

(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2014-182402  
(P2014-182402A)

(43) 公開日 平成26年9月29日(2014.9.29)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>GO2F 1/365 (2006.01)</b>	GO2F 1/365	2K102
<b>HO1S 3/067 (2006.01)</b>	HO1S 3/06 B	5F172
<b>HO1S 3/10 (2006.01)</b>	HO1S 3/10 Z	
<b>GO2F 1/35 (2006.01)</b>	GO2F 1/35 502	

審査請求 有 請求項の数 8 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2014-53958 (P2014-53958)  
 (22) 出願日 平成26年3月17日 (2014.3.17)  
 (31) 優先権主張番号 13/839,795  
 (32) 優先日 平成25年3月15日 (2013.3.15)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(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 100076428  
 弁理士 大塚 康德  
 (74) 代理人 100112508  
 弁理士 高柳 司郎  
 (74) 代理人 100115071  
 弁理士 大塚 康弘  
 (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

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ファイバレーザシステム

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】ソリトンパルスを生成する光ファイバレーザにおいて、パルスレーザの入力電力を変調することにより電力損失が生じないファイバレーザシステムを提供する。

【解決手段】レーザシステム1000は、複数の光パルスを生成するように構成された光源1010と、複数の光パルスを受光し且つ各々が互いに異なるチャープニング量を有するチャープパルスを取得するように構成された制御器1020と、光導波路から出力するパルスの各中心波長が互いに異なるように、チャープパルスが伝搬する間にソリトン自己周波数シフトを発生させるように構成された異常分散特性を有する光導波路1030を含む。

【選択図】 図1

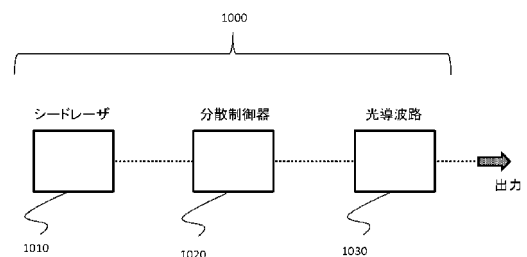


FIG. 1

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

複数の光パルスを生成するように構成された光源と、  
前記複数の光パルスを受光し且つ各々が互いに異なるチャージング量を有するチャープパルスを取得するように構成された制御器と、  
光導波路から出力するパルスの各中心波長が互いに異なるように、前記チャープパルスが伝搬する間にソリトン自己周波数シフトを発生させるように構成された異常分散特性を有する光導波路と、  
を備えることを特徴とするファイバレーザシステム。

## 【請求項 2】

前記光源と前記制御器との間に増幅器を更に備えることを特徴とする請求項 1 記載のファイバレーザシステム。

## 【請求項 3】

前記制御器は、前記チャープ光パルスを取得するために分散ガラスを含むことを特徴とする請求項 1 記載のファイバレーザシステム。

## 【請求項 4】

前記制御器は、前記チャープ光パルスを取得するために格子を含むことを特徴とする請求項 1 記載のファイバレーザシステム。

## 【請求項 5】

前記制御器は、前記チャープ光パルスを取得するためにプリズムを含むことを特徴とする請求項 1 記載のファイバレーザシステム。

## 【請求項 6】

前記制御器は、チャープファイバ格子を含むことを特徴とする請求項 1 記載のファイバレーザシステム。

## 【請求項 7】

前記チャープ光パルスを取得するために回転ステージを更に備えることを特徴とする請求項 4 記載のファイバレーザシステム。

## 【請求項 8】

第 1 の中心光波長を有する第 1 のシード光パルス及び前記第 1 の中心光波長を有する第 2 のシード光パルスを生成するように構成された光源と、

前記第 1 のシードパルスを第 1 のチャージング量を有する第 1 のチャープ光パルスに変換し、

前記第 2 のシードパルスを前記第 1 のチャージング量と異なる第 2 のチャージング量を有する第 2 のチャープ光パルスに変換するように構成された制御器と、

異常分散特性を有する光導波路とを備え、

前記光導波路は、前記第 1 のチャープ光パルスを受光して第 1 の出力光パルスを出し

、

前記光導波路は、前記第 2 のチャープ光パルスを受光して第 2 の出力光パルスを出し

、

前記第 1 の出力光パルスは第 2 の中心光波長を有し、

前記第 2 の出力光パルスは第 3 の中心光波長を有し、

前記第 2 の中心光波長は前記第 3 の中心光波長と異なることを特徴とするファイバレーザシステム。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、ファイバレーザシステムに関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

西澤他は、参考文献（西澤典彦及び後藤俊夫、IEEE PHOTONICS TEC

10

20

30

40

50

HNOLOGY LETTERS、VOL. 11、NO. 3、1999年3月)において、光ファイバを使用することにより波長可変フェムト秒(f s)光パルス源の小型システムを開示した。西澤他によると、ソリトンパルスが光ファイバにおいて生成され、ファイバに入力されるパルスレーザの入力電力を変更するだけでソリトンパルスの波長を線形にシフトできる。

【0003】

しかし、パルスレーザの入力電力を変調することにより電力損失が生じる。

【発明の概要】

【0004】

本発明の実施形態は、ファイバレーザシステムを提供する。

10

【0005】

本発明の一態様によると、ファイバレーザシステムは、複数の光パルスを生成するように構成された光源と、複数の光パルスを受光し且つ各々が互いに異なるチャージング量を有するチャープパルスを取得するように構成された制御器と、光導波路から出力するパルスの各中心波長が互いに異なるように、チャープパルスが伝搬する間にソリトン自己周波数シフトを発生させるように構成された異常分散特性を有する光導波路とを含む。

【0006】

本発明の更なる特徴は、添付の図面を参照して例示的な実施形態の以下の説明を読むことにより明らかになるだろう。

【図面の簡単な説明】

20

【0007】

【図1】本発明の第1の実施形態に関連するシードレーザ、分散制御器及び光導波路を含むファイバレーザシステムを示す図である。

【図2】(i)分散補償期間及び(ii)非線形効果期間を説明する図である。

【図3】形状が互いに異なる3つのパルス及びそれらの伝搬を示す図である。

【図4】増幅器を含むファイバレーザシステムを示す図である。

【図5】例1において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図6A】例2において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図6B】例2において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図7】例3において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

30

【図8】例4において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図9】例5において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図10A】例6において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図10B】例6において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図11】例7において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図12】例8において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図13】例9において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【図14】例10において説明するファイバレーザシステムを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0008】

40

添付の図面を参照して、本発明に係る実施形態を以下に説明する。

【0009】

ソリトンパルスは、ファイバガラス等の光導波路において生じる非線形効果と分散効果とがある特定の均衡を有するパルスである。カー(K e r r)効果及び色分散により、短光パルスの時間的スペクトル形状は光導波路内を伝搬中に変化する。しかし、特定の状況において、これらの効果は互いに完全に相殺し合うため、パルスの時間的スペクトル形状は長距離伝搬後でも維持される。

【0010】

非線形効果(カー(K e r r)効果)と異常分散との均衡により、ソリトンパルスは長距離伝搬後でも形状が変化しない。これをソリトン効果と呼ぶ。

50

【 0 0 1 1 】

ソリトン効果は、以下のように記述される。

【 0 0 1 2 】

【 数 1 】

$$N = \sqrt{\frac{\gamma P_0 T_{FWHM}^2}{3.11 \cdot |\beta_2|}} \approx 1$$

【 0 0 1 3 】

は非線形係数であり、 $\beta_2$  は群速度分散 (GVD) であり、 $P_0$  はパルスのピーク電力であり、 $T_{FWHM}$  はパルスの時間幅である。ソリトン効果を得るためには、光導波路は入力パルスに対する異常分散特性を有する必要がある。Nはソリトン次数であり、これは1、2、3又は他の整数であってもよい。

10

【 0 0 1 4 】

ソリトン効果に加えてラマン効果が伝搬中に誘導される場合、ソリトンパルスの中心波長は長波長側にシフトされる場合があり、これをソリトン自己周波数シフトと呼ぶ(本明細書中、これをSSFSと呼ぶ)。波長シフトの量は、パルスエネルギー、非線形効果の量、導波路の材料及び導波路の長さに依存する。

【 0 0 1 5 】

西澤他は、ソリトン自己周波数シフト(SSFS)を達成するために、強度変調器により入力パルスのパルスエネルギー及びピーク電力を変更した。

20

【 0 0 1 6 】

それに対して、本実施形態において、ソリトン自己周波数シフトは入力パルスの形状を変更することにより達成可能である。入力パルスの形状は、入力パルスに付加されるチャープ量に基づいて制御可能である。

【 0 0 1 7 】

光ファイバレーザシステム1000を図1に示す。システム1000は、光源であるシードレーザ1010、分散制御器1020及び光導波路1030を含む。

【 0 0 1 8 】

シードレーザ1010は、例えば分散制御器1020に光パルスを入力するために使用されるモード同期ファイバレーザである。チャープパルスが導波路に接続される場合、シードレーザ(パルスレーザ)からの平均電力は、例えば50mWに設定される。反復率は40MHzであってもよく、波長の中心は1560nmであってもよく、スペクトル幅は10nmであってもよい。

30

【 0 0 1 9 】

パルス制御器又はチャープ変調器としての分散制御器1020は、チャープパルスを取得するために使用される。チャープパルスは、周波数(又は波長)毎に異なる複数の位相遅延を有する。制御器1020により取得されるチャープパルスは、アップチャープパルスであってもよい。シードレーザ1010により生成されたパルスは、分散制御器1020によりチャープされる。制御器1020は、シードレーザ1010からの入力パルスに適用されるチャープ量を制御でき、パルスの形状を変更することもできる。

40

【 0 0 2 0 】

光導波路1030は、例えば偏波保持単一モードファイバ(PM-SMF)である光ファイバである。分散 $\beta_2$ は $-20.4$  [ps<sup>2</sup>/km]であり、モードフィールド径(MFD)は10μmであり、ファイバの長さは15mである。

【 0 0 2 1 】

図2に示すように、分散制御器1020によりチャープされた出力パルス1050は、レンズ5019を通過して光導波路1030に伝搬する。本実施形態において導波路1030は異常分散特性を有するように設計されるため、グラフ5041に示す制御器102

50

0の正常分散によるアップチャープパルス1050は、導波路1030内を伝搬中に $a_0$ と $a_1$ との間において導波路1030の異常分散で補償される。図2の期間(i)は分散補償期間である。期間(i)の間、入力パルスは異常分散特性によりダウンチャージングを受けることができる。通常、光パルスのチャープは、その瞬時周波数の時間依存性として理解される。特に、アップチャープ(ダウンチャープ)は、瞬時周波数が時間と共に増加(減少)することを意味する。

【0022】

分散補償の完了後、パルス1050は、グラフ5042に示すように変形パルスになる。

【0023】

パルスのピーク電力がソリトン効果及びラマン効果を誘導するのに十分である場合、ソリトン自己周波数シフト(SSFS)が $a_1$ と $a_2$ の間で観察される。SSFSは、図2の期間(ii)において非線形効果として観察される。

【0024】

パルスが導波路1030を伝搬する間に分散補償及び非線形効果が発生し、パルスはレンズ5021を通過して出力パルス1060として出力される。

【0025】

(i)分散補償処理期間と(ii)SSFS処理期間との間の境界 $a_1$ を正確に認識することは困難である場合があるが、SSFSのシフト量は非線形効果の期間の長さに依存する。すなわち、非線形効果の期間の長さを変更可能である場合、これは出力パルス1060の波長の中心を変更可能であることを意味する。

【0026】

光導波路1030の長さを変更せずに非線形効果の期間(ii)の長さを変更するために、分散制御器1020により形成されるチャープパルスの形状が変更される。図3に示すように、分散制御器1020から出力されるパルスの形状1052、1051及び1050に依存して、期間(i)及び(ii)の全長を維持したままでそれらの期間を変更できる。チャープパルスの形状を変更することは、チャージング量を変更することを意味する。

【0027】

図3において、補償期間(i)の後、グラフ5043、5045及び5047に示すチャープパルス1052、1051及び1050はそれぞれ、グラフ5044、5046及び5048に示すように変形される。

【0028】

チャージングにより付与される正常分散の量がグラフ5043、5045及び5047に示すように変更されるため、ソリトン効果及びラマン効果が生じる部分から導波路1030の終端までの長さは変更される。従って、SSFSの量は付加される正常分散に依存して異なってくる。換言すると、SSFSの量はチャージングにより変更可能である。

【0029】

パルスにおけるチャージング量の変更される場合、パルスの形状も制御される。本システム1000において、パルスのエネルギーを変更する必要がない。

【0030】

チャープパルス(1052、1051又は1050)は、導波路1030に結合される。導波路1030において、ソリトン効果及びラマン効果が誘導される。これらの効果により、パルスの波長は調整され、パルスの中心波長はパルスにおけるチャープの量により異なる。

【0031】

シードレーザ1010は、ファイバレーザ、固体レーザ及び強度変調CWレーザ等のパルスレーザであってもよい。出力電力がソリトン効果及びラマン効果を生じさせるのに十分な強さでない場合、図4に説明するように、レーザ増幅器1015がシードレーザ1010と分散制御器1020との間に挿入されてもよい。本実施形態において、シードレー

10

20

30

40

50

ザ 1010 及び / 又は増幅器は、代替又は追加の分散（チャープング）制御器として使用されてもよい。チャープング量が十分である場合、分散制御器 1020 は省略されてもよい。

#### 【0032】

分散制御器 1020 は、正常分散制御器、異常分散制御器又はそれらの双方を含んでもよい。分散制御器 1020 の例は、光ファイバ、格子、プリズム、チャープファイバ格子及び分散材料である。

#### 【0033】

光導波路 1030 は、入力パルスに対する異常分散を有する必要がある。この異常分散導波路は、偏波保持ファイバであるのが好ましい。従って、波長板、偏光子又は偏光ビープスプリッタを含む偏波制御装置が導波路 1030 の前に挿入されてもよい。

10

#### 【0034】

SSFS による波長の中心のシフト量は、シミュレーションにより推定される。シミュレーションのために、以下の特定の情報が使用される。図 4 のシードレーザ 1010 及び増幅器 1015 であるシード光源として、エルビウム添加モード同期ファイバレーザ及びエルビウム添加ファイバ増幅器を使用できる。シード光源は、50 mW の平均電力、1560 nm の中心波長、40 MHz の反復率及び継続時間が 200 fs のパルスを有する。出力パルスのチャープングは、900 ライン / mm の格子の対により制御される。格子間の距離は 30 mm ~ 5 mm で変更される。チャープパルスは、偏波保持単一モードファイバ（PM-SMF）に結合される。PM-SMF は、 $-20.4 [ps^2/km]$  の分散、10  $\mu m$  のモードフィールド径（MFD）及び 15 m の長さを有する。PM-SMF からの出力は、中心波長が 1600 nm ~ 1720 nm であり、平均電力が 30 mW ~ 45 mW である。パルスのチャープング量が制御されない場合、出力パルスの中心波長は調整されず、単に 1740 nm である。

20

#### 【0035】

SSFS（すなわち、ソリトンに対する非線形効果による波長変調）を発生させるための条件を 1 つの例として上述した。他の例は、非線形偏微分方程式（すなわち、非線形シュレーディンガー方程式）を解くために使用される疑スペクトル数値法である分割ステップフーリエ法に基づく計算シミュレーションを使用することにより取得可能である。

#### 【0036】

（例 1）図 5 において、シードレーザ 1010 はモード同期ファイバレーザである。レーザ 1010 からのパルスは、レンズ 5019 を通過して平行ビームになる。平行ビームは、分散ガラスから構成される分散制御器 5020 に伝搬し、分散を制御されたパルスは、偏波を保持した状態で光ファイバ 5030 に結合される。パルスはレンズ 5021 を通過し、異常分散を有する導波路に入力する。分散は、分散ガラスの光路長を変更することにより制御される。図 5 において、2 つの分散ガラスはテーバ状の部分を持つ。パルスが伝搬する光路長は、例えば分散ガラスの一方を上方又は下方に移動することにより変更可能である。双方の分散ガラスが異なる方向に移動されてもよい。

30

#### 【0037】

（例 2）図 6 A において、シードレーザ 1010 及び光ファイバは上記の例 1 と同一である。分散制御器 6020 の部分は、反射型格子である格子（格子 1、2、3 及び 4）のセットから構成される。分散は、格子間の距離又は平行ビームと格子との間の角度を変更することにより制御可能である。一般に、格子は分散ガラスより大きい分散を付与できる。制御器 6021 として透過型格子を使用する別の例の 1 つを図 6 B に示す。各パルスに適用されるチャープング量は、格子 1 と格子 2 との間の距離及び格子 3 と格子 4 との間の距離を同時に変更することにより変更可能である。格子のピッチは、例えば 900 ライン / mm であってもよい。

40

#### 【0038】

（例 3）図 7 において、シードレーザ 1010 及び光ファイバ 5030 は例 1 と同一である。分散制御器 7020 の部分は、プリズム（プリズム 1、プリズム 2、プリズム 3 及

50

びプリズム 4) を含む。分散は、プリズム間の距離を変更することにより制御される。一般に、プリズムは、光パルスがプリズムを通過する特定の光路により分散を制御できる。各パルスに適用されるチャージング量は、プリズムの少なくとも 1 つを移動してパルスが透過する光路長を変更することにより変更可能である。

【 0 0 3 9 】

(例 4) 図 8 において、シードレーザ 1 0 1 0 及び光ファイバ 5 0 3 0 は例 1 と同一である。分散制御器 8 0 2 0 の部分はチャージファイバ格子を含む。分散は、チャージファイバ格子の格子ピッチを変更することにより制御される。チャージファイバ格子を使用することにより、システムにおける空きスペースの調整に関する問題が軽減する。各パルスに適用されるチャージング量は、チャージファイバ格子の温度を調整すること及び / 又はチャージファイバ格子に印加される電圧を変更することにより変更可能である。

10

【 0 0 4 0 】

(例 5) 図 9 において、シードレーザ 1 0 1 0 及び光ファイバ 5 0 3 0 は例 1 と同一である。分散制御器 9 0 2 0 の部分は、ファイバサーキュレータ 1 0 9 0、格子 (格子 1 及び格子 2) 及びミラーを含む。分散は、格子間の距離又は平行ビームと格子との間の角度を変更することにより制御される。この図により、格子数を減少できる。各パルスに適用されるチャージング量は、格子 1 及び 2 に対するパルスの入射角を変更することにより変更可能である。

【 0 0 4 1 】

(例 6) 図 1 0 A において、シードレーザ 1 0 1 0 及び光ファイバ 5 0 3 0 は例 1 と同一である。分散制御器 1 1 2 0 の部分は、ファイバサーキュレータ 1 0 9 0、反射型格子である格子 (格子 1 及び 2)、回転ステージ及びミラーを含む。回転ステージは、例えば自動的に又は反復して軸の周りを  $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$  回転するように設計可能である。分散は、平行ビームと格子との間の角度を変更することにより制御される。この図により、分散を迅速に制御できる。図 1 0 B において、反射型格子の代わりに透過型格子が使用される。各パルスに適用されるチャージング量は、回転ステージにより変更可能である。

20

【 0 0 4 2 】

(例 7) 図 1 1 において、シードレーザ 1 0 1 0 及び光ファイバ 5 0 3 0 は例 1 と同一である。分散制御器 1 2 2 0 の部分は、ファイバサーキュレータ 1 0 9 0、プリズム (プリズム 1 及びプリズム 2) 及びミラーを含む。分散は、プリズム間の距離を変更することにより制御される。各パルスに適用されるチャージング量は、例えばプリズムの一方を下方に移動してパルスの光路長を変更することにより変更可能である。

30

【 0 0 4 3 】

(例 8) 図 1 2 において、シードレーザ 1 0 1 0 及び光ファイバ 5 0 3 0 は例 1 と同一である。分散制御器 1 3 2 0 の部分は、ファイバサーキュレータ 1 0 9 0 及びチャージファイバ格子 1 3 2 0 を含む。分散は、チャージファイバ格子の格子ピッチを変更することにより制御される。この図により、空きスペースの調整に関する問題が軽減し、反射型チャージファイバ格子を更に使用できる。各パルスに適用されるチャージング量は、例 4 で説明した方法で変更可能である。

【 0 0 4 4 】

(例 9) 図 1 3 において、シードレーザ 1 0 1 0 及び光ファイバ 5 0 3 0 は例 1 と同一である。分散は、光スイッチ 1 3 5 5、互いに異なるチャージング量を提供する複数の分散制御器要素及びビームコンバイナ 1 3 5 6 を含む分散制御器 1 4 2 0 の異なる設定により制御される。各分散制御器要素は、上記の例で説明したように、格子、プリズム、チャージファイバ格子、分散材料及び導波路のうちの一つ以上を含んでもよい。スイッチを使用することにより、チャージの高速調整が可能になり且つ / 又はより多様なチャージングが可能になる。各パルスに適用されるチャージング量は、光スイッチ 1 3 5 5 により変更可能である。

40

【 0 0 4 5 】

(例 1 0) 図 1 4 において、シードレーザ 1 0 1 0 は例 1 と同一である。分散制御器 1

50

520は、光スイッチ1355、複数の光ファイバ及びビームコンバイナ1356を含む。光ファイバの長さが互いに異なるため、出力されるソリトンパルスの波長の中心は異なる。図14の光スイッチ1355、複数の光ファイバ及びビーム制御器は、図1で説明した分散制御器及び導波路として動作する。このシステム構成において、空きスペースに関する問題は軽減し、デジタル化パルスが更に高速に生成される。

【0046】

上述のように、本発明により、異なる中心波長を有する出力パルス間の入力パルスエネルギーの差異を減少できる。従って、光エネルギーを更に効率的に使用できる。

【0047】

例示的な実施形態を参照して本発明に係る実施形態を説明したが、本発明は上述の実施形態に限定されないことが理解されるべきである。以下の特許請求の範囲の範囲は、そのような変更、並びに等価の構造及び機能の全てを含むように広範に解釈されるべきである。

【図1】

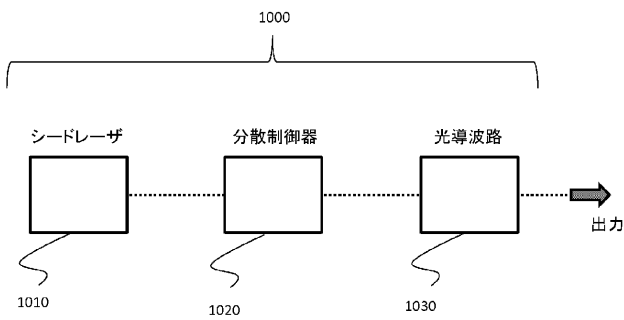


FIG. 1

【図4】

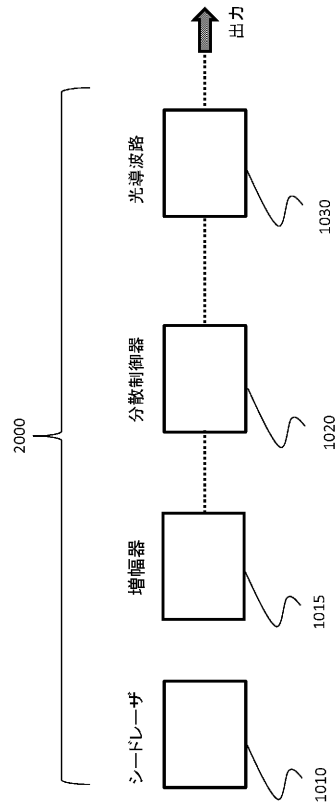


FIG. 4

【 図 5 】

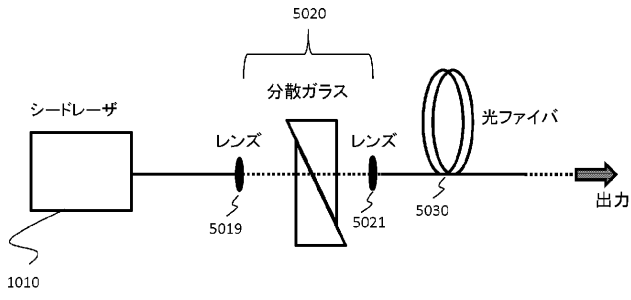


FIG. 5

【 図 6 A 】

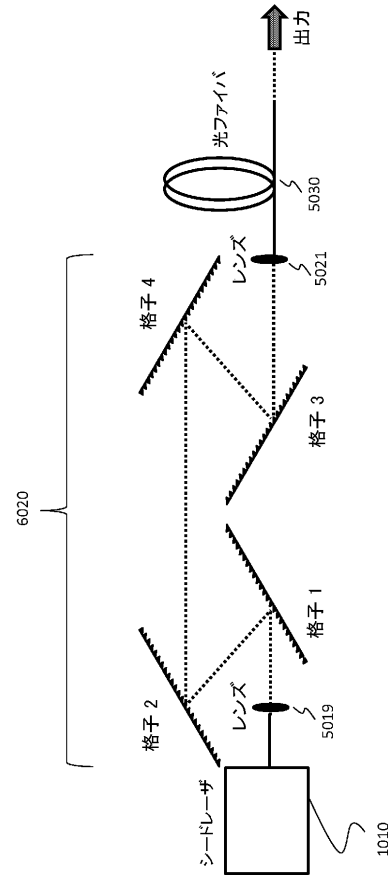


FIG. 6A

【 図 6 B 】

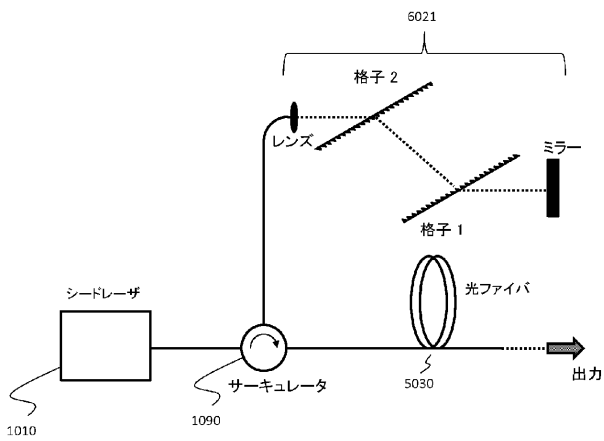


FIG. 6B

【 図 7 】

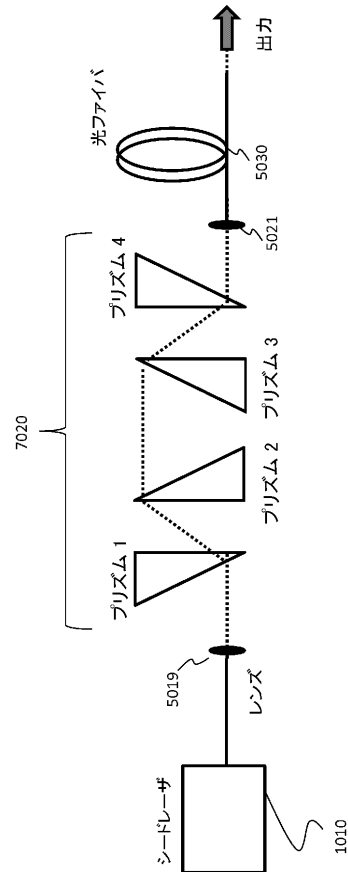


FIG. 7

【 図 8 】

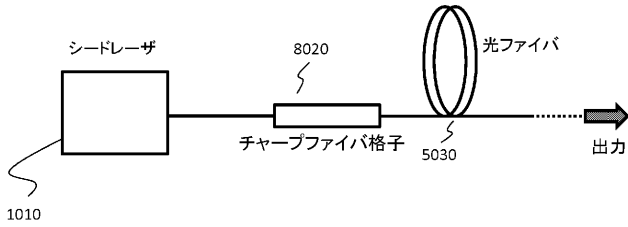


FIG. 8

【 図 9 】

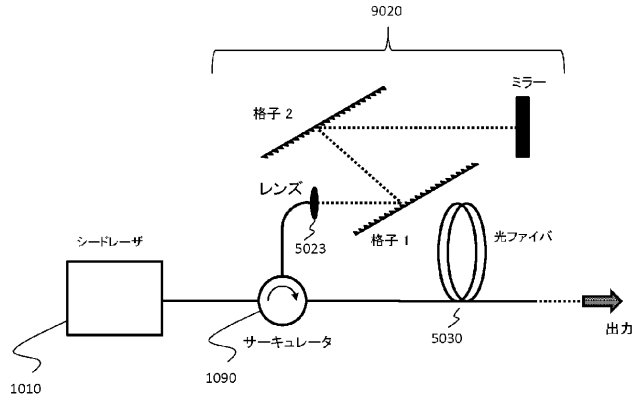


FIG. 9

【 図 10 A 】

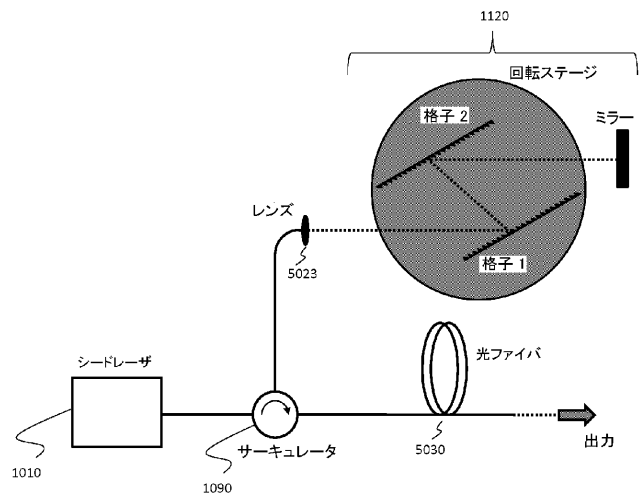


FIG. 10A

【 図 10 B 】

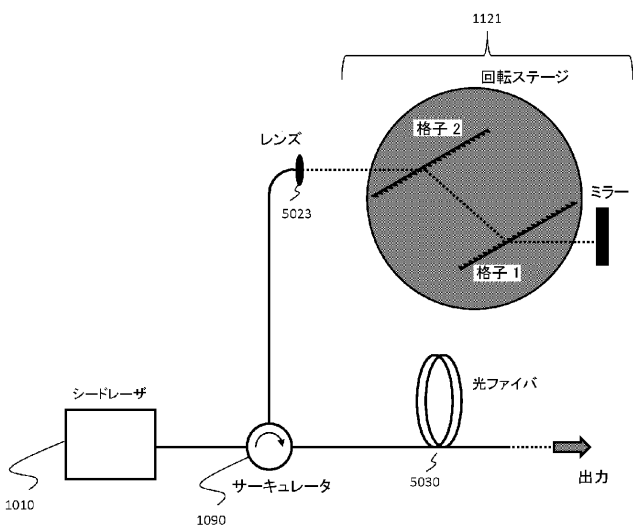


FIG. 10B

【 図 11 】

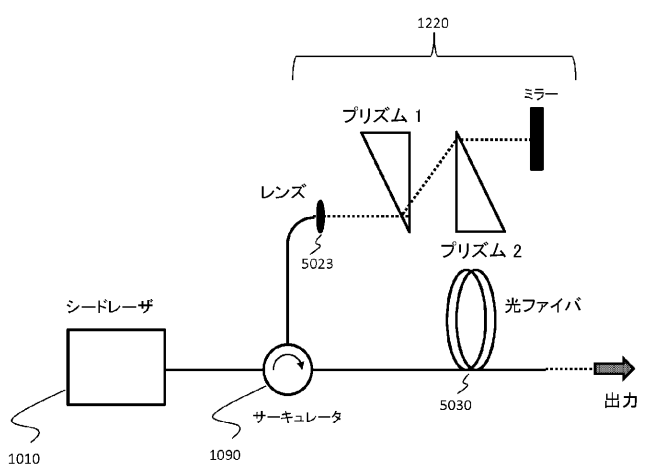


FIG. 11

【 図 1 2 】

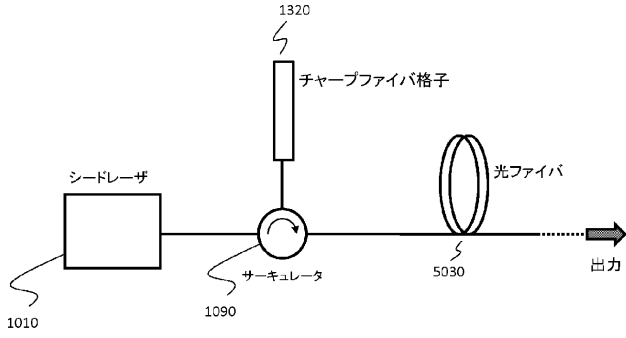


FIG. 12

【 図 1 3 】

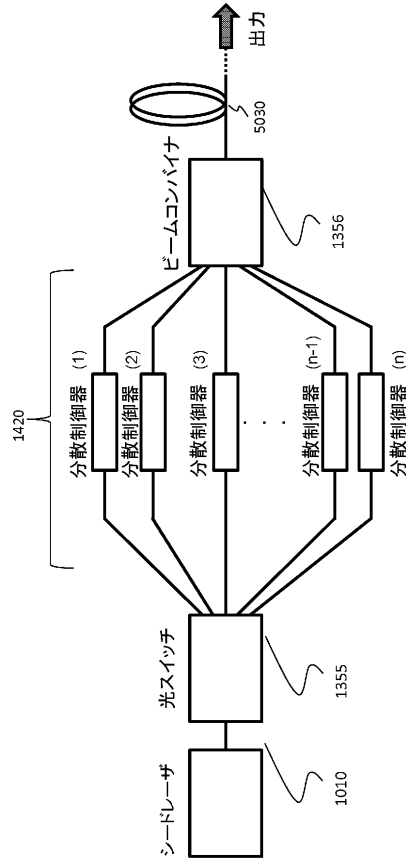


FIG. 13

【 図 1 4 】

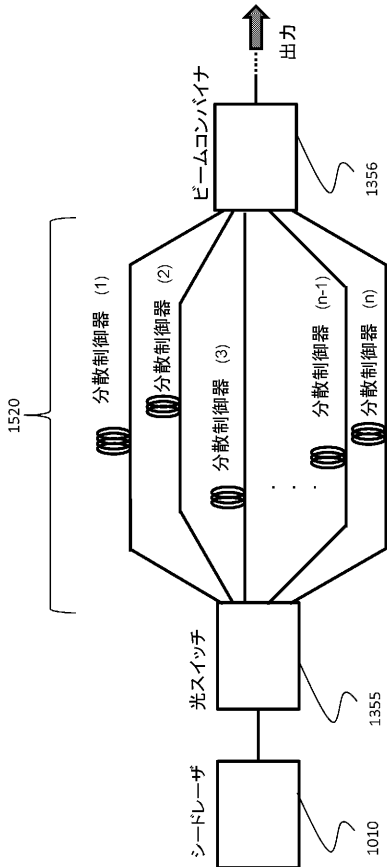


FIG. 14

【 図 2 】

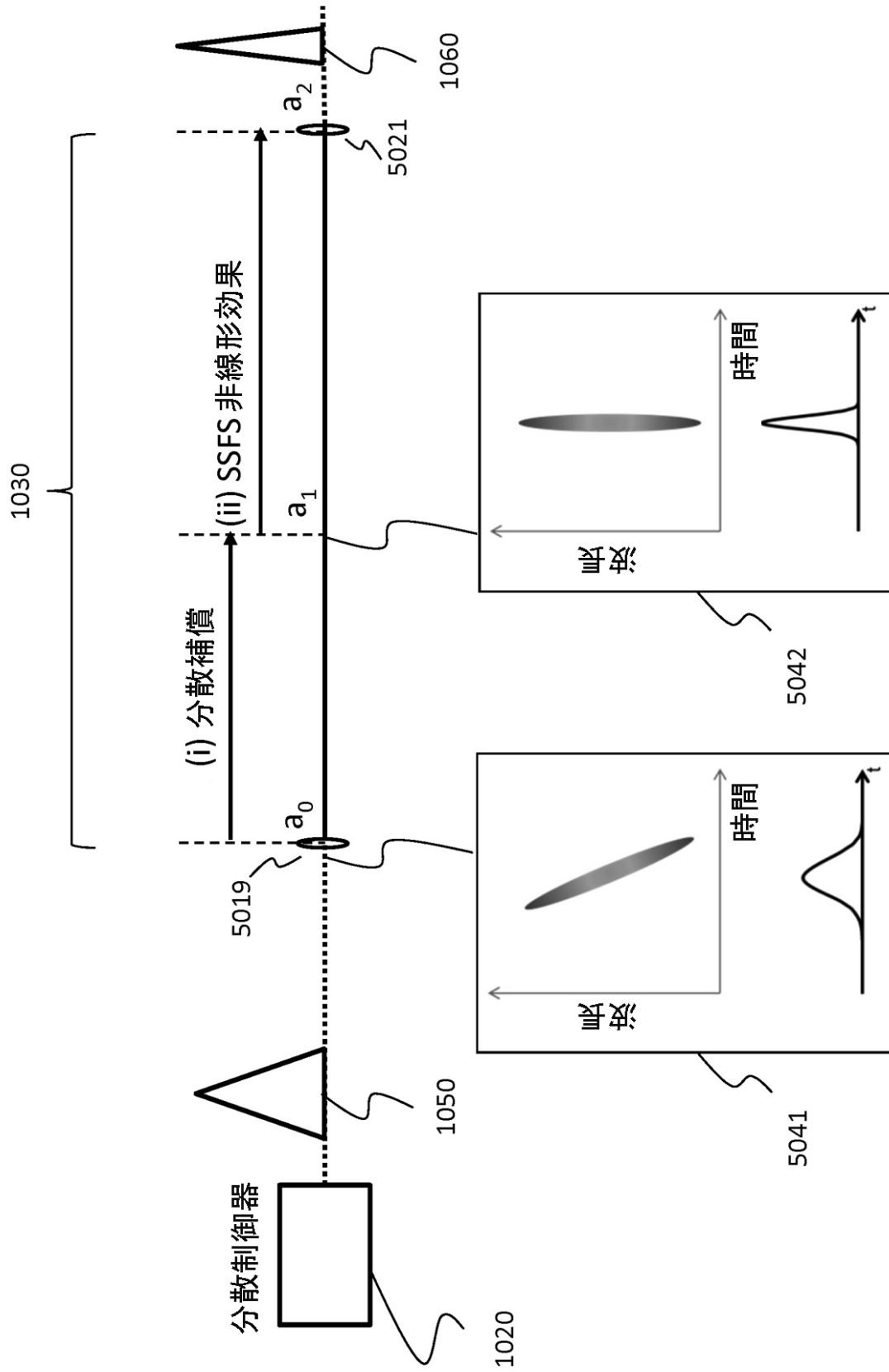


FIG. 2

【 図 3 】

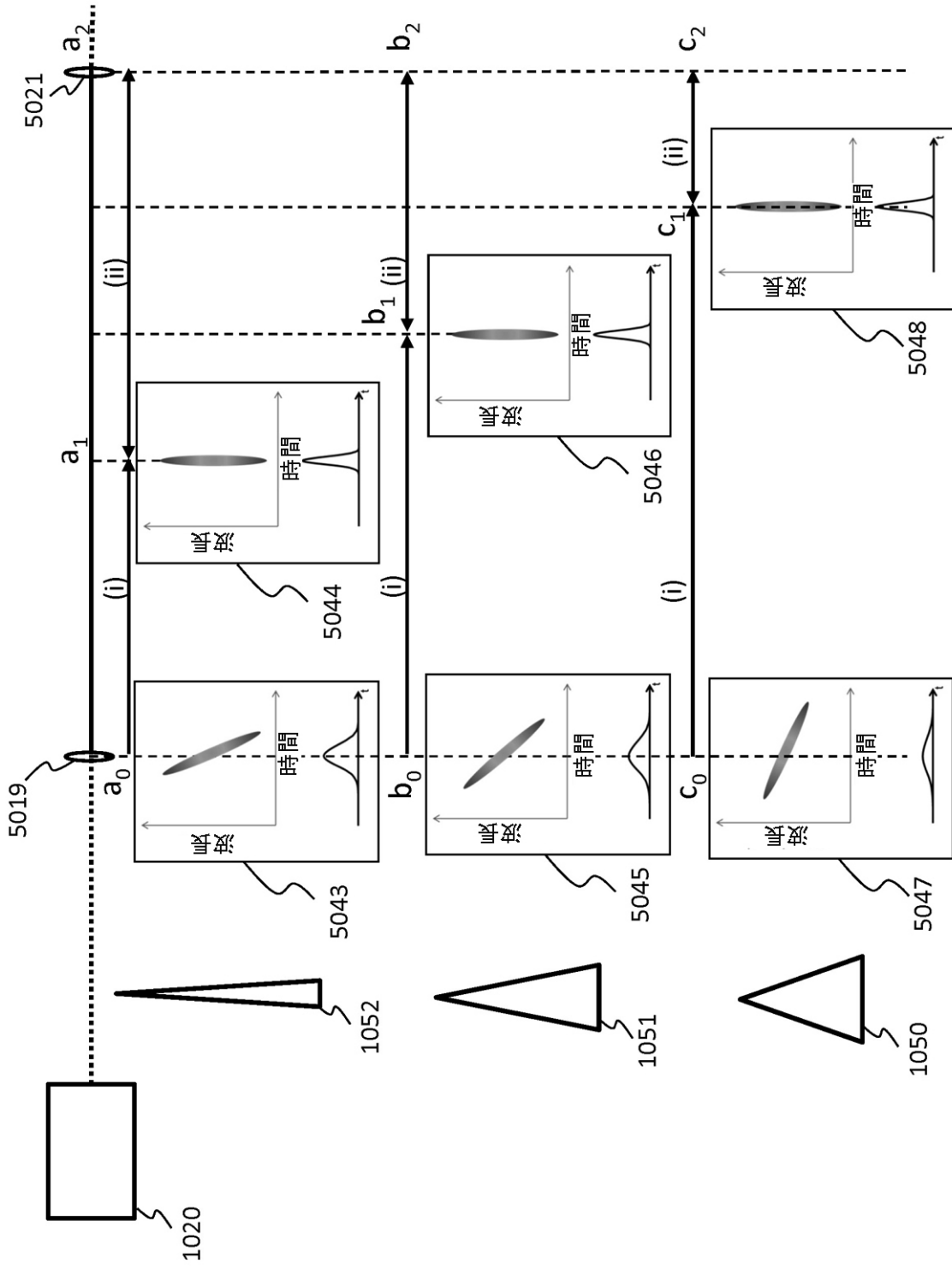


FIG. 3

---

フロントページの続き

(72)発明者 太田 健史

アメリカ合衆国 ニューヨーク州 11042, レイク サクセス, ワン キヤノン プラザ  
キヤノン ユーエスエイ, インコーポレイテッド内

Fターム(参考) 2K102 AA10 AA15 BA18 BA23 BB02 BC02 DA06 EB08 EB20  
5F172 AF03 AM08 DD03 NN12 NN14 NR05 NR12 NR14