

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4635402号
(P4635402)

(45) 発行日 平成23年2月23日 (2011.2.23)

(24) 登録日 平成22年12月3日 (2010.12.3)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 S 3/10 (2006.01)

H O 1 S 3/10 Z

H O 1 S 3/131 (2006.01)

H O 1 S 3/131

請求項の数 21 (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2001-509128 (P2001-509128)
 (86) (22) 出願日 平成12年3月17日 (2000.3.17)
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2000/001660
 (87) 国際公開番号 W02001/005005
 (87) 国際公開日 平成13年1月18日 (2001.1.18)
 審査請求日 平成19年2月8日 (2007.2.8)
 (31) 優先権主張番号 特願平11-196251
 (32) 優先日 平成11年7月9日 (1999.7.9)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)
 (31) 優先権主張番号 特願平11-212190
 (32) 優先日 平成11年7月27日 (1999.7.27)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

前置審査

(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 100157750
 弁理士 高城 政浩
 (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
 (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 重松 昌行
 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】 光増幅器及び光増幅方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

所定の波長帯域に属し、波長の異なる複数の信号光を合波した多重信号光を一括して増幅する光増幅器であって、蛍光物質が添加された光導波路を有し、前記多重信号光を前記蛍光物質の光励起を利用して増幅する一つあるいは複数の光増幅部と、前記光増幅部に所定の励起光を供給する励起光源と、前記光増幅部における利得の波長依存性の変化に応じて、前記所定の波長帯域内において損失 L (dB) の波長 λ (nm) に対する傾き $dL/d\lambda$ を変更可能な光フィルタと、増幅後の光パワーが所定の目標値になるよう前記励起光源の励起光出力を制御するとともに、最終的な利得の波長依存性を平坦化させるように、前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する制御手段と、前記光増幅部固有の利得の波長依存性を補償する利得等化器とを備える光増幅器。

【請求項 2】

前記多重信号光に含まれる信号光の数を検出する波数モニタをさらに備え、前記制御手段は前記波数モニタで検出された信号光の数に応じて増幅後の光パワーの目標値を調整する請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 3】

前記光増幅部に入力される光パワーを検出する入力光パワー検出手段をさらに備え、前記制御手段は、前記入力光パワー検出手段の検出結果に基づいて前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 4】

10

20

前記光増幅部の利得を検出する利得検出手段をさらに備え、前記制御手段は、前記利得検出手段の検出結果に基づいて前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 5】

前記光増幅部から出力された光に含まれる信号光の各波長、出力を検出する検出手段をさらに備え、前記制御手段は、前記検出手段で検出された最短、最長波長のパワー偏差に基づいて前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 6】

前記多重信号光とともに送られてきた入力光信号中の最短波長、最長波長に関する情報を読み出す読み出し手段をさらに備えており、前記制御手段は、前記読み出し手段で得られた情報を基にして前記パワー偏差を求める請求項 5 記載の光増幅器。

10

【請求項 7】

前記光増幅部から出力された光の前記所定の波長帯域の両端外側におけるそれぞれの ASE 光レベルを検出する ASE 光レベル検出手段をさらに備え、前記制御手段は、前記 ASE 光レベル検出手段で検出したそれぞれの ASE 光レベルのレベル差が一定となるように前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 8】

前記光増幅部から出力された光に含まれる信号光の各波長、出力を検出する検出手段と、前記検出手段で検出された最短波長の光より短波長側と最長波長の光より長波長側におけるそれぞれの ASE 光レベルを検出する ASE 光レベル検出手段とをさらに備え、前記制御手段は、前記 ASE 光レベル検出手段で検出したそれぞれの ASE 光レベルのレベル差が一定となるように前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 1 記載の光増幅器。

20

【請求項 9】

前記多重信号光とともに送られてきた入力光信号中の最短波長、最長波長に関する情報を読み出す読み出し手段をさらに備えており、前記 ASE 光レベル検出手段は、前記読み出し手段で得られた情報を基にして ASE 光レベルを求める波長を決定する請求項 8 記載の光増幅器

【請求項 10】

前記光フィルタは、

30

前記多重信号光を導波させ、上流側から順に第 1 ～ 第 6 の領域に区分される主光路と、前記主光路の第 1 及び第 3 の領域に対しては伝搬光が光結合する程度に近接し、前記主光路の第 2 の領域に対しては伝搬光が光結合しない程度に離隔されて配置され、前記主光路の第 2 の領域に対応する領域の長さが前記主光路と異なる第 1 の副光路と、

前記主光路の第 4 及び第 6 の領域に対しては伝搬光が光結合する程度に近接し、前記主光路の第 5 の領域に対しては伝搬光が光結合しない程度に離隔されて配置され、前記主光路の第 5 の領域に対応する領域の長さが前記主光路と異なる第 2 の副光路と、

前記主光路の第 2 の領域及び前記第 1 の副光路の前記主光路の第 2 の領域に対応する領域の少なくとも一方に配置されている第一の温度調整器と、

前記主光路の第 5 の領域及び前記第 2 の副光路の前記主光路の第 5 の領域に対応する領域の少なくとも一方に配置されている第二の温度調整器とを備えている請求項 1 記載の光増幅器。

40

【請求項 11】

所定の波長帯域に属し、波長の異なる複数の信号光を合波した多重信号光を一括して増幅する光増幅方法であって、

前記多重信号光を所定の励起光とともに蛍光物質が添加された光導波路に導いて光増幅する工程と、

増幅前あるいは増幅後の少なくともいずれか一方の前記多重信号光を、前記光増幅部における利得の波長依存性の変化に応じて前記所定の波長帯域内において損失 L (dB) の波長 λ (nm) に対する傾き $dL/d\lambda$ を変更可能な光フィルタに導き、前記光フィルタ

50

の傾き $dL/d\lambda$ を調整することにより、前記光増幅工程における利得の波長依存性を低減する工程と、

前記励起光の強度を調整して増幅後の光パワーを所定の目標値になるように調整する工程と、

最終的な利得の波長依存性を平坦化させるように、前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する工程と、

所定の利得等化器により前記光増幅工程における固有の利得の波長依存性を低減する工程と、

を備えている光増幅方法。

【請求項 1 2】

10

多重信号光に含まれる信号光の数を検出し、検出された信号光の数に応じて増幅後の光パワーの目標値を調整する工程をさらに備えている請求項 1 1 記載の光増幅方法。

【請求項 1 3】

前記光増幅工程で入力される前記多重信号光の光パワーに基づいて前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 1 1 記載の光増幅方法。

【請求項 1 4】

前記光増幅工程での利得に基づいて前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 1 1 記載の光増幅方法。

【請求項 1 5】

前記光増幅工程で増幅された光の前記所定の波長帯域中の異なる 2 つの波長における光パワーの偏差に基づいて前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 1 1 記載の光増幅方法。

20

【請求項 1 6】

前記多重信号光とともに送られてきた入力光信号中の最短波長、最長波長に関する情報を読み出す工程をさらに備え、前記異なる 2 つの波長は、それぞれ読み出した最短波長と最長波長である請求項 1 5 記載の光増幅方法。

【請求項 1 7】

前記光増幅工程で増幅された光の前記所定の波長帯域の両端外側におけるそれぞれの ASE 光レベルを検出し、そのレベル差が一定となるように前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 1 1 記載の光増幅方法。

30

【請求項 1 8】

前記光増幅工程で増幅された光に含まれる信号光の各波長、出力を検出して、検出された最短波長の光より短波長側と最長波長の光より長波長側におけるそれぞれの ASE 光レベルを検出する工程をさらに備えている請求項 1 1 記載の光増幅方法。

【請求項 1 9】

前記多重信号光とともに送られてきた入力光信号中の最短波長、最長波長に関する情報を読み出す工程をさらに備え、前記 ASE 光レベルを検出する工程では読み出した最短波長、最長波長を基に検出する波長を決定する請求項 1 8 記載の光増幅方法。

【請求項 2 0】

前記光フィルタの前記所定の波長帯域における全透過率を最大に調整した際にその損失 L が波長によらずに略一定となるよう調整する請求項 1 1 記載の光増幅方法。

40

【請求項 2 1】

前記光フィルタは、

前記多重信号光を導波させ、上流側から順に第 1 ~ 第 6 の領域に区分される主光路と、

前記主光路の第 1 及び第 3 の領域に対しては伝搬光が光結合する程度に近接し、前記主光路の第 2 の領域に対しては伝搬光が光結合しない程度に離隔されて配置され、前記主光路の第 2 の領域に対応する領域の長さが前記主光路と異なる第 1 の副光路と、

前記主光路の第 4 及び第 6 の領域に対しては伝搬光が光結合する程度に近接し、前記主光路の第 5 の領域に対しては伝搬光が光結合しない程度に離隔されて配置され、前記主光路の第 5 の領域に対応する領域の長さが前記主光路と異なる第 2 の副光路と、

50

を備えており、前記利得の波長依存性を低減する工程は、前記第 1 の副光路と前記主光路のこれに対応する領域の少なくとも一方及び前記第 2 の副光路と前記主光路のこれに対応する領域の少なくとも一方の温度を調整することにより前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する請求項 11 記載の光増幅方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は所定の波長帯域に属する異なる波長の複数の信号光を合波した多重信号光を一括して増幅する光増幅器及び光増幅方法に関する。

【0002】

10

【従来の技術】

光増幅器としては、蛍光物質が添加された導波路に信号光とともに当該蛍光物質の励起光とを導くことにより、信号光を増幅する光増幅器が知られている。このような光増幅器は、光伝送システムにおける中継局などに設けられている。特に、異なる波長の複数の信号光を合波した多重信号光を伝送する波長多重伝送システムに用いられる光増幅器は、これら複数の信号光それぞれを互いに等しい利得で一括光増幅するとともに、複数の信号光それぞれのパワーを一定の目標値に増幅して出力する必要がある。

【0003】

例えば、文献 1「K. Inoue, et al., "Tunable Gain Equalization Using a Mach-Zehnder Optical Filter in Multistage Fiber Amplifiers", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.3, No.8, pp.718-720 (1991)」には、マッハツェンダ干渉計を用いた光フィルタにより光増幅器の利得平坦化を図る技術が記載されている。また、文献 2「S. Kinoshita, et al., "Large Capacity WDM Transmission Based on Wideband Erbium-Doped Fiber Amplifiers", OSA TOPS, Vol.25, pp.258-261 (1998)」には、光増幅器の前段光増幅部と後段光増幅部との間に減衰量可変の光減衰器を挿入して、前段光増幅部に入力する信号光のパワーが変動しても、後段光増幅部に入力する信号光のパワーを光減衰器により一定に保つことにより、光増幅器から出力される信号光のパワーを一定の目標値に保つとともに、光増幅器全体の利得偏差をも一定に保つ技術が記載されている。

20

【0004】

【発明が解決しようとする課題】

30

しかしながら、上記文献 1 に記載された技術では、例えば光増幅器の前段の伝送路における損失が何らかの原因により変動して、光増幅器に入力される信号光のパワーが変動したときに、光増幅器から出力される信号光のパワーを一定の目標値に保とうとすると、光増幅器における信号光の光増幅の利得を変化させる必要がある。そして、利得を変化させると、利得の波長依存性が変動し、その結果、光増幅器の利得平坦性が損なわれ、光増幅器から出力される複数の信号光それぞれのパワーが等しくなくなる、いわゆる偏差を有することになる。

【0005】

また、上記文献 2 に記載された技術では、後段光増幅部に入力される信号光のパワーを光減衰器により一定の目標値に保とうとすると、前段光増幅部に入力した信号光のパワーが十分に大きいときには、光減衰器により大きく減衰させる必要が生ずることになり、その結果、励起効率が悪くなって、雑音指数が劣化してしまう。

40

【0006】

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、入力信号光パワーが変動しても雑音指数を劣化させることなく出力信号光パワーおよび利得平坦性を維持することができる光増幅器および光増幅方法を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するため、本発明に係る光増幅器は、所定の波長帯域に属し、波長の異なる複数の信号光を合波した多重信号光を一括して増幅する光増幅器であって、(1) 蛍光

50

物質が添加された光導波路を有し、この多重信号光を蛍光物質の光励起を利用して増幅する一つあるいは複数の光増幅部と、(2)光増幅部に所定の励起光を供給する励起光源と、(3)光増幅部における利得の波長依存性の变化に応じて、所定の波長帯域内において損失 L (dB) の波長 λ (nm) に対する傾き $dL/d\lambda$ を変更可能な光フィルタと、(4)増幅後の光パワーが所定の目標値になるよう励起光源の励起光出力を制御するとともに、最終的な利得の波長依存性を平坦化させるように、光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する制御手段と、(5)光増幅部固有の利得の波長依存性を補償する利得等化器と、を備えることを特徴とする。

【0008】

一方、本発明に係る光増幅方法は、(1)多重信号光を所定の励起光とともに蛍光物質が添加された光導波路に導いて光増幅する工程と、(2)増幅前あるいは増幅後の少なくともいずれか一方の多重信号光を、前記光増幅部における利得の波長依存性の变化に応じて所定の波長帯域内において損失 L (dB) の波長 λ (nm) に対する傾き $dL/d\lambda$ を変更可能な光フィルタに導き、光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整することにより、光増幅工程における利得の波長依存性を低減する工程と、(3)励起光の強度を調整して増幅後の光パワーを所定の目標値になるように調整する工程と、(4)最終的な利得の波長依存性を平坦化させるように、前記光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整する工程と、(5)所定の利得等化器により前記光増幅工程における固有の利得の波長依存性を低減する工程とを備えていることを特徴とする。

【0009】

本発明に係る光増幅器または光増幅方法によれば、光増幅器への入力信号光パワーが変動しても、光増幅器からの出力信号光パワーを所定の目標値に維持することができる。また、入力信号光パワーの変動により光増幅部の利得に波長依存性が生じることがあっても、光フィルタの損失 L の波長 λ に対する傾き $dL/d\lambda$ を調整することにより、光増幅器全体の利得平坦性を維持することができる。また、利得等化器が光増幅部固有の利得の波長依存性を等化し、光フィルタが入力信号光のパワー変動の補償を行うことで、光増幅器全体の利得平坦性がより優れたものとなり、制御・調整が容易になる。

【0010】

この光フィルタの特性が所定の波長帯域内において

$$L = a(\lambda - \lambda_c) + b$$

(λ_c (nm)、 b (dB) は定数) を満たし、 a (dB/nm) が可変であれば、傾き $dL/d\lambda$ の調整が容易である。この λ_c がこの所定の波長帯域内に設定されていると、所定の波長帯域内の波長 λ_c での損失 L が常に一定となり、 λ_c における雑音特性を重視した設計が可能となる。

【0011】

多重信号光に含まれる信号光の数を検出する波数モニタをさらに備え、制御手段は波数モニタで検出された信号光の数に応じて増幅後の光パワーの目標値を調整することが好ましい。信号光の数が増減することで入力信号光のパワーが変動しても各信号光のパワーを一定に保つことができる。

【0012】

光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ の調整は、例えば、1)光増幅部に入力される光パワーを検出する入力光パワー検出手段の検出結果に基づいて行ってもよく、2)光増幅部の利得を検出する利得検出手段の検出結果に基づいて行ってもよく、3)光増幅部から出力された光に含まれる信号光の各波長、出力を検出して、検出された最短、最長波長のパワー偏差に基づいて行ってもよく、あるいは、4)光増幅部から出力された光の所定の波長帯域の両端外側におけるそれぞれの ASE 光レベルを検出する ASE 光レベル検出手段で検出したそれぞれの ASE 光レベルのレベル差が一定となるように行ってもよい。光増幅部から出力された光に含まれる信号光の各波長、出力を検出し、検出された最短波長の光より短波長側と最長波長の光より長波長側におけるそれぞれの ASE 光レベルを検出して調整に用いてもよい。3)、4)の場合は、多重信号光とともに送られてくる最短、最長波長に関する情報

を基にしてパワー偏差やASE光レベルを検出する波長を決定してもよい。

【0013】

さらに、光フィルタの所定の波長帯域における全透過率を最大に調整した際にその損失が波長によらずに略一定となるよう調整することが好ましい。このようにすると、特に入力多重信号光のパワーが小さい場合の雑音指数を低減することが可能である。

【0014】

これらいずれの構成、方法によっても光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ の調整が容易となり、本発明の目的を実現することができる。

【0015】

本発明に係る光増幅器における光フィルタは、(1)多重信号光を導波させ、上流側から順に第1～第6の領域に区分される主光路と、(2)この主光路の第1及び第3の領域に対しては伝搬光が光結合する程度に近接し、主光路の第2の領域に対しては伝搬光が光結合しない程度に離隔されて配置され、主光路の第2の領域に対応する領域の長さが主光路と異なる第1の副光路と、(3)主光路の第4及び第6の領域に対しては伝搬光が光結合する程度に近接し、主光路の第5の領域に対しては伝搬光が光結合しない程度に離隔されて配置され、主光路の第5の領域に対応する領域の長さが主光路と異なる第2の副光路と、(4)主光路の第2の領域及び第1の副光路の主光路の第2の領域に対応する領域の少なくとも一方に配置されている第一の温度調整器と、(5)主光路の第5の領域及び第2の副光路の主光路の第5の領域に対応する領域の少なくとも一方に配置されている第二の温度調整器とを備えていることが好ましい。

【0016】

一方、本発明に係る光増幅方法においては、(1)多重信号光を導波させ、上流側から順に第1～第6の領域に区分される主光路と、(2)主光路の第1及び第3の領域に対しては伝搬光が光結合する程度に近接し、主光路の第2の領域に対しては伝搬光が光結合しない程度に離隔されて配置され、主光路の第2の領域に対応する領域の長さが主光路と異なる第1の副光路と、(3)主光路の第4及び第6の領域に対しては伝搬光が光結合する程度に近接し、主光路の第5の領域に対しては伝搬光が光結合しない程度に離隔されて配置され、主光路の第5の領域に対応する領域の長さが主光路と異なる第2の副光路と、を備える光フィルタを用い、利得の波長依存性を低減する工程は、第1の副光路と主光路のこれに対応する領域の少なくとも一方及び第2の副光路と主光路のこれに対応する領域の少なくとも一方の温度を調整することにより光フィルタの傾き $dL/d\lambda$ を調整することが好ましい。

【0017】

第一、第二の副光路とそれぞれに対応する主光路とはそれぞれマッハツェンダ型の干渉装置を形成している。それぞれのマッハツェンダ型干渉装置において少なくとも一方の光路の温度を調整することでそれぞれの主光路における損失の波長依存性を調整することが可能となり、本発明に係る光増幅器及び光増幅方法における光フィルタとして好適である。

【0018】

【発明の実施の形態】

以下、添付図面を参照して本発明の好適な実施の形態について詳細に説明する。説明の理解を容易にするため、各図面において同一の構成要素に対しては可能な限り同一の参照番号を附し、重複する説明は省略する。

【0019】

(第1の実施形態)

図1は、第1の実施形態に係る光増幅器100の概略構成図である。本実施形態に係る光増幅器100は、光入力端101から光出力端102へ順に、光カプラ130、前段光増幅部111、光フィルタ140および後段光増幅部112が直列接続されている。光増幅器100はさらに、前段光増幅部111、後段光増幅部112のそれぞれに励起光を供給する励起光源121と122、さらにこれらの励起光源121、122の光量と光フィ

ルタ 140 の損失スペクトルを制御する制御回路 150 を備える。

【0020】

光カプラ 130 は、光入力端 101 へ入力された多重信号光の一部を分岐して制御回路 150 へと出力し、残部を前段光増幅部 111 へと出力する。前段光増幅部 111 は、励起光源 121 から励起光が供給され、光カプラ 130 から送られた多重信号光を一括光増幅して出力する。光フィルタ 140 は、この多重信号光の波長帯域において全損失が略一定であって、該波長帯域において損失の波長に対する傾きが可変である損失スペクトルを有している。後段光増幅部 112 は、励起光源 122 から励起光が供給され、光フィルタ 140 から送られた多重信号光を一括光増幅して、光出力端 102 へ出力する。

【0021】

制御回路 150 は、光カプラ 130 により分岐された多重信号光のパワーを検出する。そして、制御回路 150 は、その入力多重信号光パワーに基づいて、出力多重信号光のパワーが一定の目標値になるよう、励起光源 121 および 122 それぞれから出力される励起光のパワーを制御する。また、制御回路 150 は、その入力多重信号光パワーに基づいて、光フィルタ 140 の損失スペクトルを制御する。

【0022】

図 2 は、前段光増幅部 111 および励起光源 121 の説明図である。前段光増幅部 111 は、増幅用光ファイバ 113、光カプラ 114、光アイソレータ 115 および 116 を含む。光カプラ 114 は、励起光源 121 から出力された励起光を増幅用光ファイバ 113 へ導入するとともに、増幅用光ファイバ 113 から出力された信号光を通過させる。光アイソレータ 115 および 116 それぞれは、順方向へ光を通過させるが、逆方向へは光を通過させない。

【0023】

また、増幅用光ファイバ 113 は、励起光源 121 から出力された励起光により励起可能な蛍光物質が添加された光導波路である。添加される蛍光物質は、好適には希土類元素であり、より好適には Er 元素である。Er 元素が添加される場合、波長 1.55 μm 帯の信号光を増幅することができるので好適である。また、このとき、励起光源 121 から出力され増幅用光ファイバ 113 へ供給される励起光の波長は 1.48 μm または 0.98 μm が好適である。後段光増幅部 112 および励起光源 122 も同様の構成である。

【0024】

次に、光フィルタ 140 の好適な 1 実施例について説明する。図 3 は、光フィルタ 140 の説明図である。この光フィルタ 140 は、例えば石英からなる基板 10 上に形成された平面光導波路回路であって、主光路 20、第 1 の副光路 21、第 2 の副光路 22、第 1 の温度調整手段としてのヒータ 51、および、第 2 の温度調整手段としてのヒータ 53 を備えている。

【0025】

主光路 20 は、基板 10 の一方の端面にある光入力端 11 に入射した光を基板 10 の他方の端面にある光出力端 12 まで導波させて出射させる光導波路であり、6 つの領域 A ~ F を有している。

【0026】

主光路 20 と第 1 の副光路 21 とは、第 1 の領域 A と第 3 の領域 C で近接して互いに光結合され、それぞれ第 1 の光カプラ 31 と第 2 の光カプラ 32 とを形成している。第 2 の領域 B においては、主光路 20 の光路長が第 1 の副光路 21 の光路長より長く設定され、それぞれの光路が離隔して配置されている。このようにして、主光路の第一の領域 A から第三の領域 C に至る部分と第一の副光路 21 とは非対称型のマッハツェンダー型干渉回路を形成している。以下、この部分を第 1 のマッハツェンダ干渉回路 41 と呼ぶ。

【0027】

同様に、主光路 20 と第 2 の副光路 22 とは、第 4 の領域 D と第 6 の領域 F で近接して互いに光結合され、それぞれ第 3 の光カプラ 33 と第 4 の光カプラ 34 とを形成している。第 5 の領域 E においては、主光路 20 の光路長が第 2 の副光路 22 の光路長より短く設

10

20

30

40

50

定され、それぞれの光路が離隔して配置されている。このようにして、主光路の第４の領域Ｄから第６の領域Ｆに至る部分と第２の副光路２２とは非対称型のマッハツェンダ型干渉回路を形成している。以下、この部分を第２のマッハツェンダ干渉回路４２と呼ぶ。

【００２８】

ヒータ５１は、主光路２０の第２の領域Ｂ上に設けられている。このヒータ５１は、主光路２０の温度を調整することにより、第１のマッハツェンダ干渉回路４１における主光路２０と第１の副光路２１との光路長差を調整して、第１のマッハツェンダ干渉回路４１の透過特性を調整する。また、ヒータ５３は、主光路２０の第５の領域Ｅ上に設けられている。このヒータ５３は、主光路２０の温度を調整することにより、第２のマッハツェンダ干渉回路４２における主光路２０と第２の副光路２２との光路長差を調整して、第２のマッハツェンダ干渉回路４２の透過特性を調整する。これらヒータ５１および５３は制御回路１５０により制御される。

10

【００２９】

なお、第１の副光路２１の第２の領域Ｂ上あるいは第２の副光路２２の第５の領域Ｅ上にヒータを設けて、ヒータ５１、ヒータ５３のそれぞれの代わりとしても、両方にヒータを設置してもよい。また、ヒータに替えて冷却用のペルチエ素子を設けてもよい。

【００３０】

この光フィルタ１では、光入力端１１に入力し主光路２０を経て光出力端１２から出力される光に対する損失スペクトル $L(\lambda)$ [dB]は、光カプラ３１および３２による主光路２０と第１の副光路２１との間の光結合に基づく第１のマッハツェンダ干渉回路４１の透過特性 $T_1(\lambda)$ 、および、光カプラ３３および３４による主光路２０と第２の副光路２２との間の光結合に基づく第２のマッハツェンダ干渉計４２の透過特性 $T_2(\lambda)$ の双方に従う。

20

【００３１】

一般に非対称型のマッハツェンダ干渉回路の透過特性 $T(\lambda)$ は、

【００３２】

【数１】

$$T(\lambda) = 1 - A \sin^2 \left(\frac{2\pi(\lambda - \lambda_0)}{\Delta\lambda} + \Delta\phi \right) \quad \cdots(1)$$

30

なる式で表される。ここで、 λ [nm]は光の波長である。 A 、 λ_0 [nm]および $\Delta\lambda$ [nm]それぞれはマッハツェンダ干渉回路の構造パラメータにより決定される定数である。また、 $\Delta\phi$ は温度調整により設定され得る位相値である。そして、光フィルタ１の損失スペクトル $L(\lambda)$ は、

【数２】

$$L(\lambda) = -10 \log \{ T_1(\lambda) \cdot T_2(\lambda) \} \quad \cdots(2)$$

なる式で表される。以下、光フィルタ１の損失スペクトル $L(\lambda)$ の波長に対する傾き $dL(\lambda)/d\lambda$ を単に傾き $S(\lambda)$ と呼ぶ。

【００３３】

40

光フィルタ１は、第１のマッハツェンダ干渉回路４１および第２のマッハツェンダ干渉回路４２それぞれの定数 A 、 λ_0 および $\Delta\lambda$ の各値を適切に設計することにより、所定の波長帯域中の所定波長 λ_1 における損失 $L(\lambda_1)$ を略一定に維持したまま、ヒータ５１、５３による温度調整により位相値 $\Delta\phi$ の値を変更することにより、その波長帯域における損失 $L(\lambda)$ および傾き $S(\lambda)$ を変更することが可能である。後述するように、この光フィルタ１の傾き $S(\lambda)$ は波長 λ に対する依存性が小さく、光フィルタ１の損失 $L(\lambda)$ の波長 λ に対する線形性が優れている。

【００３４】

本発明者は各マッハツェンダ干渉計４１および４２それぞれの構造パラメータを代えた数種の光フィルタ１を作成し、その傾き $S(\lambda)$ の可変性を確認したのでその結果について

50

以下に説明する。

【 0 0 3 5 】

次表は、各実施例における構造パラメータを示している。

【表 1】

		実施例A	実施例B	実施例C
第1のマッハツェンダ干渉回路	A	0.60	0.85	0.60
	λ_0	1550	1550	1590
	$\Delta \lambda$	200	200	200
第2のマッハツェンダ干渉回路	A	0.50	0.60	0.5
	λ_0	1600	1600	1640
	$\Delta \lambda$	200	200	200

10

【 0 0 3 6 】

いずれの実施例の光フィルタにおいてもそれぞれのマッハツェンダ干渉回路 4 1、4 2 における光路長差は、基準温度の場合でそれぞれ $12.5\lambda_0$ 、 $9.5\lambda_0$ に設定した。そのうえで、ヒータ 5 1、5 3 を作動させて主光路 2 0 の第 2 の領域 B と第 5 の領域 E の温度をそれぞれ調整することより、マッハツェンダ干渉回路 4 1 および 4 2 それぞれの位相値 $\Delta \phi$ を符号が逆で絶対値が相等しくなるように $0 \text{ rad} \sim 0.595 \text{ rad}$ の範囲で変化させた。

20

【 0 0 3 7 】

図 4 ~ 図 6 は、それぞれ実施例 A ~ C の光フィルタの損失スペクトルを位相値 $\Delta \phi$ の各値について示したグラフである。

【 0 0 3 8 】

実施例 A は、図 4 から分かるように、波長帯域 $1535 \text{ nm} \sim 1565 \text{ nm}$ 中の中心波長 1550 nm 付近で損失が $2.73 \text{ dB} \sim 3.01 \text{ dB}$ と略一定であり、その波長帯域において傾き $S(\lambda)$ を $0 \sim 5.05 \text{ dB} / 30 \text{ nm}$ の範囲で設定可能である。また、損失 2.89 dB (@ 中心波長 1550 nm) の点を通る直線との偏差の最大値は、位相値 $\Delta \phi$ が 0.595 rad であるときに $\pm 0.21 \text{ dB}$ であって十分に小さく、傾き $S(\lambda)$ は線形性に優れていることが確認された。

30

【 0 0 3 9 】

実施例 B は、図 5 から分かるように、波長帯域 $1535 \text{ nm} \sim 1565 \text{ nm}$ 中の中心波長 1550 nm 付近で損失が $3.65 \text{ dB} \sim 3.98 \text{ dB}$ と略一定であり、その波長帯域において傾き $S(\lambda)$ を $0 \sim 10 \text{ dB} / 30 \text{ nm}$ の範囲で設定可能である。また、損失 0.87 dB (@ 中心波長 1550 nm) の点を通る直線との偏差の最大値は、位相値 $\Delta \phi$ の値が 0.314 rad であるときに $\pm 0.87 \text{ dB}$ であって十分に小さく、傾き $S(\lambda)$ は線形性に優れていることが確認された。

40

【 0 0 4 0 】

実施例 C は、図 6 から分かるように、波長帯域 $1575 \text{ nm} \sim 1605 \text{ nm}$ 中の中心波長 1590 nm 付近で損失が $2.73 \text{ dB} \sim 3.01 \text{ dB}$ と略一定であり、その波長帯域において傾き $S(\lambda)$ を $0 \sim 5 \text{ dB} / 30 \text{ nm}$ の範囲で設定可能である。また、損失 2.89 dB (@ 中心波長 1590 nm) の点を通る直線との偏差の最大値は、位相値 $\Delta \phi$ の値が 0.595 rad であるときに $\pm 0.21 \text{ dB}$ であって十分に小さく、傾き $S(\lambda)$ は線形性に優れていることが確認された。

【 0 0 4 1 】

なお、主光路 2 0 の第 2 の領域 B と第 5 の領域 E のそれぞれの温度をある一定のバイア

50

ス温度に調整したときに位相値 $\Delta \varphi$ の値が 0 になるようにマッハツェンダ干渉計 4 1 および 4 2 それぞれの構造パラメータを適切に設定すると、主光路 2 0 の第 2 の領域 B と第 5 の領域 E のそれぞれの温度を上記バイアス温度より上昇させることにより位相値 $\Delta \varphi$ の値を $0 \sim +0.595 \text{ rad}$ の範囲で変化させることができ、また、主光路 2 0 の第 2 の領域 B と第 5 の領域 E のそれぞれの温度を上記バイアス温度より降下させることにより位相値 $\Delta \varphi$ の値を $-0.595 \text{ rad} \sim 0$ の範囲で変化させることができる。このようにして位相値 $\Delta \varphi$ の値を $-0.595 \text{ rad} \sim +0.595 \text{ rad}$ の範囲で変化させることにより、所定波長帯域において傾き $S(\lambda)$ を $\pm \text{adB/nm}$ の範囲で設定し得る。

【0042】

また、ヒータ 5 1、5 3 に替えてペルチエ素子を設けて、主光路 2 0 の第 2 の領域 B と第 5 の領域 E のそれぞれの温度を上昇または降下させることにより、位相値 $\Delta \varphi$ の値を正だけでなく負にも設定することができる。このようにして位相値 $\Delta \varphi$ の値を $-0.595 \text{ rad} \sim +0.595 \text{ rad}$ の範囲で変化させることもできる。

【0043】

このように図 3 に示される光フィルタ 1 4 0 においては、光入力端 1 1 に入力し主光路 2 0 を経て光出力端 1 2 から出力される光に対する損失スペクトルは、光カプラ 3 1 および 3 2 による主光路 2 0 と第 1 の副光路 2 1 との間の光結合に基づく第 1 のマッハツェンダ干渉回路 4 1 の透過特性、および、光カプラ 3 3 および 3 4 による主光路 2 0 と第 2 の副光路 2 2 との間の光結合に基づく第 2 のマッハツェンダ干渉回路 4 2 の透過特性により定まる。この光フィルタ 1 4 0 は、基板 1 0 上に集積化されて小型である点で好適であり、また、挿入損失が小さい点でも好適である。

【0044】

次に、第 1 の実施形態に係る光増幅器 1 0 0 の動作を説明するとともに、第 1 の実施形態に係る光増幅器制御方法を説明する。図 7 A ~ 図 7 D は、第 1 の実施形態に係る光増幅器 1 0 0 の動作を説明する図である。光フィルタ 1 4 0 の損失スペクトル (図 7 A) は、前述したように信号光の波長帯域中の所定波長 λ_1 において損失 $L(\lambda_1)$ が略一定であって、該波長帯域において傾き $S(\lambda)$ が可変である。そして、その傾き $S(\lambda)$ は、入力信号光パワーをモニタする制御回路 1 5 0 により制御される。

【0045】

入力信号光パワーが所定値であり、前段光増幅部 1 1 1 および後段光増幅部 1 1 2 における信号光の光増幅の利得が波長に依らず略一定である場合 (図 7 B)、これに対して入力信号光パワーが所定値より小さくなったときには、前段光増幅部 1 1 1 および後段光増幅部 1 1 2 における信号光の光増幅の利得は、制御回路 1 5 0 により制御されて大きくなり、その結果、波長が長いほど利得が小さくなり、利得は波長に対して依存性を生ずる (図 7 C)。しかし、このときに、光フィルタ 1 4 0 の傾き $S(\lambda)$ は制御回路 1 5 0 により制御されて、波長が長いほど損失が小さく設定される。したがって、前段光増幅部 1 1 1 および後段光増幅部 1 1 2 の利得の波長依存性が光フィルタ 1 4 0 の損失の波長依存性により相殺されて、その結果、光増幅器 1 0 0 全体の利得特性は、波長に依らず略一定となり、利得の平坦性が維持される (図 7 D)。

【0046】

以上のように、本実施形態では、入力信号光パワーが変動しても、出力信号光パワーを一定の目標値に維持するとともに、光増幅器 1 0 0 全体の利得平坦性を維持することができる。また、光フィルタ 1 4 0 の損失が信号光の波長帯域中の所定波長において略一定であるので、雑音指数が劣化することがない。なお、本実施形態において、光フィルタ 1 4 0 は、後段光増幅部 1 1 2 の後段にあってもよい。

【0047】

(第 2 の実施形態)

図 8 は、本発明に係る第 2 の実施形態である光増幅器 2 0 0 の概略構成図である。なお、この図には、光増幅器 2 0 0 の前段に設けられる光増幅器 2 0 0 A も示されている。本実施形態に係る光増幅器 2 0 0 は、光入力端 2 0 1 から光出力端 2 0 2 へ順に、光カプラ

10

20

30

40

50

２３０、前段光増幅部２１１、光フィルタ２４０および後段光増幅部２１２が直列に接続されている。光増幅器２００はさらに、前段光増幅部２１１、後段光増幅部２１２のそれぞれに励起光を供給する励起光源２２１と２２２、これらの励起光源２２１と２２２と光フィルタ２４０の損失スペクトルを制御する制御回路２５０を備える。

【００４８】

それぞれの構成は、図１に示される第１の実施形態と同様であるが、制御回路２５０の構成が相違する。制御回路２５０は、光カプラ２３０により分岐された入力信号光のパワーを検出する点では第１の実施形態と同様であるが、前段の光増幅器２００Ａから送信されてきた前段の光増幅器２００Ａの出力信号光パワーに関する情報が入力されている。そして、制御回路２５０は、前段の光増幅器２００Ａの出力信号光パワーおよび自己の入力信号光パワーに基づいて必要利得を算出し、出力信号光のパワーが一定の目標値になるよう、励起光源２２１および２２２それぞれから出力される励起光のパワーを制御する。また、制御回路２５０は、その必要利得に基づいて、光フィルタ２４０の損失スペクトルを制御する。

10

【００４９】

具体的には、必要利得が大きくなると、前段光増幅部２１１および後段光増幅部２１２における信号光の光増幅の利得は、波長が長いほど小さくなり、利得に波長依存性が生じる。しかし、このときに、光フィルタ２４０の傾き $S(\lambda)$ は、制御回路２５０により制御されて、波長が長いほど損失が小さくなるよう設定される。したがって、前段光増幅部２１１および後段光増幅部２１２の利得の波長依存性が光フィルタ２４０の損失スペクトルにより相殺されて、その結果、光増幅器２００全体の利得特性は、波長に依らず略一定となり、利得の平坦性が維持される。

20

【００５０】

以上のように、本実施形態でも、入力信号光パワーが変動しても、出力信号光パワーを一定の目標値に維持するとともに、光増幅器２００全体の利得平坦性を維持することができる。また、光フィルタ２４０の損失が信号光の波長帯域中の所定波長において略一定であるので、雑音指数が劣化することがない。なお、本実施形態において、光フィルタ２４０は、後段光増幅部２１２の後段にあってもよい。

【００５１】

（第３の実施形態）

30

図９は、本発明に係る第３の実施形態である光増幅器３００の概略構成図である。本実施形態に係る光増幅器３００は、光入力端３０１から光出力端３０２へ順に、光カプラ３３１、前段光増幅部３１１、後段光増幅部３１２、光フィルタ３４０および光カプラ３３２が直列に接続されている。光増幅器３００はさらに、前段光増幅部３１１、後段光増幅部３１２のそれぞれに励起光を供給する励起光源３２１と３２２、これらの励起光源３２１と３２２と光フィルタ３４０の損失スペクトルを制御する制御回路３５０を備える。

【００５２】

各構成要素の構成は、図１に示される第１の実施形態と同様であるため、説明は省略する。本実施形態では、光出力側に光カプラ３３２を有し、分岐した出力光の一部を制御回路３５０に導いている点と、光フィルタ３４０が多段増幅器３１１、３１２の下流に配置されている点が特徴である。

40

【００５３】

制御回路３５０は、光カプラ３３１により分岐された入力信号光のパワーを検出するとともに、光カプラ３３２により分岐された出力信号光のパワーを検出する。そして、制御回路３５０は、出力信号光のパワーが一定の目標値になるよう、励起光源３２１および３２２それぞれから出力される励起光のパワーを制御する。また、制御回路３５０は、出力信号光パワーおよび入力信号光パワーに基づいて利得を算出し、その利得に基づいて、光フィルタ３４０の損失スペクトルを制御する。

【００５４】

具体的には、利得が大きくなると、前段光増幅部３１１および後段光増幅部３１２にお

50

ける信号光の光増幅の利得は、波長が長いほど小さくなり、利得に波長依存性が生じる。しかし、このときに、光フィルタ340の傾き $S(\lambda)$ は、制御回路350により制御されて、波長が長いほど損失が小さくなるよう設定される。したがって、前段光増幅部311および後段光増幅部312の利得の波長依存性が光フィルタ340の損失スペクトルにより相殺されて、その結果、光増幅器300全体の利得特性は、波長に依らず略一定となり、利得の平坦性が維持される。

【0055】

以上のように、本実施形態でも、入力信号光パワーが変動しても、出力信号光パワーを一定の目標値に維持するとともに、光増幅器300全体の利得平坦性を維持することができる。また、光フィルタ340の損失が信号光の波長帯域中の所定波長において略一定であるので、雑音指数が劣化することがない。なお、本実施形態において、光フィルタ340は、前段光増幅部311と後段光増幅部312との間にあってもよい。

【0056】

(第4の実施形態)

図10Aは、本発明に係る第4の実施形態である光増幅器400の概略構成図である。実施形態に係る光増幅器400は、光入力端401から光出力端402へ順に、前段光増幅部411、後段光増幅部412および光フィルタ440が直列に接続されている。光増幅器400はさらに、前段光増幅部411、後段光増幅部412のそれぞれに励起光を供給する励起光源421と422、光出力端402から出力される各波長の信号光のパワーをモニタするスペクトルモニタデバイス460、励起光源421と422の励起光出力と光フィルタ440の損失スペクトルを制御する制御回路450を備える。

【0057】

本実施形態ではスペクトルモニタデバイス460を有している点が特徴である。その他の構成は他の実施形態と同様であるためその説明を省略する。

【0058】

このスペクトルモニタデバイス460は、光出力端402から出力される光の一部が分岐されて導かれるか、図3に示した構造を有する光フィルタ440の第2の副光路22から出力される光が導かれ、導かれた光を分波する。このスペクトルモニタデバイス460は、例えばアレイ導波路回折格子(AWG: Arrayed-Waveguide Grating)により実現することができ、この場合には、図3に示した構造を有する光フィルタ440とともに共通の基板上に形成することができるので装置全体の小型化が可能である。

【0059】

制御回路450は、スペクトルモニタデバイス460により分波された各波長の出力信号光のパワーを検出する。そして、制御回路450は、出力信号光のパワーが一定の目標値になるよう、励起光源421および422それぞれから出力される励起光のパワーを制御する。また、制御回路450は、各波長の出力信号光パワーの偏差に基づいて、その偏差が小さくなるように光フィルタ440の損失スペクトルを制御する。

【0060】

ここで、光フィルタ440およびスペクトルモニタデバイス460の好適な1実施例について説明する。図11は、光フィルタ440およびスペクトルモニタデバイス460の説明図である。光フィルタ440およびスペクトルモニタデバイス460は共通の基板10A上に形成されている。光フィルタ440は、図3に示した構成と同様の構成である。スペクトルモニタデバイス460は、基板10A上に形成されたAWGである。すなわち、スペクトルモニタデバイス460は、入力側スラブ導波路61、複数のチャネル導波路を有するアレイ導波路部62、出力側スラブ導波路63および出力側チャネル導波路64₁~64_Nを備える。

【0061】

入力側スラブ導波路61には、光フィルタ440の第2の副光路22から出力される光が入力され、その光をアレイ導波路部62の各チャネル導波路それぞれへと分波して出力する。アレイ導波路部62の複数のチャネル導波路それぞれは、入力側スラブ導波路61

から出力側スラブ導波路 6 3 までの光路長が互いに異なり、導波する光に対して互いに異なる位相を与える。出力側スラブ導波路 6 3 は、アレイ導波路部 6 2 の複数のチャネル導波路それぞれから光を入力して、出力側チャネル導波路 6 4₁ ~ 6 4_Nそれぞれへ出力する。

【 0 0 6 2 】

出力側チャネル導波路 6 4₁ ~ 6 4_Nそれぞれへ出力される光は、光フィルタ 4 4 0 の第 2 の副光路 2 2 から出力された光が分波された各波長の信号光である。そこで、制御回路 4 5 0 は、スペクトルモニタデバイス 4 6 0 の出力側チャネル導波路 6 4₁ ~ 6 4_Nそれぞれへ出力された各波長の信号光のパワーを検出して、この各波長の信号光パワーの偏差が小さくなるように、光フィルタ 4 4 0 の損失傾斜を制御する。なお、制御回路 4 5 0 は、

10

【 0 0 6 3 】

図 1 0 B は、この第 4 の実施形態の変形形態であり、光入力端 4 0 1 側に入力信号光中の監視光成分を分岐する光カプラ 4 3 0 を備えている点が図 1 0 A に示される第 4 の実施形態と相違する。監視光には、例えば、送られてくる多重信号光中の最短波長と最長波長に関する情報が含まれており、制御回路 4 5 0 はこれらの情報を読み出して、パワー偏差を求める 2 つの波長を決定する。

【 0 0 6 4 】

20

以上のように、本実施形態でも、入力信号光パワーが変動しても、出力信号光パワーを一定の目標値に維持するとともに、光増幅器 4 0 0 全体の利得平坦性を維持することができる。また、光フィルタ 4 4 0 の損失が信号光の波長帯域中の所定波長において略一定であるので、雑音指数が劣化することがない。更に、特に本実施形態では、光フィルタ 4 4 0 の損失傾斜がフィードバック制御されるので、安定した動作が可能である。

【 0 0 6 5 】

(第 5 の実施形態)

図 1 2 は、本発明に係る第 5 の実施形態である光増幅器 5 0 0 の概略構成図である。本実施形態に係る光増幅器 5 0 0 は、第 1 の実施形態に係る光増幅器 1 0 0 において前段光増幅部 1 1 1 と光フィルタ 1 4 0 との間に利得等化器 1 7 0 を挿入したものである。利得

30

【 0 0 6 6 】

次に、第 5 の実施形態に係る光増幅器 5 0 0 の動作、すなわち、第 5 の実施形態に係る光増幅方法を説明する。図 1 3 A ~ 図 1 3 C は、第 5 の実施形態に係る光増幅器 5 0 0 の動作を説明する図である。入力信号光パワーが所定値であるときであっても、前段光増幅部 1 1 1 および後段光増幅部 1 1 2 の利得スペクトルは、厳密には一定とはならず、前段光増幅部 1 1 1 および後段光増幅部 1 1 2 に固有の利得波長依存性を有している (図 1 3 A)。利得等化器 1 7 0 は、このときの前段光増幅部 1 1 1 および後段光増幅部 1 1 2 の利得スペクトルの形状と同様の形状の損失スペクトルを有している。したがって、出力される光のスペクトルは平坦なものとなる。

40

【 0 0 6 7 】

これに対して入力信号光パワーが所定値より小さくなったときには、前段光増幅部 1 1 1 および後段光増幅部 1 1 2 における信号光の光増幅の利得は、制御回路 1 5 0 により制御されて大きくなり、その結果、波長が長いほど利得が小さくなり利得の波長依存性が変化する (図 1 3 B)。しかし、このときに、光フィルタ 1 4 0 の損失スペクトルは制御回路 1 5 0 により制御されて、波長が長いほど損失が小さくなるよう設定される。

【 0 0 6 8 】

50

前段光増幅部 1 1 1 および後段光増幅部 1 1 2 から出力された光は、その固有の利得波長依存性が利得等化器 1 7 0 により等化され、図 1 3 C に示されるように利得 (dB) が波長に対して線型に変化するように調整される。その後、残存する利得の波長依存性は、光フィルタ 1 4 0 の損失スペクトルにより相殺される。その結果、光増幅器 5 0 0 全体の利得特性は、波長に依らず略一定となり、その平坦性が維持される。

【 0 0 6 9 】

以上のように、本実施形態でも、入力信号光パワーが変動しても、出力信号光パワーを一定の目標値に維持するとともに、光増幅器 5 0 0 全体の利得平坦性を維持することができる。特に本実施形態では、光フィルタ 1 4 0 に加えて利得等化器 1 7 0 を設けたことにより、光増幅器 5 0 0 全体の利得平坦性は優れたものとなる。また、光フィルタ 1 4 0 の損失が信号光の波長帯域中の所定波長において略一定であるので、雑音指数が劣化することがない。なお、本実施形態において、光フィルタ 1 4 0 および利得等化器 1 7 0 の双方または何れか一方は、後段光増幅部 1 1 2 の後段にあってもよい。もちろん、第 2 ~ 第 4 の実施形態に係る光増幅器の何れに利得等化器を挿入しても同様の効果が得られる。

【 0 0 7 0 】

(第 6 の実施形態)

図 1 4 A は、本発明に係る第 6 の実施形態である光増幅器 3 0 0 a の概略構成図である。本実施形態に係る光増幅器 3 0 0 a は、図 9 に示される第 3 の実施形態の光増幅器 3 0 0 の最終段の光カプラ 3 3 2 に代えて A S E 光レベル検出器 3 3 3 を設置している点のみが相違する。

【 0 0 7 1 】

この A S E 光レベル検出器 3 3 3 は、光フィルタ 3 4 0 から出力された信号光の所定波長帯域の両端外側に位置するそれぞれの波長の自然放光 (A S E 光) レベルを検出するものであり、制御回路 3 5 0 は、検出した長波長側と短波長側の A S E 光レベル差を一定に維持するように光フィルタ 3 4 0 の損失スペクトルを調整する。A S E 光のレベル差を利用して制御することで制御が容易になるという利点がある。

【 0 0 7 2 】

多重信号光とともに多重信号光中の最短波長と最長波長に関する情報を有する監視光が送られてくる場合には、光カプラ 3 3 1 で分岐された監視光を制御回路 3 5 0 で受信してこれらの情報を読み出し、A S E 光レベル検出器 3 3 3 で A S E 光レベルを検出する波長を読み出した最短波長と最長波長の外側近傍の波長となるよう設定すると、多重信号光中の最短波長と最長波長が一定でない場合にも安定した光増幅を行える。

【 0 0 7 3 】

図 1 4 B は、本発明に係る第 6 の実施形態の変形形態である光増幅器 6 0 0 の概略構成図である。具体的な構成は、光入力端 6 0 1 から光出力端 6 0 2 へ順に、光カプラ 6 3 0 、前段光増幅部 6 1 1 、後段光増幅部 6 1 2 、光カプラ 6 3 1 および光フィルタ 6 4 0 が直列接続されて構成されている。光増幅器 6 0 0 はさらに、前段、後段の各光増幅部 6 1 1 、 6 1 2 のそれぞれに励起光を供給する励起光源 6 2 1 、 6 2 2 、さらにこれらの励起光源 6 2 1 、 6 2 2 の光量と光フィルタ 6 4 0 の損失スペクトルを制御する制御回路 6 5 0 を備える。また、光カプラ 6 3 1 で分岐された光はスペクトルモニタデバイス 6 6 0 と可変バンドパスフィルタ 6 7 0 に導かれる。可変バンドパスフィルタ 6 7 0 を透過した光は受光素子 6 8 0 によって検出される。スペクトルモニタデバイス 6 6 0 と受光素子 6 8 0 の出力は制御回路 6 5 0 へと送られる。各増幅部 6 1 1 、 6 1 2 と光フィルタ 6 4 0 の構成は第 1 の実施形態と同一であるため説明を省略する。

【 0 0 7 4 】

本実施形態では、スペクトルモニタデバイス 6 6 0 で信号光中の最短波長の光と最長波長の光のそれぞれの波長を検出する。そして、可変バンドパスフィルタ 6 7 0 を制御することで出力多重信号光に含まれるこれらの波長の外側、すなわち、検出された最短波長より短波長側と検出された最長波長より長波長側のそれぞれの A S E 光レベルを受光素子 6 8 0 により検出する。そして、制御回路 6 5 0 は、検出した長波長側と短波長側の A S E

光レベル差を一定に維持するように光フィルタ 640 の損失スペクトルを調整する。この場合も制御が容易になるという利点がある。

【0075】

(第7の実施形態)

図15は、本発明に係る第7の実施形態である光増幅器700の概略構成図である。この光増幅器700は、分散補償ファイバ(DCF: Dispersion Compensating Fiber)770を内蔵している。

【0076】

具体的な構成は、光入力端701から光出力端702へ順に、光カプラ730、前段光増幅部711、光フィルタ740、中段光増幅部712、利得等化器760、DCF770および後段光増幅部713が直列接続されて構成されている。光増幅器700はさらに、前段、中段、後段の各光増幅部711~713のそれぞれに励起光を供給する励起光源721~723、さらにこれらの励起光源721~723の光量と光フィルタ740の損失スペクトルを制御する制御回路750を備える。各増幅部711~713と光フィルタ740の構成は第1の実施形態と同一であるため説明を省略する。

【0077】

本発明者は損失スペクトルを調整可能な光フィルタを用いた本実施形態の光増幅器700の雑音特性改善効果を確認するため、従来一般的であった全損失率のみを調整する可変光減衰器を光フィルタとして搭載した場合との比較実験を行った。

【0078】

実験では、 -28 dBm/c h ~ -12 dBm/c h の16dBのダイナミックレンジの入力レベルに対する雑音特性を測定した。可変光減衰器を用いる場合、一般的に16dBもの入力ダイナミックレンジへの対応は困難であるため、 -28 dBm/c h ~ -20 dBm/c h と -20 dBm/c h ~ -12 dBm/c h の2種に分けてこれらを組み合わせ使用した場合も合わせて測定した。

【0079】

測定結果を図16に示す。ここで、○が可変光減衰器を用いて全レンジを1種の光増幅器で増幅した場合、△が可変光減衰器を用いて全レンジを分割して2種の光増幅器でそれぞれ増幅した場合、□が本発明に係る第7の実施形態の光増幅器で増幅した場合の入力レベルに対する雑音特性を示している。

【0080】

本発明に係る光増幅器では、全ての入力レベルにおいて雑音特性が改善され、さらに適応できるダイナミックレンジが拡大できる効果のあることが確認された。

【0081】

次に、光フィルタの変形例について説明する。図4~図6に示される損失スペクトルを有する光フィルタは、使用波長帯域の中心波長付近で損失が略一定であったが、損失が略一定となる波長 λ_1 が短波長側あるいは長波長側にずれていてもよい。図17に損失スペクトルを示す光フィルタは、この波長 λ_1 が波長帯域の最短波長に位置している。そして、損失スペクトルは $L_0(\lambda)$ と $L_2(\lambda)$ の間で可変でき、光フィルタへ入力される光のパワーが最大のときには、損失スペクトルが $L_2(\lambda)$ となるよう調整し、入力される光のパワーが最小のときには、損失が波長によらずに一定となる $L_0(\lambda)$ となるよう調整する。その中間のときには $L_1(\lambda)$ となるよう調整する。このようにすることで、特に短波長帯域での雑音指数劣化を抑制できる。また、入力されるパワーが最小のときには、透過率が最大となるので、特に入力光のパワーが小さいときの雑音特性回前効果がある。

【0082】

(第8の実施形態)

図18は、本発明に係る第8の実施形態である光増幅器300bの概略構成図である。本実施形態に係る光増幅器300bは、図9に示される第3の実施形態の光増幅器300の最終段の光カプラ332からの分岐先に出力多重信号光中に含まれる信号光の数(波数)を検出する波数モニタ335が配置されている点が相違する。

【 0 0 8 3 】

入力多重信号光中に含まれる波数が変動すると、個々の信号光のパワーは変動せずとも入力多重信号光のパワーは変動する。そのため、単に増幅後の出力多重信号光のパワーを一定に維持しようとする、波数が減少した場合には個々の信号光のパワーが増大し、波数が増加した場合には個々の信号光のパワーは減少して変動することになる。

【 0 0 8 4 】

本実施形態では、制御回路 3 5 0 b が波数モニタ 3 3 5 の出力をもとにして波数に比例して出力多重信号光のパワーの目標値を調整する。これにより、波数が変動した場合も個々の信号光の増幅後の光パワーを一定に維持することができる。

【 0 0 8 5 】

本発明は、上記実施形態に限定されるものではなく種々の変形が可能である。例えば、増幅用光ファイバに添加される蛍光物質は、E r 元素に限られるものではなく、他の希土類元素（例えば、T m 元素、P r 元素、N d 元素等）であってもよい。増幅用光ファイバに替えて、励起光により励起可能な蛍光物質が添加された平面光導波路であってもよい。必ずしも前段光増幅部と後段光増幅部とに区分されていなくてもよく、あるいは3個以上の光増幅部を有していてもよい。

【 0 0 8 6 】

【産業上の利用可能性】

本発明に係る光増幅器、光増幅方法は特に、多重信号光を伝送する波長多重伝送システムにおいて好適に使用される。

【 0 0 8 7 】

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明に係る光増幅器の第 1 の実施形態の概略構成図である。

【図 2】 第 1 の実施形態の前段光増幅部および励起光源の説明図である。

【図 3】 第 1 の実施形態の光フィルタの説明図である。

【図 4】 光フィルタの実施例 A において位相値 $\Delta \phi$ を変更したときの損失スペクトルを示したグラフである。

【図 5】 光フィルタの実施例 B において位相値 $\Delta \phi$ を変更したときの損失スペクトルを示したグラフである。

【図 6】 光フィルタの実施例 C において位相値 $\Delta \phi$ を変更したときの損失スペクトルを示したグラフである。

【図 7】 第 1 の実施形態の光増幅器の動作を説明する図である。

【図 8】 本発明に係る光増幅器の第 2 の実施形態の概略構成図である。

【図 9】 本発明に係る光増幅器の第 3 の実施形態の概略構成図である。

【図 10】 本発明に係る光増幅器の第 4 の実施形態と、その変形形態の概略構成図である。

【図 11】 第 3 の実施形態における光フィルタおよびスペクトルモニタデバイスの説明図である。

【図 12】 本発明に係る光増幅器の第 5 の実施形態の概略構成図である。

【図 13】 本発明に係る光増幅器の第 5 の実施形態の動作を説明する図である。

【図 14】 本発明に係る光増幅器の第 6 の実施形態とその変形形態の概略構成図であり、

【図 15】 本発明に係る光増幅器の第 7 の実施形態の概略構成図である。

【図 16】 上記第 7 の実施形態と従来の光増幅器の雑音特性を比較したグラフである。

【図 17】 本発明に係る光増幅器に用いられる光フィルタの変形例の損失スペクトルを説明する図である。

【図 18】 本発明に係る光増幅器の第 8 の実施形態の概略構成図である。

【符号の説明】

1 0 ... 基板、1 1、1 0 1、2 0 1、3 0 1、4 0 1、6 0 1、7 0 1 ... 光入力端、1 2、1 0 2、2 0 2、3 0 2、4 0 2、6 0 2、7 0 2 ... 光出力端、2 0 ... 主光路、2 1

10

20

30

40

50

、 2 2 ... 副光路、 3 1 ~ 3 4、 1 1 4、 1 3 0、 2 3 0、 3 3 1、 3 3 2、 4 3 0、 6 3 0、 6 3 1、 7 3 0 ... 光カプラ、 4 1、 4 2 ... マッハツェンダ干渉回路（干渉計）、 5 1、 5 3 ... ヒータ、 6 1 ... 入力側スラブ導波路、 6 2 ... アレイ導波路部、 6 3 ... 出力側スラブ導波路、 1 0 0、 2 0 0、 3 0 0、 4 0 0、 5 0 0、 6 0 0、 7 0 0 ... 光増幅器、 1 1 1、 2 1 1、 3 1 1、 4 1 1、 6 1 1、 7 1 1 ... 前段光増幅部、 1 1 2、 2 1 2、 3 1 2、 4 1 2、 6 1 2、 7 1 3 ... 後段光増幅部、 1 1 3 ... 増幅用光ファイバ、 1 1 5 ... 光アイソレータ、 1 2 1、 1 2 2、 2 2 1、 3 2 1、 4 2 1、 6 2 1 ... 励起光源、 1 4 0、 2 4 0、 3 4 0、 4 4 0、 6 4 0、 7 4 0 ... 光フィルタ、 1 5 0、 2 5 0、 3 5 0、 4 5 0、 6 5 0、 7 5 0 ... 制御回路、 1 7 0、 7 6 0 ... 利得等化器、 3 1 0 ... 多段増幅器、 3 3 3 ... 光レベル検出器、 3 3 5 ... 波数モニタ、 4 6 0、 6 6 0 ... スペクトルモニタデバイス、 6 7 0 ... 可変バンドパスフィルタ、 6 8 0 ... 受光素子、 7 1 2 ... 中段光増幅部。

10

【図 1】

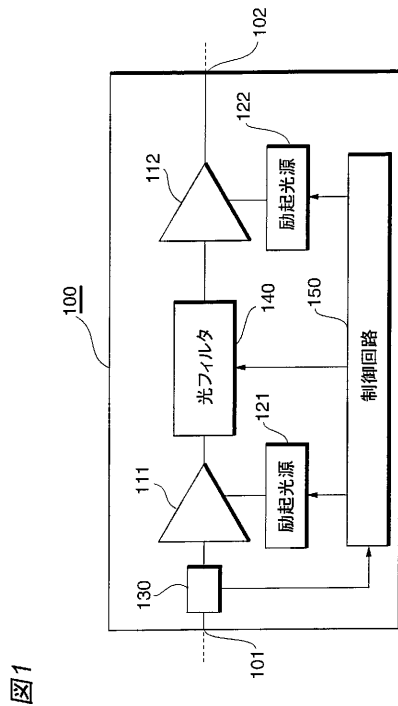
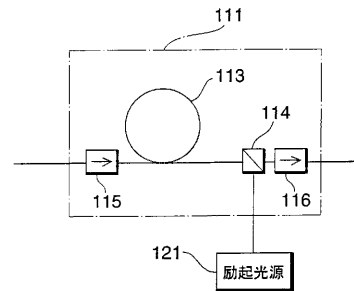


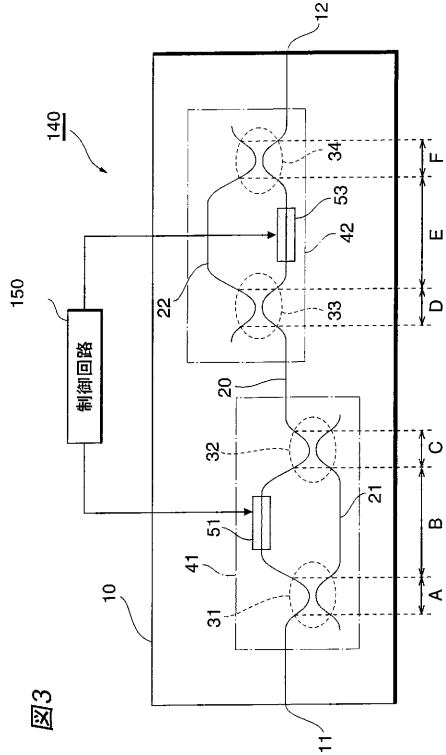
図1

【図 2】

図2



【図 3】



【図 4】

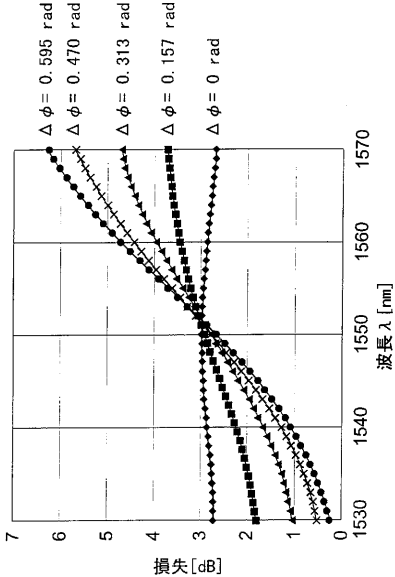


図4

【図 5】

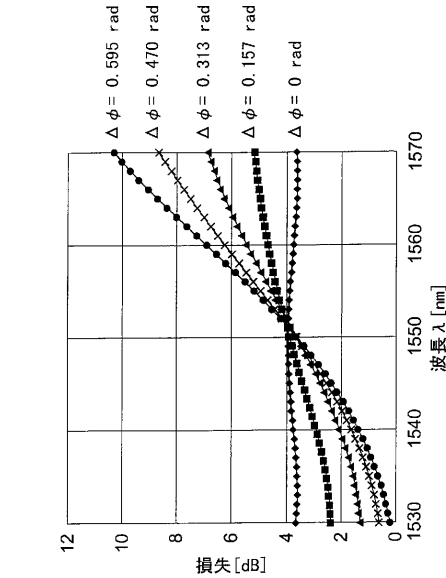


図5

【図 6】

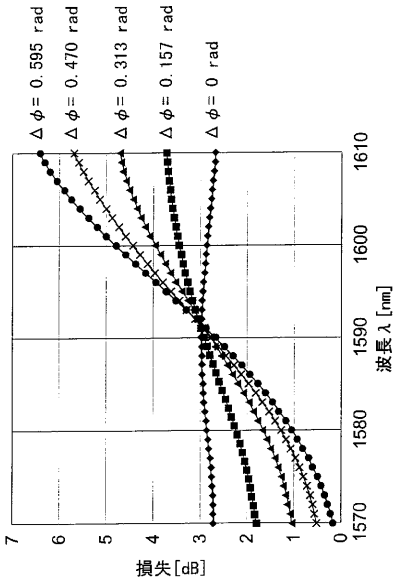
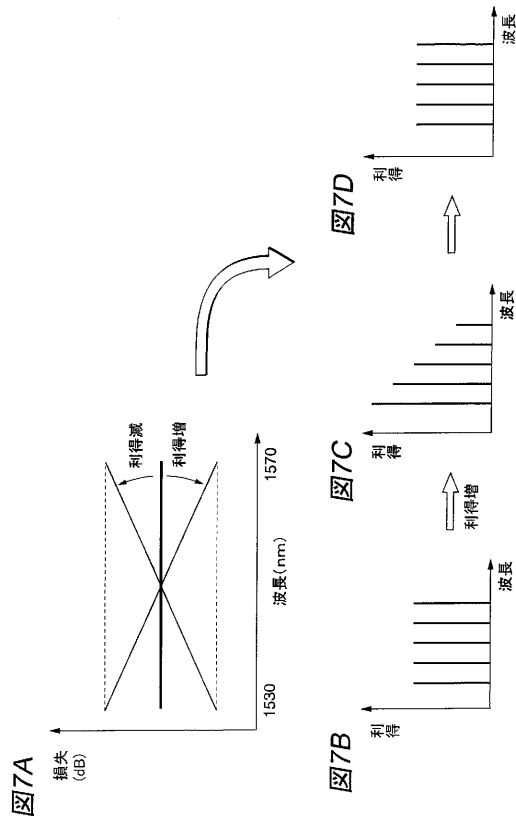
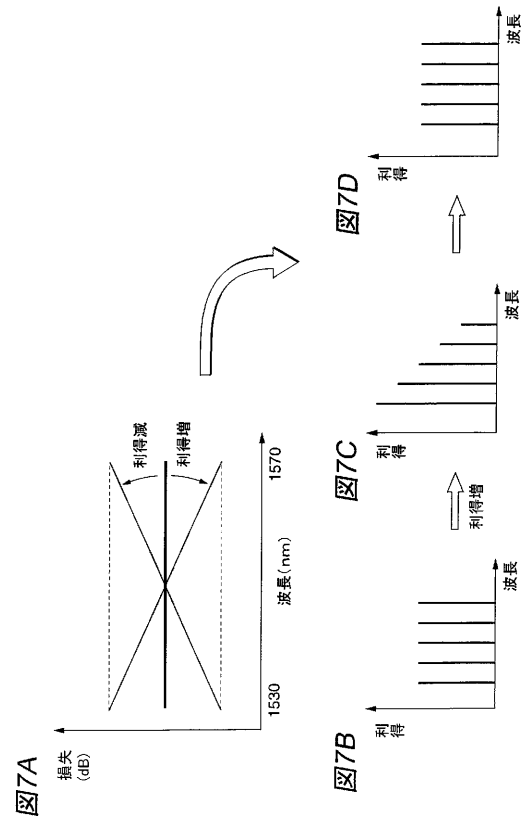


図6

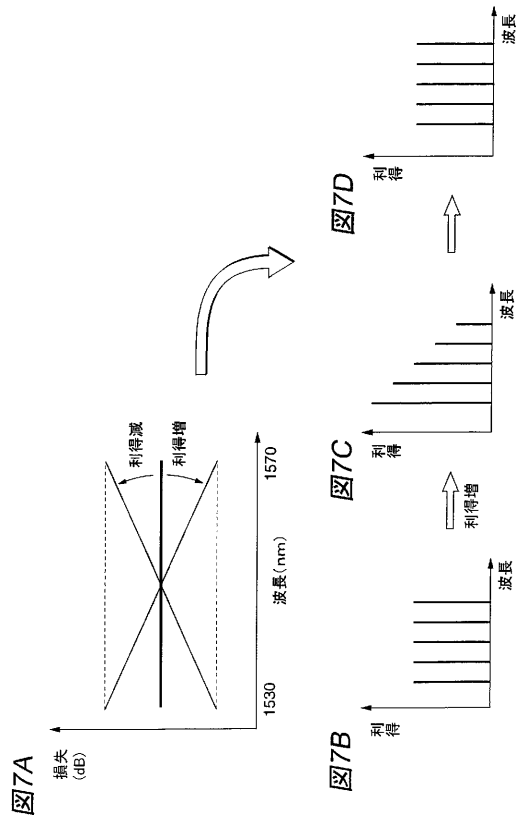
【図7A】



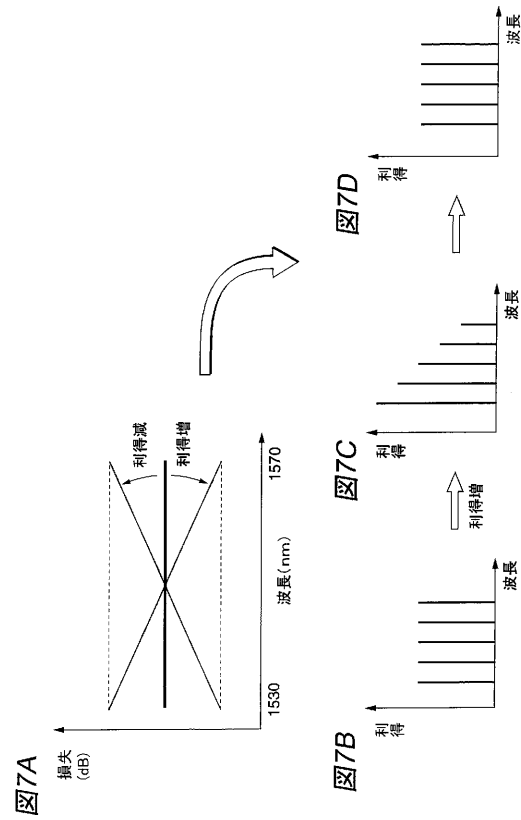
【図7B】



【図7C】



【図7D】



【図 8】

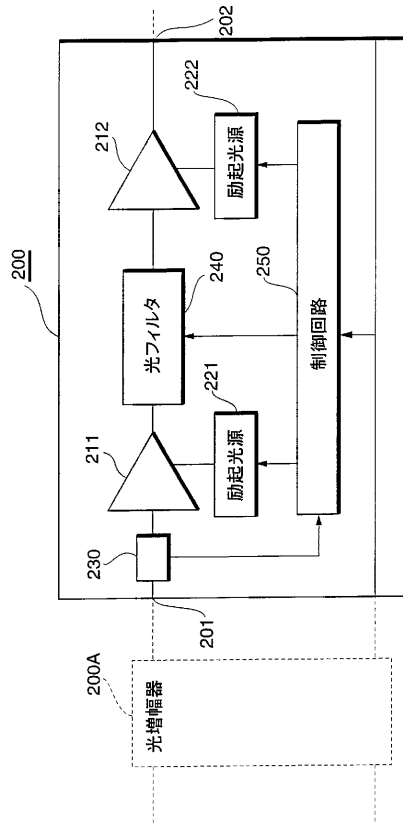


図8

【図 9】

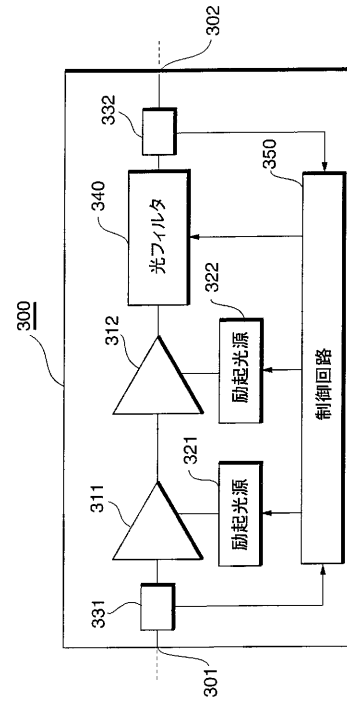


図9

【図 10 A】

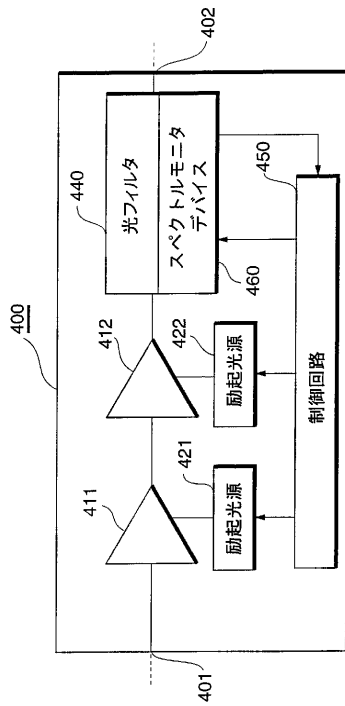


図10A

【図 10 B】

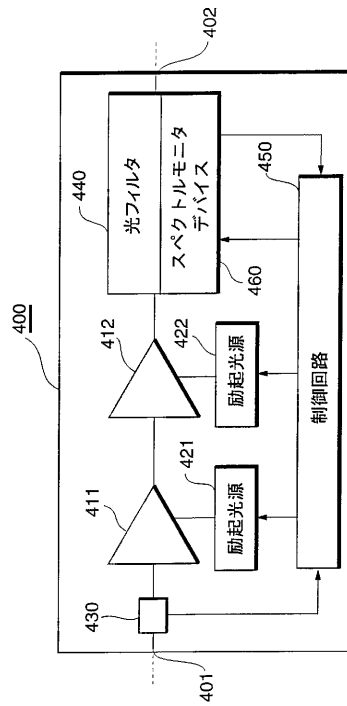


図10B

【図 1 1】

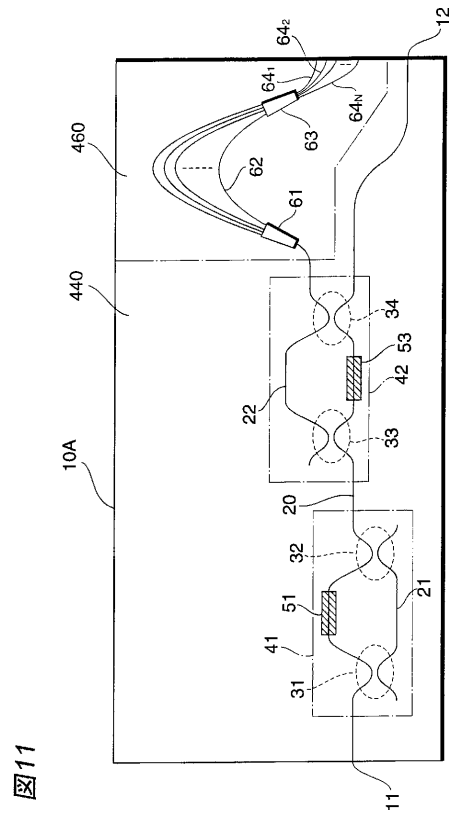
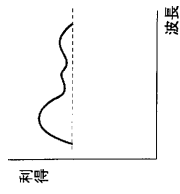


図11

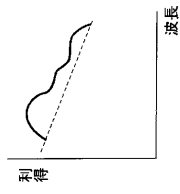
【図 1 3 A】

図13A



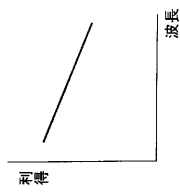
【図 1 3 B】

図13B



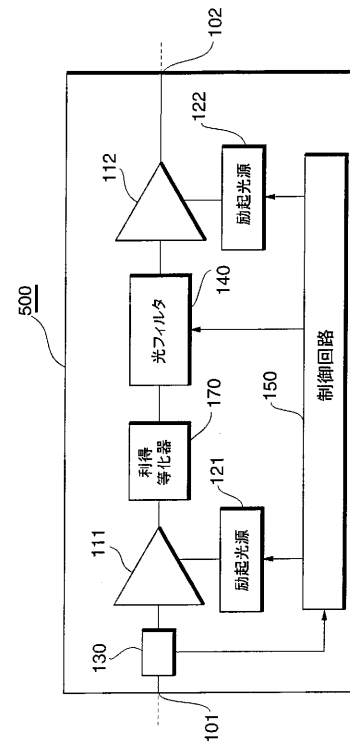
【図 1 3 C】

図13C



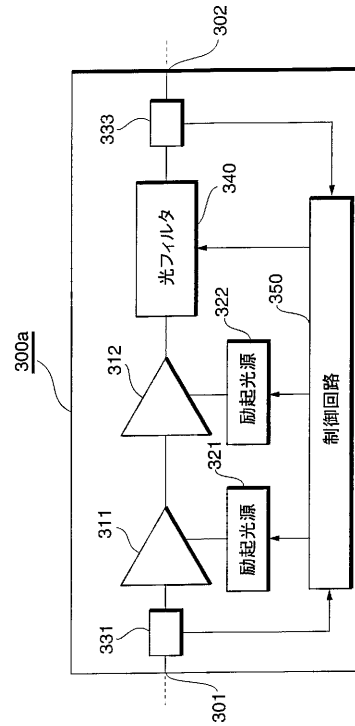
【図 1 2】

図12

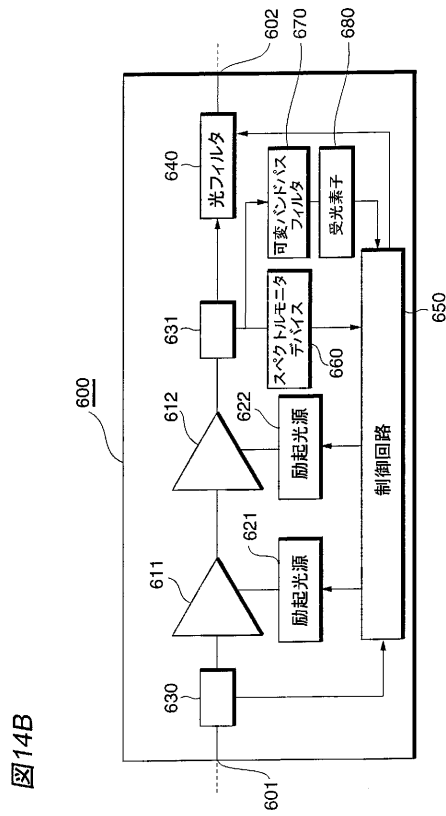


【図 1 4 A】

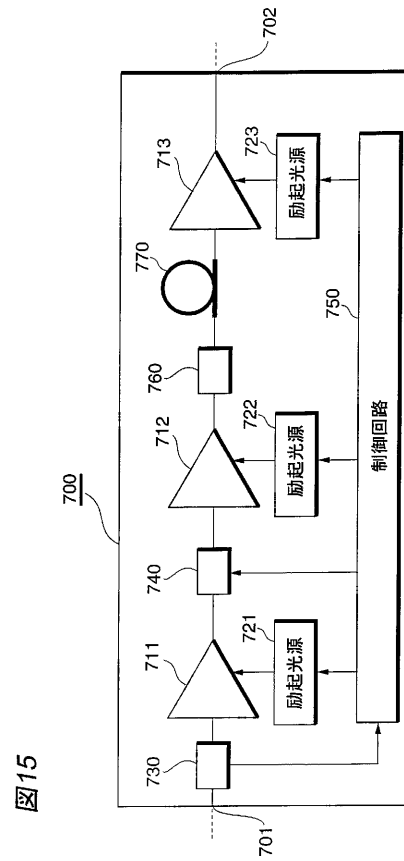
図14A



【図14B】

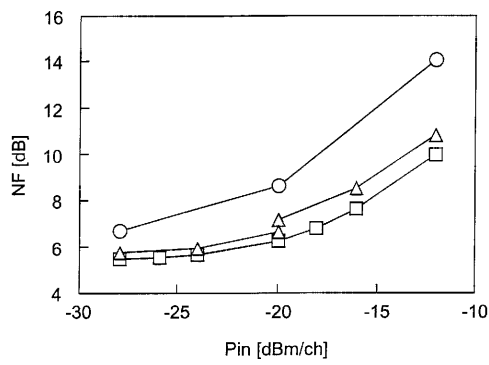


【図15】



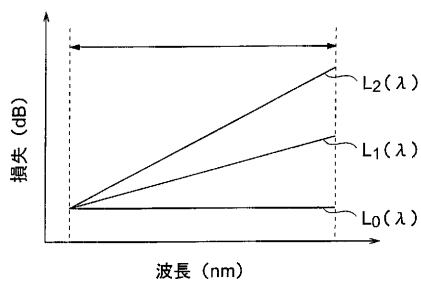
【図16】

図16



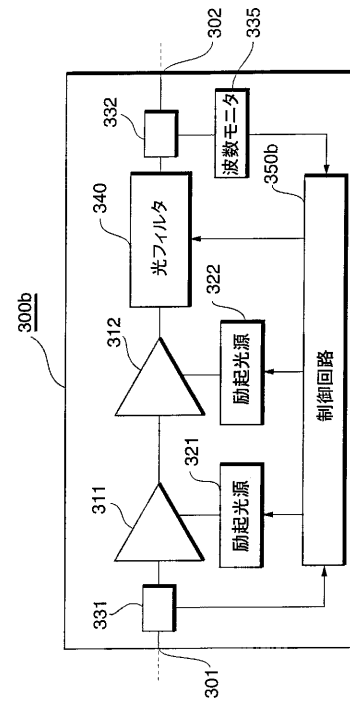
【図17】

図17



【図18】

図18



フロントページの続き

(72)発明者 畑山 均

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 笹岡 英資

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 傍島 正朗

(56)参考文献 特開平 0 4 - 1 4 7 1 1 4 (J P , A)

特開平 1 0 - 2 2 9 3 8 6 (J P , A)

特開平 0 9 - 1 9 1 3 0 3 (J P , A)

特開平 0 9 - 3 2 1 7 0 1 (J P , A)

特開平 1 0 - 2 5 6 6 3 4 (J P , A)

特開平 0 6 - 2 7 6 1 5 4 (J P , A)

特開平 0 8 - 2 1 3 6 7 6 (J P , A)

特開平 1 0 - 0 6 5 6 5 0 (J P , A)

特開平 1 0 - 0 2 2 9 2 4 (J P , A)

特開平 0 9 - 2 3 0 4 0 0 (J P , A)

F. Khaleghi, Mohsen Kavehrad, and C. Barnard, Tunable Coherent Optical Transversal EDF
A Gain Equalization, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, IEEE, 1 9 9 5 年 4 月, VOL. 13,
NO. 4, pp.581-587

T.V. Clapp, et al, Broadband variable optical attenuator in silica waveguide technology,
24th European Conference on Optical Communication, 1998 (ECOC'98), 1 9 9 8 年 9
月 2 0 日, Vol.1, pp.301-302

(58)調査した分野(Int.Cl., D B 名)

H01S 3/00 - 3/30