

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3558124号

(P3558124)

(45) 発行日 平成16年8月25日(2004.8.25)

(24) 登録日 平成16年5月28日(2004.5.28)

(51) Int. Cl.⁷

F I

GO2F 1/35
 HO1S 3/06
 HO1S 3/23
 HO1S 3/30
 HO4B 10/16

GO2F 1/35 5O1
 HO1S 3/06 B
 HO1S 3/23
 HO1S 3/30 Z
 HO4B 9/00 J

請求項の数 14 (全 15 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2000-224154 (P2000-224154)
 (22) 出願日 平成12年7月25日(2000.7.25)
 (65) 公開番号 特開2002-40496 (P2002-40496A)
 (43) 公開日 平成14年2月6日(2002.2.6)
 審査請求日 平成13年6月7日(2001.6.7)

(73) 特許権者 000002130
 住友電気工業株式会社
 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
 (74) 代理人 100088155
 弁理士 長谷川 芳樹
 (74) 代理人 100089978
 弁理士 塩田 辰也
 (74) 代理人 100092657
 弁理士 寺崎 史朗
 (74) 代理人 100110582
 弁理士 柴田 昌聰
 (72) 発明者 津崎 哲文
 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電
 気工業株式会社 横浜製作所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ラマン増幅器及びそれを用いた光伝送システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

所定の増幅波長帯域内にある信号光を励起光によってラマン増幅する集中定数型のラマン増幅器であって、

互いに直列に接続され、前記増幅波長帯域内にある前記信号光をそれぞれラマン増幅するとともに、互いに異なる波長分散値を有する複数のラマン増幅用光ファイバと、前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれに前記励起光を供給する1または複数の励起光供給手段とを備えることを特徴とするラマン増幅器。

【請求項2】

前記増幅波長帯域内の少なくとも一部の波長帯域において、前記複数のラマン増幅用光ファイバでの前記波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 0.5 ps/nm 以下であることを特徴とする請求項1記載のラマン増幅器。

【請求項3】

前記増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、前記複数のラマン増幅用光ファイバでの前記波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 5.0 ps/nm 以下であることを特徴とする請求項1記載のラマン増幅器。

【請求項4】

前記増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、前記複数のラマン増幅用光ファイバでの前記波長分散値を入力端から任意の位置まで累積した分散値の絶対値が、各位置に対して 30 ps/nm 以下であることを特徴とする請求項1記載のラマン増幅器。

10

20

【請求項 5】

前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれにおける分散スロープ値が、 $-0.5 \text{ ps} / \text{nm}^2 / \text{km}$ 以上 $0.1 \text{ ps} / \text{nm}^2 / \text{km}$ 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 6】

前記複数のラマン増幅用光ファイバは、互いに異なる符号の前記波長分散値を有する 2 つのラマン増幅用光ファイバを少なくとも含むことを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 7】

前記複数のラマン増幅用光ファイバは、2 つのラマン増幅用光ファイバからなるとともに、その一方の前記波長分散値が正、他方の前記波長分散値が負に構成されていることを特徴とする請求項 6 記載のラマン増幅器。 10

【請求項 8】

前記増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれでの前記波長分散値の絶対値が、所定の波長分散下限値以上であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 9】

前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれは、互いに異なるレイリー散乱係数を有することを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 10】

前記複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も小さい前記レイリー散乱係数を有するラマン増幅用光ファイバが、最も入力端側の位置に設置されていることを特徴とする請求項 9 記載のラマン増幅器。 20

【請求項 11】

前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれの長さが、5 km 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 12】

前記複数のラマン増幅用光ファイバの少なくとも 1 つは、前記励起光の波長での実効断面積が $15 \mu\text{m}^2$ 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 13】

前記複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も大きい非線型定数を有するラマン増幅用光ファイバが、前記励起光供給手段から前記励起光が供給される位置に最も近い位置に設置されていることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。 30

【請求項 14】

信号光が伝送される光ファイバを用いて構成された光伝送路を有するとともに、前記光伝送路を伝送される前記信号光を中継する中継局内に、請求項 1 記載のラマン増幅器が設置されていることを特徴とする光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、信号光を励起光によってラマン増幅するラマン増幅器、及びそれを用いた光伝送システムに関するものである。 40

【0002】

【従来の技術】

光ファイバ増幅器は、光伝送システムで光ファイバ伝送路を伝送される信号光に対して、光伝送路での伝送損失を補償すべく信号光を光増幅するものである。光伝送路上に設置される光ファイバ増幅器は、光伝送路としても機能する光増幅用光ファイバと、光増幅用光ファイバへと励起光を供給する励起光供給手段とを備えて構成される。そして、励起光が供給されている光増幅用光ファイバに信号光が入力されると、その信号光は、光増幅用光ファイバにおいて光増幅されて出力される。 50

【0003】

このような光ファイバ増幅器としては、Er（エルビウム）などの希土類元素を添加する希土類元素添加ファイバ増幅器と、誘導ラマン散乱によるラマン増幅現象を利用するラマン増幅器とが用いられている。

【0004】

ここで、希土類元素添加ファイバ増幅器（例えばEDFA：Erbium-Doped Fiber Amplifier、Er添加ファイバ増幅器）は、希土類元素を添加した光ファイバ（例えばEDF：Erbium-Doped Fiber、Er添加光ファイバ）を光増幅用光ファイバとして用いたもので、モジュール化されて光伝送システムの中継局内などに設置される。一方、ラマン増幅器においては、光ファイバ伝送路を構成して

10

【0005】

【発明が解決しようとする課題】

上記したラマン増幅器は、光伝送用の光ファイバに信号光とともに励起光を入力し、ラマン増幅によって伝送損失を補償する分布定数型の光増幅器として構成することができる。また、EDFAなどと同様に、光伝送路上で中継局内などの所定位置に設置し、入力信号光を所定の利得（net gain）で光増幅して出力信号光を得る集中定数型の光増幅器として利用することも可能である。

【0006】

しかしながら、ラマン増幅器を集中定数型の光増幅器として利用する場合、EDFAなどに比べて、光増幅に必要なラマン増幅用光ファイバの長さが長いため、自己位相変調や四光波混合などの非線型光学効果の影響が大きくなる。このため、ラマン増幅用光ファイバでの非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が顕著となるという問題を生じる。

20

【0007】

本発明は、以上の問題点に鑑みてなされたものであり、非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が抑制される集中定数型のラマン増幅器、及びそれを用いた光伝送システムを提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】

このような目的を達成するために、本発明によるラマン増幅器は、（1）所定の増幅波長帯域内にある信号光を励起光によってラマン増幅する集中定数型のラマン増幅器であって、（2）互いに直列に接続され、増幅波長帯域内にある信号光をそれぞれラマン増幅するとともに、互いに異なる波長分散値を有する複数のラマン増幅用光ファイバと、（3）複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれに励起光を供給する1または複数の励起光供給手段と、を備えることを特徴とする。

30

【0009】

単一のラマン増幅用光ファイバを用いて構成された集中定数型のラマン増幅器においては、その構成から増幅器モジュール内で波長分散を制御することができない。したがって、ラマン増幅用光ファイバの波長分散の値により、ラマン増幅用光ファイバを伝送される間に信号光に累積される分散値が大きくなったり、あるいは、零分散に近い状態で信号光が

40

【0010】

このとき、信号光の分散値が大きくなる場合には、自己位相変調（SPM：Self Phase Modulation）や群速度分散（GVD：Group Velocity Dispersion）などが発生する原因となる。また、信号光が零分散近傍で伝送される場合には、交差位相変調（XPM：Cross Phase Modulation）や四光波混合（FWM：Four Wave Mixing）などが発生する原因となる。そして、ラマン増幅用光ファイバでの伝送中にこれらの非線型光学効果等を生じると、その影響によって信号光の伝送品質が劣化してしまう。

【0011】

50

これに対して、上記したラマン増幅器においては、直列に接続した複数のラマン増幅用光ファイバを用いて集中定数型のラマン増幅器を構成するとともに、それらの波長分散値をそれぞれ異なる値としている。これによって、増幅器内の光伝送路で波長分散を制御して、信号光への分散の累積や零分散近傍での伝送を低減することが可能となる。したがって、非線型光学効果による増幅器内での信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器が実現される。

【0012】

また、増幅波長帯域内の少なくとも一部の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバでの波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 0.5 ps/nm 以下であることを特徴とする。

10

【0013】

あるいは、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバでの波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 5.0 ps/nm 以下であることを特徴とする。

【0014】

ラマン増幅器内の光伝送路全体としての累積された分散値を、ラマン増幅用光ファイバの波長分散値の組合せによって補償して上記の範囲内とすることによって、それぞれ波長分散値の異なる複数のラマン増幅用光ファイバが接続された光ファイバ伝送路の全体として、波長分散が十分に補償された構成とすることができる。したがって、SPMやGVDの発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

20

【0015】

また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバでの波長分散値を入力端から任意の位置まで累積した分散値の絶対値が、各位置に対して 30 ps/nm 以下であることが好ましい。

【0016】

ラマン増幅器内の光伝送路全体としての分散値が上記のように補償されている場合においても、入力端から出力端までの光伝送路上で分散値が過度に大きくなることがあると、SPMやGVDによる信号光の伝送品質の劣化の原因となる。これに対して、光伝送路上の各位置に対して、その位置までに累積された分散値を常に上記の範囲内とすることによって、そのような伝送品質の劣化を抑制することができる。

30

【0017】

さらに、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれにおける分散スロープ値が、 $-0.5 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上 $0.1 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下であることが好ましい。このように、分散スロープ値を十分に小さい値としておけば、増幅波長帯域の全体に対して、十分に波長分散を補償することが可能となる。

【0018】

また、複数のラマン増幅用光ファイバは、互いに異なる符号の波長分散値を有する2つのラマン増幅用光ファイバを少なくとも含むことを特徴とする。

【0019】

このように逆符号の波長分散値を有するラマン増幅用光ファイバを用いれば、波長分散値の絶対値がある程度の大きさであっても、逆符号の波長分散値の組合せによって全体として波長分散を補償することができる。これによって、信号光の零分散近傍での伝送を極力避けることが可能となり、XPMやFWMの発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

40

【0020】

具体的な構成としては、例えば、複数のラマン増幅用光ファイバは、2つのラマン増幅用光ファイバからなるとともに、その一方の波長分散値が正、他方の波長分散値が負に構成されているものがある。このような構成によれば、特に簡単なラマン増幅用光ファイバの構成によって波長分散を補償して、信号光の伝送品質の劣化の抑制を実現することができる。

50

【0021】

また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれでの波長分散値の絶対値が、所定の波長分散下限値以上であることを特徴とする。このように波長分散値に下限値を与えることによって、零分散近傍の波長分散値を有する光ファイバを除外して、増幅器内の光伝送路における零分散近傍での信号光の伝送を防止することができる。波長分散下限値については、例えば、絶対値が $0.5 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$ 以上とすることが好ましい。

【0022】

また、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれは、互いに異なるレイリー散乱係数を有することを特徴とする。このように、複数のラマン増幅用光ファイバを、上記したように互いに異なる波長分散値を有すると同時に、レイリー散乱係数についても異なる値を有するものとすることによって、増幅器での伝送品質の劣化の抑制とともに、その雑音特性をも向上することができる。

10

【0023】

このとき、複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も小さいレイリー散乱係数を有するラマン増幅用光ファイバが、最も入力端側の位置に設置されていることが好ましい。

【0024】

入力端側にレイリー散乱係数が大きいラマン増幅用光ファイバを設置する構成とした場合、入力端側で二重レイリー散乱によって生じる雑音光が大きくなるとともに、その大きい雑音光が後段の他のラマン増幅用光ファイバによって光増幅されることとなる。これに対して、レイリー散乱係数が小さく雑音特性が優れた光ファイバを入力端側に設置する構成とすることによって、増幅器内の光伝送路全体としての雑音特性を向上することができる。

20

【0025】

また、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれの長さが、 5 km 以下であることが好ましい。このように、ラマン増幅用光ファイバの長さを極力短くすることによって、非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化、及び雑音光の発生をともに低減することができる。

【0026】

また、複数のラマン増幅用光ファイバの少なくとも1つは、励起光の波長での実効断面積が $15 \mu\text{m}^2$ 以下であることを特徴とする。

30

【0027】

さらに、複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も大きい非線型定数を有するラマン増幅用光ファイバが、励起光供給手段から励起光が供給される位置に最も近い位置に設置されていることを特徴とする。

【0028】

ラマン増幅用光ファイバの実効断面積、非線型定数、またはその両者にそれぞれ上記した条件を適用することによって、誘導ラマン散乱によるラマン増幅の効率を高めて、増幅器のラマン利得を向上することができる。また、ラマン増幅器の全体として必要なラマン利得を確保するためのラマン増幅用光ファイバの長さが短くなるなど、ラマン増幅用光ファイバで生じる雑音光や伝送品質の劣化を低減することが可能となる。

40

【0029】

また、本発明による光伝送システムは、信号光が伝送される光ファイバを用いて構成された光伝送路を有するとともに、光伝送路を伝送される信号光を中継する中継局内に、上記したラマン増幅器が設置されていることを特徴とする。

【0030】

光伝送システムの中継局に設置される集中定数型の光増幅器として、上記の構成を有するラマン増幅器を用いることによって、信号光の伝送品質の劣化が抑制されて、送信局から受信局へと確実に信号光を伝送可能な光伝送システムを実現することができる。

【0031】

50

【発明の実施の形態】

以下、図面とともに本発明によるラマン増幅器及びそれを用いた光伝送システムの好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

【0032】

図1は、本発明によるラマン増幅器の一実施形態を示す構成図である。本ラマン増幅器1は、光伝送システムの中継局などに設置される集中定数型の光増幅器であり、2つのラマン増幅用光ファイバ11、12と、2つの励起光源ユニット21、22とを備えて構成されている。

10

【0033】

ラマン増幅用光ファイバ11と12とはそれぞれ、互いに異なる波長分散値を有する石英系の光ファイバからなる。また、これらのラマン増幅用光ファイバは、ラマン増幅器1の入力端1aから出力端1bに向けて、ラマン増幅用光ファイバ11、12の順で直列に接続されている。

【0034】

この2つのラマン増幅用光ファイバ11、12を用いた構成によって、信号光を伝送するとともに、励起光が供給されているときに、所定の増幅波長帯域内にある信号光を励起光によってラマン増幅するためのラマン増幅器1内の光伝送路（光ファイバ線路）が形成されている。また、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれでの波長分散値の組合せによって、ラマン増幅される信号光への分散の累積や信号光の零分散近傍での伝送を低減するなど、所定の条件を満たすように、ラマン増幅器1内の光伝送路での波長分散が制御される。

20

【0035】

ラマン増幅用光ファイバ11、12の後方には、それぞれ光アイソレータ41、42が設置されている。光アイソレータ41、42のそれぞれは、光を順方向（図1中に示した矢印の方向）へと通過させるが、逆方向へは通過させないものである。すなわち、光アイソレータ41は、ラマン増幅用光ファイバ11から到達した光をラマン増幅用光ファイバ12へと通過させるが、逆方向へは光を通過させない。また、光アイソレータ42は、ラマン増幅用光ファイバ12から到達した光を出力端1bへと通過させるが、逆方向へは光を

30

【0036】

ラマン増幅用光ファイバ11、12への励起光は、励起光供給手段である励起光源ユニット21、22によってそれぞれ供給される。励起光源ユニット21、22は、ラマン増幅用光ファイバ11、12と光アイソレータ41、42との間にそれぞれ設けられた光合波器31、32を介して、ラマン増幅器1内の光伝送路に接続されている。

【0037】

ここで、光合波器31、32は、励起光源ユニット21、22から供給されて到達した励起光を、前方のラマン増幅用光ファイバ11、12へ向けて逆方向にそれぞれ通過させる。また、ラマン増幅用光ファイバ11、12から到達した信号光を、光アイソレータ41、42へ向けて順方向にそれぞれ通過させる。これによって、本ラマン増幅器1は、後方励起（逆方向励起）の光増幅器として構成されている。

40

【0038】

図1においては、ラマン増幅用光ファイバ11へと励起光を供給する励起光源ユニット21について、その具体的な構成の一例を図示してある。本実施形態においては、6つの励起光源211a、211b、212a、212b、213a、及び213bが用いられている。なお、励起光源ユニット22については、その具体的な構成の図示を省略しているが、励起光源ユニット21と同様の構成のものが用いられている。

【0039】

励起光源ユニット21の6つの励起光源のうち、励起光源211a及び211bは同一の

50

波長 λ_1 の光を出力するものである。励起光源 2 1 1 a 及び 2 1 1 b からの光は、偏波合成器 2 1 1 c によって合成されて、偏波について均一な波長 λ_1 の励起光が生成される。同様に、励起光源 2 1 2 a 及び 2 1 2 b は同一の波長 λ_2 ($\lambda_2 < \lambda_1$) の光を出力し、それらは偏波合成器 2 1 2 c によって合成されて、偏波について均一な波長 λ_2 の励起光が生成される。また、励起光源 2 1 3 a 及び 2 1 3 b は同一の波長 λ_3 ($\lambda_3 < \lambda_1$ 、 λ_2) の光を出力し、それらは偏波合成器 2 1 3 c によって合成されて、偏波について均一な波長 λ_3 の励起光が生成される。

【0040】

そして、偏波合成器 2 1 1 c、2 1 2 c、及び 2 1 3 c でそれぞれ合成された波長 λ_1 、 λ_2 、及び λ_3 の光は、波長合成器 2 1 4 において合成されて3つの波長成分を有する励起光とされ、光合波器 3 1 を介してラマン増幅用光ファイバ 1 1 へと供給される。

10

【0041】

なお、励起光源ユニットの構成については、ラマン増幅器に要求される増幅波長帯域などに応じて、励起光の波長や励起光源の個数などを適宜設定することが好ましい。具体的には、励起光源ユニットからラマン増幅用光ファイバへと供給される励起光の波長については、通常、信号光の波長よりも $0.1 \mu\text{m}$ 程度短い波長が用いられる。また、励起光源の個数については、そのラマン増幅器での増幅波長帯域内の各波長において光増幅が可能となるように、必要な個数(必要な波長数)の励起光源が用いられる。例えば、1波長の励起光によって増幅波長帯域の全体での光増幅が可能なる場合には、励起光は1波長成分のみを有するものであっても良い。

20

【0042】

上記したラマン増幅器 1 においては、複数のラマン増幅用光ファイバ、図 1 においては2つのラマン増幅用光ファイバ 1 1、1 2、を直列に接続して増幅器 1 内での光伝送路を構成するとともに、それらの波長分散値をそれぞれ異なる値としている。この構成によれば、ラマン増幅用光ファイバ 1 1、1 2 のそれぞれでの波長分散値の組合せを利用して、増幅器 1 内での波長分散を制御して、信号光への分散の累積や零分散近傍での伝送などの、信号光の伝送上好ましくない条件の発生を防止することが可能となる。これによって、非線型光学効果による増幅器内での信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器が実現される。

【0043】

ここで、増幅器 1 内の光伝送路での信号光への分散の累積に関しては、増幅波長帯域内の少なくとも一部の波長帯域において、ラマン増幅用光ファイバ 1 1、1 2 での波長分散を入力端 1 a から出力端 1 b まで累積した分散値の絶対値を、 0.5 ps/nm 以下の範囲内とすることが好ましい。これは、分散値の増幅波長帯域内での最小値を 0.5 ps/nm 以下とすることに相当する。

30

【0044】

また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、波長分散を入力端 1 a から出力端 1 b まで累積した分散値の絶対値を、 5.0 ps/nm 以下の範囲内とすることが好ましい。これは、分散値の増幅波長帯域内での最大値を 5.0 ps/nm 以下とすることに相当する。

40

【0045】

ラマン増幅器 1 内の光伝送路全体としての分散値となる、各ラマン増幅用光ファイバ 1 1、1 2 を通して累積された分散値を、上記の範囲内とすることによって、それぞれ波長分散値の異なる2つのラマン増幅用光ファイバ 1 1、1 2 が接続された光伝送路の全体として波長分散が十分に補償された構成となる。したがって、自己位相変調 (SPM: Self Phase Modulation) や群速度分散 (GVD: Group Velocity Dispersion) の発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

【0046】

また、増幅器 1 内の光伝送路での信号光の零分散近傍での伝送に関しては、2つのラマン増幅用光ファイバ 1 1、1 2 は、互いに異なる符号の波長分散値(一方が正、他方が負の

50

波長分散値)を有する構成とすることが好ましい。

【0047】

このように、逆符号の波長分散値を有するラマン増幅用光ファイバ11、12を接続して光伝送路を構成すれば、ラマン増幅用光ファイバ11、12での波長分散値の絶対値がそれぞれある程度の大きさの値であっても、逆符号の波長分散値の組合せによって、増幅器1内の光伝送路の全体として波長分散を補償することができる。これによって、信号光の零分散近傍での伝送を極力避けることが可能となり、交差位相変調(XPM: Cross Phase Modulation)や四光波混合(FWM: Four Wave Mixing)の発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

【0048】

図1に示したラマン増幅器におけるラマン増幅用光ファイバの組合せ等について、さらに具体的に説明する。図2は、図1に示したラマン増幅器内の光ファイバ伝送路における波長分散の一例について模式的に示すグラフである。なお、図2においては、ラマン増幅器1の構成を簡略化してラマン増幅用光ファイバ11及び12のみを示し、励起光源ユニット21、22、光合波器31、32、及び光アイソレータ41、42については、図示を省略している。また、図2中の点1cは、ラマン増幅用光ファイバ11と12とが互いに接続される中間点を示している。

【0049】

図2に示した例においては、入力端1a側のラマン増幅用光ファイバ11として、正の波長分散値を有する光ファイバが適用されている。これにより、入力端1aから中間点1cに向けて、伝送距離とともに分散値が累積的に増加し、中間点1cにおいて、約30 ps/nmの分散値となっている。

【0050】

一方、出力端1b側のラマン増幅用光ファイバ12としては、負の波長分散値を有する光ファイバが適用されている。これにより、中間点1cで約30 ps/nmとなっていた分散値が、出力端1bに向けて伝送距離とともに累積的に減少し、出力端1bにおいて、ほぼ0 ps/nmの分散値となる。より具体的には、その絶対値が所定の値以下(例えば0.5 ps/nm以下、あるいは5.0 ps/nm以下)の範囲内の分散値となるように波長分散が補償される。このような構成により、上記したように非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器1が得られる。

【0051】

図3に、図2に示した構成のラマン増幅器を実現するためのラマン増幅用光ファイバの具体例を、その屈折率プロファイルによって示す。図3に示した光ファイバは、SiO₂にGeO₂が添加された比屈折率差n₁のコア領域61と、SiO₂にFが添加された比屈折率差n₂のクラッド領域62とを有して構成されている。

【0052】

上記した構成からなる光ファイバにおいて、純SiO₂を0%としたコア領域61及びクラッド領域62の比屈折率差をn₁ = 2.9%、n₂ = -0.4%として、ラマン増幅用光ファイバ11及び12にそれぞれ適用した。ここで、比屈折率差以外の光ファイバの構成については、それぞれの光ファイバで異なる構成とした。

【0053】

具体的には、前段のラマン増幅用光ファイバ11では、コア径を4.8(μm)、波長1.55μmでの波長分散を4.3(ps/nm/km)、波長1.55μmでの実効断面積を10.8(μm²)、非線型定数を20.4(1/W/km)とした。

【0054】

また、後段のラマン増幅用光ファイバ12では、コア径を4.0(μm)、波長1.55μmでの波長分散を-9.0(ps/nm/km)、波長1.55μmでの実効断面積を9.9(μm²)、非線型定数を22.3(1/W/km)とした。

【0055】

以上の構成からなるラマン増幅用光ファイバ11及び12を用いれば、図2に示した波長

10

20

30

40

50

分散となるように、ラマン増幅器1を構成することができる。なお、それぞれの波長分散値から、中間点1cでの分散値が約 30 ps/nm となる図2の場合には、ラマン増幅用光ファイバ11の長さは約 6.98 km 、ラマン増幅用光ファイバ12の長さは約 3.33 km となる。

【0056】

ここで、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、波長分散を入力端1aから任意の位置まで累積した分散値の絶対値を、各位置に対して 30 ps/nm 以下の範囲内とすることが好ましい。これは、増幅器1内の光伝送路上の各位置での分散値の最大値を、図2に示した例のように、 30 ps/nm 以下とすることに相当する。

【0057】

入力端1aから出力端1bまでの光伝送路上で分散値が過度に大きくなる位置が存在すると、光伝送路全体としての波長分散の補償にかかわらず、SPMやGVDによる信号光の伝送品質の劣化が発生する原因となる。これに対して、光伝送路上の各位置に対しても分散値に一定の条件を課することによって、信号光の伝送中での伝送品質の劣化を抑制することができる。なお、この条件は、図1及び図2のように2つのラマン増幅用光ファイバ11、12を用いている場合には、それらが接続される中間点1cまでに累積される波長分散値を 30 ps/nm 以下とすることによって達成される。

【0058】

また、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれにおける分散スロープ値を、 $-0.5 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上 $0.1 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下の範囲内とすることが好ましい。

【0059】

例えば、上記した具体例の光ファイバ等によってラマン増幅器1を構成した場合、波長 $1.55 \mu\text{m}$ で波長分散の補償が可能となるが、それぞれの分散スロープ値の絶対値が大きいと、増幅波長帯域内で波長 $1.55 \mu\text{m}$ から離れた波長帯域における波長分散の補償が困難となる。これに対して、上記のように分散スロープ値を十分に小さい値としておけば、増幅波長帯域の全体に対して、十分に波長分散を補償することが可能となる。

【0060】

また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれでの波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、 0 ps/nm 近傍を除いておくことが好ましい。これによって、増幅器1内の光伝送路で、零分散近傍で伝送されることによる信号光の伝送品質の劣化を確実に防止することができる。なお、波長分散下限値については、例えば、絶対値が 0.5 ps/nm/km 以上とすることが好ましい。

【0061】

さらに、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれの長さを、 5 km 以下とすることが好ましい。このように、ラマン増幅用光ファイバ11、12の長さ、したがって増幅器1内の光伝送路の長さを極力短くすることによって、非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化をより低減することができる。また、非線型光学効果とは別に伝送品質の劣化の原因となる雑音光の発生についても、ともに低減される。

【0062】

また、複数のラマン増幅用光ファイバとして用いる光ファイバの構成については、その少なくとも1つを、ラマン増幅用の励起光の波長における実効断面積を $15 \mu\text{m}^2$ 以下とすることが好ましい。

【0063】

あるいは、複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も大きい非線型定数を有するラマン増幅用光ファイバを、励起光源ユニットから励起光が供給される位置に最も近い位置に設置することが好ましい。

【0064】

ラマン増幅用光ファイバとして適用する光ファイバの実効断面積、非線型定数、またはそ

10

20

30

40

50

の両者にそれぞれ上記した条件を課することによって、増幅器のラマン利得を向上することができる。

【0065】

図4に、波長 $1.48\ \mu\text{m}$ の励起光を用いた場合の、波長帯域 $1525\ \text{nm} \sim 1625\ \text{nm}$ でのラマン利得係数 g_R のグラフを示す。ここで、グラフFは、通常の $1.3\ \mu\text{m}$ 零分散シングルモードファイバによるラマン利得係数 g_R を示している。一方、グラフGは、励起光波長における実効断面積が $10\ \mu\text{m}^2$ で高非線型性の光ファイバを用いた場合のラマン利得係数 g_R を示している。

【0066】

これらのグラフF及びGより、励起光波長での実効断面積が小さく、かつ非線型定数が大きい光ファイバを用いることによって、誘導ラマン散乱によるラマン増幅の効率を向上させて、増幅器での高ラマン利得を得ることが可能となることがわかる。また、このとき、ラマン増幅器に対して必要とされているラマン利得を確保するためのラマン増幅用光ファイバの長さを短くすることができるなど、ラマン増幅用光ファイバで生じる雑音光や伝送品質の劣化についても、さらに低減することが可能となる。

10

【0067】

なお、非線型定数が最大のラマン増幅用光ファイバを、励起光源ユニットから励起光が供給される位置に最も近い位置に設置することについては、図1に示すように、各ラマン増幅用光ファイバ11、12が励起光源ユニット21、22に対して同様の位置関係にある場合には、任意の光ファイバを非線型定数が大きいものとして良い。また、図1に示した構成において、前方の励起光源ユニット21が設置されず、後方の励起光源ユニット22がラマン増幅用光ファイバ11及び12に対する共通の励起光供給手段となる場合には、励起光源ユニット22に近いラマン増幅用光ファイバ12に、非線型定数の大きい光ファイバが適用される。

20

【0068】

また、複数のラマン増幅用光ファイバからなる光伝送路での雑音特性については、複数のラマン増幅用光ファイバとして、互いに異なるレイリー散乱係数を有する光ファイバを用いることが好ましい。これによって、波長分散値の組合せによる信号光の伝送品質の劣化の抑制とともに、レイリー散乱係数の組合せを利用して、二重レイリー散乱による雑音光の発生及びその増幅を低減して、光伝送路の雑音特性をも向上することができる。

30

【0069】

この場合の光伝送路の構成については、最も小さいレイリー散乱係数を有するラマン増幅用光ファイバを、最も入力端側の位置に設置することが好ましい。例えば、図1に示した構成のラマン増幅器1においては、前段のラマン増幅用光ファイバ11として、レイリー散乱係数が小さく雑音特性が重視された光ファイバ(例えばGe低濃度コアの光ファイバ)を適用する。一方、後段のラマン増幅用光ファイバ12として、ラマン利得などの他の特性が重視された光ファイバを適用する。

【0070】

入力端1a側のラマン増幅用光ファイバ11にレイリー散乱係数が大きいものを配置した場合、前段のラマン増幅用光ファイバ11で大きい雑音光が生成されるとともに、後段のラマン増幅用光ファイバ12でその雑音光が光増幅されて、結果として出力信号光における雑音光強度が増大してしまう。これに対して、上記のように前段に雑音特性を重視した光ファイバを、また、後段にラマン利得などを重視した光ファイバを配置する構成とすれば、増幅器1の全体としての雑音特性を向上することができる。

40

【0071】

次に、上記したラマン増幅器を用いた本発明による光伝送システムについて説明する。図5は、図1に示したラマン増幅器を用いた光伝送システムの一実施形態を示す構成図である。

【0072】

本実施形態の光伝送システムは、送信局Tと受信局Rとの間の光伝送路(光ファイバ線路

50

)上に、送信局T側から順に2つの中継局A、Bが設けられて構成されている。これらの中継局A、Bは、光伝送路を伝送される信号光を中継するためのものである。そして、中継局A及びBの内部には、それぞれ図1に示した構成を有するラマン増幅器1a及び1bが設置されている。

【0073】

このように、図1に示した構成によるラマン増幅器1a、1bを、光伝送システムの中継局A、Bに設置される集中定数型の光増幅器として利用することによって、信号光の伝送品質の劣化が抑制されて、送信局Tから受信局Rへと確実に信号光を伝送可能な光伝送システムを実現することができる。

【0074】

なお、2つの中継局A及びBの間の光伝送路Cについては、必要な分散制御等がされた光伝送路として構成されていることが好ましい。また、この光伝送路C中に、同様にラマン増幅器等が備えられた他の中継局がさらに設けられていても良い。

【0075】

本発明によるラマン増幅器、及びそれを用いた光伝送システムは、上記した実施形態に限られるものではなく、様々な変形が可能である。

【0076】

図6及び図7は、それぞれラマン増幅器の変形例として他の実施形態を示す構成図である。このうち、図6に示したラマン増幅器では、図1に示した構成に対して、さらに2つの励起光源ユニット23、24が設置されている。これらの励起光源ユニットのうち、励起光源ユニット23は、入力端1aとラマン増幅用光ファイバ11との間に設けられた光合波器33を介して光伝送路に接続されて、ラマン増幅用光ファイバ11へと順方向に励起光を供給している。また、励起光源ユニット24は、光アイソレータ41とラマン増幅用光ファイバ12との間に設けられた光合波器34を介して光伝送路に接続されて、ラマン増幅用光ファイバ12へと順方向に励起光を供給している。これによって、図6のラマン増幅器1は、双方向励起の光増幅器として構成されている。

【0077】

また、図7に示したラマン増幅器では、励起光源ユニットとしては、ラマン増幅用光ファイバ11の前方の励起光源ユニット23と、ラマン増幅用光ファイバ12の後方の励起光源ユニット22とが設置されている。また、ラマン増幅用光ファイバ11と光アイソレータ41との間、及び光アイソレータ41とラマン増幅用光ファイバ12との間には、それぞれ光合分波器35、36が設置されている。

【0078】

これらの光合分波器35、36は、いずれも励起光源ユニット22、23から供給される励起光の波長の光を合分波するものである。また、光合分波器35及び36の間には、励起光源ユニット22、23からの励起光を迂回して通過させるバイパス路となる光伝送路37が設けられている。これによって、図7のラマン増幅器1は、励起光源ユニット22及び23のそれぞれからの励起光が、2つのラマン増幅用光ファイバ11、12の両方にそれぞれ供給される双方向励起の光増幅器として構成されている。

【0079】

これらの変形例以外にも、様々な構成の変更が可能である。例えば、励起光源ユニットについては、2つのラマン増幅用光ファイバに対して単一の励起光源ユニットのみを設置しても良い。また、光アイソレータ41、42については、不要な場合は設置を省略しても良い。あるいは、光アイソレータ及び光合波器を集積化して、損失を低減する構成とすることも可能である。

【0080】

また、直列に接続される複数のラマン増幅用光ファイバの個数については、上記した2つの場合に限らず、3つ以上のラマン増幅用光ファイバを用いても良い。この場合、ラマン増幅器の構成はやや複雑となるが、波長分散値やレイリー散乱係数などの組合せの自由度が増すこととなるので、それらの諸特性の制御性が向上される。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 1 】

また、ラマン増幅器内の光ファイバ伝送路における波長分散についても、図2に示した構成に限らず、他の特性との関係などに応じて、様々な構成とすることが可能である。例えば、図2においては、前段のラマン増幅用光ファイバ11が正の波長分散値、後段のラマン増幅用光ファイバ12が負の波長分散値を有する構成とされている。これに対して、図8に示すように、前段のラマン増幅用光ファイバ11が負の波長分散値、後段のラマン増幅用光ファイバ12が正の波長分散値を有する構成とすることも可能である。

【 0 0 8 2 】

波長分散以外の各構成条件、例えばラマン増幅用光ファイバの非線型定数、レイリー散乱係数、分散スロープ、及び光ファイバの長さ等についても、それぞれの条件の相関や、個々のラマン増幅器に対して要求される具体的な特性条件などに応じて、適宜その組合せを選択することが好ましい。

10

【 0 0 8 3 】

【 発明の効果 】

本発明によるラマン増幅器及びそれを用いた光伝送システムは、以上詳細に説明したように、次のような効果を得る。すなわち、互いに異なる波長分散値を有する複数のラマン増幅用光ファイバを直列に接続して構成された集中定数型のラマン増幅器によれば、増幅器内の光伝送路での波長分散を波長分散値の組合せによって制御して、信号光への分散の累積や零分散近傍での伝送を低減することが可能となる。これによって、非線型光学効果などによる信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器が実現される。

20

【 0 0 8 4 】

このような構成を有するラマン増幅器では、増幅器モジュール内で波長分散が制御されるため、上記した特性の向上とともに、その中継局などへの適用が容易である。また、特性制御の自由度の高さから、各用途に適した様々な特性のラマン増幅器を提供することが可能となる。

【 図面の簡単な説明 】

【 図 1 】 ラマン増幅器の一実施形態を示す構成図である。

【 図 2 】 図 1 に示したラマン増幅器内の光伝送路における波長分散の一例を示すグラフである。

【 図 3 】 ラマン増幅器に適用されるラマン増幅用光ファイバの構成を示す図である。

30

【 図 4 】 ラマン増幅用光ファイバにおけるラマン利得係数について示すグラフである。

【 図 5 】 図 1 に示したラマン増幅器を用いた光伝送システムの一実施形態を示す構成図である。

【 図 6 】 ラマン増幅器の他の実施形態を示す構成図である。

【 図 7 】 ラマン増幅器の他の実施形態を示す構成図である。

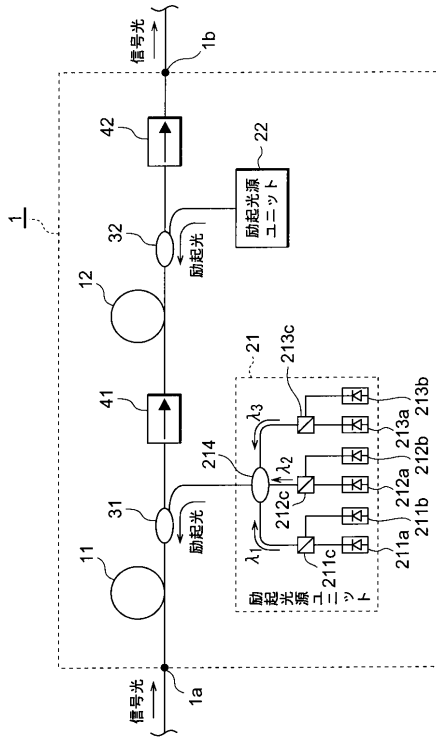
【 図 8 】 図 1 に示したラマン増幅器内の光伝送路における波長分散の他の例を示すグラフである。

【 符号の説明 】

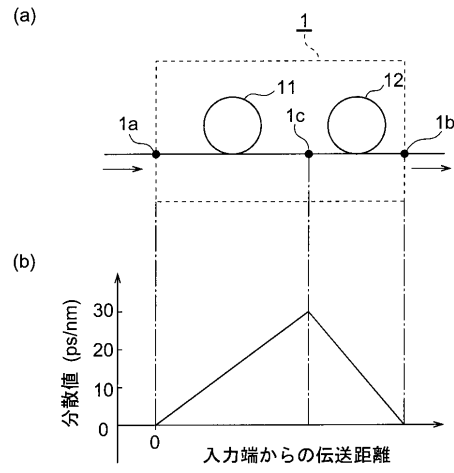
1 ... ラマン増幅器、 1 a ... 入力端、 1 b ... 出力端、 1 c ... 中間点、 1 1、 1 2 ... ラマン増幅用光ファイバ、 2 1 ~ 2 4 ... 励起光源ユニット、 3 1 ~ 3 4 ... 光合波器、 3 5、 3 6 ... 光合分波器、 3 7 ... 光伝送路、 4 1、 4 2 ... 光アイソレータ。

40

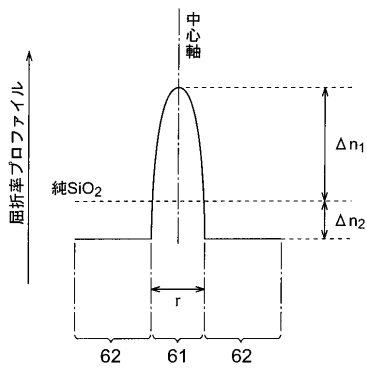
【図1】



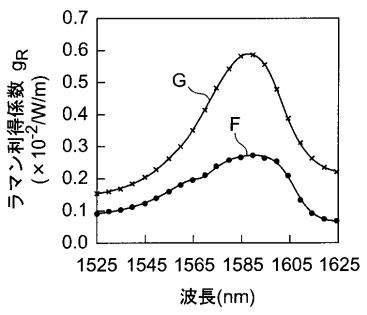
【図2】



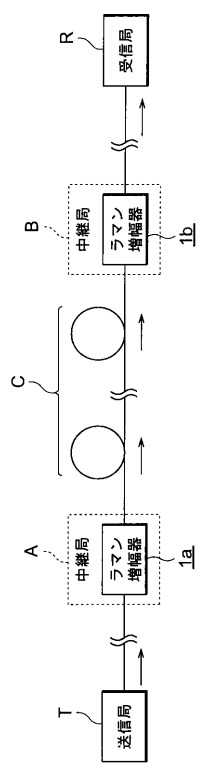
【図3】



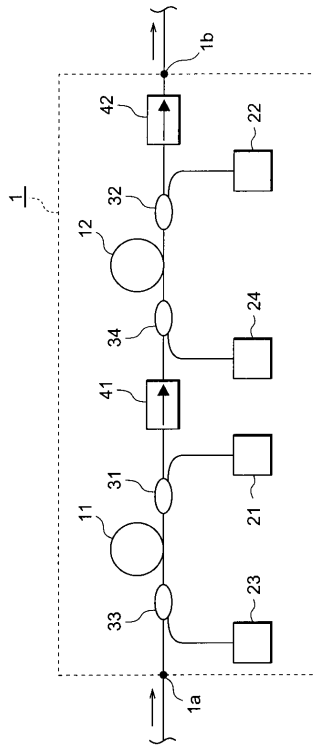
【図4】



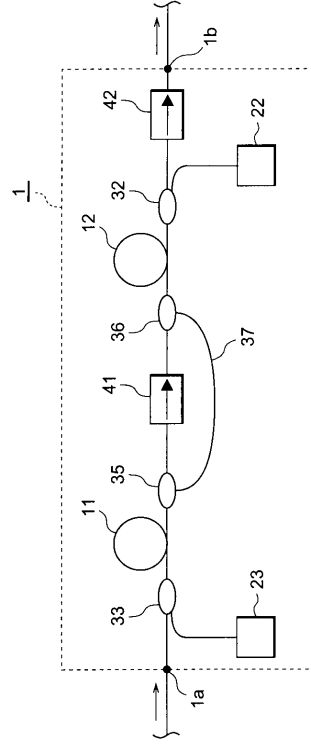
【図5】



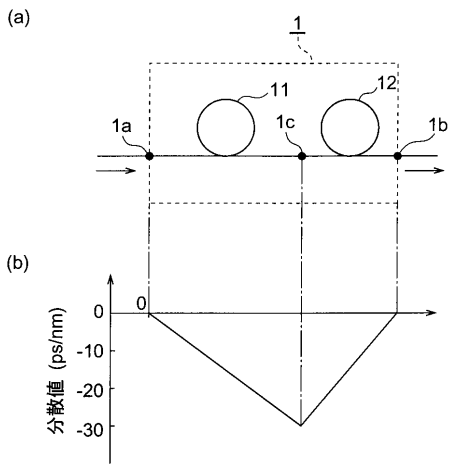
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.⁷ F I
H 0 4 B 10/17

(72)発明者 西村 正幸
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社 横浜製作所内

(72)発明者 平野 正晃
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社 横浜製作所内

審査官 田部 元史

(56)参考文献 特開2002-014383(JP,A)
特開2001-237777(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, DB名)
G02F1/35-1/39