(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第3832361号

(P3832361)

(45)発行日　平成18年10月11日(2006.10.11)　(24)登録日　平成18年7月28日(2006.7.28)

(51)Int.Cl.		F I		
H01S 3/10	(2006.01)	H01S	3/10	Z
G02F 1/01	(2006.01)	G02F	1/01	C
H04B 10/04	(2006.01)	H04B	9/00	S
H04B 10/06	(2006.01)			
H04B 10/14	(2006.01)			

請求項の数 29　(全 41 頁)

(21)出願番号　特願2002-57600(P2002-57600)
(22)出願日　平成14年3月4日(2002.3.4)
(65)公開番号　特開2003-258348(P2003-258348A)
(43)公開日　平成15年9月12日(2003.9.12)
審査請求日　平成16年12月1日(2004.12.1)

(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　角井　素貴
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】光増幅器および光通信システム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

Ｓバンド内において入力端に入力した所定波長域の複数の波長の信号光を光増幅して、その光増幅した信号光を出力端より出力する光増幅器であって、

前記入力端から前記出力端へ至る信号光伝搬経路上に設けられ、Ｔｍ元素が光導波領域に添加され前記信号光を光増幅する光導波路と、

励起光を前記光導波路に供給するものであって、励起光の波長が互いに異なる複数の励起光供給手段と、

前記信号光伝搬経路上に前記光導波路と直列的に設けられ、信号光波長における透過特性が可変である透過特性可変光部品と、

信号光の波数と、前記入力端に入力する信号光の入力パワーまたは前記出力端より出力される光の出力パワーを検知する信号光検知部と、

前記波数毎に前記入力パワーまたは前記出力パワーの検知結果に基づいて、前記励起光供給手段より前記光導波路に供給される励起光のパワーを調整するとともに、信号光波長における前記透過特性可変光部品の透過特性をも調整して、前記光導波路における信号光増幅の利得の大きさ及び利得スペクトルの形状の双方を制御する制御部と

を備えることを特徴とする光増幅器。

【請求項２】

前記励起光供給手段は、波長１．０５μｍ帯または波長１．４μｍ帯の励起光を前記光導波路に供給するとともに、波長１．２μｍ帯または波長１．５５～１．６５μｍ帯の励起光

を前記光導波路に供給することを特徴とする請求項１記載の光増幅器。
【請求項３】
前記信号光検知部は、前記光導波路における信号光増幅の利得帯域内の２以上の波長で、前記出力端より出力する信号光のパワー、前記光導波路における信号光増幅の利得、または、ＡＳＥ光のパワーを検知することを特徴とする請求項１記載の光増幅器。
【請求項４】
前記信号光検知部は、前記光導波路の側方に出射される自然放出光のパワーを検出することで、前記光導波路における信号光増幅の利得を検知することを特徴とする請求項３記載の光増幅器。
【請求項５】
前記信号光検知部は、
前記入力信号光の全パワーまたは出力光の全パワーと、
前記光導波路における信号光増幅の利得帯域内の１以上の波長で、前記出力端より出力する信号光のパワー、前記光導波路における信号光増幅の利得、またはＡＳＥ光のパワーと、
を検知することを特徴とする請求項１記載の光増幅器。
【請求項６】
前記光導波路における信号光増幅の利得帯域内の１以上の波長が、信号光の波長帯域中の短波長側か若しくは長波長側にあることを特徴とする請求項５記載の光増幅器。
【請求項７】
前記信号光検知部は、
前記光導波路より出力された光のパワーの一部を分岐して取り出す光分岐カプラと、
前記光分岐カプラにより取り出された光のうち特定波長の光を選択的に透過させるフィルタと、
前記フィルタを透過した前記特定波長の光のパワーを検出する受光部と
を有することを特徴とする請求項３または５に記載の光増幅器。
【請求項８】
前記信号光検知部は、
前記光導波路より出力された光のパワーの一部を分岐して取り出す光分岐カプラと、
前記光分岐カプラにより取り出された光を回折する回折格子と、
前記回折格子により回折された光のうち特定波長の光のパワーを検出する受光部と
を有することを特徴とする請求項３記載の光増幅器。
【請求項９】
前記信号光検知部は、前記回折格子により回折された光のスペクトルに基づいて、前記入力端に入力する信号光の波数を検知することを特徴とする請求項８記載の光増幅器。
【請求項１０】
前記信号光検知部は、前記入力端に入力する信号光の全パワー、および、前記出力端より出力される光の全パワーを検知することを特徴とする請求項１記載の光増幅器。
【請求項１１】
前記信号光検知部は、信号光本線以外から受け渡される情報に基づいて、前記入力端に入力する信号光の波数を検知することを特徴とする請求項１記載の光増幅器。
【請求項１２】
前記透過特性可変光部品は、信号光波長における透過率が可変であることを特徴とする請求項１記載の光増幅器。
【請求項１３】
前記制御部は、
前記入力端に入力する信号光の波数に基づいて、前記励起光供給手段より前記光導波路に供給される波長１．２μｍ帯または波長１．５５～１．６５μｍ帯の励起光のパワーを調整し、前記入力端に入力した信号光のパワーまたは前記出力端より出力されるべき信号光パワーの目標値に基づいて、信号光波長における前記透過特性可変光部品の透過率を調整

して、前記光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、
前記励起光供給手段より前記光導波路に供給される波長１．０５μｍ帯または波長１．４μｍ帯の励起光のパワーを調整して、前記出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御する
ことを特徴とする請求項１２記載の光増幅器。
【請求項１４】
前記入力端に入力する各波長の信号光のパワーの変動量ΔP_{in}［ｄＢ］、前記出力端より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーの変動量ΔP_{out}［ｄＢ］、および、前記入力端に入力する信号光の波数に応じた値を有する係数Ｘに対して、前記透過特性可変光部品の透過率の変動量ΔＡ［ｄＢ］が「$\Delta A = X \cdot (\Delta P_{in} - \Delta P_{out})$」なる式で表されることを特徴とする請求項１３記載の光増幅器。
【請求項１５】
前記透過特性可変光部品は、信号光波長域における損失スペクトルの傾斜が可変であることを特徴とする請求項１記載の光増幅器。
【請求項１６】
前記制御部は、
前記入力端に入力する信号光の波数に基づいて、前記励起光供給手段より前記光導波路に供給される波長１．２μｍ帯または波長１．５５～１．６５μｍ帯の励起光のパワーを調整し、前記入力端に入力した信号光のパワーまたは前記出力端より出力されるべき信号光パワーの目標値に基づいて、信号光波長域における前記透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜を調整して、前記光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、
前記励起光供給手段より前記光導波路に供給される波長１．０５μｍ帯または波長１．４μｍ帯の励起光のパワーを調整して、前記出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御する
ことを特徴とする請求項１５記載の光増幅器。
【請求項１７】
前記入力端に入力する各波長の信号光のパワーの変動量ΔP_{in}［ｄＢ］、前記出力端より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーの変動量ΔP_{out}［ｄＢ］、および、前記入力端に入力する信号光の波数に応じた値を有する係数Ｙに対して、信号光波長域における前記透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜の変動量ΔＳ［ｄＢ］が「$\Delta S = Y \cdot (\Delta P_{in} - \Delta P_{out})$」なる式で表されることを特徴とする請求項１６記載の光増幅器。
【請求項１８】
前記透過特性可変光部品は、信号光波長域における損失スペクトルの形状が波長軸方向にシフト可能であることを特徴とする請求項１５記載の光増幅器。
【請求項１９】
前記制御部は、
前記入力端に入力する信号光の波数に基づいて、信号光波長域における前記透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜および波長軸方向シフト量を調整し、前記入力端に入力する各波長の信号光のパワーおよび前記出力端より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーに基づいて、信号光波長域における前記透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜を調整して、前記光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、
前記励起光供給手段より前記光導波路に供給される波長１．０５μｍ帯または波長１．４μｍ帯の励起光のパワーを調整して、前記出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御する
ことを特徴とする請求項１８記載の光増幅器。
【請求項２０】
前記光導波路は、信号光入力側の前段光導波路と信号光出力側の後段光増幅路とを有し、

前記透過特性可変光部品は、前記前段光導波路と前記後段光増幅路の間に位置し、
前記制御部は、前記波数に基づいて、前記励起光供給手段より前記前段光導波路に供給される励起光のパワーを調整し、かつ、
前記入力端に入力した信号光のパワーまたは前記出力端より出力されるべき信号光パワーの目標値に基づいて、信号光波長における前記透過特性可変光部品の透過率を調整して、前記光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、かつ、
前記励起光供給手段より前記後段光導波路に供給される励起光のパワーを調整して、前記出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御する
ことを特徴とする請求項１記載の光増幅器。
【請求項２１】
前記光導波路は、信号光入力側の前段光導波路と信号光出力側の後段光増幅路とを有し、
前記透過特性可変光部品は、前記前段光導波路と前記後段光増幅路の間に位置し、
前記制御部は、前記波数に基づいて、信号光波長における前記透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜および波長軸方向シフト量を調整し、かつ、
前記入力端に入力した信号光のパワーまたは前記出力端より出力されるべき信号光パワーの目標値に基づいて、信号光波長における前記透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜を調整して、前記光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、かつ、
前記励起光供給手段より前記後段光導波路に供給される励起光のパワーを調整して、前記出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御する
ことを特徴とする請求項１記載の光増幅器。
【請求項２２】
Ｓバンド内において入力端に入力した所定波長域の複数の波長の信号光を光増幅して、その光増幅した信号光を出力端より出力する光増幅器であって、
前記入力端から前記出力端へ至る信号光伝搬経路上に設けられ、Ｔｍ元素が光導波領域に添加され前記信号光を光増幅する光導波路と、
波長１．２μｍ帯または波長１．５５～１．６５μｍ帯の励起光を前記光導波路に供給する励起光供給手段と、
前記光導波路またはその近傍の温度を検出する温度検出部と、
前記温度検出部による温度検出結果に基づいて、前記励起光供給手段より前記光導波路に供給される励起光のパワーを調整して、前記光導波路における信号光増幅の利得の大きさ及び利得スペクトルの形状の双方を制御する制御部と
を備えることを特徴とする光増幅器。
【請求項２３】
Ｓバンド内において入力端に入力した所定波長域の複数の波長の信号光を光増幅して、その光増幅した信号光を出力端より出力する光増幅器であって、
前記入力端から前記出力端へ至る信号光伝搬経路上に設けられ、Ｔｍ元素が光導波領域に添加され前記信号光を光増幅する光導波路と、
励起光を前記光導波路に供給する励起光供給手段と、
前記信号光伝搬経路上に設けられ、信号光波長域における損失スペクトルの傾斜が可変である透過特性可変光部品と、
前記光導波路またはその近傍の温度を検出する温度検出部と、
前記温度検出部による温度検出結果に基づいて、信号光波長における前記透過特性可変光部品の透過特性を調整して、前記光導波路における信号光増幅の利得の大きさ及び利得スペクトルの形状の双方を制御する制御部と
を備えることを特徴とする光増幅器。
【請求項２４】
前記透過特性可変光部品は、複数のマッハツェンダ型干渉計が多段構成されたものであることを特徴とする請求項１５または２３に記載の光増幅器。

【請求項２５】
前記透過特性可変光部品は、損失スペクトルの形状が波長方向にシフト可能であることを特徴とする請求項２３記載の光増幅器。
【請求項２６】
前記透過特性可変光部品は、損失スペクトルの傾斜の制御と波長方向のシフトとが互いに独立に制御可能であることを特徴とする請求項２５記載の光増幅器。
【請求項２７】
前記透過特性可変光部品は、損失スペクトルの波長方向のシフト可能量が１０ｎｍ以上であることを特徴とする請求項２５記載の光増幅器。
【請求項２８】
前記透過特性可変光部品は、損失スペクトルの波長方向のシフト可能量が１５ｎｍ以上であることを特徴とする請求項２５記載の光増幅器。
【請求項２９】
請求項１，２２および２３の何れか１項に記載の光増幅器を含み、信号光を伝送するとともに、この信号光を前記光増幅器により光増幅することを特徴とする光通信システム。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【発明の属する技術分野】
本発明は、励起光が供給された光導波路において信号光を光増幅する光増幅器、および、この光増幅器を含む光通信システムに関するものである。
【０００２】
【従来の技術】
光通信システムは、光ファイバ伝送路に信号光を伝搬させることで、大容量の情報を高速に伝送することができる。この光通信システムにおける信号光の波長帯域として、Ｃバンド（１５３０ｎｍ～１５６５ｎｍ）が既に使用され、Ｌバンド（１５６５ｎｍ～１６２５ｎｍ）の使用も検討されている。また、更なる大容量化を図る為に、信号光波長帯域としてＳバンド（１４６０ｎｍ～１５３０ｎｍ）の使用も検討されている。
【０００３】
また、光通信システムでは、信号光を光増幅するために光増幅器が用いられる。ＣバンドまたはＬバンドの信号光を光増幅することができる光増幅器として、Ｅｒ（エルビウム）元素が光導波領域に添加された光増幅用ファイバ（ＥＤＦ: Erbium Doped Fiber）を光増幅媒体として用いるＥＤＦＡ（Erbium Doped Fiber Amplifier）が用いられる。このＥＤＦＡは、ＥＤＦに励起光（波長０．９８μｍ帯または１．４８μｍ帯）を供給することで、このＥＤＦを伝搬するＣバンドまたはＬバンドの信号光を光増幅することができる。
【０００４】
一方、Ｓバンドの信号光を光増幅することができる光増幅器として、Ｔｍ（ツリウム）元素が光導波領域に添加された光増幅用ファイバ（ＴＤＦ: Thulium Doped Fiber）を光増幅媒体として用いるＴＤＦＡ（Thulium Doped Fiber Amplifier）が検討されている。このＴＤＦＡは、ＴＤＦに励起光（波長１．０５μｍ帯、１．２μｍ帯、１．４μｍ帯または１．５５～１．６５μｍ帯）を供給することで、このＴＤＦを伝搬するＳバンドの信号光を光増幅することができる。
【０００５】
ＥＤＦＡは、Ｅｒイオンの３準位系（基底準位、$^4I_{13/2}$準位、$^4I_{15/2}$準位）の遷移を利用するものであることから、利得の大きさに応じて略一意的に利得スペクトルの形状が定まる。これに対して、ＴＤＦＡは、Ｔｍイオンの４準位系（基底準位、$^3H_4$準位、$^3F_4$準位、$^3H_6$準位）の遷移を利用するものであることから、利得の大きさと利得スペクトル形状（利得の傾斜など）とが互いに独立に変動し得る。
【０００６】
図４４は、ＥＤＦＡおよびＴＤＦＡそれぞれの動作を比較して説明する図である。同図（ａ）は、ＥＤＦＡにおける非飽和利得スペクトル、非飽和吸収スペクトル、反転分布６０

％時の利得スペクトル、および、反転分布５０％時の利得スペクトルそれぞれを示す。また、同図（ｂ）は、ＴＤＦＡにおける非飽和利得スペクトル、非飽和吸収スペクトル、反転分布６０％時の利得スペクトル、および、反転分布５０％時の利得スペクトルそれぞれを示す。各利得スペクトルは、非飽和利得スペクトルおよび非飽和吸収スペクトルに基づいて算出され得る。この図に示されるように、ＥＤＦＡの場合と比較してＴＤＦＡの場合には、光増幅に与るイオンの数が励起光パワーにより変動するので、利得傾斜の変動を生ずることなく、利得スペクトルを定数倍に変化させることが可能である。

【０００７】

このような性質を利用することを意図したＴＤＦＡは、例えば文献１「T. Sakamoto, et al., "Gain-equalized thulium-doped fiber amplifiers for 1460nm-based WDM signals", OAA'99, Technical Digest, WD2 (1999)」に記載されている。この文献１に記載されたＴＤＦＡは、トータル入力信号光パワーが－１３ｄＢｍで一定という条件の下で、利得の傾斜を一定に維持したまま、利得の大きさのみを調整することを意図したものである。

【０００８】

また、文献２「I. G. Clarke, et al., "S-band amplifier with variable gain tilt control", OFC'2001, Technical Digest, TuQ2 (2001)」に記載されたＴＤＦＡは、第１ＴＤＦと第２ＴＤＦとの間に可変光減衰器が設けられたもので、利得の傾斜を調整することを意図したものである。このＴＤＦＡは、信号光が該ＴＤＦＡに到達するまでに伝搬する光伝送路における損失の傾斜の変動および誘導ラマン散乱に因り生じる各波長の信号光のパワーの偏差を補償することを目的とするものである。

【０００９】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、文献１に記載されたＴＤＦＡは、実使用状態と比較するとトータル入力信号光パワー（－１３ｄＢｍ）が小さく、励起光パワーに対して利得飽和しない程度であったことから、利得の傾斜を一定に維持したまま、利得の大きさのみを調整し得たものである。多波長の信号光を波長多重して光伝送する波長分割多重（ＷＤＭ: Wavelength Division Multiplexing）光通信システムでは、波長多重度の向上が検討されていることから、これら多波長の信号光を一括して光増幅するＴＤＦＡに入力する信号光のトータルパワーは実際には更に大きくなることが予想される。また、また、実使用状態を考慮するならば、トータル入力信号光パワーを一定とすべきではなく、出力信号光パワーを一定とすべく利得の大きさを制御すべきである。また、文献２に記載されたＴＤＦＡは、実使用状態において想定される光伝送路の損失の動的変動や信号光の波数の動的変動が考慮されていない。更に、陸上の光通信システムでは、伝送装置は一般に温度０℃～６５℃の環境で動作する必要があるが、ＴＤＦの利得スペクトルの温度依存性が考慮された事例はない。

【００１０】

本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、実使用状態において想定される条件下においても利得の大きさと利得スペクトル形状とを制御し得る光増幅器（ＴＤＦＡ）、および、この光増幅器を含む光通信システムを提供することを目的とする。

【００１１】

【課題を解決するための手段】

本発明に係る光増幅器は、Ｓバンド内において入力端に入力した所定波長域の複数の波長の信号光を光増幅して、その光増幅した信号光を出力端より出力する光増幅器であって、(1) 入力端から出力端へ至る信号光伝搬経路上に設けられ、Ｔｍ元素が光導波領域に添加され信号光を光増幅する光導波路と、(2) 励起光を光導波路に供給するものであって、励起光の波長が互いに異なる複数の励起光供給手段と、(3) 信号光伝搬経路上に光導波路と直列的に設けられ、信号光波長における透過特性が可変である透過特性可変光部品と、(4) 信号光の波数と、入力端に入力する信号光の入力パワーまたは出力端より出力される光の出力パワーを検知する信号光検知部と、(5) 波数毎に入力パワーまたは出力パワーの検知結果に基づいて、励起光供給手段より光導波路に供給される励起光のパワーを調整するとともに、信号光波長における透過特性可変光部品の透過特性をも調整して、光導波路

における信号光増幅の利得の大きさ及び利得スペクトルの形状の双方を制御する制御部とを備えることを特徴とする。
励起光供給手段は、波長１．０５μｍ帯または波長１．４μｍ帯の励起光を光導波路に供給するとともに、波長１．２μｍ帯または波長１．５５～１．６５μｍ帯の励起光を光導波路に供給するのが好適である。
【００１２】
この光増幅器は以下のように作用する。入力端から出力端へ至る信号光伝搬経路上に設けられＴｍ元素が光導波領域に添加された光導波路は、励起光供給手段により励起光が供給される。入力端に入力したＳバンドの信号光は、この光導波路により光増幅され、透過特性可変光部品により損失を受けて、出力端より出力される。また、入力端に入力する信号光のパワーもしくは波数、または、出力端より出力される光のパワーは、信号光検知部により検知される。そして、制御部により、信号光検知部による検知結果に基づいて、励起光供給手段より光導波路に供給される励起光のパワーが調整されるとともに、信号光波長における透過特性可変光部品の透過特性も調整されて、光導波路における信号光増幅の利得の大きさ及び利得スペクトルの形状の双方が制御される。この光増幅器は、実使用状態において想定される条件下においても利得の大きさと利得スペクトル形状とが制御され得る。
【００１３】
また、本発明に係る光増幅器では、信号光検知部は、光導波路における信号光増幅の利得帯域内の２以上の波長で、出力端より出力する信号光のパワー、光導波路における信号光増幅の利得、または、ＡＳＥ光のパワーを検知するのが好適である。この場合には、出力信号光パワー、利得またはＡＳＥ光パワーが信号光検知部により２以上の波長で検知され、これに基づいて利得の大きさ及び利得傾斜の双方が求められる。
【００１４】
また、本発明に係る光増幅器では、信号光検知部は、光導波路の側方に出射される自然放出光のパワーを検出することで、光導波路における信号光増幅の利得を検知するのが好適である。或いは、信号光検知部は、入力信号光の全パワーまたは出力光の全パワーと、光導波路における信号光増幅の利得帯域内の１以上の波長で、出力端より出力する信号光のパワー、光導波路における信号光増幅の利得、またはＡＳＥ光のパワーと、を検知するのが好適であり、また、このとき、光導波路における信号光増幅の利得帯域内の１以上の波長が、信号光の波長帯域中の短波長側か若しくは長波長側にあるのが好適である。或いは、信号光検知部は、(1) 光導波路より出力された光のパワーの一部を分岐して取り出す光分岐カプラと、(2) 光分岐カプラにより取り出された光のうち特定波長の光を選択的に透過させるフィルタと、(3)フィルタを透過した特定波長の光のパワーを検出する受光部とを有するのが好適である。或いは、信号光検知部は、(1) 光導波路より出力された光のパワーの一部を分岐して取り出す光分岐カプラと、(2) 光分岐カプラにより取り出された光を回折する回折格子と、(3) 回折格子により回折された光のうち特定波長の光のパワーを検出する受光部とを有するのが好適である。これら何れの場合にも、利得の大きさ及び利得傾斜の双方が求められる。また、信号光検知部は、回折格子により回折された光のスペクトルに基づいて、入力端に入力する信号光の波数を検知するのが好適であり、この場合には、上位監視システムから独立した制御が可能となる。
【００１５】
また、本発明に係る光増幅器では、信号光検知部は、入力端に入力する信号光の全パワー、および、出力端より出力される光の全パワーを検知するのが好適である。或いは、信号光検知部は、信号光本線以外から受け渡される情報に基づいて、入力端に入力する信号光の波数を検知するのが好適である。これらの場合には、簡易な信号光検知部は簡易な構成となる。
【００１６】
また、本発明に係る光増幅器では、透過特性可変光部品は、信号光波長における透過率が可変であるのが好適である。また、このとき、制御部は、入力端に入力する信号光の波数

に基づいて、励起光供給手段より光導波路に供給される波長１．２μｍ帯または波長１．５５～１．６５μｍ帯の励起光のパワーを調整し、入力端に入力した信号光のパワーまたは出力端より出力されるべき信号光パワーの目標値に基づいて、信号光波長における透過特性可変光部品の透過率を調整して、光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、励起光供給手段より光導波路に供給される波長１．０５μｍ帯または波長１．４μｍ帯の励起光のパワーを調整して、出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御するのが好適である。また、入力端に入力する各波長の信号光のパワーの変動量ΔP_{in}［ｄＢ］、出力端より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーの変動量ΔP_{out}［ｄＢ］、および、入力端に入力する信号光の波数に応じた値を有する係数Ｘに対して、透過特性可変光部品の透過率の変動量ΔＡ［ｄＢ］が「$\Delta A = X \cdot (\Delta P_{in} - \Delta P_{out})$」なる式で表されるのが好適である。この場合には、信号光波長における透過率が可変である透過特性可変光部品が用いられて、この透過特性可変光部品の透過率が調整されるとともに、励起光源から出力される励起光のパワーが調整されて、利得の大きさ及び利得傾斜が制御される。このように制御されることで、励起光パワーの変動幅が小さくなり好ましい。

【００１７】

また、本発明に係る光増幅器では、透過特性可変光部品は、信号光波長域における損失スペクトルの傾斜が可変であるのが好適である。また、このとき、制御部は、入力端に入力する信号光の波数に基づいて、励起光供給手段より光導波路に供給される波長１．２μｍ帯または波長１．５５～１．６５μｍ帯の励起光のパワーを調整し、入力端に入力した信号光のパワーまたは出力端より出力されるべき信号光パワーの目標値に基づいて、信号光波長域における透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜を調整して、光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、励起光供給手段より光導波路に供給される波長１．０５μｍ帯または波長１．４μｍ帯の励起光のパワーを調整して、出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御するのが好適である。また、入力端に入力する各波長の信号光のパワーの変動量ΔP_{in}［ｄＢ］、出力端より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーの変動量ΔP_{out}［ｄＢ］、および、入力端に入力する信号光の波数に応じた値を有する係数Ｙに対して、信号光波長域における透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜の変動量ΔＳ［ｄＢ］が「$\Delta S = Y \cdot (\Delta P_{in} - \Delta P_{out})$」なる式で表されるのが好適である。また、透過特性可変光部品は、信号光波長域における損失スペクトルの形状が波長軸方向にシフト可能であるのが好適である。このとき、制御部は、入力端に入力する信号光の波数に基づいて、信号光波長域における透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜および波長軸方向シフト量を調整し、入力端に入力する各波長の信号光のパワーおよび出力端より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーに基づいて、信号光波長域における透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜を調整して、光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、励起光供給手段より光導波路に供給される波長１．０５μｍ帯または波長１．４μｍ帯の励起光のパワーを調整して、出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御するのが好適である。この場合には、信号光波長における損失傾斜が可変である透過特性可変光部品が用いられて、この透過特性可変光部品の損失傾斜が調整されるとともに、励起光源から出力される励起光のパワーが調整されて、利得の大きさ及び利得傾斜が制御される。このように制御されることで、励起光パワーの変動幅が小さくなり好ましい。

また、本発明に係る光増幅器では、光導波路は、信号光入力側の前段光導波路と信号光出力側の後段光増幅路とを有し、透過特性可変光部品は、前段光導波路と後段光増幅路の間に位置し、制御部は、波数に基づいて、励起光供給手段より前段光導波路に供給される励起光のパワーを調整し、かつ、入力端に入力した信号光のパワーまたは出力端より出力されるべき信号光パワーの目標値に基づいて、信号光波長における透過特性可変光部品の透過率を調整して、光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、かつ、励起光供給手段より後段光導波路に供給される励起光のパワーを調整して、出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御するのが好適である。

また、本発明に係る光増幅器では、光導波路は、信号光入力側の前段光導波路と信号光出力側の後段光増幅路とを有し、透過特性可変光部品は、前段光導波路と後段光増幅路の間に位置し、制御部は、波数に基づいて、信号光波長における透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜および波長軸方向シフト量を調整し、かつ、入力端に入力した信号光のパワーまたは出力端より出力されるべき信号光パワーの目標値に基づいて、信号光波長における透過特性可変光部品の損失スペクトルの傾斜を調整して、光導波路における信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御し、かつ、励起光供給手段より後段光導波路に供給される励起光のパワーを調整して、出力端より出力される各波長の信号光のパワーを制御するのが好適である。

【００１８】

本発明に係る光増幅器は、Ｓバンド内において入力端に入力した所定波長域の複数の波長の信号光を光増幅して、その光増幅した信号光を出力端より出力する光増幅器であって、(1) 入力端から出力端へ至る信号光伝搬経路上に設けられ、Ｔｍ元素が光導波領域に添加され信号光を光増幅する光導波路と、(2) 波長１．２μｍ帯または波長１．５５～１．６５μｍ帯の励起光を光導波路に供給する励起光供給手段と、(3) 光導波路またはその近傍の温度を検出する温度検出部と、(4) 温度検出部による温度検出結果に基づいて、励起光供給手段より光導波路に供給される励起光のパワーを調整して、光導波路における信号光増幅の利得の大きさ及び利得スペクトルの形状の双方を制御する制御部とを備えることを特徴とする。この光増幅器では、入力端から出力端へ至る信号光伝搬経路上に設けられＴｍ元素が光導波領域に添加された光導波路は、励起光供給手段により励起光が供給される。入力端に入力したＳバンドの信号光は、この光導波路により光増幅されて出力端より出力される。また、光導波路またはその近傍の温度が温度検出部により検出される。そして、制御部により、温度検出部による検出結果に基づいて、励起光供給手段より光導波路に供給される励起光のパワーが調整されて、光導波路における信号光増幅の利得の大きさ及び利得スペクトルの形状の双方が制御される。

【００１９】

本発明に係る光増幅器は、Ｓバンド内において入力端に入力した所定波長域の複数の波長の信号光を光増幅して、その光増幅した信号光を出力端より出力する光増幅器であって、(1) 入力端から出力端へ至る信号光伝搬経路上に設けられ、Ｔｍ元素が光導波領域に添加され信号光を光増幅する光導波路と、(2) 励起光を光導波路に供給する励起光供給手段と、(3) 信号光伝搬経路上に設けられ、信号光波長における透過特性が可変である透過特性可変光部品と、(4) 光導波路またはその近傍の温度を検出する温度検出部と、(5) 温度検出部による温度検出結果に基づいて、信号光波長における透過特性可変光部品の透過特性を調整して、光導波路における信号光増幅の利得の大きさ及び利得スペクトルの形状の双方を制御する制御部とを備えることを特徴とする。この透過特性可変光部品は、信号光波長域における損失スペクトルの傾斜が可変であるのが好適であり、また、複数のマッハツェンダ型干渉計が多段構成されたものであるのが好適である。この光増幅器では、入力端から出力端へ至る信号光伝搬経路上に設けられＴｍ元素が光導波領域に添加された光導波路は、励起光供給手段により励起光が供給される。入力端に入力したＳバンドの信号光は、この光導波路により光増幅され、透過特性可変光部品により損失を受けた後に、出力端より出力される。また、光導波路またはその近傍の温度が温度検出部により検出される。そして、制御部により、温度検出部による検出結果に基づいて、信号光波長における透過特性可変光部品の透過特性が調整されて、光導波路における信号光増幅の利得の大きさ及び利得スペクトルの形状の双方が制御される。

【００２０】

上記の本発明に係る光増幅器に含まれる透過特性可変光部品は、損失傾斜が可変であるだけでなく、損失スペクトルの形状が波長方向にシフト可能であるのが好適であり、また、損失スペクトルの傾斜の制御と波長方向のシフトとが互いに独立に制御可能であるのが好適である。また、透過特性可変光部品は、損失スペクトルの波長方向のシフト可能量が１０ｎｍ以上であるのが好適であり、１５ｎｍ以上であれば更に好適である。

【００２１】
本発明に係る光通信システムは、上記の本発明に係る何れかの光増幅器を含み、信号光を伝送するとともに、この信号光を光増幅器により光増幅することを特徴とする。この光通信システムによれば、所定波長帯域（１４５５～１４８５ｎｍ）の信号光は、上記の光増幅器により光増幅される。したがって、所定波長帯域の信号光の伝送品質が優れたものとなる。
【００２２】
【発明の実施の形態】
以下、添付図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。
【００２３】
（比較例）
初めに、本実施形態に係る光増幅器と対比されるべき比較例の光増幅器について説明する。図１は、比較例の光増幅器９００の構成図である。この図に示される光増幅器９００は、入力端９０１から出力端９０２へ向かって順に、光分岐器１１１、光アイソレータ１２１、光結合器１３１、光結合器１３２、光増幅用ファイバ１４１、光アイソレータ１２２、光アイソレータ１２３、光結合器１３３、光結合器１３４、光増幅用ファイバ１４２、光結合器１３５、光アイソレータ１２４および光分岐器１１２を備える。また、この光増幅器９００は、光分岐器１１１に接続された信号光検知部１６１、光分岐器１１２に接続された信号光検知部１６２、光結合器１３１に接続された励起光源１７１、光結合器１３２に接続された励起光源１７２、光結合器１３３に接続された励起光源１７３、光結合器１３４に接続された励起光源１７４、光結合器１３５に接続された励起光源１７５、および、制御部９９０を備える。
【００２４】
光増幅用ファイバ１４１および１４２それぞれは、フッ化物系ガラスまたはテルライト系ガラスをホストガラスとする光導波路であり、少なくともコア領域にＴｍ元素が添加されているＴＤＦである。光増幅用ファイバ１４１，１４２は、励起光が供給されることにより所定波長帯域（１４５５～１４８５ｎｍ）内の波長の信号光を光増幅する。
【００２５】
光結合器１３１～１３５および励起光源１７１～１７５は、光増幅用ファイバ１４１，１４２に励起光を供給する励起光供給手段として作用する。励起光の波長帯は、１．０５μｍ帯、１．２μｍ帯、１．４μｍ帯または１．５５～１．６５μｍ帯である。励起光源１７１～１７５として、半導体レーザ励起Ｎｄ：ＹＬＦレーザ光源、Ｎｄ：ＹＡＧレーザ光源、Ｙｂレーザ光源、半導体レーザ光源、等が好適に用いられる。
【００２６】
光結合器１３１は、励起光源１７１から出力された励起光を光結合器１３２に向けて出力するとともに、光アイソレータ１２１より到達した信号光をも光結合器１３２に向けて出力する。光結合器１３２は、励起光源１７２から出力された励起光を光増幅用ファイバ１４１に向けて出力するとともに、光結合器１３１より到達した光をも光増幅用ファイバ１４１に向けて出力する。
【００２７】
光結合器１３３は、励起光源１７３から出力された励起光を光結合器１３４に向けて出力するとともに、光アイソレータ１２３より到達した信号光をも光結合器１３４に向けて出力する。光結合器１３４は、励起光源１７４から出力された励起光を光増幅用ファイバ１４２に向けて出力するとともに、光結合器１３３より到達した光をも光増幅用ファイバ１４２に向けて出力する。光結合器１３５は、励起光源１７５から出力された励起光を光増幅用ファイバ１４２に向けて出力するとともに、光増幅用ファイバ１４２より到達した光を光アイソレータ１２４に向けて出力する。
【００２８】
光アイソレータ１２１～１２４それぞれは、光を順方向（入力端９０１から出力端９０２

へ向かう方向）にのみ光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。

【００２９】

光分岐器１１１は、入力端９０１と光アイソレータ１２１との間の光路上に設けられており、入力端９０１に入力した光のパワーの一部を分岐して、その分岐した光を信号光検知部１６１へ向けて出力する。信号光検知部１６１は、光分岐器１１１より到達した光を入力して、入力端９０１に入力した信号光のパワーを検知する。また、この信号光検知部１６１は、信号光波数を検知してもよい。

【００３０】

光分岐器１１２は、光アイソレータ１２４と出力端９０２との間の光路上に設けられており、出力端９０２より出力される光のパワーの一部を分岐して、その分岐した光を信号光検知部１６２へ向けて出力する。信号光検知部１６２は、光分岐器１１２より到達した光を入力して、出力端９０２より出力する信号光のパワーを検知する。また、この信号光検知部１６２は、信号光波数を検知してもよい。

【００３１】

制御部９９０は、信号光検知部１６１，１６２による検知結果を受け取り、励起光源１７１～１７５それぞれから出力される励起光のパワーを調整する。

【００３２】

この光増幅器９００では、励起光源１７１，１７２より出力された励起光は、光増幅用ファイバ１４１へ順方向に供給される。励起光源１７３，１７４より出力された励起光は、光増幅用ファイバ１４２へ順方向に供給される。また、励起光源１７５より出力された励起光は、光増幅用ファイバ１４２へ逆方向に供給される。

【００３３】

入力端９０１に入力した信号光は、光分岐器１１１、光アイソレータ１２１、光結合器１３１および光結合器１３２を順に経て、光増幅用ファイバ１４１に入力し、この光増幅用ファイバ１４１において光増幅される。光増幅用ファイバ１４１において光増幅された信号光は、光アイソレータ１２２、光アイソレータ１２３、光結合器１３３および光結合器１３４を順に経て、光増幅用ファイバ１４２に入力し、この光増幅用ファイバ１４２において光増幅される。光増幅用ファイバ１４２において光増幅された信号光は、光結合器１３５、光アイソレータ１２４および光分岐器１１２を順に経て、出力端９０２より出力される。

【００３４】

光分岐器１１１において信号光のパワーの一部が分岐され、その分岐された信号光は信号光検知部１６１に入力して、この信号光検知部１６１により、入力信号光のパワーが検知される。また、光分岐器１１２において信号光のパワーの一部が分岐され、その分岐された信号光は信号光検知部１６２に入力して、この信号光検知部１６２により、出力信号光のパワーが検知される。そして、制御部９９０により、信号光検知部１６１，１６２による検知結果に基づいて、励起光源１７１～１７５それぞれから出力される励起光のパワーが調整され、このようにして、光増幅器９００における信号光増幅の利得または出力信号光パワーが制御される。

【００３５】

次に、比較例の光増幅器９００のより具体的な構成について説明する。この光増幅器９００の入力端９０１に入力する信号光は、波長帯域１４７０．３～１４９３．０ｎｍ内の最大３２波（１００ＧＨｚ間隔）であり、波長毎のパワーが－２９±４ｄＢｍであるとする。また、出力端９０２より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーが＋３．５ｄＢｍであるとする。各波長の入力信号光のパワーの変動（±４ｄＢｍ）は、光増幅器を中継器として用いた場合に前スパンの損失変動に相当する。前段の光増幅用ファイバ１４１は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２０ｍであるとする。後段の光増幅用ファイバ１４２は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２５ｍであるとする。

【００３６】

励起光源１７２より前段の光増幅用ファイバ１４１に順方向に供給される励起光は、波長

が１．４２μｍであって、パワーが１４０ｍＷで一定であるとする。励起光源１７４より後段の光増幅用ファイバ１４２に順方向に供給される励起光は、波長が１．４２μｍであって、最大パワーが８０ｍＷであるとする。励起光源１７５より後段の光増幅用ファイバ１４２に逆方向に供給される励起光は、波長が１．４２μｍであって、最大パワーが１５０ｍＷであるとする。これら各々は、現在市販されている半導体レーザ光源１個で実現可能である。

【００３７】

励起光源１７１より前段の光増幅用ファイバ１４１に順方向に供給される励起光は、波長が１．５６μｍであって、パワーが＋１１ｄＢｍで一定であるとする。励起光源１７３より前段の光増幅用ファイバ１４２に順方向に供給される励起光は、波長が１．５６μｍであって、パワーが＋１１ｄＢｍで一定であるとする。現在市販されている波長１．５６μｍの光を出力する半導体レーザ光源として、最大出力パワーが＋１３ｄＢｍであるものがある。２つの光結合器の挿入損失の和（１ｄＢを幾らか超える程度）を考慮すれば、光増幅用ファイバ１４１，１４２への入力点における励起光パワーが＋１１ｄＢｍであるというのは妥当な範囲内である。

【００３８】

図２は、比較例の光増幅器９００の入力信号光３２波時の利得スペクトルを示す図である。図３は、比較例の光増幅器９００の入力信号光３２波時の出力信号光スペクトルを示す図である。これらの図には、入力信号光の波数が３２で、トータル入力信号光パワーが－１８ｄＢｍ，－１６ｄＢｍ，－１４ｄＢｍ，－１２ｄＢｍおよび－１０ｄＢｍの各値である場合について、利得スペクトルまたは出力信号光スペクトルが示されている。図３では、トータル入力信号光パワーが－１４ｄＢｍであるときを基準として、この基準との偏差が示されている。図２から判るように、入力信号光パワーが大きいほど、利得スペクトルは長波長側にシフトする。また、図３から判るように、出力信号光スペクトルは、信号光波長域で略直線的な形状を維持したまま、入力信号光パワーが大きいほど傾斜が負から正へ大きくなっていく。特に信号光波長域の両端付近では、出力信号光パワーは±１ｄＢ以上も変動する。

【００３９】

ここでは、ＡＳＥ（Amplified Spontaneous Emission）光をも含むトータル出力光パワーがトータル入力信号光パワーの関数（図４）となるように、励起光源１７４，１７５より光増幅用ファイバ１４２に供給される励起光のパワーを調整して、トータル出力信号光パワーが＋１８．５ｄＢｍとなるよう制御した。なお、トータル出力信号光パワーの目標値からのトータル出力光パワーの乖離分は、

【数１】

$$P_{ASE}=\int G(P_{in},\lambda)\cdot NF(P_{in},\lambda)\cdot d\lambda \qquad \cdots(1)$$

なる式で表されるＡＳＥ光パワーP_{ASE}である。ここで、P_{in}は入力信号光パワーであり、λは波長であり、Ｇは利得であり、ＮＦは雑音指数である。

【００４０】

特に、雑音指数ＮＦの入力信号光パワーP_{in}依存性が無視し得るほど小さいときには、ＡＳＥ光パワーP_{ASE}は利得Ｇの１次関数として簡易に表される。雑音指数ＮＦの入力信号光パワーP_{in}依存性を小さくするには、前段の光増幅用ファイバ１４１へ供給される励起光のパワーを大きくして光増幅用ファイバ１４１を利得飽和の状態としておけばよい。

【００４１】

以上のような制御方式では、入力信号光および出力光それぞれのトータルパワーを信号光検知部１６１，１６２により検知すればよいので、制御が容易である。しかし、実際の光通信システムでは、中継区間の損失の変動だけでなく、送受信すべき情報の容量などに応じて信号光波数の変動もあり得る。そこで、以下では、信号光波数の変動の影響について説明する。

【００４２】
図５は、比較例の光増幅器９００の入力信号光８波時の利得スペクトルを示す図である。図６は、比較例の光増幅器９００の入力信号光８波時の出力信号光スペクトルを示す図である。これらの図には、入力信号光の波数が８で、トータル入力信号光パワーが－２４ｄＢｍ，－２２ｄＢｍ，－２０ｄＢｍ，－１８ｄＢｍおよび－１６ｄＢｍの各値である場合について、利得スペクトルまたは出力信号光スペクトルが示されている。図６では、トータル入力信号光パワーが－１４ｄＢｍであるときを基準として、この基準との偏差が示されている。図５から判るように、入力信号光パワーが大きいほど、利得スペクトルは長波長側にシフトする。また、図６から判るように、出力信号光スペクトルは、信号光波長域で略直線的な形状を維持したまま、入力信号光パワーが大きいほど傾斜が負から正へ大きくなっていく。特に波長１４９３ｎｍ付近では、出力信号光パワーは±１ｄＢ以上も変動する。

【００４３】
入力信号光の波数が３２であるときの利得スペクトル（図２）と、入力信号光の波数が８であるときの利得スペクトル（図５）とを比較すると、波長毎の入力信号光パワーが同じであっても、利得スペクトルは異なっている。このような現象は、ＥＤＦＡでは見られず、Ｔｍイオンの４準位系の遷移を利用するＴＤＦＡに特有のものである。

【００４４】
図３に見られるような出力信号光スペクトルの変動を抑制するための１手段として、信号光波長域の両端付近の出力信号光パワーの偏差が零となるように（すなわち、利得傾斜が零となるように）、励起光源１７１，１７３から光増幅用ファイバ１４１，１４２に供給される波長１．５６μｍの励起光のパワーを制御することが考えられる。図７は、波長１．５６μｍ励起光パワーを制御したときの比較例の光増幅器９００の入力信号光３２波時の利得スペクトルを示す図である。図８は、波長１．５６μｍ励起光パワーを制御したときの比較例の光増幅器９００の入力信号光３２波時の出力信号光スペクトルを示す図である。図９は、比較例の光増幅器９００における波長１．５６μｍ励起光パワーとトータル入力信号光パワーとの関係を示す図である。

【００４５】
図９に示されるように、トータル入力信号光パワーが大きいほど、励起光源１７１，１７３から光増幅用ファイバ１４１，１４２に供給される波長１．５６μｍの励起光のパワーは小さくされる。このときの利得スペクトルは、図７に示されるように、入力信号光パワーに依存した波長シフトが抑制される。また、このときの出力信号光スペクトルは、図８に示されるように、傾斜の変動が抑制されるものの、波長１４９３ｎｍ付近では出力信号光パワーの変動が±０．４ｄＢ程度となっている。

【００４６】
陸上で用いられる中継器としての光増幅器では、利得偏差は$1dB_{p-p}$以下であることが望ましい。しかし、上記の例では、入力信号光パワーが変動しただけで、この利得偏差の許容値にほぼ達する。このことから、例えば、光増幅器９００の利得を等化する利得等化フィルタを挿入した場合に、その利得等化フィルタの製造バラツキ等により、必要なマージンが無くなるという問題がある。また、各波長の入力信号光パワーの変動幅を上記の例の$8dB_{p-p}$より大きく設定しなければならない場合もあり、この場合には、出力信号光パワーの変動が±０．４ｄＢ程度を超えることになる。このように、比較例の光増幅器９００は、実使用状態において想定される条件下において使用するには不充分なものである。

【００４７】
（第１実施形態）
次に、本発明に係る光増幅器の第１実施形態について説明する。図１０は、第１実施形態に係る光増幅器１００の構成図である。この図に示される光増幅器１００は、入力端１０１から出力端１０２へ向かって順に、光分岐器１１１、光アイソレータ１２１、光結合器１３１、光結合器１３２、光増幅用ファイバ１４１、光アイソレータ１２２、透過特性可

変光部品１５０、光アイソレータ１２３、光結合器１３３、光結合器１３４、光増幅用ファイバ１４２、光結合器１３５、光アイソレータ１２４および光分岐器１１２を備える。また、この光増幅器１００は、光分岐器１１１に接続された信号光検知部１６１、光分岐器１１２に接続された信号光検知部１６２、光結合器１３１に接続された励起光源１７１、光結合器１３２に接続された励起光源１７２、光結合器１３３に接続された励起光源１７３、光結合器１３４に接続された励起光源１７４、光結合器１３５に接続された励起光源１７５、および、制御部１９０を備える。

【００４８】

比較例の光増幅器９００（図１）と比較すると、この第１実施形態の光増幅器１００は、光アイソレータ１２２と光アイソレータ１２３との間に透過特性可変光部品１５０が設けられている点、および、制御部９９０に替えて制御部１９０が設けられている点、で相違する。透過特性可変光部品１５０は、信号光波長における透過率が可変のものであり、その透過率が制御部１９０により制御される。制御部１９０は、信号光検知部１６１，１６２による検知結果（入力信号光パワー、信号光波数、出力信号光パワー）を受け取り、或いは、信号光本線以外の例えば監視システムより信号光波数情報を受け取り、これらの何れかに基づいて、励起光源１７１～１７５それぞれから出力される励起光のパワーを制御し、また、透過特性可変光部品１５０の透過率を制御する。

【００４９】

信号光検知部１６１，１６２は、光増幅用ファイバ１４１，１４２の信号光増幅の利得帯域における２以上の波長で、出力信号光パワー、光増幅の利得およびＡＳＥ光のパワーの何れかを検知するものである。また、信号光検知部１６１は入力信号光の全パワーを検知してもよいし、信号光検知部１６２は出力光の全パワーを検知してもよい。或いは、光増幅用ファイバ１４１，１４２の側方に出射される自然放出光のパワーを検出することで、光増幅用ファイバ１４１，１４２における光増幅の利得を検知するようにしてもよい。また、監視システムから受け渡される情報に基づいて、信号光波数を検知してもよい。

【００５０】

図１１は、第１実施形態に係る光増幅器１００の信号光検知部１６２の構成例を示す図である。この図に示される信号光検知部１６２は、光分岐器163_1，163_2、光フィルタ164_1，164_2、および、受光素子165_1～165_3を有している。光分岐器163_1は、光分岐器１１２より到達した光を２分岐して、分岐した一方の光を光分岐器163_2へ向けて出力し、他方の光を受光素子165_3へ向けて出力する。光分岐器163_2は、光分岐器163_1より到達した光を２分岐して、分岐した一方の光を光フィルタ164_1へ向けて出力し、他方の光を光フィルタ164_2へ向けて出力する。

【００５１】

光フィルタ164_1は、光分岐器163_2より到達した光を入力して、光増幅用ファイバ１４２において光増幅された信号光の波長帯域のうち短波長側にある特定波長の光を選択的に透過させる。光フィルタ164_2は、光分岐器163_2より到達した光を入力して、信号光波長帯域のうち長波長側にある特定波長の光を選択的に透過させる。

【００５２】

受光素子165_1は、光フィルタ164_1を透過した光を受光し、その受光した光のパワーに応じた電気信号を制御部１９０へ向けて出力する。受光素子165_2は、光フィルタ164_2を透過した光を受光し、その受光した光のパワーに応じた電気信号を制御部１９０へ向けて出力する。また、受光素子165_3は、光分岐器163_1より到達した光を受光し、その受光した光のパワーに応じた電気信号を制御部１９０へ向けて出力する。

【００５３】

したがって、図１１に示される信号光検知部１６２は、受光素子165_1および165_2により、光分岐器１１２より到達した光のパワーを２波長でモニタすることができ、利得傾斜をモニタすることができる。また、この信号光検知部１６２は、受光素子165_3により、光分岐器１１２より到達した光の全パワーをモニタすることができる。この信号光検知部１６２は簡易な構成で安価である点で好適である。なお、図１１において、光フィル

タ１６４$_2$および受光素子１６５$_2$を設けることなく、光フィルタ１６４$_1$として透過波長域が可変のものを用いてもよい。

【００５４】

図１２は、第１実施形態に係る光増幅器１００の信号光検知部１６２の他の構成例を示す図である。この図に示される信号光検知部１６２は、アレイ導波路型回折格子（ＡＷＧ：Arrayed Waveguide Grating）１６６および受光素子１６７$_1$～１６７$_N$を有している。ただし、Ｎは２以上の整数である。

【００５５】

ＡＷＧ１６６は、平面基板上に複数本の光導波路がアレイ状に形成されてなる回折格子であって、入力した光を合波または分波して出力することができる。ここでは、ＡＷＧ１６６は光分波器として用いられる。すなわち、ＡＷＧ１６６は、光分岐器１１２より到達した光を分波して、その分波した各波長の光を受光素子１６７$_1$～１６７$_N$へ向けて出力する。受光素子１６７$_1$～１６７$_N$それぞれは、ＡＷＧ１６６により出力されて到達した各波長の光を受光し、その受光した光のパワーに応じた電気信号を制御部１９０へ向けて出力する。

【００５６】

したがって、図１２に示される信号光検知部１６２は、受光素子１６７$_1$～１６７$_N$により、光分岐器１１２より到達した光のパワーをＮ波長でモニタすることができ、利得傾斜をモニタすることができる。また、この信号光検知部１６２は、受光素子１６７$_1$～１６７$_N$それぞれによるモニタ結果に基づいて、光分岐器１１２より到達した光の全パワーをモニタすることができる。この信号光検知部１６２は、多くの波長で高精度にモニタすることができ、また、信号光波数を検知することできるので、これらの点で好適である。

【００５７】

次に、第１実施形態に係る光増幅器１００のより具体的な構成について説明する。この光増幅器１００の入力端１０１に入力する信号光は、波長帯域１４７０．３～１４９３．０ｎｍ内の最大３２波（１００ＧＨｚ間隔）であり、波長毎のパワーが－２９±４ｄＢｍであるとする。また、出力端１０２より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーが＋３．５ｄＢｍであるとする。前段の光増幅用ファイバ１４１は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２０ｍであるとする。後段の光増幅用ファイバ１４２は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２５ｍであるとする。

【００５８】

励起光源１７２より前段の光増幅用ファイバ１４１に順方向に供給される励起光は、波長が１．４２μｍであって、パワーが１４０ｍＷで一定であるとする。励起光源１７４より後段の光増幅用ファイバ１４２に順方向に供給される励起光は、波長が１．４２μｍであって、最大パワーが８０ｍＷであるとする。励起光源１７５より後段の光増幅用ファイバ１４２に逆方向に供給される励起光は、波長が１．４２μｍであって、最大パワーが１５０ｍＷであるとする。励起光源１７４，１７５から出力される励起光のパワーは、上述した比較例の場合と同様にして制御される。

【００５９】

励起光源１７１より前段の光増幅用ファイバ１４１に順方向に供給される励起光は、波長が１．５６μｍであって、パワーが＋１１ｄＢｍで一定であるとする。励起光源１７３より前段の光増幅用ファイバ１４２に順方向に供給される励起光は、波長が１．５６μｍであって、パワーが＋１１ｄＢｍで一定であるとする。

【００６０】

また、透過特性可変光部品１５０における損失の変動量ΔＡ［ｄＢ］は、

【数２】

$$\Delta A = X \cdot \Delta P_{in} \qquad \cdots (2)$$

なる式に基づいて制御される。ここで、ΔＰ$_{in}$［ｄＢ］は入力信号光パワーの変動量であ

り、Ｘは信号光波数に応じた値を有する係数である。なお、中継スパンに敷設される光ファイバの品種等に応じて出力信号光の目標パワーの変動量を変更する必要があるような場合には、透過特性可変光部品１５０における損失の変動量ΔＡ［ｄＢ］は、

【数３】

$$\Delta A = X \cdot (\Delta P_{in} - \Delta P_{out}) \qquad \cdots (3)$$

なる式に基づいて制御される。ここで、ΔP_{out}［ｄＢ］は出力信号光の目標パワーの変動量である。

【００６１】

図１３は、第１実施形態に係る光増幅器１００の入力信号光３２波時の利得スペクトルを示す図である。図１４は、第１実施形態に係る光増幅器１００の入力信号光３２波時の出力信号光スペクトルを示す図である。これらの図には、Ｘの値が１で、信号光波数が３２で、トータル入力信号光パワーが－１８ｄＢｍ，－１６ｄＢｍ，－１４ｄＢｍ，－１２ｄＢｍおよび－１０ｄＢｍの各値である場合について、利得スペクトルまたは出力信号光スペクトルが示されている。図１４から判るように、上記(2)式に基づく制御により、信号光波長域における出力信号光パワーの変動は－０．３ｄＢ～＋０．１ｄＢの範囲内に抑制されている。

【００６２】

図１５は、第１実施形態に係る光増幅器１００の入力信号光８波時の利得スペクトルを示す図である。図１６は、第１実施形態に係る光増幅器１００の入力信号光８波時の出力信号光スペクトルを示す図である。これらの図には、Ｘの値が０．９で、信号光波数が８で、トータル入力信号光パワーが－２４ｄＢｍ，－２２ｄＢｍ，－２０ｄＢｍ，－１８ｄＢｍおよび－１６ｄＢｍの各値である場合について、利得スペクトルまたは出力信号光スペクトルが示されている。ここでは、励起光源１７１から光増幅用ファイバ１４１へ供給される波長１．５６μｍの励起光のパワー、および、励起光源１７３から光増幅用ファイバ１４２へ供給される波長１．５６μｍの励起光のパワーそれぞれは、信号光波数の減少に伴う利得スペクトルの短波長側へのシフトを補償するために、＋１２ｄＢｍに設定される。また、信号光波数の減少に伴い利得スペクトルの傾斜が小さくなることから、Ｘの値は０．９とされる。この場合には、信号光波長域における出力信号光パワーの変動は±０．２ｄＢ以内の範囲内に抑制されている。

【００６３】

ただし、信号光波数が３２の場合（図１３、図１４）および信号光波数が８の場合（図１５、図１６）の双方で、波長毎の入力信号光パワーが－３３ｄＢｍであるときには、やはり利得傾斜が生じる。これは、ＥＤＦＡの場合には原理的に上記(3)式が成り立つ（このとき、Ｘは波数に拘わらず常に値が１）のに対して、ＴＤＦＡの場合には、厳密には、（$\Delta P_{in} - \Delta P_{out}$）に対してΔＡが非線形な関数であることに起因する。そこで、波長毎の入力信号光パワーの変動が上記の例の$8\mathrm{dB}_{p\text{-}p}$を超えることが想定される場合には、一次関数である上記(3)式に替えて二次関数（または更に高次の関数）を用いることにより、より良好な出力信号光スペクトルを維持することができる。

【００６４】

なお、励起光源１７１，１７３から出力される波長１．５６μｍの励起光のパワーを一定とし、或いは、励起光源１７１，１７３から波長１．５６μｍの励起光を出力しないで、励起光源１７２，１７４，１７５それぞれから出力される波長１．４２μｍの励起光のパワーおよび透過特性可変光部品１５０の透過率を制御することも考えられる。しかし、この場合には、図１７に示されるように、信号光波数が変動したときに利得傾斜が発生する。図１７は、トータル入力信号光パワーの各値について出力信号光スペクトルを示す図である。ただし、P_{in}＝－１４ｄＢｍであってP_{out}＝＋１８．５ｄＢｍである場合を基準としている。この図１７に示されるような利得傾斜を透過特性可変光部品１５０の透過率の調整により補償しようとするならば、信号光波数が３２から８へ（またはその逆に）変動したときに、透過特性可変光部品１５０の透過率の変動量は５ｄＢも必要となる。また

、波長毎の入力信号光パワーの変動量が８ｄＢ$_{p-p}$であると、透過特性可変光部品１５０の透過率の変動量は１０ｄＢ以上も必要となる。このことは、雑音特性や励起効率に関して大きなデメリットをもたらすので、好ましくない。

【００６５】

また、信号光波数が変動した場合および波長毎の入力信号光パワーが変動した場合の何れでも、励起光源１７１，１７３から出力される波長１．５６μｍの励起光のパワーを制御するのは好ましくない。何故なら、既に図７～図９で説明したとおり、信号光波数が３２であるときでも、波長毎の入力信号光パワーが小さいときには、波長１．５６μｍの励起光のパワーは＋１１．６ｄＢｍも必要となる。信号光波数が減少したときには、波長１．５６μｍの励起光のパワーは＋１２ｄＢｍ以上も必要となる。ところが、波長１．５６μｍの光を出力する市販の半導体レーザ光源では、最大出力パワーが＋１３ｄＢｍ程度であるので、光増幅用ファイバ１４１，１４２へ入力する時点での波長１．５６μｍの励起光のパワーを＋１２ｄＢｍ以上とするのは困難である。このことから、励起光源１７１，１７３から出力される波長１．５６μｍの励起光のパワーを制御するのは好ましくない。

【００６６】

そこで、上述したように、利得を一定に維持すればよい信号光波数の変動時には、その信号光波数に基づいて、各励起光源より光増幅用ファイバ１４１，１４２に供給される励起光のパワーを調整し、また、波長毎の入力信号光パワーまたは出力信号光パワー目標値の変動時には、それらに基づいて、透過特性可変光部品１５０の透過率を調整して、信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御するのが好ましい。また、波長１．４２μｍ帯の励起光のパワーを調整して、各波長の出力信号光パワーを制御するのが好ましい。このようにすることにより、透過特性可変光部品１５０の透過率の変動量が小さくなって、雑音特性や励起効率が優れ、また、光源１７１，１７３が出力する波長１．５６μｍの励起光のパワーの要求値が軽減される。

【００６７】

以上では、励起光源１７１，１７３は、波長１．５６μｍの励起光を出力するものとしたが、波長帯１．５５～１．６５μｍに含まれる波長の励起光を出力するものであってもよく、後者の場合にも同程度の励起効率が得られる。また、励起光源１７１，１７３は、波長１．２μｍ帯の励起光を出力するものであってもよい。

【００６８】

（第２実施形態）

次に、本発明に係る光増幅器の第２実施形態について説明する。図１８は、第２実施形態に係る光増幅器２００の構成図である。この図に示される光増幅器２００は、入力端２０１から出力端２０２へ向かって順に、光分岐器１１１、光アイソレータ１２１、光結合器１３１、光結合器１３２、光増幅用ファイバ１４１、光アイソレータ１２２、透過特性可変光部品２５０、光アイソレータ１２３、光結合器１３３、光結合器１３４、光増幅用ファイバ１４２、光結合器１３５、光アイソレータ１２４および光分岐器１１２を備える。また、この光増幅器２００は、光分岐器１１１に接続された信号光検知部１６１、光分岐器１１２に接続された信号光検知部１６２、光結合器１３１に接続された励起光源１７１、光結合器１３２に接続された励起光源１７２、光結合器１３３に接続された励起光源１７３、光結合器１３４に接続された励起光源１７４、光結合器１３５に接続された励起光源１７５、および、制御部２９０を備える。

【００６９】

第１実施形態に係る光増幅器１００（図１０）と比較すると、この第２実施形態の光増幅器２００は、光アイソレータ１２２と光アイソレータ１２３との間に透過特性可変光部品１５０に替えて透過特性可変光部品２５０が設けられている点、および、制御部１９０に替えて制御部２９０が設けられている点、で相違する。透過特性可変光部品２５０は、信号光波長における損失スペクトルの傾斜が可変のものであり、その損失傾斜が制御部２９０により制御される。制御部２９０は、信号光検知部１６１，１６２による検知結果（入力信号光パワー、信号光波数、出力信号光パワー）を受け取り、或いは、監視システムよ

り信号光波数情報を受け取り、これらの何れかに基づいて、励起光源１７１～１７５それぞれから出力される励起光のパワーを制御し、また、透過特性可変光部品２５０の損失傾斜を制御する。

【００７０】

図１９は、第２実施形態に係る光増幅器２００の透過特性可変光部品２５０の構成例を示す図である。この図に示される透過特性可変光部品２５０は、平面基板２５１上に３本の光導波路２５２ａ～２５２ｃが形成されたものである。第１光導波路２５２ａは、基板２５１の端面に位置する入力端２５０ａから出力端２５０ｂに至るまで形成されている。第２光導波路２５２ｂは光結合器２５３ａ，２５３ｂにおいて第１光導波路２５２ａと光結合されており、これらは第１のマッハツェンダ型干渉計を構成している。第３光導波路２５２ｃは光結合器２５３ｃ，２５３ｄにおいて第１光導波路２５２ａと光結合されており、これらは第２のマッハツェンダ型干渉計を構成している。また、光結合器２５３ａと光結合器２５３ｂとの間において、第１光導波路２５２ａ上にヒータ２５４ａが設けられ、第２光導波路２５２ｂ上にヒータ２５４ｂが設けられている。光結合器２５３ｃと光結合器２５３ｄとの間において、第１光導波路２５２ａ上にヒータ２５４ｃが設けられ、第３光導波路２５２ｃ上にヒータ２５４ｄが設けられている。

【００７１】

このように構成される透過特性可変光部品２５０では、光結合器２５３ａと光結合器２５３ｂとの間における第１光導波路２５２ａおよび第２光導波路２５２ｂそれぞれの光路長の差は、ヒータ２５４ａによる第１光導波路２５２ａの温度調整、および、ヒータ２５４ｂによる第２光導波路２５２ｂの温度調整に依存する。また、光結合器２５３ｃと光結合器２５３ｄとの間における第１光導波路２５２ａおよび第３光導波路２５２ｃそれぞれの光路長の差は、ヒータ２５４ｃによる第１光導波路２５２ａの温度調整、および、ヒータ２５４ｄによる第３光導波路２５２ｃの温度調整に依存する。そして、入力端２５０ａから出力端２５０ｂへ至る光の透過特性は、これらの光路長差および光結合器２５３ａ～２５３ｄそれぞれの光結合率に依存する。

【００７２】

図２０は、第２実施形態に係る光増幅器２００の透過特性可変光部品２５０の損失スペクトルの１例を示す図である。この図に示されるように、透過特性可変光部品２５０の損失スペクトルは、ヒータ２５４ａ，２５４ｂによる第１光導波路２５２ａの温度調整により調整可能であり、特に、特定波長における損失を略一定に維持したまま損失傾斜を変化させることができ、しかも、その損失［単位ｄＢ］は波長に対して略線形的である。したがって、この透過特性可変光部品２５０は、単なる出力一定制御時に信号光波長域で略直線的な形状を有する出力信号光スペクトル（図３，図６）の傾斜を補償するのに好適に用いられる。

【００７３】

次に、第２実施形態に係る光増幅器２００のより具体的な構成について説明する。この光増幅器２００の入力端２０１に入力する信号光は、波長帯域１４７０．３～１４９３．０ｎｍ内の最大３２波（１００ＧＨｚ間隔）であり、波長毎のパワーが－２９±４ｄＢｍであるとする。また、出力端２０２より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーが＋３．５ｄＢｍであるとする。前段の光増幅用ファイバ１４１は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２０ｍであるとする。後段の光増幅用ファイバ１４２は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２５ｍであるとする。

【００７４】

励起光源１７２より前段の光増幅用ファイバ１４１に順方向に供給される励起光は、波長が１．４２μｍであって、パワーが１４０ｍＷで一定であるとする。励起光源１７４より後段の光増幅用ファイバ１４２に順方向に供給される励起光は、波長が１．４２μｍであって、最大パワーが８０ｍＷであるとする。励起光源１７５より後段の光増幅用ファイバ１４２に逆方向に供給される励起光は、波長が１．４２μｍであって、最大パワーが１５０ｍＷであるとする。励起光源１７４，１７５から出力される励起光のパワーは、上述し

た比較例の場合と同様にして制御される。

【００７５】

励起光源１７１より前段の光増幅用ファイバ１４１に順方向に供給される励起光は、波長が１．５６μｍであって、パワーが＋１１ｄＢｍで一定であるとする。励起光源１７３より前段の光増幅用ファイバ１４２に順方向に供給される励起光は、波長が１．５６μｍであって、パワーが＋１１ｄＢｍで一定であるとする。

【００７６】

また、透過特性可変光部品２５０における損失傾斜の変動量ΔＳ［ｄＢ］は、

【数４】

$$\Delta S = Y \cdot (\Delta P_{in} - \Delta P_{out}) \qquad \cdots (4)$$

なる式に基づいて制御される。ここで、ΔP_{in}［ｄＢ］は入力信号光パワーの変動量であり、ΔP_{out}［ｄＢ］は出力信号光の目標パワーの変動量であり、Ｙは、信号光波数に応じた値を有する係数である。信号光波数が少ないほど、係数Ｙの値は小さい。これは、信号光波数が少ないほど、光増幅用ファイバ１７４，１７５中のＴｍイオンの飽和の度合いに対する入力信号光の影響が小さくなるからである。

【００７７】

図２１は、第２実施形態に係る光増幅器２００の入力信号光３２波時の利得スペクトルを示す図である。図２２は、第２実施形態に係る光増幅器２００の入力信号光３２波時の出力信号光スペクトルを示す図である。図２３は、第２実施形態に係る光増幅器２００の透過特性可変光部品２５０の入力信号光３２波時の損失スペクトルを示す図である。これらの図には、Ｙの値が０．７で、信号光波数が３２で、トータル入力信号光パワーが－１８ｄＢｍ，－１６ｄＢｍ，－１４ｄＢｍ，－１２ｄＢｍおよび－１０ｄＢｍの各値である場合について、利得スペクトル、出力信号光スペクトルまたは損失スペクトルが示されている。図２２から判るように、上記(4)式に基づく制御により、信号光波長域における出力信号光パワーの変動は±０．３ｄＢの範囲内に抑制されている。

【００７８】

信号光の波数および波長毎の信号光入出力パワーの双方が変動する場合、第１実施形態で説明したとおり、利得を一定に維持すればよい信号光波数変動時には、その信号光波数に基づいて、励起光源１７１，１７３から出力される励起光のパワーを調整し、波長毎の入力信号光パワーまたは出力信号光パワー目標値の変動時には、それらに基づいて、透過特性可変光部品２５０の入力信号を調整して、信号光増幅の利得スペクトルの形状を制御することが望ましい。本制御方式により、光源１７１，１７３が出力する波長１．５６μｍ帯の励起光のパワーの要求値が軽減され、また、透過特性可変光部品２５０において実現しなければならない損失スペクトル傾斜の最大値が軽減される。

【００７９】

なお、この光増幅器２００において透過特性が可変の透過特性可変光部品が無く、励起光源１７１，１７３から出力される励起光のパワーが一定に維持されるとした場合、信号光波数が３２から８に変動したときに、図１７に示されたように利得傾斜が発生する。一方、図１９に示された構成の透過特性可変光部品２５０は、損失傾斜が可変であるだけでなく、損失スペクトルの形状が波長軸方向にシフト可能である。すなわち、透過特性可変光部品２５０は、その損失傾斜を変化させたときに損失が略一定に維持される特定波長（クロスポイント）も可変である。したがって、信号光波数が変動したときに、図１７に示されるように波長１４７６ｎｍをクロスポイントとして利得傾斜が生じるような場合には、透過特性可変光部品２５０の損失傾斜およびクロスポイントの双方を変更することで、信号光波長域における出力信号光パワーの変動が小さく抑制され得る。

【００８０】

また、このような損失スペクトルの傾斜が可変である透過特性可変光部品２５０は、第１実施形態における透過率が可変である透過特性可変光部品１５０と比較して、信号光波長域における平均の損失が小さい点でも好ましく、また、波長毎の入力信号光パワーが大き

いときの雑音指数が改善される点でも好ましい。図２４は、第１実施形態に係る光増幅器１００の雑音指数特性を示す図である。図２５は、第２実施形態に係る光増幅器２００の雑音指数特性を示す図である。これらの図は、信号光波数が３２であるときの雑音指数の波長依存性が示されている。これらの図を対比してわかるように、波長毎の入力信号光パワーがー２５ｄＢｍと大きいときに、損失スペクトルの傾斜が可変である透過特性可変光部品２５０を有する第２実施形態に係る光増幅器２００の方が雑音指数は良好となっている。波長毎の入力信号光パワーの変動幅が更に大きいときには、雑音指数の観点において、光増幅器２００の方が更に優位となる。

【００８１】

（第３実施形態）

次に、本発明に係る光増幅器の第３実施形態について説明する。図２６は、第３実施形態に係る光増幅器３００の構成図である。この図に示される光増幅器３００は、入力端３０１から出力端３０２へ向かって順に、光分岐器３１１、光アイソレータ３２１、光結合器３３１、光増幅用ファイバ３４１、光結合器３３２、光アイソレータ３２２、透過特性可変光部品３５０、光結合器３３４、光増幅用ファイバ３４２、光結合器３３５、光アイソレータ３２３および光分岐器３１２を備える。また、この光増幅器３００は、光分岐器３１１に接続された信号光検知部３６１、光分岐器３１２に接続された信号光検知部３６２、光結合器３３１に接続された励起光源３７１、光結合器３３２に接続された励起光源３７２、光結合器３３４に接続された励起光源３７４、光結合器３３５に接続された励起光源３７５、および、制御部３９０を備える。

【００８２】

光増幅用ファイバ３４１および３４２それぞれは、フッ化物系ガラスまたはテルライト系ガラスをホストガラスとする光導波路であり、少なくともコア領域にＴｍ元素が添加されているＴＤＦである。光増幅用ファイバ３４１，３４２は、励起光が供給されることにより所定波長帯域（１４５５～１４８５ｎｍ）内の波長の信号光を光増幅する。

【００８３】

光結合器３３１～３３５および励起光源３７１～３７５は、光増幅用ファイバ３４１，３４２に励起光を供給する励起光供給手段として作用する。励起光の波長帯は、１．０５μｍ帯、１．２μｍ帯、１．４μｍ帯または１．５５～１．６５μｍ帯である。励起光源３７１～３７５として、半導体レーザ励起Ｎｄ：ＹＬＦレーザ光源、Ｎｄ：ＹＡＧレーザ光源、Ｙｂレーザ光源、半導体レーザ光源、等が好適に用いられる。

【００８４】

光結合器３３１は、励起光源３７１から出力された励起光を光増幅用ファイバ３４１に向けて出力するとともに、光アイソレータ３２１より到達した信号光をも光増幅用ファイバ３４１に向けて出力する。光結合器３３２は、励起光源３７２から出力された励起光を光増幅用ファイバ３４１に向けて出力するとともに、光増幅用ファイバ３４１より到達した光を光アイソレータ３２２に向けて出力する。

【００８５】

光結合器３３４は、励起光源３７４から出力された励起光を光増幅用ファイバ３４２に向けて出力するとともに、透過特性可変光部品３５０より到達した光をも光増幅用ファイバ３４２に向けて出力する。光結合器３３５は、励起光源３７５から出力された励起光を光増幅用ファイバ３４２に向けて出力するとともに、光増幅用ファイバ３４２より到達した光を光アイソレータ３２４に向けて出力する。

【００８６】

光アイソレータ３２１～３２３それぞれは、光を順方向（入力端３０１から出力端３０２へ向かう方向）にのみ光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。

【００８７】

光分岐器３１１は、入力端３０１と光アイソレータ３２１との間の光路上に設けられており、入力端３０１に入力した光のパワーの一部を分岐して、その分岐した光を信号光検知部３６１へ向けて出力する。信号光検知部３６１は、光分岐器３１１より到達した光を入

力して、入力端３０１に入力した信号光のパワーを検知する。光分岐器３１２は、光アイソレータ３２３と出力端３０２との間の光路上に設けられており、出力端３０２より出力される光のパワーの一部を分岐して、その分岐した光を信号光検知部３６２へ向けて出力する。信号光検知部３６２は、光分岐器３１２より到達した光を入力して、出力端３０２より出力する信号光のパワーを検知する。また、信号光検知部３６１，３６２は、信号光波数を検知してもよい。信号光検知部３６２は、第１実施形態で説明したものと同様の構成である。

【００８８】

信号光検知部３６１，３６２は、光増幅用ファイバ３４１，３４２の信号光増幅の利得帯域における２以上の波長で、出力信号光パワー、光増幅の利得およびＡＳＥ光のパワーの何れかを検知するものである。また、信号光検知部１６１は入力信号光の全パワーを検知してもよいし、信号光検知部１６２は出力光の全パワーを検知してもよい。或いは、光増幅用ファイバ１４１，１４２の側方に出射される自然放出光のパワーを検出することで、光増幅用ファイバ１４１，１４２における光増幅の利得を検知するようにしてもよい。また、信号光本線以外の例えば監視システムから受け渡される情報に基づいて、信号光波数を検知してもよい。

【００８９】

透過特性可変光部品３５０は、信号光波長における損失スペクトルの傾斜が可変のものであり、その損失傾斜が制御部３９０により制御される。この透過特性可変光部品３５０は、第２実施形態で説明したものと同様の構成である。制御部３９０は、信号光検知部３６１，３６２による検知結果（入力信号光パワー、信号光波数、出力信号光パワー）を受け取り、或いは、監視システムより信号光波数情報を受け取り、これらの何れかに基づいて、励起光源３７１～３７４それぞれから出力される励起光のパワーを制御し、また、透過特性可変光部品３５０の損失傾斜を制御する。

【００９０】

この光増幅器３００では、励起光源３７１より出力された励起光は、光増幅用ファイバ３４１へ順方向に供給される。励起光源３７２より出力された励起光は、光増幅用ファイバ３４１へ逆方向に供給される。励起光源３７４より出力された励起光は、光増幅用ファイバ３４２へ順方向に供給される。また、励起光源３７５より出力された励起光は、光増幅用ファイバ３４２へ逆方向に供給される。

【００９１】

入力端３０１に入力した信号光は、光分岐器３１１、光アイソレータ３２１および光結合器３３１を順に経て、光増幅用ファイバ３４１に入力し、この光増幅用ファイバ３４１において光増幅される。光増幅用ファイバ３４１において光増幅された信号光は、光結合器３３２、光アイソレータ３２２、透過特性可変光部品３５０および光結合器３３４を順に経て、光増幅用ファイバ３４２に入力し、この光増幅用ファイバ３４２において光増幅される。光増幅用ファイバ３４２において光増幅された信号光は、光結合器３３５、光アイソレータ３２３および光分岐器３１２を順に経て、出力端３０２より出力される。

【００９２】

光分岐器３１１において信号光のパワーの一部が分岐され、その分岐された信号光は信号光検知部３６１に入力して、この信号光検知部３６１により、入力信号光のパワーが検知される。また、光分岐器３１２において信号光のパワーの一部が分岐され、その分岐された信号光は信号光検知部３６２に入力して、この信号光検知部３６２により、出力信号光のパワーが検知される。そして、制御部３９０により、信号光検知部３６１，３６２による検知結果に基づいて、励起光源３７１～３７４それぞれから出力される励起光のパワーが調整され、また、透過特性可変光部品３５０の損失傾斜が調整され、このようにして、光増幅器３００における信号光増幅の利得または出力信号光パワーが制御される。

【００９３】

次に、第３実施形態に係る光増幅器３００のより具体的な構成について説明する。この光増幅器３００の入力端３０１に入力する信号光は、波長帯域１４５７．４～１４７９．７

ｎｍ内の最大３２波（１００ＧＨｚ間隔）であり、波長毎のパワーが－２９±４ｄＢｍであるとする。また、出力端３０２より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーが＋３．５ｄＢｍであるとする。前段の光増幅用ファイバ３４１は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２０ｍであるとする。後段の光増幅用ファイバ３４２は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２５ｍであるとする。

【００９４】

励起光源３７１より前段の光増幅用ファイバ３４１に順方向に供給される励起光は、波長が１．０５μｍであって、パワーが１２０ｍＷで一定であるとする。励起光源３７２より前段の光増幅用ファイバ３４１に逆方向に供給される励起光は、波長が１．０５μｍであって、パワーが４０ｍＷで一定であるとする。励起光源３７４より後段の光増幅用ファイバ３４２に順方向に供給される励起光は、波長が１．０５μｍであって、最大パワーが１００ｍＷであるとする。励起光源３７５より後段の光増幅用ファイバ３４２に逆方向に供給される励起光は、波長が１．０５μｍであって、最大パワーが２００ｍＷであるとする。励起光源３７４，３７５から出力される励起光のパワーは、上述した比較例の場合と同様にして制御される。これら各々は、近年開発された半導体レーザ光源１個で実現可能である。また、励起光源３７１および励起光源３７２それぞれから出力される励起光の波長が同一であって各々一定パワーであり、また、両者のパワーの和が１６０ｍＷであるから、２つの励起光源３７１，３７２に替えて１つの励起光源と光分岐器（分岐比３：１）とを設けて、この１つの励起光源から出力された励起光を光分岐器により２分岐して光結合器３３１，３３２へ出力するようにしてもよい。また、透過特性可変光部品３５０における損失傾斜の変動量ΔＳ［ｄＢ］は、上記(4)式に基づいて制御される。

【００９５】

図２７は、第３実施形態に係る光増幅器３００の利得スペクトルを示す図である。図２８は、第３実施形態に係る光増幅器３００の出力信号光スペクトルを示す図である。ここでは、透過特性可変光部品３５０の損失傾斜は信号光波数に依らず平坦とされた。また、これらの図中で、Ｍｉｎは波長毎の入力信号光パワーが－３３ｄＢｍの場合を示し、Ｍｉｄは波長毎の入力信号光パワーが－２９ｄＢｍの場合を示し、Ｍａｘは波長毎の入力信号光パワーが－２５ｄＢｍの場合を示す。また、Ｍｉｎ，ＭｉｄおよびＭａｘそれぞれに続く括弧の中の数値は信号光波数を示す。例えば、Ｍｉｎ（３２）は波数３２で波長毎の入力信号光パワーが－３３ｄＢｍの場合を示し、Ｍｉｄ（８）は波数８で波長毎の入力信号光パワーが－２９ｄＢｍの場合を示し、Ｍａｘ（４）は波数４で波長毎の入力信号光パワーが－２５ｄＢｍの場合を示す。これらの図から判るように、波長１．０５μｍの励起光を用いた場合の出力信号光スペクトルは、波長１．４５μｍの励起光を用いた場合と比較すると直線的ではないが、信号光波長域内では直線近似が可能である。

【００９６】

図２９は、第３実施形態に係る光増幅器３００の利得スペクトルを示す図である。図３０は、第３実施形態に係る光増幅器３００の出力信号光スペクトルを示す図である。図３０は、第３実施形態に係る光増幅器３００の透過特性可変光部品３５０の損失特性を示す図である。ここでは、透過特性可変光部品３５０の損失傾斜は信号光波数に応じて調整され、また、信号光波数が最大波数３２で入力信号光パワーが最小値－３３ｄＢｍであるときに損失傾斜が平坦となるように設定された。そして、信号光波数が３２であるときには上記(4)式中の係数Ｙの値は０．３５とされ、信号光波数が８であるときには係数Ｙの値は０．１７とされ、信号光波数が４であるときには係数Ｙの値は０．１３とされた。これらの図から判るように、上記(4)式に基づく制御により、入力信号光パワーおよび信号光波数それぞれの変動範囲の全域において、信号光波長域における出力信号光パワーの変動は±０．３ｄＢ以内の範囲内に抑制されている。なお、このとき、波長１．２μｍ帯および波長１．５５～１．６５μｍ帯の何れの励起光も不要である。

【００９７】

なお、波長１．４μｍ帯の励起光を用いた場合に見られたような出力信号光スペクトルの傾斜変動におけるクロスポイントの波長シフトは、本実施形態のように波長１．０５μｍ

帯の励起光を用いた場合には軽微であるので、透過特性可変光部品３５０のクロスポイントの波長シフトは殆ど不要である。また、透過特性可変光部品３５０として図１９に示されるような２つのマッハツェンダ型干渉計が直列に接続された構成のものが用いられる場合には、その透過特性は波長を変数とする正弦波関数の重ね合わせで表現できる。したがって、この透過特性可変光部品３５０は、図３２に示されるような非直線的な損失スペクトルの実現も可能であるので、図２８に示されるような非直線的な出力信号光スペクトルを補償することも可能である。

【００９８】

（第４実施形態）

次に、本発明に係る光増幅器の第４実施形態について説明する。図３３は、第４実施形態に係る光増幅器４００の構成図である。この図に示される光増幅器４００は、入力端４０１から出力端４０２へ向かって順に、光分岐器３１１、光アイソレータ３２１、光結合器３３１、光増幅用ファイバ３４１、光結合器３３２、光アイソレータ３２２、光結合器３３３、光結合器３３４、光増幅用ファイバ３４２、光結合器３３５、光アイソレータ３２３および光分岐器３１２を備える。また、この光増幅器３００は、光分岐器３１１に接続された信号光検知部３６１、光分岐器３１２に接続された信号光検知部３６２、光結合器３３１に接続された励起光源３７１、光結合器３３２に接続された励起光源３７２、光結合器３３３に接続された励起光源３７３、光結合器３３４に接続された励起光源３７４、光結合器３３５に接続された励起光源３７５、光増幅用ファイバ３４１またはその近傍の温度を検出する温度検出部３８１、光増幅用ファイバ３４２またはその近傍の温度を検出する温度検出部３８２、および、制御部４９０を備える。

【００９９】

第３実施形態に係る光増幅器３００（図２６）と比較すると、この第４実施形態の光増幅器４００は、透過特性可変光部品が設けられていない点、光アイソレータ３２２と光結合器３３４との間に光結合器３３３が設けられている点、この光結合器３３３に接続された励起光源３７３が設けられている点、温度検出部３８１，３８２が設けられている点、および、制御部３９０に替えて制御部４９０が設けられている点、で相違する。制御部４９０は、信号光検知部３６１，３６２による検知結果（入力信号光パワー、信号光波数、出力信号光パワー）および温度検出部３８１，３８２による温度検出結果を受け取り、或いは、監視システムより信号光波数情報を受け取り、これらの何れかに基づいて、励起光源３７１～３７５それぞれから出力される励起光のパワーを制御する。

【０１００】

次に、第４実施形態に係る光増幅器４００のより具体的な構成について説明する。この光増幅器４００の入力端４０１に入力する信号光は、波長帯域１４６２．４～１４８４．９ｎｍ内の最大３２波（１００ＧＨｚ間隔）であり、波長毎のパワーが－２５±４ｄＢｍであるとする。また、出力端４０２より出力されるべき各波長の信号光の目標パワーが＋３．５ｄＢｍであるとする。前段の光増幅用ファイバ３４１は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２０ｍであるとする。後段の光増幅用ファイバ３４２は、Ｔｍ濃度が２０００ｐｐｍであり、全長が２５ｍであるとする。

【０１０１】

励起光源３７１より前段の光増幅用ファイバ３４１に順方向に供給される励起光は、波長が１．０５μｍであって、パワーが１２０ｍＷで一定であるとする。励起光源３７２より前段の光増幅用ファイバ３４１に逆方向に供給される励起光は、波長が１．０５μｍであって、パワーが４０ｍＷで一定であるとする。励起光源３７３より後段の光増幅用ファイバ３４２に順方向に供給される励起光は、波長が１．５６μｍであるとする。励起光源３７４より後段の光増幅用ファイバ３４２に順方向に供給される励起光は、波長が１．０５μｍであって、最大パワーが１００ｍＷであるとする。励起光源３７５より後段の光増幅用ファイバ３４２に逆方向に供給される励起光は、波長が１．０５μｍであって、最大パワーが２００ｍＷであるとする。励起光源３７３～３７５それぞれから出力される励起光のパワーは、上述した比較例の場合と同様にして制御される。なお、２つの励起光源３７

１，３７２に替えて１つの励起光源と光分岐器（分岐比３：１）とを設けて、この１つの励起光源から出力された励起光を光分岐器により２分岐して光結合器３３１，３３２へ出力するようにしてもよい。

【０１０２】

図３４は、第４実施形態に係る光増幅器４００の利得スペクトルを示す図である。図３５は、第４実施形態に係る光増幅器４００の出力信号光スペクトルを示す図である。これらの図中で、Ｍｉｎは波長毎の入力信号光パワーが－３３ｄＢｍの場合を示し、Ｍｉｄは波長毎の入力信号光パワーが－２９ｄＢｍの場合を示し、Ｍａｘは波長毎の入力信号光パワーが－２５ｄＢｍの場合を示す。また、Ｍｉｎ，ＭｉｄおよびＭａｘそれぞれに続く括弧の中の数値は信号光波数を示す。これら図から判るように、入力信号光パワーおよび信号光波数それぞれの変動範囲の全域において、信号光波長域における出力信号光パワーの変動は±０．３ｄＢ以内の範囲内に抑制されている。

【０１０３】

また、図３６は、第４実施形態に係る光増幅器４００において励起光源３７３から後段の光増幅用ファイバ３４２に順方向に供給される波長１．５６μｍの励起光のパワーと入力信号光パワーとの関係を示す図である。ここでは、信号光波数が最大波数３２で入力信号光パワーが最大値－２１ｄＢｍであるとき（すなわち、光増幅用ファイバ３４２における飽和が最も大きくなるとき）に波長１．５６μｍの励起光のパワーが零となるように設定された。信号光波数が最小波数４で入力信号光パワーが最小値－２９ｄＢｍであるときに、光増幅用ファイバ３４２に供給されるべき波長１．５６μｍの励起光の必要パワーは最大値＋１１．３ｍＷとなる。現在市販されている波長１．５６μｍの光を出力する半導体レーザ光源として、最大出力パワーが＋１３ｄＢｍであるものがある。２つの光結合器の挿入損失の和（１ｄＢを幾らか超える程度）を考慮すれば、光増幅用ファイバ３４２への入力点における励起光パワーが＋１１．３ｄＢｍであるというのは実現可能である。

【０１０４】

なお、波長１．５６μｍ帯励起光は、前段の光増幅用ファイバ３４１へ供給されるよりも、後段の光増幅用ファイバ３４２へ供給される方が好ましい。図３７は、第４実施形態に係る光増幅器４００の利得特性および雑音指数特性それぞれを示す図である。同図（ａ）は利得特性を示し、同図（ｂ）は雑音指数特性を示す。また、この図には、信号光波数が８であって、波長毎の入力信号光パワーが－２９ｄＢｍであるときに、パワー７．３ｍＷの波長１．５６μｍ帯励起光が後段の光増幅用ファイバ３４２のみへ供給された場合（実線）、および、パワー３．３ｍＷの波長１．５６μｍ帯励起光が光増幅用ファイバ３４１，３４２それぞれへ供給された場合（破線）が示されている。この図から判るように、利得特性は殆ど一致しているものの、雑音指数は、波長１．５６μｍ帯励起光が後段の光増幅用ファイバ３４２のみへ供給された場合の方が小さい。

【０１０５】

図３８は、第４実施形態に係る光増幅器４００の利得特性の温度依存性を示す図である。同図（ａ）は、光増幅用ファイバ３４１，３４２の温度が５℃、２５℃および５５℃それぞれの場合における利得特性を示す。同図（ｂ）は、温度２５℃の場合を基準として、温度５℃および５５℃それぞれの場合における利得特性の偏差を示す。光増幅用ファイバ３４１，３４２の温度が変動したときに、この図から判るように利得スペクトルが変動する。したがって、入力信号光パワーや信号光波数に基づくだけでなく、温度検出部３８１，３８２により検出された光増幅用ファイバ３４１，３４２の温度にも基づいて、励起光源３７１～３７５それぞれから出力される励起光のパワーを調整することで、利得の大きさ及び利得スペクトルの形状を制御することができる。これにより、利得特性の温度依存性が軽減される。

【０１０６】

（第５実施形態）

次に、本発明に係る光増幅器の第５実施形態について説明する。図３９は、第５実施形態に係る光増幅器５００の構成図である。この図に示される光増幅器５００は、入力端５０

１から出力端５０２へ向かって順に、光分岐器３１１、光アイソレータ３２１、光結合器３３１、光増幅用ファイバ３４１、光結合器３３２、光アイソレータ３２２、透過特性可変光部品３５０、光結合器３３４、光増幅用ファイバ３４２、光結合器３３５、光アイソレータ３２３および光分岐器３１２を備える。また、この光増幅器３００は、光分岐器３１１に接続された信号光検知部３６１、光分岐器３１２に接続された信号光検知部３６２、光結合器３３１に接続された励起光源３７１、光結合器３３２に接続された励起光源３７２、光結合器３３４に接続された励起光源３７４、光結合器３３５に接続された励起光源３７５、光増幅用ファイバ３４１またはその近傍の温度を検出する温度検出部３８１、光増幅用ファイバ３４２またはその近傍の温度を検出する温度検出部３８２、および、制御部５９０を備える。

【０１０７】

第３実施形態に係る光増幅器３００（図２６）と比較すると、この第５実施形態の光増幅器５００は、温度検出部３８１，３８２が設けられている点、および、制御部３９０に替えて制御部５９０が設けられている点で相違する。制御部５９０は、信号光検知部３６１，３６２による検知結果（入力信号光パワー、信号光波数、出力信号光パワー）および温度検出部３８１，３８２による温度検出結果を受け取り、或いは、監視システムより信号光波数情報を受け取り、これらの何れかに基づいて、励起光源３７１～３７５それぞれから出力される励起光のパワーを制御し、また、透過特性可変光部品３５０の損失傾斜を制御する。この第５実施形態に係る光増幅器５００では、第３実施形態および第４実施形態それぞれで説明したものと同様の制御が行われる。

【０１０８】

（光通信システムの実施形態）

次に、本発明に係る光通信システムの実施形態について説明する。図４０は、本実施形態に係る光通信システム１の構成図である。この光通信システム１は、光送信器１０、光中継器２０および光受信器３０を備え、光送信器１０と光中継器２０との間に光ファイバ伝送路４０が敷設され、光中継器２０と光受信器３０との間に光ファイバ伝送路５０が敷設されたものである。

【０１０９】

光送信器１０内には、光源部11_1～11_3および光合波器１２が設けられている。光源部11_1は、Ｓバンド内の多波長の信号光を発生し、これらを合波して出力する。光源部11_2は、Ｃバンド内の多波長の信号光を発生し、これらを合波して出力する。光源部11_3は、Ｌバンド内の多波長の信号光を発生し、これらを合波して出力する。光合波器１２は、光源部11_1より出力されたＳバンドの多波長の信号光、光源部11_2より出力されたＣバンドの多波長の信号光、および、光源部11_3より出力されたＬバンドの多波長の信号光を入力し、これらを合波して光ファイバ伝送路４０に送出する。

【０１１０】

光中継器２０内には、光分波器２１、光増幅器22_1～22_3および光合波器２３が設けられている。光分波器２１は、光ファイバ伝送路４０を伝搬してきて到達したＳ，ＣおよびＬの各バンドの多波長の信号光を入力し、バンド毎に分波して出力する。光増幅器22_1は、光分波器２１より出力されたＳバンドの多波長の信号光を入力し、これらを一括光増幅して出力する。光増幅器22_2は、光分波器２１より出力されたＣバンドの多波長の信号光を入力し、これらを一括光増幅して出力する。光増幅器22_3は、光分波器２１より出力されたＬバンドの多波長の信号光を入力し、これらを一括光増幅して出力する。また、光合波器２３は、光増幅器22_1により光増幅されたＳバンドの多波長の信号光、光増幅器22_2により光増幅されたＣバンドの多波長の信号光、および、光増幅器22_3により光増幅されたＬバンドの多波長の信号光を入力し、これらを合波して光ファイバ伝送路５０に送出する。

【０１１１】

光受信器３０内には、受光部31_1～31_N（Ｎは２以上の整数）および光分波器３２が設けられている。光分波器３２は、光ファイバ伝送路５０を伝搬してきて到達したＳ，Ｃお

よびＬの各バンドの多波長の信号光を入力し、波長毎に分波して出力する。受光部３１$_n$は、光分波器３２より出力された波長λ$_n$の信号光を入力して受光する（ｎは１以上Ｎ以下の任意の整数）。

【０１１２】

この図に示される３個の光増幅器のうち、Ｓバンド用の光増幅器２２$_1$は、上述した本実施形態に係る光増幅器１００，２００，３００，４００または５００と同一構成のもの（ＴＤＦＡ）である。また、Ｃバンド用の光増幅器２２$_2$およびＬバンド用の光増幅器２２$_3$それぞれは、波長０．９８μｍ帯または１．４８μｍ帯の励起光をＥＤＦに供給して信号光を光増幅するＥＤＦＡである。

【０１１３】

この光通信システム１は以下のように動作する。光送信器１０においては、光源部１１$_1$より出力されたＳバンドの多波長の信号光、光源部１１$_2$より出力されたＣバンドの多波長の信号光、および、光源部１１$_3$より出力されたＬバンドの多波長の信号光は、光合波器１２により合波されて、光ファイバ伝送路４０に送出される。光中継器２０においては、光ファイバ伝送路４０を伝搬してきて到達したＳ，ＣおよびＬの各バンドの多波長の信号光は、光分波器２１によりバンド毎に分波される。光分波器２１により分波されて出力されたＳバンドの多波長の信号光は、光増幅器２２$_1$により光増幅され、光分波器２１により分波されて出力されたＣバンドの多波長の信号光は、光増幅器２２$_2$により光増幅され、また、光分波器２１により分波されて出力されたＬバンドの多波長の信号光は、光増幅器２２$_3$により光増幅される。これらの光増幅されたＳ，ＣおよびＬの各バンドの多波長の信号光は、光合波器２３により合波されて、光ファイバ伝送路５０に送出される。光受信器３０においては、光ファイバ伝送路５０を伝搬してきて到達したＳ，ＣおよびＬの各バンドの多波長の信号光は、光分波器３２により波長毎に分波される。そして、光分波器３２により分波されて出力された波長λ$_n$の信号光は、受光部３１$_n$により受光される。

【０１１４】

このように、この光通信システム１は、Ｓ，ＣおよびＬの各バンドの多波長の信号光を多重化して光ファイバ伝送路４０，５０に伝搬させるので、大容量の情報を高速に伝送することができる。また、Ｓバンド用の光増幅器２２$_1$は、上述した本実施形態に係る光増幅器と同一構成のもの（ＴＤＦＡ）であるので、出力信号光パワーを一定に維持することができ、また、利得平坦度を一定に維持することができる。したがって、この光通信システム１は、Ｓバンド信号光の伝送品質が優れたものとなる。

【０１１５】

（損失傾斜可変の光透過特性可変光部品について）

次に、第２実施形態の構成中の光透過特性可変光部品２５０（図１９）について更に詳細に説明する。なお、第３実施形態および第５実施形態それぞれの構成中の光透過特性可変光部品３５０についても同様である。この光透過特性可変光部品２５０は、既述したように、信号光波長域における損失傾斜が可変であるだけでなく、クロスポイント（損失傾斜の中心波長）も可変である。図１９に示されるように、光透過特性可変光部品２５０は、２段のマッハツェンダ型干渉計が縦列接続されたものであり、４つのヒータ２５４ａ～２５４ｄにより各光導波路の温度調整により、損失特性を調整することができる。

【０１１６】

図４１は、光透過特性可変光部品２５０の損失特性を示す図である。図４２は、光透過特性可変光部品２５０の各ヒータの駆動電圧と損失傾斜との関係を示す図である。各図（ａ）はクロスポイントが１４６５ｎｍであり、各図（ｂ）はクロスポイントが１４８０ｎｍであり、各図（ｃ）はクロスポイントが１４９５ｎｍである。なお、図４２において、Ｈ１はヒータ２５４ａを表し、Ｈ２はヒータ２５４ｂを表し、Ｈ３はヒータ２５４ｃを表し、Ｈ４はヒータ２５４ｄを表す。

【０１１７】

図４３は、光透過特性可変光部品２５０の各ヒータの駆動電圧とクロスポイントとの関係を示す図である。図４２および図４３から判るように、光透過特性可変光部品２５０は、

ヒータ２５４ｂおよび２５４ｃによる温度調整によりクロスポイントを制御することができ、ヒータ２５４ａおよび２５４ｄによる温度調整により損失傾斜を制御することができる。

【０１１８】

このように、光透過特性可変光部品２５０は、損失傾斜の制御とクロスポイントのシフトの制御とを互いに独立に行うことができる。クロスポイントは、１４６５ｎｍ～１４９５ｎｍの範囲でシフト可能である。

【０１１９】

なお、波長１．４μｍ帯励起のＴＤＦＡの場合、波数変動および入出力パワー変動によってクロスポイントが１０ｎｍ程度変動するので、光透過特性可変光部品２５０のクロスポイントの変化の幅は１０ｎｍ以上であるのが好適である。また、波長１．０５μｍ帯励起のＴＤＦＡの場合、波数変動および入出力パワー変動によってクロスポイントが１５ｎｍ程度変動するので、光透過特性可変光部品２５０のクロスポイントの変化の幅は１５ｎｍ以上であるのが好適である。

【０１２０】

【発明の効果】

以上、詳細に説明したとおり、本発明に係る光増幅器は、実使用状態において想定される条件下においても利得の大きさと利得スペクトル形状とが制御され得る。

【図面の簡単な説明】

【図１】比較例の光増幅器９００の構成図である。

【図２】比較例の光増幅器９００の入力信号光３２波時の利得スペクトルを示す図である。

【図３】比較例の光増幅器９００の入力信号光３２波時の出力信号光スペクトルを示す図である。

【図４】比較例の光増幅器９００におけるトータル出力光パワーとトータル入力信号光パワーとの関係を示す図である。

【図５】比較例の光増幅器９００の入力信号光８波時の利得スペクトルを示す図である。

【図６】比較例の光増幅器９００の入力信号光８波時の出力信号光スペクトルを示す図である。

【図７】波長１．５６μｍ励起光パワーを制御したときの比較例の光増幅器９００の入力信号光３２波時の利得スペクトルを示す図である。

【図８】波長１．５６μｍ励起光パワーを制御したときの比較例の光増幅器９００の入力信号光３２波時の出力信号光スペクトルを示す図である。

【図９】比較例の光増幅器９００における波長１．５６μｍ励起光パワーとトータル入力信号光パワーとの関係を示す図である。

【図１０】第１実施形態に係る光増幅器１００の構成図である。

【図１１】第１実施形態に係る光増幅器１００の信号光検知部１６２の構成例を示す図である。

【図１２】第１実施形態に係る光増幅器１００の信号光検知部１６２の他の構成例を示す図である。

【図１３】第１実施形態に係る光増幅器１００の入力信号光３２波時の利得スペクトルを示す図である。

【図１４】第１実施形態に係る光増幅器１００の入力信号光３２波時の出力信号光スペクトルを示す図である。

【図１５】第１実施形態に係る光増幅器１００の入力信号光８波時の利得スペクトルを示す図である。

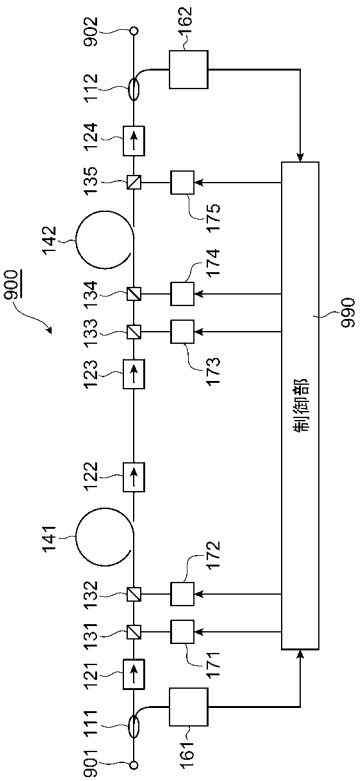
【図１６】第１実施形態に係る光増幅器１００の入力信号光８波時の出力信号光スペクトルを示す図である。

【図１７】トータル入力信号光パワーの各値について出力信号光スペクトルを示す図である。

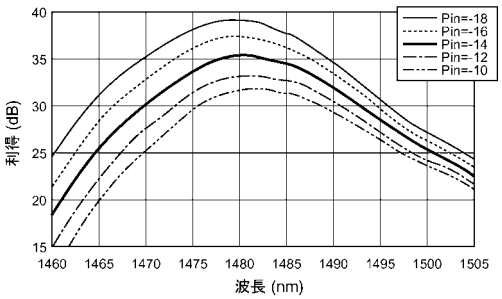
【図１８】第２実施形態に係る光増幅器２００の構成図である。
【図１９】第２実施形態に係る光増幅器２００の透過特性可変光部品２５０の構成例を示す図である。
【図２０】第２実施形態に係る光増幅器２００の透過特性可変光部品２５０の損失スペクトルの１例を示す図である。
【図２１】第２実施形態に係る光増幅器２００の入力信号光３２波時の利得スペクトルを示す図である。
【図２２】第２実施形態に係る光増幅器２００の入力信号光３２波時の出力信号光スペクトルを示す図である。
【図２３】第２実施形態に係る光増幅器２００の透過特性可変光部品２５０の入力信号光３２波時の損失スペクトルを示す図である。
【図２４】第１実施形態に係る光増幅器１００の雑音指数特性を示す図である。
【図２５】第２実施形態に係る光増幅器２００の雑音指数特性を示す図である。
【図２６】第３実施形態に係る光増幅器３００の構成図である。
【図２７】第３実施形態に係る光増幅器３００の利得スペクトルを示す図である。
【図２８】第３実施形態に係る光増幅器３００の出力信号光スペクトルを示す図である。
【図２９】第３実施形態に係る光増幅器３００の利得スペクトルを示す図である。
【図３０】第３実施形態に係る光増幅器３００の出力信号光スペクトルを示す図である。
【図３１】第３実施形態に係る光増幅器３００の透過特性可変光部品３５０の損失特性を示す図である。
【図３２】第３実施形態に係る光増幅器３００の透過特性可変光部品３５０の損失特性を示す図である。
【図３３】第４実施形態に係る光増幅器４００の構成図である。
【図３４】第４実施形態に係る光増幅器４００の利得スペクトルを示す図である。
【図３５】第４実施形態に係る光増幅器４００の出力信号光スペクトルを示す図である。
【図３６】第４実施形態に係る光増幅器４００において励起光源３７３から後段の光増幅用ファイバ３４２に順方向に供給される波長１．５６μｍの励起光のパワーと入力信号光パワーとの関係を示す図である。
【図３７】第４実施形態に係る光増幅器４００の利得特性および雑音指数特性それぞれを示す図である。
【図３８】第４実施形態に係る光増幅器４００の利得特性の温度依存性を示す図である。
【図３９】第５実施形態に係る光増幅器５００の構成図である。
【図４０】本実施形態に係る光通信システム１の構成図である。
【図４１】光透過特性可変光部品２５０の損失特性を示す図である。
【図４２】光透過特性可変光部品２５０の各ヒータの駆動電圧と損失傾斜との関係を示す図である。
【図４３】光透過特性可変光部品２５０の各ヒータの駆動電圧とクロスポイントとの関係を示す図である。
【図４４】ＥＤＦＡおよびＴＤＦＡそれぞれの動作を比較して説明する図である。
【符号の説明】
１…光通信システム、１０…光送信器、１１…光源部、１２…光合波器、２０…光中継器、２１…光分波器、２２…光増幅器、２３…光合波器、３０…光受信器、３１…受光部、３２…光分波器、４０，５０…光ファイバ伝送路、１００…光増幅器、１１１，１１２…光分岐器、１２１～１２４…光アイソレータ、１３１～１３５…光結合器、１４１，１４２…光増幅用ファイバ、１５０…透過特性可変光部品、１６１，１６２…信号光検知部、１７１～１７５…励起光源、１９０…制御部、２００…光増幅器、２５０…透過特性可変光部品、２９０…制御部、３００…光増幅器、３１１，３１２…光分岐器、３２１～３２３…光アイソレータ、３３１～３３５…光結合器、３４１，３４２…光増幅用ファイバ、３５０…透過特性可変光部品、３６１，３６２…信号光検知部、３７１～３７５…励起光源、３８１，３８２…温度検出部、３９０…制御部、４００…光増幅器、４９０…制御部

、５００…光増幅器、５９０…制御部。

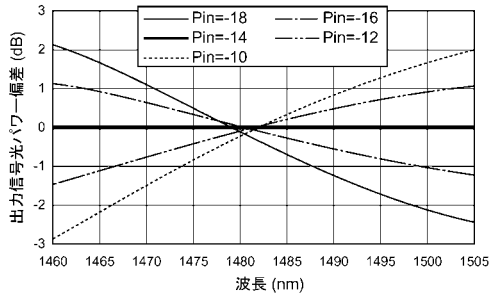
【図１】



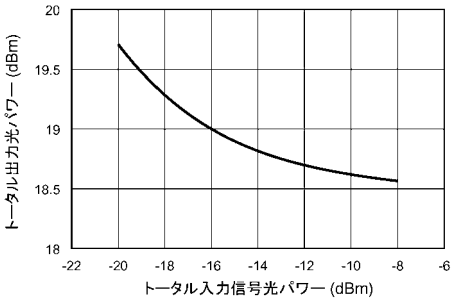
【図２】



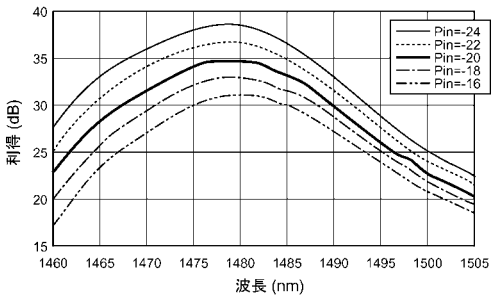
【図３】


Pin=-18
Pin=-16
Pin=-14
Pin=-12
Pin=-10
出力信号光パワー偏差 (dB)
3
2
1
0
-1
-2
-3
1460 1465 1470 1475 1480 1485 1490 1495 1500 1505
波長 (nm)

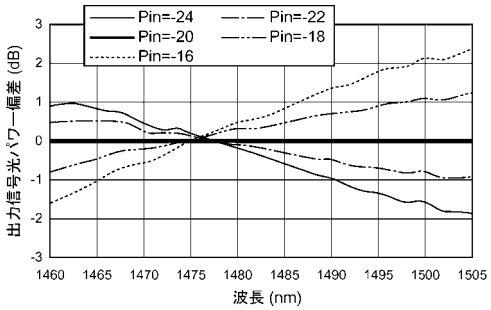
【図４】


トータル出力光パワー (dBm)
20
19.5
19
18.5
18
-22 -20 -18 -16 -14 -12 -10 -8 -6
トータル入力信号光パワー (dBm)

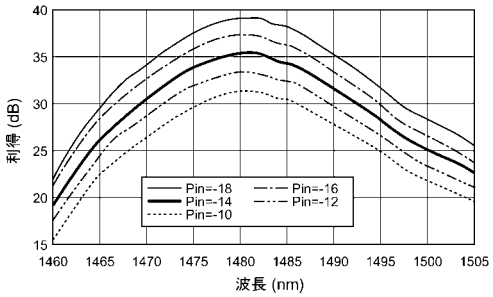
【図５】


Pin=-24
Pin=-22
Pin=-20
Pin=-18
Pin=-16
利得 (dB)
40
35
30
25
20
15
1460 1465 1470 1475 1480 1485 1490 1495 1500 1505
波長 (nm)

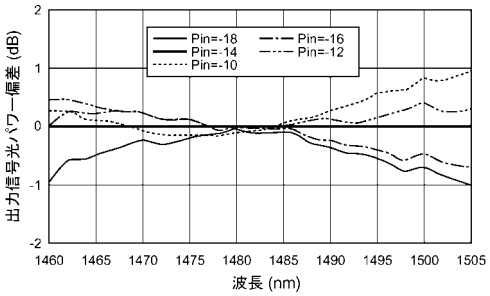
【図６】


Pin=-24
Pin=-22
Pin=-20
Pin=-18
Pin=-16
出力信号光パワー偏差 (dB)
3
2
1
0
-1
-2
-3
1460 1465 1470 1475 1480 1485 1490 1495 1500 1505
波長 (nm)

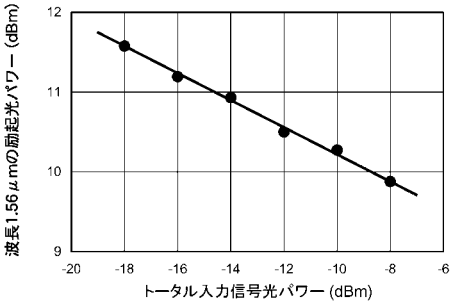
【図７】


利得 (dB)
波長 (nm)
Pin=-18
Pin=-14
Pin=-10
Pin=-16
Pin=-12

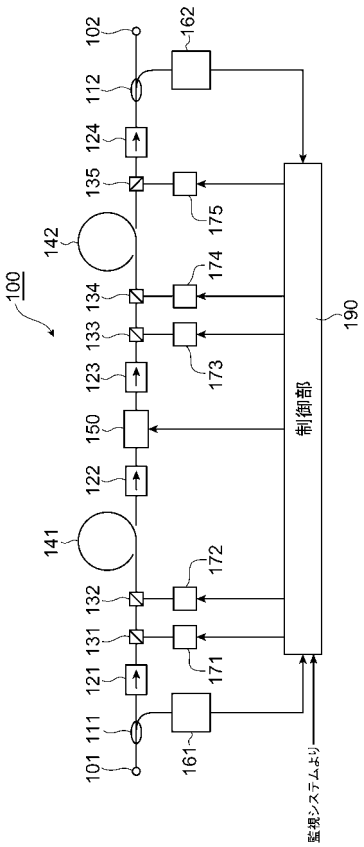
【図８】


出力信号光パワー偏差 (dB)
波長 (nm)
Pin=-18
Pin=-14
Pin=-10
Pin=-16
Pin=-12

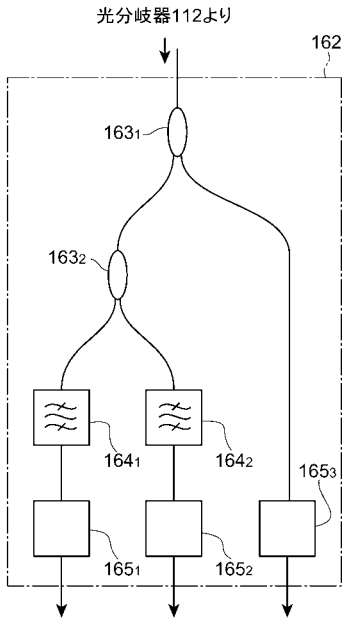
【図９】


波長1.56μmの励起光パワー (dBm)
トータル入力信号光パワー (dBm)

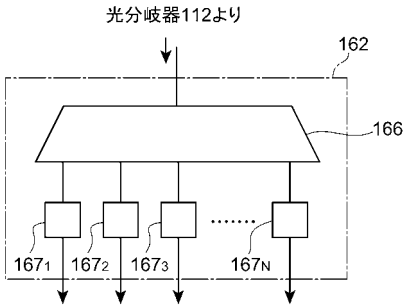
【図１０】


100
101
102
111
112
121
122
123
124
131
132
133
134
135
141
142
150
161
162
171
172
173
174
175
190
制御部
監視システムより

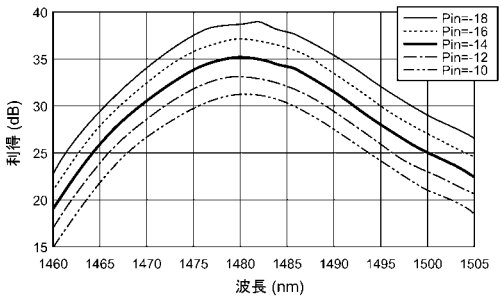
【図１１】



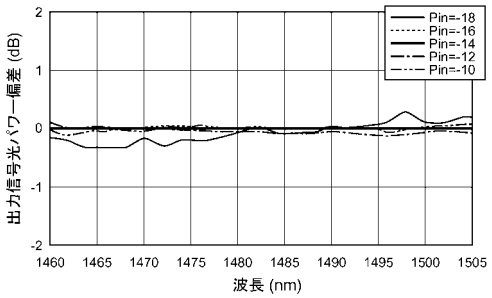
【図１２】



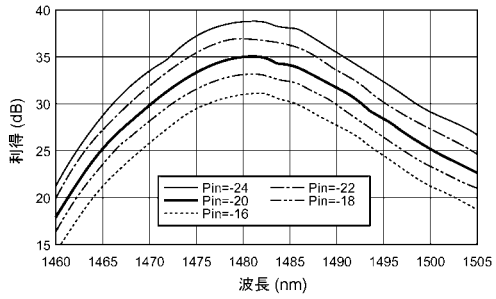
【図１３】



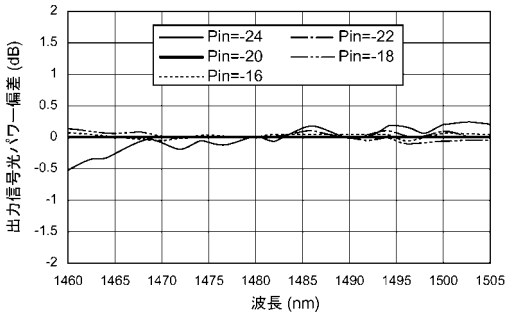
【図１４】



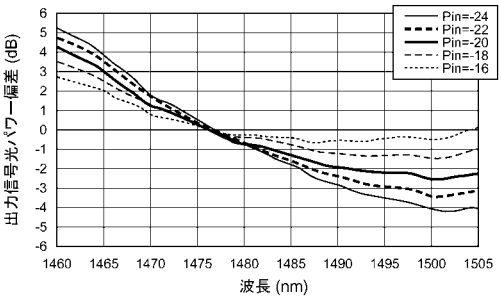
【図１５】



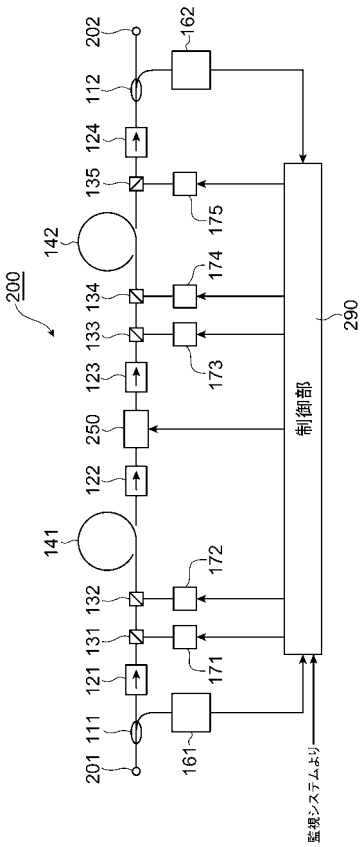
【図１６】



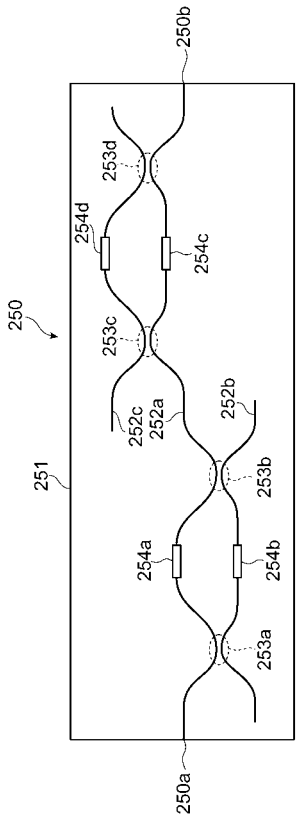
【図１７】



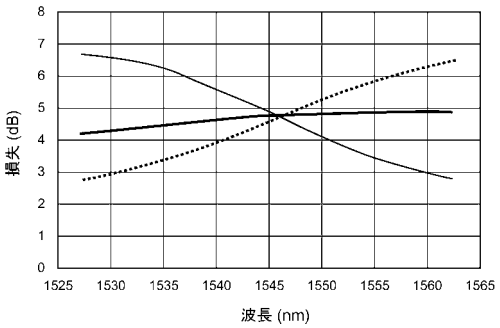
【図１８】



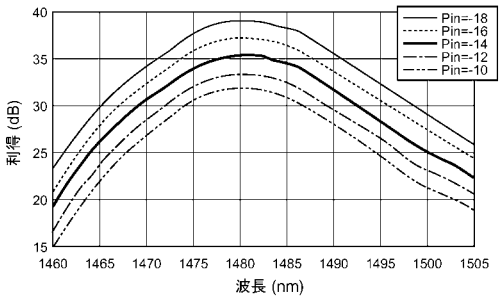
【図１９】



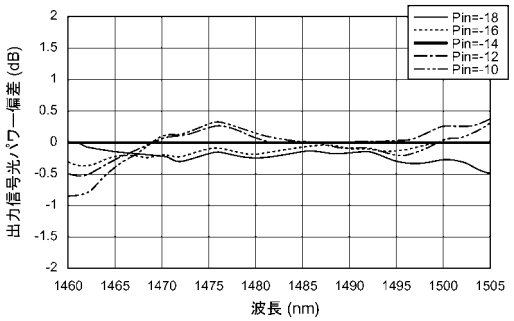
【図２０】



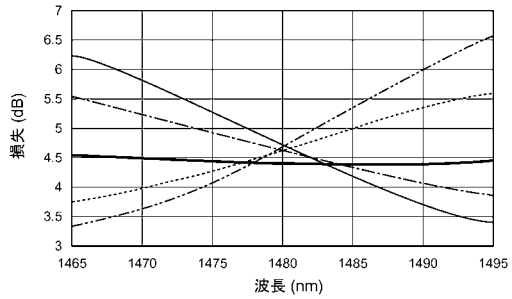
【図２１】



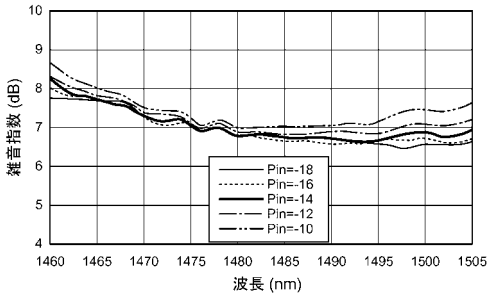
【図２２】



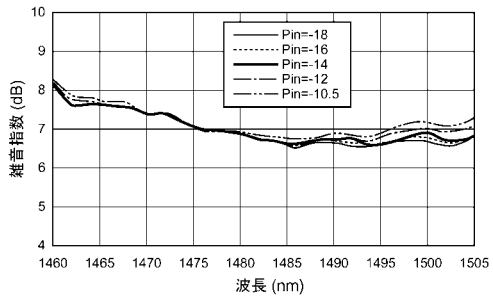
【図２３】



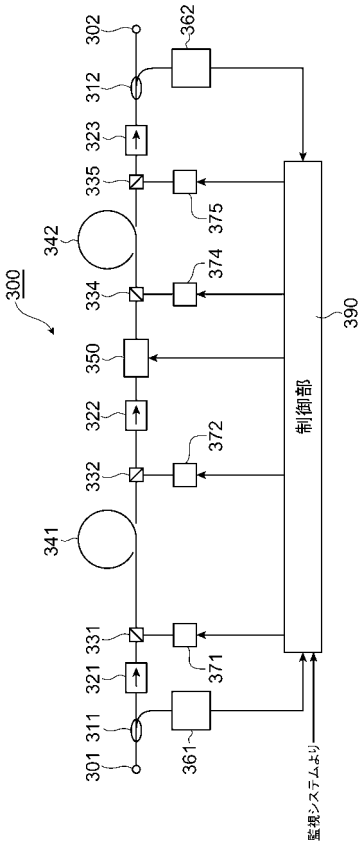
【図２４】



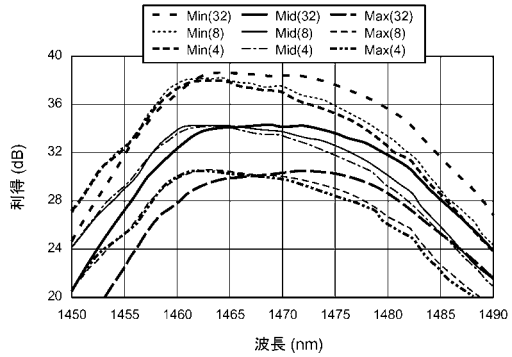
【図２５】



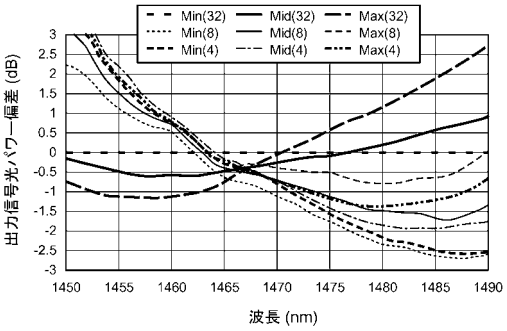
【図２６】



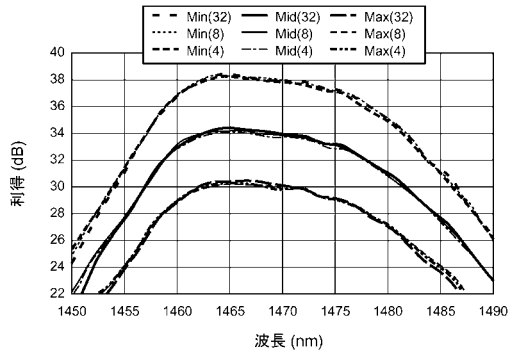
【図２７】



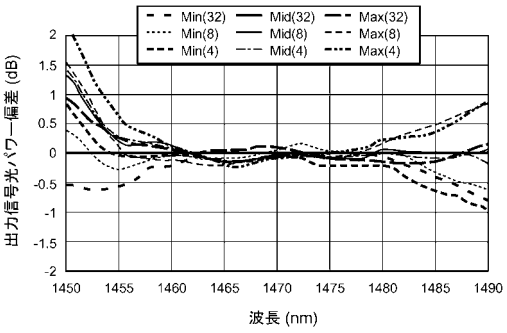
【図２８】



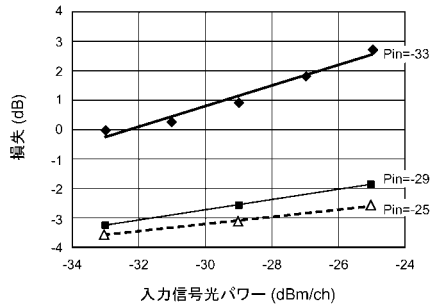
【図２９】



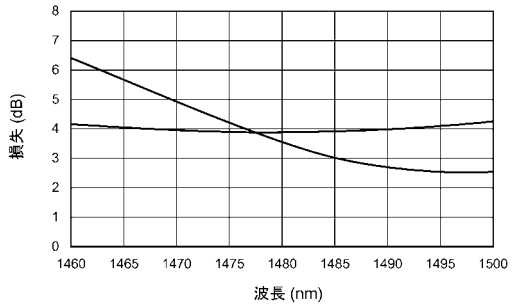
【図３０】



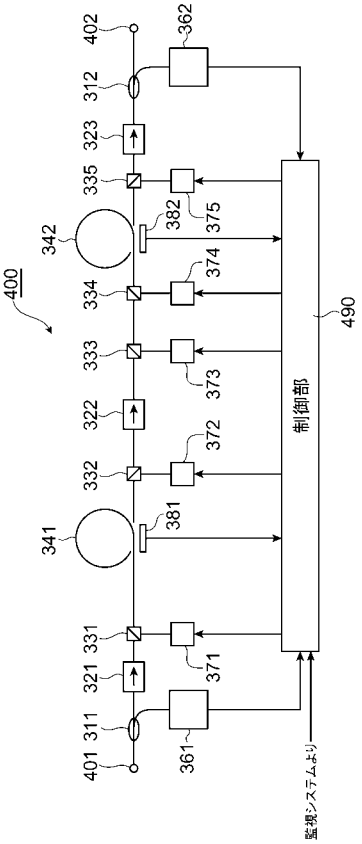
【図３１】



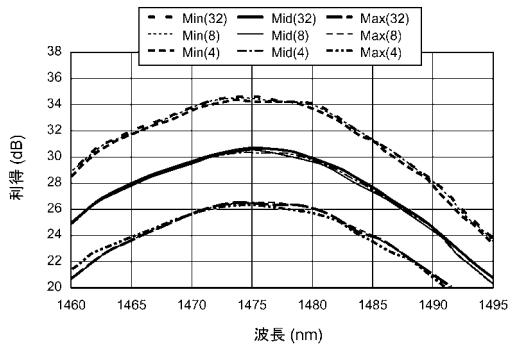
【図３２】



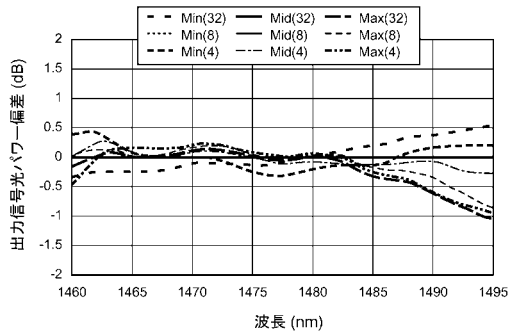
【図３３】



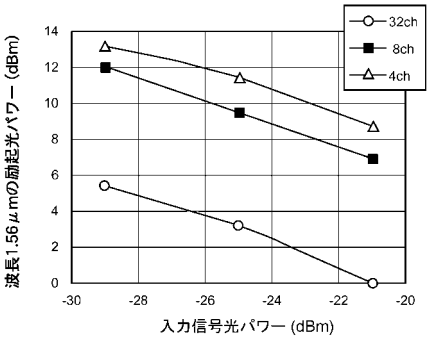
【図３４】



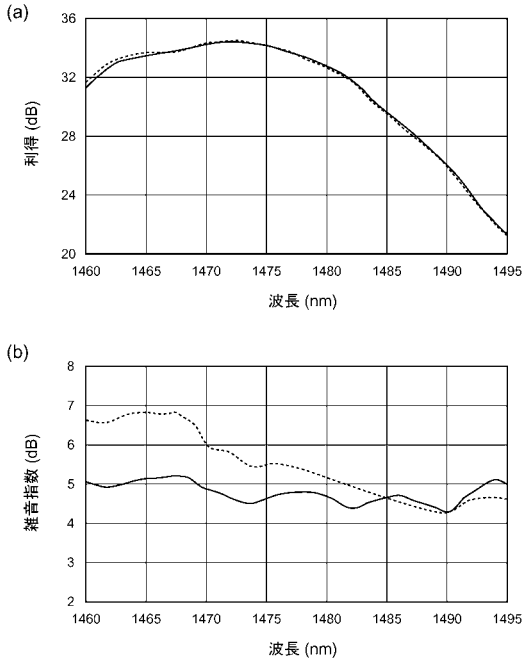
【図３５】



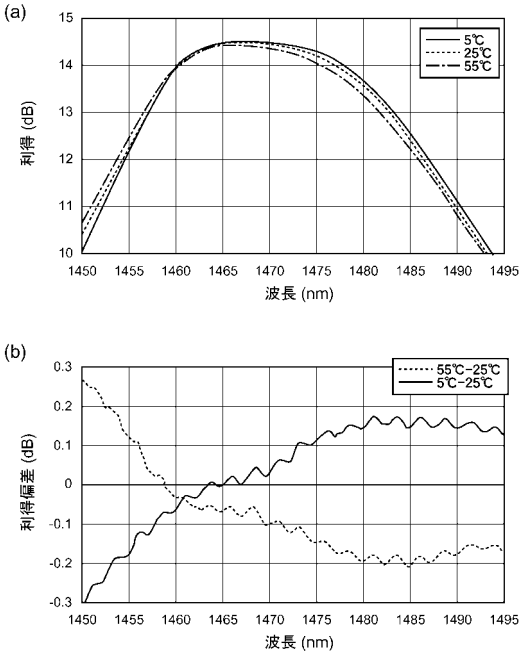
【図３６】



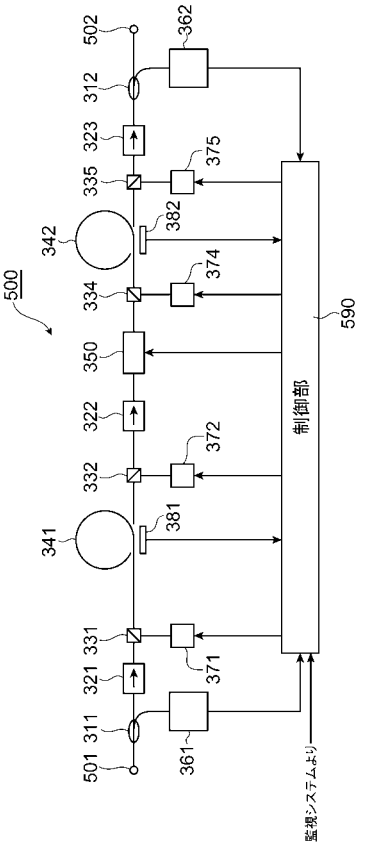
【図３７】



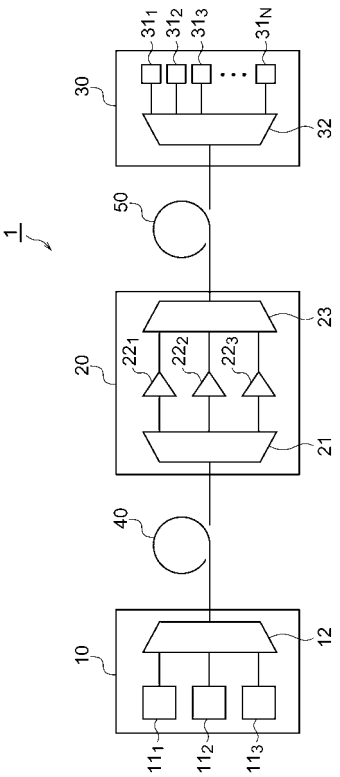
【図３８】



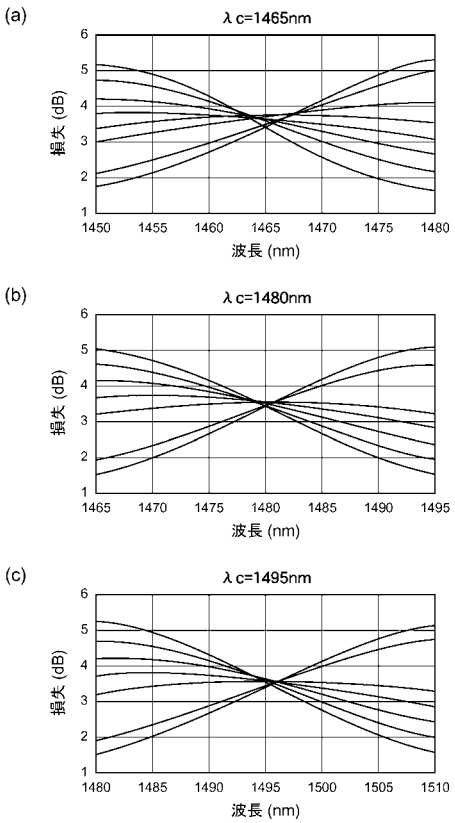
【図３９】



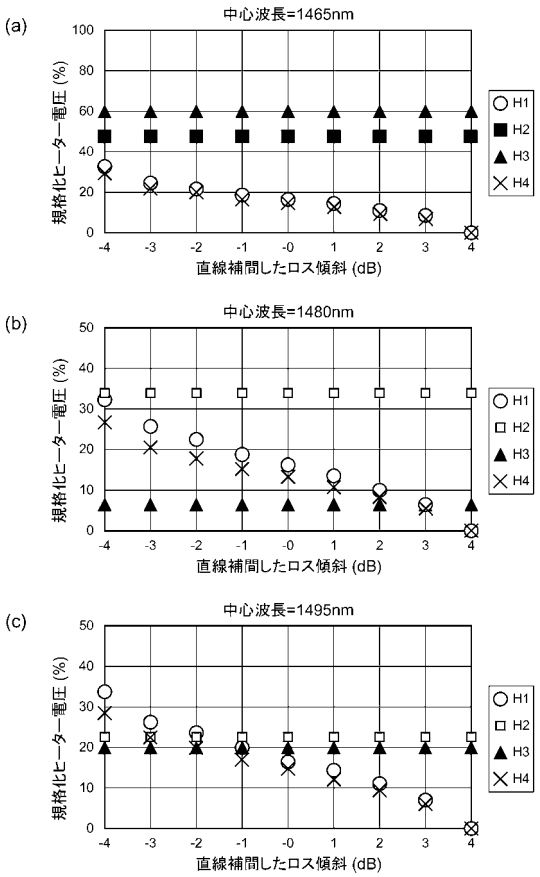
【図４０】



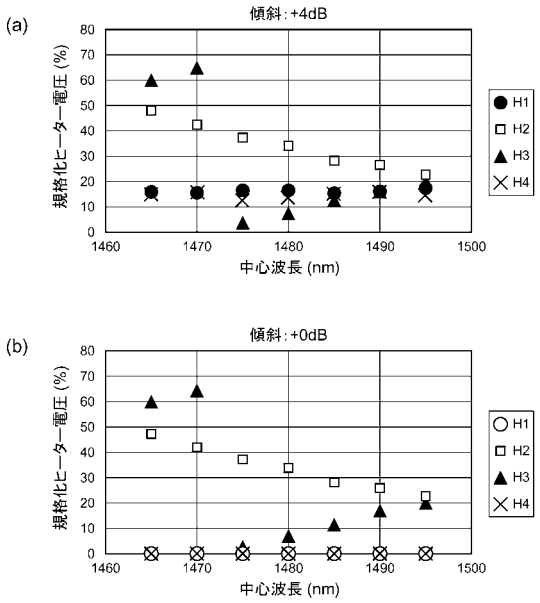
【図４１】



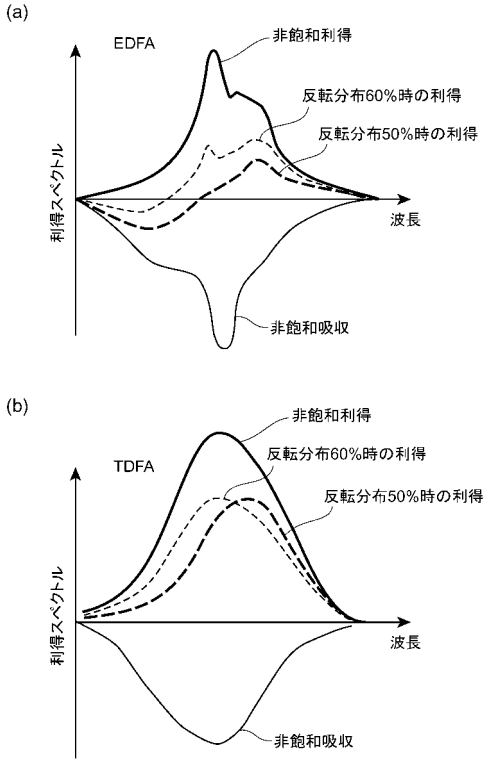
【図４２】



【図４３】


(a)
傾斜:+4dB
規格化ヒーター電圧 (%)
中心波長 (nm)
H1
H2
H3
H4
(b)
傾斜:+0dB
規格化ヒーター電圧 (%)
中心波長 (nm)
H1
H2
H3
H4

【図４４】


(a)
EDFA
非飽和利得
反転分布60%時の利得
反転分布50%時の利得
利得スペクトル
波長
非飽和吸収
(b)
TDFA
非飽和利得
反転分布60%時の利得
反転分布50%時の利得
利得スペクトル
波長
非飽和吸収

フロントページの続き

審査官　金高　敏康

(56)参考文献　国際公開第０１／００５００５（WO，Ａ１）
特開２０００－２９９５１８（ＪＰ，Ａ）
Optical Fiber Communication Conference (OFC)，２００１年，Vol.54，TuQ2-1～TuQ2-3

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
H01S 3/00 - 4/00
G02F 1/01
H04B 10/04
H04B 10/06
H04B 10/14