

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7635805号
(P7635805)

(45)発行日 令和7年2月26日(2025.2.26)

(24)登録日 令和7年2月17日(2025.2.17)

(51)国際特許分類	F I		
H 0 4 B 10/291 (2013.01)	H 0 4 B 10/291		
H 0 4 B 10/25 (2013.01)	H 0 4 B 10/25		
G 0 2 F 1/35 (2006.01)	G 0 2 F 1/35	5 0 1	
H 0 4 J 14/00 (2006.01)	H 0 4 J 14/00		

請求項の数 10 (全17頁)

(21)出願番号	特願2023-140118(P2023-140118)	(73)特許権者	000004237 日本電気株式会社 東京都港区芝五丁目7番1号
(22)出願日	令和5年8月30日(2023.8.30)	(74)代理人	100103894 弁理士 家入 健
(62)分割の表示	特願2022-35924(P2022-35924)の分割	(72)発明者	ル タヤンディエ ドゥ ガボリ エマニュエル 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
原出願日	平成30年4月11日(2018.4.11)	(72)発明者	松本 恵一 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
(65)公開番号	特開2023-160879(P2023-160879A)	審査官	後澤 瑞征
(43)公開日	令和5年11月2日(2023.11.2)		
審査請求日	令和5年8月30日(2023.8.30)		
(出願人による申告)平成28年度、国立研究開発法人情報通信研究機構「高度通信・放送研究開発委託研究／空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発」、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願			

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光増幅器及び光増幅方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

信号光の増幅に使用される励起光を出力する励起光源と、
前記励起光を使ったクラッド励起によって、前記信号光に対する分布型増幅器を構成するマルチコアファイバと、を備え、
前記励起光源は、多重化されたマルチモードレーザ光を出力し、
前記マルチコアファイバの内側クラッドは、前記信号光の伝搬方向に沿って直径が増加する光増幅器。

【請求項2】

前記信号光に対する集中型増幅器をさらに備え、
前記集中型増幅器は、エルビウム以外の希土類元素ドーパのマルチコアファイバを含む請求項1に記載の光増幅器。

【請求項3】

前記信号光に対する集中型増幅器をさらに備え、
前記集中型増幅器は、前記分布型増幅器と直列に配置され、または、前記分布型増幅器の内部に含まれている
請求項1に記載の光増幅器。

【請求項4】

信号光の増幅に使用される励起光を出力する励起光源と、
前記励起光を使ったクラッド励起によって、前記信号光に対する分布型増幅器を構成する

マルチコアファイバと、

前記信号光に対する集中型増幅器と、を備え、

前記励起光源は、多重化されたマルチモードレーザ光を出力し、

前記励起光源からの前記多重化されたマルチモードレーザ光は、前記分布型増幅器及び前記集中型増幅器の両方に使用される光増幅器。

【請求項 5】

前記励起光源は、複数個のレーザダイオードと、前記複数個のレーザダイオードからの複数の出力光を多重化する光カプラと、を含む

請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載の光増幅器。

10

【請求項 6】

前記励起光は、波長多重及びモード多重の少なくとも一方によって多重化されている

請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の光増幅器。

【請求項 7】

前記信号光は、波長分割多重及び空間分割多重の少なくとも一方によって多重化されている

請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の光増幅器。

【請求項 8】

前記分布型増幅器は、光通信波長帯のマルチバンドに対応可能であり、

前記マルチバンドは、L バンド、C バンド及び S バンドの少なくともいずれか一つを含む

請求項 1 乃至 7 のいずれか一項に記載の光増幅器。

20

【請求項 9】

信号光の増幅に使用される励起光を出力し、

前記励起光を使ったクラッド励起によって、マルチコアファイバは前記信号光に対する分布型増幅器を構成し、

多重化されたマルチモードレーザ光を前記励起光として用い、

前記マルチコアファイバの内側クラッドは、前記信号光の伝搬方向に沿って直径が増加する光増幅方法。

【請求項 10】

信号光の増幅に使用される励起光を出力し、

前記励起光を使ったクラッド励起によって、マルチコアファイバは前記信号光に対する分布型増幅器を構成し、

多重化されたマルチモードレーザ光を前記励起光として用い、

前記多重化されたマルチモードレーザ光は、前記分布型増幅器及び前記信号光に対する集中型増幅器の両方に使用される

光増幅方法。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光増幅器及び光増幅方法に関する。

40

【背景技術】

【0002】

光通信分野では、光ファイバリンクの容量を増加させることが望ましい。これは、光ファイバリンク上で伝送される信号のスペクトル効率 (S E : Spectral Efficiency) を増加させることで実現できる。これを達成する一般的な方法は、送信される情報に対してより効率的な変調フォーマットを使用することである。この変調フォーマットは、波長分割多重 (W D M : Wavelength Division Multiplexing) と組み合わせて用いることができる。また、長距離伝送の可能性を維持しつつ、1 本のファイバによる伝送容量を増大させるため、空間分割多重 (S D M : Space Division Multiplexing) が用いられる。

【0003】

50

非特許文献 1 では、40 波長の 128 Gb/s PM-QPSK (Polarization Multiplexed - Quadrature Phase Shift Keying: 偏波多重直交位相シフトキーイング) 信号を 6,160 km 以上の伝送に用いられる、7 つのコアを含むマルチコアファイバ (MCF: Multi Core Fiber) で実装された SDM が開示されている。MCF は、同一ファイバ内で光信号を伝送するいくつかのコアと、MCF を利得媒体とするファイバ増幅器からなるマルチコア (MC: multicore) - エルビウムドープファイバ増幅器 (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) からなる。MC-EDFA は、直接コア励起法により、分離された励起光源で 1 つの MCF 利得媒体を含む各コアを励起する。また、特許文献 1 では、コアに希土類元素をドープした他のマルチコアファイバ増幅器が提案されている。

【0004】

10

非特許文献 1 のシステムによれば、システムの容量を、MCF のコア数倍、すなわち非特許文献 1 のコア数の 7 倍にすることができる。MCF を用いることにより、各コアにおける WDM に加えて、多数のコアを用いて光信号を空間的に多重化することが可能である。これにより、伝送距離を犠牲にすることなく、ファイバの伝送容量を増大させることができる。

【0005】

非特許文献 2 は、個別コア励起 (ICP: Individual Core Pumping)、共有コア励起 (SCP: Shared Core Pumping) 及び共通クラッド励起 (CCP: Common Cladding Pumping) などの様々な異なる増幅方法を開示している。非特許文献 2 では、これらの技術を MC-EDFA に適用している。

20

【0006】

さらに、ラマン増幅も、優れた雑音特性を有する、広く知られた増幅プロセスである。ラマン増幅方式の一例が非特許文献 3 によって提案されている。この方式は、誘導ラマン散乱 (SRS: Stimulated Raman Scattering) に依拠し、ファイバ中のフォノン放出により、短波長励起光 (高周波) が長波長 (低周波) の信号を非線形状態で増幅する。典型的には、1430 nm ~ 1490 nm の範囲の励起光を使用して、C 及び L バンドの一方または両方の信号を増幅する。ラマン増幅は伝送ファイバ内の広範囲で起こるため、分布増幅である。ラマン増幅の雑音特性は EDFA の雑音特性より優れている。ハイブリッド EDFA / ラマン増幅を実現するために、EDFA にラマン増幅を適用することができる。しかし、非特許文献 3 に記載されるように、ラマン増幅は EDFA よりも消費電力が大きい。そのため、電源供給が制限されると、低雑音特性のラマン増幅の利用は制限される。

30

【0007】

さらに、ラマン増幅に関連する 2 つの問題が知られている。第 1 には、異なる波長の励起光が波長多重される (すなわち WDM) ことである。しかし、高出力励起光は広いスペクトルを有するので、多重化された励起光のスペクトルはいくつかの領域で重複し得る。重複したスペクトル部分の波長領域における多重化は、異なる励起光の重複の抑制につながり、増幅には使用されない。これにより、非効率な消費電力が増加する。

【0008】

第 2 に、ラマン増幅は、信号有効領域による励起光パワーの比である、ファイバコアに依存した励起光のパワー密度に依存する。このため、伝送光信号の劣化が激しいことからファイバコア直径を調整することができず、ラマン増幅を伝送距離に応じて調整することができない。したがって、ラマン増幅の設計は、伝送距離パラメータの観点から、信号対雑音及び電力消費の点で最適に設計できない。

40

【0009】

加えて、特許文献 2 及び非特許文献 4 において、MCF による SDM に対するラマン増幅が提案されている。この場合には、MCF 内のコアのそれぞれに励起光を与え、各コアでラマン増幅を行う。よって、MCF による SDM に対するラマン増幅は、大容量化及び並列化を実現できる。

【先行技術文献】

50

【特許文献】

【 0 0 1 0 】

【文献】米国特許公開第 2 0 0 8 / 0 0 1 8 9 8 9 号明細書

【文献】米国特許公開第 2 0 0 7 / 0 2 6 8 5 6 9 号明細書

【非特許文献】

【 0 0 1 1 】

【文献】H. Takahashi et al., "First Demonstration of MC-EDFA-Repeatered SDM Transmission of 40 x 128-Gbit/s PDM-QPSK Signals per Core over 6,160-km 7-core MCF", ECOC 2012, paper Th.3.C.3.

【文献】E. Le Taillandier de Gabory et al., "Transmission of 256Gb/s PM-16QAM Signal through 7-Core MCF and MC-EDFA with Common Cladding and Variable Shared Core Pumping for Reduction of Power Consumption", ECOC 2017, paper M.1.E.2

10

【文献】J-X. Cai et al., "49.3 Tb/s Transmission Over 9100 km Using C+L EDFA and 54 Tb/s Transmission Over 9150 km Using Hybrid-Raman EDFA", Journal of Lightwave technology, Vol. 33, No. 13, pages 2724-2734.

【文献】T. Mizuno et al., "Hybrid Cladding-pumped EDFA/Raman for SDM Transmission Systems Using Core-by-core Gain Control Scheme", ECOC 2017, paper M.1.E.3

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 2 】

しかし、上述のラマン増幅には、いくつかの問題がある。非特許文献 3 に記載されるように、ラマン増幅は EDFA よりも消費電力が大きい。そのため、電源供給が制限されると、低雑音特性のラマン増幅の利用は制限される。また、非特許文献 4 における MCF による SDM に対するラマン増幅は、大容量化及び並列化を実現できる。しかしながら、各コアに励起光を供給する必要があるため、励起光を供給するための多数の装置が必要となる。その結果、コストが高くなり、装置の設置面積が大きくなる。そのため、ラマン光増幅器の消費電力、コスト及びサイズの低減が求められている。

【 0 0 1 3 】

30

本発明は、上記の事情に鑑みてなされたものであり、消費電力及びサイズを抑えつつラマン増幅を行うことができる光増幅器を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 4 】

本発明の一態様である光増幅器は、信号光の増幅に使用される励起光を出力する励起光源と、前記励起光を使ったクラッド励起によって、前記信号光に対する分布型増幅器を構成するマルチコアファイバと、を備え、前記励起光源は、多重化されたマルチモードレーザ光を出力するものである。

【 0 0 1 5 】

本発明の一態様である光増幅方法は、信号光の増幅に使用される励起光を出力し、前記励起光を使ったクラッド励起によって、マルチコアファイバは前記信号光に対する分布型増幅器を構成し、多重化されたマルチモードレーザ光を前記励起光として用いるものである。

40

【発明の効果】

【 0 0 1 6 】

本発明によれば、消費電力及びサイズを抑えつつラマン増幅を行うことができる光増幅器を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 7 】

【図 1】実施の形態 1 にかかる光通信システムを模式的に示すブロック図である。

【図 2】実施の形態 1 にかかるファイバラマン増幅器の構成を示す図である。

50

【図 3】実施の形態 1 にかかるファイバラマン増幅器の構成を示す図である。

【図 4】実施の形態 1 にかかる繰り返し配置された F R A の構成を示す図である。

【図 5】実施の形態 1 にかかるファイバラマン増幅器及び比較例のシミュレーション結果を示す図である。

【図 6】実施の形態 2 にかかるファイバラマン増幅器の構成を示す図である。

【図 7】レーザから放射された光及び励起光のスペクトルを示す図である。

【図 8】レーザの消費電力の比較を示す図である。

【図 9】実施の形態 3 にかかるファイバラマン増幅器の構成を示す図である。

【図 10】実施の形態 4 にかかるファイバラマン増幅器の構成を示す図である。

【図 11】多重光信号のパワーのシミュレーションを示す図である。

10

【図 12】実施の形態 5 にかかるファイバラマン増幅器の構成を示す図である。

【図 13】多重光信号のパワーのシミュレーションを示す図である。

【図 14】実施の形態 6 にかかるファイバラマン増幅器の構成を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。なお、図中、同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明は適宜省略する。

【0019】

実施の形態 1

実施の形態 1 にかかるファイバラマン増幅器について説明する。図 1 は、実施の形態 1 にかかる光通信システム 100 を模式的に示す図である。光通信システム 100 は、光通信装置 101 及び 102、ファイバラマン増幅器 (F R A : Fiber Raman Amplifier) 10 を有する。

20

【0020】

光通信装置 101 及び 102 は、複数のトランスポンダを有する、光トランシーバとして構成される。本実施の形態では、簡略化のため、光通信装置 101 が、F R A 10 を介して、光通信装置 102 へ多重光信号 S I G を出力する例について説明する。なお、光通信装置 102 が F R A を介して光通信装置 101 へ多重光信号を出力してもよいことは、言うまでもない。

【0021】

30

光通信装置 101 は、トランスポンダから出射された光信号を多重化して得られる多重光信号 S I G を出力する。ここで、トランスポンダから出射される光信号は、波長多重方式 (例えば、波長分割多重 (W D M : Wavelength Division Multiplexing)) と特定の多重方式 (例えば、空間分割多重 (S D M : Space Division Multiplexing)) とにより多重化される。

【0022】

光通信装置 101 から出力された多重光信号 S I G は、光通信装置 102 に送信される間に減衰する。よって、本構成では、多重光信号 S I G の減衰を補償するために、少なくとも一つの F R A 10 が光通信デバイス 101 と光通信デバイス 102 との間に設けられる。

40

【0023】

F R A 10 は、誘導ラマン散乱 (S R S : Stimulated Raman Scattering) により多重光信号 S I G を増幅する光増幅器として構成されている。なお、S R S による増幅をラマン増幅と称する。F R A 10 は、多重光信号 S I G を増幅して光通信装置 102 に出力する。これにより、光通信装置 102 は、適切な復調を行うのに十分なパワーを有する多重光信号 S I G を受信することができる。

【0024】

F R A 10 の構成について説明する。図 2 及び図 3 に、実施の形態 1 にかかる F R A 10 の構成を示す。F R A 10 は、マルチコアファイバ (M C F : Multicore Fiber) 110、W D M カブラ 120 及び光源 130 を有する。

50

【 0 0 2 5 】

M C F 1 1 0 は、ダブルクラッド構造を有し、7つのコア C 1 ~ C 7 を有する。M C F 1 1 0 の長さは、一般に数十キロメートル、例えば 8 0 キロメートルである。光通信装置 1 0 1 から出力される多重光信号 S I G は、コア C 1 ~ C 7 を介して伝送される。つまり、W D M によって多重化された多重光信号 S I G 中の光信号はコア C 1 ~ C 7 に分配されるため、M C F 1 1 0 中で S D M によって多重化される。

【 0 0 2 6 】

本構成では、コア C 1 ~ C 7 は内側クラッド C L 1 に含まれ、内側クラッド C L 1 は外側クラッド C L 2 に含まれる。外側クラッド C L 2 の屈折率は内側クラッド C L 1 の屈折率よりも低い。例えば、外側クラッド C L 2 は、内側クラッド C L 1 の表面に低屈折率樹脂の層を塗布して形成してもよい。

10

【 0 0 2 7 】

また、ダブルクラッド構造は、単一のクラッドと、この単一クラッドを囲む空気（空気層または空気孔）とによって構成されてもよい。この場合、空気の屈折率は一般に単一のクラッドよりも低いので、単一のクラッドを内側クラッド C L 1 として機能させることができ、かつ、空気を外側クラッド C L 2 として機能させることができる。

【 0 0 2 8 】

光源 1 3 0（第 1 の光源とも称する）は、レーザ装置やレーザダイオードなどの複数のレーザを有する。本実施の形態では、光源 1 3 0 は、マルチモードレーザである 3 つのレーザ 1 3 1 ~ 1 3 3 を有する。レーザ 1 3 1 ~ 1 3 3 は、それぞれ、励起光として M C F 1 1 0 に供給されるマルチモードレーザ光であるレーザ光 L 1 ~ L 3（第 1 のマルチモードレーザ光とも称する）を出力する。なお、レーザの数は適宜変更可能である。

20

【 0 0 2 9 】

例えば、レーザ 1 3 1 ~ 1 3 3 から出射されるレーザ光 L 1 ~ L 3 の中心波長は、所定の範囲内において異なっている。この範囲は、典型的には 1 4 3 0 n m ~ 1 4 9 0 n m である。レーザ光 L 1 ~ L 3 のそれぞれのパワーは、典型的には数ワットである。レーザ 1 3 1 ~ 1 3 3 のそれぞれは、非特許文献 3 及び非特許文献 4 で用いられるレーザのような単一モードレーザに比べて電力効率が高い。レーザ光のスペクトルの全部又は一部は、重ね合わされてもよい。

【 0 0 3 0 】

M C F 1 1 0 の出力（第 1 の端部とも称する）及び光源 1 3 0 の出力は、W D M カブラ 1 2 0 に接続される。W D M カブラ 1 2 0 は、M C F 1 1 0 を介して伝送された多重光信号 S I G を光通信装置 1 0 2 に出力できる。W D M カブラ 1 2 0 は、レーザ 1 3 1 ~ 1 3 3 から出射されたレーザ光 L 1 ~ L 3 を合波する。この場合、レーザ光 L 1 ~ L 3 を波長多重することができる。また、レーザ光 L 1 ~ L 3 は、波長多重される前に偏波多重されてもよい。

30

【 0 0 3 1 】

W D M カブラ 1 2 0（第 1 の光カブラとも称する）は、合波されたレーザ光を M C F 1 1 0 の内側クラッド C L 1 に結合することで、合波されたレーザ光は内側クラッド C L 1 を介して M C F 1 1 0 の入力に伝送される（第 2 の端部とも称する）。これにより、励起光 P L（第 1 の励起光とも称する）である合波されたレーザ光を用いて、コア C 1 ~ C 7 の全てを同時に励起する。M C F 1 1 0 はダブルクラッド構造を有しているため、ダブルクラッド構造を有しない M C F と同様に、内側クラッド C L 1 の外部において無駄になることなく、内側クラッド C L 1 を介して励起光 P L を伝送することができる。

40

【 0 0 3 2 】

ここで、多重光信号 S I G の伝送方向を順方向（第 1 の方向とも称する）とする。順方向とは反対の方向を逆方向（第 2 の方向とも称する）とする。M C F 1 1 0 では、励起光 P L は逆方向に伝送される。

【 0 0 3 3 】

本実施の形態では、光通信装置 1 0 1 及び 1 0 2 は、3 7 . 5 G H z のチャネル幅で P

50

M - 16 Q A M (位相変調 - 16 直交振幅変調 : Phase Modulation - 16 Quadrature Amplitude Modulation) の変調方式を用いた 200 G b / s の光信号を送受信することができる。各光通信装置から出力される多重光信号は、100 波長の光信号を含む。コア C 1 ~ C 7 のそれぞれは、最大 20 T b / s の光信号を送信することができるので、M C F 110 の総容量は最大で 140 T b / s となる。

【0034】

次に、F R A 10 の利点を検討するため、励起光がコアによって伝送される比較例について説明する。この例では、非特許文献 4 のように、M C F のコアでラマン増幅が直接的に行われる。この場合では、1 コア当たり 3 つのレーザ光を波長多重することで、広帯域化及び高利得化を図っている。よって、比較例では、1 コア当たり 3 つのレーザが必要である。したがって、140 T b / s の総容量を M C F 110 によって実現する場合、 $3 \times 7 = 21$ 個のレーザが必要である。

10

【0035】

これに対し、F R A 10 によれば、多重光信号 S I G のラマン増幅は、より少数の励起用レーザで実現することができる。これにより、F R A 全体のサイズを抑制し、低コストで製造する上で有利である。

【0036】

また、光通信装置 101 と光通信装置 102 との間の距離が数百 k m 以上の場合には、光通信装置 101 と光通信装置 102 との間に複数の F R A を直列的に配置してもよい。図 4 に、実施の形態 1 にかかる繰り返し配置された F R A の構成を示す。図 4 に示すように、N (N は、2 以上の整数) 個の F R A 10 __ 1 ~ 10 __ N が直列的に配置されている。

20

【0037】

上述のように、1 つの F R A 10 は、80 k m の 1 つの M C F 110 をカバーすることができる。これにより、F R A 10 __ 1 ~ 10 __ N は、 $N \times 80$ k m をカバーすることができる。例えば、光通信装置 101 と光通信装置 102 との間の距離が 400 k m である場合には、N は 5 に設定される。本構成によれば、多重光信号 S I G は F R A 10 __ 1 ~ 10 __ N で繰り返し増幅されるので、長距離伝送による多重光信号 S I G の減衰を適切に補償することができる。

【0038】

図 5 に、本構成及び比較例のシミュレーション結果を示す。図 5 において、実線は実施の形態 1 にかかる F R A に含まれるレーザの数を表す。破線は、比較例にかかる F R A を直列的に配置した場合のレーザ数を表す。

30

【0039】

比較例では、F R A の数が 1 つ増えると、レーザの数は 21 個増える。N = 5 のとき、レーザの数は 105 個にもなる。これに対し、本構成によれば、F R A の数が 1 つ増えるとレーザの数は 3 個しか増えない。N = 5 のとき、レーザの数はわずか 15 個である。

【0040】

よって、F R A を直列的に配置しても、本構成では、励起用レーザの数を減らすことができ、F R A の全体サイズ及びコストを抑えることができる。

【0041】

40

実施の形態 2

次に、実施の形態 2 にかかるファイバラマン増幅器について説明する。図 6 に、実施の形態 2 にかかる F R A 20 の構成を模式的に示す。F R A 20 は、F R A 10 の W D M カプラ 120 及び光源 130 を、空間分割多重 (S D M : Space Division Multiplex) カプラ 220 (第 1 の光カプラとも称する) 及び光源 230 (第 1 の光源とも称する) に置き換えた構成を有する。

【0042】

光源 230 は、レーザ 131 及び 132 とモードカプラ 230 A とを有する。換言すれば、光源 130 と比較して、光源 230 は、レーザ 133 を除去し、かつ、モードカプラ 230 A を追加した構成を有する。レーザ 131 及び 132 から出射されたレーザ光 L 1

50

及び L 2 は、入力において空間分割多重を行うモードカブラ 2 3 0 A によりモード多重される。励起光 P L である多重光は、S D M カブラ 2 2 0 の入力に供給される。S D M カブラ 2 2 0 は、励起光 P L を M C F 1 1 0 の内側クラッド C L 1 に結合する。

【 0 0 4 3 】

よって、本構成によれば、実施の形態 1 と同様に、M C F を通じて伝送される多重光信号 S I G は、適宜 S R S によって増幅される。

【 0 0 4 4 】

また、F R A 2 0 の利点について説明する。図 7 に、光 L 1 及び L 2 と励起光 P L とのスペクトルを示す。図 7 では、F R A 2 0 内の励起光 P L を P L __ 2 で示している。また、図 7 には、例えば W D M カブラ 1 2 0 によりレーザ光 L 1 及び L 2 が波長多重された励起光 P L __ C が、比較例 A として示されている。

10

【 0 0 4 5 】

図 7 に示すように、励起光 P L __ 2 及び P L __ C のピークは、カブラの挿入損失により、レーザ光 L 1 及び L 2 のピークよりも低くなる。また、励起光 P L __ 2 及び P L __ C のピークはほぼ一致している。しかし、2 つのピーク間の中央領域では、励起光 P L __ 2 のパワーは、励起光 P L __ C のパワーよりも大きい。これは、励起光 P L __ 2 が波長多重ではなくモード多重されており、レーザ光 L 1 及び L 2 を追加損失なく多重化できるためである。

【 0 0 4 6 】

その結果、本構成によれば、F R A 1 0 に比べて、レーザが発するレーザ光のパワーを低減することができる。図 8 に、レーザの消費電力の比較を示す。図 8 では、非特許文献 4 の 2 つのレーザの消費電力を比較例 B として示している。図 8 に示すように、F R A 2 0 は消費電力をさらに低減することができる。

20

【 0 0 4 7 】

実施の形態 3

次に、実施の形態 3 にかかるファイバラマン増幅器について説明する。図 9 に、実施の形態 3 にかかる F R A 3 0 の構成を示す。F R A 3 0 は、F R A 1 0 の M C F 1 1 0 を、M C F 3 1 0 に置換し、かつ、M C - E D F A (マルチコア - エルビウムドープファイバ増幅器 : Multi Core - Erbium Doped Fiber Amplifier) 3 4 0 を追加した構成を有する。本構成において、M C - E D F A 3 4 0 は、M C F 3 1 0 を介して S R S により増幅された多重光信号 S I G をさらに増幅する。なお、図 9 では、簡略化のため、外側クラッド C L 2 を省略している。

30

【 0 0 4 8 】

M C F 1 1 0 と同様に、M C F 3 1 0 もコア C 1 ~ C 7 を有する。しかし、M C F 3 1 0 の内側クラッド C L 1 の入力端の直径 D 1 は、出力端の直径 D 2 よりも小さい。内側クラッド C L 1 の直径は、順方向 (または逆方向) に連続的に変化する。具体的には、内側クラッド C L 1 の直径は、入力端から出力端に向かって連続的に増加する。

【 0 0 4 9 】

この場合、実施の形態 1 と同様に、励起光 P L は逆方向へ伝送される。M C F 3 1 0 の出力端における励起光 P L のパワー密度は、大きな直径 D 2 により低下し、これによりラマン増幅の利得も低下する。また、M C F 3 1 0 の出力端からの距離が長くなると、S R S による消費のために、励起光のパワーが低下する。

40

【 0 0 5 0 】

すなわち、逆方向においては、励起光 P L のパワーが減少するのにしたがって、内側クラッド C L 1 の直径も減少する。よって、励起光 P L のパワー密度 (すなわち、ラマン増幅の利得) は、逆方向の長い距離において平均化される。また、内側クラッド C L 1 の直径の変化を適切に設計することにより、励起光 P L (すなわち、S R S による振幅利得) のパワー密度を長い距離において一定に保つことができる。

【 0 0 5 1 】

励起光 P L のパワー密度は平均化されるか、一定であるため、多重光信号 S I G の伝送

50

特性を変化させることなく、安定に保つことができる。したがって、本構成によれば、SRSによって、多重光信号SIGをより高品質に増幅することができる。

【0052】

実施の形態4

次に、実施の形態4にかかるファイバラマン増幅器について説明する。図10に、実施の形態4にかかるFRA40の構成を示す。FRA40は、ファイバラマン増幅器30のMCF310をMCF410に置換した構成を有する。

【0053】

MCF410は、MCF410A及び410Bを有する。MCF410Aは、MCF410の入力側に配置される。MCF410Bは、MCF410の出力側に配置される。MCF410A及び410Bは、スプライス点410Cでスプライスされる。

10

【0054】

MCF310と同様に、MCF410A及び410BもコアC1～C7を有する。MCF410A及び410Bのそれぞれの内側クラッドの直径は一定である。しかし、MCF410Aの内側クラッドの直径D3は、MCF410Bの内側クラッドの直径D4よりも小さい。

【0055】

MCF310と同様に、励起光PLのパワー密度は、MCF410内で、内側クラッドの直径の変化によって制御できる。したがって、実施の形態3と同様に、励起光PLのパワー密度を平均化し、又は、一定とすることができる。よって、本構成によれば、SRSによって、光信号をより高品質に増幅することができる。

20

【0056】

本構成では、内側クラッドの直径は段階的に変化している。その結果、FRA30よりも励起光PLのパワー密度を、より大まかに制御することができる。

【0057】

図11に、多重光信号のパワーのシミュレーションを示す。図11では、FRA30、FRA40、EDFAのみ(EDFA-ONLY)の場合及び比較例が示されている。EDFAのみの場合は、FRA30のMC-EDFA340のみによって増幅される場合である。比較例は、非特許文献4の場合である。

【0058】

ここでは、長さ80kmのMCFを有する3つのFRAを直列に配置することで、多重光信号SIGのパワーは、MC-EDFAによって80km毎に最大まで増幅される。80kmのMCFでの損失は0.2dB/kmである。

30

【0059】

図11に示すように、EDFAのみの場合には、FRAで減衰が補償されないため、多重光信号SIGのパワーが最も小さく、ダイナミックレンジが最大となる。非特許文献4の比較例では、EDFAのみの場合よりも40km後にパワーが大きくなるように、多重光信号SIGがSRSで増幅される。一般に、送信時の最小電力が大きくなるほど、受信点におけるOSNR(光信号対雑音比: Optical Signal to Noise Ratio)などの多重光信号SIGの品質が高くなる。したがって、比較例の多重光信号SIGの品質は、EDFAのみの場合よりも高くなる。

40

【0060】

また、FRA30及び40では、MCFの内側クラッドの直径によって、逆方向へのラマン増幅が制御されている。これにより、FRA30及び40では、多重光信号SIGのパワーが比較例に比べて好適に補償される。その結果、FRA30及び40のそれぞれにおける多重光信号SIGの最小パワーは、比較例よりも大きくなる。したがって、FRA30及び40によれば、受信点における多重光信号SIGの品質をより高めることができる。

【0061】

しかし、上述したように、FRA40における励起光PLのパワー密度は、FRA30

50

よりも大まかに制御されているため、F R A 4 0における多重光信号S I Gのパワーは、底部においては、F R A 3 0よりも減少する。

【 0 0 6 2 】

しかし、F R A 3 0のM C F 3 1 0の構成は、M C F 4 1 0の構成よりも複雑である。このため、連続的に直径が変化するM C F 3 1 0の製造は比較的困難である。これに対し、M C F 4 1 0は、互いに直径の異なるM C F 4 1 0 A及び4 1 0 Bをスプライスした単純な構成である。よって、励起光P Lのパワー密度の平均化の効果はM C F 3 1 0よりも劣るものの、M C F 4 1 0の方がM C F 3 1 0よりも容易に製造できる。

【 0 0 6 3 】

したがって、本構成によれば、低コスト製造と多重光信号の高品質な増幅とを両立可能なF R Aを提供することができる。

【 0 0 6 4 】

実施の形態 5

次に、実施の形態 5 にかかるファイバラマン増幅器について説明する。図 1 2 に、実施の形態 5 にかかるF R A 5 0の構成を示す。F R A 5 0は、F R A 3 0のM C F 3 1 0をM C F 1 1 0に置換し、光源 1 3 0を光源 5 3 0及び5 5 0に置換し、かつ、WDMカブラ 5 6 0を追加した構成を有する。WDMカブラ 5 6 0は、M C F 1 1 0の入力端に配置される。

【 0 0 6 5 】

光源 5 3 0（第 1 の光源とも称する）は、レーザ L 1 3 1 及び L 1 3 2 と同一のレーザ 5 3 1 及び 5 3 2（第 1 のレーザとも称する）を有する。レーザ 5 3 1 及び 5 3 2 は、それぞれレーザ光 L 1 1 1 及び L 1 2 を出射する。レーザ光 L 1 1 1 及び L 1 2 は WDM カブラ 1 2 0 で多重化され、多重化された励起光 P L 1（第 1 の励起光とも称する）は内側クラッド C L 1 に結合される。励起光 P L 1 は、逆方向に伝送される。

【 0 0 6 6 】

光源 5 5 0（第 2 の光源とも称する）は、レーザ L 1 3 1 及び L 1 3 2 と同一のレーザ 5 5 1 及び 5 5 2（第 2 のレーザとも称する）を有する。レーザ 5 5 1 及び 5 5 2 は、それぞれレーザ光 L 2 1 及び L 2 2（第 2 のマルチモードレーザ光とも称する）を出射する。レーザ光 L 2 1 及び L 2 2 は WDM カブラ 5 6 0（第 2 の光カブラとも称する）で多重化され、多重化された励起光 P L 2（第 2 の励起光とも称する）は内側クラッド C L 1 に結合される。励起光 P L 2 は、順方向に伝送される。

【 0 0 6 7 】

上述したように、M C F 1 1 0 の出力端からの距離（または WDM カブラ 1 2 0）が長くなるほど、励起光 P L 1 のパワー密度は小さくなる。一方、M C F 1 1 0 の出力端からの距離（または WDM カブラ 1 2 0）が長くなると、励起光 P L 2 のパワー密度は大きくなる。つまり、励起光 P L 1 のパワー密度の減少を、励起光 P L 2 の増加で補うことができる。これにより、励起光 P L 1 及び P L 2 の合計パワー密度を平均化することができる。また、M C F 1 1 0 を適切に設計して励起光のパワーを設定することで、励起光 P L 1 及び P L 2（すなわち、ラマン増幅の利得）の合計パワー密度をより長い距離で一定に保つことができる。

【 0 0 6 8 】

図 1 3 に、多重光信号のパワーのシミュレーションを示す。図 1 3 では、F R A 3 0、4 0 及び 5 0、ならびに E D F A のみ（E D F A - O N L Y）の場合が示されている。図 1 1 に示すように、E D F A のみの場合は、F R A 3 0 の M C - E D F A 3 4 0 のみによって増幅される場合である。図 1 3 に示すように、8 0 k m の長さの M C F を有する 3 つの F R A を直列的に配置することで、多重光信号 S I G のパワーが 8 0 k m 毎に最大まで増幅される。

【 0 0 6 9 】

図 1 3 に示すように、E D F A のみの場合には、F R A で減衰が補償されないため、多重光信号 S I G のパワーのダイナミックレンジが最も小さくなる。F R A 5 0 では、ラマ

10

20

30

40

50

ン増幅が P L 2 で励起される、入力端 (0 k m) 1 5 k m までの多重光信号のパワーが大きくなる。P L 2 により励起されたラマン増幅でパワーの減少を補償することができるので、多重光信号 S I G のパワーを減少させることができる。なお、電力の削減は、光通信デバイス 1 0 1 の出力電力と前段の F R A の M C - E D F A 3 4 0 による増幅とを適宜制御することで、実現することができる。

【 0 0 7 0 】

一般に、K e r r 効果に起因する非線形劣化による信号の歪みは、光信号の増幅を抑制することにより低減できる。したがって、本構成によれば、受信点における多重光信号の品質をさらに向上させることができる。

【 0 0 7 1 】

10

実施の形態 6

次に、実施の形態 6 にかかるファイバラマン増幅器について説明する。図 1 4 に、実施の形態 6 にかかる F R A 6 0 の構成を示す。F R A 6 0 は、F R A 1 0 の M C F 1 1 0 を、M C F 6 1 0 に置換した構成を有する。

【 0 0 7 2 】

M C F 6 1 0 は、M C F 6 1 0 A、M C - E D F A 6 1 0 B 及び M C F 6 1 0 C を有し、M C F 6 1 0 A、M C - E D F A 6 1 0 B 及び M C F 6 1 0 C は順方向に直列的に接続されている。M C F 6 1 0 A 及び M C F 6 1 0 C は、M C F 1 1 0 と同様の構成を有する。M C - E D F A 6 1 0 B は、M C F 1 1 0 と同様に、コア C 1 ~ C 7 を有する。M C - E D F A 6 1 0 B の長さは、通常、数十メートルである。M C F 6 1 0 C の長さは、通常、数十キロメートルである。

20

【 0 0 7 3 】

光源 1 3 0 では、レーザ 1 3 1 の中心波長は、E D F A による増幅に適した 1 4 8 0 n m である。レーザ 1 3 1 の出力パワーは、レーザ 1 3 2 及び 1 3 3 の出力パワーよりも高く設定されている。

【 0 0 7 4 】

次に、M C F 6 1 0 における光増幅について説明する。逆方向に伝送される励起光 P L は、ラマン増幅によって、M C F 6 1 0 C で減衰する。しかし、レーザ 1 3 1 の出力パワーはレーザ 1 3 2 及び 1 3 3 の出力パワーよりも高く、レーザ光 L 1 は M C F 6 1 0 C では完全には減衰しないので、残存したレーザ光 L 1 が M C - E D F A 6 1 0 B に入射する。よって、M C - E D F A 6 1 0 B は残存したレーザ光 L 1 によって励起され、多重光信号 S I G は M C - E D F A 6 1 0 B によって増幅される。

30

【 0 0 7 5 】

本構成によれば、多重光信号 S I G は、M C F 6 1 0 C でのラマン増幅のみならず、M C - E D F A 6 1 0 B を励起するためのレーザを追加配置することなく、M C - E D F A 6 1 0 B でも増幅することができる。

【 0 0 7 6 】

M C - E D F A 6 1 0 B を励起するための追加のレーザが必要な場合、追加のレーザは、光源 1 3 0 から数十キロメートル離れた位置に配置される。この場合、離れた場所に電力を供給する必要があるため、電源の構成は比較的大きなものとなる。これに対し、本構成によれば、M C - E D F A 6 1 0 B を励起するための追加のレーザを必要としないので、F R A のサイズを抑制することができる。

40

【 0 0 7 7 】

上述したように、本構成によれば、コンパクトな構成で光信号を効果的に増幅することができる。

【 0 0 7 8 】

その他の実施の形態

本発明は、本発明は上記実施の形態に限られたものではなく、趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更することが可能である。例えば、コアの数は、2 以上の任意の数とすることができる。

50

【 0 0 7 9 】

実施の形態 1、2 及び 6 において、MC - EDFA は、実施の形態 3 ~ 5 と同様に配置することができる。なお、MC - EDFA の個数は 1 個に限定されるものではなく、上述の実施の形態にかかる MC - EDFA を複数個、FRA 内に配置してもよい。この場合、FRA と光通信装置との間に MC - EDFA を直列に配置してもよい。また、EDFA に換えて、エルビウム以外の希土類元素をドープした他のファイバアンプを用いてもよい。

【 0 0 8 0 】

光源 130 及び 530 は、レーザ光をモード多重する光源 230 のような構成であってもよい。この場合、WDM カプラ 120 を SDM カプラ 220 等の SDM カプラに置き換えてもよい。

10

【 0 0 8 1 】

実施の形態 5 では、光源 550 は、レーザ光をモード多重する光源 230 のような構成であってもよい。この場合、WDM カプラ 560 を SDM カプラ 220 等の SDM カプラに置き換えてもよい。また、光源 560 におけるレーザ光のスペクトルの全部または一部を重ね合わせてもよい。

【 符号の説明 】

【 0 0 8 2 】

10、10__1 ~ 10__N、20、30、40、50、60 ファイバラマン増幅器 (FRA)

100 光通信システム

20

101、102 光通信装置

110、310、410、410A、410B、610、610A、610C マルチコアファイバ (MCF)

120、560 WDM カプラ

130、230、550 光源

131 ~ 132、531、532、551、552 レーザ

220 SDM カプラ

230A モードカプラ

340、610B マルチコア - エルビウムドープファイバ増幅器 (MC - EDFA)

C1 ~ C7 コア

30

CL1 内側クラッド

CL2 外側クラッド

L1 ~ L3、L11、L12、L21、L22 レーザ光

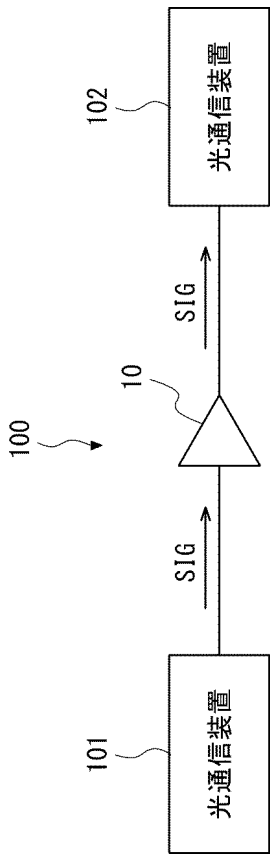
PL、PL1、PL2 励起光

40

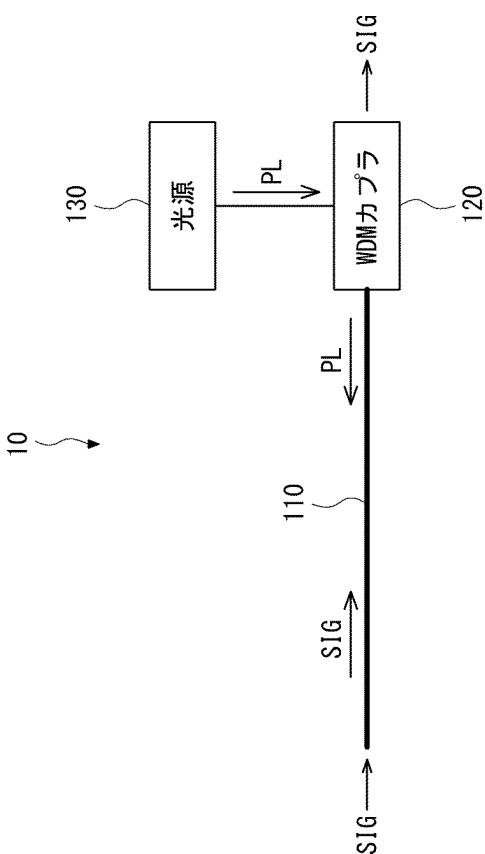
50

【図面】

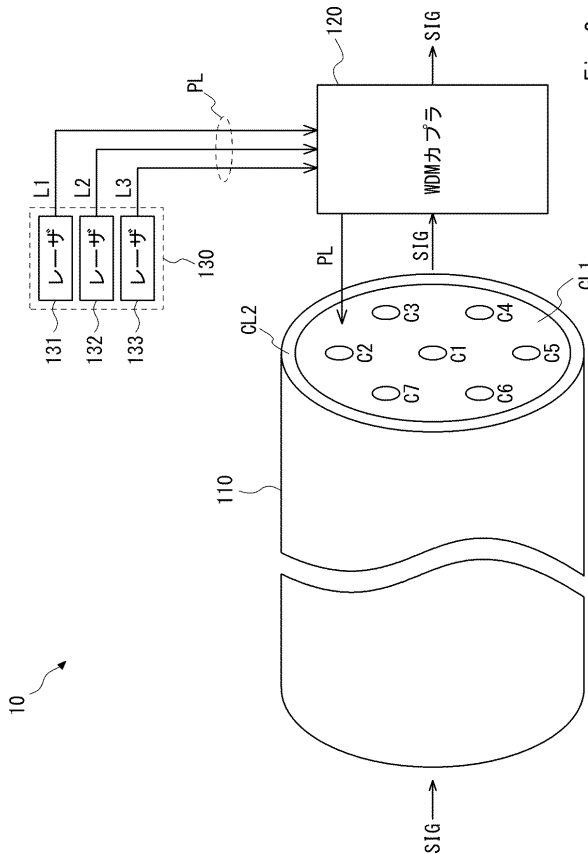
【図 1】



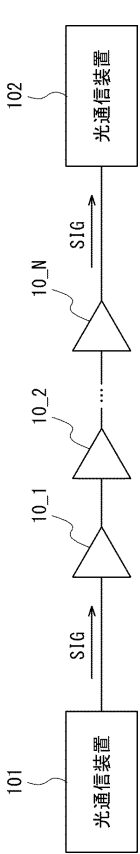
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

20

30

40

50

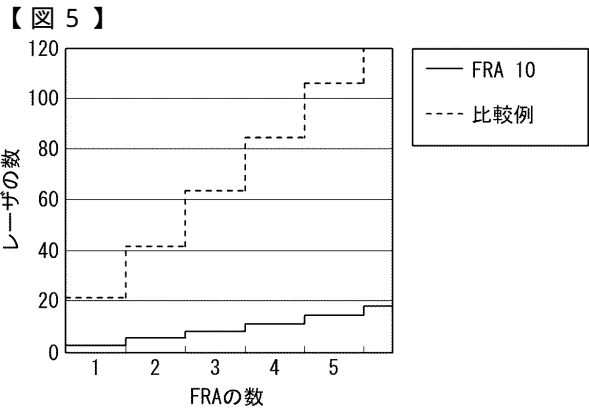


Fig. 5

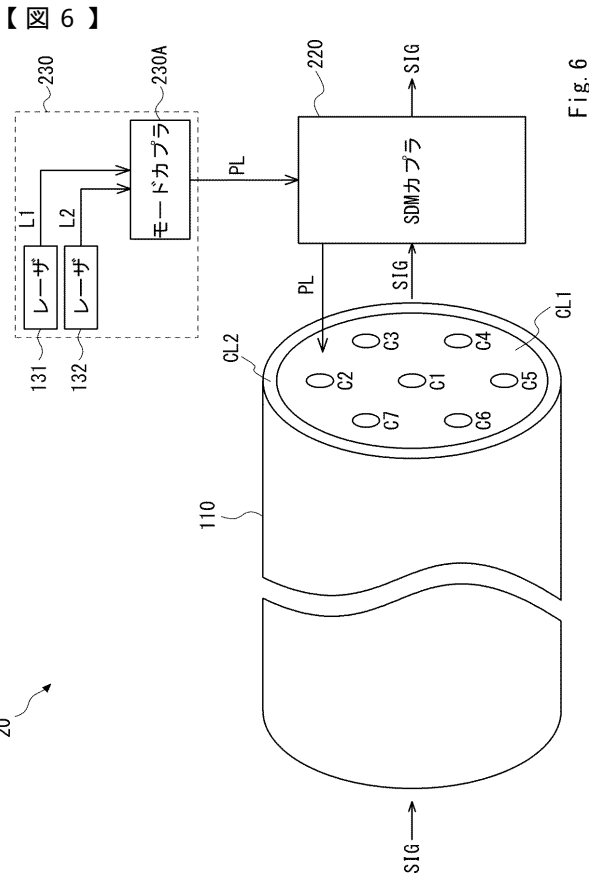


Fig. 6

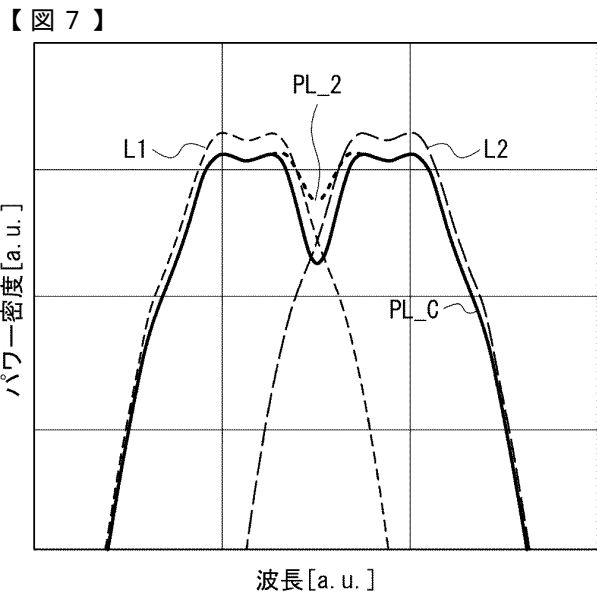


Fig. 7

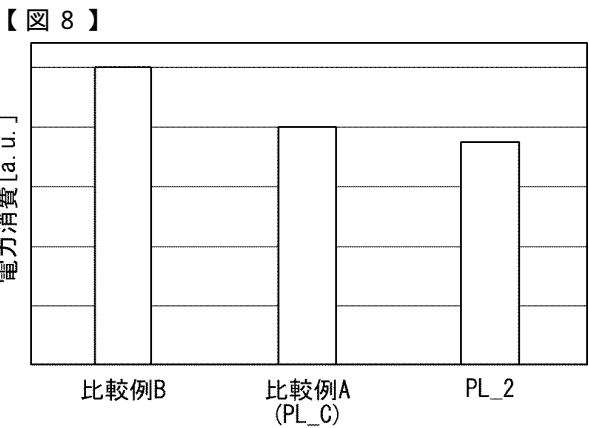


Fig. 8

10

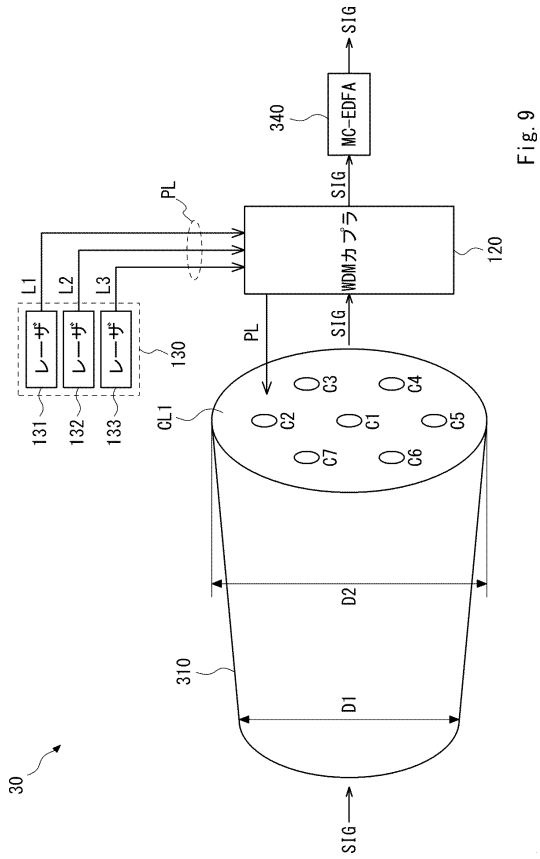
20

30

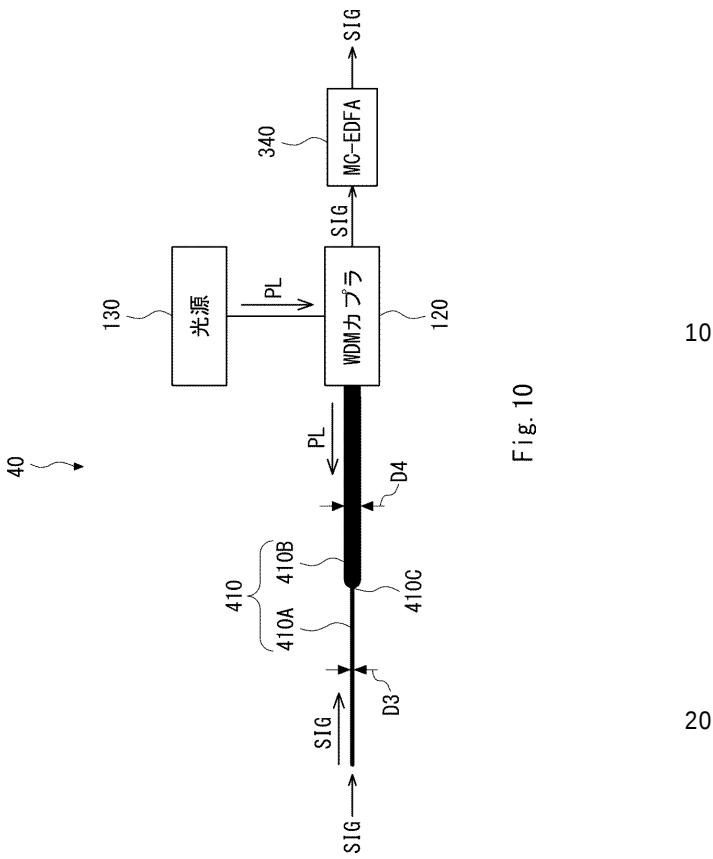
40

50

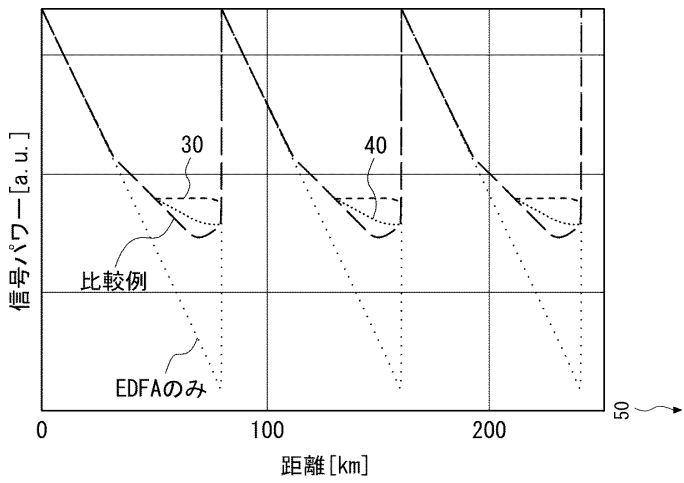
【図 9】



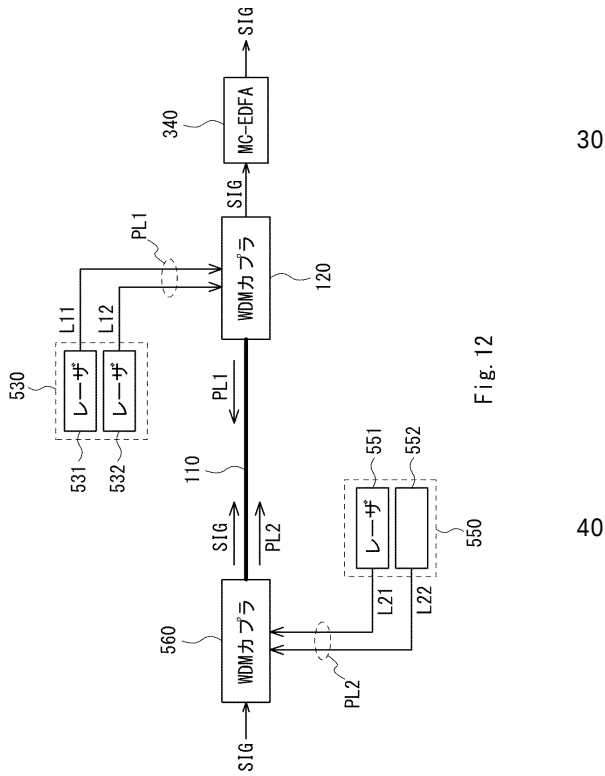
【図 10】



【図 11】



【図 12】



10

20

30

40

50

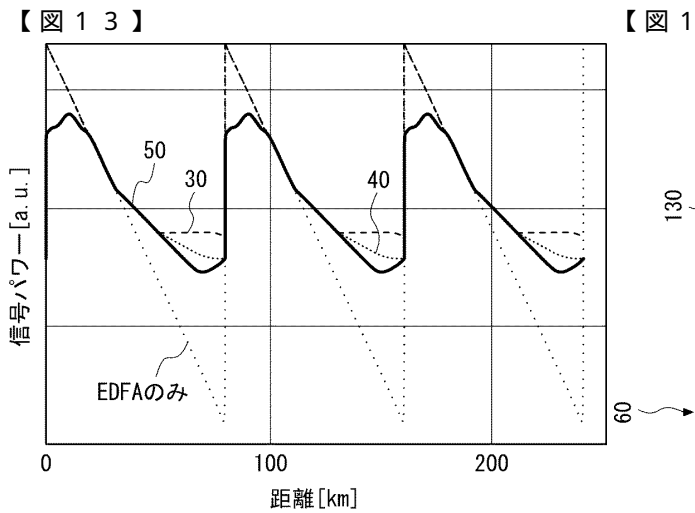


Fig. 13

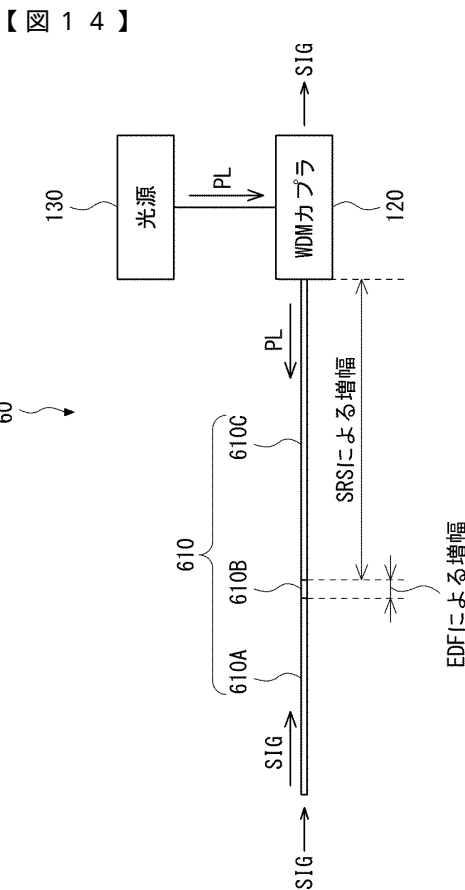


Fig. 14

10

20

30

40

50

フロントページの続き

(56)参考文献 特開 2 0 1 6 - 0 4 2 1 6 4 (J P , A)

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)

H 0 4 B 1 0 / 2 9 1

H 0 4 B 1 0 / 2 5

H 0 4 J 1 4 / 0 0 - 1 4 / 0 4

G 0 2 F 1 / 3 5