

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4078104号
(P4078104)

(45) 発行日 平成20年4月23日(2008.4.23)

(24) 登録日 平成20年2月8日(2008.2.8)

(51) Int.Cl. F 1
G 0 2 F 1/35 (2006.01) G 0 2 F 1/35 5 0 1

請求項の数 12 (全 53 頁)

(21) 出願番号	特願2002-79639 (P2002-79639)	(73) 特許権者	000005223
(22) 出願日	平成14年3月20日(2002.3.20)		富士通株式会社
(62) 分割の表示	特願平8-50679の分割		神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
原出願日	平成8年3月7日(1996.3.7)	(74) 代理人	100092978
(65) 公開番号	特開2002-344046 (P2002-344046A)		弁理士 真田 有
(43) 公開日	平成14年11月29日(2002.11.29)	(72) 発明者	木下 進
審査請求日	平成14年3月20日(2002.3.20)		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
(31) 優先権主張番号	特願平7-61345	審査官	佐藤 宙子
(32) 優先日	平成7年3月20日(1995.3.20)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		
(31) 優先権主張番号	特願平7-278530		
(32) 優先日	平成7年10月26日(1995.10.26)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ増幅器及び光信号の増幅方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

励起光を出力する第1の励起光源と、
光合分波器と、

該光合分波器を介して該第1の励起光源と接続され、該第1の励起光源からの該励起光により所定の波長帯域の波長多重光信号を増幅するとともに、前段又は後段にシリカ系光ファイバを結合した、希土類元素を添加した第1の光ファイバとを備え、

該第1の光ファイバより出力された該励起光の残留励起光により該シリカ系光ファイバが該光信号をラマン増幅させることを特徴とする、光ファイバ増幅器。

【請求項2】

該第1の励起光源が、
2つの励起光源と、

これら2つの励起光源からの励起光について偏波合成する偏波合成器とから構成されたことを特徴とする、請求項1記載の光ファイバ増幅器。

【請求項3】

該第1の励起光源が、

励起光を無偏光化する手段を有することを特徴とする、請求項1記載の光ファイバ増幅器。

【請求項4】

該第1の励起光源が、

励起光を変調する手段を有することを特徴とする、請求項 1 記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 5】

励起光を出力する第 1 の励起光源と、
光合分波器と、

該光合分波器を介して該第 1 励起光源と接続され、該第 1 の励起光源からの該励起光により所定の波長帯域の波長多重光信号を増幅する希土類元素を添加した第 1 の光ファイバと、

該第 1 の光ファイバに結合され、該第 1 の光ファイバより出力された該励起光の残留励起光により該光信号をラマン増幅させるシリカ系光ファイバと、

該シリカ系光ファイバに接続され、該シリカ系光ファイバ内で該光信号がラマン増幅されるように選択された波長の第 2 の励起光で該シリカ系光ファイバを励起する第 2 の励起光源とをそなえ、

該第 1 の励起光源から出力される励起光の波長帯域と、該第 2 の励起光源から出力される励起光の波長帯域とが異なるように選択されていることを特徴とする、光伝送システム

。

【請求項 6】

希土類元素を添加した第 1 の光ファイバからなり、波長に依存した利得特性を有し、該第 1 の光ファイバに接続された励起光源からの第 1 の励起光により励起されて所定の波長帯域内の波長多重光信号を増幅する光増幅部と、

該第 1 の光ファイバに結合されたシリカ系光ファイバを所望の励起光で励起して、前記光増幅部の利得特性が補償されるように該シリカ系光ファイバで該光信号をラマン増幅させる第 2 の励起光源と、をそなえ、

かつ、該第 1 の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で該第 1 の光ファイバから出力される該第 1 の励起光の残留励起光および第 2 の励起光源からの第 2 の励起光により該光信号がラマン増幅されるように該第 1 および第 2 の励起光の波長が選択されたことを特徴とする、光ファイバ増幅器。

【請求項 7】

該第 1 の励起光の波長と、該第 2 の励起光の波長とは異なる波長帯域の励起光であることを特徴とする、請求項 6 記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 8】

該第 1 の励起光の波長と、該第 2 の励起光の波長とは実質的に等しい波長帯域の励起光であることを特徴とする、請求項 6 記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 9】

希土類元素を添加した第 1 の光ファイバを該第 1 の光ファイバに接続された励起光源からの第 1 の励起光により励起して所定の波長帯域の光信号を増幅し、

該第 1 の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で該第 1 の光ファイバから出力される該第 1 の励起光の残留励起光および第 2 の励起光源からの第 2 の励起光により該光信号がラマン増幅されるように該第 1 および第 2 の励起光の波長が選択されたことを特徴とする、光信号の増幅方法。

【請求項 10】

該第 1 の励起光の波長と、該第 2 の励起光の波長とは異なる波長帯域の励起光であることを特徴とする、請求項 9 記載の光信号の増幅方法。

【請求項 11】

該第 1 の励起光の波長と、該第 2 の励起光の波長とは実質的に等しい波長帯域の励起光であることを特徴とする、請求項 9 記載の光信号の増幅方法。

【請求項 12】

希土類元素を添加した第 1 の光ファイバからなる光増幅部が、該第 1 の光ファイバに接続された励起光源からの第 1 の励起光により波長に依存した利得特性で所定の波長帯域内の光信号を増幅し、

該第 1 の光ファイバに結合されたシリカ系光ファイバを該第 1 の光ファイバから出力さ

10

20

30

40

50

れる該第1の励起光の残留励起光および該第1の励起光と波長の異なる所望の励起光で励起して、前記光増幅部の利得特性が補償されるように該シリカ系光ファイバで該光信号をラマン増幅させることを特徴とする、光信号の増幅方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光ファイバ増幅器及び光信号の増幅方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

近年、光通信システムの研究開発が精力的に進められているが、エルビウム(Er)ドープファイバ(以下、エルビウムドープファイバを「EDF」ということがある)などの希土類ドープファイバを用いた光増幅の技術を利用したブースターアンプやリピータあるいはプリアンプの重要性が明らかになっている。

【0003】

また、光増幅器の出現により、光増幅器を多中継増幅する伝送システムが、マルチメディア社会における通信システムの経済化を図る上で非常に大きな役割を果たすとして注目を集めている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、かかる伝送システムにおける課題としては、分散補償、伝送路である光ファイバ中での非線型効果(伝送品質に悪影響を及ぼすもの)の低減、経済的な広帯域波長多重伝送を挙げることができる。

一般に、伝送路である光ファイバには、分散特性があり、ファイバの長さに比例して分散量が蓄積するが、従来は、光増幅中継器などはなく、再生中継を行なっているので、中継する毎に分散量がリセットされ、問題とならなかった。

【0005】

しかし、光増幅中継では一種のアナログ増幅による中継であるため、分散量が蓄積するので、これに対しては、信号波長を零分散波長に設定して伝送すればよい。しかし、これでは、次のような課題がある。

(1-1)光ファイバは既に大量に敷設されており、その光ファイバの零分散波長は不幸なことに1.3 μ mであり、一方、実用化の目処がたっている光増幅器では1.55 μ m帯の信号しか増幅できない。

【0006】

(1-2)最近の報告で、たとえ新規に零分散波長が1.55 μ mにある光ファイバを敷設して、1.55 μ mの信号で伝送しても、光ファイバ中での非線型効果が活発に生じてしまうことが明らかとなった。これは、信号波長を零分散波長に一致させて伝送すると好ましくない非線型効果が顕著となることを意味する。

【0007】

(1-3)特に、波長多重伝送においては、複数の異なる信号光波長があるために零分散波長に一致させるといった概念は適用できない。

したがって、最近では、意図的に信号波長を零分散波長から適度にずらして、例えば、中継毎に、分散を補償すること等が提案されている。

このように、近年、分散補償器の研究が活発に進められているが、もっとも実用化に近いのは分散補償ファイバ(以下、分散補償ファイバを「DCF」ということがある。ここで、DCFは、Dispersion Compensation Fiberの略である。)であるが、この場合、以下の課題がある。

【0008】

(2-1)既設のファイバ(伝送路)を利用する場合、既に存在する中継点で集中的に分散補償を行なうために、分散補償ファイバを装置として介装する必要がある。このため、分散補償ファイバの長さを短くするような研究開発が行なわれている。

10

20

30

40

50

(2-2) 新規にファイバを敷設する場合は、分散補償ファイバを装置として介装するのではなく、分散補償ファイバを伝送路の一部として敷設することも考えられる。例えば20kmのファイバと20kmの分散補償ファイバとで40kmの伝送路を構成することが考えられるが、このような新規の分散補償ファイバの研究開発は、上記(2-1)の用途に使用する分散補償ファイバの研究開発と合わせると、二重開発となってしまう。

【0009】

即ち、以上をまとめると、波長多重伝送においては、波長分散を補償する必要があり、分散補償ファイバで行なうのが実用化にもっとも近いことから、一つの方法として分散補償ファイバを用いる方法が有力であり、更にこの分散補償ファイバを光増幅中継器の中に一つの部品として入れることが研究されているとうことができるが、一般には、分散補償ファイバ(DCF)のモードフィールド径は分散を補償するために小さく非線型効果が生じやすいとともに補償する分散量が増えると損失も大きい。

10

【0010】

このために、分散補償ファイバの損失も光増幅器で補償する方法が考えられるが、この分散補償ファイバ内で生じる自己位相変調(SPM: Self-Phase Modulation)や相互位相変調(XPM: Cross-Phase Modulation)といった信号の品質を劣化させる非線型効果の影響を受けないように損失を補償する必要があり、レベルダイヤの設計が難しいという問題がある。さらに、WDM用の光増幅器には、平坦でかつ広い光増幅帯域が要求されるが、希土類ドープファイバ光増幅器にも利得の波長依存性があり平坦でかつ広い増幅帯域を実現するのは困難であるという課題もある。

20

【0011】

また、利得が高い希土類ドープファイバ光増幅器では、光増幅を行なう際に不要な発振が生じることがあり、このように不要な発振が生じた場合には、希土類ドープファイバ光増幅器が不安定に動作することになる。

例えば、エルビウムドープファイバ光増幅器では、光増幅を行なう際に、1.53~1.57 μ mの自然放出光(ASE)が発生するが、このASEはエルビウムドープファイバ光増幅器内の反射点で反射を繰り返すため、不要な発振が生じることがある。特に、多波長一括増幅用に調整されたエルビウムドープファイバ光増幅器(即ち、励起率が高いエルビウムドープファイバ光増幅器)では、1.53 μ m付近での利得が高いため、この波長において不要な発振が生じやすく、このように不要な発振が生じた場合には、エルビウムドープファイバ光増幅器が不安定に動作する。

30

【0012】

本発明は、このような課題に鑑み創案されたもので、分散補償ファイバを用いる場合には、この分散補償ファイバのモードフィールド径が小さいためにラマン増幅のしきい値の下がっていることを利用して、ラマン増幅による分散補償ファイバの損失補償を行なえるようにした、光ファイバ増幅器及び光信号の増幅方法を提供することを目的とする。

【0013】

さらに、本発明は、分散補償ファイバと同様にラマン増幅機能を有するシリカ系光ファイバを用いることにより、分散補償ファイバを用いる場合と同様に、ラマン増幅によるシリカ系光ファイバの損失補償を行なえるようにした、光ファイバ増幅器を提供することを目的とする。

40

また、本発明は、利得が高い希土類ドープファイバ光増幅器や、多波長一括増幅用に調整された希土類ドープファイバ光増幅器の不安定動作を抑制するようにした、光ファイバ増幅器を提供することを目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】

このため、本発明の光ファイバ増幅器は、励起光を出力する第1の励起光源と、光合分波器と、該光合分波器を介して該第1の励起光源と接続され、該第1の励起光源からの該励起光により所定の波長帯域の波長多重光信号を増幅するとともに、前段又は後段にシリカ系光ファイバを結合した、希土類元素を添加した第1の光ファイバとを備え、該第1の

50

光ファイバより出力された該励起光の残留励起光により該シリカ系光ファイバが該光信号をラマン増幅させることを特徴としている。

この場合においては、該第1の励起光源を、2つの励起光源と、これら2つの励起光源からの励起光について偏波合成する偏波合成器とから構成することができる。又、該第1の励起光源は、励起光を無偏光化する手段を有することとしてもよい。更に、該第1の励起光源は、励起光を変調する手段を有することとしてもよい。

さらに、本発明の光伝送システムは、励起光を出力する第1の励起光源と、光合分波器と、該光合分波器を介して該第1の励起光源と接続され、該第1の励起光源からの該励起光

により所定の波長帯域の波長多重光信号を増幅する希土類元素を添加した第1の光ファイバと、該第1の光ファイバに結合され、該第1の光ファイバより出力された該励起光の残留励起光により該光信号をラマン増幅させるシリカ系光ファイバと、該シリカ系光ファイバに接続され、該シリカ系光ファイバ内で該光信号がラマン増幅されるように選択された波長の第2の励起光で該シリカ系光ファイバを励起する第2の励起光源とをそなえ、該第1の励起光源から出力される励起光の波長帯域と、該第2の励起光源から出力される励起光の波長帯域とが異なるように選択されていることを特徴としている。

また、本発明の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加した第1の光ファイバからなり、波長に依存した利得特性を有し、該第1の光ファイバに接続された励起光源からの第1の励起光により励起されて所定の波長帯域内の波長多重光信号を増幅する光増幅部と、該第1の光ファイバに結合されたシリカ系光ファイバを所望の励起光で励起して、前記光増幅部の利得特性が補償されるように該シリカ系光ファイバで該光信号をラマン増幅させる第2の励起光源とをそなえ、かつ、該第1の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で該第1の光ファイバから出力される該第1の励起光の残留励起光および第2の励起光源からの第2の励起光により該光信号がラマン増幅されるように該第1および第2の励起光の波長が選択されたことを特徴としている。

この場合においては、該第1の励起光の波長と、該第2の励起光の波長とは異なる波長帯域の励起光であることとしたり、該第1の励起光の波長と、該第2の励起光の波長とは実質的に等しい波長帯域の励起光であることとしたりすることができる。

また、本発明の光信号の増幅方法は、希土類元素を添加した第1の光ファイバを該第1の光ファイバに接続された励起光源からの第1の励起光により励起して所定の波長帯域の光信号を増幅し、該第1の励起光の波長は、該第1の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で該第1の光ファイバから出力される該第1の励起光の残留励起光および第2の励起光源からの第2の励起光により該光信号がラマン増幅されるように該第1および第2の励起光の波長が選択されたことを特徴としている。

この場合においては、該第1の励起光の波長と、該第2の励起光の波長とは異なる波長帯域の励起光であることとしたり、該第1の励起光の波長と、該第2の励起光の波長とは実質的に等しい波長帯域の励起光であることとしたりすることができる。

さらに、本発明の光信号の増幅方法は、希土類元素を添加した第1の光ファイバからなる光増幅部が、該第1の光ファイバに接続された励起光源からの第1の励起光により波長に依存した利得特性で所定の波長帯域内の光信号を増幅し、該第1の光ファイバに結合されたシリカ系光ファイバを該第1の光ファイバから出力される該第1の励起光の残留励起光および該第1の励起光と波長の異なる所望の励起光で励起して、前記光増幅部の利得特性が補償されるように該シリカ系光ファイバで該光信号をラマン増幅させることを特徴としている。

(1) 本発明の第1の態様の説明

図1は本発明の第1の態様を示す原理ブロック図で、この図1において、51, 52は前後2段にわたり配設された希土類ドープファイバ及び分散補償ファイバである。

【0015】

53-1は、希土類ドープファイバ51のための第1の波長帯域の励起光を生じる第1励起光源であり、54-1は、第1励起光源53-1からの励起光を希土類ドープファイバ

10

20

30

40

50

5 1 へ入射する第 1 光カプラである。

5 3 - 2 は、分散補償ファイバ 5 2 のための第 2 の波長帯域の励起光を生じる第 2 励起光源であり、5 4 - 2 は、第 2 励起光源 5 3 - 2 からの励起光を分散補償ファイバ 5 2 へ入射する第 2 光カプラである。

【 0 0 1 6 】

そして、分散補償ファイバ 5 2 を第 2 励起光源 5 3 - 2 からの第 2 の波長帯域の励起光で励起してラマン増幅を生じさせるように構成されている。

即ち、希土類ドープファイバ 5 1 からなる希土類ドープファイバ光増幅部と、所望の励起光で励起されることによりラマン増幅を生じさせる分散補償ファイバ 5 2 からなるラマン光増幅部とが、前後 2 段にわたって縦続接続されているのである。

この場合、第 1 励起光源 5 3 - 1 で生じる励起光の波長帯域が $0.98 \mu\text{m}$ であり、第 2 励起光源 5 3 - 2 で生じる励起光の波長帯域が $1.47 \mu\text{m}$ ($1.45 \sim 1.49 \mu\text{m}$: 以下、 $1.47 \mu\text{m}$ 帯域というときは、特に断らない限り、 $1.45 \sim 1.49 \mu\text{m}$ をいう) であることが好ましい。

【 0 0 1 7 】

なお、ラマン光増幅部が前段増幅部として配設されるとともに、希土類ドープファイバ光増幅部が後段増幅部として配設するようにしてもよく、希土類ドープファイバ光増幅部が低雑音指数を有する光増幅部として構成されている場合においては、希土類ドープファイバ光増幅部が前段増幅部として配設されるとともに、ラマン光増幅部が後段増幅部として配設するようにしてもよい。

また、第 2 励起光源 5 3 - 2 を、2 つの励起光源と、これらの励起光源からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器とで構成することもでき、第 2 励起光源 5 3 - 2 を、励起光源とデポラライザとを組み合わせ、励起光の無偏光化を行なうように構成することもでき、第 2 励起光源 5 3 - 2 を、変調を施された励起光を発生するように構成することもできる。

(2) 本発明の第 2 の態様の説明

図 2 は本発明の第 2 の態様を示す原理ブロック図で、この図 2 において、6 1 , 6 2 は、前後 2 段にわたり配設されたエルビウムドープファイバ及び分散補償ファイバである。

【 0 0 1 8 】

6 3 は、 $1.47 \mu\text{m}$ 帯域の励起光を生じる励起光源であり、6 4 は、励起光源 6 3 からの励起光をエルビウムドープファイバ 6 1 へ入射する光カプラである。

そして、この場合は、分散補償ファイバ 6 2 をエルビウムドープファイバ 6 1 からの残留励起光で励起してラマン増幅を生じさせるように構成されている。

【 0 0 1 9 】

即ち、希土類ドープファイバであるエルビウムドープファイバ 6 1 からなる希土類ドープファイバ光増幅部と、希土類ドープファイバ光増幅部を励起しうる所望の励起光で励起されることによりラマン増幅を生じさせるラマン光増幅部(このラマン光増幅部は、分散補償ファイバ 6 2 からなる)とが、縦列的に配設されるとともに、この希土類ドープファイバ光増幅部及びラマン光増幅部を励起するための励起光を供給する励起光源 6 3 が設けられているのである。

なお、励起光源 6 3 を、2 つの励起光源と、これらの励起光源からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器とで構成することもでき、励起光源 6 3 を、励起光源とデポラライザとを組み合わせ、励起光の無偏光化を行なうように構成することもでき、励起光源 6 3 を、変調を施された励起光を発生するように構成することもできる。

(3) 本発明の第 3 の態様の説明

図 3 は本発明の第 3 の態様を示す原理ブロック図で、この図 3 において、7 1 , 7 2 は前後 2 段にわたり配設されたエルビウムドープファイバ及び分散補償ファイバである。

7 3 は $1.47 \mu\text{m}$ 帯域の励起光を生じる励起光源であり、7 4 は励起光源 7 3 からの励起光を分散補償ファイバ 7 2 へ入射する光カプラである。

【 0 0 2 0 】

この場合は、エルビウムドープファイバ7 1を分散補償ファイバ7 2からの残留励起光で励起させるように構成されている。

(4) 本発明の第4の態様の説明

図4は本発明の第4の態様を示す原理ブロック図で、この図4において、8 1は希土類元素をドープされた分散補償ファイバであり、8 2は、希土類元素をドープされた分散補償ファイバ8 1のための励起光を生じる励起光源であり、8 3は、励起光源8 2からの励起光を希土類元素をドープされた分散補償ファイバ8 1へ入射する光カプラである。

(5) 本発明の第5の態様の説明

図5は本発明の第5の態様を示す原理ブロック図で、この図5において、9 1, 9 2は前後2段にわたり配設されたエルビウムドープファイバ及び分散補償ファイバである。

10

【0021】

9 3はエルビウムドープファイバ9 1のための1.47 μm帯域の励起光を生じる励起光源であり、9 4は励起光源9 3からの励起光をエルビウムドープファイバ9 1へ入射する光カプラである。

9 5は、エルビウムドープファイバ9 1と分散補償ファイバ9 2との間に介装されて、エルビウムドープファイバ9 1から出てくる1.47 μm帯域の残留励起光を遮断する光フィルタである。

【0022】

(6) 本発明の第6の態様の説明

図6(a)は本発明の第6の態様を示す原理ブロック図で、この図6(a)において、10 1はシリカ系光ファイバ(SOF)であり、10 2はエルビウムドープファイバ(EDF)であり、図6(a)に示す光ファイバ増幅器は、シリカ系光ファイバ10 1を前段側に、エルビウムドープファイバ10 2を後段側にそれぞれそなえている。

20

10 3-1は、シリカ系光ファイバ10 1のための波長帯域の励起光を生じるシリカ系光ファイバ用励起光源であり、10 4-1は、シリカ系光ファイバ用励起光源10 3-1からの励起光をシリカ系光ファイバ10 1へ入射する光カプラである。

【0023】

10 3-2は、エルビウムドープファイバ10 2のための波長帯域の励起光を生じるエルビウムドープファイバ用励起光源であり、10 4-2は、エルビウムドープファイバ用励起光源10 3-2からの励起光をエルビウムドープファイバ10 2へ入射する光カプラである。

30

この場合は、シリカ系光ファイバ10 1をシリカ系光ファイバ用励起光源10 3-1からの波長帯域の励起光で励起してラマン増幅を生じさせるように構成されている。

【0024】

即ち、図6(a)に示す光ファイバ増幅器では、希土類ドープファイバであるエルビウムドープファイバ10 2からなる希土類ドープファイバ光増幅部と、所望の励起光で励起されることによりラマン増幅を生じさせるシリカ系光ファイバ10 1からなるラマン光増幅部とが、前後2段にわたって縦続接続されており、ラマン光増幅部が前段増幅部として配設されるとともに、希土類ドープファイバ光増幅部が後段増幅部として配設されているのである。

40

なお、希土類ドープファイバ光増幅部が低雑音指数を有する光増幅部として構成されている場合において、希土類ドープファイバ光増幅部が前段増幅部として配設されるとともに、ラマン光増幅部が後段増幅部として配設してもよい。

【0025】

さらに、励起光を生じる励起光源を設けて、この励起光源が、上記のシリカ系光ファイバ用励起光源10 3-1及びエルビウムドープファイバ用励起光源10 3-2を兼用するようにしてもよい。

(7) 本発明の第7の態様の説明

図6(b)は本発明の第7の態様を示す原理ブロック図で、この図6(b)において、11 1は低雑音指数を有するエルビウムドープファイバ(EDF)であり、11 2はシリカ

50

系光ファイバ(SOF)であり、図6(b)に示す光ファイバ増幅器は、エルビウムドープファイバ111を前段側に、シリカ系光ファイバ112を後段側にそれぞれそなえている。

113-2は、シリカ系光ファイバ112のための波長帯域の励起光を生じるシリカ系光ファイバ用励起光源であり、114-2は、シリカ系光ファイバ用励起光源113-2からの励起光をシリカ系光ファイバ112へ入射する光カプラである。

【0026】

113-1は、エルビウムドープファイバ111のための波長帯域の励起光を生じるエルビウムドープファイバ用励起光源であり、114-1は、エルビウムドープファイバ用励起光源113-1からの励起光をエルビウムドープファイバ111へ入射する光カプラである。

10

この場合は、シリカ系光ファイバ112をシリカ系光ファイバ用励起光源113-2からの波長帯域の励起光で励起してラマン増幅を生じさせるように構成されている。

【0027】

なお、1.47 μ m帯域の励起光を生じる励起光源を設けて、励起光源が、上記のシリカ系光ファイバ用励起光源113-2及びエルビウムドープファイバ用励起光源113-1を兼用するようにしてもよい。

(8)本発明の第8の態様の説明

図7は本発明の第8の態様を示す原理ブロック図で、この図7において、121-1は低雑音指数を有する第1エルビウムドープファイバ(EDF)であり、122はシリカ系光ファイバ(SOF)であり、121-2は第2エルビウムドープファイバ(EDF)であり、図7に示す光ファイバ増幅器は、第1エルビウムドープファイバ121-1を前段に、シリカ系光ファイバ122を中段に、第2エルビウムドープファイバ121-2を後段にそれぞれそなえている。

20

123-1は、第1エルビウムドープファイバ121-1のための波長帯域の励起光を生じる第1エルビウムドープファイバ用励起光源であり、124-1は、第1エルビウムドープファイバ用励起光源123-1からの励起光を第1エルビウムドープファイバ121-1へ入射する光カプラである。

【0028】

123-2は、シリカ系光ファイバ122のための波長帯域の励起光を生じるシリカ系光ファイバ用励起光源であり、124-2は、シリカ系光ファイバ用励起光源123-2からの励起光をシリカ系光ファイバ122へ入射する光カプラである。

30

123-3は、第2エルビウムドープファイバ121-2のための波長帯域の励起光を生じる第2エルビウムドープファイバ用励起光源であり、124-3は、第2エルビウムドープファイバ用励起光源123-3からの励起光を第2エルビウムドープファイバ121-2へ入射する光カプラである。

【0029】

この場合は、シリカ系光ファイバ122をシリカ系光ファイバ用励起光源123-2からの波長帯域の励起光で励起してラマン増幅を生じさせるように構成されている。

即ち、図7に示す光ファイバ増幅器では、希土類ドープファイバであるエルビウムドープファイバ121-1からなり低雑音指数を有する希土類ドープファイバ光増幅部が前段増幅部として配設され、所望の励起光で励起されることによりラマン増幅を生じさせるシリカ系光ファイバ122からなるラマン光増幅部が中段増幅部として配設され、希土類ドープファイバであるエルビウムドープファイバ121-2からなる希土類ドープファイバ光増幅部が後段増幅部として配設されているのである。

40

(9)本発明の第9の態様の説明

図8は本発明の第9の態様を示す原理ブロック図で、この図8において、131-1は低雑音指数を有する第1エルビウムドープファイバ(EDF)であり、132は分散補償ファイバ(DCF)であり、131-2は第2エルビウムドープファイバ(EDF)であり、図8に示す光ファイバ増幅器は、第1エルビウムドープファイバ131-1を前段に、

50

分散補償ファイバ 132 を中段に、第 2 エルビウムドープファイバ 131 - 2 を後段にそれぞれそなえている。

133 - 1 は、第 1 エルビウムドープファイバ 131 - 1 のための波長帯域の励起光を生じる第 1 エルビウムドープファイバ用励起光源であり、134 - 1 は、第 1 エルビウムドープファイバ用励起光源 133 - 1 からの励起光を第 1 エルビウムドープファイバ 131 - 1 へ入射する光カプラである。

【0030】

133 - 2 は、分散補償ファイバ 132 のための波長帯域の励起光を生じる分散補償ファイバ用励起光源であり、134 - 2 は、分散補償ファイバ用励起光源 133 - 2 からの励起光を分散補償ファイバ 132 へ入射する光カプラである。133 - 3 は、第 2 エルビウムドープファイバ 131 - 2 のための波長帯域の励起光を生じる第 2 エルビウムドープファイバ用励起光源であり、134 - 3 は、第 2 エルビウムドープファイバ用励起光源 133 - 3 からの励起光を第 2 エルビウムドープファイバ 131 - 2 へ入射する光カプラである。

10

【0031】

この場合は、分散補償ファイバ 132 を分散補償ファイバ用励起光源 133 - 2 からの波長帯域の励起光で励起してラマン増幅を生じさせるように構成されている。

即ち、図 8 に示す光ファイバ増幅器では、希土類ドープファイバであるエルビウムドープファイバ 131 - 1 からなり低雑音指数を有する希土類ドープファイバ光増幅部が前段増幅部として配設され、所望の励起光で励起されることによりラマン増幅を生じさせる分散補償ファイバ 132 からなるラマン光増幅部が中段増幅部として配設され、希土類ドープファイバであるエルビウムドープファイバ 131 - 2 からなる希土類ドープファイバ光増幅部が後段増幅部として配設されているのである。

20

(10) 本発明の第 10 の態様の説明

図 9 (a) は本発明の第 10 の態様を示す原理ブロック図で、この図 9 (a) において、141 は分散補償ファイバ (DCF) であり、142 は励起光を生じる励起光源であり、143 は、励起光源 142 からの励起光を分散補償ファイバ 141 へ入射する光カプラであって、分散補償ファイバ 141 を励起光源 142 からの励起光で励起してラマン増幅を生じさせるように構成されている。

これにより、この光ファイバ増幅器は、分散補償ファイバ 141 と、この分散補償ファイバ 141 を励起してラマン増幅を生じさせる励起光源 142 とを有する分散補償ファイバモジュールをそなえていることになる。

30

【0032】

この場合も、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光が光サーキュレータを通じて出力されるように構成したり、入力信号光が入力される入力ポート又は出力信号光が出力される出力ポートに、それぞれアイソレータを付加したりしてもよい。

(11) 本発明の第 11 の態様の説明

図 9 (b) は本発明の第 11 の態様を示す原理ブロック図で、この図 9 (b) において、151 はシリカ系光ファイバ (SOF) であり、152 は励起光を生じる励起光源であり、153 は、励起光源 152 からの励起光をシリカ系光ファイバ 151 へ入射する光カプラであって、シリカ系光ファイバ 151 を励起光源 152 からの励起光で励起してラマン増幅を生じさせるように構成されている。

40

この場合も、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光が光サーキュレータを通じて出力されるように構成してもよい。

【0033】

(12) 本発明の第 12 の態様の説明

図 10 は本発明の第 12 の態様を示す原理ブロック図で、この図 10 において、154 は、希土類ドープファイバ 61 からなる希土類ドープファイバ光増幅部であり、155 は、光ファイバ又は光アイソレータが付加された光ファイバからなる光ファイバ減衰部である

50

。この光ファイバ減衰部 155 は、希土類ドープファイバ光増幅部 154 の不安定動作を抑制するものである。

【0034】

また、この光ファイバ減衰部 155 は、所望の励起光で励起されることによりラマン増幅を生じさせるラマン光増幅部を兼用していてもよい。

なお、図 10 において、63 は、励起光源であり、64 は、励起光源 63 からの励起光を希土類ドープファイバ 61 へ入射する光カプラである。

(13) 本発明の第 13 の態様の説明

図 11 は本発明の第 13 の態様を示す原理ブロック図で、この図 11 において、156 - 1, 156 - 2 は、希土類ドープファイバ 121 - 1, 121 - 2 からなる希土類ドープファイバ光増幅部としてそれぞれ構成された前段光増幅部及び後段光増幅部である。この前段光増幅部 156 - 1 及び後段光増幅部 156 - 2 を有して、光増幅ユニットが構成されている。

10

157 は、光ファイバ又は光アイソレータが付加された光ファイバからなる光ファイバ減衰部であり、この光ファイバ減衰部 157 は、光増幅ユニットにおける前段光増幅部 156 - 1 と後段光増幅部 156 - 2 との間に配設され、光増幅ユニットの不安定動作を抑制するものである。

【0035】

また、この光ファイバ減衰部 157 は、所望の励起光で励起されることによりラマン増幅を生じさせるラマン光増幅部を兼用していてもよい。

20

なお、図 11 において、123 - 1, 123 - 3 は、励起光源であり、124 - 1 は、励起光源 123 - 1 からの励起光を希土類ドープファイバ 121 - 1 へ入射する光カプラであり、124 - 3 は、励起光源 123 - 3 からの励起光を希土類ドープファイバ 121 - 2 へ入射する光カプラである。

【0036】

本発明の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加した第 1 の光ファイバからなり、所定の波長帯域の光信号を増幅する光増幅部と、第 1 の光ファイバに結合されたシリカ系光ファイバを所望の励起光で励起して、シリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源とをそなえたことを特徴としている（請求項 1）。

30

【0037】

また、本発明の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加した第 1 の光ファイバを有し、所定の波長帯域の光信号を増幅する光増幅部と、第 1 の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された波長の励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源とを有することを特徴としている（請求項 2）。

【0038】

ここで、前記ラマン増幅用励起光源は、光増幅部の前段に設けられていてもよい（請求項 3）。

また、前記ラマン増幅用励起光源は、2つの励起光源と、これら2つの励起光源からの励起光について偏波合成する偏波合成器とから構成されてもよく（請求項 4）、ラマン増幅用励起光源が、励起光を無偏光化する手段を有してもよく（請求項 5）、さらに、励起光を変調する手段を有してもよい（請求項 6）。

40

【0039】

そして、本発明の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加した第 1 の光ファイバと、第 1 の光ファイバを励起する励起光を出力する第 1 の励起光源とを有し、所定の波長帯域の光信号を増幅する光増幅部と、第 1 の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された波長の励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源とをそなえ、第 1 の励起光源から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源から出力される励起光の波長帯域とが異なるように選択されていることを特徴としている（請求項 7）。

50

【0040】

前記第1の励起光源から出力される励起光の波長帯域は0.98 μ m帯域であり、ラマン増幅用励起光源から出力される励起光の波長が1.45 μ m乃至1.49 μ mの波長帯域にあることが好ましい(請求項8)。

また、本発明の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加した第1の光ファイバと、第1の光ファイバを励起する励起光を出力する第1の励起光源とを有し、所定の波長帯域の光信号を増幅する光増幅部と、第1の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された波長の励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源とをそなえ、第1の励起光源から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源から出力される励起光の波長帯域とが実質的に等しいように選択されていることを特徴としている(請求項9)。

10

【0041】

さらに、本発明の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加した第1の光ファイバと、第1の光ファイバを励起する励起光を出力する第1の励起光源とを有し、所定の波長帯域の光信号を増幅する光増幅部と、第1の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された波長の励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源と、ラマン増幅用励起光源からの励起光をシリカ系光ファイバに入射する光カプラとをそなえたことを特徴としている(請求項10)。

【0042】

そして、本発明の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加した第1の光ファイバからなり、波長に依存した利得特性を有し、所定の波長帯域内の光信号を増幅する光増幅部と、第1の光ファイバに結合されたシリカ系光ファイバを所望の励起光で励起して、前記光増幅部の利得特性が補償されるようにシリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源とをそなえたことを特徴としている(請求項11)。

20

【0043】

また、本発明の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加した第1の光ファイバを有し、所定の波長帯域の光信号を波長に依存した利得特性で増幅する光増幅部と、第1の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅され、前記光増幅部の利得特性が補償されるように調整された励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源とを有することを特徴としている(請求項12)。

30

【0044】

加えて、本発明の光信号の増幅方法は、シリカ系光ファイバを所望の励起光で励起して、シリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させ、ラマン増幅させた光信号を、希土類元素を添加した第1の光ファイバによって増幅することを特徴としている(請求項13)。
また、本発明の光信号の増幅方法は、シリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された波長の励起光でシリカ系光ファイバを励起し、シリカ系光ファイバと結合された希土類元素を添加した第1の光ファイバによって光信号を増幅することを特徴としている(請求項14)。

【0045】

さらに、本発明の光信号の増幅方法は、希土類元素を添加した第1の光ファイバを励起して所定の波長帯域の光信号を増幅し、第1の光ファイバと結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された波長の励起光でシリカ系光ファイバを励起することを特徴としている(請求項15)。

40

ここで、前記第1の光ファイバと、シリカ系光ファイバとは異なる波長帯域の励起光によって励起されてもよく(請求項16)、また、第1の光ファイバと、シリカ系光ファイバとは実質的に等しい波長帯域の励起光によって励起されてもよい(請求項17)。

【0046】

そして、本発明の光信号の増幅方法は、希土類元素を添加した第1の光ファイバからなる光増幅部が、波長に依存した利得特性で所定の波長帯域内の光信号を増幅し、第1の光ファイバに結合されたシリカ系光ファイバを所望の励起光で励起して、前記光増幅部の利得

50

特性が補償されるようにシリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させることを特徴としている（請求項18）。

【0047】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。

（1）第1実施形態の説明

図12は本発明の第1実施形態を示すブロック図で、この図12に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ144、分散補償ファイバ141、光分波合波器143が配設されている。また、光分波合波器143には、励起光源142が接続されている。

ここで、励起光源142は、ラマン増幅によるエルビウムドープファイバ増幅の帯域補償を行なうことのできる帯域（例えば、 $1.44 \sim 1.49 \mu\text{m}$ ）の励起光を生じる励起光源であり、この励起光源142からの励起光は光分波合波器143を通じて分散補償ファイバ141の出力端から入射されるようになっている。

従って、この光ファイバ増幅器は、分散補償ファイバ141と励起光源142とを有する分散補償ファイバモジュールをそなえていることになる。

このような構成により、分散補償ファイバ141を励起光源142からの励起光で励起してラマン増幅を生じさせることができる。即ち、分散補償ファイバ141では、一般にそのモードフィールド径が小さいので、ラマン増幅のしきい値の下がっており、これにより、ラマン増幅を生じやすいのである。

ところで、分散補償ファイバには、次のような特性がある。

【0048】

即ち、分散補償ファイバ（DCF）は、コア径が小さくモードフィールド径が通常の約半分で非線型効果（誘導ラマン散乱（SRSS）、誘導ブリルアン散乱（SBS）、4光子混合（FWM）、自己位相変調効果（SPM）等）が伝送路であるファイバより生じやすい。なお、分散補償ファイバは、その使用態様から、伝送路であるファイバほど長くは無いので分散補償ファイバを通す際の光パワーを小さくすれば使用できることは分かっている。これは非線型効果の影響も長さが長くなるとともに増大するからである。

また、分散補償ファイバでの光の減衰（損失）も無視できるものでないことが分かっており、このために光増幅器で、この損失を補償する必要がある。

【0049】

一方、入力パワーは上記のように述べた様に小さい値に制限され光増幅器としてのレベル設計に困難が生じている。

しかし、上記の非線型効果にも通信の際に有害なものや有益なものがある。このうち、ラマン増幅は有益である。

このラマン増幅が、非常に有益となる可能性がある点は次のとおりである。即ち、分散補償ファイバをラマン増幅させれば、分散補償ファイバ自体が光増幅器となり、損失が補償できるというものである。

【0050】

なお、ラマン増幅とは、誘導ラマン散乱、即ち、強い単色光を光ファイバに照射したときに、その光ファイバの光学フォノンと相互作用することにより固有な量だけ波長がずれたコヒーレントなストークス光が誘導放出により発生する現象を応用して、ストークス光が信号光と同じ波長となるように単色光の波長を設定し、誘導放出により信号光を増幅させることをいう。

従って、上記のように分散補償ファイバ141を励起光源142からの上記のような帯域の励起光で励起してラマン増幅を生じさせることにより、このラマン増幅による分散補償ファイバの損失補償（エルビウムドープファイバの利得のくぼみの平坦化やエルビウムドープファイバの利得の減少の補填補償を含む）を行なうことができるのである。

なお、エルビウムドープファイバの $1.54 \mu\text{m}$ 帯の利得のくぼみを平坦化するには、 $\sim 1.44 \mu\text{m}$ で励起してラマン増幅を生じさせる。

10

20

30

40

50

また、図 1 3 に示すように、出力側に、アイソレータ 1 4 4 - 2 を追加することもできる。

さらに、図 1 2 , 図 1 3 に示すように、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図 3 9 や図 4 0 に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することもできる。

【 0 0 5 1 】

また、分散補償ファイバ 1 4 1 のかわりに、シリカ系光ファイバを用いることもできる。

(2) 第 2 実施形態の説明

図 1 4 は本発明の第 2 実施形態を示すブロック図で、この図 1 4 に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ 5 5 - 1 , 光分波合波器 5 4 - 1 , エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ) 5 1 , アイソレータ 5 5 - 2 , 分散補償ファイバ 5 2 , 光分波合波器 5 4 - 2 , アイソレータ 5 5 - 3 が配設されている。また、光分波合波器 5 4 - 1 には、励起光源 5 3 - 1 が接続されるとともに、光分波合波器 5 4 - 2 には、励起光源 5 3 - 2 が接続されている。

ここで、励起光源 (第一励起光源) 5 3 - 1 は、エルビウムドープファイバ 5 1 のための第 1 の波長帯域 (例えば $0.98 \mu\text{m}$ 帯域) での励起光を生じるもので、励起光源 5 3 - 2 は、分散補償ファイバ 5 2 のための第 2 の波長帯域 (例えば $1.47 \mu\text{m}$ 帯域 ($1.45 \sim 1.49 \mu\text{m}$) または $1.44 \mu\text{m}$ までの帯域 ($\sim 1.44 \mu\text{m}$)) の励起光を生じるものである。

【 0 0 5 2 】

すなわち、励起光源 5 3 - 1 から出力される励起光の第 1 の波長帯域と、励起光源 5 3 - 2 から出力される励起光の第 2 の波長帯域とが異なるように選択されている。

これにより、励起光源 5 3 - 2 からの励起光で、分散補償ファイバ 5 2 を励起して、前述の第 1 実施形態と同じ原理により、ラマン増幅を生じさせることができる。従って、この実施形態においても、分散補償ファイバ 5 2 を励起光源 5 3 - 2 からの $1.47 \mu\text{m}$ 帯域あるいは $1.44 \mu\text{m}$ までの帯域の励起光で励起してラマン増幅を生じさせることにより、このラマン増幅による分散補償ファイバの損失補償を行なうことができるのである。

さらに、希土類ドープファイバ光増幅器の利得の波長特性が希土類イオンによって決まってしまうのに対して、ラマン光増幅器の利得の波長特性は励起波長によって決まり、励起波長を変えればそのピーク値がシフトするため、希土類ドープファイバ光増幅器の利得の波長特性を補償するようにラマン増幅を行なう際の励起波長を選択することができ、このようにすれば、広帯域光増幅器を実現することができる。

即ち、ラマン増幅の場合も増幅帯域幅が存在し、この利得の波長依存性を用いれば単なる分散補償ファイバの損失補償だけでなくエルビウムドープファイバの増幅帯域を補いより広帯域化が図れるのである。

【 0 0 5 3 】

換言すれば、エルビウムドープファイバ増幅器の波長特性は、図 2 6 , 2 7 に示すように、平坦ではないので、分散補償ファイバを用いてラマン増幅させることにより、上記エルビウムドープファイバ増幅器の波長特性の凹凸を平坦化することができ、その結果、広帯域光増幅器を実現することができ、多波長一括増幅 (図 2 7 参照) を行なう場合等に好適となるのである。

なお、希土類ドープファイバであるエルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部が、低雑音指数を有する光増幅部として構成されてもよい。

【 0 0 5 4 】

また、図 1 4 に示す光ファイバ増幅器では、エルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部が前段増幅部として配設されるとともに、分散補償ファイバからなるラマン光増幅部が後段増幅部として配設されているが、これに限定されず、分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバからなるラマン光増幅部が前段増幅部として配設されるとともに、エルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部が後段増幅部

10

20

30

40

50

として配設されてもよい（ラマン光増幅部がシリカ系光ファイバからなる場合は、1つの励起光源が、シリカ系光ファイバ用励起光源及びエルビウムドープファイバ用励起光源を兼用することができる）。

【0055】

すなわち、励起光源53-2は、エルビウムドープファイバ51に結合されたシリカ系光ファイバ（図示省略）内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.44 μmまでの波長（～1.44 μm）の励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用の励起光源として機能している。

従って、本発明の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加した希土類ドープファイバ51を有し、前記の例えば0.98 μm帯域の光信号を波長に依存した利得特性で増幅する光増幅部（希土類ドープファイバ光増幅器）と、希土類ドープファイバ51と結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅され、前記光増幅部の利得特性が補償されるように調整された励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源52-2を有することになる。

さらに、励起光源53-2は、例えば図23～図25に示す励起光源53-2, 53-2, 53-2と同様に、2つの励起光源と、これらの励起光源からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器とで構成されてもよく、励起光源とデポラライザとを組み合わせ（励起光源とデポラライザとが励起光を無偏光化する手段として機能している。）励起光の無偏光化を行なうように（励起光を変調する手段を有する。）構成されてもよく、変調を施された励起光を発生するように構成されてもよい。

なお、図23～図25に示す励起光源53-2, 53-2, 53-2については、それぞれ本発明の第9実施形態、本発明の第9実施形態の第1変形例及び本発明の第9実施形態の第2変形例において説明する。

（3）第3実施形態の説明

図15は本発明の第3実施形態を示すブロック図で、この図15に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ65-1, 光分波合波器64, エルビウムドープファイバ（希土類ドープファイバ）61, アイソレータ65-2, 分散補償ファイバ62, アイソレータ65-3が配設されている。そして、光分波合波器64に、励起光源63が接続されている。

ここで、励起光源63は、例えば1.47 μm帯域（1.45～1.49 μm）の励起光を生じるものである。

【0056】

このような構成により、この図15に示す光ファイバ増幅器では、励起光を光分波合波器64によりエルビウムドープファイバ61の一端から入射して、エルビウムドープファイバ61を励起させ、増幅させるが、エルビウムドープファイバ61の他端から残留励起光が到達する。その後は、この残留励起光をアイソレータ65-2を介して分散補償ファイバ62へ供給して、ラマン増幅を生じさせる。

このようにエルビウムドープファイバ, 分散補償ファイバに共通の励起光源を用いて、両ファイバでの増幅が行なえるのは次のとおりである。

【0057】

即ち、1.55 μm帯の信号光をラマン増幅する際の励起波長帯はエルビウムドープファイバ（EDF）の励起波長帯である1.47 μm帯（1.45～1.49 μm）であるからであり、従って、EDFを1.47 μm帯の光で励起した際の残留励起光パワーを用いて、ラマン増幅を行なうことができるのである。これにより、エルビウムドープファイバ61で光増幅を行ないながら、分散補償ファイバ62の損失を補償できるのである。

これにより、前述の第2実施形態と同様に、エルビウムドープファイバ増幅器の波長特性の凹凸を平坦化して、広帯域光増幅器を実現することができ、多波長一括増幅を行なう場合等に好適となるほか、励起光源が1つで済むので、構造の簡素化及びコストの低廉化にも寄与しうるのである。

【0058】

また、この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することもできる。

さらに、励起光源63は、2つの励起光源と、これらの励起光源からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器とで構成されてもよく、励起光源とデポラライザとを組み合わせ、励起光の無偏光化を行なうように構成されてもよく、変調を施された励起光を発生するように構成されてもよい。

(3-1) 第3実施形態の第1変形例の説明

図16は本発明の第3実施形態の第1変形例を示すブロック図で、この図16に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ65-1、光分波合波器64-1、エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ)61-1、アイソレータ65-2、分散補償ファイバ62、エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ)61-2、光分波合波器64-2、アイソレータ65-3が配設されている。そして、光分波合波器64-1に、励起光源63-1が接続されるとともに、光分波合波器64-2に、励起光源63-2が接続されている。

ここで、励起光源63-1、63-2は、共に例えば1.47 μ m帯域(1.45~1.49 μ m)の励起光を生じるものである。

【0059】

従って、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ61-1、61-2からなり、例えば1.47 μ m帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ61-1、61-2に結合されたシリカ系光ファイバ(図示省略)を例えば1.47 μ m帯域の励起光で励起して、シリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源63-2とをそなえたことになる。

【0060】

後述するように、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ61-1、61-2と、エルビウムドープファイバ61-1、61-2を励起する励起光を出力する励起光源63-1、63-2とを有し、第1の波長帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ61-1、61-2と結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.44 μ mまでの波長(~1.44 μ m)の励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源(図示省略)と、ラマン増幅用励起光源からの励起光をシリカ系光ファイバに入射する光分波合波器(光カプラ)とをそなえて構成してもよい。

【0061】

この場合、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ61-1、61-2を有し、1.47 μ m帯域の光信号を波長に依存した利得特性で増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ61-1、61-2と結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅され、前記希土類ドープファイバ光増幅部の利得特性が補償されるように調整された励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源とを有するように構成することもできる。

【0062】

このような構成により、この図16に示す光ファイバ増幅器では、励起光を光分波合波器64-1によりエルビウムドープファイバ61-1の入力端から入射して、エルビウムドープファイバ61-1を励起させ、増幅させるが、このとき、エルビウムドープファイバ61-1の他端からは残留励起光が到達する。さらに、この残留励起光をアイソレータ65-2を介して分散補償ファイバ62へ供給して、ラマン増幅を生じさせる。

また、励起光を光分波合波器64-2によりエルビウムドープファイバ61-2の出力端から入射して、エルビウムドープファイバ61-2を励起させ、増幅させることも行なわれるが、このとき、エルビウムドープファイバ61-2の入力端からはやはり残留励起光が到達する。さらに、この残留励起光も分散補償ファイバ62へ供給して、ラマン増幅を生じさせる。

10

20

30

40

50

【0063】

従って、ラマン増幅用励起光源が、希土類ドーブファイバ光増幅部の前段に設けられるようになっている。

すなわち、本発明の光信号の増幅方法は、希土類元素を添加したエルビウムドーブファイバ61-2からなり、波長に依存した利得特性で1.47 μ m帯域内の光信号を増幅し、エルビウムドーブファイバ61-2に結合されたシリカ系光ファイバを所望の励起光で励起して、前記光増幅部の利得特性が補償されるようにシリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるのである。

【0064】

この場合は、分散補償ファイバ62は前後のエルビウムドーブファイバ61-1, 61-2からの残留励起光を用いてラマン増幅させているので、分散補償ファイバ62による補償効果を大きくすることができ、構造の簡素化及びコストの低廉化をはかりながら、広帯域光増幅器を実現することができる。

また、この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することもできる。

さらに、分散補償ファイバ62用の励起光源及び光分波合波器を設けることもできる。

【0065】

即ち、図8と同様の要領で、0.98 μ m帯の励起光源133-1~133-3及び光分波合波器134-1~134-3用いて光ファイバ増幅器を構成するようにしてもよい。

なお、分散補償ファイバ62のかわりに、シリカ系光ファイバを用いてもよい。

【0066】

すなわち、本発明の光信号の増幅方法は、シリカ系光ファイバを1.47 μ m帯域あるいは1.44 μ mまでの帯域の励起光で励起して、シリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させ、ラマン増幅させた光信号を、希土類元素を添加したエルビウムドーブファイバ61-1, 61-2によって増幅するようにもできる。

【0067】

また、本発明の光信号の増幅方法は、シリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された波長の励起光でシリカ系光ファイバを励起し、シリカ系光ファイバと結合された希土類元素を添加したエルビウムドーブファイバ61-1, 61-2によって光信号を増幅するのである。この場合、エルビウムドーブファイバ61-1, 61-2と、シリカ系光ファイバとは実質的に等しい波長帯域の励起光によって励起されてもよい。

(3-2)第3実施形態の第2変形例の説明

図17は本発明の第3実施形態の第2変形例を示すブロック図で、この図17に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ65-1, 光分波合波器64-1, エルビウムドーブファイバ61-1, アイソレータ65-2, 分散補償ファイバ62, 光分波合波器64-3, 光フィルタ66, アイソレータ65-3, 光分波合波器64-4, エルビウムドーブファイバ61-2, 光分波合波器64-5, アイソレータ65-4が配設されている。そして、光分波合波器64-1に、励起光源63-1が接続されるとともに、光分波合波器64-5に、励起光源63-2が接続されている。すなわち、ラマン増幅用励起光源が、希土類ドーブファイバ光増幅部の前段に設けられるようになっている。

ここで、励起光源63-1, 63-2は、共に例えば1.47 μ m帯域(1.45~1.49 μ m)の励起光を生じるものである。後述するように、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドーブファイバ61-1, 61-2からなり、例えば1.47 μ m帯域の光信号を増幅する希土類ドーブファイバ光増幅部と、エルビウムドーブファイバ61-1, 61-2に結合されたシリカ系光ファイバ(図示省略)を例えば1.47 μ m帯域の励起光で励起して、シリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源63-2とをそなえたことになる。

【0068】

この場合、希土類元素を添加したエルビウムドーブファイバ61-1, 61-2を有し、

10

20

30

40

50

1.47 μm帯域の光信号を波長に依存した利得特性で増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2と結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅され、前記希土類ドープファイバ光増幅部の利得特性が補償されるように調整された励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源63-2とを有するように構成することもできる。

【0069】

また、光分波合波器64-3と64-4との間には、光フィルタ66, アイソレータ65-3をそなえた光信号ラインと、励起光ラインとが平行に設けられる。

このような構成により、この図17に示す光ファイバ増幅器では、励起光を光分波合波器64-1によりエルビウムドープファイバ61-1の入力端から入射して、エルビウムドープファイバ61-1を励起させ、増幅させるが、このとき、エルビウムドープファイバ61-1の他端からは残留励起光が到達する。さらに、この残留励起光をアイソレータ65-2を介して分散補償ファイバ62へ供給して、ラマン増幅を生じさせる。

また、励起光を光分波合波器64-5によりエルビウムドープファイバ61-2の出力端から入射して、エルビウムドープファイバ61-2を励起させ、増幅させることも行なわれるが、このとき、エルビウムドープファイバ61-2の入力端からはやはり残留励起光が到達する。さらに、この残留励起光も光分波合波器64-4, 64-3を介して、分散補償ファイバ62へ供給して、ラマン増幅を生じさせる。

この場合も、分散補償ファイバ62は前後のエルビウムドープファイバ61-1, 61-2からの残留励起光を用いてラマン増幅させているので、分散補償ファイバ62による補償効果を大きくすることができ、構造の簡素化及びコストの低廉化をはかりながら、広帯域光増幅器を実現することができる。

【0070】

また、この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することもできる。

さらに、分散補償ファイバ62用の励起光源及び光分波合波器を設けることもできる。

【0071】

即ち、図8と同様の要領で、0.98 μm帯の励起光源133-1~133-3及び光分波合波器134-1~134-3を用いて光ファイバ増幅器を構成するようにしてもよい。

なお、分散補償ファイバ62のかわりに、シリカ系光ファイバを用いてもよい。

【0072】

すなわち、本発明の光信号の増幅方法は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ61-1, 61-2を励起して1.47 μm帯域あるいは1.44 μmまでの波長帯域の光信号を増幅し、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2と結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された波長の励起光でシリカ系光ファイバを励起することもできる。そして、本発明の光信号の増幅方法は、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2と、シリカ系光ファイバとは異なる波長帯域の励起光によって励起されることもできるのである。

(4) 第4実施形態の説明

図18は本発明の第4実施形態を示すブロック図で、この図18に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ75-1, エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ)71, 分散補償ファイバ72, 光分波合波器74, アイソレータ75-2が配設されている。そして、光分波合波器74に、励起光源73が接続されている。

ここで、励起光源73は、例えば1.47 μm帯域(1.45~1.49 μm)の励起光を生じるものである。

【0073】

このような構成により、この図18に示す光ファイバ増幅器では、励起光を光分波合波器74により分散補償ファイバ72の出力側から入射して、ラマン増幅を生じさせるととも

10

20

30

40

50

に、この分散補償ファイバ72からの残留励起光を、エルビウムドープファイバ71の出力端から入射して、エルビウムドープファイバ71を励起させ、信号光を増幅させる。

このように逆にラマン増幅の際の残留励起光でエルビウムドープファイバ71を励起することにより、前述の第2実施形態と同様に、エルビウムドープファイバの波長特性の凹凸を平坦化して、広帯域光増幅器を実現することができ、多波長一括増幅を行なう場合等に好適となるほか、励起光源が1つで済むので、構造の簡素化及びコストの低廉化にも寄与するのである。

なお、エルビウムドープファイバ、分散補償ファイバに共通の励起光源を用いて、両ファイバでの増幅が行なえる理由は、前述と同じである。

【0074】

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

また、励起光源73は、2つの励起光源と、これらの励起光源からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器とで構成されてもよく、励起光源とデポラライザとを組み合わせ、励起光の無偏光化を行なうように構成されてもよく、変調を施された励起光を発生するように構成されてもよい。

(5) 第5実施形態の説明

図19は本発明の第5実施形態を示すブロック図で、この図19に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ84-1、光分波合波器83、エルビウム(希土類元素)イオンをドープされた分散補償ファイバ(以下、エルビウムドープ分散補償ファイバという)81、アイソレータ84-2が配設されている。そして、光分波合波器83に、例えば1.47 μm 帯域(1.45~1.49 μm)や0.98 μm の励起光を生じる励起光源82が接続されている。

このような構成により、この図19に示す光ファイバ増幅器では、励起光を光分波合波器83によりエルビウムドープ分散補償ファイバ81の一端から入射して、このエルビウムドープ分散補償ファイバ81を励起させ、信号光を増幅させる。

【0075】

このように分散補償ファイバのコアにErイオンをドープすれば、励起光は分散補償ファイバ81内で急速に減衰するために、ラマン増幅も生じず、各微小区間で、分散補償ファイバ81の損失を補償することになり、信号対雑音比を良好に保つことが可能となる。

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

【0076】

なお、励起光源82は、2つの励起光源と、これらの励起光源からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器とで構成されてもよく、励起光源とデポラライザとを組み合わせ、励起光の無偏光化を行なうように構成されてもよく、変調を施された励起光を発生するように構成されてもよい。

(6) 第6実施形態の説明

図20は本発明の第6実施形態を示すブロック図で、この図20に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ96-1、光分波合波器94、エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ)91、アイソレータ96-2、光フィルタ95、分散補償ファイバ92が配設されている。そして、光分波合波器94に、例えば1.47 μm 帯域(1.45~1.49 μm)の励起光を生じる励起光源93が接続されている。

また、光フィルタ95は、エルビウムドープファイバ91から出てくる1.47 μm 帯域の残留励起光を遮断するものである。

【0077】

このような構成により、この図20に示す光ファイバ増幅器では、励起光を光分波合波器94によりエルビウムドープファイバ91の一端から入射して、エルビウムドープファイ

10

20

30

40

50

バ91を励起させ、信号光を増幅させるが、このとき、エルビウムドープファイバ91の他端から残留励起光が到達する。そして、この残留励起光は、光フィルタ95により遮断される。

もし、不必要に1.47 μ m帯の光を分散補償ファイバ92に通すとラマン増幅により、レベルダイヤ設計あるいは光増幅器の波長特性に擾乱を来すことになるから、この場合は、1.47 μ m帯の光が分散補償ファイバ92に入力されるのを光フィルタ95により遮断しているのである。

【0078】

従って、分散補償ファイバ92は主として伝送路の分散を補償するために使用されることになる。

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

【0079】

なお、励起光源93は、2つの励起光源と、これらの励起光源からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器とで構成されてもよく、励起光源とデポラライザとを組み合わせ、励起光の無偏光化を行なうように構成されてもよく、変調を施された励起光を発生するように構成されてもよい。

(7) 第7実施形態の説明

図21は本発明の第7実施形態を示すブロック図で、この図21に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ5-1、光分波合波器3-1、シリカをホストとするエルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ)1、光分波合波器3-2、アイソレータ5-2が配設されている。そして、光分波合波器3-1に、例えば0.98 μ m帯域の励起光を生じる励起光源2-1が接続されるとともに、光分波合波器3-2に、例えば約1.44 μ mの励起光あるいは約1.46 μ mの励起光を生じる励起光源2-2が接続されている。

ここで、光分波合波器3-1としてバルク型ではなく融着型のものを使用するとともに、励起光源2-1として光アイソレータ(光ISO)を内蔵しない型のものを使用しているのは、1.55 μ m帯域の光信号を増幅する際にエルビウムドープファイバ1で発生する1.55 μ m帯域の雑音光は、0.98 μ m帯域の励起光を生じる励起光源2-1には戻らないからである(以下の実施形態においても同様である)。

このような構成により、この図21に示す光ファイバ増幅器では、0.98 μ m帯域の励起光を光分波合波器3-1によりエルビウムドープファイバ1の一端から入射して、エルビウムドープファイバ1を励起させ、信号光を増幅させる。さらに、1.44 μ mの励起光あるいは1.46 μ mの励起光を光分波合波器3-2によりエルビウムドープファイバ1の出力端から入射して、エルビウムドープファイバ1でラマン増幅させる。

なお、エルビウムドープファイバ1においても、強い光を入力すると、ラマン増幅が生じることが知られている。

【0080】

このように、シリカをホストとするエルビウムドープファイバ1を一般的な励起波長[例えば0.98 μ m(1.47 μ mでもよい)]で増幅するとともに、~1.44 μ mでラマン増幅することにより、エルビウムドープファイバの1.54 μ m帯の利得のくぼみ(図26参照)を平坦化することができ、また、~1.46 μ mでラマン増幅することにより、1.57 μ m付近のエルビウムドープファイバの利得減少(図26参照)を補ってより特性を平坦化して広帯域化を実現できる。

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

【0081】

(8) 第8実施形態の説明

10

20

30

40

50

図 2 2 は本発明の第 8 実施形態を示すブロック図で、この図 2 2 に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ 1 4 4 - 1 , 分散補償ファイバ 1 4 1 , 偏向保持型光分波合波器 1 4 3 , アイソレータ 1 4 4 - 2 が配設されている。そして、光分波合波器 1 4 3 に、偏波合成型励起光源 1 4 2 が接続されている。

ここで、励起光源 1 4 2 は、2 つの励起光源 1 4 2 A , 1 4 2 B と、これらの励起光源 1 4 2 A , 1 4 2 B からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器 (P B S) 1 4 2 C とで構成されている。

【 0 0 8 2 】

そして、励起光源 1 4 2 A , 1 4 2 B は共に等しい励起光パワーを有し、共に例えば 1 . 4 5 ~ 1 . 4 9 μm (または 1 . 4 5 ~ 1 . 4 8 μm) の励起光を出力するものである。なお、光分波合波器 1 4 3 としては光学膜型のものが使用され、偏光状態を保持して光の合波或いは分波を行なえるようになっている。

10

【 0 0 8 3 】

このような構成により、この図 2 2 に示す光ファイバ増幅器では、直交偏波合成された励起光を光分波合波器 1 4 3 により分散補償ファイバ 1 4 1 の出力端から入射して、分散補償ファイバ 1 4 1 で効果的にラマン増幅を生じさせる。そして、このラマン増幅により、分散補償ファイバの損失補償を行なうことができるのである。

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図 3 9 や図 4 0 に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

20

【 0 0 8 4 】

また、分散補償ファイバ 1 4 1 のかわりに、シリカ系光ファイバを用いることもできる。さらに、励起光源 1 4 2 は、例えば図 2 4 , 図 2 5 に示す励起光源 5 3 - 2 , 5 3 - 2 と同様に、励起光源とデポライザとを組み合わせ、励起光の無偏光化を行なうように構成されてもよく、変調を施された励起光を発生するように構成されてもよい。

【 0 0 8 5 】

なお、図 2 4 , 図 2 5 に示す励起光源 5 3 - 2 , 5 3 - 2 については、それぞれ本発明の第 9 実施形態の第 1 変形例及び本発明の第 9 実施形態の第 2 変形例において説明する。

(9) 第 9 実施形態の説明

30

図 2 3 は本発明の第 9 実施形態を示すブロック図で、この図 2 3 に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ 5 5 - 1 , 光分波合波器 5 4 - 1 , エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ) 5 1 , アイソレータ 5 5 - 2 , 分散補償ファイバ 5 2 , 偏光保持型光分波合波器 5 4 - 2 , アイソレータ 5 5 - 3 が配設されている。そして、光分波合波器 5 4 - 1 に、励起光源 5 3 - 1 が接続されるとともに、光分波合波器 5 4 - 2 に、偏波合成型励起光源 5 3 - 2 が接続されている。

ここで、励起光源 5 3 - 1 は例えば 0 . 9 8 μm の励起光を出力するものであり、励起光源 5 3 - 2 は、2 つの励起光源 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 B と、これらの励起光源 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 B からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器 (P B S) 5 3 - 2 C とで構成されている。

40

【 0 0 8 6 】

そして、この場合も、励起光源 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 B は共に等しい励起光パワーを有し、共に例えば 1 . 4 5 ~ 1 . 4 9 μm (または 1 . 4 5 ~ 1 . 4 8 μm) の励起光を出力するものである。

なお、光分波合波器 5 4 - 1 としては、偏波保持の機能のない融着型のものが使用される一方、光分波合波器 5 4 - 2 としては、光学膜型のものが使用され、偏光状態を保持して光の合波或いは分波を行なえるようになっている。

【 0 0 8 7 】

このような構成により、この図 2 3 に示す光ファイバ増幅器では、励起光源 5 3 - 1 からの励起光は光分波合波器 5 4 - 1 からエルビウムドープファイバ 5 1 の一端から信号光と

50

ともに入射される。これにより、エルビウムドープファイバ51で信号光の増幅が行なわれる。

また、直交偏波合成するされた励起光が光分波合波器54-2により分散補償ファイバ52の出力端から入射して、分散補償ファイバ52で効果的にラマン増幅を生じさせる。そして、このラマン増幅により、分散補償ファイバ52の損失補償を行なう。

【0088】

このようにしても、前述の第8実施形態と同様の効果ないし利点を得られる。

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

10

【0089】

さらに、エルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部が、低雑音指数を有する光増幅部として構成されてもよく、分散補償ファイバからなるラマン光増幅部が、前段増幅部として配設されるとともに、エルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部が後段増幅部として配設されてもよい。

(9-1) 第9実施形態の第1変形例の説明

図24は本発明の第9実施形態の第1変形例を示すブロック図で、この図24に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ55-1、光分波合波器54-1、エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ)51、アイソレータ55-2、分散補償ファイバ52、偏光保持型光分波合波器54-2、アイソレータ55-3が配設されている。そして、光分波合波器54-1に、励起光源53-1が接続されるとともに、光分波合波器54-2に、無偏光偏波合成型励起光源53-2が接続されている。

20

ここで、励起光源53-1は例えば0.98 μm の励起光を出力するものであり、励起光源53-2は、1つの励起光源53-2Aと、この励起光をデポラライズ(無偏光化)するデポラライザ53-2Bとで構成されている。

【0090】

ここで、デポラライザ53-2Bは、分散補償ファイバ52からなるラマン光増幅器における偏光依存性を低減させるものであり、励起光源53-2Aからの励起光を分波する偏波保持カプラ53-2Eと、偏波保持カプラ53-2Eで分波された励起光及び遅延線によって遅延させられた励起光について直交偏波合成する偏波合成器(PBS)53-2Cとで構成されている。

30

そして、この場合も、励起光源53-2Aは、例えば1.45~1.49 μm (または1.45~1.48 μm)の励起光を出力するものである。

【0091】

なお、光分波合波器54-1としても、偏波保持の機能のない融着型のものが使用される一方、光分波合波器54-2としても、光学膜型のものが使用され、偏光状態を保持して光の合波或いは分波を行なえるようになっている。

このような構成により、この図24に示す光ファイバ増幅器では、励起光源53-1からの励起光は光分波合波器54-1からエルビウムドープファイバ51の一端から信号光とともに入射される。これにより、エルビウムドープファイバ51で信号光の増幅が行なわれる。

40

【0092】

また、無偏光化された励起光が光分波合波器54-2により分散補償ファイバ52の出力端から入射して、分散補償ファイバ52で効果的にラマン増幅を生じさせる。そして、このラマン増幅により、分散補償ファイバ52の損失補償を行なう。

このようにすれば、分散補償ファイバ52における偏光依存性を低減しながら、前述の第9実施形態と同様の効果ないし利点を得ることができる。

【0093】

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号

50

光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

さらに、エルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部が、低雑音指数を有する光増幅部として構成されてもよく、分散補償ファイバからなるラマン光増幅部が、前段増幅部として配設されるとともに、エルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部が後段増幅部として配設されてもよい。

(9 - 2) 第 9 実施形態の第 2 変形例の説明

図 2 5 は本発明の第 9 実施形態の第 2 変形例を示すブロック図で、この図 2 5 に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ 5 5 - 1 , 光分波合波器 5 4 - 1 , エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ) 5 1 , アイソレータ 5 5 - 2 , 分散補償ファイバ 5 2 , 偏光保持型光分波合波器 5 4 - 2 , アイソレータ 5 5 - 3 が配設されている。そして、光分波合波器 5 4 - 1 に、励起光源 5 3 - 1 が接続されるとともに、光分波合波器 5 4 - 2 に、変調偏波合成型励起光源 5 3 - 2 が接続されている。

ここで、励起光源 5 3 - 1 は例えば $0.98 \mu\text{m}$ の励起光を出力するものであり、励起光源 5 3 - 2 は、2 つの励起光源 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 B と、これらの励起光源 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 B からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器 (P B S) 5 3 - 2 C と、各励起光源 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 B に対して数百 kHz ~ 1 MHz の変調を施す変調器 5 3 - 2 D とで構成されている。

そして、この場合も、励起光源 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 B は共に等しい励起光パワーを有し、共に例えば $1.45 \sim 1.49 \mu\text{m}$ (または $1.45 \sim 1.48 \mu\text{m}$) の励起光を出力するものである。

【 0 0 9 4 】

なお、光分波合波器 5 4 - 1 としても、偏波保持の機能のない融着型のものが使用される一方、光分波合波器 5 4 - 2 としても、光学膜型のもものが使用され、偏光状態を保持して光の合波或いは分波を行なえるようになっている。

このような構成により、この図 2 5 に示す光ファイバ増幅器では、励起光源 5 3 - 1 からの励起光は光分波合波器 5 4 - 1 からエルビウムドープファイバ 5 1 の一端から信号光とともに入射される。これにより、エルビウムドープファイバ 5 1 で信号光の増幅が行なわれる。

【 0 0 9 5 】

また、変調されそのスペクトルが数百 kHz 以上になっており、且つ直交偏波合成された励起光 (この励起光のスペクトル線幅を広げることができる) が光分波合波器 5 4 - 2 により分散補償ファイバ 5 2 の出力端から入射して、分散補償ファイバ 5 2 で効果的にラマン増幅を生じさせる。そして、このラマン増幅により、分散補償ファイバの損失補償を行なう。

このようにすれば、誘導ブリルアン散乱のしきい値を高め、有害な非線型効果を抑制しながら、前述の第 9 実施形態と同様の効果ないし利点を得ることができる。

【 0 0 9 6 】

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図 3 9 や図 4 0 に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

さらに、エルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部が、低雑音指数を有する光増幅部として構成されてもよく、分散補償ファイバからなるラマン光増幅部が、前段増幅部として配設されるとともに、エルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部が後段増幅部として配設されてもよい。

(1 0) 第 1 0 実施形態の説明

図 2 8 は本発明の第 1 0 実施形態を示すブロック図で、この図 2 8 に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ 1 2 5 - 1 , 光分波合波器 1 2 4 - 1 , エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ) 1 2 1 - 1 , アイソレータ 1 2 5 - 2 , シリカ系光ファイバ 1 2 2 , エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ) 1 2 1 - 2 , 光分波合波器 1 2 4 - 3 , アイソレータ 1 2 5 - 3 が配設されている。そして、光分波合

波器 124-1, 124-3 に、例えば 1.47 μ m 帯域 (1.45 ~ 1.49 μ m) の励起光を生じる励起光源 123-1, 123-3 (第 1 のエルビウムドープファイバ 121-1 に結合されたシリカ系ファイバ 122 を例えば 1.47 μ m 帯域の励起光で励起して、シリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源として機能している。) が接続されている。

ここで、シリカ系光ファイバ 122 は、励起波長により増幅周波数帯域が変えることができるラマン光増幅器として機能するものであり、その帯域特性はホストガラスのシリカとコアのドープ材料及び濃度によって決まる。

【0097】

また、エルビウムドープファイバ 121-1, 121-2 は、増幅周波数帯域とその帯域特性がホストガラスとコアのドープ材料によって決まる希土類ドープファイバ光増幅器として機能するものである (光ファイバ増幅器として機能し、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 121-1, 121-2 からなり、例えば 1.47 μ m 帯域の光信号を増幅する。)

本実施形態におけるシリカ系光ファイバ 122 のモードフィールド径は小さくされており、シリカ系光ファイバ 122 からなるラマン光増幅器の雑音指数が、エルビウムドープファイバ 121-1, 121-2 からなる希土類ドープファイバ光増幅器より大きい場合には、前段増幅部に希土類ドープファイバ光増幅器を用いるとともに、中段増幅部にラマン光増幅器を用い、更に、信号光パワーが大きい後段増幅部には希土類ドープファイバ光増幅器を用いて、これらを縦続的に接続することにより、低雑音で且つより平坦な帯域特性

あるいは広い増幅周波数帯域を有する光ファイバ増幅器を実現しているのである。即ち、低雑音指数を有する希土類ドープファイバ光増幅器 (1.47 μ m 帯励起によるエルビウムドープファイバ光増幅器など) を前段増幅部に用いて、極小の信号光を低雑音な状態で増幅するのであり、また、信号対雑音比 (SNR) を劣化させる非線形効果 (ここで、非線形効果とは、信号光の自己位相変調 (Self-Phase Modulation, SPM)、四光子混合 (Four Wave Mixing, FWM)、相互位相変調 (Cross-Phase Modulation, XPM) などの信号対雑音比 (SNR) を劣化させるものである) の影響を低減するために、信号光パワーが小さいシリカ系光ファイバを用いたラマン光増幅器を中段増幅部に用いているのである。

【0098】

すなわち、本実施形態の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 121-1, 121-2 からなり、波長に依存した利得特性を有し、第 1 の波長帯域内の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ 121-1 に結合されたシリカ系光ファイバ 122 を第 2 の波長帯域の励起光で励起して、前記希土類ドープファイバ光増幅部の利得特性が補償されるようにシリカ系光ファイバ 122 で光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源 123-3 とをそなえたことになる。

このような構成により、この図 28 に示す光ファイバ増幅器では、励起光を光分波合波器 124-1 によりエルビウムドープファイバ 121-1 の一端から入射して、エルビウムドープファイバ 121-1 を励起させ、信号光を増幅させるとともに、このとき生じる残留励起光により、シリカ系光ファイバ 122 を励起させ、分散補償ファイバと同様に、ラ

マン増幅させる。さらに、励起光を光分波合波器 124-3 によりエルビウムドープファイバ 121-2 の出力端から入射して、エルビウムドープファイバ 121-2 を励起させ、信号光を増幅させるとともに、このとき生じる残留励起光により、シリカ系光ファイバ 122 を励起させ、ラマン増幅させる。すなわち、ラマン増幅用励起光源が、エルビウムドープファイバ光増幅部 121-2 の前段に設けられるようにもできる。

【0099】

このように、図 28 に示す光ファイバ増幅器において、1.47 μ m 帯の励起光源 123-1, 123-3 を用いることにより、エルビウムドープファイバ 121-1, 121-2 及びシリカ系光ファイバ 122 のいずれをも励起することができ、これにより、図 7 に

10

20

30

40

50

示す光ファイバ増幅器における励起光源 123 - 2 を削減することができ、光ファイバ増幅器の簡素化及び励起光パワーの効率化を図ることができる。

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図 39 や図 40 に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

【0100】

なお、シリカ系光ファイバ 122 とエルビウムドープファイバ 121 - 2 との間にアイソレータを設けるようにしてもよい。

また、シリカ系光ファイバ 122 用の励起光源及び光分波合波器を設けることもできる。この場合、光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 121 - 1, 121 - 2 からなり、波長に依存した利得特性を有し、1.47 μm 帯域内の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ 121 - 1, 121 - 2 に結合されたシリカ系光ファイバ 122 を 1.47 μm 帯域の励起光で励起して、前記希土類ドープファイバ光増幅部の利得特性が補償されるようにシリカ系光ファイバ 122 で光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源 123 - 1, 123 - 3 とをそなえたことになる。また、これらのラマン増幅用励起光源 123 - 1, 123 - 3 から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源 123 - 1, 123 - 3 から出力される励起光の波長帯域とが実質的に等しいように選択されていることになる。

【0101】

即ち、図 7 と同様の要領で、0.98 μm 帯の励起光源 123 - 1 ~ 123 - 3 及び光分波合波器（ラマン増幅用励起光源 121 - 1, 123 - 3 からの励起光をシリカ系光ファイバ 122 に入射する光分波合成器として機能している。）124 - 1 ~ 124 - 3 を用いて光ファイバ増幅器を構成するようにしてもよい。

なお、シリカ系光ファイバ 122 のかわりに、分散補償ファイバを用いてもよい。

（10）第 10 実施形態の変形例の説明

図 29 は本発明の第 10 実施形態の変形例を示すブロック図で、この図 29 に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ 125 - 1, 光分波合波器 124 - 1, エルビウムドープファイバ（希土類ドープファイバ）121 - 1, アイソレータ 125 - 2, シリカ系光ファイバ 122, 光フィルタ 126, エルビウムドープファイバ（希土類ドープファイバ）121 - 2, 光分波合波器 124 - 3, アイソレータ 125 - 3 が配設されている。そして、光分波合波器 124 - 1, 124 - 3 に、それぞれ偏波合成型励起光源 123 - 1, 123 - 3 が接続されている。

ここで、励起光源 123 - 1 は、2つの励起光源 123 - 1 A, 123 - 1 B と、これらの励起光源 123 - 1 A, 123 - 1 B からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器（PBS）123 - 1 C とで構成されており、励起光源 123 - 1 A, 123 - 1 B は共に等しい励起光パワーを有し、共に例えば 1.45 ~ 1.49 μm （または 1.45 ~ 1.48 μm ）の励起光を出力するものである。

また、励起光源 123 - 3 は、2つの励起光源 123 - 3 A, 123 - 3 B と、これらの励起光源 123 - 3 A, 123 - 3 B からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器（PBS）123 - 3 C とで構成されているが、単に励起光パワーを増加させるために直交偏波合成した励起光源であるため、励起光源 123 - 3 A, 123 - 3 B の励起波長及び励起光パワーは異なってもよい。

さらに、シリカ系光ファイバ 122 内でも直交偏波合成した励起光の無偏光状態が保たれるように、エルビウムドープファイバ 121 - 1 及びシリカ系光ファイバ 122 はしっかりとポピン等に固定されているか、筐体の中に納められることにより、外気の影響等を受けないようになっている。

【0102】

なお、アイソレータ 125 - 1 ~ 125 - 3 は、偏波無依存型の光アイソレータであり、光フィルタ 126 は、エルビウムドープファイバ 121 - 1 で発生した 1.535 μm 近傍の ASE ピークを除去あるいは平坦化する光フィルタであり、省略することもできる。

従って、本実施形態の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ121-1, 121-2と、エルビウムドープファイバ121-1, 121-2を励起する励起光を出力する励起光源123-1, 123-3とを有し、0.98 μ m帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ121-1, 121-2と結合されたシリカ系光ファイバ122内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.44 μ mまでの波長の励起光でシリカ系光ファイバ122を励起する励起光源123-1と、励起光源123-1からの励起光をシリカ系光ファイバ122に入射する光分波合成器(光カプラ)124-1とをそなえたことになる。

このような構成により、この図29に示す光ファイバ増幅器では、1.47 μ m帯域の励起光を光分波合波器124-1によりエルビウムドープファイバ121-1の一端から入射して、エルビウムドープファイバ121-1を励起させ、信号光を増幅させるとともに、このとき生じる残留励起光により、シリカ系光ファイバ122を励起させ、ラマン増幅させる。

さらに、1.47 μ mの励起光を光分波合波器124-3によりエルビウムドープファイバ121-2の出力端から入射して、エルビウムドープファイバ121-2を励起させ、増幅させるとともに、このとき生じる残留励起光により、シリカ系光ファイバ122を励起させ、ラマン増幅させる。すなわち、ラマン増幅用励起光源123-3は、エルビウムドープファイバ光増幅部121-2の前段に設けられるように構成することもできる。

【0103】

このように、図29に示す光ファイバ増幅器において、1.47 μ m帯の励起光源123-1, 123-3を用いることにより、エルビウムドープファイバ121-1, 121-2及びシリカ系光ファイバ122のいずれをも励起することができ、これにより、図7に示す光ファイバ増幅器における励起光源123-2を削減することができ、光ファイバ増幅器の簡素化及び励起光パワーの効率化を図ることができる。

また、この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

【0104】

さらに、シリカ系光ファイバ122用の励起光源及び光分波合波器を設けることもできる。この場合、ラマン増幅用励起光源が、2つの励起光源と、これら2つの励起光源からの励起光について偏波合成する偏波合成器とから構成されてもよい。

即ち、図7と同様の要領で、0.98 μ m帯の励起光源123-1~123-3及び光分波合波器124-1~124-3を用いて光ファイバ増幅器を構成するようにしてもよい。

【0105】

従って、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ121-1, 121-2からなり、波長に依存した利得特性有し、1.47 μ m帯域内の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ121-1, 121-2に結合されたシリカ系光ファイバ122を1.47 μ m帯域の励起光で励起して、前記希土類ドープファイバ光増幅部の利得特性が補償されるようにシリカ系光ファイバ122で光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源とをそなえたことになる。

【0106】

即ち、図7と同様の要領で、0.98 μ m帯の励起光源123-1~123-3及び光分波合波器124-1~124-3を用いて光ファイバ増幅器を構成するようにしてもよい。

従って、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ121-1, 121-2からなり、例えば1.47 μ m帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ121-1, 121-2に結合されたシリカ系光ファイバ122を例えば1.47 μ m帯域の励起光で励起して、シリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源(図示省略)とをそなえたことになる。

10

20

30

40

50

【0107】

また、従って、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ121-1, 121-2と、エルビウムドープファイバ121-1, 121-2を励起する励起光を出力する第一励起光源123-1, 123-3とを有し、1.47 μ m帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ121-1, 121-2と結合されたシリカ系光ファイバ122内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.47 μ m帯域の励起光でシリカ系光ファイバ122を励起するラマン増幅用励起光源とをそなえ、第1の励起光源123-1, 123-3から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源123-1, 123-2から出力される励起光の波長帯域とが実質的に等しいように選択されていることになる。

10

【0108】

そして、光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ121-1, 121-2と、エルビウムドープファイバ121-1, 121-2を励起する励起光を出力する第1励起光源123-1, 123-3とを有し、第1の波長帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ121-1, 121-2と結合されたシリカ系光ファイバ122内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.44 μ mまでの波長(\sim 1.44 μ m)の励起光でシリカ系光ファイバ122を励起するラマン増幅用励起光源と、ラマン増幅用励起光源からの励起光をシリカ系光ファイバに入射する光分波合成器とをそなえてもよい。

【0109】

なお、シリカ系光ファイバ122とエルビウムドープファイバ121-2との間にアイソレータを設けるようにしてもよい。

20

また、シリカ系光ファイバ122のかわりに、分散補償ファイバを用いてもよい。

【0110】

(11)第11実施形態の説明

図30は本発明の第11実施形態を示すブロック図で、この図30に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ115-1, 光分波合波器114-1, エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ)111, アイソレータ115-2, シリカ系光ファイバ112, 偏光保持型光分波合波器114-2, アイソレータ115-3が配設されている。そして、光分波合波器114-1に、励起光源113-1が接続されるとともに、光分波合波器114-2に、偏波合成型励起光源113-2が接続されている。

30

そこで、図30に示す光ファイバ増幅器では、これらの希土類ドープファイバ光増幅器とラマン光増幅器とを用いて互いに補償して、より平坦な帯域特性あるいは広い増幅周波数帯域を得ることができるようにしているのであり、低雑音指数を有する希土類ドープファイバ光増幅器(0.98 μ m帯励起あるいは1.47 μ m帯励起によるエルビウムドープファイバ光増幅器など)を前段増幅部に用いるとともに、後段増幅部にシリカ系光ファイバからなるラマン光増幅器を用いて、これらを縦続的に接続することにより、光ファイバ増幅器が低雑音特性を有するより平坦な帯域特性あるいは広い増幅周波数帯域を有するようになっている。すなわち、ラマン増幅用励起光源113-1は、希土類ドープファイバ光増幅部111の前段に設けられるように構成することもできる。

40

即ち、ラマン光増幅器の雑音指数が希土類ドープファイバ光増幅器のものより大きい場合には、前段増幅部に希土類ドープファイバ光増幅器を用いるとともに、後段増幅部にラマン光増幅器を用いて、これらを縦続的に接続することにより、低雑音な光ファイバ増幅器を実現しているのである。

【0111】

従って、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ111からなり、例えば0.98 μ m帯域の励起光で光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ111に結合されたシリカ系光ファイバ112を例えば1.47 μ m帯域の励起光で励起して、シリカ系光ファイバ112で光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源113-2とをそなえたことになる。

50

【0112】

また、従って、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ111と、エルビウムドープファイバ111を励起する励起光を出力する励起光源113-1とを有し、0.98 μ mの波長帯域の励起光で光信号を増幅する光増幅部と、エルビウムドープファイバ111と結合されたシリカ系光ファイバ112内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.47 μ mの波長の励起光でシリカ系光ファイバ112を励起するラマン増幅用励起光源113-2とをそなえ、励起光源113-1から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源113-2から出力される励起光の波長帯域とが異なるように選択されていることになる。

【0113】

ここで、励起光源113-1から出力される励起光の波長帯域が0.98 μ m帯域であり、ラマン増幅用励起光源113-2から出力される励起光の波長が1.45 μ m乃至1.49 μ mの波長帯域にある。

さらに、励起光源113-1は例えば0.98 μ mの励起光を出力するものであり、励起光源113-2は、2つの励起光源113-2A, 113-2Bと、これらの励起光源113-2A, 113-2Bからの励起光について直交偏波合成する偏波合成器(PBS)113-2Cとで構成されている。

【0114】

従って、ラマン増幅用励起光源113-2が、2つの励起光源113-2A, 113-2Bと、これら2つの励起光源113-2A, 113-2Bからの励起光について偏波合成する偏波合成器113-2Cとから構成されたことになる。そして、この場合も、励起光源113-2A, 113-2Bは共に等しい励起光パワーを有し、共に例えば1.45~1.49 μ m(または1.45~1.48 μ m)の励起光を出力するものである。

なお、光分波合波器114-1としては、偏波保持の機能のない融着型のものが使用される一方、光分波合波器114-2としては、光学膜型のものが使用され、偏光状態を保持して光の合波或いは分波を行なえるようになっている。

【0115】

このような構成により、この図30に示す光ファイバ増幅器では、励起光源113-1からの励起光は光分波合波器114-1からエルビウムドープファイバ111の一端から信号光とともに入射される。これにより、エルビウムドープファイバ111で信号光の増幅が行なわれる。

また、直交偏波合成された励起光が光分波合波器114-2によりシリカ系光ファイバ112の出力端から入射して、シリカ系光ファイバ112で効果的にラマン増幅を生じさせる。そして、このラマン増幅により、シリカ系光ファイバ112の損失補償を行なう。

【0116】

このようにしても、前述の第9実施形態と同様の効果ないし利点を得られる。

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

【0117】

なお、1.47 μ m帯域の励起光を生じる励起光源を設けて、この励起光源が、シリカ系光ファイバ用励起光源及びエルビウムドープファイバ用励起光源を兼用するようによい。

すなわち、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ111と、エルビウムドープファイバ111を励起する励起光を出力する第一励起光源113-1とを有し、0.98 μ m帯域の励起光で光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ111と結合されたシリカ系光ファイバ112内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.47 μ m帯域の励起光でシリカ系光ファイバ112を励起するラマン増幅用励起光源113-2とをそなえている。そして、第1の励起光源113-1から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源113-2から出力される励起

10

20

30

40

50

光の波長帯域とが実質的に等しいように選択されてもよい。

【0118】

従って、光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ111と、エルビウムドープファイバ111を励起する励起光を出力する第1励起光源113-1とを有し、第1の波長帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ111と結合されたシリカ系光ファイバ112内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.44 μm までの波長($\sim 1.44\mu\text{m}$)の励起光でシリカ系光ファイバ112を励起するラマン増幅用励起光源113-2と、ラマン増幅用励起光源113-2からの励起光をシリカ系光ファイバ112へ入射する光分波合成器114-2とをそなえてもよい。

10

【0119】

従って、光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ111からなり、波長に依存した利得特性を有し、0.98 μm 帯域内の励起光で光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ111に結合されたシリカ系光ファイバ112を第2の波長帯域の励起光で励起して、前記希土類ドープファイバ光増幅部の利得特性が補償されるようにシリカ系光ファイバ112で光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源53-2とをそなえて構成されてもよい。

また、ラマン光増幅器によって高い出力が得られない場合には、入力側の増幅部(前段増幅部)にシリカ系光ファイバ又は分散補償ファイバからなるラマン光増幅器を用いるとともに、出力側の増幅部(後段増幅部)にエルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅器を用いて、これらを縦列的に接続する。

20

特に、ラマン光増幅器用励起光源の励起波長を約1.44 μm とすると、希土類ドープファイバ光増幅器における約1.54 μm 近傍に生じる利得の窪みをラマン光増幅によって補償することができ、また、ラマン光増幅器用励起光源の励起波長を約1.46 μm とすると、希土類ドープファイバ光増幅器における約1.57 μm より長波長側で生じる利得の減少をラマン光増幅によって補償することができ、これにより、光ファイバ増幅器の更なる帯域特性の平坦化あるいは高帯域化が可能となる。

さらに、シリカ系光ファイバ又は分散補償ファイバを用いたラマン光増幅器の利得が生じはじめる励起光パワー(しきい値励起光パワー)を低減するため、モードフィールド径を小さくしたシリカ系光ファイバを用いるとともに、このモードフィールド径を小さくしたが大いになった非線形効果の影響を低減するために、信号光パワーが小さい入力側の増幅部(前段増幅部)にシリカ系光ファイバからなるラマン光増幅器を用いるとともに、信号光パワーが大きい出力側の増幅部(後段増幅部)にエルビウムドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅器を用いて、これらを縦列的に接続することにより、光ファイバ増幅器が更に平坦な帯域特性あるいは広い増幅周波数帯域を有するようにすることもできる。

30

(11-1)第11実施形態の第1変形例の説明

図31は本発明の第11実施形態の第1変形例を示すブロック図で、この図31に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ115-1、光分波合波器114-1、エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ)111、アイソレータ115-2、シリカ系光ファイバ112、偏光保持型光分波合波器114-2、アイソレータ115-3が配設されている。そして、光分波合波器114-1に、励起光源113-1が接続されるとともに、光分波合波器114-2に、無偏光偏波合成型励起光源113-2が接続されている。

40

ここで、励起光源113-1は例えば0.98 μm の励起光を出力するものであり、励起光源113-2は、1つの励起光源113-2Aと、この励起光をデポラライズ(励起光を無偏光化する手段)するデポラライザ113-2Bとで構成されている。

【0120】

また、デポラライザ113-2Bは、シリカ系光ファイバ112からなるラマン光増幅器における偏光依存性を低減させるものであり、励起光源113-2Aからの励起光を

50

分波する偏波保持カップラ 113-2E と、偏波保持カップラ 113-2E で分波された励起光及び遅延線によって遅延させられた励起光について直交偏波合成する偏波合成器 (PBS) 113-2C とで構成されている。

そして、この場合も、励起光源 113-2A は、例えば 1.45 ~ 1.49 μm (または 1.45 ~ 1.48 μm) の励起光を出力するものである。

【0121】

なお、光分波合波器 114-1 としても、偏波保持の機能のない融着型のものが使用される一方、光分波合波器 114-2 としても、光学膜型のものが使用され、偏光状態を保持して光の合波或いは分波を行なえるようになっている。

このような構成により、この図 31 に示す光ファイバ増幅器では、励起光源 113-1 からの励起光は光分波合波器 114-1 からエルビウムドープファイバ 111 の一端から信号光とともに入射される。これにより、エルビウムドープファイバ 111 で信号光の増幅が行なわれる。

10

【0122】

また、無偏光化された励起光が光分波合波器 114-2 によりシリカ系光ファイバ 112 の出力端から入射して、シリカ系光ファイバ 112 で効果的にラマン増幅を生じさせる。

そして、このラマン増幅により、シリカ系光ファイバ 112 の損失補償を行なう。

このようにすれば、シリカ系光ファイバ 112 における偏光依存性を低減しながら、前述の第 11 実施形態と同様の効果ないし利点を得ることができる。

【0123】

20

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図 39 や図 40 に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

すなわち、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 111 と、エルビウムドープファイバ 111 を励起する励起光を出力する第一励起光源 113-1 とを有し、0.98 μm の波長帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ 111 と結合されたシリカ系光ファイバ 112 内で光信号がラマン増幅されるように選択された波長の 1.47 μm の励起光でシリカ系光ファイバ 112 を励起するラマン増幅用励起光源 113-2 とをそなえている。

【0124】

30

そして、第一励起光源 113-1 から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源 113-2 から出力される励起光の波長帯域とが異なるように選択されていることになる。ここで、第一の励起光源 113-1 から出力される励起光の波長帯域が 0.98 μm 帯域であり、ラマン増幅用励起光源 113-2 から出力される励起光の波長が 1.45 μm 乃至 1.49 μm の波長帯域にある。

【0125】

すなわち、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 111 と、エルビウムドープファイバ 111 を励起する励起光を出力する第一励起光源 113-1 とを有し、0.98 μm 帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ 111 と結合されたシリカ系光ファイバ 112 内で光信号がラマン増幅されるように選択された 1.47 μm 帯域の励起光でシリカ系光ファイバ 112 を励起するラマン増幅用励起光源 113-2 とをそなえ、第一の励起光源 113-1 から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源 113-2 から出力される励起光の波長帯域とが実質的に等しいように選択されていることになる。

40

なお、1.47 μm 帯域の励起光を生じる励起光源を設けて、この励起光源が、シリカ系光ファイバ用励起光源及びエルビウムドープファイバ用励起光源を兼用するようにしてもよい。

【0126】

従って、光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 111 と、エルビウムドープファイバ 111 を励起する励起光を出力する第一励起光源 113-1

50

とを有し、第1の波長帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ111と結合されたシリカ系光ファイバ112内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.44 μmまでの波長(～1.44 μm)の励起光でシリカ系光ファイバ112を励起するラマン増幅用励起光源113 2と、ラマン増幅用励起光源113 2からの励起光をシリカ系光ファイバ112へ入射する光分波合成器114 2とをそなえてもよい。

【0127】

(11-2)第11実施形態の第2変形例の説明

図32は本発明の第11実施形態の第2変形例を示すブロック図で、この図32に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ115-1、光分波合波器114-1、エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ)111、アイソレータ115-2、シリカ系光ファイバ112、偏光保持型光分波合波器114-2、アイソレータ115-3が配設されている。そして、光分波合波器114-1に、励起光源113-1が接続されるとともに、光分波合波器114-2に、変調偏波合成型励起光源113-2が接続されている。

ここで、励起光源113-1は例えば0.98 μmの励起光を出力するものであり、励起光源113-2は、2つの励起光源113-2A、113-2Bと、これらの励起光源113-2A、113-2Bからの励起光について直交偏波合成する偏波合成器(PBS)113-2Cと、各励起光源113-2A、113-2Bに対して数百kHz～1MHzの変調を施す変調器113-2Dとで構成されている。

そして、この場合も、励起光源113-2A、113-2Bは共に等しい励起光パワーを有し、共に例えば1.45～1.49 μm(または1.45～1.48 μm)の励起光を出力するものである。

【0128】

なお、光分波合波器114-1としても、偏波保持の機能のない融着型のものが使用される一方、光分波合波器114-2としても、光学膜型のものが使用され、偏光状態を保持して光の合波或いは分波を行なえるようになっている。

従って、光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ111と、エルビウムドープファイバ111を励起する励起光を出力する第1励起光源113-1とを有し、第1の波長帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ111と結合されたシリカ系光ファイバ112内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.44 μmまでの波長(～1.44 μm)の励起光でシリカ系光ファイバ112を励起するラマン増幅用励起光源113 2と、ラマン増幅用励起光源113 2からの励起光をシリカ系光ファイバ112へ入射する光分波合成器114 2とをそなえてもよい。

このような構成により、この図32に示す光ファイバ増幅器では、励起光源113-1からの励起光は光分波合波器114-1からエルビウムドープファイバ111の一端から信号光とともに入射される。これにより、エルビウムドープファイバ111で増幅が行なわれる。

【0129】

また、変調されそのスペクトルが数百kHz以上になっており、且つ直交偏波合成された励起光(この励起光のスペクトル線幅を広げることができる)が光分波合波器114-2によりシリカ系光ファイバ112の出力端から入射して、シリカ系光ファイバ112で効果的にラマン増幅を生じさせる。そして、このラマン増幅により、シリカ系光ファイバ112の損失補償を行なう。

このようにすれば、誘導ブリルアン散乱のしきい値を高め、有害な非線型効果を抑制しながら、前述の第11実施形態と同様の効果ないし利点を得ることができる。

【0130】

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図4

0 に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

なお、 $1.47\ \mu\text{m}$ 帯域の励起光を生じる励起光源を設けて、この励起光源が、シリカ系光ファイバ用励起光源及びエルビウムドープファイバ用励起光源を兼用するようにしてもよい。

【0131】

(12) 第12実施形態の説明

図35は本発明の第12実施形態を示すブロック図で、この図35に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ65-1、光分波合波器64、エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ増幅部)61、分散補償ファイバ62(光ファイバ減衰部)10、アイソレータ65-3が配設されている。そして、光分波合波器64に、励起光源63が接続されている。

ここで、励起光源63は、例えば $1.47\ \mu\text{m}$ 帯域($1.45\sim 1.49\ \mu\text{m}$)の励起光を生じるものである。

【0132】

また、利得が高い希土類ドープファイバ光増幅器では、光増幅を行なう際に不要な発振が生じることがあり、このように不要な発振が生じた場合には、希土類ドープファイバ光増幅器が不安定に動作する。

例えば、エルビウムドープファイバ光増幅器では、光増幅を行なう際に、 $1.53\sim 1.57\ \mu\text{m}$ の自然放光(ASE)が発生するが、このASEはエルビウムドープファイバ光増幅器内の反射点で反射を繰り返すため、不要な発振が生じることがある。特に、多波長一括増幅用に調整されたエルビウムドープファイバ光増幅器(即ち、励起率が高いエルビウムドープファイバ光増幅器)では、 $1.53\ \mu\text{m}$ 付近の利得が高いため、この波長で不要な発振が生じやすく、このように不要な発振が生じた場合には、エルビウムドープファイバ光増幅器が不安定に動作する。20

このような不安定動作を抑制するためには、信号光を損失(減衰)させる媒体(これを損失媒体という)を設けることが有効である(この原理については後述する)。

【0133】

図35に示すような光ファイバ増幅器では、エルビウムドープファイバ61を介して入射された残留励起光により分散補償ファイバ62を励起して、この分散補償ファイバ62での信号光の損失(減衰)を補償するようになっているが、実際には、全ての損失を補償することは困難であり、ある程度の損失が残るため、分散補償ファイバ62が損失媒体として機能することとなる。30

ここで、損失媒体を設けることによる不安定動作の抑制の原理を説明する。

【0134】

一般に、エルビウムドープファイバの利得を G とし、エルビウムドープファイバの両端(前端および後端)での反射率をそれぞれ R_1 、 R_2 (ここで、反射率 R_1 はエルビウムドープファイバの前端より前段にある全ての部品からの反射の反射率であり、反射率 R_2 はエルビウムドープファイバの後端より後段にある全ての部品からの反射の反射率である)として R_1 と R_2 の幾何平均を R ($R = (R_1 R_2)^{1/2}$)とすると、 GR をエルビウムドープファイバの動作の安定度の目安とすることができる。40 GR が大きいとエルビウムドープファイバは不安定に動作し、特に、 GR が1以上のときエルビウムドープファイバでは発振が生じる。このため、 GR が小さくなるようにする必要があり、具体的には、 GR は 0.02 以下が目安となる。

図35に示すように、エルビウムドープファイバ61(このエルビウムドープファイバ61の利得を G とする)の後段(信号光の出力側)に、分散補償ファイバ62(この分散補償ファイバ62の損失を(0 1)とする)を、例えば融着接続することにより設けると、エルビウムドープファイバ61と分散補償ファイバ62との間に境界Aが生じる。50

このときは、図35に示すように、エルビウムドープファイバ61の後端での反射率を R

1, 分散補償ファイバ62の前端での反射率を R_2 (ここで、反射率 R_1 はエルビウムドープファイバ61の前端より前段にある全ての部品からの反射の反射率であり、反射率 R_2 は分散補償ファイバ62の後端より後段にある全ての部品からの反射の反射率である)とする。また、エルビウムドープファイバ61と分散補償ファイバ62との境界Aでの屈折率差によって生じる反射の反射率を R_A ($R_A = R_1, R_2$; 損失媒体が光ファイバであればこの条件を満たす)とすると、エルビウムドープファイバの動作の安定度を示すパラメータは、 G_R から $(G - R)$ となる。即ち、 G_R は光が一巡するときの片道の利得と考えられ、損失媒体を設けたときには、光が一巡するときの正味の利得は、 $(R_1 \times G \times R_2) \times (R_2 \times G) = (G - R)^2 R_1 R_2$ となるため、片道での正味の利得は、 $G - (R_1 R_2)^{1/2} = (G - R)$ となる。なお、 $R_A = R_1, R_2$ であるため、反射率 R_A の影響は無視することができるものとする。ここで、 $0 < R < 1$ であるため、等価的に G_R が小さくなる。

10

このように、損失媒体を設けることにより、エルビウムドープファイバの動作の安定度を示すパラメータ G_R が小さくなるため、エルビウムドープファイバ61の不安定動作を抑制することができる。

【0135】

本実施形態にかかる光ファイバ増幅器では、図35に示すように、分散補償ファイバ62をエルビウムドープファイバ61の後段に設けて、この分散補償ファイバ62を、エルビウムドープファイバ61からの残留励起光を用いて励起することにより、この分散補償ファイバ62の損失補償(エルビウムドープファイバ61の利得のくぼみの平坦化やエルビウムドープファイバ61の利得の減少の補填補償を含む)を行なうと同時に、残った損失分によって、エルビウムドープファイバ61の不安定動作を抑制するようになっている。このような構成により、この図35に示す光ファイバ増幅器では、励起光および信号光を光分波合波器64によりエルビウムドープファイバ61の一端から入射して、エルビウムドープファイバ61を励起させ、信号光を増幅させるが、エルビウムドープファイバ61の他端へは残留励起光が到達する。その後は、この残留励起光を分散補償ファイバ62へ供給して、ラマン増幅を生じさせる。

20

このようにエルビウムドープファイバ、分散補償ファイバに共通の励起光源を用いて、両ファイバでの増幅が行なえるのは次のとおりである。

【0136】

即ち、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の信号光をラマン増幅する際の励起波長帯はエルビウムドープファイバ(EDF)の励起波長帯である $1.47 \mu\text{m}$ 帯($1.45 \sim 1.49 \mu\text{m}$)であるからであり、従って、EDFを $1.47 \mu\text{m}$ 帯の光で励起した際の残留励起光パワーを用いて、ラマン増幅を行なうことができるのである。これにより、エルビウムドープファイバ61で光増幅を行ないながら、分散補償ファイバ62の損失を補償できるのである。これにより、前述の第7実施形態と同様に、エルビウムドープファイバ増幅器の波長特性の凹凸を平坦化して、広帯域光増幅器を実現することができ、多波長一括増幅を行なう場合等に好適となるほか、励起光源が1つで済むので、構造の簡素化及びコストの低廉化にも寄与しうるのである。

30

【0137】

また、この光ファイバ増幅器では、分散補償ファイバ62の損失分によって、エルビウムドープファイバ61の不安定動作を抑制することも同時に行なわれており、これにより、波長多重(WDM)用に調整された希土類ドープファイバ光増幅器における不要な発振動作を防ぎ、安定した光増幅を行なうことができる。

40

なお、励起光源63が $0.98 \mu\text{m}$ の励起光を生じる場合は、分散補償ファイバ62はラマン増幅を行わず、従って、分散補償ファイバ62の損失補償は行なわれない。

【0138】

また、分散補償ファイバ等の光ファイバには、レイリー後方散乱に起因する反射が存在する。この反射の反射率は光ファイバの長さに依存し、光ファイバの長さが長くなるとこの反射の反射率も大きくなる。

50

従って、上述したような分散補償ファイバの損失による反射率の低減効果よりも、分散補償ファイバ自身のレイリー後方散乱による反射率の影響が大きい場合には、分散補償ファイバに光アイソレータを付加することが考えられる。

【 0 1 3 9 】

例えば図 3 5 においては、この光アイソレータをエルビウムドープファイバ 6 1 と分散補償ファイバ 6 2 との間に設けることができ、このようにすれば、レイリー後方散乱による反射率の影響が現れる場合に、常に反射率を低減させることができる。

さらに、この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図 3 9 や図 4 0 に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することもできる。

また、励起光源 6 3 は、2つの励起光源と、これらの励起光源からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器とで構成されてもよく、励起光源とデポラライザとを組み合わせ、励起光の無偏光化を行なうように構成されてもよく、変調を施された励起光を発生するように構成されてもよい。

【 0 1 4 0 】

(1 2 - 1) 第 1 2 実施形態の第 1 変形例の説明

図 3 6 は本発明の第 1 2 実施形態の第 1 変形例を示すブロック図で、この図 3 6 に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ 1 1 5 - 1 , 光分波合波器 1 1 4 - 1 , エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ増幅部) 1 1 1 , シリカ系光ファイバ 1 1 2 (光ファイバ減衰部) , アイソレータ 1 1 5 - 3 が配設されている。そして、光分波合波器 1 1 4 - 1 に、励起光源 1 1 3 - 1 が接続されている。

また、励起光源 1 1 3 - 1 は、例えば $1.47 \mu\text{m}$ 帯域 ($1.45 \sim 1.49 \mu\text{m}$) の励起光を出力するものであり、光分波合波器 1 1 4 - 1 としては、例えば融着型のものが使用されている。

【 0 1 4 1 】

前述の第 1 2 実施形態において説明したように、利得が高い希土類ドープファイバ光増幅器では、光増幅を行なう際に不要な発振が生じることがあり、このように不要な発振が生じた場合には、希土類ドープファイバ光増幅器は不安定に動作する。

そこで、図 3 6 に示す光ファイバ増幅器においても、図 3 5 に示す光ファイバ増幅器における場合と同様に、この希土類ドープファイバ光増幅器としてのエルビウムドープファイバ 1 1 1 の後段に、損失媒体としてのシリカ系光ファイバ 1 1 2 を設けることにより、エルビウムドープファイバ 1 1 1 の不安定動作を抑制するようになっている。なお、図 3 6 においても、 R_1 , R_2 , R_A は反射率 , A は境界を示す。

前述した第 1 1 実施形態と同様に、図 3 6 に示す光ファイバ増幅器でも、シリカ系光ファイバ 1 1 2 をエルビウムドープファイバ 1 1 1 の後段に設けて、このシリカ系光ファイバ 1 1 2 を、エルビウムドープファイバ 1 1 1 からの残留励起光で励起することにより、このシリカ系光ファイバ 1 1 2 の損失補償 (エルビウムドープファイバ 1 1 1 の利得のくぼみの平坦化やエルビウムドープファイバ 1 1 1 の利得の減少の補填補償を含む) を行なうと同時に、残った損失分によって、エルビウムドープファイバ 1 1 1 の不安定動作を抑制するようになっている。

【 0 1 4 2 】

従って、本実施形態の光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 1 1 1 からなり、波長に依存した利得特性を有し、 $1.47 \mu\text{m}$ 帯域内の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ 1 1 1 に結合されたシリカ系光ファイバ 1 1 2 を第 2 の波長帯域の励起光で励起して、エルビウムドープファイバ光増幅部の利得特性が補償されるようにシリカ系光ファイバ 1 1 2 で光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源 1 1 3 - 1 とをそなえたことになる。

このような構成により、この図 3 6 に示す光ファイバ増幅器では、励起光源 1 1 3 - 1 からの励起光は、光分波合波器 1 1 4 - 1 からエルビウムドープファイバ 1 1 1 の一端へ信号光とともに入射される。これにより、エルビウムドープファイバ 1 1 1 で信号光の増幅が

10

20

30

40

50

行なわれる。

また、このとき生じる残留励起光を用いて、シリカ系光ファイバ112を励起させることにより、分散補償ファイバと同様にラマン増幅を行ない、このラマン増幅により、シリカ系光ファイバ112の損失補償を行なう。

【0143】

このように、図36に示す光ファイバ増幅器において、1.47 μ m帯域の励起光源113-1を用いることにより、エルビウムドープファイバ111及びシリカ系光ファイバ112のいずれをも励起することができ、これにより、光ファイバ増幅器の簡素化及び励起光パワーの効率化を図ることができる。

また、この光ファイバ増幅器では、シリカ系光ファイバ112の損失分によって、エルビウムドープファイバ111により生じた不要な発振を除去することも同時に行なわれており、これにより、波長多重(WDM)用に調整された希土類ドープファイバ光増幅器における不要な発振動作を防ぎ、安定した光増幅を行なうことができる。

なお、励起光源113-1が0.98 μ mの励起光を生じる場合は、シリカ系光ファイバ112はラマン増幅を行わず、従って、シリカ系光ファイバ112の損失補償は行なわれない。

また、シリカ系光ファイバ等の光ファイバには、レイリー後方散乱に起因する反射が存在する。この反射の反射率は光ファイバの長さに依存し、光ファイバの長さが長くなるとこの反射の反射率も大きくなる。

【0144】

従って、上述したようなシリカ系光ファイバの損失による反射率の低減効果よりも、シリカ系光ファイバ自身のレイリー後方散乱による反射率の影響が大きい場合には、シリカ系光ファイバに光アイソレータを付加することが考えられる。

例えば図36においては、この光アイソレータをエルビウムドープファイバ111とシリカ系光ファイバ112との間に設けることができ、このようにすれば、レイリー後方散乱による反射率の影響が現れる場合に、常に反射率を低減させることができる。

【0145】

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

(12-2) 第12実施形態の第2変形例の説明

図37は本発明の第12実施形態の第2変形例を示すブロック図で、この図37に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ65-1、光分波合波器64-1、エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ増幅部として構成された前段光増幅部)61-1、分散補償ファイバ62(光ファイバ減衰部)、エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ増幅部として構成された後段光増幅部)61-2、光分波合波器64-2、アイソレータ65-3が配設されている。そして、光分波合波器64-1に、励起光源63-1が接続されるとともに、光分波合波器64-2に、励起光源63-2が接続されている。

ここで、励起光源63-1、63-2は、共に例えば1.47 μ m帯域(1.45~1.49 μ m)の励起光を生じるものである。

【0146】

前述の第12実施形態において説明したように、利得が高い希土類ドープファイバ光増幅器では、光増幅を行なう際に不要な発振が生じることがあり、このように不要な発振が生じた場合には、希土類ドープファイバ光増幅器が不安定に動作する。

図35に示す第12実施形態にかかる光ファイバ増幅器においては、この希土類ドープファイバ光増幅器としてのエルビウムドープファイバ61の後段に、損失媒体としての分散補償ファイバ62を設けることにより、エルビウムドープファイバ61の不安定動作を抑制するようになっている。

【0147】

10

20

30

40

50

ところが、エルビウムドープファイバ61の利得Gが非常に大きい場合は、反射率R1，利得Gおよび反射率RAで構成されるGRパラメータが大きくなるため（エルビウムドープファイバ61の利得Gが非常に大きいため、RA=R1，R2であるにもかかわらずこの反射率RAの影響が無視できなくなる）、その後段に分散補償ファイバ62を設けても、その損失の効果が見れず、エルビウムドープファイバ61の不安定動作を抑制することができないことがある。

そこで、このような場合でもエルビウムドープファイバ61の不安定動作を抑制するために、このエルビウムドープファイバ61を分割して前後段のエルビウムドープファイバとして、これら間に分散補償ファイバ62を配設したものが、図37に示す光ファイバ増幅器である。

10

【0148】

このときの不安定動作の抑制の原理を図37を参照しながら説明する。

図37に示すように、エルビウムドープファイバ61-1，61-2（エルビウムドープファイバ61-1，61-2の利得をそれぞれG/2とする）の間に、分散補償ファイバ62〔この分散補償ファイバ62の損失を（0 1）とする〕を、例えば融着接続することにより配設すると、エルビウムドープファイバ61-1と分散補償ファイバ62との間に境界Aが生じ、分散補償ファイバ62とエルビウムドープファイバ61-2との間に境界Bが生じる。

また、エルビウムドープファイバ61-1の前端での反射率をR1，エルビウムドープファイバ61-2の後端での反射率をR2，境界Aでの反射率をRA（RA=R1，R2），境界Bでの反射率をRB（RB=R1，R2）とする。ここで、反射率R1はエルビウムドープファイバ61-1の前端より前段にある全ての部品からの反射の反射率であり、反射率R2はエルビウムドープファイバ61-2の後端より後段にある全ての部品からの反射の反射率である。また、反射率RAは境界Aでの屈折率差によって生じる反射の反射率であり、反射率RBは境界Bでの屈折率差によって生じる反射の反射率である。

20

このとき考えられるGRパラメータとしては、（1）反射率R1，エルビウムドープファイバ61-1の利得G/2および反射率RAで構成されるGRパラメータ，（2）反射率R1，エルビウムドープファイバ61-1の利得G/2，損失および反射率RBで構成されるGRパラメータ，（3）反射率R1，エルビウムドープファイバ61-1の利得G/2，損失，エルビウムドープファイバ61-2の利得G/2および反射率R2で構成されるGRパラメータ，（4）反射率RA，損失，エルビウムドープファイバ61-2の利得G/2および反射率R2で構成されるGRパラメータ，（5）反射率RB，エルビウムドープファイバ61-2の利得G/2および反射率R2で構成されるGRパラメータがある。

30

ここで、（1）についてみると、図35に示すエルビウムドープファイバ61ではその利得がGであるため $GR = G(R1RA)^{1/2}$ であるのに対して、図37に示すエルビウムドープファイバ61-1ではその利得はG/2と図35に示すエルビウムドープファイバ61の利得Gの半分になっているため、 $GR = (G/2)(R1RA)^{1/2}$ となり（RA=RA）、図35に示すエルビウムドープファイバ61のGRの半分となる。

40

（2）についてみてみると、エルビウムドープファイバ61-1では、その後段に損失（0 1）があるため、第12実施形態の場合と同様に、光が一巡するときの正味の利得は、 $[R1 \times (G/2) \times] \times [RB \times \times (G/2)] = [(G/2)]^2 R1 RB$ となるため、片道での正味の利得は、 $(G/2)(R1 RB)^2$ となる。ここで、0 1であり、RB=RBであるため、等価的にGRが小さくなる。また、RA=RBであるため、（1）の場合よりも更にGRパラメータが小さくなり、このときのGRは無視することができる。

（3）についてみてみると、エルビウムドープファイバ61-1，61-2の間に損失（0 1）があるため、第12実施形態の場合と同様に、光が一巡するときの正味の利得は、 $[R1 \times (G/2) \times] \times [R2 \times \times (G/2)] = [(G/2)]$

50

$^2 R_1 R_2$ となるため、片道での正味の利得は、 $(G/2) (R_1 R_2)^{1/2} = [(G/2) R]$ となり、エルビウムドープファイバ 61-1, 61-2 の動作の安定度を示すパラメータは、 $(G/2) R$ から $[(G/2) R]$ となる。なお、 $R_A R_1$, R_2 且つ、 $R_B R_1$, R_2 であるため、反射率 R_A および反射率 R_B の影響は無視することができるものとする。ここで、 $0 < R_1 < 1$ であるため、等価的に $G R$ が小さくなる。

なお、(4), (5) については、それぞれ(2), (1) についての場合と同様である。

【0149】

従って、図35に示すエルビウムドープファイバ61の利得 G が非常に大きい場合においては、 R_1 , G , R_A の $G R$ パラメータが大きいため、エルビウムドープファイバ61が不安定に動作するのであるが、エルビウムドープファイバ61を分割して、図37に示すような前後段のエルビウムドープファイバ61-1, 61-2として、これらの間に損失媒体としての分散補償ファイバ62を配設することにより、(1)および(5)について $G R$ パラメータを小さくすることができ、これによりエルビウムドープファイバ61-1, 61-2の不安定動作を抑制することができる。

このため、図37に示す光ファイバ増幅器では、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2の間に分散補償ファイバ62を配設して、この分散補償ファイバ62を、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2からの残留励起光で励起することにより、この分散補償ファイバ62の損失補償(エルビウムドープファイバ61-1, 61-2の利得のくぼみの平坦化やエルビウムドープファイバ61-1, 61-2の利得の減少の補填補償を含む)を行なうと同時に、残った損失分によって、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2の不安定動作を抑制するようになっている。

このような構成により、この図37に示す光ファイバ増幅器では、励起光および信号光を光分波合波器64-1によりエルビウムドープファイバ61-1の入力端から入射して、エルビウムドープファイバ61-1を励起させ、信号光を増幅させるが、このとき、エルビウムドープファイバ61-1の他端へは残留励起光が到達する。この残留励起光を分散補償ファイバ62へ供給して、ラマン増幅を生じさせる。

また、励起光を光分波合波器64-2によりエルビウムドープファイバ61-2の出力端から入射して、エルビウムドープファイバ61-2を励起させ、エルビウムドープファイバ61-2の入力端から入力された信号光を増幅させることも行なわれるが、このとき、エルビウムドープファイバ61-2の入力端へはやはり残留励起光が到達する。この残留励起光も分散補償ファイバ62へ供給して、ラマン増幅を生じさせる。

この場合は、分散補償ファイバ62は前後のエルビウムドープファイバ61-1, 61-2からの残留励起光を用いてラマン増幅させているので、分散補償ファイバ62による補償効果を大きくすることができ、構造の簡素化及びコストの低廉化をはかりながら、広帯域光増幅器を実現することができる。

【0150】

また、この光ファイバ増幅器では、分散補償ファイバ62の損失分によって、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2により生じた不要な発振を除去することも同時に行なわれており、これにより、波長多重(WDM)用に調整された希土類ドープファイバ光増幅器における不要な発振動作を防ぎ、ノイズの少ない状態で安定した光増幅を行なうことができる。

なお、励起光源63-1, 63-2が $0.98 \mu\text{m}$ の励起光を生じる場合は、分散補償ファイバ62はラマン増幅を行わず、従って、分散補償ファイバ62の損失補償は行なわれない。

【0151】

また、分散補償ファイバ等の光ファイバには、レイリー後方散乱に起因する反射が存在する。この反射の反射率は光ファイバの長さに依存し、光ファイバの長さが長くなるとこの反射の反射率も大きくなる。

10

20

30

40

50

従って、上述したような分散補償ファイバの損失による反射率の低減効果よりも、分散補償ファイバ自身のレイリー後方散乱による反射率の影響が大きい場合には、分散補償ファイバに光アイソレータを付加することが考えられる。

【0152】

例えば図37においては、この光アイソレータをエルビウムドープファイバ61-1と分散補償ファイバ62との間に設けることができ、このようにすれば、レイリー後方散乱による反射率の影響が現れる場合に、常に反射率を低減させることができる。

さらに、この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図39や図40に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することもできる。

また、分散補償ファイバ62用の励起光源及び光分波合波器を設けることもできる。即ち、図8と同様の要領で、励起光源133-1~133-3及び光分波合波器134-1~134-3を用いて光ファイバ増幅器を構成するようにしてもよい。

【0153】

さらに、分散補償ファイバ62のかわりに、シリカ系光ファイバを用いてもよい。

従って、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ61-1からなり、例えば0.98 μ m帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ61-1に結合されたシリカ系光ファイバ(図示省略)を例えば1.47 μ m帯域の励起光で励起して、シリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源63-1, 63-2とをそなえてもよい。

【0154】

また、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ61-1, 61-2と、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2を励起する励起光を出力する第一励起光源63-1, 63-2とを有し、1.47 μ m帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2と結合されたシリカ系光ファイバ内で光信号がラマン増幅されるように選択された1.47 μ m帯域の励起光でシリカ系光ファイバを励起するラマン増幅用励起光源63-2とをそなえ、第1の励起光源63-1, 63-3から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源63-2から出力される励起光の波長帯域とが実質的に等しいように選択されてもよい。

【0155】

従って、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ61-1, 61-2からなり、波長に依存した利得特性を有し、1.47 μ m帯域内の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ61-1, 61-2に結合されたシリカ系光ファイバを第2の波長帯域の励起光で励起して、前記希土類ドープファイバ光増幅部の利得特性が補償されるようにシリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源とをそなえてもよい。

(12-3) 第12実施形態の第3変形例の説明

図38は本発明の第12実施形態の第3変形例を示すブロック図で、この図38に示す光ファイバ増幅器は、入力側から順に、アイソレータ125-1, 光分波合波器124-1, エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ増幅部として構成された前段光増幅部)121-1, シリカ系光ファイバ122(光ファイバ減衰部), エルビウムドープファイバ(希土類ドープファイバ増幅部として構成された後段光増幅部)121-2, 光分波合波器124-3, アイソレータ125-3が配設されている。そして、光分波合波器124-1, 124-3に、例えば1.47 μ m帯域(1.45~1.49 μ m)の励起光を生じる励起光源123-1, 123-3が接続されている。

前述の第12実施形態において説明したように、利得が高い希土類ドープファイバ光増幅器では、光増幅を行なう際に不要な発振が生じることがあり、このように不要な発振が生じた場合には、希土類ドープファイバ光増幅器が不安定に動作する。

【0156】

図36に示す光ファイバ増幅器においては、この希土類ドープファイバ光増幅器としての

エルビウムドープファイバ 1 1 1 の後段に、損失媒体としてのシリカ系光ファイバ 1 1 2 を設けることにより、エルビウムドープファイバ 1 1 1 の不安定動作を抑制するようになっている。

ところが、エルビウムドープファイバ 1 1 1 の利得 G が非常に大きい場合は、図 3 5 に示す光ファイバ増幅器の場合と同様に G R パラメータが大きくなるため、その後段にシリカ系光ファイバ 1 2 2 を設けても、その損失の効果が現れず、エルビウムドープファイバ 1 1 1 の不安定動作を抑制することができない。

【 0 1 5 7 】

そこで、このような場合でもエルビウムドープファイバ 1 1 1 の不安定動作を抑制するために、このエルビウムドープファイバ 1 1 1 を分割して前後段のエルビウムドープファイバとして、これらの中にシリカ系光ファイバ 1 2 2 を配設したものが、図 3 8 に示す光ファイバ増幅器である。なお、このときの不安定動作の抑制の原理は、第 1 2 実施形態の第 2 変形例で説明したものと同様であり、図 3 8 においても、R 1 , R 2 , R A , R B は反射率, A , B は境界を示す。

このため、図 3 8 に示す光ファイバ増幅器では、シリカ系光ファイバ 1 2 2 を中段に設けて、このシリカ系光ファイバ 1 2 2 を、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 からの残留励起光で励起することにより、このシリカ系光ファイバ 1 2 2 の損失補償（エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 の利得のくぼみの平坦化やエルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 の利得の減少の補填補償を含む）を行なうと同時に、残った損失分によって、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 の不安定動作を抑制するようになっている。

【 0 1 5 8 】

従って、この光ファイバ増幅器は、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 からなり、例えば 0 . 9 8 μ m 帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 に結合されたシリカ系光ファイバ 1 2 2 を例えば 1 . 4 7 μ m 帯域の励起光で励起して、シリカ系光ファイバ 1 2 2 で光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源 1 2 3 - 3 とをそなえたことになる。また、ラマン増幅用励起光源 1 2 3 - 1 が、エルビウムドープファイバ光増幅部 1 2 1 - 1 の前段に設けられるように構成することもできる。

【 0 1 5 9 】

さらに、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 と、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 を励起する励起光を出力する励起光源 1 2 3 - 1 , 1 2 3 - 3 とを有し、1 . 4 7 μ m 帯域の光信号を増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 と結合されたシリカ系光ファイバ 1 2 2 内で光信号がラマン増幅されるように選択された 1 . 4 7 μ m 帯域の励起光でシリカ系光ファイバ 1 2 2 を励起するラマン増幅用励起光源 1 2 3 - 2 とをそなえ、第 1 の励起光源 1 2 3 - 1 , 1 2 3 - 3 から出力される励起光の波長帯域と、ラマン増幅用励起光源 1 2 3 - 2 から出力される励起光の波長帯域とが実質的に等しいように選択されていることになる。

【 0 1 6 0 】

この場合、希土類元素を添加したエルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 を有し、1 . 4 7 μ m 帯域の光信号を波長に依存した利得特性で増幅する希土類ドープファイバ光増幅部と、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 と結合されたシリカ系光ファイバ 1 2 2 内で光信号がラマン増幅され、前記希土類ドープファイバ光増幅部の利得特性が補償されるように調整された励起光でシリカ系光ファイバ 1 1 2 を励起するラマン増幅用励起光源 1 2 3 - 3 とを有するように構成されたことになる。

このような構成により、この図 3 8 に示す光ファイバ増幅器では、励起光および信号光を光分波合波器 1 2 4 - 1 によりエルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 の一端から入射して、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 を励起させ、信号光を増幅させるとともに、このとき生じる残留励起光により、シリカ系光ファイバ 1 2 2 を励起させ、分散補償ファイバ

10

20

30

40

50

と同様に、ラマン増幅させる。

さらに、励起光を光分波合波器 1 2 4 - 3 によりエルビウムドープファイバ 1 2 1 - 2 の出力端から入射して、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 2 を励起させ、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 2 の入力端から入力された信号光を増幅させるとともに、このとき生じる残留励起光により、シリカ系光ファイバ 1 2 2 を励起させ、ラマン増幅させる。

このように、図 3 8 に示す光ファイバ増幅器において、1 . 4 7 μm 帯の励起光源 1 2 3 - 1 , 1 2 3 - 3 を用いることにより、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 及びシリカ系光ファイバ 1 2 2 のいずれをも励起することができ、これにより、図 8 に示す光ファイバ増幅器における励起光源 1 2 3 - 2 を削減することができ、光ファイバ増幅器の簡素化及び励起光パワーの効率化を図ることができる。

10

また、この光ファイバ増幅器では、シリカ系光ファイバ 1 2 2 の損失分によって、エルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2 により生じた不要な発振を除去することも同時に行なわれており、これにより、波長多重 (WDM) 用に調整された希土類ドープファイバ光増幅器における不要な発振動作を防ぎ、ノイズの少ない状態で安定した光増幅を行なうことができる。

なお、励起光源 1 2 3 - 1 , 1 2 3 - 3 が 0 . 9 8 μm の励起光を生じる場合は、シリカ系光ファイバ 1 2 2 はラマン増幅を行わず、従って、シリカ系光ファイバ 1 2 2 の損失補償は行なわれない。

また、シリカ系光ファイバ等の光ファイバには、レイリー後方散乱に起因する反射が存在する。この反射の反射率は光ファイバの長さに依存し、光ファイバの長さが長くなるとこの反射の反射率も大きくなる。

20

【 0 1 6 1 】

従って、上述したようなシリカ系光ファイバの損失による反射率の低減効果よりも、シリカ系光ファイバ自身のレイリー後方散乱による反射率の影響が大きい場合には、シリカ系光ファイバに光アイソレータを付加することが考えられる。

例えば図 3 8 においては、この光アイソレータをエルビウムドープファイバ 1 2 1 - 1 とシリカ系光ファイバ 1 2 2 との間に設けることができ、このようにすれば、レイリー後方散乱による反射率の影響が現れる場合に、常に反射率を低減させることができる。

【 0 1 6 2 】

この場合も、入力部あるいは入出力部に、アイソレータを設ける代わりに、図 3 9 や図 4 0 に示すように、入力信号光が光サーキュレータを通じて入力されるとともに、出力信号光がこの光サーキュレータを通じて出力されるように構成することができる。

30

さらに、シリカ系光ファイバ 1 2 2 とエルビウムドープファイバ 1 2 1 - 2 との間にアイソレータを設けるようにしてもよい。

また、シリカ系光ファイバ 1 2 2 用の励起光源及び光分波合波器を設けることもできる。即ち、図 8 と同様の要領で、励起光源 1 2 3 - 1 ~ 1 2 3 - 3 及び光分波合波器 1 2 4 - 1 ~ 1 2 4 - 3 を用いて光ファイバ増幅器を構成するようにしてもよい。

【 0 1 6 3 】

さらに、シリカ系光ファイバ 1 2 2 のかわりに、分散補償ファイバを用いてもよい。

また、光ファイバ増幅器が、希土類ドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部と、所望の励起光で励起されることによりラマン増幅を生じさせるラマン光増幅部 (ラマン光増幅部は、分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバで構成される。以下同じ) とが、縦列的に配設されて構成されることにより、励起光パワーを高効率に利用した 2 段構成の光ファイバ増幅器を提供しうる利点がある。

40

【 0 1 6 4 】

【 発明の効果 】

以上詳述したように、本発明の光ファイバ増幅器によれば、希土類元素を添加した第 1 の光ファイバからなり、所定の波長帯域の光信号を増幅する光増幅部と、第 1 の光ファイバに結合されたシリカ系光ファイバを所望の励起光で励起して、シリカ系光ファイバで光信号をラマン増幅させるラマン増幅用励起光源とをそなえているので、このラマン増幅によ

50

る分散補償ファイバの損失補償（エルビウムドープファイバの利得のくぼみの平坦化やエルビウムドープファイバの利得の減少の補填補償を含む。）を行なうことができる（請求項1～18）。

さらに、これらの希土類ドープファイバ光増幅部及びラマン光増幅部を励起するための励起光を供給する共通の励起光源が設けられることにより、励起光パワーを高効率に利用することができるとともに、使用する励起光源の数を減らして構成の簡素化およびコストの低廉化に寄与しうる。

【0165】

また、本発明の光ファイバ増幅器によれば、前後2段にわたり配設されたエルビウムドープファイバ（エルビウムドープファイバは、低雑音指数を有してもよい。以下同じ）及び分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバをそなえ、エルビウムドープファイバのための第1の波長帯域の励起光を生じる第1励起光源と、分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバのための第2の波長帯域の励起光を生じる第2励起光源とをそなえ、分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバを第2励起光源からの第2の波長帯域の励起光で励起してラマン増幅を生じさせるように構成しているため、エルビウムドープファイバによる光増幅を行ないながら、ラマン増幅による分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバの損失補償を行なうことができる。

さらに、希土類ドープファイバがエルビウムドープファイバで構成されるとともに、第1励起光源で生じる励起光の波長帯域が0.98 μ m帯域であり、第2励起光源で生じる励起光の波長帯域が1.47 μ m帯域であることにより、より効果的にエルビウムドープファイバによる光増幅を行ないながら、ラマン増幅による分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバの損失補償を行なうことができる。

また、希土類ドープファイバ及び分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバに共通の励起光源を設けることもでき、このようにすれば、使用する励起光源の数を減らして構成の簡素化およびコストの低廉化に寄与しうる。

さらに、本発明の光ファイバ増幅器では、エルビウムドープファイバを1.47 μ m帯域で励起する際に生じる残留励起パワーを利用して、分散補償ファイバをラマン増幅したり、分散補償ファイバを1.47 μ m帯で励起する際に生じる残留励起パワーを利用して、エルビウムドープファイバを励起したるように構成しているため、分散補償ファイバの損失を低減することができる。更には、分散補償ファイバを \sim 1.44 μ mあるいは1.47 μ m帯でラマン増幅させることにより、エルビウムドープファイバの増幅帯域を補い、更により広帯域化もしくは平坦化を推進できる利点がある。

また、本発明の光ファイバ増幅器では、分散補償ファイバに希土類元素をドープしたものを使用することにより、分散補償を行なうと同時に、分散補償ファイバの損失を低減するほか、信号光を十分に光増幅しうる分散補償機能付き光ファイバ増幅器を提供しうる利点がある。

【0166】

さらに、本発明の光ファイバ増幅器では、1.47 μ m帯の励起光が分散補償ファイバに入力されるのを阻止する光フィルタを設けているため、1.47 μ m帯の漏れ励起光パワーが分散補償ファイバをラマン増幅することにより、光ファイバ増幅器に不安定動作もしくは増幅帯域の波長依存性を変化させないようにすることができる。

また、本発明の光ファイバ増幅器では、低雑音指数を有する第1エルビウムドープファイバを前段に、分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバを中段に、第2エルビウムドープファイバを後段にそれぞれそなえているため、分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバは、分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバの前後に位置する第1及び第2エルビウムドープファイバからの残留励起光を用いてラマン増幅させているため、分散補償ファイバ又はシリカ系光ファイバによる補償効果を大きくすることができ、構造の簡素化及びコストの低廉化をはかりながら、広帯域光増幅器を実現することができる。

さらに、ラマン増幅部を励起するための励起光源を、2つの励起光源と、これらの励起光源からの励起光について直交偏波合成する偏波合成器とで構成することもでき、このよう

10

20

30

40

50

にすれば、分散補償ファイバで効果的にラマン増幅を生じさせて、このラマン増幅により、分散補償ファイバの損失補償を行なうことができる。

また、ラマン増幅部を励起するための励起光源を、励起光源とデポラライザとを組み合わせ、励起光の無偏光化を行なうように構成してもよく、このようにすれば、分散補償ファイバからなるラマン光増幅器における偏光依存性を低減することができる。

【0167】

さらに、ラマン増幅部を励起するための励起光源からの光に変調を施してスペクトルを数百kHz以上に広げた励起光を発生するように構成してもよく、このようにすれば、誘導ブリルアン散乱のしきい値を高め、有害な非線型効果を抑制しながら、分散補償ファイバで効果的にラマン増幅を生じさせて、このラマン増幅により、分散補償ファイバの損失補償を行なうことができる。

10

また、本発明では、分散補償ファイバを励起してラマン増幅を生じさせるようにしたモジュールを使用して光ファイバ増幅器を構成しているので、分散補償ファイバの損失を低減できる利点がある。

そして、この場合においても、入出力部に光サーキュレータを設ければ、使用するアイソレータの数を減らして、コストの低減に寄与することができる。

【0168】

また、本発明の光ファイバ増幅器では、希土類ドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部と、希土類ドープファイバ光増幅部の不安定動作を抑制すべく光ファイバ又は光アイソレータが付加された光ファイバからなる光ファイバ減衰部とをそなえているので、希土類ドープファイバ光増幅部の不安定動作を抑制して、精度の高い光増幅を行なうことができる。

20

さらに、本発明の光ファイバ増幅器では、希土類ドープファイバからなる希土類ドープファイバ光増幅部としてそれぞれ構成された前段光増幅部及び後段光増幅部を有する光増幅ユニットと、光増幅ユニットにおける前段光増幅部と後段光増幅部との間に配設され、光増幅ユニットの不安定動作を抑制すべく光ファイバ又は光アイソレータが付加された光ファイバからなる光ファイバ減衰部とをそなえているので、光増幅ユニットの不安定動作を抑制して、精度の高い光増幅を行なうことができる。

また、光ファイバ減衰部が、所望の励起光で励起されることによりラマン増幅を生じさせるラマン光増幅部を兼用するようにすれば、光ファイバ減衰部の損失補償を行なうことができる。

30

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の態様を示す原理ブロック図である。

【図2】本発明の第2の態様を示す原理ブロック図である。

【図3】本発明の第3の態様を示す原理ブロック図である。

【図4】本発明の第4の態様を示す原理ブロック図である。

【図5】本発明の第5の態様を示す原理ブロック図である。

【図6】(a)は本発明の第6の態様を示す原理ブロック図であり、(b)は本発明の第7の態様を示す原理ブロック図である。

【図7】本発明の第8の態様を示す原理ブロック図である。

40

【図8】本発明の第9の態様を示す原理ブロック図である。

【図9】(a)は本発明の第10の態様を示す原理ブロック図であり、(b)は本発明の第11の態様を示す原理ブロック図である。

【図10】本発明の第12の態様を示す原理ブロック図である。

【図11】本発明の第13の態様を示す原理ブロック図である。

【図12】本発明の第1実施形態を示すブロック図である。

【図13】本発明の第1実施形態の変形例を示すブロック図である。

【図14】本発明の第2実施形態を示すブロック図である。

【図15】本発明の第3実施形態を示すブロック図である。

【図16】本発明の第3実施形態の第1変形例を示すブロック図である。

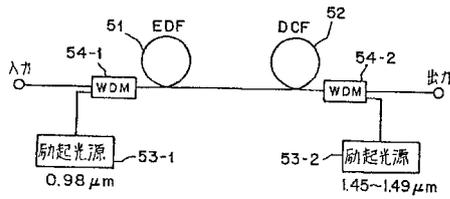
50

- 【図 17】本発明の第 3 実施形態の第 2 変形例を示すブロック図である。
- 【図 18】本発明の第 4 実施形態を示すブロック図である。
- 【図 19】本発明の第 5 実施形態を示すブロック図である。
- 【図 20】本発明の第 6 実施形態を示すブロック図である。
- 【図 21】本発明の第 7 実施形態を示すブロック図である。
- 【図 22】本発明の第 8 実施形態を示すブロック図である。
- 【図 23】本発明の第 9 実施形態を示すブロック図である。
- 【図 24】本発明の第 9 実施形態の第 1 変形例を示すブロック図である。
- 【図 25】本発明の第 9 実施形態の第 2 変形例を示すブロック図である。
- 【図 26】光ファイバ増幅器の波長特性を説明する図である。 10
- 【図 27】光ファイバ増幅器の波長特性を説明する図である。
- 【図 28】本発明の第 10 実施形態を示すブロック図である。
- 【図 29】本発明の第 10 実施形態の変形例を示すブロック図である。
- 【図 30】本発明の第 11 実施形態を示すブロック図である。
- 【図 31】本発明の第 11 実施形態の第 1 変形例を示すブロック図である。
- 【図 32】本発明の第 11 実施形態の第 2 変形例を示すブロック図である。
- 【図 33】光サーキュレータの構成を示す図である。
- 【図 34】アイソレータの構成を示す図である。
- 【図 35】本発明の第 12 実施形態を示すブロック図である。
- 【図 36】本発明の第 12 実施形態の第 1 変形例を示すブロック図である。 20
- 【図 37】本発明の第 12 実施形態の第 2 変形例を示すブロック図である。
- 【図 38】本発明の第 12 実施形態の第 3 変形例を示すブロック図である。
- 【図 39】本発明の光サーキュレータを用いた実施形態の第 1 の例を示すブロック図である。
- 【図 40】本発明の光サーキュレータを用いた実施形態の第 2 の例を示すブロック図である。
- 【符号の説明】
- 1, 1 - 1, 1 - 2 エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ)
- 2, 2 - 1, 2 - 2 励起光源
- 3 - 1 ~ 3 - 5 光分波合波器 (光カプラ) 30
- 4 反射鏡 (反射手段)
- 5, 5 - 1 ~ 5 - 4 アイソレータ (光アイソレータ)
- 11 - 1, 11 - 2 エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ)
- 12, 12 - 1, 12 - 2 励起光源
- 13 - 1 ~ 13 - 4, 13 - 1, 13 - 2 光分波合波器 (光カプラ)
- 13 - 5 カプラ
- 14 反射鏡
- 15, 15 - 2 光サーキュレータ
- 16 - 1 ~ 16 - 3 アイソレータ
- 17, 17 - 2 フィルタ 40
- 18 出力光検出器
- 18 A フォトダイオード
- 19 光出力一定制御器
- 19 A 差動増幅器
- 21 - 1, 21 - 2 エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ)
- 22 励起光源
- 23 光分岐部
- 24 - 1 ~ 24 - 4, 24 - 1 ~ 24 - 4 光分波合波器 (光カプラ)
- 25 - 1 ~ 25 - 4 アイソレータ
- 26 光フィルタ 50

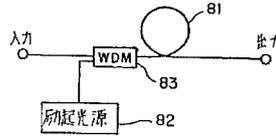
3 1 , 3 1 - 1 , 3 1 - 2	エルビウムドープファイバ (希土類ドープファイバ)	
3 2	励起光源	
3 3 , 3 3	光サーキュレータ	
3 4 - 1 , 3 4 - 2 , 3 4 - 1 , 3 4 - 2 , 3 4 - 1 , 3 4 - 2		
	光分波合波器 (光カプラ)	
3 5 , 3 5 , 3 5	反射鏡	
3 6	残留励起光検出器	
3 6 A	フォトダイオード	
3 7	制御器	
3 7 A	差動増幅器	10
3 8	光サーキュレータ	
3 9 - 1 ~ 3 9 - 3	アイソレータ	
4 0	光フィルタ	
5 1	エルビウムドープファイバ	
5 2	分散補償ファイバ	
5 3 - 1 , 5 3 - 2 , 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 B , 5 3 - 2 , 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 , 5 3 - 2 A , 5 3 - 2 B	励起光源	
5 3 - 2 B	デポラライザ	
5 3 - 2 C , 5 3 - 2 C , 5 3 - 2 C	偏波合成器	
5 3 - 2 D	変調器	20
5 3 - 2 E	偏波保持カプラ	
5 4 - 1 , 5 4 - 2	光分波合波器 (光カプラ)	
5 5 - 1 ~ 5 5 - 3	アイソレータ	
6 1 , 6 1 - 1 , 6 1 - 2	エルビウムドープファイバ	
6 2	分散補償ファイバ	
6 3 , 6 3 - 1 , 6 3 - 2	励起光源	
6 4 , 6 4 - 1 ~ 6 4 - 5	光分波合波器 (光カプラ)	
6 5 - 1 ~ 6 5 - 4	アイソレータ	
6 6	光フィルタ	
7 1	エルビウムドープファイバ	30
7 2	分散補償ファイバ	
7 3	励起光源	
7 4	光分波合波器 (光カプラ)	
7 5 - 1 , 7 5 - 2	アイソレータ	
8 1	希土類ドープ分散補償ファイバ	
8 2	励起光源	
8 3	光分波合波器 (光カプラ)	
8 4 - 1 , 8 4 - 2	アイソレータ	
9 1	エルビウムドープファイバ	
9 2	分散補償ファイバ	40
9 3	励起光源	
9 4	光分波合波器 (光カプラ)	
9 5	光フィルタ	
9 6 - 1 , 9 6 - 2	アイソレータ	
1 0 1	シリカ系光ファイバ	
1 0 2	エルビウムドープファイバ	
1 0 3 - 1 , 1 0 3 - 2	励起光源	
1 0 4 - 1 , 1 0 4 - 2	光分波合波器 (光カプラ)	
1 1 1	エルビウムドープファイバ	
1 1 2	シリカ系光ファイバ	50

1 1 3 - 1 , 1 1 3 - 2 , 1 1 3 - 2 A , 1 1 3 - 2 B , 1 1 3 - 2 C , 1 1 3 - 2 A	
, 1 1 3 - 2 D , 1 1 3 - 2 A , 1 1 3 - 2 B	励起光源
1 1 3 - 2 B	デポラライザ
1 1 3 - 2 C , 1 1 3 - 2 C , 1 1 3 - 2 C	偏波合成器
1 1 3 - 2 D	変調器
1 1 3 - 2 E	偏波保持カブラ
1 1 4 - 1 , 1 1 4 - 2	光分波合波器 (光カブラ)
1 1 5 - 1 ~ 1 1 5 - 3	アイソレータ
1 2 1 - 1 , 1 2 1 - 2	エルビウムドープファイバ
1 2 2	シリカ系光ファイバ
	10
1 2 3 - 1 ~ 1 2 3 - 3 , 1 2 3 - 1 , 1 2 3 - 1 A , 1 2 3 - 1 B , 1 2 3 - 3	
, 1 2 3 - 3 A , 1 2 3 - 3 B	励起光源
1 2 3 - 1 C , 1 2 3 - 3 C	偏波合成器
1 2 4 - 1 ~ 1 2 4 - 3	光分波合波器 (光カブラ)
1 2 5 - 1 ~ 1 2 5 - 3	アイソレータ
1 2 6	光フィルタ
1 3 1 - 1 , 1 3 1 - 2	エルビウムドープファイバ
1 3 2	分散補償ファイバ
1 3 3 - 1 ~ 1 3 3 - 3	励起光源
1 3 4 - 1 ~ 1 3 4 - 3	光分波合波器 (光カブラ)
	20
1 4 1	分散補償ファイバ
1 4 2 , 1 4 2 A , 1 4 2 B	励起光源
1 4 2 C	偏波合成器
1 4 3	光分波合波器 (光カブラ)
1 4 4 , 1 4 4 - 1 , 1 4 4 - 2	アイソレータ
1 5 1	シリカ系光ファイバ
1 5 2	励起光源
1 5 3	光分波合波器 (光カブラ)
1 5 4	希土類ドープファイバ光増幅部
1 5 5	光ファイバ減衰部
	30
1 5 6 - 1	前段光増幅部
1 5 6 - 2	後段光増幅部
1 5 7	光ファイバ減衰部

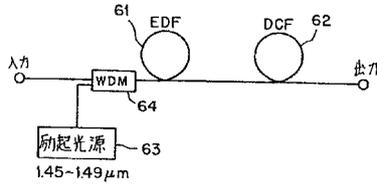
【 図 1 】



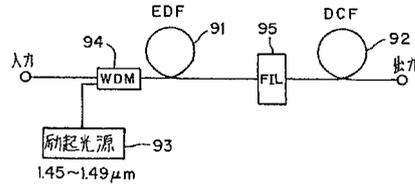
【 図 4 】



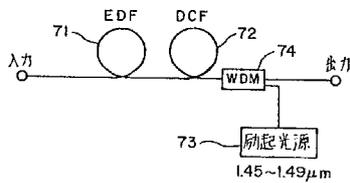
【 図 2 】



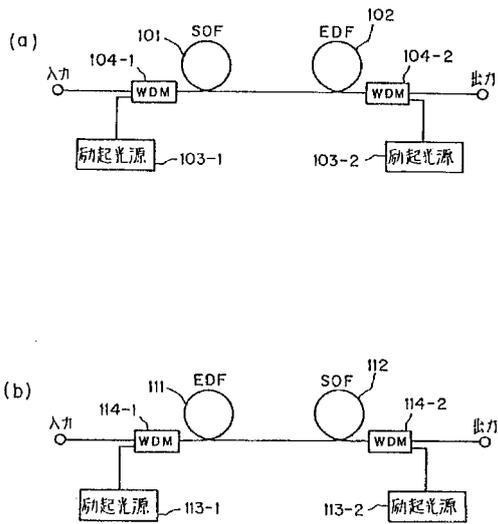
【 図 5 】



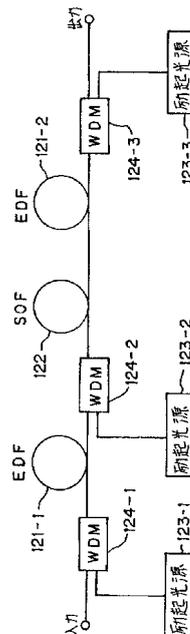
【 図 3 】



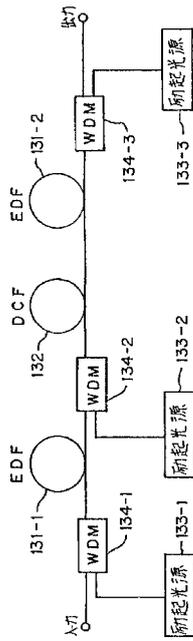
【 図 6 】



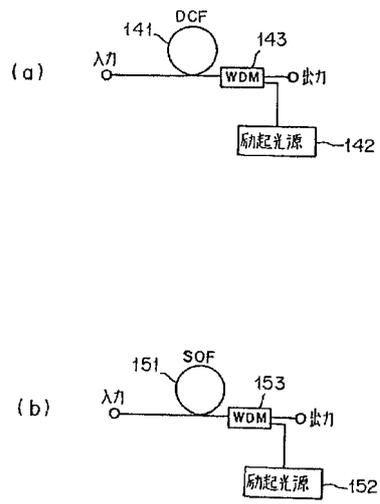
【 図 7 】



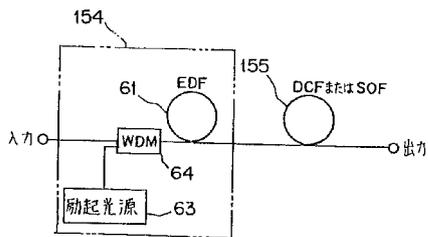
【 図 8 】



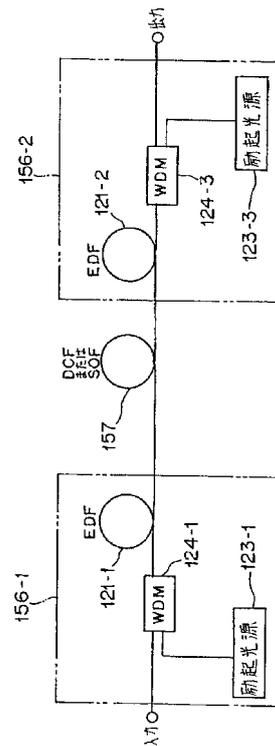
【 図 9 】



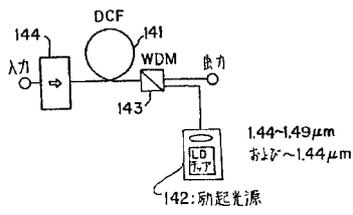
【 図 10 】



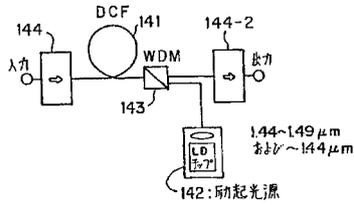
【 図 11 】



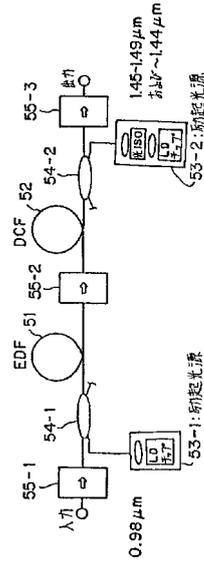
【図12】



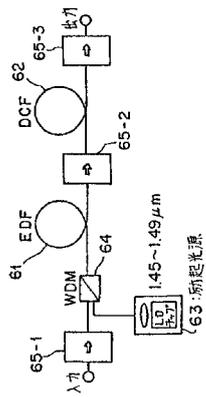
【図13】



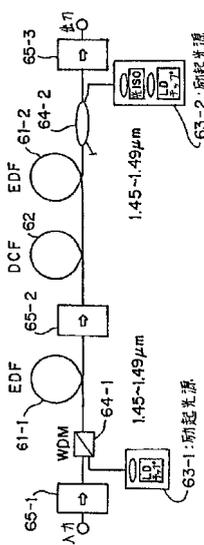
【図14】



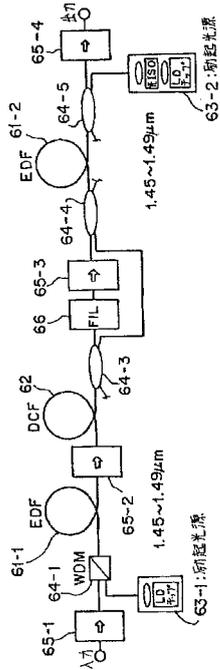
【図15】



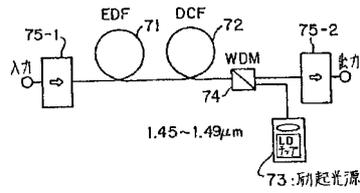
【図16】



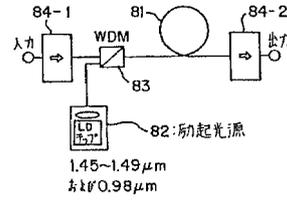
【 図 17 】



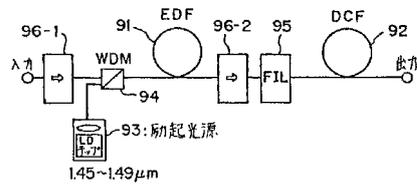
【 図 18 】



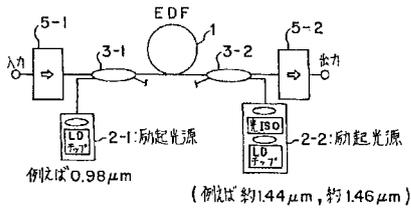
【 図 19 】



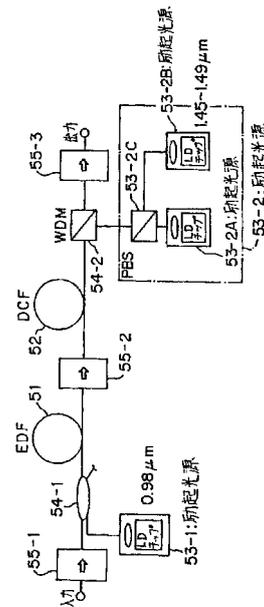
【 図 20 】



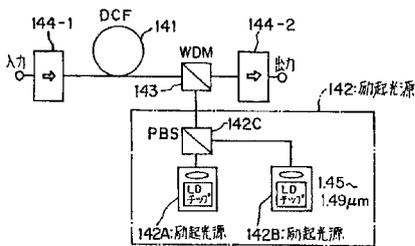
【 図 21 】



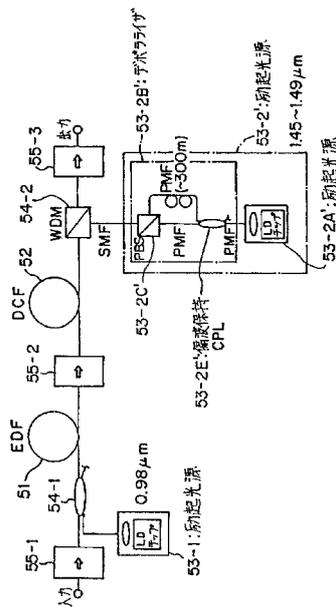
【 図 23 】



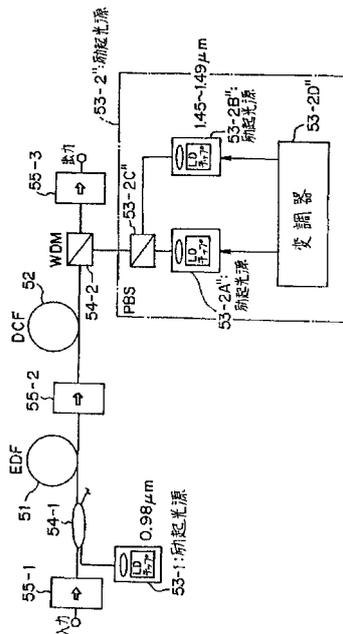
【 図 22 】



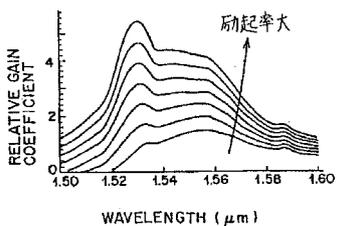
【 図 2 4 】



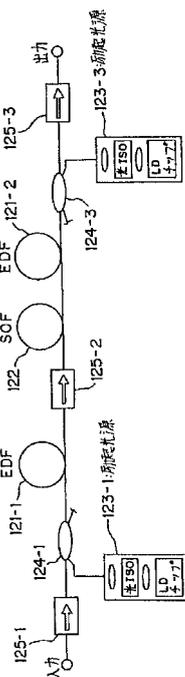
【 図 2 5 】



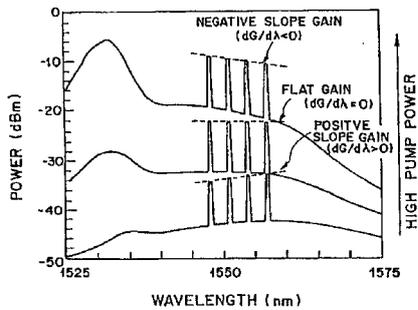
【 図 2 6 】



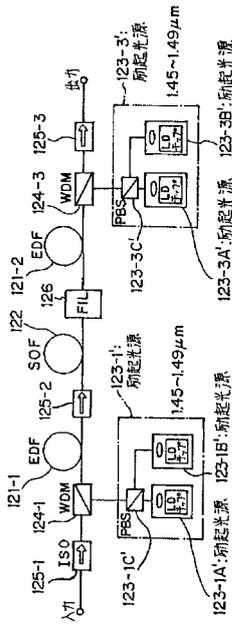
【 図 2 8 】



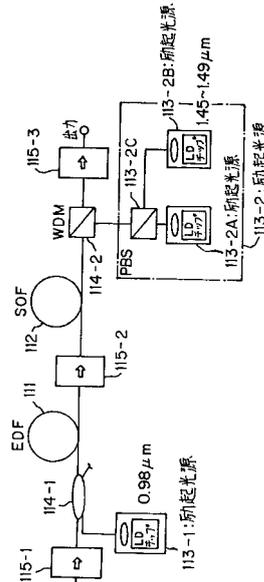
【 図 2 7 】



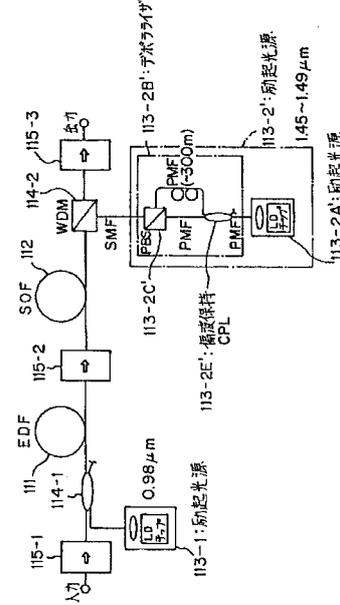
【 図 29 】



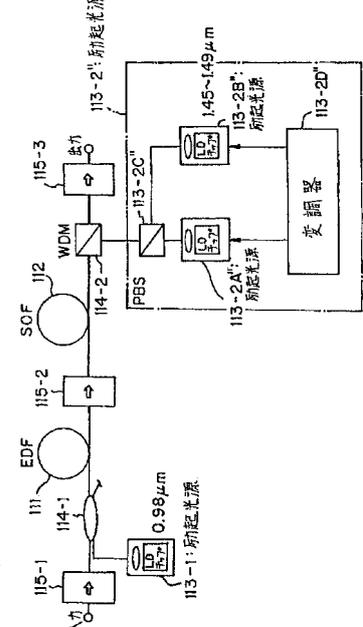
【 図 30 】



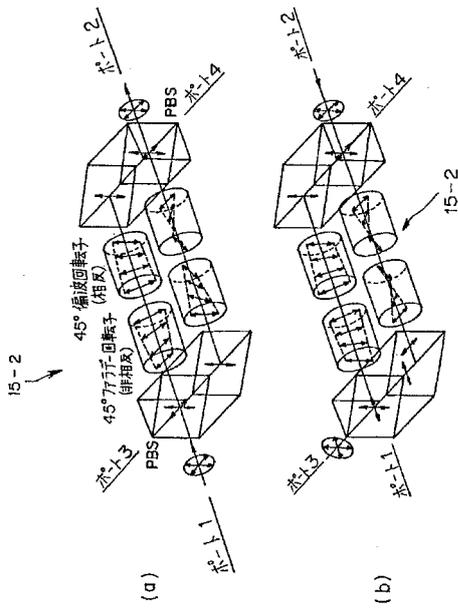
【 図 31 】



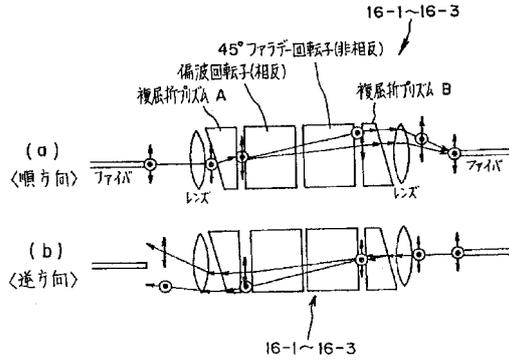
【 図 32 】



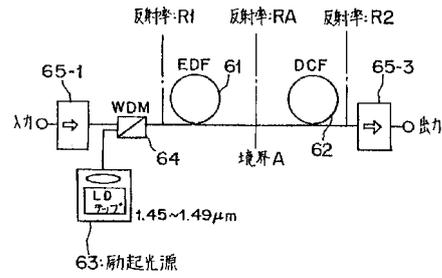
【図 3 3】



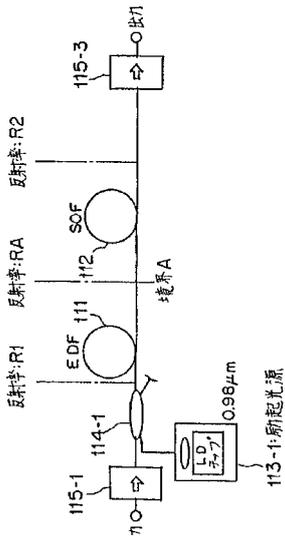
【図 3 4】



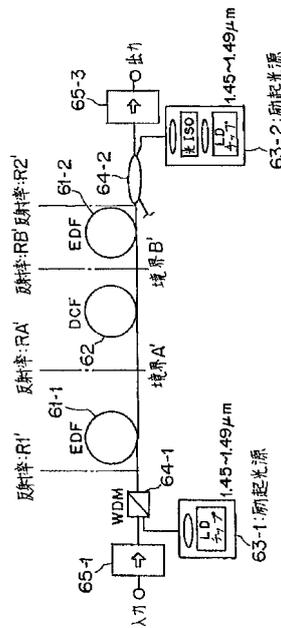
【図 3 5】



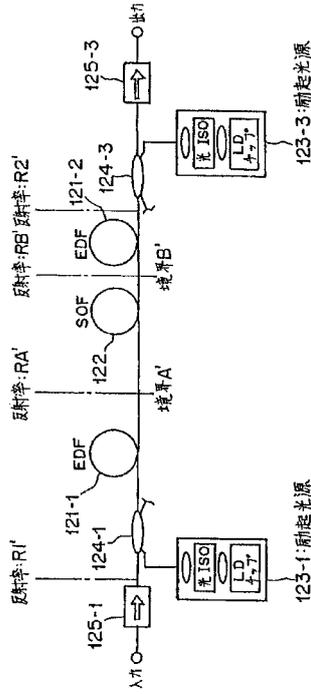
【図 3 6】



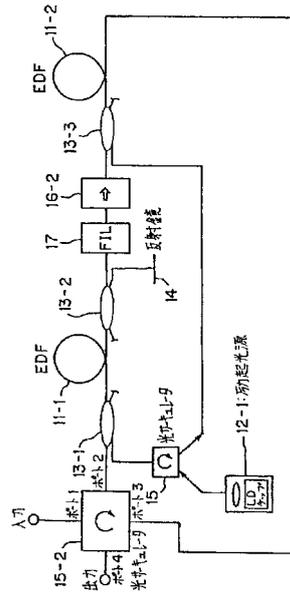
【図 3 7】



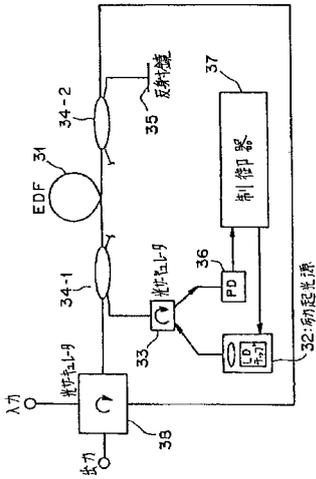
【 图 38 】



【 图 39 】



【 图 40 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平03-054530(JP,A)
特開平04-120524(JP,A)
特開平07-202306(JP,A)
特開平04-233519(JP,A)
特開昭60-236277(JP,A)
IEE Proceedings, 1990年, Vol.137, Pt.J, No.4, 225-229
Electronics Letters, 1990年 1月, Vol.26, No1, 1-2
Electronics Letters, 1995年 7月, Vol.31, No.14, 1163-1164
Journal of Lightwave Technology, 1991年 9月, Vol.9, No.9, 1178-1186

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/35
H04B 10/00
IEEE
JSTPlus(JDream2)