

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6796027号  
(P6796027)

(45) 発行日 令和2年12月2日(2020.12.2)

(24) 登録日 令和2年11月17日(2020.11.17)

(51) Int.Cl.		F I
<b>GO2F</b>	<b>1/377</b>	<b>(2006.01)</b>
<b>HO4B</b>	<b>10/077</b>	<b>(2013.01)</b>
<b>HO4B</b>	<b>10/25</b>	<b>(2013.01)</b>
<b>HO4J</b>	<b>14/06</b>	<b>(2006.01)</b>
<b>GO2F</b>	<b>1/39</b>	<b>(2006.01)</b>

GO2F	1/377
HO4B	10/077
HO4B	10/25
HO4J	14/06
GO2F	1/39

請求項の数 8 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2017-112540 (P2017-112540)	(73) 特許権者	000004226
(22) 出願日	平成29年6月7日(2017.6.7)		日本電信電話株式会社
(65) 公開番号	特開2018-205595 (P2018-205595A)		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(43) 公開日	平成30年12月27日(2018.12.27)	(74) 代理人	110001243
審査請求日	令和1年6月26日(2019.6.26)		特許業務法人 谷・阿部特許事務所
		(72) 発明者	梅木 毅伺
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日
			本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	阿部 真志
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日
			本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	風間 拓志
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日
			本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光送信器およびこれを使用した光伝送システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

連続(CW)光を出力する信号光源と、  
 前記CW光を分岐する手段と、  
 分岐された前記CW光の一方を変調して第1の主信号光を出力する第1の変調器と、  
 前記第1の主信号光に対する第1の位相共役光を生成し、第1の主信号光 位相共役光の対を出力する第1の二次非線形光学素子と、  
 分岐された前記CW光の他方を変調して第2の主信号光を出力する第2の変調器と、  
 前記第2の主信号光に対する第2の位相共役光を生成し、第2の主信号光 位相共役光の対を出力する第2の二次非線形光学素子と、  
 前記第1の主信号光 位相共役光の対および前記第2の主信号光 位相共役光の対を偏波多重し、偏波多重光を出力する偏波合成手段と、  
 基本波光を出力する局部発振光源と、  
 前記基本波光に基づいて、前記第1の二次非線形光学素子および前記第2の二次非線形光学素子で位相共役光を生成するための励起光を生成する第3の二次非線形光学素子と、  
 前記基本波光の一部であって、前記CW光とともに前記第1の変調器に入力され、前記第1の二次非線形光学素子を透過する第1のパイロット光の位相と、前記基本波光の一部であって、前記CW光とともに前記第2の変調器に入力され、前記第2の二次非線形光学素子を透過する第2のパイロット光の位相とを同期させる位相調整機構と  
 を備えたことを特徴とする光送信器。

## 【請求項 2】

前記位相調整機構は、

前記透過した第 1 のパイロット光のレベルを検出して、前記第 1 のパイロット光および前記第 1 の主信号光の位相を調整する第 1 のフィードバック回路と、

前記透過した第 2 のパイロット光のレベルを検出して、前記第 2 のパイロット光および前記第 2 の主信号光の位相を調整する第 2 のフィードバック回路と、

前記透過した第 1 のパイロット光および前記透過した第 2 のパイロット光のレベルを検出して、前記パイロット光の一方の位相を調整する第 3 のフィードバック回路とを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の光送信器。

## 【請求項 3】

前記 CW 光を分岐する手段は、

前記信号光源からの前記 CW 光が入力される第 1 の入力と、

前記局部発振光源からの前記基本波光が入力される第 2 の入力と、

前記 CW 光の前記一方およびこれに直交する前記第 1 のパイロット光を出力する第 1 の出力と、

前記 CW 光の前記他方およびこれに直交する前記第 2 のパイロット光を出力する第 2 の出力と

を有する偏波分離手段であり、

前記位相調整機構は、

前記偏波合成手段によって合成された前記透過した第 1 のパイロット光および前記透過した第 2 のパイロット光のレベルを検出して、前記励起光の一方の位相を調整するフィードバック回路を含むこと

を特徴とする請求項 1 に記載の光送信器。

## 【請求項 4】

連続 (CW) 光を出力する信号光源と、

前記 CW 光を分岐する手段と、

分岐された前記 CW 光の一方を変調して第 1 の主信号光を出力する第 1 の変調器と、

前記第 1 の主信号光に対する第 1 の位相共役光を生成し、第 1 の主信号光 位相共役光の対を出力する第 1 の二次非線形光学素子と、

分岐された前記 CW 光の他方を変調して第 2 の主信号光を出力する第 2 の変調器と、

前記第 2 の主信号光に対する第 2 の位相共役光を生成し、第 2 の主信号光 位相共役光の対を出力する第 2 の二次非線形光学素子と、

前記第 1 の主信号光 位相共役光の対および前記第 2 の主信号光 位相共役光の対を偏波多重し、偏波多重光を出力する偏波合成手段と、

基本波光を出力する局部発振光源と、

前記基本波光に基づいて、前記第 1 の二次非線形光学素子および前記第 2 の二次非線形光学素子で位相共役光を生成するための励起光を生成する第 3 の二次非線形光学素子と、

前記第 1 の位相共役光を生成した前記第 1 の二次非線形光学素子における前記励起光の位相と、前記第 2 の位相共役光を生成した前記第 2 の二次非線形光学素子における前記励起光の位相とを同期させる位相調整機構と

を備えたことを特徴とする光送信器。

## 【請求項 5】

前記位相調整機構は、

前記第 1 の二次非線形光学素子から分離された第 1 の励起光および前記第 2 の二次非線形光学素子から分離された第 2 の励起光を合波する光カプラと、

前記光カプラの出力レベルを検出して、前記励起光の一方の位相を調整するフィードバック回路と

を含むことを特徴とする請求項 4 に記載の光送信器。

## 【請求項 6】

前記基本波光を分岐する光カプラと、

10

20

30

40

50

前記分岐された基本波光の一方が入力される前記第3の二次非線形光学素子に加え、前記分岐された基本波光の他方が入力され、前記第1の二次非線形光学素子および前記第2の二次非線形光学素子のいずれかで位相共役光を生成するための励起光を生成する第4の二次非線形光学素子と

をさらに備え、

前記位相調整機構は、

前記第1の二次非線形光学素子から分離された第1の励起光および前記第2の二次非線形光学素子から分離された第2の励起光を合波する光カプラと、

前記光カプラの出力レベルを検出して前記基本波光の一方の位相を調整するフィードバック回路と

を含むことを特徴とする請求項4に記載の光送信器。

#### 【請求項7】

前記第1の二次非線形光学素子、前記第2の二次非線形光学素子および前記第3の二次非線形光学素子は、それぞれ直接接合リッジ導波路を含み、

前記直接接合リッジ導波路は、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{KNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ 、 $\text{LiNb}_{(x)}\text{Ta}_{(1-x)}\text{O}_3$  ( $0 < x < 1$ )、または $\text{KTiOPO}_4$ のいずれかの材料から構成されるか、または、当該材料のいずれかに $\text{Mg}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Sc}$ 、 $\text{In}$ からなる群から選ばれた少なくとも一種を添加物として加えた材料から構成されること

を特徴とする請求項1乃至5いずれかに記載の光送信器。

#### 【請求項8】

請求項1乃至7いずれかに記載の光送信器と、

前記光送信器からの前記偏波多重光の搬送波位相に同期した基本波光を出力する局部発振光源を備え、前記偏波多重光を2つの偏波成分に分離し、非線形光学素子によって前記2つの偏波成分をそれぞれ光増幅し、光増幅された2つの偏波成分を再合波する偏波ダイバシティ構成を有する位相感応光増幅器と

を備えたことを特徴とする光伝送システム。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【背景技術】

#### 【0001】

本発明は、光通信システムや光計測システムで用いられる光送信器およびそれを用いた光伝送システムに関する。

#### 【0002】

従来の光伝送システムでは、光ファイバを伝搬して減衰した信号を再生するために、光信号を電気信号に変換し、デジタル信号を識別後に光信号を再生する識別再生光中継器が用いられた。識別再生光中継器では、光-電気変換する電子部品の応答速度制限や、消費電力増大の問題があった。そこで、希土類元素を添加した光ファイバに励起光を入射して信号光を光のまま増幅するファイバレーザ増幅器や、半導体レーザ増幅器が登場した。これらレーザ増幅器は、劣化した信号光波形を整形する機能を有していなかった。逆に、不可避的かつランダムに発生する自然放出光が信号成分と全く無関係に混入され、増幅前後で信号光の $S/N$ が少なくとも3dB低下する。 $S/N$ 低下は、デジタル信号伝送時における伝送符号誤り率を上昇させ、伝送品質を低下させる。

#### 【0003】

レーザ増幅器の限界を打開する手段として、位相感応光増幅器(Phase Sensitive Amplifier: PSA)が検討されている。PSAは、伝送ファイバの分散の影響による劣化した信号光波形や位相信号を整形する機能を有する。信号とは無関係の直交位相をもった自然放出光を抑圧でき、同相の自然放出光も最小限で済む。このために原理的に増幅前後で信号光の $S/N$ を劣化させず同一に保つことができる。

#### 【0004】

図5は、従来技術のPSAの基本的な構成を示す図である。PSA100は、光パラメトリック増幅を用いた位相感応光増幅部101と励起光源102と励起光位相制御部10

10

20

30

40

50

3と、第1光分岐部104-1及び第2の光分岐部104-2とを備える。図5に示されるように、PSA100に入力された信号光110は、光分岐部104-1で2分岐されて、一方は位相感応光増幅部101に入射し、他方は励起光源102に入射する。励起光源102から出射した励起光111は、励起光位相制御部103を介して位相が調整され、位相感応光増幅部101に入射する。位相感応光増幅部101は、入力した信号光110及び励起光111に基づいて出力信号光112を出力する。

#### 【0005】

位相感応光増幅部101は、信号光110の位相および励起光111の位相が一致すると信号光110を増幅し、両者の位相が90度ずれた直交位相関係になると信号光110を減衰する特性を有する。この特性を利用して増幅利得が最大となるように励起光111

信号光110間の位相を一致させると、信号光110と直交位相の自然放出光が発生せず、また同相の成分に関しても信号光のもつ雑音以上に過剰な自然放出光を発生しない。このため、S/N比を劣化させずに信号光110を増幅できる。

#### 【0006】

信号光110および励起光111の位相同期を達成するために、励起光位相制御部103は、第1の光分岐部104-1で分岐された信号光110の位相と同期するように励起光111の位相を制御する。励起光位相制御部103は、第2の光分岐部104-2で分岐された出力信号光112の一部を狭帯域の検出器で検波し、出力信号光112の増幅利得が最大となるように励起光111の位相を制御する。

#### 【0007】

上述のパラメトリック増幅を行う非線形光学媒質には、周期分極反転LiNbO<sub>3</sub>(PPLN)導波路に代表される二次非線形光学材料と、石英ガラスファイバに代表される三次非線形光学材料がある。

#### 【0008】

図6は、PPLN導波路を用いた従来技術のPSAの構成を示す図である(非特許文献1参照)。図6に示したPSA200は、エルビウム添加ファイバレーザ増幅器(EDFA)201と、第1の二次非線形光学素子202及び第2の二次非線形光学素子204と、第1の光分岐部203-1及び第2の光分岐部203-2と、位相変調器205と、光ファイバ伸長器206と、偏波保持ファイバ207と、光検出器208と、位相同期ループ(PLL)回路209と、を備える。第1の二次非線形光学素子202は、第1の空間光学系211と、第1のPPLN導波路212と、第2の空間光学系213と、第1のダイクロイックミラー214と、を備える。第2の二次非線形光学素子204も、同様の構成を持ち詳細は説明を省略する。

#### 【0009】

図6のPSA200に入射した信号光250は、光分岐部203-1によって分岐されて、一方は第2の二次非線形光学素子204に入射する。分岐光の他方は励起基本波光251として位相変調器205及び光ファイバ伸長器206を介して、位相制御されてEDFA201に入射する。EDFA201は、入射した励起基本波光251を十分に増幅し、第1の二次非線形光学素子202に入射する。EDFA201により、微弱な励起基本波光251から非線形光学効果を得るのに十分なパワーを得ることができる。第1の二次非線形光学素子202では、入射した励起基本波光251から第2高調波(以下、SH光)252が発生する。発生したSH光252は、偏波保持ファイバ207を介して第2の二次非線形光学素子204に入射する。第2の二次非線形光学素子204では、入射した信号光250およびSH光252によって縮退パラメトリック増幅を行うことで、位相感応光増幅を行い、出力信号光253を出力する。

#### 【0010】

PSAにおいては、信号光と位相の合った光のみを増幅するために、上述のように信号光の位相と励起光の位相とが一致するか、または、ラジアンだけずれている必要がある。すなわち二次の非線形光学効果を用いる場合は、SH光に相当する波長である励起光の位相 $\theta_2$ と、信号光の位相 $\theta_s$ とが以下の式(1)の関係を満たすことが必要となる

10

20

30

40

50

。ここで、 $n$ は整数とする。

$$= 1 / 2 ( \quad \quad \quad ) = n \quad \quad \quad \text{式 ( 1 )}$$

【 0 0 1 1 】

図 7 は、従来技術の二次非線形光学効果を利用した P S A における、入力信号光 励起光間の位相差 と利得との関係を示す図である。横軸の位相差 が - 、 0、または のときに、縦軸の利得 ( d B ) が最大となっていることがわかる。

【 0 0 1 2 】

信号光 2 5 0 と励起基本波光 2 5 1 との間の位相同期のために、まず位相変調器 2 0 5 で微弱なパイロット信号により位相変調を励起基本波光 2 5 1 に施し、出力信号光 2 5 3 の一部を分岐して検出器 2 0 8 で検波する。このパイロット信号成分は、図 7 に示した位相差 が最小となって、位相同期が取れている状態で最小となる。したがって、パイロット信号が最小、つまり増幅出力信号が最大となるように P L L 回路 2 0 9 を用いて、光ファイバ伸長器 2 0 6 にフィードバックを行う。励起基本波光 2 5 1 の位相を光ファイバ伸長器 2 0 6 によって制御して、信号光 2 5 0 と励起基本波光 2 5 1 との間の位相同期を達成できる。

【 0 0 1 3 】

光通信の高速・大容量化の要請の中で、P S A においても、以下述べるように対応する変調方式や多重化方式の点でその適用範囲が広がっている。図 7 に示したように、P L N 導波路を用いた従来の P S A は、直交する位相成分を減衰させる特性を有しているため、通常の強度変調や二値の位相変調を用いる強度変調・直接検波 ( I M D D : Intensity M odulation-Direct Detection )、2 値位相変調 ( B P S K : Binary Phase Shift Keying )、差動位相偏移変調 ( D P S K : Differential Phase Shift Keying ) 等の変調信号の増幅に適用できるものの、さらに多値の変調フォーマットである Q P S K ( Quadrature Phase Shift Keying ) や 8 P S K 等の変調信号を増幅できない。

【 0 0 1 4 】

非特許文献 2 及び非特許文献 3 は、Q P S K 等の変調信号を位相感応光増幅し、位相再生増幅が可能な構成を開示している。非特許文献 2 は三次の非線形光学材料である石英ガラスファイバを用いた方法を、非特許文献 3 は二次の非線形光学材料である P P L N を用いた方法を開示している。

【 0 0 1 5 】

多値の変調フォーマットでは、信号光からキャリア抽出するためには、変調信号の多値度が上がるほどより多くの非線形過程を用いる必要がある。その場合、信号光からキャリア抽出によって生成した基本波光の S / N を保つことが難しい。また、非線形過程を複数回用いたキャリア抽出方法の構成では、複数の信号を波長多重した W D M ( Wavelength Division Multiplexing ) 信号を一括して増幅することができなかつた。

【 0 0 1 6 】

非特許文献 4 は、信号光として主信号光およびその位相共役光からなる対を用い、非縮退パラメトリック増幅により、高次多値変調フォーマットの直交振幅変調 ( Q A M : Quadrature Amplitude Modulation ) 変調信号やマルチキャリア信号に対する位相感応光増幅器を開示している。

【 0 0 1 7 】

図 8 は、信号光として主信号光およびその位相共役光からなる対を用いた、従来技術の非縮退パラメトリック増幅による P S A の構成を示した図である。図 8 に示した P S A 3 0 0 は、光送信器 3 0 1 および位相感応光増幅器 3 0 2 からなる。光送信器 3 0 1 では、複数の信号光源 3 0 3 からの出力光に対し外部変調器 3 0 4 を用いてデータ変調した後に、合波器 3 0 5 によって波長多重を行う。信号光源 3 0 3 とは別の局部発振光源 3 0 7 から出力される基本波光から、二次非線形光学素子 3 1 1 により第二高調波 ( S H : Second Harmonic ) 光を発生させて励起光 3 1 2 とする。その後、二次非線形光学素子 3 0 6 によって、励起光 3 1 2 と波長多重された主信号光 3 1 3 との差周波光を発生させ、この差周波光を主信号光に対する位相共役光とする。位相共役光は、アイドラ光とも呼ばれる。

## 【 0 0 1 8 】

光送信器 3 0 1 からは、多重化された主信号光 3 1 3 およびその位相共役光からなる複数対を含む信号光群 3 1 6 と、局部発振器 3 0 7 からの基本波光の一部 3 1 4 とを別々に位相感应光増幅器 3 0 2 へ出力する。位相感应光増幅器 3 0 2 では、二次非線形光学素子 3 2 3 によって基本波光 3 1 4 から S H 光である励起光 3 2 9 を生成する。さらに二次非線形光学素子 3 2 4 において励起光 3 2 9 と信号光群 3 1 6 との間のパラメトリック増幅過程を用いて位相感应光増幅を行う。

## 【 0 0 1 9 】

図 9 は、図 8 の従来技術の非縮退パラメトリック増幅による P S A において、各部の光の波長軸上での関係を模式的に説明する図である。いずれの図も横軸は波長を縦軸は光強度を示している。図 9 の ( a ) に示すように、光送信器 3 0 1 からは、主信号光 3 1 3 とその位相共役光 3 1 5 との複数の対からなる信号光群 3 1 6 と、基本波光 3 1 4 が出力される。基本励起光 3 1 4 を中心として対称な位置関係にある主信号光と位相共光が 1 つの対となる。尚、対となる信号光と位相共役光は、厳密には周波数軸上において対称な位置関係にあることに留意されたい。図 9 の ( b ) は、位相感应光増幅器 3 0 2 の二次非線形光学素子 3 2 3 により基本波光 3 1 4 から S H 光である励起光 3 2 9 を生成する過程 ( S H G : Second Harmonic Generation ) を示している。図 9 の ( c ) は、二次非線形光学素子 3 2 4 において励起光 3 2 9 と信号光群 3 1 6 との間のパラメトリック増幅過程 ( O P A : Optical Parametric Amplification ) で得られる増幅された信号光群 3 3 0 を示している。図 8 では光送信器 3 0 1 から分岐した基本波光 3 1 4 を用いた構成例を示したが、長距離ファイバ伝送後の中継増幅器として用いるためには、信号光から搬送波位相を抽出し、搬送波位相に同期した局部発振光を生成する必要がある。その場合は、非特許文献 6 に示されているように基本波光をパイロット光として同送する方法がある。また、非特許文献 7 に示されているような光位相同期 ( 光 P L L ) を用いて、信号光の搬送波位相と同期した局部発振光源からの出力光を基本波として用いても良い。

## 【 0 0 2 0 】

近年のデジタルコヒーレント光通信システムにおいては、偏波多重分離 ( P D M : Polarization Division Multiplexing ) 技術による偏波多重信号が用いられる。P P L N 導波路等の非線形光学媒質は一般に偏波依存性を持つため、従来技術の P S A では偏波多重信号の増幅を行うことができなかつた。これに対し、非特許文献 5 および非特許文献 6 は、2 つの非線形光学媒質を用いた偏波ダイバシティ構成によって偏波多重信号に対して位相感应光増幅する構成を開示している。

## 【 0 0 2 1 】

図 1 0 は、従来技術の偏波多重信号光を伝送する光伝送システムの概要を示す図である。光伝送システム 3 5 0 は、光送信器 3 5 1 と、光ファイバ伝送路 3 6 1 と、偏波ダイバシティ構成を持つ光増幅装置 3 5 2 からなる。非特許文献 5 および非特許文献 6 に開示されている偏波ダイバシティ構成は、図 1 0 の光伝送システムの光増幅装置 3 5 2 と同構成である。偏波ダイバシティ構成 3 5 2 では、光ファイバ 3 6 1 を伝送された偏波多重信号は、偏波ビームスプリッタ ( P B S ) 3 6 2 で分離される。分離した 2 つの偏波成分に対してそれぞれ非線形光学素子からなる位相感应光増幅器 3 6 3、3 6 4 で光増幅を行った後、P B S 3 6 5 で再度合波する。後述するように、偏波多重信号光を伝送する光伝送システムの送信信号である P D M 信号は、直交する偏波間で別々の異なるデータに基づき独立に変調される。P D M 信号は、それぞれのデータに対応した光変調信号を P B S で合波することで生成できる。

## 【 発明の概要 】

## 【 発明が解決しようとする課題 】

## 【 0 0 2 2 】

しかしながら、従来技術の偏波多重信号光を伝送する光伝送システムでは、以下に述べるような光送信器における偏波状態の不安定性に起因する問題があった。主信号光およびその位相共役光からなる対を用い、非縮退のパラメトリック増幅による P S A を利用する

10

20

30

40

50

ためは、すべての対に対して直交する偏波成分のそれぞれにおいて位相同期条件が満たされる必要がある。図10のような従来技術の光伝送システムの光送信器351における偏波多重信号の生成方法では、偏波ダイバシティ構成の位相感応光増幅器352で増幅動作が不安定になる問題があった。

#### 【0023】

再び図10を参照して光送信器の構成を概観すると、光送信器351は、2つの主信号光 - 位相共役光の対を生成する2つの信号アーム（ルート）から構成される。信号光源353からの搬送波光は光カプラ354等で分岐され、2つの光変調器355、356において異なるデータ信号により搬送波光を変調し、2つの主信号光を生成される。その後、2つの差周波発生器357、358においてそれぞれの位相共役光を生成する。一方の差周波発生器358からの主信号光 - 位相共役光の対の偏波を偏波回転子359で90°回転し、直交した主信号光 - 位相共役光の対366が得られる。直交した偏波の2つの対が、PBS360によって合波され、PDM信号367が出力される。光送信器351からのPDM信号367は、伝送路である光ファイバ361中で偏波が回転する。偏波回転を受けたPDM信号368が偏波ダイバシティ構成352に入力されると、初段のPBS362の2つの偏波軸に対して射影された光電界成分に分岐される。つまり、元の2つの直交する偏波成分がそれぞれ混ざった状態で非線形光学素子363、364に入射される。

#### 【0024】

図11は、従来技術のPDM光の光伝送システムにおける偏波の状態を概念的に説明する図である。図11の(a)は、光送信器351の出力のA点におけるPDM信号367の直交する2つの偏波を示している。横軸をs偏光（偏光）状態とすれば縦軸はp偏光（偏光）状態を示す。図11の(b)は、光ファイバ361を伝送後のB点でのPDM信号368の偏波状態を示し、光送信器351の出力点AのPDM信号367に対して、光ファイバの全体で累積的に生じる偏波回転が加えられている。図11の(c)は、初段のPBS362によって偏波分離された後のC1点およびC2点での各偏波軸の電界成分を示している。B点でのPDM信号の各偏波成分が、PBS362の2つの軸へ射影した成分が混ざった状態で分離される。

#### 【0025】

独立した位相感応光増幅を行う位相感応光増幅器363、364では、図6に示したような位相同期の構成により出力の一部をモニタし、その出力が最大になるように励起光と信号光の相対位相を調整するようにフィードバックを掛ける。偏波ダイバシティ構成352では、図11の(c)のように2つの直交する偏波成分がそれぞれ混ざった状態で入射される。2つの直交する偏波成分に対して、各位相感応光増幅器で、同時に位相感応光増幅条件が安定して満たされていないと、光増幅後のPDM信号を安定化できない。

#### 【0026】

図11の(c)のように2つの偏波の成分が混ざっている状態自体は、偏波ダイバシティ構成352においては問題ない。しかしながら、B点で受信されるPDM信号の偏波状態が揺らぐと、位相感応光増幅器の出力も不安定化してしまう。ここで、光伝送路上で生じる偏波状態のゆらぎは対象としない。問題となるのは、光送信器351内でPDM信号を生成する際の、2つの直交する偏波成分の偏波位相の揺らぎである。

#### 【0027】

光送信器351は、通常、光源、光半導体素子、光学部品、およびこれらを相互に接続する偏波保持ファイバなどから構成される。さらに、これらの要素部品を制御するための制御回路、装置内外のインタフェース回路、電源などを含んだモジュール構成が採られる。このような装置内では、装置の動作状態や環境温度の変化によって、内部温度が不均一に分布し、その分布も刻々と変化し得る。また装置外の環境や運用状態によっては、外部からの振動が装置内の部品間の接続光ファイバや光学部品に加わることもある。図10で説明したように光送信器内では、別々の差周波発生器（二次非線形光学素子）357、378によって2つの信号アームで信号光群が生成され、PBSにより偏波多重されるが、この2つの信号アームでは、それぞれ独立して温度変化や振動などによって影響を受け得

10

20

30

40

50

る。したがって、2つの信号アームによって信号光、位相共役光およびパイロット光の位相も異なる態様で変動し得る。さらに、2つの差周波発生器へ供給される励起光の位相も、異なる態様で変動し得る。偏波多重光を生成する2つのアーム間で位相条件が別個に変動することで、2つの偏波間の相対位相も、周期的にまたは不定期に、刻々と変動し揺らぎが生じる。このように、PDM信号が、光送信器における2つの信号光アーム間の相対位相のゆらぎを持っていると、光ファイバ361を伝送した後の、偏波ダイバシティ構成において位相感応光増幅動作に直接影響を与えることになる。

【0028】

図11の(c)を参照すれば、偏波ダイバシティ構成では、2つの偏波成分が混在した形態でPBSにより分離され、混在した2つの偏波成分がそれぞれの光感応増幅器に入力される。したがって、PDM信号が形成される光送信器において2つの偏波間で信号光群の相対位相が異なっていれば、1つの光感応増幅器内で図7および式(1)で示した位相感応光増幅のための位相条件を満たすことはできない。偏波多重された後では光ファイバによって受ける位相変化は、2つの偏波間で同一変化を受けることから相対位相の変化は小さい。一方、光送信器において発生する2つの偏波間の相対位相の変動・ゆらぎは、より直接的であって、光送信器351と偏波ダイバシティ構成352との間でリアルタイムに影響する。このように光送信器から出力されるPDM信号の質の揺らぎ自体が、偏波ダイバシティ構成352の位相感応光増幅器363, 364からの出力を不安定化してしまう問題があった。図10に示したようなPDM信号の光送信器351で、偏波多重された主信号 位相共役光の対を、従来技術の構成で安定して生成することはできなかった。

【0029】

本発明は、このような問題に鑑みてなされたものでその目的とするところは、直交する偏波間の位相の変動を抑えたPDM信号を生成する光送信器を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0030】

本発明は、このような目的を達成するために、請求項1に記載の発明は、連続(CW)光を出力する信号光源と、前記CW光を分岐する手段と、分岐された前記CW光の一方を変調して第1の主信号光を出力する第1の変調器と、前記第1の主信号光に対する第1の位相共役光を生成し、第1の主信号光 位相共役光の対を出力する第1の二次非線形光学素子と、分岐された前記CW光の他方を変調して第2の主信号光を出力する第2の変調器と、前記第2の主信号光に対する第2の位相共役光を生成し、第2の主信号光 位相共役光の対を出力する第2の二次非線形光学素子と、前記第1の主信号光 位相共役光の対および前記第2の主信号光 位相共役光の対を偏波多重し、偏波多重光を出力する偏波合成手段と、基本波光を出力する局部発振光源と、前記基本波光に基づいて、前記第1の二次非線形光学素子および前記第2の二次非線形光学素子で位相共役光を生成するための励起光を生成する第3の二次非線形光学素子と、前記基本波光の一部であって、前記CW光とともに前記第1の変調器に入力され、前記第1の二次非線形光学素子を透過する第1のパイロット光の位相と、前記基本波光の一部であって、前記CW光とともに前記第2の変調器に入力され、前記第2の二次非線形光学素子を透過する第2のパイロット光の位相とを同期させる位相調整機構とを備えたことを特徴とする光送信器である。

【0031】

請求項2に記載の発明は、請求項1の光送信器であって、前記位相調整機構は、前記透過した第1のパイロット光のレベルを検出して、前記第1のパイロット光および前記第1の主信号光の位相を調整する第1のフィードバック回路と、前記透過した第2のパイロット光のレベルを検出して、前記第2のパイロット光および前記第2の主信号光の位相を調整する第2のフィードバック回路と、前記透過した第1のパイロット光および前記透過した第2のパイロット光のレベルを検出して、前記パイロット光の一方の位相を調整する第3のフィードバック回路とを含むことを特徴とする(実施形態1に相当)。

【0032】

請求項3に記載の発明は、請求項1の光送信器であって、前記CW光を分岐する手段は

10

20

30

40

50

、前記信号光源からの前記CW光が入力される第1の入力と、前記局部発振光源からの前記基本波光が入力される第2の入力と、前記CW光の前記一方およびこれに直交する前記第1のパイロット光を出力する第1の出力と、前記CW光の前記他方およびこれに直交する前記第2のパイロット光を出力する第2の出力とを有する偏波分離手段であり、前記位相調整機構は、前記偏波合成手段によって合成された前記透過した第1のパイロット光および前記透過した第2のパイロット光のレベルを検出して、前記励起光の一方の位相を調整するフィードバック回路を含むことを特徴とする（実施形態2に相当）。

【0033】

請求項4に記載の発明は、連続(CW)光を出力する信号光源と、前記CW光を分岐する手段と、分岐された前記CW光の一方を変調して第1の主信号光を出力する第1の変調器と、前記第1の主信号光に対する第1の位相共役光を生成し、第1の主信号光位相共役光の対を出力する第1の二次非線形光学素子と、分岐された前記CW光の他方を変調して第2の主信号光を出力する第2の変調器と、前記第2の主信号光に対する第2の位相共役光を生成し、第2の主信号光位相共役光の対を出力する第2の二次非線形光学素子と、前記第1の主信号光位相共役光の対および前記第2の主信号光位相共役光の対を偏波多重し、偏波多重光を出力する偏波合成手段と、基本波光を出力する局部発振光源と、前記基本波光に基づいて、前記第1の二次非線形光学素子および前記第2の二次非線形光学素子で位相共役光を生成するための励起光を生成する第3の二次非線形光学素子と、前記第1の位相共役光を生成した前記第1の二次非線形光学素子における前記励起光の位相と、前記第2の位相共役光を生成した前記第2の二次非線形光学素子における前記励起光の位相とを同期させる位相調整機構とを備えたことを特徴とする光送信器である。

【0034】

請求項5に記載の発明は、請求項4の光送信器であって、前記位相調整機構は、前記第1の二次非線形光学素子から分離された第1の励起光および前記第2の二次非線形光学素子から分離された第2の励起光を合波する光カプラと、前記光カプラの出力レベルを検出して、前記励起光の一方の位相を調整するフィードバック回路とを含むことを特徴とする（実施形態3に相当）。

【0035】

請求項6に記載の発明は、請求項4の光送信器であって、前記基本波光を分岐する光カプラと、前記分岐された基本波光の一方が入力される前記第3の二次非線形光学素子に加え、前記分岐された基本波光の他方が入力され、前記第1の二次非線形光学素子および前記第2の二次非線形光学素子のいずれかで位相共役光を生成するための励起光を生成する第4の二次非線形光学素子とをさらに備え、前記位相調整機構は、前記第1の二次非線形光学素子から分離された第1の励起光および前記第2の二次非線形光学素子から分離された第2の励起光合波する光カプラと、前記光カプラの出力レベルを検出して前記基本波光の一方の位相を調整するフィードバック回路とを含むことを特徴とする（実施形態4に相当）。

【0036】

請求項7に記載の発明は、請求項1乃至5いずれかの光送信器であって、前記第1の二次非線形光学素子、前記第2の二次非線形光学素子および前記第3の二次非線形光学素子は、それぞれ直接接合リッジ導波路を含み、前記直接接合リッジ導波路は、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{KNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ 、 $\text{LiNb}_{(x)}\text{Ta}_{(1-x)}\text{O}_3$  ( $0 < x < 1$ )、または $\text{KTiOPo}_4$ のいずれかの材料から構成されるか、または、当該材料のいずれかにMg、Zn、Sc、Inからなる群から選ばれた少なくとも一種を添加物として加えた材料から構成されることを特徴とする。

【0037】

請求項8に記載の発明は、請求項1乃至7いずれかに記載の光送信器と、前記光送信器からの前記偏波多重光の搬送波位相に同期した基本波光を出力する局部発振光源を備え、前記偏波多重光を2つの偏波成分に分離し、非線形光学素子によって前記2つの偏波成分をそれぞれ光増幅し、光増幅された2つの偏波成分を再合波する偏波ダイバシティ構成を

10

20

30

40

50

有する位相感応光増幅器とを備えたことを特徴とする光伝送システムである。

【発明の効果】

【0038】

本発明により直交する偏波間の相対位相の変動ゆらぎを抑えた光送信器を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【0039】

【図1】図1は、本発明の実施形態1の光送信器の構成を示す図である。

【図2】図2は、本発明の実施形態2の光送信器の構成を示す図である。

【図3】図3は、本発明の実施形態3の光送信器の構成を示す図である。

【図4】図4は、本発明の実施形態4の光送信器の構成を示す図である。

【図5】図5は、従来技術のPSAの基本的な構成を示す図である。

【図6】図6は、PPLN導波路を用いた従来技術のPSAの構成を示す図である。

【図7】図7は、PSAの入力信号光励起光間位相差 - 利得の関係を示す図である。

【図8】図8は、信号光対を用いた従来技術の非縮退型PSA構成を示す図である。

【図9】図9は、非縮退型PSAの各部の光の波長軸上での関係を示す図である。

【図10】図10は、従来技術の偏波多重信号の光伝送システムを示す図である。

【図11】図11は、PDM光伝送システムの各部の偏波状態を説明する図である。

【発明を実施するための形態】

【0040】

本発明の光送信器では、信号光、その位相共役光、励起光、パイロット信号などの各信号において、直交する偏波間の位相差を安定化させる構成が提示される。PDM信号を生成する光送信器で、1つの主信号光およびその位相共役光の1対からなるPDM信号に対する構成（実施形態1、2）と、複数の対からなる波長多重化された信号群のPDM信号に対する構成（実施形態3、4）が開示される。2つの直交する偏波に対応し、各々が二次非線形光学素子を含む2つの信号アーム間で、信号光群の相対位相のドリフトを安定化させる。2つの信号アーム間の相対位相は、信号光群と同送するパイロット信号を検出して、信号光群の位相を調整する位相調整機構によって調整される。励起光の位相を調整する位相調整機構や、励起光を生成する基本波光の位相を調整する位相調整機構を採ることもできる。本発明の光送信器は、中継型の偏波ダイバシティ構成を持つ位相感応光増幅器と組み合わせた光伝送システムも提供する。以下、複数の実施形態とともに、本発明の光送信器の詳細な構成および動作を説明する。

【0041】

[実施形態1]

図1は、本発明の実施形態1に係る光送信器の構成を示す図である。本実施形態は、主信号光およびその位相共役光の対からなる偏波多重された信号光群を生成するための光送信器の構成を示す。ここで、1つの主信号光およびその位相共役光を対（ペア）と呼ぶ。第1の偏波の第1の対に対して、1つのデータ信号による変調によって、変調された主信号光および位相共役光からなる第1の対が得られる。さらに、第1の偏波に直交する第2の偏波の第2の対に対して、別のデータ信号による変調によって、変調された主信号光および位相共役光からなる第2の対が得られる。第1の偏波の第1の対と、第2の偏波の第2の対が偏波多重化されて、偏波多重信号群が構成される。主信号光の波長および位相共役光の波長の中心位置する波長のパイロット光を重畳し、偏波多重信号光群と同時に送信する。

【0042】

図1の光送信器400は、信号光源401と、光カブラ402、409と、外部変調器403、404と、2つの差周波発生（DFG：Difference Frequency Generation）用の二次非線形光学素子405、406と、偏光ビームスプリッタ（PBS）407と、局部発振光源408と、EDFA410と、バンドパスフィルタ（BPF）411と、SH光発生（SHG）用の二次非線形光学素子412と、SH光の分波器413と、PZT（チタン酸ジルコニウム酸鉛）圧電素子を用いた光ファイバ伸縮器414～416と、分波

10

20

30

40

50

器 4 1 7 ~ 4 1 9 と、光検出器 4 2 1 ~ 4 2 3 と、偏光子 4 2 8 と、位相同期ループ ( P L L ) 回路 4 2 5 ~ 4 2 7 とを備えている。これらのうち、光ファイバ伸縮器と分波器と光検出器と位相同期ループ回路かなる 3 つのループは、それぞれ位相調整機構を構成している。

【 0 0 4 3 】

光送信器 4 0 0 において、局部発振光源 4 0 8 から出力された連続波光 ( C W 光 ) は、光カプラ 4 0 9、4 0 2 により 3 つの光に分波され、それぞれ基本波光 4 4 1、第 1 のパイロット光 4 4 2、第 2 のパイロット光 4 4 3 として用いる。E D F A 4 1 0 は、基本波光 4 4 1 を増幅する。B P F 4 1 1 は、E D F A 4 1 0 によって発生したノイズ光を排除し、増幅された基本波光のみを透過させる。

10

【 0 0 4 4 】

S H 光発生用の二次非線形光学素子 4 1 2 は、P P L N 導波路および出力側のダイクロイックミラーを含む。B P F 4 1 1 を透過した基本波光が二次非線形光学素子 4 1 2 に入射すると、P P L N 導波路により基本波光の半分の波長 ( 2 倍の周波数 ) の S H 光が発生し、ダイクロイックミラーにより基本波光と S H 光とが分離される。S H 光の分波器 4 1 3 により 2 分岐された第 1 の S H 光 4 4 6 および第 2 の S H 光 4 4 7 を、それぞれ励起光として、第 1 の差周波発生差周波発生 ( D F G ) 用の二次非線形光学素子 4 0 5 および第 2 の D F G 用の二次非線形光学素子 4 0 6 に入射する。

【 0 0 4 5 】

信号光源 4 0 1 は、局部発振光源 4 0 8 とは波長が異なる連続波光 ( C W 光 ) を出力し、分波器 4 0 2 により 2 つの連続波光 4 4 4、4 4 5 に分岐される。外部変調器 4 5 1、4 5 2 は、2 分岐された信号光源のそれぞれの連続波光 4 4 4、4 4 5 に対して、送信データ 4 5 1、4 5 2 に応じた 1 6 Q A M 変調を施す。信号光源 4 0 1 からの 2 つの連続波光 4 4 4、4 4 5 は、光カプラ 4 0 2 により第 1 のパイロット光 4 4 2、第 2 のパイロット光 4 4 3 とそれぞれ合波されており、D F G 用の二次非線形光学素子 4 0 5、4 0 6 にそれぞれに入力される。

20

【 0 0 4 6 】

D F G 用の二次非線形光学素子 4 0 5、4 0 6 は、それぞれ、入力側のダイクロイックミラーと、P P L N 導波路と、出力側のダイクロイックミラーとを含む。外部変調器 4 5 1 から出力された主信号光 4 4 4 および第 1 のパイロット光 4 4 2 と、二次非線形光学素子 4 1 2 から出力された励起光 4 4 6 とは、D F G 用の二次非線形光学素子 4 0 5 のダイクロイックミラーにより合波され、P P L N 導波路に入射する。これにより、主信号光 4 4 4 と励起光 ( 2 L o ) との差周波光が、D F G 用の二次非線形光学素子 4 0 5 内の P P L N 導波路において発生する。この差周波光が、主信号光 4 4 4 に対する位相共役光となる。励起光 4 4 6 は、基本波光 4 4 1 ( L o ) の 2 倍の周波数となっており、第 1 のパイロット光 4 4 2 は縮退位相感応光増幅により増幅される。ダイクロイックミラーは、主信号光 4 4 4 およびその位相共役光の対並びに第 1 のパイロット光 4 4 2 からなる信号光群と、励起光 ( 2 L o ) とを分離し、信号光群 4 4 8 を出力する。

30

【 0 0 4 7 】

D F G 用の二次非線形光学素子 4 0 6 においても、同様の動作によって信号光群 4 4 9 を出力する。すなわち、外部変調器 4 5 2 から出力された主信号光 4 4 5 および第 2 のパイロット光 4 4 3 と、二次非線形光学素子 4 1 2 から出力された励起光 4 4 7 とは、D F G 用の二次非線形光学素子 4 0 6 のダイクロイックミラーにより合波され、P P L N 導波路に入射する。これにより、主信号光 4 4 5 と励起光 ( 2 L o ) との差周波光が、D F G 用の二次非線形光学素子 4 0 6 内の P P L N 導波路において発生する。この差周波光が、主信号光 4 4 5 に対する位相共役光となる。励起光 4 4 7 は、基本波光 4 4 1 ( L o ) の 2 倍の周波数となっており、第 2 のパイロット光 4 4 3 は縮退位相感応光増幅により増幅される。ダイクロイックミラーは、主信号光 4 4 4 およびその位相共役光の対並びに第 2 のパイロット光 4 4 3 からなる信号光群と、励起光 ( 2 L o ) とを分離し、信号光群 4 4 8 を出力する。

40

50

## 【 0 0 4 8 】

縮退位相感応光増幅された2つの信号光群448、449のうち、一方の信号光群449の偏光を / 2板による偏波回転子429で偏波を回転させる。PBS407によって、偏波回転された信号光群450は信号光群448と偏波多重され、偏波多重信号群453が得られる。本実施形態では、一方の信号光群449の偏波回転のために / 2板を用いたが、光ファイバを90度ひねった状態でPBS407と接続するなどの偏波回転方法を用いても良い。偏波多重信号群453は、光送信器400からのPDM出力として光ファイバ伝送路へ送出される。

## 【 0 0 4 9 】

DFG用の二次非線形光学素子405、406の出力の後には、それぞれその出力の信号光群の一部を分岐する光カプラ417、418が備えられている。パイロット光のみを取り出すBPF423、424を経由して、さらに光検出器420、422によりパイロット光の光強度の変化を検出する。PLL回路425により、ファイバ伸縮器414へフィードバックを行うことで、第1のパイロット光442の出力が最大となるよう、位相感応光増幅前の信号光群の位相調整を行う(第1のフィードバック回路)。同様に、PLL回路427により、ファイバ伸縮器416へフィードバックを行うことで、第2のパイロット光443の出力が最大となるよう、位相感応光増幅前の信号光群の位相調整を行う(第2のフィードバック回路)。

## 【 0 0 5 0 】

光送信器400は、PBS407の出力の後に、偏波多重信号群453の一部を分岐する光カプラ418と、偏光子428がさらに備えられている。偏光子428は、PBS407による第1のパイロット光および第2のパイロット光を偏波合成後の特定の偏波を有するパイロット光について、ある特定の偏波成分のみを透過させるよう動作する。具体的には、第1のパイロット光が縦偏波(0°)の偏光を有し第2のパイロット光が横偏波(90°)の偏光を有する場合、偏波合成後のパイロット光は45°の偏光を有する。偏光子428の角度を、この45°の成分のみが透過するように調整しておく。第1のパイロット光および第2のパイロット光の相対位相が変動すると、偏波合成されたパイロット光の偏波回転が生じる。このため、偏光子428を透過できる出力光の光量が変化し、光検出器421により出力光の光強度の変化を検出する。PLL回路426によりファイバ伸縮器415へフィードバックを行うことで、光送信器400からのPDM信号453の出力が最大になるよう位相調整を行う(第3のフィードバック回路)。

## 【 0 0 5 1 】

このように光ファイバ伸縮器414~416にフィードバックを行い、光送信器400内の温度や振動に起因した、2つの偏波間の信号光、位相共役光、パイロット光および励起光の相対位相のドリフトを光ファイバ伸縮器414~416により補償する。第1のループおよび第2のループによって、2つの直交した偏波のそれぞれにおける信号光、位相共役光パイロット光および励起光の間の位相同期を行い、第3のループによって、2つの直交した偏波間の相対位相を安定化した状態でPDM信号453を送信できる。このため、光ファイバ伝送後の中継器においても、偏波ダイバシティ構成の位相感応光増幅器を安定動作させることができる。

## 【 0 0 5 2 】

本実施形態の光送信器では、それぞれの二次非線形光学素子内の非線形光学媒質として、擬似位相整合が可能なPPLN導波路を用いている。まず、Znを添加したLiNbO<sub>3</sub>上に周期が約17μmの周期的な電極を形成した。次に、電界印加法により上記の電極パターンに応じた分極反転グレーティングをZn:LiNbO<sub>3</sub>中に形成した。次に、この周期分極反転構造を有するZn:LiNbO<sub>3</sub>基板をクラッドとなるLiTaO<sub>3</sub>上に直接接合を行い、500℃で熱処理を行うことにより両基板を強固に接合した。次に、コア層を研磨により5μm程度まで薄膜化し、ドライエッチングプロセスを用いてリッジ型の光導波路を形成した。この導波路はペルチェ素子により温度調整が可能である。導波路の長さを50mmとした。このようにして形成されたPPLN導波路を有する二次非線形光

10

20

30

40

50

学素子を、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の偏波保持ファイバで光の入出力が可能なモジュール構成とした。本実施形態では、Znを添加した $\text{LiNbO}_3$ を用いたが、それ以外の非線形材料である、 $\text{KNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ 、 $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 < x < 1$ )若しくは $\text{KTiOP}_4$ 、又はそれらにMg、Zn、Sc、Inからなる群から選ばれた少なくとも一種を添加物として含有している材料を用いても良い。

#### 【0053】

以上、本実施形態に示した光送信器の構成では、光送信器内の局部発振光源からの出力をパイロット光として信号光群と同送し、2つの直交する偏波の信号光群を偏波多重した偏波多重信号群453を送信することができる。直交する2つの偏波間の相対位相が安定化されているため、中継器での偏波ダイバシティ構成において、位相感応光増幅器を安定動作させることができる。

10

#### 【0054】

また、本実施形態の光送信器では、信号変調フォーマットとして16QAMを用いた例で説明した。しかしながら変調フォーマットは、IMDD、BPSK、QPSK、64QAM、256QAM、より多値度の高いQAMなど任意のフォーマットに対しても、図1の光送信器とまったく同じ構成で励起光を生成できる。本実施形態によれば、多値の変調フォーマットの変調信号を送信することができる。また、本実施形態では信号光は1波のみであったが、複数の変調信号を波長多重したWDM信号を一括して送信することもできる。

#### 【0055】

20

#### [実施形態2]

次に、本発明の実施形態2に係る光送信器について説明する。本実施形態は、主信号光およびその位相共役光との対からなる偏波多重された信号光群を、パイロット光を同送することなく生成する光送信器の構成を示す。

#### 【0056】

図2は、本発明の実施形態2に係る光送信器の構成を示すブロック図である。光送信器500は、信号光源501と、偏波回転子502と、偏光ビームスプリッタ(PBS)503と、外部変調器504、505と、差周波発生(DFG)用の二次非線形光学素子506、507と、第2のPBS508と、局部発振光源509と、光カプラ510と、偏波回転子511と、EDFA512と、バンドパスフィルタ(BPF)513と、SH光発生(SHG)用の二次非線形光学素子514と、SH光の分波器515と、PZT(チタン酸ジルコニウム酸鉛)圧電素子を用いた光ファイバ伸縮器520と、分波器516と、偏光子517と、光検出器518と、PLL回路519とを備えている。これらのうち、光ファイバ伸縮器、分波器、光検出器および位相同期ループ回路は、位相調整機構を構成している。

30

#### 【0057】

光送信器500において、局部発振光源509から出力された連続波光(CW光)は、光カプラ510により2つの光路に分波され、それぞれ基本波光542、パイロット光543として用いる。EDFA512は、基本波光542を増幅する。BPF513は、EDFA512で発生したノイズ光を排除し、増幅された基本波光のみを透過させる。

40

#### 【0058】

SHG用の二次非線形光学素子514は、PPLN導波路と、出力側のダイクロイックミラーを含む。BPF513を透過した基本波光が二次非線形光学素子514に入射すると、PPLN導波路により基本波光の半分の波長(2倍の周波数)のSH光が発生し、ダイクロイックミラーにより基本波光とSH光とが分離される。SH光の分波器515により2分岐された第1のSH光546および第2のSH光547を、それぞれ励起光として、DFG用の二次非線形光学素子506、507へ入射する。

#### 【0059】

信号光源501は、局部発振光源509とは波長が異なる連続波光(CW光)を出力し、偏光子502およびPBS503によって、直交する偏波の2つのCW光540、54

50

1 に分岐される。局部発振光源 5 0 9 からのパイロット光 5 4 3 は、偏光子 5 1 1 を通過させた後、同じ P B S 5 0 3 の他方の入力ポートより入力し、直交する偏波の 2 のパイロット光 5 4 4、5 4 5 に分岐させる。これにより、波長の異なる信号光 5 4 0 およびパイロット光 5 4 4 は直交した偏波状態で合波され、外部変調器 5 0 4 へ出力される。同様に、信号光 5 4 1 およびパイロット光 5 4 5 も直交した偏波状態で合波され、外部変調器 5 0 5 へ出力される。外部変調器 5 0 4、5 0 5 は、2 分岐された信号光源の出力光 5 4 0、5 4 1 に対して、それぞれ送信データ 5 5 1、5 5 2 に応じた 1 6 Q A M 変調を施す。外部変調器 5 0 4、5 0 5 は、一般に偏波依存性を有しており、信号光に対して偏波の直交しているパイロット光 5 4 4、5 4 5 に対しては変調が施されない。外部変調器のタイプによっては、パイロット光にも変調が施されるが、本来の信号光への駆動偏波に比べれば変調度は小さく、パイロット光の C W 光の成分が残存する。

10

#### 【 0 0 6 0 】

外部変調器 5 0 4、5 0 5 で変調を施された信号光および C W 光のパイロット光は、D F G 用の二次非線形光学素子 5 0 6、5 0 7 にそれぞれ入力される。D F G 用の二次非線形光学素子 5 0 6、5 0 7 は、それぞれ、入力側のダイクロイックミラーと、P P L N 導波路と、出力側のダイクロイックミラーとを含む。信号光およびパイロット光と、二次非線形光学素子 5 1 4 から出力された励起光 5 4 6 とは、二次非線形光学素子 5 0 6 内のダイクロイックミラーにより合波され、P P L N 導波路に入射する。これにより、主信号光 5 4 0 と励起光 ( 2 L o ) 5 4 6 との差周波光が、二次非線形光学素子 5 0 6 内の P P L N 導波路において発生する。この差周波光が、主信号光 5 4 0 に対する位相共役光となる。一方で、P P L N 導波路は一般に偏波依存性を有しており、信号光と偏波の直交しているパイロット光 5 4 4 に対しては相互作用が起こらないため、二次非線形光学素子 5 0 6 内の P P L N 導波路中をそのまま透過する。ダイクロイックミラーは、主信号光および位相共役光の対並びにパイロット光と、励起光 5 4 6 とを分離し、信号光群 5 4 8 を出力する。

20

#### 【 0 0 6 1 】

D F G 用の二次非線形光学素子 5 0 7 においても、同様の動作によって信号光群 5 4 9 を出力する。すなわち、信号光およびパイロット光と、二次非線形光学素子 5 1 4 から出力された励起光 5 4 7 とは、二次非線形光学素子 5 0 7 内のダイクロイックミラーにより合波され、P P L N 導波路に入射する。これにより、主信号光 5 4 1 と励起光 ( 2 L o ) 5 4 7 との差周波光が、二次非線形光学素子 5 0 7 内の P P L N 導波路において発生する。この差周波光が、主信号光 5 4 1 に対する位相共役光となる。信号光 5 4 1 と偏波の直交しているパイロット光 5 4 5 に対しては相互作用が起こらないため、二次非線形光学素子 5 0 7 内の P P L N 導波路中をそのまま透過する。ダイクロイックミラーは、主信号光および位相共役光の対並びにパイロット光と、励起光 5 4 7 とを分離し、信号光群 5 4 9 を出力する。

30

#### 【 0 0 6 2 】

2 つの信号光群 5 4 8、5 4 9 の内、一方の信号光群 5 4 9 の偏光を  $\lambda/2$  板等の偏波回転子 5 2 2 を用いて再度  $90^\circ$  偏波回転させる。P B S 5 0 8 によって、信号光群 5 4 8 および偏波回転した信号光群 5 5 0 を偏波多重する。偏波多重された偏波多重信号光群 5 5 4 が生成され、光送信器の P D M 出力として、光ファイバに送出される。

40

#### 【 0 0 6 3 】

前述のように主信号光 5 4 0 とパイロット光 5 4 4 とは偏波が直交している。同様に、主信号光 5 4 1 とパイロット光 5 4 5 とは偏波が直交している。したがって、パイロット光 5 4 4、5 4 5 は、主信号光および位相共役光の対を出力した P B S 5 0 8 のポートとは別のポートから合成されたパイロット信号 5 5 3 として出力される。光送信器の P D M 出力 5 5 4 にはパイロット信号は含まれておらず、これによって本実施形態の光送信器 5 0 0 はパイロット信号を同送しない構成となる。合成されたパイロット信号 5 5 3 の後には、光検出器 5 1 6 および偏光子 5 1 7 がさらに備えられている。偏光子 5 1 7 は、実施形態 1 と同様に、第 1 のパイロット光および第 2 のパイロット光の位相変動に応じて、偏

50

光子 5 1 7 の透過できる光量を変化させるように動作する。光検出器 5 1 8 によりパイロット信号の光強度の変化を検出する。PLL回路 5 1 9 によりファイバ伸縮器 5 4 9 へフィードバックを行うことによって、光検出器 5 1 8 の検出強度が最大となるように位相調整を行う。

【 0 0 6 4 】

このように一方の信号光群 5 4 9 の経路に配置された光ファイバ伸縮器 5 2 0 にフィードバックを掛けて、温度や振動による光送信器内の 2 つの偏波間のパイロット光の相対位相のドリフトを、光ファイバ伸縮器 5 4 9 により補償することができる。パイロット光を検出して、偏波多重する信号光群の一方の信号アームの位相を調整することで、2 つの直交した偏波間の相対位相を安定化した状態で偏波多重信号を送信できる。光ファイバ伝送後の中継器においても、偏波ダイバシティ構成の位相感応光増幅器を安定動作させることができる。

10

【 0 0 6 5 】

本実施形態に示した光送信器では、光送信器内の局部発振光源からのパイロット光を同送することなく偏波多重した信号光群を送信することができる。光送信器側において、偏波間の位相が安定化されているため、中継器での偏波ダイバシティ構成の位相感応光増幅器を安定動作させることができる。

【 0 0 6 6 】

本実施形態では、信号変調フォーマットとして 1 6 Q A M を用いた例を説明した。変調フォーマットは、I M D D、B P S K、Q P S K、6 4 Q A M、2 5 6 Q A M、より多値度の高い Q A M など、任意のフォーマットに対しても、本実施形態の光送信器とまったく同じ構成で励起光を生成できる。本実施形態の光送信器によれば、多値の変調フォーマットの変調信号を送信することができる。また、本実施形態では信号光は 1 波のみであったが、複数の変調信号を波長多重した W D M 信号を一括して送信することもできる。

20

【 0 0 6 7 】

[ 実施形態 3 ]

次に、本発明の実施形態 3 に係る光送信器について説明する。本実施形態は、位相共役光を生成するための励起光の位相を安定化させることによって、主信号光および位相共役光の複数の対からなる信号光群を偏波多重した偏波多重信号光群に対し、偏波間の位相を安定化させる構成を示す。実施形態 1 ~ 2 では、主信号光およびその位相共役光からなる 1 対（主信号光 位相共役光対）を送信する光送信器の構成例を示した。実施形態 3 および次の実施形態 4 では、波長多重（W D M）された主信号光およびそれぞれの位相共役光からなる複数の対を含む信号光群を、さらに偏波多重した偏波多重信号を送信する光送信器の構成例を示す。

30

【 0 0 6 8 】

図 3 は、本発明の実施形態 3 に係る光送信器の構成を示すブロック図である。光送信器 6 0 0 は、複数の信号光源 6 0 1 と、複数の光カプラ 6 0 2 と、複数の外部変調器 6 0 3 と、波長合波器 6 0 5、6 0 6 と、差周波発生（D F G）用の二次非線形光学素子 6 0 7、6 0 8 と、偏波回転子 6 0 9 と、偏光ビームスプリッタ（P B S）6 1 0 と、を備える。光送信器 6 0 0 は、局部発振光源 6 1 1 と、E D F A 6 1 2 と、バンドパスフィルタ（B P F）6 1 3 と、S H 光発生（S H G）用の二次非線形光学素子 6 1 4 と、光分岐 6 1 5 と、P Z T 圧電素子を用いた光ファイバ伸縮器 6 2 0 と、第二高調波光の光カプラ 6 1 6 と、光検出器 6 1 7 と、PLL回路 6 1 9 とをさらに備えている。これらのうち、光ファイバ伸縮器 6 2 0、光カプラ 6 1 6、光検出器 6 1 8 および PLL回路 6 2 0 は、位相調整機構を構成している。

40

【 0 0 6 9 】

局部発振光源 6 1 1 から出力された連続波光（C W 光）は、基本波光として用いる。E D F A 6 1 2 は、基本波光を増幅する。B P F 6 1 3 は、E D F A 6 1 2 によって発生したノイズ光を排除し、増幅された基本波光のみを透過させる。

【 0 0 7 0 】

50

S H G用の二次非線形光学素子614は、P P L N導波路と、出力側のダイクロイックミラーとを含む。B P F 613を透過した基本波光が二次非線形光学素子614に入射すると、P P L N導波路により基本波光の半分の波長(2倍の周波数)のS H光が発生し、ダイクロイックミラーにより基本波光およびS H光が分離される。S H光は、光カプラ616により2分岐され、一方のS H光を第1の励起光642として、他方のS H光を第2の励起光643として、D F G用の二次非線形光学素子607、608へそれぞれに入射する。

#### 【0071】

複数の信号光源601は、それぞれ波長異なる連続波光(C W光)を出力し、複数の光カプラ602により光パワーをほぼ半分にして分岐される。複数の外部変調器603により、2分岐された複数の信号光源601からのそれぞれの出力光の一方に対して送信データ650に応じた変調を施す。ここで、送信データ650は簡略化して描いているが、各変調器において、対応するC W光に対して、異なるデータによって独立に変調することができる。波長合波器605によって、複数の外部変調器603の各々から出力された変調光の波長多重化を行い、波長多重された主信号光640が得られる。2分岐された複数の信号光源601からのそれぞれの出力光の他方に対しても、同様に、波長多重された主信号光641が得られる。

#### 【0072】

波長多重された主信号光640は、D F G用の二次非線形光学素子607に入力される。D F G用の二次非線形光学素子607は、入力側のダイクロイックミラーと、P P L N導波路と、出力側のダイクロイックミラーとを含む。主信号光640および二次非線形光学素子614から出力された励起光642は、ダイクロイックミラーにより合波され、P P L N導波路に入射する。二次非線形光学素子607のP P L N導波路において、主信号光640と励起光642との差周波光が発生する。この差周波光は、主信号光640に対する位相共役光となる。二次非線形光学素子607の出力側のダイクロイックミラーにより、主信号光および各々の位相共役光からなる複数の対(主信号光 位相共役光)からなる信号光群646と、二次非線形光学素子614からの励起光が分離され、励起光644が出力される。

#### 【0073】

波長多重された主信号光641について、D F G用の二次非線形光学素子608に入力される。主信号光641および二次非線形光学素子614から出力された励起光643は、ダイクロイックミラーにより合波され、P P L N導波路に入射する。二次非線形光学素子608のP P L N導波路において、主信号光641と励起光643との差周波光が発生する。この差周波光は、主信号光641に対する位相共役光となる。二次非線形光学素子606の出力側のダイクロイックミラーにより、主信号光641および各々の位相共役光からなる複数の対(主信号光 位相共役光)を含む信号光群647と、二次非線形光学素子614からの励起光が分離され、励起光645が出力される。

#### 【0074】

D F G用の二次非線形光学素子607、608から出力された2つの信号光群646、647の内、一方の信号光群647の偏光を / 2板等の偏波回転子609を用いて偏波回転させる。偏波回転された信号光群648は、P B S 610によって、信号光群646と偏波多重される。偏波多重された信号光群は、光送信器600のP D M出力649として光ファイバへ送出される。

#### 【0075】

D F G用の二次非線形光学素子607、608から分離された励起光644、645は、励起光(S H光)用の光カプラ616により合波される。2つの励起光644、645の位相差に応じて、光カプラ616からの出力は変動し、光検出器618によりその変動を検出する。P L L回路619によりファイバ伸縮器620へフィードバックを行うことで、励起光用の光カプラ616からの出力が最大になるように励起光の位相調整を行う。

#### 【0076】

10

20

30

40

50

このように光ファイバ伸縮器 620 にフィードバックを行い、温度や振動による、光送信器内の 2 つの励起光 642、643 の間の相対位相のドリフトを光ファイバ伸縮器 620 により補償できる。光送信器側において 2 つの偏波間の相対位相が安定化されているため、中継器においても、偏波ダイバシティ構成の位相感応光増幅器を安定動作させることができる。

【0077】

上述のように、図 3 の本実施形態の光送信器では、パイロット光を同送することなく波長多重化された複数の主信号光 (WDM 信号) をさらに偏波多重した PDM 信号を送信することができる。光送信器内の直交する 2 つの偏波間の励起光の位相が調整され、光送信器の 2 つの信号光アーム間で相対位相が安定化されているため、中継器においても、偏波ダイバシティ構成の位相感応光増幅器を安定動作させることができる。

10

【0078】

[実施形態 4]

最後に本発明の実施形態 4 に係る光送信器について説明する。本実施形態は、実施形態 3 のように位相共役光を生成するための励起光の位相を安定化させる代わりに、基本波光の位相を安定化させる構成を提示する。実施形態 3 と同様に、主信号光および位相共役光の複数の対からなる信号光群を、さらに偏波多重した偏波多重信号光に対し、偏波間の位相を安定化させる構成の光送信器を提示する。

【0079】

図 4 は、本発明の実施形態 4 に係る光送信器の構成を示すブロック図である。図 4 の光送信器 700 は、偏波多重光を生成する基本的な構成については図 3 の実施形態 3 の光送信器 600 と概ね同一であって、相違点のみを説明する。図 3 の光送信器と比較すれば、局部発振光源 711 から出力された連続波光 (CW 光) から、第 1 の DFG 用の二次非線形光学素子 707 および第 2 の DFG 用の二次非線形光学素子 708 へ供給する励起光 742、743 の生成方法において相違する。また、分離した励起光に基づいてフィードバックを掛ける、ファイバ伸縮器 723 の位置も相違する。

20

【0080】

図 4 の光送信器 700 では、局部発振光源 711 からの CW 光は、光カプラ 712 によって 2 つに分岐され、分岐された CW 光をそれぞれ基本波光として用いる。したがって、各 CW 光に対して、EDFA 713、714、BPF 715、716 を備え、増幅された 2 つの基本波光は SH 光発生 (SHG) 用の二次非線形光学素子 717、718 にそれぞれ入射する。SHG 用の二次非線形光学素子 717、718 から、それぞれ、DFG 用の二次非線形光学素子 707、708 へ励起光 742、743 が供給される。

30

【0081】

位相共役光を生成した後で DFG 用の二次非線形光学素子 707、708 から分離された励起光 744、745 は、SH 光用の光カプラ 719 で合波される。2 つの励起光 744、745 の位相差に応じて、光カプラ 716 からの出力は変動し、光検出器 721 によりその変動を検出する。PLL 回路 722 により、光カプラ 712 出力一方の分岐経路上にあるファイバ伸縮器 623 へフィードバックを行うことで、励起光用の光カプラ 719 からの出力が最大になるように 2 つの偏波間の基本波光で位相調整を行う。すなわち、光ファイバ伸縮器 723、光カプラ 719、光検出器 720 および PLL 回路 722 は、位相調整機構を構成している。

40

【0082】

このように光ファイバ伸縮器 723 にフィードバックを行い、温度変動や振動による、光送信器内の 2 つの励起光 744、745 の間の相対位相のドリフトを光ファイバ伸縮器により補償できる。光送信器側において、直交する 2 つの偏波間の相対位相のドリフトが安定化されているため、中継器での偏波ダイバシティ構成の位相感応光増幅器を安定動作させることができる。

【0083】

上述のように、図 4 の本実施形態の光送信器では、パイロット光を同送することなく波

50

長多重化された複数の主信号光(WDM信号)をさらに偏波多重したPDM信号を送信することができる。光送信器内において、直交する2つの偏波間で励起光の位相調整が行われ、光送信器の2つの信号光アーム間で相対位相が安定化されているため、中継器においても偏波ダイバシティ構成の位相感応光増幅器を安定動作させることができる。

【0084】

上述の実施形態1~実施形態4で用いた二次非線形光学素子を構成するリッジ導波路の材料は一例にすぎない。すなわち、リッジ導波路は、LiNbO<sub>3</sub>、KNbO<sub>3</sub>、LiTaO<sub>3</sub>、LiNb<sub>(x)</sub>Ta<sub>(1-x)</sub>O<sub>3</sub>(0<x<1)、またはKTiOPO<sub>4</sub>のいずれかの材料から構成されるか、または、当該材料のいずれかにMg、Zn、Sc、Inからなる群から選ばれた少なくとも一種を添加物として加えた材料から構成されても良い。

10

【0085】

上述の各実施形態の光送信器と、偏波ダイバシティ構成を持つ位相感応光増幅器とを組み合わせれば、光伝システムを構成できる。例えば、図10や、非特許文献5~7等に見られたような偏波ダイバシティ構成を有する位相感応光増幅器と組み合わせることができる。すなわち位相感応光増幅器は、実施形態1~4いずれかの光送信器からの偏波多重光の搬送波位相に同期した基本波光を出力する局部発振光源を備え、偏波多重光の偏波成分を2つに分離し、非線形光学素子によって前記2つの偏波成分をそれぞれ光増幅し、光増幅された2つの偏波成分を再合波する偏波ダイバシティ構成を有するものであれば良い。

【産業上の利用可能性】

【0086】

20

本発明は、一般に通信システムに利用することができる。特に、光伝送システムにおける光送信器に利用できる。

【符号の説明】

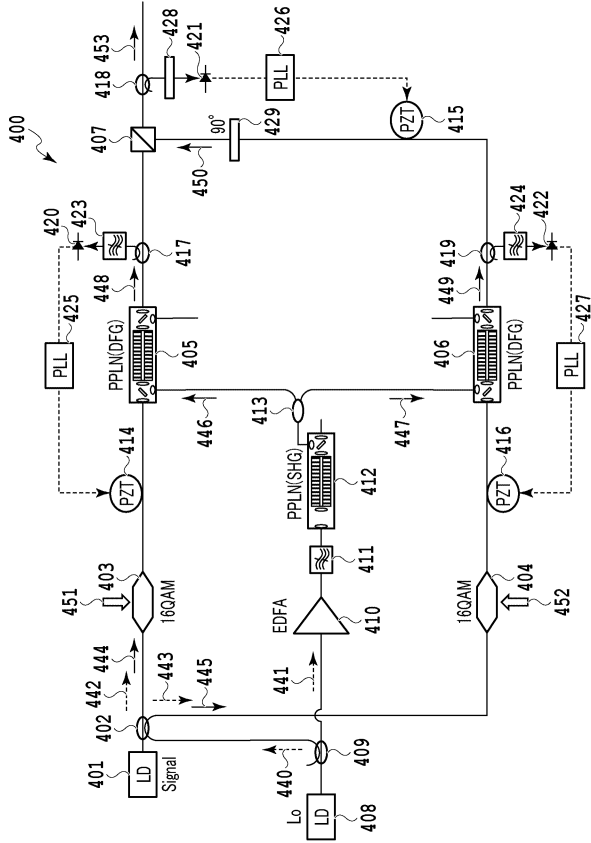
【0087】

- 100、200、302、352 位相感応光増幅器(PSA)
- 102 励起光源
- 103 励起光位相制御部
- 201、308、321、410、512、612、713、714 EDFA
- 202、204、306、311、323、324、363、364、405、406、412、406、507、514、607、608、614、707、708、717、718 二次非線形光学素子
- 206、328、414~416、520、620、723 光ファイバ伸長器
- 207、361 光ファイバ
- 208、326、421~423、518、618、721 光検出器
- 209、327、425~427、519、619、722 PLL回路
- 301、351、400、500、600、700 光送信器
- 303、353、401、501、601、701 信号光源
- 304、355、356、403、404、504、505、603、604、703、704 外部変調器
- 305、605、606、705、706 波長合波器
- 307、408、509、611、711 局部発振光源
- 309、322、411、423、434、513、613、715、716 BPF
- 360、362、365、407、503、508、610、710 PBS
- 428、502、511、517 偏光子
- 429、522、609、709 偏波回転子

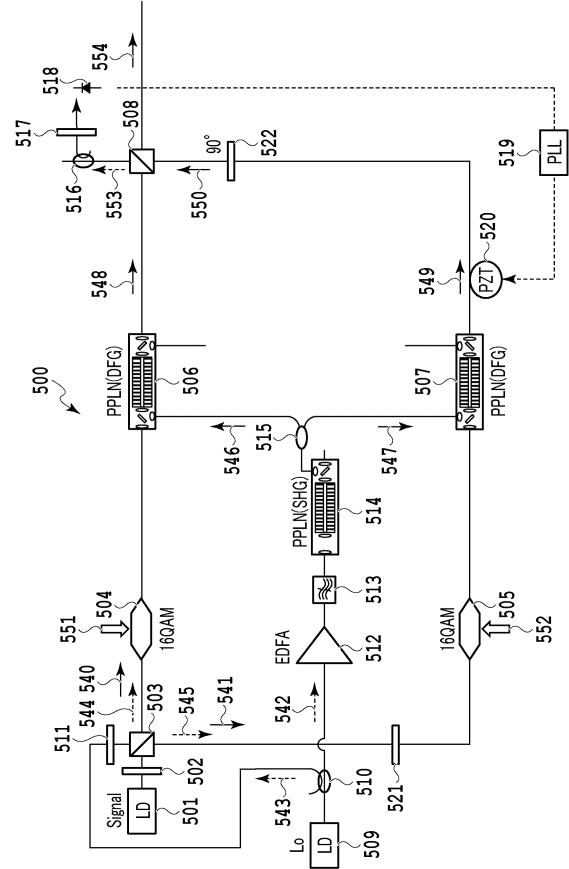
30

40

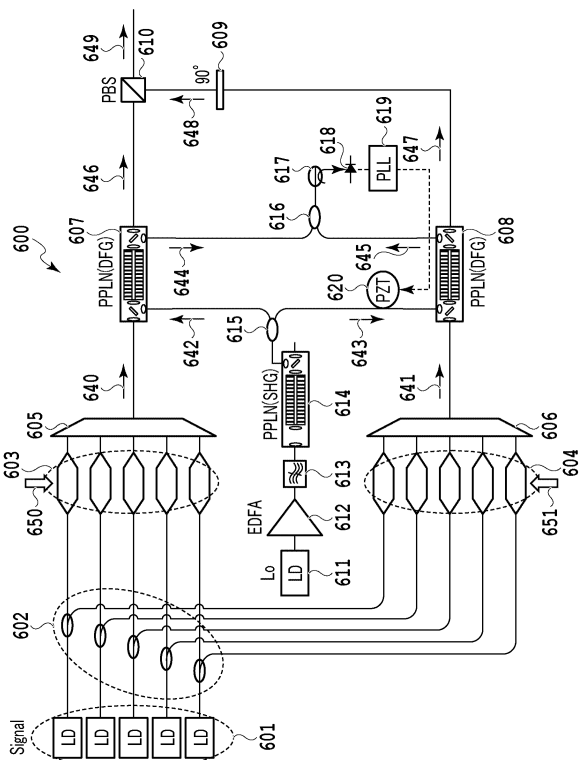
【図 1】



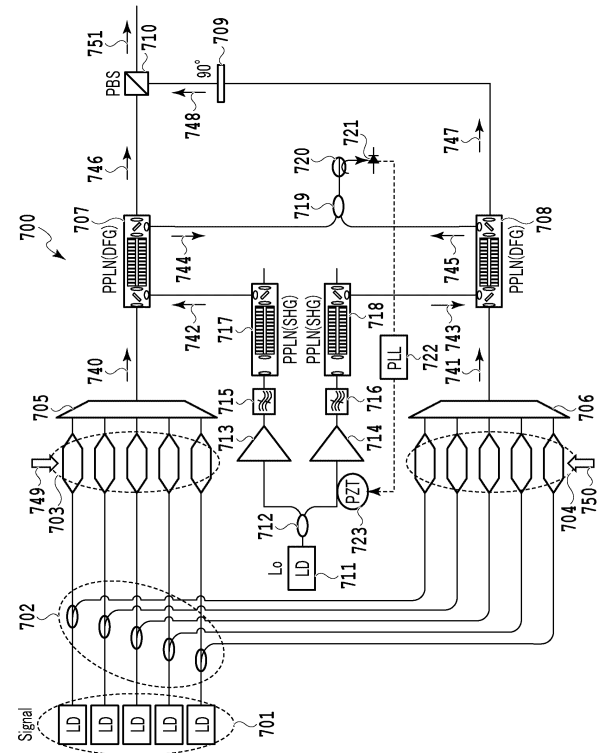
【図 2】



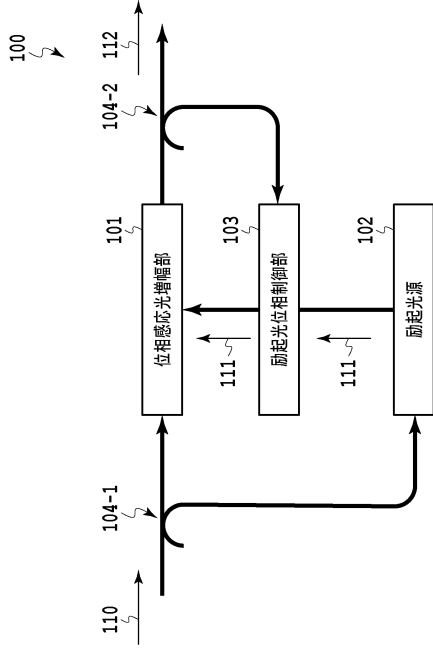
【図 3】



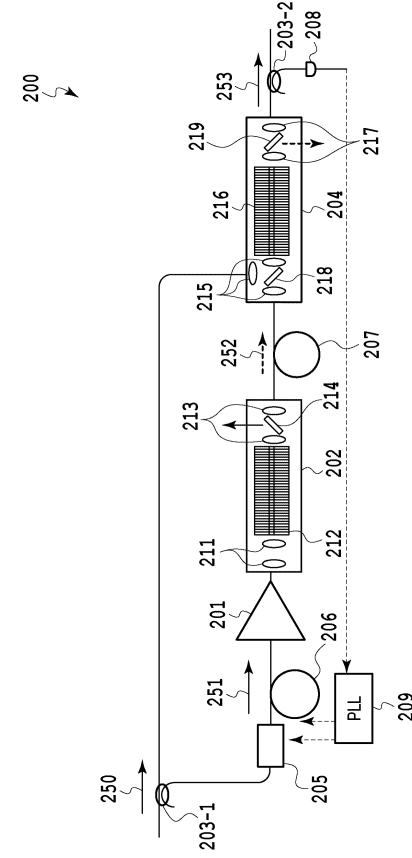
【図 4】



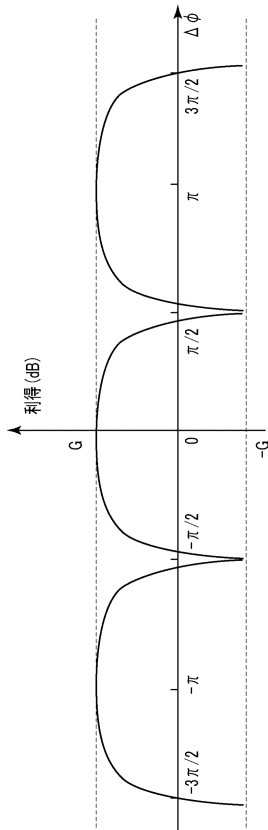
【 図 5 】



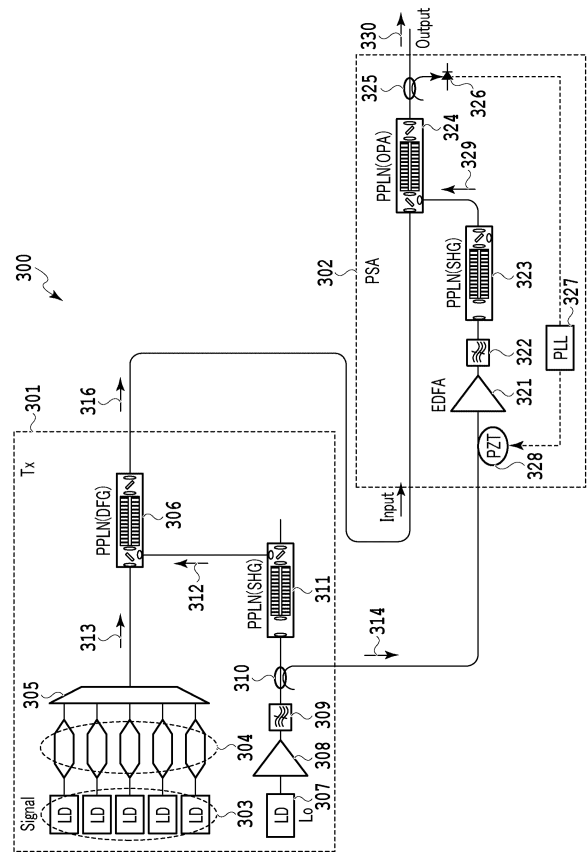
【 図 6 】



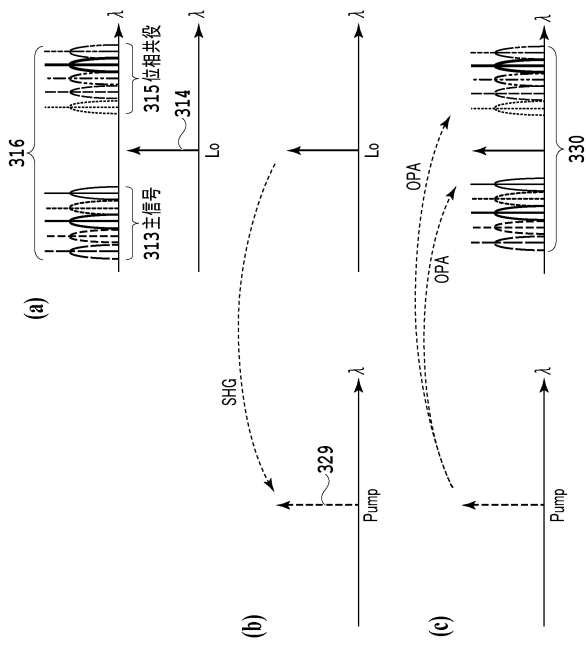
【 図 7 】



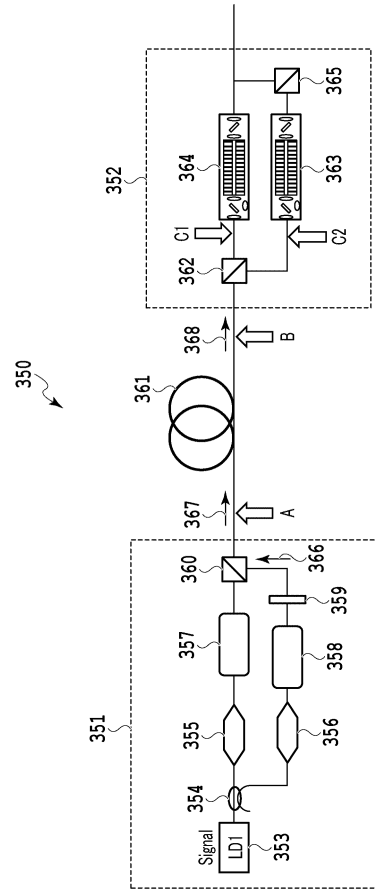
【 図 8 】



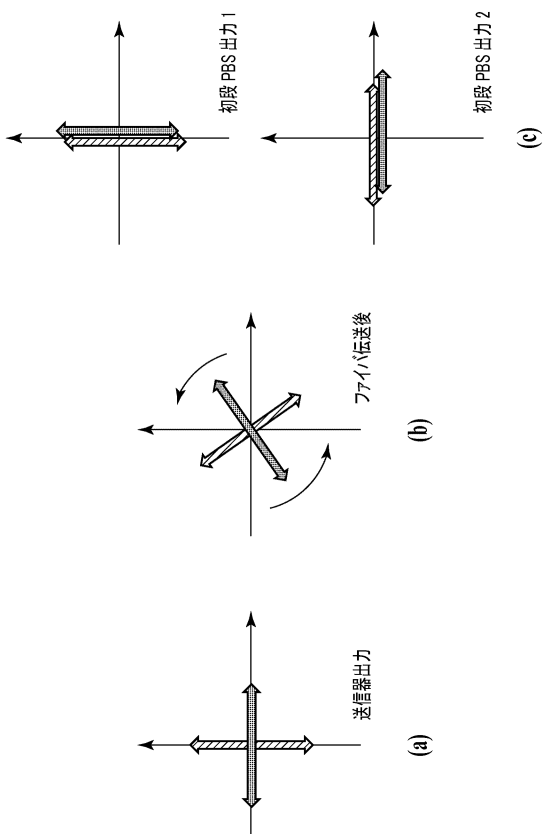
【図9】



【図10】



【図11】



## フロントページの続き

- (72)発明者 圓佛 晃次  
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 柏崎 貴大  
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 笠原 亮一  
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内

審査官 井部 紗代子

- (56)参考文献 特開2018-207362(JP,A)  
特許第6114442(JP,B1)  
特開2011-250097(JP,A)  
国際公開第2012/098911(WO,A1)  
米国特許出願公開第2016/0076941(US,A1)  
ABE, Masashi, et al., PDM-QPSK WDM Signal Amplification Using PPLN-Based Polarization-Independent In-Line Phase-Sensitive Amplifier, 42nd European Conference and Exhibition on Optical Communications, IEEE, 2016年, pp. 743-745

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/00 - 1/125  
G02F 1/21 - 7/00  
H04B10/00 - 10/90  
H04J14/00 - 14/08  
IEEE Xplore