frac{1}{f_{rep}} + \frac{\Delta\tau}{2} \quad (22)$$

40

【0087】

$s / i\_c$  : 信号光 / アイドラ光の中心角周波数

$s / i\_fwhm1$  : FWHMにおける信号光 / アイドラ光の角周波数

50

$s / i_{fwhm2}$  : FWHMにおける信号光/アイドラ光の別の角周波数。

#### 【0088】

式(20)により説明するように、信号光及びアイドラ光の中心波長は、FOPPOの総分散及びポンプパルスの繰返し率により判定される。従って、ポンプパルスの繰返し率を変更することにより、信号又はアイドラの波長を制御できる。

#### 【0089】

更に、信号光及びアイドラ光のスペクトル幅は、分散又はポンプパルスの時間的パルス幅により判定される。従って、発振器の分散の設計及び/又はポンプパルス幅により、スペクトル幅を制御できる。これは、実際はポンプパルスの時間的形状がスペクトルフィルタとして機能することを意味する。式(21)及び(22)は信号パルス及びアイドラパルスのスペクトル幅を成形する要素の全てを完全に説明するものでなく、他の非線形効果が発振器内に更に存在する。

#### 【0090】

##### 第3の例示的な実施形態

第3の例示的な実施形態は、上述した第2の実施形態700の特定の例である。本実施形態において、零分散波長は1050nmであり、パラメトリック利得に対するHNLF114の3次分散は $6.71776 \times 10^{-4} \text{ s}^3/\text{m}$ であり、パラメトリック利得に対するHNLF114の4次分散は $-9.83483 \times 10^{-5} \text{ s}^4/\text{m}$ である。ポンプレーザ102により生成されるポンプパルスに対して、出力波長は1040nmであり、平均パワーは4Wであり、繰返し率は15MHzであり、時間的パルス幅は10psであり、スペクトル幅は0.11nmである。

#### 【0091】

図9A及び図9Bは、ポンプパルスの波長が1040nmから1060nmに変更される際のHNLF114の長さ $L_{HNLF}$ に依存する利得スペクトル幅の変化のシミュレーション結果を示す。図9Aに示すように、ポンプパルスの中心波長が1040nmであり且つ $L_{HNLF}$ が0.01mである場合、信号の利得スペクトルは763nm~804nmである。図9Bに示すように、ポンプパルスの中心波長が1040nmであり且つ $L_{HNLF}$ が0.01mである場合、アイドラの利得スペクトルは1469nm~1632nmである。

#### 【0092】

##### 第4の例示的な実施形態

第4の例示的な実施形態は、上述した第2の実施形態700の特定の例である。本実施形態において、ファイバ720は、零分散波長が1300nmであり、3次分散が $6.61859 \times 10^{-4} \text{ s}^3/\text{m}$ であり、4次分散が $-4.59295 \times 10^{-5} \text{ s}^4/\text{m}$ であるシングルモードファイバ(SMF)である。当該ファイバは、776nm~824nmの範囲において正常の負の2次分散を有する。1300nmにおける $\beta_2$ が $7.125 \times 10^{-16} \text{ s}^2/\text{m}$ であり且つファイバ720の長さ $L_{ODCF}$ が13.52mであるため、ODL118は、763nm~804nmの波長に対する15MHzの繰返し率に対して0cmから約4cmに調節されてもよい。HNLF114は、第3の例示的な実施形態において使用されるファイバと同一である。ポンプパルス時間幅は10psであり、出力スペクトル幅は、式(21)及び(22)により約6nmであると計算される。

#### 【0093】

##### 第5の例示的な実施形態

第5の例示的な実施形態は、上述した第2の実施形態700の別の特定の例である。本実施形態は、ファイバ720が正常分散ファイバ(NDF)であることを除いて、第4の例示的な実施形態と同様である。この第5の例示的な実施形態において、ファイバ720は、アイドラの波長範囲において正常分散を有し、アイドラ光の波長領域における発振器のために使用される。ファイバ720は、零分散波長が1350nmであり、3次分散が $-2.50339 \times 10^{-4} \text{ s}^3/\text{m}$ であり、4次分散が $-3.43249 \times 10^{-5} \text{ s}^4/\text{m}$ であるNDFファイバである。1350nmにおける $\beta_2$ が $6.735 \times 10^{-16} \text{ s}^2/\text{m}$

00[1/m]であり且つファイバ720の長さ $L_{ODCF}$ が13.8mであるため、ODL118は、1469nm~1632nmの波長に対する15MHzの繰返し率に対して0cmから約4cmに調節されてもよい。ポンプパルス時間幅は10psであり、出力スペクトル幅は、式(21)及び(22)により、1469nmにおいて約25nmであり、1632nmにおいて15nmであると計算される。

#### 【0094】

##### 第6の例示的な実施形態

図10を参照して、第6の例示的な実施形態1000を説明する。前述の実施形態と共通の構成を同一の図中符号で示し、説明を省略する。前述の実施形態と比較して、信号パルス及びアイドラパルスは第4のWDMカプラ1024aにより分割され、第5のWDMカプラ1024bにより後で再結合される。信号光は、第4の実施形態において説明したSMF1020ファイバに結合され、アイドラ光は、第5の実施形態において使用したNDF1022に結合される。SMF1020のファイバ長は13.52mであり、NDF1022は13.8mである。

#### 【0095】

##### 第7の例示的な実施形態

第7の例示的な実施形態は、上述した第2の実施形態700の別の特定の例であり、以下に説明する相違点を除いて第4の例示的な実施形態と同様である。ポンプレーザ102は、波長を1040nmから1060nmに調節可能な波長可変レーザである。HNLF114の長さは1mである。従って、中心波長は778nmから835nmに調節され、信号のスペクトル幅は3.5nmから5nmに変更される。FOPPOにおいて、ファイバ720はSMFであり、長さは12.7mである。ODL118の長さは4cmから6cmに調節される。

#### 【0096】

##### 第8の例示的な実施形態

第8の例示的な実施形態は、上述した第2の実施形態700の特定の例であり、以下に説明する相違点を除いて第5の例示的な実施形態と同様である。第7の例示的な実施形態と同様に、ポンプレーザ102は、波長を1040nmから1060nmに調節可能な波長可変レーザである。FOPPOの中心波長は1451nmから1568nmに調節され、スペクトル幅は14.8nmから13.6nmに変更される。FOPPOにおいて、ファイバ720はNDFであり、長さは12.9mである。ODLの長さは11cmから14cmに調節される。

#### 【0097】

##### 第9の例示的な実施形態

第9の例示的な実施形態は、以下に説明する相違点を除いて、上述した第6の実施形態1000の別の例である。第7の例示的な実施形態と同様に、ポンプレーザ102は、波長を1040nmから1060nmに調節可能な波長可変レーザである。HNLF114のファイバ長は1mである。SMF1020のファイバ長は13.52mであり、NDF1022は12.98mである。ODL118の長さは0cmから3cmに調節される。

#### 【0098】

上述した第2~第9の実施形態は、散逸ソリトンのモード同期によるファイバにおける非線形効果に基づいて、パルスブレイキングを防止する。従って、スペクトルフィルタを用いずに、散逸ソリトンのモード同期に基づいて高出力を達成できる。スペクトルフィルタを除去することにより、波長の調節性が維持されるため、発振器の長さを調節するだけで波長を変えることができる。

#### 【0099】

##### 第10の実施形態

第10の実施形態1100は、ポンプ源102としてフェムト秒の固定波長ファイバレーザを使用する調節範囲の広い正常分散FOPPOである。正常分散レジームでFOPPOを動作することにより、最大1.3nJのパルスエネルギーで1360nm~1835nm

10

20

30

40

50

の波長可変範囲が達成された。FOPPOキャビティの外部で数mの一般的なシングルモードファイバ(SMF-28)を使用してデチャープした後、出力パルス時間幅は~200fsに到達した。

#### 【0100】

図11を参照して、第10の実施形態1100を説明する。前述の実施形態と共通の構成を第1の例示的な実施形態と同一の図中符号で示し、説明を省略する。図11は、正常分散FOPPO源1100である第10の実施形態を概略的に示す図である。源1100は、FOPPO共振キャビティ及びシードレーザ102である2つの部分に分割可能である。シードレーザ102は、発振器1126及び1つ以上の増幅器を含む。

#### 【0101】

##### 発振器

発振器1126は波長可変レーザである。発振器1126は、1つ以上の光ファイバ、溶融ファイバ及びファイバ結合型マイクロ光学構成要素を含む光ファイバリングレーザであってもよい。発振器1126は、エルビウム添加ファイバであってもよい第1の線形利得媒質1130aを含む。第1の線形利得媒質1130aは、別のドーパントを有する別の利得媒質又はファイバであってもよい。第1の線形利得媒質1130aの第1の端部は、第1のWDMカブラ1132aの第1のポートに結合される。第1のWDMカブラ1132aは、WDMカブラ108bと同様又は同一であってもよい。第1のWDMカブラ1132aは信号ポート及びポンプポートを含んでもよく、第1のWDMカブラ1132aは合分波器として動作されてもよい。第1のポンプレーザ1134aは第1のWDMカブラ1132aのポンプポートに結合され、第1のWDMカブラ1132aはポンプ光を第1の線形利得媒質1130aの第1のポートに渡し、第1の線形利得媒質1130aは信号光を放出する。信号光は、第1の線形利得媒質1130aからカブラ1132aの第1のポートに結合される。カブラ1132aは信号を信号ポートに渡す。第1のポンプレーザ1134a及び第1の線形利得媒質1130aは、逆ポンプ構成で構成されてもよい。第1のポンプレーザ1134aは、980nmファイバ結合型レーザであってもよい。カブラ1132aは、溶融ファイバカブラであってもよい。あるいは、第1のポンプレーザ1134aは1480nmレーザであってもよく、第1のWDMカブラ1132aは、ダイクロイックフィルタを用いるファイバ結合型マイクロ光学構成要素であってもよい。

#### 【0102】

第1のWDMカブラ1132aの信号ポートは、アイソレータ1136aの入力ポートに接続される。アイソレータ1136aは、アイソレータ1136aの出力ポートに信号光を渡す。アイソレータ1136aは、光がアイソレータ1136aの出力ポートからの入力ポートに通過するのを阻止する。これにより、発振器1126のリングが一方向に動作することが保証される。アイソレータ1136a及び第1のWDMカブラ1132aは、単一の構成要素に組み合わせられてもよい。

#### 【0103】

アイソレータ1136aの出力ポートは、可飽和吸収体1138の入力に結合される。可飽和吸収体1138からの光は、光遅延線1140の入力に結合される。光遅延線からの光は、カブラ1142の入力ポートに結合される。カブラ1142はパワースプリッタである。パワースプリッタ1142は、入力ポートに結合された光を、第1の線形利得媒質1130aに結合されてレーザキャビティに対するフィードバックを提供する第2のポートと、ポンプ源102の1つ以上の増幅器に伝えられる出力ポートとに分割する。パワースプリッタ1142は、5%/95%の分割比を有してもよい。パワースプリッタ1142は、溶融光ファイバカブラであってもよい。パワースプリッタ1142は、マイクロ光学ファイバカブラスプリッタであってもよい。パワースプリッタ1142は、発振器の波長範囲に対して最適化されてもよい。

#### 【0104】

本明細書中で説明する発振器1126内の構成要素のうちの1つ以上は、効率向上又はコスト低減のために組み合わせられてもよい。発振器の構成要素は、自由空間光学構成要素

10

20

30

40

50

に置換されてもよい。発振器 1 1 2 6 の繰返し率は、O D L 1 1 4 0 を変更することにより調節される。

#### 【 0 1 0 5 】

##### 線形増幅器

パワースプリッタ 1 1 4 2 の出力ポートを通して発振器 1 1 2 6 から出射した光は、第 2 のアイソレータ 1 1 3 6 b の入力ポートに結合される。その後、光は第 2 の W D M カプラ 1 1 3 2 b の信号ポートに渡される。第 2 のポンプ 1 1 3 4 b は、第 2 の W D M カプラ 1 1 3 2 b のポンプポートに結合される。第 2 の W D M カプラ 1 1 3 2 b は、信号光とポンプ光とを多重化し、第 2 の W D M カプラ 1 1 3 2 b の出力ポートを介して多重化光を出力する。W D M カプラの出力ポートは、第 2 の線形利得媒質 1 1 3 0 b の入力に結合される。第 2 のアイソレータは、第 2 の線形利得媒質 1 1 3 0 b からの信号が発振器 1 1 2 6 に入射するのを阻止する。第 2 の線形利得媒質は、発振器 1 1 2 6 により生成された光を増幅する。第 2 の線形利得媒質 1 1 3 0 b から出射した増幅光は、バンドパスフィルタ 1 1 2 8 を通過する。バンドパスフィルタ 1 1 2 8 は、発振器により生成された波長範囲内の光のみを通過させるファイバ結合型マイクロ光フィルタであってもよい。

10

#### 【 0 1 0 6 】

バンドパスフィルタ 1 1 2 8 を通過した光は、第 3 の W D M カプラ 1 1 3 2 c の信号ポートに結合される。第 3 のポンプ 1 1 3 4 c は、第 3 の W D M カプラ 1 1 3 2 c のポンプポートに結合される。第 3 の W D M カプラ 1 1 3 2 c は、信号光とポンプ光とを多重化し、第 3 の W D M カプラ 1 1 3 2 c の出力ポートを介して多重化光を出力する。第 3 の W D M カプラ 1 1 3 2 c の出力ポートは、第 3 の線形利得媒質 1 1 3 0 c の入力に結合される。第 3 の線形利得媒質 1 1 3 0 c の出力は、第 4 の W D M カプラ 1 1 3 2 d に結合される。第 4 のポンプ 1 1 3 4 d は、第 4 の W D M カプラ 1 1 3 2 d のポンプポートに結合される。第 4 の W D M カプラ 1 1 3 2 d は、第 3 の線形利得媒質 1 1 3 0 c からの増幅光を第 4 の W D M カプラ 1 1 3 2 d の信号ポートに結合する。第 4 の W D M カプラ 1 1 3 2 d は更に、ポンプ光を第 3 の線形利得媒質に結合する。

20

#### 【 0 1 0 7 】

その後、増幅光は、シードレーザ 1 0 2 から出射してパラメトリック増幅器に入射する前にシードパルスのチャープを変更するために、分散補償ファイバ 1 1 3 6 を通過する。

#### 【 0 1 0 8 】

##### パラメトリック増幅器

シードレーザの出力は、第 1 の偏光制御器 1 0 6 a を介してパラメトリック増幅器に結合される。第 1 の偏光制御器 1 0 6 a は、C / L バンド W D M カプラ 1 0 8 a に結合される。シードレーザからのパルス列は、C / L バンドカプラ 1 0 8 a を使用して F O P O キャビティに結合される。第 1 の W D M カプラ 1 0 8 a の多重化ポートは、パラメトリック利得媒質として使用される D S F 等の H N L F 1 1 4 に結合される。H N L F 1 1 4 の出力は、パワースプリッタ 1 1 6 の入力ポートに結合される。パワースプリッタ 1 1 6 の第 1 の出力ポートは、出力信号 1 0 4 を生成する。パワースプリッタ 1 1 6 の第 2 の出力ポートは、分散管理ファイバ 1 1 2 0 の入力に結合される。分散管理ファイバ 1 1 2 0 は、光パラメトリック発振器の総分散を制御するために使用される特定の分散及び長さを有する。分散管理ファイバ 1 1 2 0 の出力は、C / L バンドカプラ 1 0 8 a の L ポートに結合される第 2 の偏光制御器 1 0 6 b に結合され、F O P O に対する共振リングキャビティが完成する。

30

40

#### 【 0 1 0 9 】

F O P O の重要な特徴は、共振リングキャビティ全体にわたる平均分散 / ユニット長が正常分散レジームであることである。F O P O の別の特徴は、F O P O の全長は一定であるが、ポンプレーザ 1 0 2 を調節することにより F O P O のピーク出力波長を調節できることである。

#### 【 0 1 1 0 】

##### 実験結果

50

本出願人は、第10の実施形態に基づいて実験結果を得た。シード発振器1126の繰返し率は、ODL1140を使用することにより $\sim 18.8\text{ MHz}$ から $\sim 19.0\text{ MHz}$ に調節可能であった。シード発振器1126は、 $\sim 1\text{ mW}$ の平均パワーで $1560\text{ nm}$ において $\sim 400\text{ fs}$ パルスを出力した。増幅器はErファイバ1130b及び1130cに基づき、2つの段階を有した。発振器からのパルス列は、第1の段階1130bにおいて $\sim 20\text{ mW}$ に増幅された。バンドパスフィルタ1128は $1560\text{ nm}$ を中心とする $1\text{ nm}$ の帯域幅を有し、過剰な非線形スペクトル広がり及びASEノイズを回避するために使用された。シードレーザ102の出力において、信号は $\sim 180\text{ mW}$ に増大された。FOPPOの入力におけるポンプパルス時間幅は約 $5\text{ ps}$ であると推定され、パルスは高くチャープされた。HNLFの長さは $1.5\text{ m}$ であった。パワースプリッタ116は、 $90/10\%$ 溶融ファイバ出力カプラであった。分散管理ファイバ1120は、 $7.5\text{ m}$ のDCF-38であった。

10

#### 【0111】

FOPPOにおいて使用されるファイバの $1560\text{ nm}$ における分散を図17に示す。キャビティにおいて使用される分散補償ファイバ(DCF-38)1120の長さが相対的に長いため、リングキャビティの平均分散は $\sim -25\text{ ps/nm/km}$ である。この正常分散により、散逸ソリトンがFOPPOキャビティ内で形成される。FOPPOのキャビティ長に対応するようにシード発振器のキャビティ長を調節することにより、 $40\text{ mW}$ を上回るポンプパワーにおいてパラメトリック発振が観察された。

20

#### 【0112】

シード発振器のキャビティ長をODL1140で同調させた際のFOPPOからの出力スペクトルを記録するために、光スペクトル解析器を使用した。いくつかのオフセットに対する測定されたスペクトルを図12Aに示す。ODL1140のオフセットの関数である信号スペクトル及びアイドラスペクトルに対するピーク波長を図12Bに示す。図12Cは、FOPPOにより生成された信号及びアイドラのパワー及び帯域幅を示す図である。

#### 【0113】

本出願人は、 $1560\text{ nm}$ におけるポンプがポンプ波長の両側の2つの対称な側波帯(信号及びアイドラ)にエネルギーを伝達したことを観察した。尚、生成された波がポンプから遠くなかった場合、更なる四波混合(FWM)効果が発生し、それにより、複数の高次のFWMピークが生成された。 $475\text{ nm}$ ( $1360\text{ nm} \sim 1835\text{ nm}$ )の波長範囲を有する $\sim 400\text{ nm}$ の総調節範囲( $16\text{ mm}$ を超えるキャビティ長の調節による)が取得された。最大出力パルスエネルギーは $\sim 1.3\text{ nJ}$ であった。

30

#### 【0114】

##### 第11の例示的な実施形態

図13を参照して、第11の例示的な実施形態1300を説明する。前述の実施形態と共通の構成を第1の例示的な実施形態と同一の図中符号で示し、説明を省略する。第11の例示的な実施形態1300は、ポンプレーザ102及びFOPPOを含む。ピーク出力104は、ポンプレーザ102の繰返し率を調節することにより制御される。ポンプレーザ102の繰返し率は制御可能である。繰返し率を制御可能なポンプレーザ102は、アクティブモード同期レーザ、アクティブQスイッチレーザ、強度変調により連続波(CW)レーザから生成されたパルスレーザ、あるいは位相変調によりCWレーザから生成されたパルスレーザであってもよい。

40

#### 【0115】

ポンプレーザ102は、WDM108aの第1の入力ポートに結合される。WDM108aは、WDM108aの出力ポートにポンプ光を渡す。WDM108aの出力ポートは、HNLF114の入力に結合される。HNLFは、パラメトリック利得を提供する。HNLF114の出力は、フィルタ1338の入力ポートに結合される。フィルタ1338の出力は、パワースプリッタ116の入力ポートに結合される。パワースプリッタ116の第1の出力は、出力信号104を提供する。パワースプリッタ116の第2の出力は、WDM108aの第2の入力ポートに結合され、ポンプ信号と混合され、WDM108a

50

から送出され、FOPPOに対するフィードバックを提供する。

【0116】

第11の実施形態の特定の例において、シードレーザ102の出力波長は1550nmで安定してもよい。シードレーザ102の繰返し率は、15.363MHzから15.366MHzに調節されてもよい。シードレーザからの出力は、WDMカプラ108aを介して光ファイバパラメトリック発振器(FOPPO)に結合される。FOPPO共振キャビティは、1310nmにおいて零分散及び0.092ps/nm<sup>2</sup>/km分散スロープを有する10mのSMFと、1548nmにおいて零分散及び0.07ps/nm<sup>2</sup>/km分散スロープを有する5mのHNLF114とを含む。当該FOPPO共振キャビティにおける総分散は異常分散領域内である。従って、1580nm及び1620nmにおけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ15.366MHz及び15.363MHzである。

10

【0117】

HNLF114において、パラメトリック過程が発生し、信号光及びアイドラ光が生成される。その後、信号光及びポンプ光は、本例ではロングパスフィルタであってもよいフィルタ1338により遮断される。パワースプリッタ116はアイドラ光の90%を出力104に送出し、アイドラ光の10%はFOPPOに戻されて次のシードレーザパルスと重ねられる。

【0118】

本例の利点は、波長調節が高速であること及びアイドラの波長領域において自由空間のアライメントがないことである。更に、発振されたパルスがソリトンレジームで動作されるため、パルス波形はsech<sup>2</sup>状になる。図14Aは、フィルタ1338がロングパスフィルタである場合の波長可変範囲を示す図であり、FOPPOの総分散1440を波長に対して示す。信号波長は、破線1442により示される範囲である。ポンプ波長を破線1444により示す。アイドラ波長は範囲1446内である。シードレーザ102の繰返し率は分散範囲1448aに対応し、これは範囲1450aにより示される波長範囲と一致する。繰返し率とアイドラの波長との間の対応付けは、分散曲線1440により制御される。

20

【0119】

第12の例示的な実施形態

第12の例示的な実施形態は、上述した第11の例示的な実施形態1300の別の特定の例である。シードレーザ102の出力波長は、1550nmで安定してもよい。シードレーザ102の繰返し率は、15.368MHzから15.369MHzに調節されてもよい。シードレーザからの出力は、WDMカプラ108aを介して光ファイバパラメトリック発振器(FOPPO)に結合される。FOPPO共振キャビティは、1310nmにおいて零分散及び0.092ps/nm<sup>2</sup>/km分散スロープを有する10mのシングルモードファイバ(SMF)と、1548nmにおいて零分散及び0.07ps/nm<sup>2</sup>/km分散スロープを有する5mのHNLFとを含む。当該FOPPO共振キャビティにおける総分散は異常分散領域内である。従って、1580nm及び1620nmにおけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ15.369MHz及び15.368MHzである。

30

【0120】

HNLF114において、パラメトリック過程が発生し、信号光及びアイドラ光が生成される。その後、アイドラ光及びポンプ光は、本例ではショートパスフィルタであってもよいフィルタ1338により遮断される。パワースプリッタ116はアイドラ光の90%を出力104に送出し、アイドラ光の10%はFOPPOに戻されて次のシードレーザパルスと重ねられる。

40

【0121】

図14Bは、フィルタ1338がロングパスフィルタである場合の波長可変範囲を示す図であり、FOPPOの総分散1440を波長に対して示す。信号波長は、破線1442により示される範囲である。ポンプ波長を破線1444により示す。アイドラ波長は範囲1446内である。シードレーザ102の繰返し率は分散範囲1448bに対応する。これ

50

は、範囲 1 4 5 0 b により示される波長範囲と一致する。繰返し率とアイドラの波長との間の対応付けは、分散曲線 1 4 4 0 により制御される。

【 0 1 2 2 】

第 1 3 の例示的な実施形態

図 1 5 を参照して、第 1 3 の例示的な実施形態 1 4 0 0 を説明する。前述の実施形態と共通の構成を第 1 の例示的な実施形態と同一の図中符号で示し、説明を省略する。本構成は、D C F 1 4 2 0 が H N L F 1 1 4 とフィルタ 1 3 3 8 との間に存在することを除いて、図 1 3 に示す第 1 1 の例示的な実施形態と同一である。

【 0 1 2 3 】

第 1 3 の例示的な実施形態の特定の例において、シードレーザ 1 0 2 の出力波長は 1 5 5 0 n m で安定してもよい。シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は、1 5 . 5 2 5 M H z から 1 5 . 5 2 9 M H z に調節されてもよい。シードレーザからの出力は、W D M カプラ 1 0 8 a を介して光ファイバパラメトリック発振器 ( F O P O ) に結合される。F O P O 共振キャビティは、1 5 5 0 n m において - 4 0 p s / n m / k m 分散及び - 0 . 1 p s / n m <sup>2</sup> / k m 分散スロープを有する 1 0 m の分散補償ファイバ ( D C F ) と、1 5 4 8 n m において零分散及び 0 . 0 7 p s / n m <sup>2</sup> / k m 分散スロープを有する 5 m の高非線形ファイバ ( H N F ) とを含む。当該 F O P O 共振キャビティにおける総分散は正常分散領域内である。従って、1 5 8 0 n m 及び 1 6 2 0 n m におけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ 1 5 . 5 2 5 M H z 及び 1 5 . 5 2 9 M H z である。

【 0 1 2 4 】

H N L F 1 1 4 において、パラメトリック過程が発生し、信号光及びアイドラ光が生成される。その後、信号光及びポンプ光は、本例ではロングパスフィルタであってもよいフィルタ 1 3 3 8 により遮断される。パワースプリッタ 1 1 6 はアイドラ光の 9 0 % を出力 1 0 4 に送出し、アイドラ光の 1 0 % は F O P O に戻されて次のシードレーザパルスと重ねられる。

【 0 1 2 5 】

本例の利点は、波長調節が高速であること及びアイドラの波長領域において自由空間のアライメントがないことである。更に、発振されたパルスが散逸ソリトンレジームで動作されるため、パルスエネルギーはソリトンレジームで生成されるパルスより高い。図 1 6 A は、フィルタ 1 3 3 8 がロングパスフィルタである場合の波長可変範囲を示す図であり、F O P O の総分散 1 4 4 0 を波長に対して示す。信号波長は、破線 1 4 4 2 により示される範囲である。ポンプ波長を破線 1 4 4 4 により示す。アイドラ波長は、範囲 1 4 4 6 内である。シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は分散範囲 1 6 4 8 a に対応し、これは範囲 1 6 5 0 a により示される波長範囲と一致する。繰返し率とアイドラの波長との間の対応付けは、分散曲線 1 4 4 0 により制御される。

【 0 1 2 6 】

第 1 4 の例示的な実施形態

第 1 4 の例示的な実施形態は、上述した第 1 1 の例示的な実施形態 1 3 0 0 の別の特定の例である。シードレーザ 1 0 2 の出力波長は 1 5 5 0 n m で安定してもよい。シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は、1 5 . 5 1 9 M H z から 1 5 . 5 2 1 M H z に調節されてもよい。シードレーザからの出力は、W D M カプラ 1 0 8 a を介して光ファイバパラメトリック発振器 ( F O P O ) に結合される。F O P O 共振キャビティは、1 3 1 0 n m において - 4 0 p s / n m / k m 分散及び 0 . 0 7 p s / n m <sup>2</sup> / k m 分散スロープを有する 1 0 m の D C F と、1 5 4 8 n m において零分散及び 0 . 0 7 p s / n m <sup>2</sup> / k m 分散スロープを有する 5 m の H N L F とを含む。当該 F O P O 共振キャビティにおける総分散は正常分散領域内である。従って、1 5 2 0 n m 及び 1 5 4 0 n m におけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ 1 5 . 5 1 9 M H z 及び 1 5 . 5 2 1 M H z である。

【 0 1 2 7 】

H N L F 1 1 4 において、パラメトリック過程が発生し、信号光及びアイドラ光が生成される。その後、アイドラ光及びポンプ光は、本例ではショートパスフィルタであっても



よいフィルタ 1 3 3 8 により遮断される。パワースプリッタ 1 1 6 はアイドラ光の 9 0 % を出力 1 0 4 に送出し、アイドラ光の 1 0 % は F O P O に戻されて次のシードレーザパルスと重ねられる。

#### 【 0 1 2 8 】

図 1 6 B は、フィルタ 1 3 3 8 がロングパスフィルタである場合の波長可変範囲を示す図であり、F O P O の総分散 1 4 4 0 を波長に対して示す。信号波長は領域 1 4 4 2 内である。ポンプ波長を破線 1 4 4 4 により示す。アイドラ波長を破線 1 4 4 6 により示す。シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は分散範囲 1 6 4 8 b に対応し、これは範囲 1 6 5 0 b により示される波長範囲と一致する。繰返し率とアイドラの波長との間の対応付けは、分散曲線 1 4 4 0 により制御される。

#### 【 0 1 2 9 】

##### 第 1 5 の例示的な実施形態

第 1 5 の例示的な実施形態は、図 1 5 を参照して説明した上述の第 1 3 の例示的な実施形態 1 4 0 0 の特定の例の変形である。シードレーザ 1 0 2 の出力波長は 1 5 5 0 nm で安定してもよい。シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は、4 4 . 4 9 8 3 MHz から 4 4 . 4 9 9 MHz に調節されてもよい。シードレーザからの出力は、WDM カプラ 1 0 8 a を介して光ファイバパラメトリック発振器 ( F O P O ) に結合される。F O P O 共振キャビティは、1 5 5 0 nm において - 4 0 ps / nm / km 分散及び - 0 . 1 ps / nm<sup>2</sup> / km 分散スロープを有する 0 . 1 8 m の DCF 1 4 2 0 と、1 5 4 8 nm において零分散及び 0 . 0 7 ps / nm<sup>2</sup> / km 分散スロープを有する 5 m の HNL F とを含む。当該 F O P O 共振キャビティにおける総分散は、1 5 5 0 nm より短い波長において正常分散領域であり、1 5 5 0 nm より長い波長領域において異常分散である。従って、1 5 2 0 nm 及び 1 5 4 0 nm におけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ 4 4 . 5 4 0 7 MHz 及び 4 4 . 5 4 1 2 MHz である。更に、1 5 8 0 nm 及び 1 6 2 0 nm におけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ 4 4 . 5 4 1 4 MHz 及び 4 4 . 5 4 0 6 MHz である。

#### 【 0 1 3 0 】

HNL F 1 1 4 において、パラメトリック過程が発生し、信号光及びアイドラ光が生成される。その後、アイドラ光及びポンプ光は、本例ではショートパスフィルタであってもよいフィルタ 1 3 3 8 により遮断される。パワースプリッタ 1 1 6 はアイドラ光の 9 0 % を出力 1 0 4 に送出し、アイドラ光の 1 0 % は F O P O に戻されて次のシードレーザパルスと重ねられる。

#### 【 0 1 3 1 】

図 1 6 C は、フィルタ 1 3 3 8 がバンドカットフィルタである場合の波長可変範囲を示す図であり、F O P O の総分散 1 4 4 0 を波長に対して示す。分散は、信号に対して正常分散であり、アイドラに対して異常分散である。信号波長は領域 1 4 4 2 内である。ポンプ波長を破線 1 4 4 4 により示す。アイドラ波長は範囲 1 4 4 6 内である。シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は分散範囲 1 6 4 8 c に対応し、これは波長範囲 1 6 5 0 c 1 及び 1 6 5 0 c 2 と一致する。繰返し率とアイドラの波長との間の対応付けは、分散曲線 1 4 4 0 により制御される。

#### 【 0 1 3 2 】

##### 第 1 6 の例示的な実施形態

第 1 6 の例示的な実施形態は、上述した第 1 1 の例示的な実施形態 1 3 0 0 の別の特定の例であり、本実施形態において、シードレーザは、調節可能な繰返し率を有する波長可変パルスレーザである。シードレーザ 1 0 2 の発振器は、1 5 . 0 0 5 m のラージモードエリアファイバ ( LMA F ) 及び半導体光増幅器 ( S O A ) を含んでもよい。LMA F は、1 5 5 0 nm の波長において 3 8 . 2 5 ps / nm / km 分散及び 0 . 0 7 3 3 ps / nm<sup>2</sup> / km 分散スロープを有してもよい。S O A は、変調電流により駆動される。シードレーザ 1 0 2 は 1 5 5 5 ~ 1 5 6 0 nm で波長調節されてもよい。シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は、1 5 . 3 6 7 MHz から 1 5 . 3 6 2 MHz に調節されてもよい。シードレーザからの出力は、WDM カプラ 1 0 8 a を介して光ファイバパラメトリック発振器 (

10

20

30

40

50

F O P O ) に結合される。F O P O 共振キャビティは、1 3 1 0 n m において零分散及び 0 . 0 9 2 p s / n m <sup>2</sup> / k m 分散スロープを有する 1 0 m の S M F と、1 5 4 8 n m において零分散及び 0 . 0 7 p s / n m <sup>2</sup> / k m 分散スロープを有する 5 m の H N L F 1 1 4 とを含む。当該 F O P O 共振キャビティにおける総分散は異常分散領域内である。従って、1 5 8 0 n m 及び 1 6 2 0 n m におけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ 1 5 . 3 6 6 M H z 及び 1 5 . 3 6 3 M H z である。シード発振器の繰返し率とパラメトリック発振器の繰返し率とを同期することにより、波長可変範囲は拡張される。

#### 【 0 1 3 3 】

H N L F 1 1 4 において、パラメトリック過程が発生し、信号光及びアイドラ光が生成される。その後、信号光及びポンプ光は、本例ではロングパスフィルタであってもよいフ  
ィルタ 1 3 3 8 により遮断される。パワースプリッタ 1 1 6 はアイドラ光の 9 0 % を出力  
1 0 4 に送出し、アイドラ光の 1 0 % は F O P O に戻されて次のシードレーザパルスと重  
ねられる。

#### 【 0 1 3 4 】

本例の利点は、波長調節が高速であること及びアイドラの波長領域において自由空間の  
アライメントがないことである。更に、短い波長のシードパルスがアイドラ領域内の長い  
波長において利得を生成するため、シード発振器のパワーの変動を減少できる。更に、発  
振されたパルスがソリトンレジームで動作されるため、パルス波形は s e c h <sup>2</sup> 状になる  
。図 1 4 C は、フィルタ 1 3 3 8 がロングパスフィルタであり且つシードレーザが波長可  
変である場合の波長可変範囲を示す図であり、F O P O の総分散 1 4 4 0 を波長に対して  
示す。信号波長は、破線 1 4 4 2 により示される範囲である。ポンプ波長を領域 1 4 4 4  
で示す。アイドラ波長は範囲 1 4 4 6 内である。シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は分散範  
囲 1 4 4 8 a に対応し、これは範囲 1 4 5 0 c により示される波長範囲と一致する。繰返  
し率とアイドラの波長との間の対応付けは、分散曲線 1 4 4 0 により制御される。シード  
レーザ 1 0 2 を波長調節させることにより、波長範囲 1 4 5 0 c が拡張する。ポンプレー  
ザの波長が調節されるため、ポンプレーザ波長領域における分散が重要であり、繰返し率  
のポンプ及びアイドラ（又は信号）の間の関係が F O P O の波長可変範囲を拡張又は抑制  
する。

#### 【 0 1 3 5 】

##### 第 1 7 の例示的な実施形態

第 1 7 の例示的な実施形態は、上述した第 1 1 の例示的な実施形態 1 3 0 0 の別の特定  
の例であり、本例ではロングパスフィルタでなくショートパスフィルタであるフィルタ 1  
3 3 8 によりアイドラ光及びポンプ光が遮断されることを除いて、第 1 6 の実施形態とほ  
ぼ同様である。また、シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は、1 5 . 3 7 2 M H z から 1 5 .  
3 6 7 M H z に調節されてもよい。1 5 2 0 n m 及び 1 5 4 0 n m におけるラウンドトリ  
ップ周波数は、それぞれ 1 5 . 3 6 9 M H z 及び 1 5 . 3 6 8 M H z である。

#### 【 0 1 3 6 】

図 1 4 D は、フィルタ 1 3 3 8 がショートパスフィルタである場合の波長可変範囲を示  
す図であり、F O P O の総分散 1 4 4 0 を波長に対して示し、シードレーザは波長可変で  
ある。信号波長は、範囲 1 4 4 2 である。ポンプ波長を範囲 1 4 4 4 により示す。アイド  
ラ波長は、範囲 1 4 4 6 内である。シードレーザ 1 0 2 の繰返し率は分散範囲 1 4 4 8 d  
に対応し、これは範囲 1 4 5 0 d により示される波長範囲と一致する。繰返し率とアイド  
ラの波長との間の対応付けは、分散曲線 1 4 4 0 により制御される。アイドラの波長調節  
範囲 1 4 5 0 d は、シードレーザ 1 0 2 の波長及び繰返し率を調節させることにより増加  
される。F O P O の波長可変範囲を拡張するためには、シードレーザの繰返し率及び波長  
の双方を調節させることが重要である。

#### 【 0 1 3 7 】

##### 第 1 8 の例示的な実施形態

第 1 8 の例示的な実施形態は、安定シードレーザ 1 0 2 を第 1 6 の実施形態で説明した  
のと同様の波長可変シードレーザ 1 0 2 に置換することを除いて、第 1 3 の例示的な実施

10

20

30

40

50

形態とほぼ同様である。シードレーザ 102 の発振器は、14.848 m の LMAF を含んでもよい。シードレーザ 102 の繰返し率は、波長に依存して 15.529 MHz から 15.524 MHz に調節されてもよい。

#### 【0138】

第 18 の例示的な実施形態は、第 13 の例示的な実施形態の特定の例と同一のファイバを有する FOPPO を含む。図 16D は、フィルタ 1338 がロングパスフィルタである場合の波長可変範囲を示す図であり、FOPPO の総分散 1440 を波長に対して示し、シードレーザ 102 は波長可変である。信号波長は、破線 1442 により示される範囲である。ポンプ波長は領域 1444 内である。アイドラ波長は範囲 1446 内である。シードレーザ 102 の繰返し率は分散範囲 1648 d に対応し、これは範囲 1650 d により示される波長範囲と一致する。繰返し率とアイドラの波長との間の対応付けは、分散曲線 1440 により制御される。範囲 1650 d は、シードレーザ 102 の波長及び繰返し率を変更することにより拡張される。FOPPO の波長可変範囲を拡張するためには、シードレーザの繰返し率及び波長の双方を調節させることが重要である。

10

#### 【0139】

##### 第 19 の例示的な実施形態

第 19 の例示的な実施形態は、安定シードレーザ 102 を第 16 の実施形態で説明したのと同様の波長可変シードレーザ 102 に置換することを除いて、第 14 の例示的な実施形態とほぼ同様である。シードレーザ 102 の発振器は、14.855 m の LMAF を含んでもよい。シードレーザ 102 の繰返し率は、波長に依存して 15.522 MHz から 15.517 MHz に調節されてもよい。1520 nm 及び 1540 nm におけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ 15.519 MHz 及び 15.521 MHz である。

20

#### 【0140】

第 19 の例示的な実施形態は、第 13 の例示的な実施形態の特定の例と同一のファイバを有する FOPPO を含む。図 16E は、フィルタ 1338 がショートパスフィルタである場合の波長可変範囲を示す図であり、FOPPO の総分散 1440 を波長に対して示し、シードレーザは波長可変である。信号波長は、破線 1442 により示す範囲である。ポンプ波長は領域 1444 内である。アイドラ波長は範囲 1446 内である。シードレーザ 102 の繰返し率は分散範囲 1648 e に対応し、これは範囲 1650 e により示される波長範囲と一致する。繰返し率とアイドラの波長との間の対応付けは、分散曲線 1440 により制御される。範囲 1650 e は、シードレーザ 102 の波長及び繰返し率を変更することにより拡張される。FOPPO の波長可変範囲を拡張するためには、シードレーザの繰返し率及び波長の双方を調節させることが重要である。

30

#### 【0141】

##### 第 20 の例示的な実施形態

第 20 の例示的な実施形態は、安定シードレーザ 102 を第 16 の実施形態で説明したのと同様の波長可変シードレーザ 102 に置換することを除いて、第 15 の例示的な実施形態とほぼ同様である。シードレーザ 102 の発振器は、5.175 m の LMAF を含んでもよい。シードレーザ 102 の繰返し率は、波長に依存して 44.552 MHz から 44.537 MHz に調節されてもよい。

40

#### 【0142】

図 16F は、フィルタ 1338 がバンドカットフィルタである場合の波長可変範囲を示す図であり、FOPPO の総分散 1440 を波長に対して示す。分散は、ポンプに対して正常分散であり、アイドラに対して異常分散である。信号波長は領域 1442 内である。ポンプ波長は領域 1444 内である。アイドラ波長は範囲 1446 内である。シードレーザ 102 の繰返し率は分散範囲 1648 f に対応し、これは波長範囲 1650 f1 及び 1650 f2 と一致する。繰返し率とアイドラの波長との間の対応付けは、分散曲線 1440 により制御される。

#### 【0143】

##### 第 21 の例示的な実施形態

50

第21の例示的な実施形態は、第16の例示的な実施形態とほぼ同様である。但し、シードレーザ102の発振器は、1550nmにおいて $-40\text{ ps/nm/km}$ 分散及び $-0.1\text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 分散スロープを有する15.228mのDCFを含む。波長は1550nmから1565nmに波長調節され、繰返し率は、波長に依存して15.3634MHzから15.3657MHzに変更される。ポンプに対する分散は正常分散レジームであるが、アイドラに対する分散は異常分散レジームである。FOPPOの総分散は異常分散である。FOPPOの波長の出力は、ポンプの波長及びポンプの繰返し率を調節することにより波長調節されてもよい。

#### 【0144】

##### 第22の例示的な実施形態

第22の例示的な実施形態は、シードレーザの発振器が第21の例示的な実施形態において使用した発振器と同様であることを除いて、第17の例示的な実施形態とほぼ同様である。但し、15.224mの同一のDCFを使用し、繰返し率は、波長に依存して15.3682MHzから15.3689MHzに変更される。ポンプに対する分散は正常分散レジームであるが、信号の分散は異常分散レジームである。FOPPOの総分散は異常分散である。FOPPOの波長の出力は、ポンプの波長及びポンプの繰返し率を調節することにより波長調節されてもよい。

#### 【0145】

##### 第23の例示的な実施形態

第23の例示的な実施形態は、シードレーザの発振器が第21の例示的な実施形態において使用した発振器と同様であることを除いて、第18の例示的な実施形態とほぼ同様である。但し、15.069mの同一のDCFを使用し、繰返し率は、波長に依存して15.5255MHzから15.5278MHzに変更される。ポンプ及びアイドラに対する分散は正常分散レジームである。FOPPOの総分散は正常分散である。ポンプレーザの波長が調節されるため、波長調節されたポンプレーザ波長領域における分散が重要であり、繰返し率のポンプ及びアイドラ（又は信号）の間の関係がFOPPOの波長可変範囲を拡張又は抑制するために重要である。FOPPOの波長の出力は、ポンプの波長及びポンプの繰返し率を調節することにより波長調節されてもよい。

#### 【0146】

##### 第24の例示的な実施形態

第24の例示的な実施形態は、シードレーザの発振器が第21の例示的な実施形態において使用した発振器と同様であることを除いて、第19の例示的な実施形態とほぼ同様である。但し、15.076mの同一のDCFを使用し、繰返し率は、波長に依存して15.5814MHzから15.5206MHzに変更される。ポンプ及び信号に対する分散は正常分散レジームである。ポンプレーザの波長が調節されるため、ポンプレーザ波長領域における分散がFOPPOの波長調節性にとって重要である。FOPPOの総分散は正常分散である。FOPPOの波長の出力は、ポンプの波長及びポンプの繰返し率を調節することにより波長調節されてもよい。シードレーザは例11と同一である。シードレーザの発振器は、1550nmにおいて $-40\text{ ps/nm/km}$ 分散及び $-0.1\text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 分散スロープを有する15.076mの分散補償ファイバ（DCF）及びSOAで構成される。波長は1550nmから1565nmに波長調節され、繰返し率は、波長に依存して15.5184MHzから15.5206MHzに変更される。

#### 【0147】

##### 第25の例示的な実施形態

第25の例示的な実施形態は、シードレーザの発振器が第21の例示的な実施形態において使用した発振器と同様であることを除いて、第20の例示的な実施形態とほぼ同様である。但し、5.253mの同一のDCFを使用し、繰返し率は、波長に依存して44.5394MHzから44.5416MHzに変更される。ポンプ及び信号に対する分散は正常分散であるが、アイドラに対する分散は異常分散である。FOPPOの波長の出力は、ポンプの波長及びポンプの繰返し率を調節することにより波長調節されてもよい。シード

10

20

30

40

50

レーザからの出力は、光ファイバパラメトリック発振器（FOPPO）に結合される。FOPPOは、1550nmにおいて $-40\text{ ps/nm/km}$ 分散及び $-0.1\text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 分散スロープを有する0.18mの分散補償ファイバ（DCF）と、1548nmにおいて零分散及び $0.07\text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 分散スロープを有する5mの高非線形ファイバ（HNF）とから構成されるため、当該FOPPOにおける総分散は、1550nmより短い波長範囲において正常分散であり、1550nmより長い波長範囲において異常分散である。従って、1520nm及び1540nmにおけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ44.5407MHz及び44.5412MHzである。それに対して、1580nm及び1620nmにおけるラウンドトリップ周波数は、それぞれ44.5414MHz及び44.5406MHzである。

10

【図1】

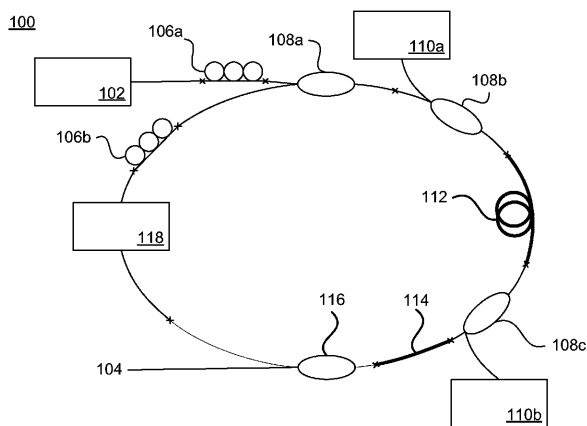


FIG. 1

【図2】

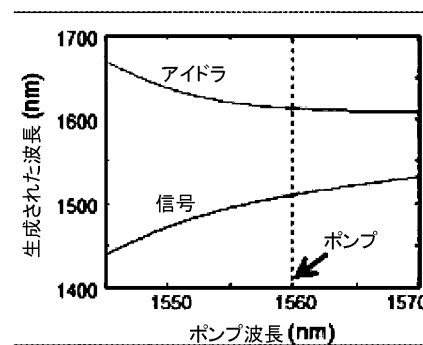


FIG. 2

【図3】

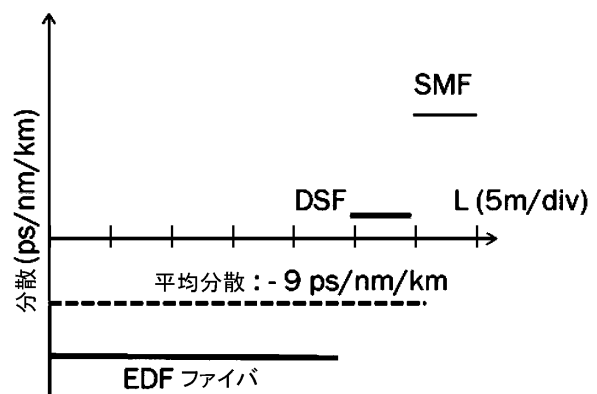


FIG. 3

【図 4】

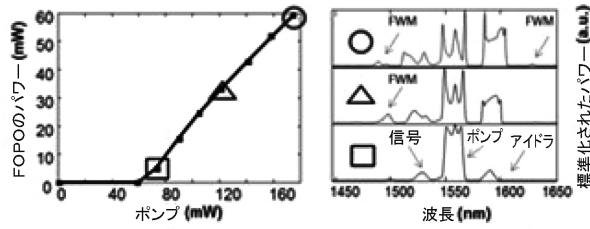


FIG. 4

【図 5】

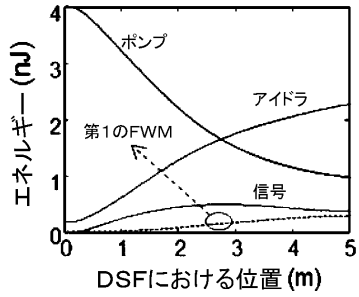


FIG. 5

【図 6】

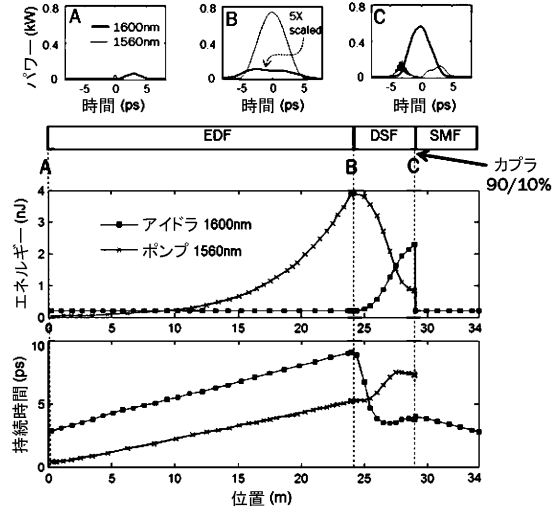


FIG. 6

【図 7】

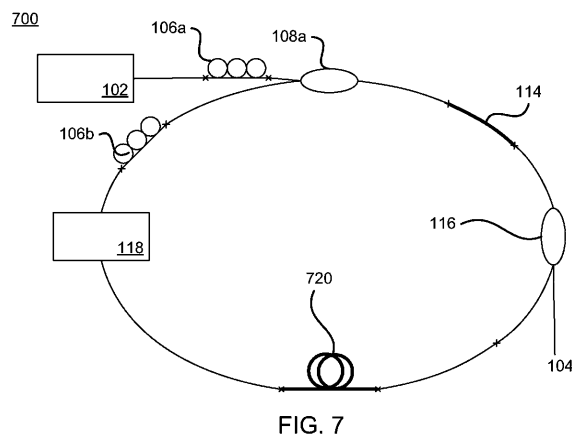


FIG. 7

【図 8】

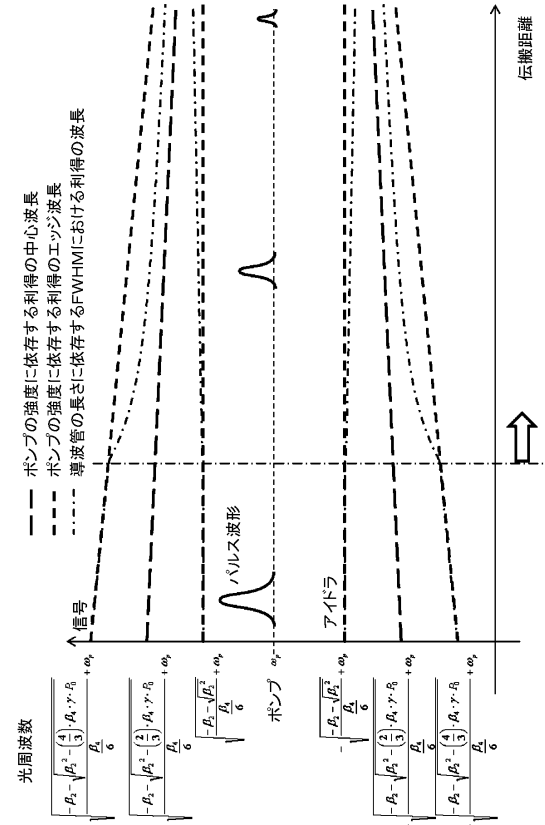
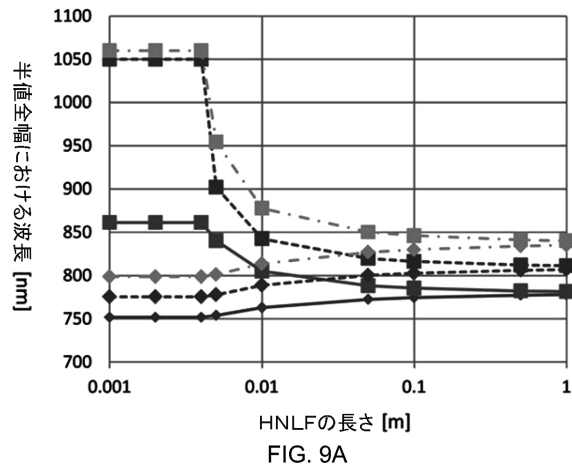


FIG. 8

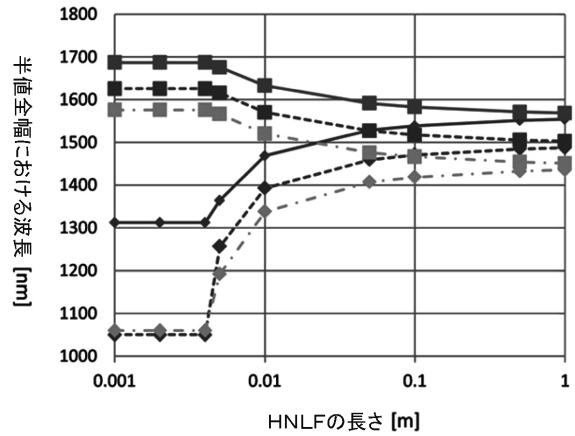
【図 9 A】

- 1040nmポンプによる半値全幅における短波長
- 1040nmポンプによる半値全幅における長波長
- ◆--- 1050nmポンプによる半値全幅における短波長
- 1050nmポンプによる半値全幅における長波長
- ◆- 1060nmポンプによる半値全幅における短波長
- 1050nmポンプによる半値全幅における長波長

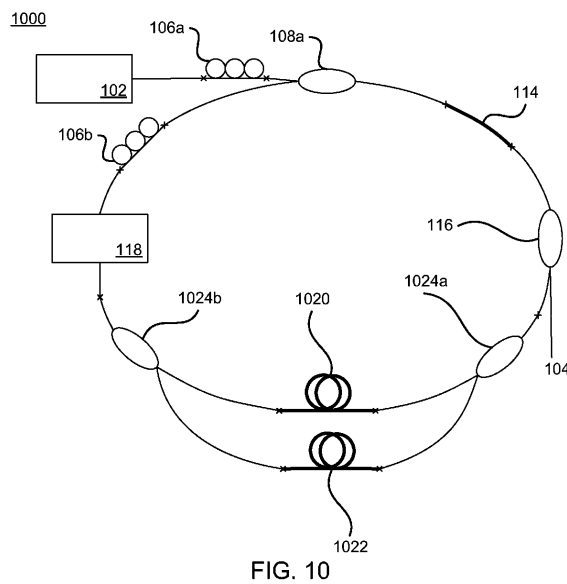


【図 9 B】

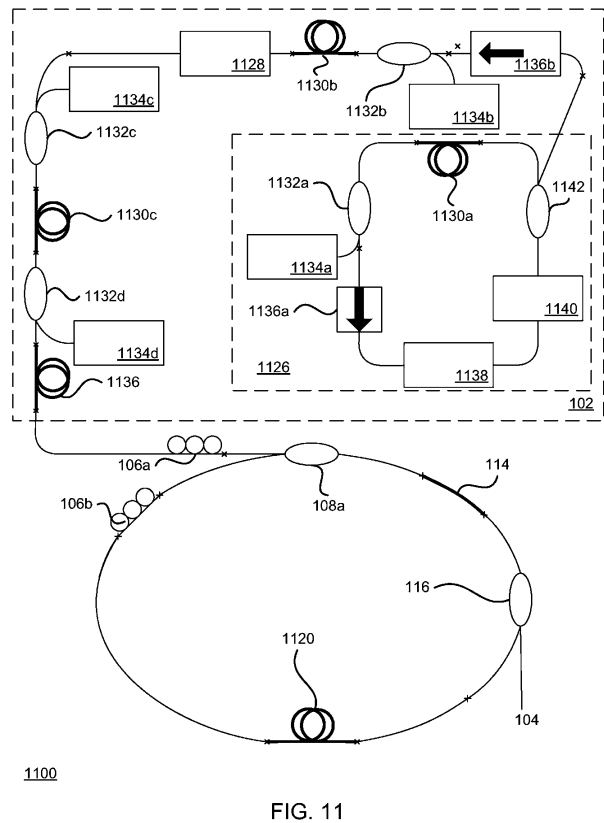
- 1040nmポンプによる半値全幅における短波長
- 1040nmポンプによる半値全幅における長波長
- ◆--- 1050nmポンプによる半値全幅における短波長
- 1050nmポンプによる半値全幅における長波長
- ◆- 1060nmポンプによる半値全幅における短波長
- 1050nmポンプによる半値全幅における長波長



【図 10】



【図 11】



【図 12 A】

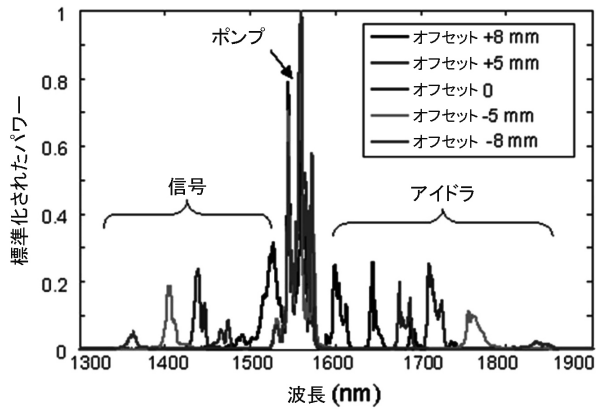


FIG. 12A

【図 12 B】

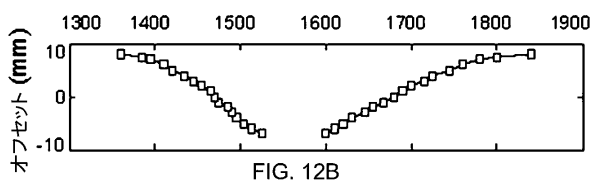


FIG. 12B

【図 12 C】

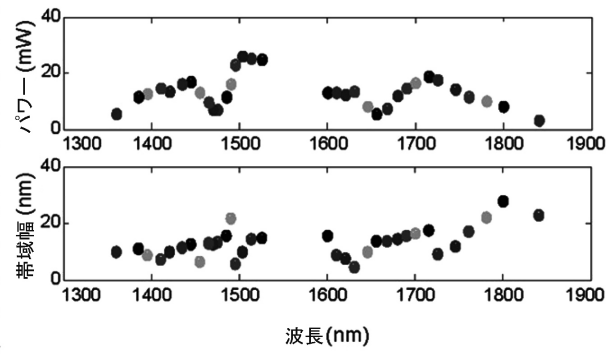


FIG. 12C

【図 13】

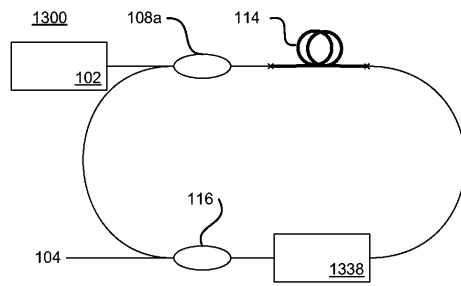


FIG. 13

【図 14 A】

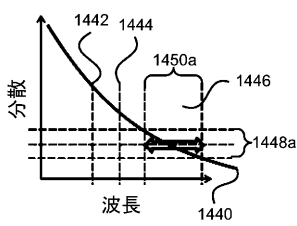


FIG. 14A

【図 14 B】

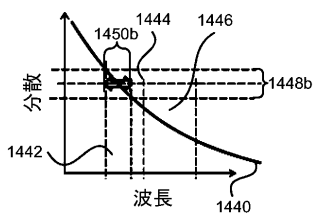


FIG. 14B

【図 14 C】

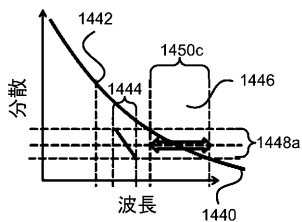


FIG. 14C

【図 14 D】

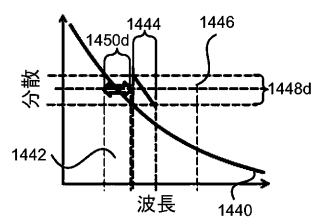


FIG. 14D

【図 15】

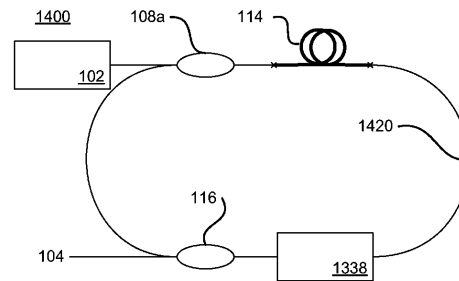
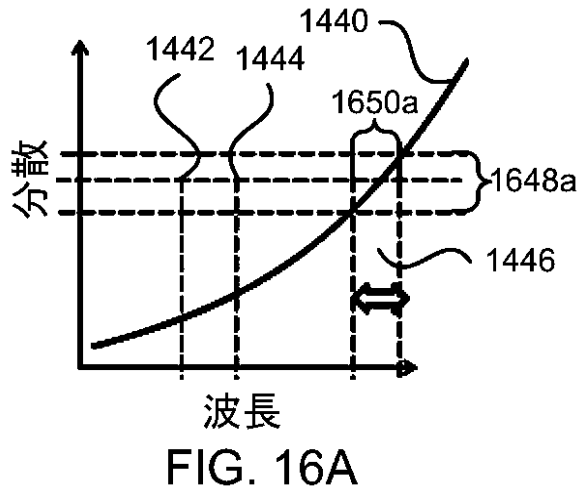


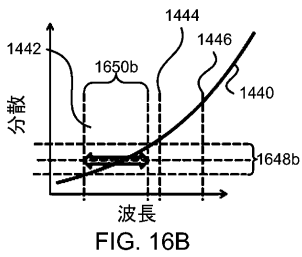
FIG. 15



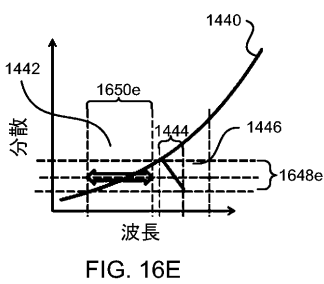
【図 16 A】



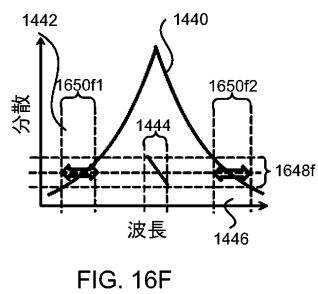
【図 16 B】



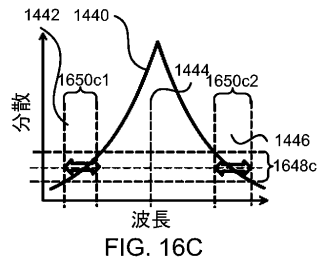
【図 16 E】



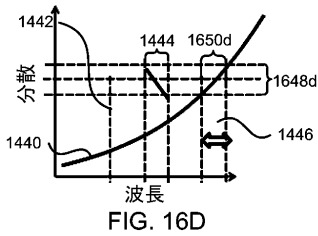
【図 16 F】



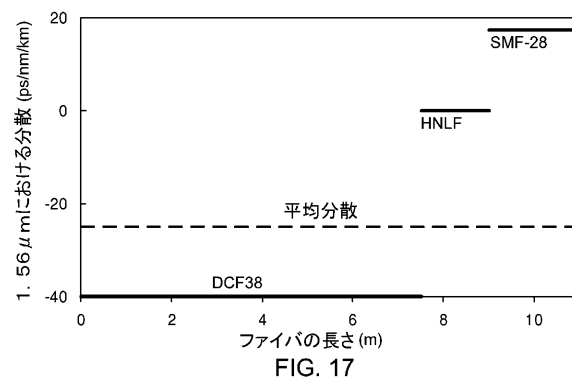
【図 16 C】



【図 16 D】



【図 17】



## フロントページの続き

(31)優先権主張番号 14/312,407

(32)優先日 平成26年6月23日(2014.6.23)

(33)優先権主張国 米国(US)

(73)特許権者 516000158

ジ アリゾナ ボード オブ リージェンツ オン ビハーフ オブ ザ ユニバーシティー オブ アリゾナ

The Arizona Board of Regents on behalf of the University of Arizona

アメリカ合衆国 アリゾナ州 85721-0300, トゥーソン, ザ ユニバーシティー オブ アリゾナ, テック トランスファー アリゾナ, ユニバーシティー サービスズ アネックス, 4ス フロアー, ピー.オー. ボックス 210300エー

The University of Arizona, Tech Transfer Arizona, University Services Annex 4th Floor, P.O. Box 210300A, Tucson, Arizona 85721-0300 U.S.A.

(74)代理人 100076428

弁理士 大塚 康徳

(74)代理人 100115071

弁理士 大塚 康弘

(74)代理人 100112508

弁理士 高柳 司郎

(74)代理人 100116894

弁理士 木村 秀二

(74)代理人 100130409

弁理士 下山 治

(74)代理人 100134175

弁理士 永川 行光

(72)発明者 キエウ, カン

アメリカ合衆国 アリゾナ州 85721, トゥーソン, ユニバーシティ ブールバード, 1630イー, ユニバーシティ オブ アリゾナ, カレッジ オブ オプティカル サイエンス内

(72)発明者 グエン, タン ナム

アメリカ合衆国 アリゾナ州 85721, トゥーソン, ユニバーシティ ブールバード, 1630イー, ユニバーシティ オブ アリゾナ, カレッジ オブ オプティカル サイエンス内

(72)発明者 ピーガンバリアン, ナザー

アメリカ合衆国 アリゾナ州 85750, トゥーソン, ベントソ エヌ.パセオ 5507

(72)発明者 太田 健史

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92618, アーバイン, アルトン パークウェイ 15975, キヤノン ユーエスエイ インコーポレイテッド内

審査官 山本 貴一

(56)参考文献 特表2009-506375(JP,A)

特開2009-277754(JP,A)

米国特許出願公開第2012/0205352(US,A1)

米国特許出願公開第2012/0257270(US,A1)

米国特許第5513194 (US, A)

米国特許出願公開第2012/0062983 (US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/35 - 1/39

H01S 3/067, 3/108, 3/109

IEEE Xplore

Scopus