

(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2004-228404

(P2004-228404A)

(43) 公開日 平成16年8月12日(2004.8.12)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

H01S 3/10  
G02F 1/035  
H04B 10/02  
H04B 10/16  
H04B 10/17

F I

H01S 3/10  
G02F 1/035  
H04B 9/00  
H04B 9/00

Z  
M  
J

テーマコード (参考)

2H079  
5F072  
5K102

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 23 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2003-15915 (P2003-15915)  
(22) 出願日 平成15年1月24日 (2003.1.24)

(71) 出願人 000005223  
富士通株式会社  
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号  
(74) 代理人 100078330  
弁理士 笹島 富二雄  
(72) 発明者 尾中 美紀  
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内  
(72) 発明者 林 悦子  
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内  
(72) 発明者 菅谷 靖  
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

最終頁に続く

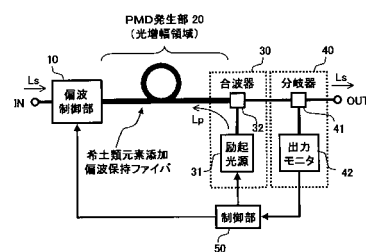
(54) 【発明の名称】 偏波モード分散補償機能を有する光増幅器

(57) 【要約】

【課題】 偏波モード分散 (PMD) 補償機能と光増幅機能を単一の構成で実現した高機能かつ小型の光増幅器を低コストで提供する。

【解決手段】 本発明の光増幅器は、入力される信号光  $L_s$  の偏波状態を制御する偏波制御部 10 と、希土類元素を添加した偏波保持ファイバに偏波制御部 10 からの信号光  $L_s$  が入力され、その直交偏波モード間に群遅延時間差を与えて PMD 補償を行うと同時に信号光  $L_s$  を増幅する PMD 発生部 20 と、上記の偏波保持ファイバに励起光を供給する励起光供給部 30 と、PMD 発生部 20 からの信号光  $L_s$  の PMD 発生状態等をモニタするモニタ部 40 と、モニタ部 40 のモニタ結果を基に偏波制御部 10 および励起光供給部 30 を制御する制御部 50 と、を備えて構成される。

【選択図】 図 1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

入力される信号光の偏波状態を制御する偏波制御部と、  
該偏波制御部で制御された信号光の直交する偏波モード成分間に群遅延時間差を与えることが可能な複屈折性を持つ光伝送媒体を有し、該光伝送媒体に希土類元素を添加した偏波モード分散発生部と、  
該偏波モード分散発生部の光伝送媒体に対して、前記希土類元素を励起状態とすることが可能な励起光を与える励起光供給部と、  
前記偏波モード分散発生部から出力される信号光の偏波モード分散発生状態をモニタするモニタ部と、  
該モニタ部でモニタされる偏波モード分散が低減されるように前記偏波制御部を制御する制御部と、  
を備えて構成されたことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

10

**【請求項 2】**

請求項 1 に記載の光増幅器であって、  
前記モニタ部は、前記偏波モード分散発生部から出力される信号光のパワーをモニタし、  
前記制御部は、前記モニタ部でモニタされる信号光のパワーが予め設定した値で一定となるように前記励起光供給部を制御することを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

20

**【請求項 3】**

請求項 1 に記載の光増幅器であって、  
前記偏波モード分散発生部は、前記光伝送媒体として偏波保持ファイバを用い、該偏波保持ファイバのコア部分を中心とした光の伝搬領域に希土類元素を添加したことを特徴とする光増幅器。

**【請求項 4】**

請求項 1 に記載の光増幅器であって、  
前記偏波モード分散発生部は、前記光伝送媒体として基板上に形成した複屈折性を持つ光導波路を用い、前記基板上の少なくとも光導波路に希土類元素を添加したことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

30

**【請求項 5】**

請求項 1 に記載の光増幅器であって、  
前記モニタ部は、前記偏波モード分散発生部から出力される信号光の一部をモニタ光として分岐する分岐器と、該分岐器で分岐されたモニタ光のパワーおよび偏波モード分散発生状態をモニタする出力モニタと、信号光を透過し、励起光を遮断する特性を持ち、前記偏波モード分散発生部に供給された励起光の漏れ光が前記出力モニタに入力されることを阻止する励起光遮断デバイスと、を備えたことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

**【発明の詳細な説明】****【0001】****【発明の属する技術分野】**

40

本発明は、光通信システムに用いる光増幅器に関し、特に、偏波モード分散を補償する機能を備えて高機能化を果たしながら小型化を両立させた光増幅器に関するものである。

**【0002】****【従来の技術】**

光増幅器は光通信システムの長距離化・大容量化を実現するキーコンポーネントの 1 つである。この光増幅器は、反転分布媒質からの誘導放出を用いるレーザ増幅器と、ラマン散乱やブリルアン散乱などの非線形光学効果に基づく増幅器とに分別される。また、レーザ増幅器には、希土類添加光ファイバ増幅器と半導体増幅媒体を用いる半導体レーザ増幅器とがある。前者は光励起により光増幅器として動作し、また、後者は注入電流励起により光増幅器として動作する。

50

## 【0003】

これらの光増幅器の中で希土類添加光ファイバ増幅器は、ビットレートフリー、高利得・低雑音・広帯域、低結合損失、低偏光依存性および高効率等という性能面での大きな利点を有している。希土類添加光ファイバ増幅器の中でも、エルビウムドープ光ファイバ増幅器(Erbium-doped fiber amplifier: EDFA)が一般的であり、光ファイバ通信システムにおいて既に実用化されている。

## 【0004】

近年、インターネットの普及等により通信トラフィックの需要は爆発的に急増している。このニーズに応える技術として、1本の光ファイバーに多波長の光信号を重畳して通信を行う波長多重(WDM)伝送技術が脚光を浴びている。WDM伝送技術については、主として2地点間を結ぶ対一(Point-to-Point)のシステムが既に実用化されており、また、高密度波長多重(DWDM)として、今後、大容量伝送の地盤を固めるべく、波長域の拡大を望む需要も高まっている。上記のようなWDM伝送技術の導入により、送受信機内の1波用光増幅器については、少なくとも信号光の波長数に対応した多数の光増幅器が必要になるため、光増幅器の小型化に対する要求が強くなっている。

## 【0005】

また、幹線系の長距離・大容量システムの域を越えたフォトリックネットワークシステムとしてより柔軟でより経済的なトランスポート網の構築が要請されており、フォトリックネットワークを構成するための光ノード技術の開発も進められている。具体的には、WDMリング伝送路から任意の波長の信号を取り出したり或いは任意の波長の信号を挿入したりする機能を有する光アド・ドロップ装置(OADM)や、光回線を相互に切り替える機能または光を波長単位でルーティングする波長スイッチとしての機能を有する光クロスコネクタ(OLC)装置などの開発が進められている。

## 【0006】

来るべき大容量情報化社会に向けたフォトリックネットワークには、高速化、低コスト化および高信頼度化と共に、さらなる高機能化および多様化が求められる。このようなニーズに応えるためには、波長単位もしくは数波の波長グループなどといった小さな単位で各種補償技術を適用して伝送品質の高度な管理を行うことが必要になる。具体的には、所要の適用領域に対して光スイッチや波長分散補償器、偏波モード分散(PMD)補償器、チューナブル光フィルタ等といった機能デバイスを適用することが必要になる。また、上記のような機能デバイスで発生する損失を補償するために、1波または数波の波長グループに対応した光増幅器が要求され、1つのノード内に数多くの光増幅器が必要となる。例えば、1つのOLC装置内で数百個レベルの光増幅器が見込まれる。

## 【0007】

上述したような光通信システムは、メトロ(市街地網)さらにはオフィスや家庭の近くまで引き込まれることが想定されるため、小型光増幅器に対する需要はさらに大きくなることが見込まれる。また、より高速化された光通信システムでは、波長分散補償器およびPMD補償器の必要性がより高くなる。特に、PMD補償器は信号チャネル毎に配置する必要がある。従って、これら光部品の損失を補償する多数の小型光増幅器が必要になると考えられる。

## 【0008】

なお、上記のような機能デバイスの損失を補償するための光増幅器は、これまで主に開発されてきた高性能(例えば、高利得、低NF、広帯域等)を追求した光増幅器とは異なり、1波または数波の波長グループに対応した増幅帯域を有し、少なくとも所要の光部品の損失を補償するに足る利得が得られる小型化を追求した光増幅器となる。

## 【0009】

従来は損失補償用の光増幅器に関する技術として、例えば、下記の特許文献1等では、遠隔励起方法を用いた単体光増幅器を単体光学素子(光結合器や光分岐器など)の入力側に設置し、単体光増幅器と単体光学素子を一体化して損失の無い光学素子を構成する内容が記載されている。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 0 】

また、本出願人は、先願である特許文献 2 , 3 等において、分散補償器 ( D C F ) を複数の光増幅器の段間に配置し、広帯域の W D M 信号光に対する波長分散を補償可能にした光増幅器を提案している。

## 【 0 0 1 1 】

## 【 特許文献 1 】

特開平 5 - 5 0 2 3 3 4 号公報

## 【 特許文献 2 】

特開平 1 1 - 3 1 2 8 4 8 号公報

## 【 特許文献 3 】

特開 2 0 0 0 - 0 7 8 0 8 1 号公報

## 【 発明が解決しようとする課題 】

しかしながら、上記の特許文献 1 等に記載された従来の技術については、光増幅器と光学素子を接続して単に組み合わせた構成の域を越えておらず、光増幅器および光学素子の省スペース化は実現されていない。また、特許文献 2 , 3 等で提案した技術については、分散補償器と光増幅器の双方の特性に配慮して、光増幅器内部における最適な位置に分散補償器を配置しているものの、上記の特許文献 1 等の場合と同様に光増幅器と分散補償器を接続して単に組み合わせた構成であり、光増幅器の小型化という課題が残されている。

## 【 0 0 1 2 】

なお、本出願人は、損失を補償すべき光学素子を良好な反射減衰特性の接続法 ( 融着接続法や斜め研磨コネクタ接続法等 ) を用いて光増幅媒体の出力側に一体化することで、光学素子の挿入損失の効果を利用して光増幅媒体への出力側反射光を低減させ、従来必須であったアイソレータのうちの少なくとも出力側のアイソレータを省略可能として省スペース化を図る技術を提案している ( 例えば、特願 2 0 0 2 - 0 9 2 4 4 3 号参照 ) 。この先願発明は、損失を補償すべき光学素子と光増幅器との構成に関する技術を提供するものであるが、光学素子の種類については特に限定していないため、光増幅器との一体化の対象となる光学素子を特定して、所要の部品やスペースの共通化・共有化により光増幅器の小型化を図るといった技術的なアプローチはなされていない。

## 【 0 0 1 3 】

本発明は上記の点に鑑みてなされたもので、光機能デバイスの 1 つである偏波モード分散補償器との一体化構成により高機能化を図ると共に、所要の部品やスペースの共通化・共有化により小型化および低コスト化を実現した、偏波モード分散補償機能を有する光増幅器を提供することを目的とする。

## 【 0 0 1 4 】

## 【 課題を解決するための手段 】

上記の目的を達成するため、本発明に係る偏波モード分散補償機能を有する光増幅器は、入力される信号光の偏波状態を制御する偏波制御部と、該偏波制御部で制御された信号光の直交する偏波モード成分間に群遅延時間差を与えることが可能な複屈折性を持つ光伝送媒体を有し、該光伝送媒体に希土類元素を添加した偏波モード分散発生部と、該偏波モード分散発生部の光伝送媒体に対して、前記希土類元素を励起状態とすることが可能な励起光を与える励起光供給部と、前記偏波モード分散発生部から出力される信号光の偏波モード分散発生状態をモニタするモニタ部と、該モニタ部でモニタされる偏波モード分散が低減されるように前記偏波制御部を制御する制御部と、を備えて構成される。

## 【 0 0 1 5 】

上記のような構成の光増幅器では、偏波制御部に入力された信号光はその偏波状態が制御部からの信号に従って制御された後に、偏波モード分散発生部の希土類元素が添加された複屈折性を持つ光伝送媒体に与えられる。この偏波モード分散発生部には、励起光供給部からの励起光が与えられていて、光伝送媒体内の希土類元素が励起状態にされている。このため、偏波モード分散発生部に送られた信号光は、その偏波状態に応じて直交偏波モード間に群遅延時間差が与えられると共に希土類元素の誘導放出作用により増幅され、モニ

10

20

30

40

50

タ部でモニタされる信号光の偏波モード分散の補償と、例えばその偏波モード分散補償に伴って発生する損失を少なくとも補償する信号光の増幅とが同時に行われるようになる。これにより、一体化構成により高機能化と小型化を両立させた光増幅器の実現が可能になる。

【 0 0 1 6 】

【 発 明 の 実 施 の 形 態 】

以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて説明する。なお、全図を通して同一の符号は同一または相当する部分を示すものとする。

【 0 0 1 7 】

図 1 は、本発明に係る光増幅器の第 1 実施形態の構成を示す機能ブロック図である。

10

図 1 において、本実施形態の光増幅器は、例えば、入力端子 I N に与えられる信号光 L s の偏波状態を制御する偏波制御部 1 0 と、希土類元素を添加した複屈折性を有する光伝送媒体に対して偏波制御部 1 0 から出力される信号光 L s を入力することで、その信号光 L s の直交する偏波モード成分間に所要の群遅延時間差 ( D i f f e r e n t i a l G r o u p D e l a y : D G D ) を与えて P M D 補償を行うと同時に、信号光 L s を増幅する P M D 発生部 2 0 と、該 P M D 発生部 2 0 の光伝送媒体に励起光を供給して希土類元素を励起状態とする励起光供給部 3 0 と、 P M D 発生部 2 0 から出力端子 O U T に送られる信号光 L s のパワーおよび P M D 発生状態をモニタするモニタ部 4 0 と、モニタ部 4 0 のモニタ結果に基づいて偏波制御部 1 0 および励起光供給部 3 0 を制御する制御部 5 0 と、を備えて構成される。

20

【 0 0 1 8 】

偏波制御部 1 0 は、制御部 5 0 からの制御信号に従って、入力端子 I N を介して与えられる信号光 L s の偏光面角度を調整する公知の光デバイスである。この偏波制御部 1 0 は、例えば特許第 3 2 3 0 7 8 4 号公報や特開 2 0 0 0 - 3 1 2 1 8 1 号公報等に記載された P M D 補償器に使用される偏波制御回路 ( 偏波コントローラ ) に相当するものである。

【 0 0 1 9 】

P M D 発生部 2 0 は、複屈折性を有する光伝送媒体として例えば偏波保持ファイバ等を使用し、その偏波保持ファイバのコア部分に希土類元素を添加したものからなる。偏波保持ファイバは、直交する偏波モード間に伝搬定数差を生じさせ、一方の偏波モードから他方の偏波モードへの結合を抑制して偏波保持能力を高めた光ファイバであり、その構造としては P A N D A 型や楕円クラッド型等がある。図 2 は、 P A N D A 型偏波保持ファイバの断面構造の一例である。図中の符号 2 1 はコア、符号 2 2 はクラッド、符号 2 3 は応力付与部をそれぞれ示している。本実施形態において P M D 発生部 2 0 として使用する偏波保持ファイバは、コア 2 1 部分を中心とした光の伝搬領域に希土類元素を添加することにより光増幅媒体としての機能も備える。コア 2 1 に添加される希土類元素の具体例としては、 E r ( エルビウム )、 P r ( プラセオジウム )、 T h ( トリウム )、 E r - Y b ( エルビウムおよびイッテルビウムの共添加 ) 等を挙げることができる。ただし、希土類元素は上記の具体例に限定されるものではない。

30

【 0 0 2 0 】

励起光供給部 3 0 は、例えば、偏波保持ファイバに添加された希土類元素を励起することのできる所要の波長の励起光 L p を発生する励起光源 3 1 と、その励起光 L p を P M D 発生部 2 0 の偏波保持ファイバに供給する合波器 3 2 とを有する。ここでは、偏波保持ファイバの信号光出力側に合波器 3 2 が配置され、信号光 L s の伝搬方向とは逆方向に励起光 L p が伝搬する後方励起型の一例が示してある。励起光源 3 1 としては、例えば、半導体励起レーザやファイバラマンレーザ等を使用することが可能である。

40

【 0 0 2 1 】

なお、上記のように希土類元素を添加した偏波保持ファイバを用い、それに励起光を供給して光増幅器を構成する内容については、例えば、特開 2 0 0 1 - 2 4 4 5 3 5 号公報、特開平 7 - 1 4 2 7 9 8 号公報、特開平 5 - 4 5 6 8 2 号公報等で公知である。ただし、これら公知の光増幅器は P M D 補償機能を具備するものではない。

50

## 【 0 0 2 2 】

ここで、上記の励起光供給部 3 0 に用いられる合波器 3 2 の具体的な構成例を図 3 および図 4 を参照しながら説明する。

図 3 の構成は、ファイバ型の融着 WDM カプラを合波器 3 2 として使用した一例である。この構成例では、PMD 発生部 2 0 の希土類元素を添加した偏波保持ファイバの出力端が融着 WDM カプラの 1 つのポートに光学的に接続され、そのポートとは反対側に位置する 2 つのポートの一方にはモニタ部 4 0 に繋がる光路の一端が光学的に接続され、他方には励起光源 3 1 のピグテールファイバ等が融着接続される。

## 【 0 0 2 3 】

図 4 の構成は、波長多重分離膜 3 2 A と複数のレンズ 3 2 B を利用して空間レンズ結合型の構成とした合波器 3 2 の一例である。波長多重分離膜 3 2 A は、励起光  $L_p$  を高い反射率で反射し、信号光  $L_s$  を透過する特性を有するものとする。この構成例では、励起光源 3 1 からレンズ 3 2 B を介して波長多重分離膜 3 2 A に入射された励起光  $L_p$  は、波長多重分離膜 3 2 で反射されて PMD 発生部 2 0 の偏波保持ファイバに導かれる。一方、偏波保持ファイバからレンズ 3 2 B を介して波長多重分離膜 3 2 A に入射された信号光  $L_s$  は、波長多重分離膜 3 2 A を透過してモニタ部 4 0 に繋がる光路に導かれる。

## 【 0 0 2 4 】

なお、図 3 および図 4 には後方励起の場合を例に示したが、この構成は後述するような前方励起の場合にも同様にして応用することが可能である。

モニタ部 4 0 ( 図 1 ) は、PMD 発生部 2 0 から出力され励起光供給部 3 0 の合波器 3 1 を通過して出力端子 OUT に送られる信号光  $L_s$  の一部をモニタ光として分岐する分岐器 4 1 と、分岐器 4 1 で分岐されたモニタ光を用いて信号光  $L_s$  のパワーや PMD 発生状態をモニタする出力モニタ 4 2 とを有する。出力モニタ 4 2 は、例えば、菊池、外 1 名、「PMD 補償器における偏光度を用いた PMD 検出方式の検討」、1999 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-10-68 等に記載された公知の PMD モニタ方法を適用することが可能である。出力モニタ 4 2 の具体的な構成は、例えば図 5 に示すように、分岐器 4 1 で分岐されたモニタ光をさらに分岐器 4 2 A で 4 つの光に分岐し、それらのうちの 3 つの光を波長板 4 2 B や偏光子 4 2 C を介して受光器 4 2 D に送り、他の 1 つの光は受光器 4 2 D に直接送り、各々の受光器 4 2 D で検出される偏波状態の異なる光のパワーに基づいて、演算処理回路 4 2 E で偏光度 ( Degree of Polarization : DOP ) を演算して信号光  $L_s$  の PMD 発生状態をモニタする。ただし、本発明に適用可能な出力モニタの構成は、図 5 の一例に限定されるものではない。

## 【 0 0 2 5 】

制御部 5 0 ( 図 1 ) は、モニタ部 4 0 でのモニタ結果に基づいて、信号光  $L_s$  に残留した PMD がより小さくなるように偏波制御部 1 0 で調整される信号光  $L_s$  の偏光面角度を制御する。また、この制御部 5 0 は、モニタ部 4 0 でモニタされる信号光  $L_s$  のパワーに応じて、出力端子 OUT から出力される信号光  $L_s$  が所要のレベルとなるように、励起光供給部 3 0 の励起光源 3 1 を制御して本光増幅器の利得設定を調整する。

## 【 0 0 2 6 】

なお、図 1 の構成例では図示を省略したが、偏波制御部 1 0 および PMD 発生部 2 0 の間と、励起光供給部 3 0 の合波器 3 2 およびモニタ部 4 0 の分岐器 4 1 の間とには、信号光  $L_s$  を入力側から出力側にのみ通過させる光アイソレータを必要に応じて ( 例えば、高利得動作が必要な場合など ) 挿入することが可能である。

## 【 0 0 2 7 】

次に、第 1 実施形態の光増幅器の動作について説明する。

本光増幅器では、信号光  $L_s$  が入力端子 IN を介して偏波制御部 1 0 に入力されると、その信号光  $L_s$  の偏光面の角度が調整される。この偏波制御部 1 0 での偏光面角度の調整は、入力端子 IN に接続される図示しない光伝送路等を伝搬することで信号光  $L_s$  に発生した PMD が、偏波制御部 1 0 の後段に配置した PMD 発生部 2 0 で直交偏波モード成分間に付与される群遅延時間差によって低減されるように制御される。ここでは、出力段に配

置したモニタ部 40 でモニタされる PMD 発生量が減少して零に近づくように、偏波制御部 10 の動作が制御部 50 によってフィードバック制御される。

#### 【0028】

ここで、入力端子 IN に与えられる信号光 Ls に発生する PMD について簡単に説明しておく、例えば、光伝送路として一般的に広く使われているシングルモード光ファイバ (SMF) が入力端子 IN に接続されるような場合、SMF には直交する 2 つの偏波面を持つ 2 つのモードが存在し、SMF の断面構造が完全に真円ではないために生じる複屈折性により、直交偏波モードの縮退状態がとけて、偏波ごとに群速度が異なる PMD が発生する。具体的に、SMF の偏波伝達特性が  $0.5 \text{ ps/km}^{1/2}$  であるとする、例えば 300 km の長さを有する SMF を伝搬した信号光 Ls には 8.7 ps の PMD が発生し、この PMD が信号光 Ls の伝送特性を劣化させることになる。なお、上記の PMD は温度変動等の外乱により時間的に変化するため、PMD の補償は動的に行う必要がある。このため、本実施形態ではモニタ部 40 のモニタ結果に基づいて偏波制御部 10 のフィードバック制御が行われる。

#### 【0029】

偏波制御部 10 で偏波面角度が最適化された信号光 Ls は、PMD 発生部 20 の希土類元素が添加された偏波保持ファイバのコア内を伝搬する。この偏波保持ファイバには、励起光源 31 で発生した励起光 Lp が合波器 32 を介して後方より供給され、コアに添加された希土類元素が励起状態とされている。これにより、PMD 発生部 20 の偏波保持ファイバを伝搬する信号光 Ls は、その偏波面角度に応じて直交偏波モード間に群遅延時間差が付与されて PMD の補償が行われると同時に、励起された希土類元素からの誘導放出により所要のレベルまで増幅される。

#### 【0030】

上記の PMD 発生部 20 で補償可能な PMD 量は、偏波保持ファイバの長さに大きく依存する。一般的に、20 ps 程度の PMD を付与するために必要な偏波保持ファイバの長さは約 20 m と言われている。上記の具体例のように入力端子 IN に入力される信号光 Ls に発生した 8.7 ps の PMD を補償するためには、およそ 10 m 程度の長さの偏波保持ファイバを使用することが必要になる。一方、PMD 発生部 20 における信号光 Ls の増幅利得についても、光増幅媒体 (希土類元素の添加された偏波保持ファイバ) の長さに大きく依存し、ある程度の長さがないと所要の利得を発生することが難しい。例えば、周知のエルビウム添加光ファイバ増幅器に用いられている光増幅媒体の長さは数 10 m である。この光増幅媒体の長さは、上記の PMD 補償に必要な偏波保持ファイバの長さと同程度になっており、この長さの共通点に注目して本実施形態では PMD 補償のための偏波保持ファイバに希土類元素を添加して光増幅媒体としても機能させることにより、光部品の共通化による省スペース化を図った一体化構成を容易に実現可能にしている。

#### 【0031】

PMD 発生部 20 における信号光 Ls の増幅利得は、本光増幅器を PMD 補償器として考えたときの挿入損失を少なくとも補償可能な利得に設定される。具体的に、公知の PMD 補償器の挿入損失は、適用技術や PMD 補償量にもよるが、一般的に 5 ~ 10 dB 程度であると考えられるため、例えば、これと同程度の利得が少なくとも得られるような励起光 Lp が PMD 発生部 20 に供給される。ここでは、PMD 発生部 20 で増幅された信号光 Ls のパワーをモニタ部 40 でモニタし、所要の光パワーレベル (例えば、出力時の信号光 Ls のパワーが入力時のパワーに略等しくなるか、または、それを上回る所望のレベル) となるように、励起光源 31 の駆動状態が制御部 50 によってフィードバック制御される。

#### 【0032】

さらに、上記励起光源 31 のフィードバック制御に関しては、信号光 Ls の出力レベルを一定に制御する ALC とするのがよい。これにより、信号光 Ls の任意の入力レベルに対して出力レベルが一定になるため安定した出力が得られるようになる。また、ALC の出力レベルは、出力モニタ 42 の感度を考慮して設定するのが好ましい。すなわち、出力モ

10

20

30

40

50

ニタ 42 に与えられるモニタ光（信号光  $L_s$  の分岐光）の入力レベルが小さくなり過ぎると、受光器で発生する暗電流等の影響により光パワーや PMD を正確にモニタすることができなくなる。また、出力モニタ 42 への入力レベルが大きくなり過ぎると、受光器が飽和状態となって光パワーや PMD を正確にモニタすることができなくなる。そこで、モニタ部 40 に使用する分岐器 41 の分岐比と出力モニタ 42 の最小および最大入力レベルとに基づいて、出力モニタ 42 に入力されるモニタ光のレベルが適切な値となるように ALC の出力レベルを設定することにより、上記のような状況を回避することができるようになり、信号光  $L_s$  の入力レベルが広い範囲で変化しても PMD 補償および光増幅を安定して行うことが可能となる。

#### 【0033】

10

上述したように第 1 実施形態の光増幅器によれば、これまでは PMD 補償器に対して別途設けていた挿入損失補償用の光増幅器について、希土類元素を添加した偏波保持ファイバを用いて PMD 発生媒体と光増幅媒体とを共通の部品で構成すると共に、モニタ部 40 や制御部 50 も共有して省スペース化を図った一体化構成を実現したことで、PMD 補償機能と光増幅機能を単一の構成で実現した高機能かつ小型の光増幅器を提供することが可能になる。また、出力モニタ 42 のモニタ結果に基づいて偏波制御部 10 と励起光源 31 の双方を同時にフィードバック制御するようにしたことで、信号光  $L_p$  に発生した PMD の補償とその PMD 補償により生じる損失の補償とを確実に安定して行うことができる。このように光増幅器内で PMD 補償と損失補償を同時に行うようにすれば、例えば、光通信システムの受信側に配置された PMD 補償器の挿入損失をインライン光増幅器（光増幅中継器）の出力レベルを上昇させて補償するような場合と比較して、光伝送路の非線形効果による伝送特性劣化や、インライン光増幅器の過度な利得増加による光増幅特性劣化、信頼性劣化およびコストアップ等の問題発生を回避することが可能になる。

20

#### 【0034】

なお、上記の第 1 実施形態では、後方励起型の構成例について説明したが、本発明はこれに限らず、例えば図 6 に示すように、PMD 発生部 20 の希土類元素を添加した偏波保持ファイバの信号光入力側に合波器 32 を配置し、信号光  $L_s$  の伝搬方向と同じ方向に励起光  $L_p$  が伝搬する前方励起型の構成としても当然よい。また、例えば図 7 に示すように、偏波保持ファイバの信号光入力側および出力側の双方から励起光  $L_p$  を供給する双方向励起型の構成とすることも可能である。

30

#### 【0035】

次に、本発明に係る光増幅器の第 2 実施形態について説明する。

図 8 は、第 2 実施形態の光増幅器の構成を示す機能ブロック図である。

図 8 において、第 2 実施形態の光増幅器の構成が第 1 実施形態の場合と異なる点は、偏波制御部 10 および PMD 発生部 20 に代えて、例えば、ニオブ酸リチウム（ $LiNbO_3$ ；LN）等を材料とする結晶基板に形成された光導波路の複屈折性を利用して構成された偏波制御部 10' および PMD 発生部 20' を設けた点である。上記以外の励起光供給部 30、モニタ部 40 および制御部 50 の各構成については、第 1 実施形態の場合と同様であるため、ここでの説明を省略する。

#### 【0036】

40

LN 導波路型の偏波制御部 10' としては、例えば、TE-TM モードコンバータと位相シフタを組み合わせた構成、または、結晶軸を回転させて波長板を導波路で実現した構成などが公知ある。ここでは、例えば図 9 に示すように、X カットの LN 基板 11 上に、希土類元素を添加した LN 導波路 12 を形成し、その LN 導波路に沿って、TE-TM モードコンバータと位相シフタとを交互に配置して偏波制御部 10' が構成されるものとする。各段の TE-TM モードコンバータは、LN 導波路 12 の長手方向に対して直交する方向に設けた 3 つの電極 13 に、制御部 50 からの出力信号に従って制御された所要の電気信号を与えることで、LN 導波路 12 を伝搬する信号光  $L_s$  の TE-TM モードの変換が行われる。また、各段の位相シフタは、LN 導波路 12 の両サイドに設けた 2 つの電極に、制御部 50 からの出力信号に従って制御された所要の電気信号を与えることで、LN 導

50

波路 12 を伝搬する信号光  $L_s$  の位相をシフトさせる。

【0037】

LN 導波路型の PMD 発生部 20' としては、例えば図 10 に示すように、希土類元素が添加された光導波路 25A, 25B を形成した 2 つの LN 基板 24A, 24B の間に TE-TM モードコンバータ 26 を設けた構成などを適用することが可能である。TE-TM モードコンバータ 26 を介した LN 基板 24A, 24B 間の光の導波手段は、空間、ファイバまたは導波路等の任意の手段を適宜に選択すればよい。

【0038】

なお、上記の偏波制御部 10' および PMD 発生部 20' において、希土類元素を添加した LN 導波路を実現するための技術としては、例えば、I. Baumann et al., "Acoust Tunable Ti:Er:LiNbO<sub>3</sub> - Waveguide Laser", ECOC '94, pp. 99 - 102 や、H. Suche, "High-speed Er-doped LiNbO<sub>3</sub> waveguide Lasers", IPR '99, RtuG3 - 1 pp. 222 - 224 等に記載された技術を適用することが可能である。

【0039】

また、本実施形態の偏波制御部 10' および PMD 発生部 20' では、LN 基板 11, 24A, 24B に形成した光導波路 12, 25A, 25B の部分にのみ希土類元素を添加する一例を示したが、LN 基板 11, 24A, 24B の全体に希土類元素を添加するようにしても構わない。さらに、本発明における偏波制御部 10' および PMD 発生部 20' の構成は、図 9 および図 10 に示した一例に限定されるものではなく、公知の構成を適用することが可能である。

【0040】

上記のような PMD 発生部 20' の LN 導波路 25B に励起光源 31 で発生した励起光  $L_p$  を供給する合波器 32 の構成としては、例えば、前述の図 3 および図 4 に示した各構成を適用することが可能である。また、例えば図 11 に示すように、合波器 32 を導波路型の構成とすることも可能である。この導波路型の構成では、光導波路の Y 分岐部分に波長選択性モード結合部 32C が形成され、励起光源 31 からレンズ 32D を介して Y 分岐の一方の分岐ポートに入射された励起光  $L_p$  が、波長選択性モード結合部 32C を通って、PMD 発生部 20' の LN 導波路 25B に導かれる。一方、LN 導波路 25B から導波路型の合波器 32 に入射された信号光  $L_s$  は、波長選択性モード結合部 32C を介して Y 分岐の他方の分岐ポートに送られる。また、図 11 には、モニタ部 40 の分岐器 41 も導波路型として一体化した構成が併せて図示しており、前段の Y 分岐の他方の分岐ポートに送られた信号光  $L_s$  は、分岐器 41 として機能する後段の Y 分岐で 2 分岐されて出力端子 OUT および出力モニタ 42 にそれぞれ導かれる。

【0041】

次に、第 2 実施形態の光増幅器の動作について説明する。

上記のような構成の光増幅器では、PMD 発生部 20' の LN 導波路 25A, 25B に加えて偏波制御部 10' の LN 導波路 12 にも希土類元素が添加されており、励起光供給部 30 からの後方励起光  $L_p$  が LN 導波路 25B, 25A そして LN 導波路 12 にも供給されるため、入力端子 IN に入力された信号光  $L_s$  は PMD 発生部 20' だけでなく偏波制御部 10' においても増幅されるようになる。

【0042】

LN 導波路型の PMD 発生部 20' で付与される PMD 量は、一般的には、LN 導波路の長さ 1 cm あたりで 2.5 ps 程度と言われている。このため、例えば 20 ps の PMD が発生した信号光  $L_s$  の PMD 補償を行う場合、PMD 発生部 20' の LN 導波路 12 の長さとしては約 10 cm とすればよい。この LN 導波路 12 の長さは、前述した偏波保持ファイバを用いて PMD を発生させる場合と比べて非常に短くなるため小型化および省スペース化に有利である。

【0043】

一方、上記のようなLN導波路長の短いPMD発生部20'では、希土類元素が添加される部分の長さも短くなるため、光増幅領域を偏波制御部10'まで拡大しても高利得の動作は難しくなる。短い光増幅媒体を用いる場合に利得を上昇させるためには、例えば、希土類元素の添加濃度を高くする方法や、Er-Yb共添加増幅媒体として励起光吸収率の向上を図る方法などを適用することが可能である。具体的な一例を挙げておくと、約10cmのLN導波路にエルビウムを3000~5000ppmの濃度で添加した場合には、5~10dB程度の利得を得ることができるようになる。ただし、希土類元素を高濃度で添加する場合には、希土類元素間の相互作用により利得が低下する濃度消光の影響に留意する必要がある。

#### 【0044】

上記のようにLN導波路型の偏波制御部10'およびPMD発生部20'を適用した光増幅器では信号光Lsの増幅利得が低くなるが、本光増幅器をPMD補償器として考えたときの挿入損失を補償するための利得を得ることは十分に可能である。また、比較的低い利得で動作する光増幅器においては、高利得動作時に必須の構成要素となる光アイソレータを省略できるため、光増幅器の小型化および低コスト化を図ることも可能である。さらに、LN導波路型の偏波制御部10'およびPMD発生部20'によるPMD補償は、例えば、1μs以下の応答速度が得られると共に、45dB以上の反射減衰量が得られる等の利点を有している。加えて、LN導波路の集積化に有利な特徴を生かし、前述の図11に例示したように励起光供給部30やモニタ部40の所要部品を導波路型の構成として集積化することで、より小型の光増幅器を実現することも可能になる。

#### 【0045】

なお、上記の第2実施形態では後方励起型の構成例について説明したが、本発明はこれに限らず、前述した図6または図7の場合と同様にして、前方励起型または双方向励起型の構成とすることも可能である。

#### 【0046】

また、上記の第2実施形態では、LN基板上に形成した光導波路を利用してLN導波路型の偏波制御部10'およびPMD発生部20'を構成したが、これと同様にして、例えば図12に示すように、シリコン基板上にガラス導波路を形成し、その屈折率を温度制御等により変化させる平面光波回路(Planar Lightwave Circuit: PLC)型の構成を適用することも可能である。このPLC型の偏波制御部10'およびPMD発生部20'によって行われるPMD補償の利点としては、光部品の集積化による小型化が可能であることや、10ms以下の応答速度が得られることなどを挙げることができる。

#### 【0047】

次に、本発明に係る光増幅器の第3実施形態について説明する。

上述の第1、第2実施形態で説明したようなPMD補償と光増幅を同時に行う一体化構成では、例えば図6に示した前方励起型または図7に示した双方向励起型の各構成に関して、信号光Lsと同方向に伝搬する励起光Lsの漏れ光がモニタ部40に入力して出力モニタ42におけるPMDのモニタ精度を低下させる可能性がある。第3実施形態では、上記のような励起光Lpの漏れ光(残留励起光)の影響によるモニタ精度の低下を防ぐための改良例について説明する。

#### 【0048】

図13は、第3実施形態の光増幅器に用いられるモニタ部の構成を示すブロック図である。

図13において、本光増幅器に適用されるモニタ部40'は、信号光Lsを透過し、励起光Lpを遮断する光フィルタ43を分岐器41の前段の光路上に挿入したものである。なお、分岐器41および出力モニタ42の構成、並びに、モニタ部40'以外の光増幅器の他の部分の構成については、第1または第2実施形態の場合と同様であるためここでの説明を省略する。

#### 【0049】

10

20

30

40

50

光フィルタ 43 は、例えば図 14 に示すように、信号光  $L_s$  の波長帯域に対して透過率が高く、励起光  $L_p$  の波長に対して透過率が低くなるようなフィルタ特性を有する一般的な光フィルタである。この光フィルタ 43 の具体例としては、誘電体多層膜、融着カプラ、ファイバブラッググレーティング等を利用したフィルタを挙げることができる。ただし、光フィルタ 43 は上記の具体例に限定されるものではない。

#### 【0050】

上記のような構成のモニタ部 40' では、偏波制御部 10 および PMD 発生部 20 を伝搬することにより PMD 補償と光増幅が同時に施された信号光  $L_s$  と、その信号光  $L_s$  と同方向に伝搬する励起光  $L_p$  の漏れ光とが光フィルタ 43 に入力される。この光フィルタ 43 では、図 14 に示したフィルタ特性に従って、信号光  $L_s$  が分岐器 41 に送られ励起光  $L_p$  の漏れ光は遮断される。光フィルタ 43 を透過した信号光  $L_s$  は、その一部が分岐器 41 でモニタ光として分岐されて出力モニタ 42 に送られる。出力モニタ 42 では、分岐器 41 からのモニタ光を用いて信号光  $L_s$  の PMD 発生状態や出力パワーがモニタされるようになる。

10

#### 【0051】

上記のように第 3 実施形態の光増幅器によれば、前方励起型または双方向励起型の構成においても、励起光  $L_p$  の漏れ光の影響を受けることなく、信号光  $L_s$  の PMD 発生状態を高い精度でモニタすることが可能になる。

#### 【0052】

なお、上記の第 3 実施形態では、光フィルタ 43 を分岐器 41 の前段の主信号系の光路上に配置するようにしたが、光フィルタ 43 の配置は上記以外にも、例えば図 15 に示すように、分岐器 41 と出力モニタ 42 の間のモニタ系の光路上に光フィルタ 43 を配置するようにしてもよい。また、図 16 に示すように、光フィルタ 43 に代えて、励起光  $L_p$  に対応した波長帯で大きな損失が発生する光アイソレータ 44 を設けることも可能である。具体的には、 $1.55\mu\text{m}$  帯の信号光  $L_s$  に対して  $0.98\mu\text{m}$  の励起光  $L_p$  により光増幅を行う場合、 $1.55\mu\text{m}$  帯用の光アイソレータは、 $0.98\mu\text{m}$  付近で  $50\text{dB}$  程度の損失が生じるため、励起光  $L_p$  を遮断するデバイスとして好適である。上記のように光アイソレータ 44 を設けるようにすれば、光増幅媒体の出力側反射光が遮断されるため、高利得動作時においても安定な光増幅特性を得ることができるという効果も得られるようになる。

20

30

#### 【0053】

また、上記の第 3 実施形態では、個別の光フィルタ 43 をモニタ部 40 に追加するようにしたが、例えば、モニタ部 40 に接続される PMD 発生部 30 の光伝送媒体（希土類元素を添加した偏波保持ファイバや光導波路等）に直接グレーティングを形成して、上記の光フィルタ 43 と同様のフィルタ特性を実現させることも可能である。さらに、励起光に対応した波長帯の光を吸収する希土類元素（例えば、 $0.98\mu\text{m}$  の励起光に対してイッテルビウム（Yb）やボロン（B）など）を添加した吸収体を光フィルタ 43 に代えて主信号系またはモニタ系の光路に設けるようにしてもよい。加えて、モニタ部 40 を構成する各光部品自体に、光フィルタ 43 と同様の特性を有する光フィルタ膜を蒸着するようにしても構わない。この場合の具体例としては、上述の図 5 に示したような構成の出力モニタ 42 について、ガラス結晶を使用した偏光子 42C に対して光フィルタ膜を蒸着することが可能である。

40

#### 【0054】

次に、本発明に係る光増幅器の第 4 実施形態について説明する。

上述したような信号光  $L_s$  に対する PMD 補償機能と光増幅機能を同時に実現した一体化構成では、光増幅に伴って発生する自然放出（Amplified Spontaneous Emission: ASE）光も PMD のモニタ精度を低下させる要因となる。第 4 実施形態では、前述した励起光の漏れ光だけでなく ASE 光の影響をも考慮した改良例について説明する。

#### 【0055】

50

図 17 は、第 4 実施形態の光増幅器の構成を示す機能ブロック図である。

図 17 において、本実施形態の光増幅器は、信号光  $L_s$  を透過すると共に、励起光  $L_p$  の漏れ光を遮断し、かつ、ASE 光を遮断する光フィルタ 60A, 60B を PMD 補償 / 光増幅ユニット 100 の前段および後段にそれぞれ配置したものである。なお、ここでの PMD 補償 / 光増幅ユニット 100 は、上述した各実施形態における偏波制御部 10 (または 10') と PMD 発生部 20 (または 20') とを 1 つの系として表した機能ブロックである。PMD 補償 / 光増幅ユニット 100 の前後に挿入した光フィルタ 60A, 60B 以外の他の部分の構成は、第 1 または第 2 実施形態の場合と同様であるため、ここでの説明を省略する。

#### 【0056】

10

各光フィルタ 60A, 60B は、例えば図 18 に示すように、信号光  $L_s$  の波長帯域に対して透過率が高くなると共に、励起光  $L_p$  の波長に対して透過率が低く、かつ、信号光  $L_s$  の波長帯域の短波長側および長波長側の両端に続く ASE 光の波長帯域に対しても透過率が低くなるようなフィルタ特性を有する一般的な光フィルタである。

#### 【0057】

上記のような構成の光増幅器では、入力端子 IN に与えられた信号光  $L_s$  は、光フィルタ 60A を透過して PMD 補償 / 光増幅ユニット 100 に送られ、PMD 補償 / 光増幅ユニット 100 内の偏波制御部 10 および PMD 発生部 20 を伝搬することにより PMD 補償と光増幅が同時に施される。このとき、信号光  $L_s$  の光増幅に伴って ASE 光が発生し、その ASE 光は信号光  $L_s$  と同方向および逆方向にそれぞれ伝搬する。信号光  $L_s$  と同方向に伝搬する ASE 光は、信号光  $L_s$  および前方励起光の漏れ光と共に PMD 補償 / 光増幅ユニット 100 から出力側の光フィルタ 60B に送られ、信号光  $L_s$  のみが光フィルタ 60B を透過してモニタ部 40 に送られる。また、信号光  $L_s$  と逆方向に伝搬する ASE 光は、後方励起光の漏れ光と共に PMD 補償 / 光増幅ユニット 100 から入力側の光フィルタ 60A に送られ、ASE 光および後方励起光の漏れ光の双方の光増幅器外への伝搬が光フィルタ 60A によって遮断される。

20

#### 【0058】

出力側の光フィルタ 60A を透過した信号光  $L_s$  は、その一部がモニタ部 40 の分岐器 41 でモニタ光として分岐されて出力モニタ 42 に送られる。出力モニタ 42 では、分岐器 41 からのモニタ光を用いて信号光  $L_s$  の PMD 発生状態や出力パワーがモニタされるようになる。

30

#### 【0059】

上記のように第 4 実施形態の光増幅器によれば、光増幅に伴って発生する ASE 光および励起光の漏れ光を遮断する光フィルタ 60A, 60B を主信号系の光路上に配置したことにより、ASE 光および励起光  $L_p$  の漏れ光の影響を受けることなく、信号光  $L_s$  の PMD 発生状態を高い精度でモニタすることが可能になる。また、ASE 光を遮断することによって光増幅器としての雑音指数 (NF) および信号光  $L_s$  に対する広帯域 ASE パワーの割合を低減させることもできる。さらに、光増幅器の外部へ不要の光が出力されなくなるため、安全性および信頼性の向上を図ることも可能になる。

#### 【0060】

40

なお、上記の第 4 実施形態では、ASE 光および励起光  $L_p$  の漏れ光の両方を遮断することが可能な光フィルタ 60A, 60B を設けるようにしたが、ASE 光および励起光  $L_p$  の漏れ光のいずれかを遮断する光フィルタを主信号系の光路上に設けるようにしても、モニタ精度等の向上を図ることは可能である。

#### 【0061】

次に、本発明に係る光増幅器の第 5 実施形態について説明する。

第 5 実施形態では、例えば、上述の図 1 に示した第 1 実施形態の構成について、PMD 発生部 20 の複屈折性を有する光伝送媒体を複数段構成 (ここでは 2 段構成) としたときの好ましい具体例を図 19 ~ 図 21 を参照しながら説明する。

#### 【0062】

50

図 19 は、上記のような 2 段構成の P M D 発生部を備えた光増幅器について、低 N F 特性を実現可能にする一例を示す機能ブロック図である。

図 19 の構成例では、複屈折性を有する光伝送媒体としての入力側の偏波保持ファイバ 7 1 および出力側の偏波保持ファイバ 7 3 を位相シフタ 7 1 を介して縦続接続した 2 段構成の P M D 発生部 7 0 a について、上述の図 2 に示した場合と同様に、少なくとも入力側の偏波保持ファイバ 7 1 のコア部分に希土類元素が添加される。そして、この P M D 発生部 7 0 a に励起光 L p を供給する励起光供給部 3 0 は、偏波制御部 1 0 と入力側の偏波保持ファイバ 7 1 との間に合波器 3 2 を配置した前方励起型の構成とされる。ここでは、P M D 発生部 7 0 a の位相シフタ 7 1 の動作が制御部 5 0 からの制御信号により制御され、また、偏波制御部 1 0 と合波器 3 2 の間に光アイソレータ 8 0 が配置されるものとする。

#### 【 0 0 6 3 】

上記のような光増幅器の構成によれば、P M D 発生部 7 0 a の少なくとも入力側の偏波保持ファイバ 7 1 に希土類元素を添加して前方励起型の構成としたことにより、P M D 発生部 7 0 a を伝搬する信号光 L s がその入力側で主に増幅されるようになるため、低 N F 特性の光増幅器を実現することが可能になる。

#### 【 0 0 6 4 】

図 20 は、2 段構成の P M D 発生部を備えた光増幅器について、高効率を実現可能にする一例を示す機能ブロック図である。

図 20 の構成例では、複屈折性を有する光伝送媒体としての入力側の偏波保持ファイバ 7 1 および出力側の偏波保持ファイバ 7 3 を位相シフタ 7 1 を介して縦続接続した 2 段構成の P M D 発生部 7 0 b について、上述の図 2 に示した場合と同様に、少なくとも出力側の偏波保持ファイバ 7 3 のコア部分に希土類元素が添加される。そして、この P M D 発生部 7 0 b に励起光 L p を供給する励起光供給部 3 0 は、出力側の偏波保持ファイバ 7 3 とモニタ部 4 0 の分岐器 4 1 との間に合波器 3 2 を配置した後方励起型の構成とされる。ここでは、P M D 発生部 7 0 b の位相シフタ 7 1 の動作が制御部 5 0 からの制御信号により制御され、また、合波器 3 2 と分岐器 4 1 の間に光アイソレータ 8 0 が配置されるものとする。

#### 【 0 0 6 5 】

上記のような光増幅器の構成によれば、P M D 発生部 7 0 b の少なくとも出力側の偏波保持ファイバ 7 3 に希土類元素を添加して後方励起型の構成としたことにより、P M D 発生部 7 0 b を伝搬する信号光 L s がその出力側で主に増幅されるようになるため、出力効率の向上を図った光増幅器を実現することが可能になる。

#### 【 0 0 6 6 】

図 21 は、2 段構成の P M D 発生部を備えた光増幅器について、低 N F 特性および高利得を実現可能にする一例を示す機能ブロック図である。

図 21 の構成例では、上記の図 19 および図 20 の各構成を組み合わせ、2 段構成の P M D 発生部 7 0 c の入力側および出力側の各偏波保持ファイバ 7 1 , 7 3 のコア部分に希土類元素を添加し、入力側の偏波保持ファイバ 7 1 には偏波制御部 1 0 との間に配置した励起光供給部 3 0 からの前方励起光 L p を供給し、出力側の偏波保持ファイバ 7 3 にはモニタ部 4 0 との間に配置した励起光供給部 3 0 からの後方励起光 L p を供給するようにした双方向励起型の構成とされる。これにより、P M D 発生部 7 0 c を伝搬する信号光 L s がその略全域に亘って増幅されるようになるため、低 N F 特性と高利得を同時に図った光増幅器を実現することが可能になる。

#### 【 0 0 6 7 】

なお、2 段構成の P M D 発生部 7 0 c の入力側および出力側の偏波保持ファイバ 7 1 , 7 3 の両方に希土類元素を添加する場合の構成は、上記の図 21 に示したような双方向励起型に限定されるものではなく、例えば図 22 に示すように、出力側の偏波保持ファイバ 7 3 とモニタ部 4 0 との間にだけ励起光供給部 3 0 を配置し、励起光供給部 3 0 からの後方励起光 L p が出力側の偏波保持ファイバ 7 3 に供給された後に、その残留励起光が位相シ

フタ 7 2 を介して入力側の偏波保持ファイバ 7 1 に供給されるような構成としてもよい。また、図示しないが偏波制御部 1 0 と入力側の偏波保持ファイバ 7 1 との間にだけに励起光供給部 3 0 を配置し、前方励起光  $L_p$  が入力側および出力側の各偏波保持ファイバ 7 1 , 7 3 に順に供給されるようにしても構わない。

【 0 0 6 8 】

次に、本発明に係る光増幅器の第 6 実施形態について説明する。

第 6 実施形態では、例えば、上述の図 1 に示した第 1 実施形態の光増幅器を複数台使用して P M D 補償および光増幅を行う場合に、さらなる小型化を図った応用例について説明する。

【 0 0 6 9 】

10

図 2 3 は、第 6 実施形態の光増幅器の構成を示す機能ブロック図である。

図 2 3 に示す光増幅器は、入力端子アレイ I N を介して入力される波長  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  の信号光  $L_{s1}, L_{s2}, \dots, L_{sN}$  に対応した共通の構成要素である偏波制御部、P M D 発生部、励起光源およびモニタ部をそれぞれ集積化して構成した偏波制御部アレイ 1 1 0、P M D 発生部アレイ 1 2 0、励起光源アレイ 1 3 0 およびモニタ部アレイ 1 4 0 を備える。この光増幅器では、第 1 実施形態の場合と同様にして、モニタ部アレイ 1 4 0 における各波長  $\lambda_1 \sim \lambda_N$  に対応したモニタ結果を基に、偏波制御部アレイ 1 1 0 の各偏波制御部および励起光源アレイ 1 3 0 の各励起光源が制御部 5 0 によりフィードバック制御される。

【 0 0 7 0 】

20

上記のような共通要素を集積（アレイ化）した構成により、複数の信号光  $L_{s1} \sim L_{sN}$  に対応した P M D 補償および光増幅を行う光増幅器についての小型化および低コスト化を効果的に実現することが可能になる。具体的に、例えば 8 波の信号光に対応した P M D 補償および光増幅を行う場合の上記効果は次のように見積もることができる。ここでは、偏波保持ファイバを用いた 8 波対応の P M D 補償器モジュールと、その P M D 補償器モジュールでの損失を補償する 8 波対応の光増幅器モジュールとを光ファイバで接続した従来の構成を想定し、それと本実施形態のアレイ化構成との比較を行うことにする。上記の従来構成において、P M D 補償器モジュールを除いたスペース（光増幅器モジュールとモジュール間の接続ファイバとに要するスペース）に対する各要素部品のスペースの割合（サイズ比）を計算すると、次の表 1 に示すような値となる。

30

【 0 0 7 1 】

【 表 1 】

| 項目                                       | サイズ比 | 本発明の適用         |
|------------------------------------------|------|----------------|
| 1 モジュール間を接続する光ファイバの取り回しに要するスペース(R25)     | 20%  | 一体化により省スペース化可能 |
| 2 光増幅器モジュール筐体内での光ファイバの取り回し等に要するスペース(R25) | 30%  | 共通化により省スペース化可能 |
| 3 機構筐体に要するスペース                           | 2%   | 共通化により省スペース化可能 |
| 4 光増幅媒体に要するスペース                          | 23%  | 共通化により省スペース化可能 |
| 5 出力モニタに要するスペース                          | 2%   | 共通化により省スペース化可能 |
| 6 励起光源に要するスペース                           | 20%  | 省スペース化困難       |
| 7 励起光の合波器に要するスペース                        | 2%   | 省スペース化困難       |
| 8 制御部等の電気配線に要するスペース                      | 1%   | 省スペース化一部可能     |

10

ただし、表 1 の項目 1 , 2 におけるファイバは、小さく巻き過ぎると損失や P M D の増加、機械的破損等の不具合を生じるため、ファイバ種に応じた許容巻き半径という指標を用い、ここでは 2 5 m m という一般的なファイバ許容巻き半径を想定してサイズ比を計算している。上記の表 1 にあるように想定した従来の構成の各項目に示したスペースのうちで、本実施形態を適用して部品の一体化や共通化を行うことにより省スペース化が可能なものは、少なくとも項目 1 ~ 5 に示した各スペースが該当することになり、そのサイズ比の合計は 7 7 % と見積もることができる。そこで、従来構成における P M D 補償器モジュールと光増幅器モジュールのスペース比を 1 : 1 と仮定し、本実施形態を適用して省スペース化を図った場合の全体スペースの相対比を計算すると、次の表 2 に示すようになり、本実施形態の構成によって約 4 0 % の省スペース化の効果が得られることが分かる。

20

【 0 0 7 2 】

30

【表 2】

|          | 光増幅器+接続ファイバ相当部分              | PMD補償器相当部分 | 全体   |
|----------|------------------------------|------------|------|
| 従来の構成    | 1. 2<br>(1+接続ファイバ分0. 2)      | 1          | 2.2  |
| 本実施形態の構成 | 0. 23<br>(1-表1の省スペース化分0. 77) | 1          | 1.23 |

40

なお、上記の図 2 3 に示した第 6 実施形態の構成では、各信号光  $L S_1 \sim L S_N$  にそれぞれ対応させて設けられたモニタ部をアレイ化する一例を示したが、例えば図 2 4 に示すように、P M D 発生部アレイ 1 2 0 から出力される各信号光  $L S_1 \sim L S_N$  を共通の光スイッチ 1 4 1 によって切り替えながら出力モニタ 1 4 2 に送り、各信号光  $L S_1 \sim L S_N$  に対応した出力モニタの共通化して一層の小型化および低コスト化の効果をすることも可能である。

【 0 0 7 3 】

以上、本明細書で開示した主な発明について以下にまとめる。

【 0 0 7 4 】

50

(付記 1) 入力される信号光の偏波状態を制御する偏波制御部と、  
該偏波制御部で制御された信号光の直交する偏波モード成分間に群遅延時間差を与えることが可能な複屈折性を持つ光伝送媒体を有し、該光伝送媒体に希土類元素を添加した偏波モード分散発生部と、  
該偏波モード分散発生部の光伝送媒体に対して、前記希土類元素を励起状態とすることが可能な励起光を与える励起光供給部と、  
前記偏波モード分散発生部から出力される信号光の偏波モード分散発生状態をモニタするモニタ部と、  
該モニタ部でモニタされる偏波モード分散が低減されるように前記偏波制御部を制御する制御部と、  
を備えて構成されたことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

10

## 【0075】

(付記 2) 付記 1 に記載の光増幅器であって、  
前記モニタ部は、前記偏波モード分散発生部から出力される信号光のパワーをモニタし、  
前記制御部は、前記モニタ部でモニタされる信号光のパワーを入力時のパワー以上にすると利得が得られるように前記励起光供給部を制御することを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

## 【0076】

(付記 3) 付記 1 に記載の光増幅器であって、  
前記モニタ部は、前記偏波モード分散発生部から出力される信号光のパワーをモニタし、  
前記制御部は、前記モニタ部でモニタされる信号光のパワーが予め設定した値で一定となるように前記励起光供給部を制御することを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

20

## 【0077】

(付記 4) 付記 1 に記載の光増幅器であって、  
前記偏波モード分散発生部は、前記光伝送媒体として偏波保持ファイバを用い、該偏波保持ファイバのコア部分を中心とした光の伝搬領域に希土類元素を添加したことを特徴とする光増幅器。

## 【0078】

(付記 5) 付記 1 に記載の光増幅器であって、  
前記偏波モード分散発生部は、前記光伝送媒体として基板上に形成した複屈折性を持つ光導波路を用い、前記基板上の少なくとも光導波路に希土類元素を添加したことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

30

## 【0079】

(付記 6) 付記 5 に記載の光増幅器であって、  
前記光導波路は、ニオブ酸リチウムを材料とする光導波路であることを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

## 【0080】

(付記 7) 付記 5 に記載の光増幅器であって、  
前記光導波路は、平面光波回路に形成された屈折率可変の光導波路であることを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

40

## 【0081】

(付記 8) 付記 5 に記載の光増幅器であって、  
前記偏波制御部は、希土類元素を添加した光導波路型の光伝送媒体を有し、  
前記励起光供給部は、前記偏波制御部および前記偏波モード分散発生部の各光伝送媒体に励起光を供給することを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

## 【0082】

(付記 9) 付記 1 に記載の光増幅器であって、  
前記モニタ部は、前記偏波モード分散発生部から出力される信号光の一部をモニタ光として分岐する分岐器と、該分岐器で分岐されたモニタ光のパワーおよび偏波モード分散発生

50

状態をモニタする出力モニタと、信号光を透過し、励起光を遮断する特性を持ち、前記偏波モード分散発生部に供給された励起光の漏れ光が前記出力モニタに入力されることを阻止する励起光遮断デバイスと、を備えたことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

【0083】

(付記10) 付記9に記載の光増幅器であって、前記励起光遮断デバイスは、信号光を透過し、励起光を遮断する光フィルタを、前記偏波モード分散発生部および前記分岐器の間に位置する主信号系の光路上、または、前記分岐器および前記出力モニタの間に位置するモニタ系の光路上に配置したことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

10

【0084】

(付記11) 付記9に記載の光増幅器であって、前記励起光遮断デバイスは、信号光に比べて励起光に対する損失が大きい光アイソレータを、前記偏波モード分散発生部および前記分岐器の間に位置する主信号系の光路上に配置したことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

【0085】

(付記12) 付記1に記載の光増幅器であって、信号光を透過し、励起光と前記偏波モード分散発生部における信号光の増幅に伴って発生する自然放出光とを遮断する特性を持った光フィルタを、信号光が伝搬する光路上に備えて構成されたことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

20

【0086】

(付記13) 付記1に記載の光増幅器であって、前記偏波モード分散発生部は、複屈折性を持つ複数の光伝送媒体を縦続接続して構成されるとき、該複数の光伝送媒体のうちの少なくとも信号光入力側に位置する光伝送媒体に対して希土類元素が添加され、前記励起光供給部は、前記偏波モード分散発生部の希土類元素が添加された光伝送媒体に前方励起光を供給する構成としたことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

【0087】

(付記14) 付記1に記載の光増幅器であって、前記偏波モード分散発生部は、複屈折性を持つ複数の光伝送媒体を縦続接続して構成されるとき、該複数の光伝送媒体のうちの少なくとも信号光出力側に位置する光伝送媒体に対して希土類元素が添加され、前記励起光供給部は、前記偏波モード分散発生部の希土類元素が添加された光伝送媒体に後方励起光を供給する構成としたことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

30

【0088】

(付記15) 付記1に記載の光増幅器であって、前記偏波モード分散発生部は、複屈折性を持つ複数の光伝送媒体を縦続接続して構成されるとき、該複数の光伝送媒体に対して希土類元素が添加され、前記励起光供給部は、前記偏波モード分散発生部の希土類元素が添加された複数の光伝送媒体のうちの信号光入力側に位置する光伝送媒体に前方励起光を供給し、信号光出力側に位置する光伝送媒体に後方励起光を供給する構成としたことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

40

【0089】

(付記16) 付記1に記載の光増幅器を1つのユニットとして、複数のユニットを波長グループに含まれる複数の信号光に対応させて並列的に設けた光増幅器であって、前記各ユニットの共通する構成部分を一体化したことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

【0090】

50

(付記 17) 付記 16 に記載の光増幅器であって、前記各ユニットの共通するモニタ部を一体化した構成は、各ユニットの偏波モード分散発生部から出力される各々の信号光いずれか 1 つを選択し、当該信号光の一部をモニタ光として出力する光スイッチと、該光スイッチから出力されるモニタ光の偏波モード分散発生状態および光パワーをモニタする、前記各ユニットで共通化された出力モニタとを備えたことを特徴とする偏波モード分散補償機能を有する光増幅器。

【0091】

#### 【発明の効果】

以上説明したように、本発明の偏波モード分散補償機能を有する光増幅器によれば、従来、PMD 補償器に対して別途設けていた挿入損失補償用の光増幅器について、複屈折性を持つ光伝送媒体に希土類元素を添加して PMD 発生媒体と光増幅媒体を共通化すると共に、モニタ部や制御部についても共有化したことによって、PMD 補償機能と光増幅機能を単一の構成で実現した高機能かつ小型の光増幅器を低コストで提供することが可能になる。また、モニタ部の結果に基づいて偏波制御部と励起光供給部の双方を同時に制御するようにしたことで、信号光に発生した PMD の補償とその PMD 補償により生じる損失の補償とを確実に安定して行うことができる。さらに、モニタ部でモニタされる信号光のパワーが予め設定した値で一定となるように励起光供給部の制御を行うようにすれば、信号光の任意の入力レベルに対して出力レベルが一定になるため安定した出力を得ることができ、モニタ部への入力レベルを最適化することも可能になる。

10

#### 【図面の簡単な説明】

20

【図 1】本発明に係る光増幅器の第 1 実施形態の構成を示す機能ブロック図である。

【図 2】上記第 1 実施形態に用いられる PANDA 型偏波保持ファイバの断面構造の一例を示す図である。

【図 3】上記第 1 実施形態においてファイバ型の融着 WDM カプラを励起光供給部の合波器として用いた一例を示す図である。

【図 4】上記第 1 実施形態において空間レンズ結合型の構成を励起光供給部の合波器に適用した一例を示す図である。

【図 5】上記第 1 実施形態に用いられるモニタ部の具体的な構成例を示す図である。

【図 6】上記第 1 実施形態に関連した前方励起型の構成例を示す機能ブロック図である。

【図 7】上記第 1 実施形態に関連した双方向励起型の構成例を示す機能ブロック図である

30

【図 8】本発明に係る光増幅器の第 2 実施形態の構成を示す機能ブロック図である。

【図 9】上記第 2 実施形態に用いられる LN 導波路型の偏波制御部の一例を示す図である。

【図 10】上記第 2 実施形態に用いられる LN 導波路型の PMD 発生部の一例を示す図である。

【図 11】上記第 2 実施形態において導波路型の構成を励起光供給部の合波器およびモニタ部の分岐器に適用した一例を示す図である。

【図 12】上記第 2 実施形態に関連した PLC 型の構成例を示す機能ブロック図である。

【図 13】本発明に係る光増幅器の第 3 実施形態に用いられるモニタ部の構成を示すブロック図である。

40

【図 14】上記第 3 実施形態に用いられる光フィルタの透過特性の一例を示す図である。

【図 15】上記第 3 実施形態に関連した光フィルタの他の配置例を示すブロック図である。

【図 16】上記第 3 実施形態に関連して光フィルタに代えて光アイソレータを用いた一例を示すブロック図である。

【図 17】本発明に係る光増幅器の第 4 実施形態の構成を示す機能ブロック図である。

【図 18】上記第 4 実施形態に用いられる光フィルタの透過特性の一例を示す図である。

【図 19】本発明に係る光増幅器の第 5 実施形態について低 NF 特性を実現可能にする一例を示す機能ブロック図である。

50

【図 2 0】上記第 5 実施形態について高効率を実現可能にする一例を示す機能ブロック図である。

【図 2 1】上記第 5 実施形態について低 N F 特性および高利得を実現可能にする一例を示す機能ブロック図である。

【図 2 2】図 2 1 の構成に関連した他の一例を示す機能ブロック図である。

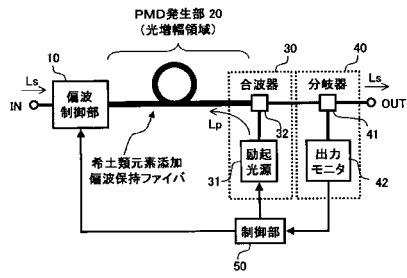
【図 2 3】本発明に係る光増幅器の第 6 実施形態の構成を示す機能ブロック図である。

【図 2 4】上記第 6 実施形態に関連した他の構成例を示す機能ブロック図である。

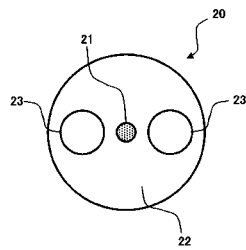
【符号の説明】

|                                           |                    |    |
|-------------------------------------------|--------------------|----|
| 1 0 , 1 0 ' , 1 0 "                       | 偏波制御部              |    |
| 1 1                                       | L N 基板             | 10 |
| 1 2                                       | 希土類元素添加 L N 導波路    |    |
| 1 3                                       | T E - T M コンバータ用電極 |    |
| 1 4                                       | 位相シフト用電極           |    |
| 2 0 , 2 0 ' , 2 0 " , 7 0 , 7 0 a ~ 7 0 c | P M D 発生部          |    |
| 2 1                                       | 希土類元素添加コア          |    |
| 2 2                                       | クラッド               |    |
| 2 3                                       | 応力付与部              |    |
| 2 4 A , 2 4 B                             | L N 基板             |    |
| 2 5 A , 2 5 B                             | 希土類元素添加 L N 導波路    |    |
| 2 6                                       | T E - T M コンバータ    | 20 |
| 3 0                                       | 励起光供給部             |    |
| 3 1                                       | 励起光源               |    |
| 3 2                                       | 合波器                |    |
| 4 0 , 4 0 '                               | モニタ部               |    |
| 4 1                                       | 分岐器                |    |
| 4 2 , 1 4 2                               | 出力モニタ              |    |
| 4 3                                       | 光フィルタ              |    |
| 4 4 , 8 0                                 | 光アイソレータ            |    |
| 5 0                                       | 制御部                |    |
| 6 0 A , 6 0 B                             | 光フィルタ              | 30 |
| 7 1 , 7 3                                 | 偏波保持ファイバ           |    |
| 7 2                                       | 位相シフト              |    |
| 1 1 0                                     | 偏波制御部アレイ           |    |
| 1 2 0                                     | P M D 発生部アレイ       |    |
| 1 3 0                                     | 励起光源アレイ            |    |
| 1 4 0                                     | モニタ部アレイ            |    |
| 1 4 1                                     | 光スイッチ              |    |

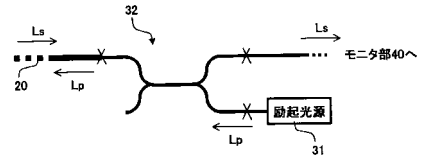
【図 1】



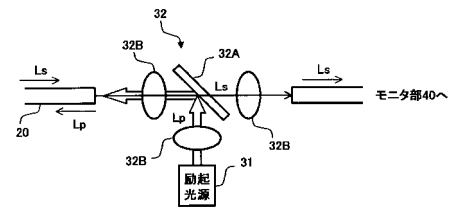
【図 2】



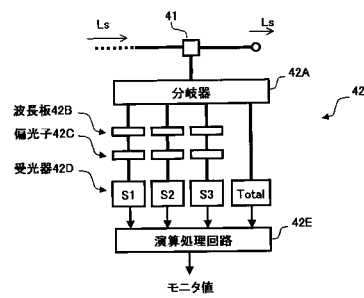
【図 3】



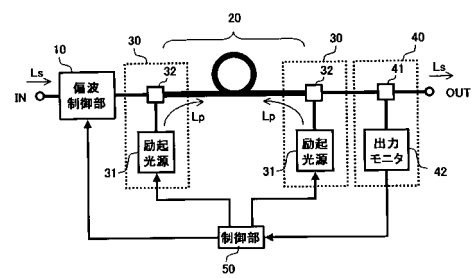
【図 4】



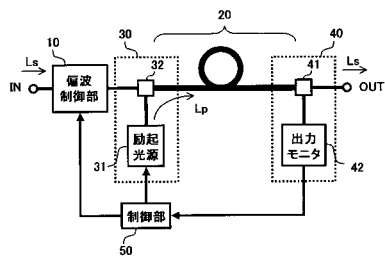
【図 5】



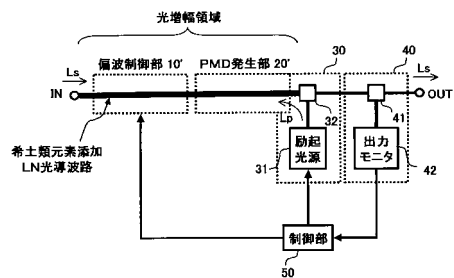
【図 7】



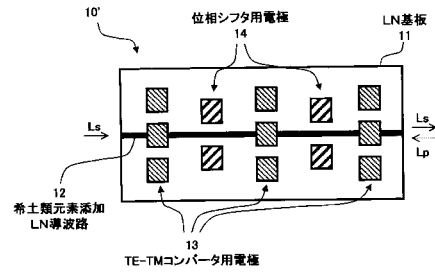
【図 6】



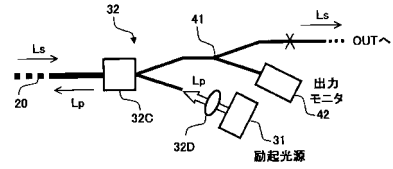
【図 8】



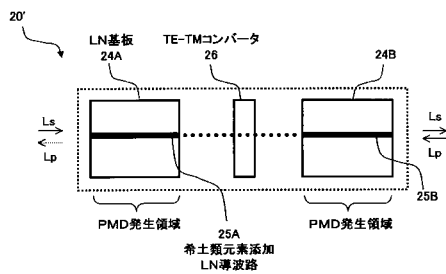
【図 9】



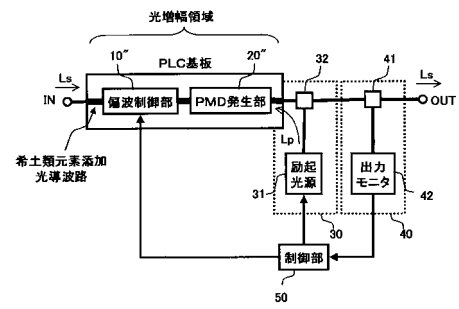
【図 11】



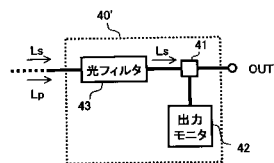
【図 10】



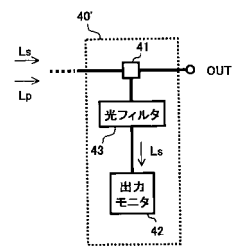
【図 12】



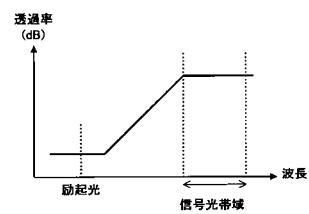
【図 13】



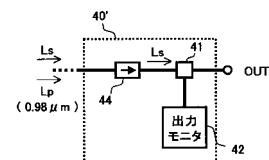
【図 15】



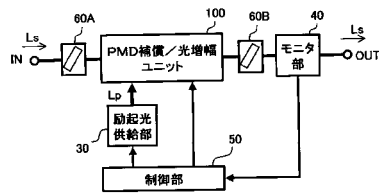
【図 14】



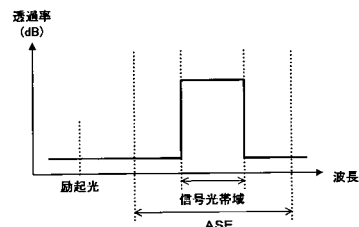
【図 16】



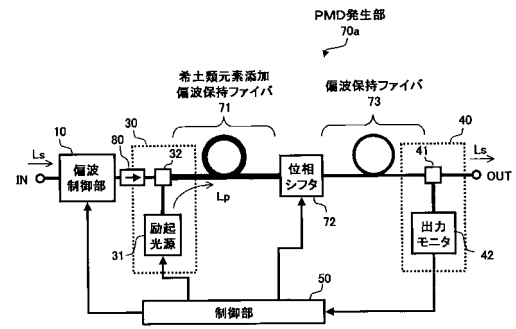
【図 17】



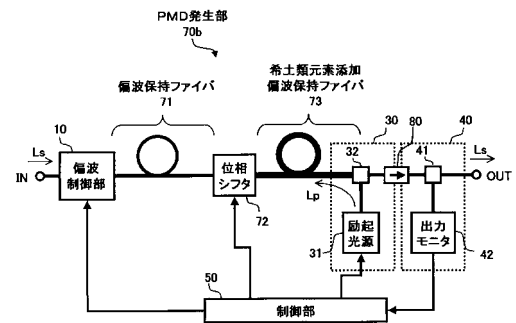
【図 18】



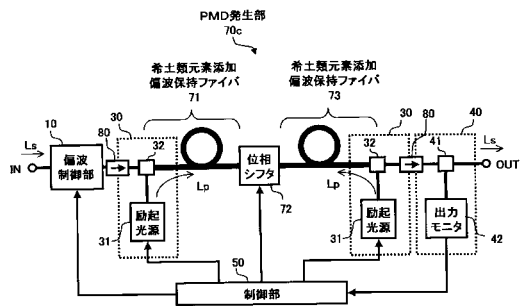
【図 19】



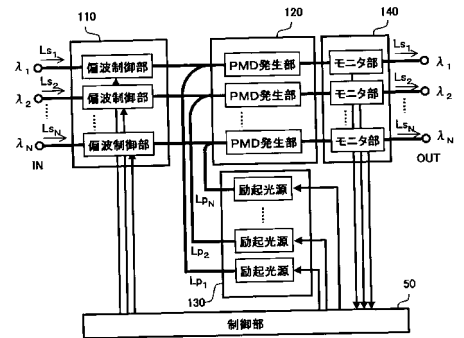
【図 20】



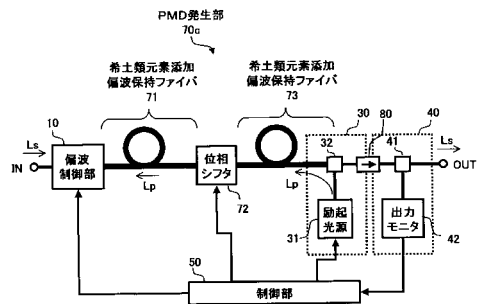
【図 21】



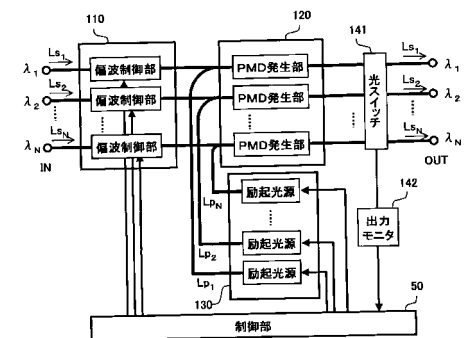
【図 23】



【図 22】



【図 24】



## フロントページの続き

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

F I

テーマコード(参考)

H 0 4 B 10/18

F ターム(参考) 2H079 AA02 AA12 BA02 CA08 DA03 EA03 FA01 HA08  
5F072 AB09 AK06 HH02 HH04 HH09 JJ01 JJ20 KK15 KK30 PP07  
YY17  
5K102 AA01 AA11 AA15 KA05 KA42 MA03 MB01 MB06 MC12 MD01  
MD03 MH04 MH13 MH21 MH22 PA03 PA12 PA16 PC03 PC05  
PC12 PC15 PD12 PH13 PH21 PH23 PH43 PH48 PH49 RB01  
RB07