(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第4001621号
(P4001621)
(45)発行日　平成19年10月31日(2007.10.31)　(24)登録日　平成19年8月24日(2007.8.24)

(51)Int.Cl.　　F I
H01S 3/06 (2006.01)　　H01S 3/06
H01S 3/10 (2006.01)　　H01S 3/10　Z

請求項の数 21　(全 16 頁)

(21)出願番号　特願平7-521675
(86)(22)出願日　平成7年2月20日(1995.2.20)
(65)公表番号　特表平9-509012
(43)公表日　平成9年9月9日(1997.9.9)
(86)国際出願番号　PCT/GB1995/000346
(87)国際公開番号　WO1995/022847
(87)国際公開日　平成7年8月24日(1995.8.24)
審査請求日　平成14年2月20日(2002.2.20)
(31)優先権主張番号　94301184.1
(32)優先日　平成6年2月18日(1994.2.18)
(33)優先権主張国　英国(GB)

(73)特許権者
ブリティッシュ・テレコミュニケーションズ・パブリック・リミテッド・カンパニー
イギリス国、イーシー１エー・７エージェイ、ロンドン、ニューゲート・ストリート　８１
(74)代理人
弁理士　鈴江　武彦
(74)代理人
弁理士　村松　貞男
(74)代理人
弁理士　橋本　良郎
(74)代理人
弁理士　白根　俊郎

最終頁に続く

(54)【発明の名称】利得制御光ファイバ増幅器

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
光増幅器であって：
第１の波長で共振するように同調され、希土類ドーパント種を含む光ファイバホストを備える利得媒質を組み入れている共振光空胴（２６，２９，２８）と；
該第１の波長と異なる第２の波長を各々が有する1以上の光信号を増幅のために該光空洞の入力に接続するための手段（２１）と；
該光信号を、増幅後に、該光空洞の出力から接続するための手段（２４）と；
光ポンプエネルギーを該光空洞に与えて、該希土類ドープしたファイバホスト内に正味の密度反転を形成するようにするための手段（２２）とを備え；
該光空洞は、該正味の密度反転が該空洞の入力（２６）での高い局部的な反転からその出力（２８）での低い局部的な反転まで該空洞全体にわたって分布するように配置されていることを特徴とする光増幅器。
【請求項２】
請求項１に記載の光増幅器であって、前記光空洞が、前記信号の波長よりも前記第１の波長でより大きい損失をもたらす少なくとも１つのサイド・タップ・グレーテング（２５）を、前記空洞の出力の近くに含んでいるので、前記密度反転分布が非対称である光増幅器。
【請求項３】
前記光空洞が第１（２６）及び第２（２８）の光グレーテングによって規定されていて、

該グレーテングは該第１の波長において高い光反射率をもつ請求項１又は２に記載の光増幅器。
【請求項４】
前記第１の波長は前記ドーパント種の吸収及び放出断面積の和のピーク値の波長に実質的に等しい請求項１ないし３のいずれか１項に記載の光増幅器。
【請求項５】
請求項１ないし３のいずれか１項に記載の光増幅器であって、前記ドーパント種はプラセオジミウムをフルオライドホスト内に有していて、使用時には前記信号波長の１つが前記ドーパント種の吸収及び放出断面積の和のピークの波長に実質的に等しく、該第１の波長は１２５０ないし１３５０ｎｍの間にあり、また該信号波長は、前記増幅器の波長選択性素子によって該第１の波長から区別できるように該第１の波長から十分離れていている光増幅器。
【請求項６】
前記ドーパント種としてエルビウムを備え、かつ前記第１の波長が１５１０ｎｍから１５６０ｎｍの範囲にあることを特徴とする請求項１ないし４のいずれか１項に記載の光増幅器。
【請求項７】
前記エルビウムドーパントに対する前記ファイバホストはＡｌ／Ｇｅシリカファイバであり、かつ前記第1の波長が１．５２ないし１．５５μｍの範囲である請求項６に記載の光増幅器。
【請求項８】
前記ポンプ源が実質的に１４８０ｎｍの波長で光を提供することを特徴とする請求項６又は７に記載の光増幅器。
【請求項９】
前記光ファイバホストが主としてプラセオジミウムをドープしたフルオライドファイバであることを特徴とする請求項１ないし３のいずれか１項に記載の光増幅器。
【請求項１０】
前記第１の波長が１２５０ｎｍから１３５０ｎｍの間にあることを特徴とする請求項９に記載の光増幅器。
【請求項１１】
前記第１の波長が上記ピークから少なくとも５ｎｍのところにあるようにされていることを特徴とする請求項９又は１０に記載の光増幅器。
【請求項１２】
さらに利得平坦化光グレーテング装置を具備する請求項１ないし１１のいずれか１項に記載の光増幅器。
【請求項１３】
第１と第２のフィードバック手段により規定され、かつ第１の波長で共振するように同調されている光空洞であって、該第１のフィードバック手段は該第１の波長で反射性をもつ広帯域反射器であり、また該第２のフィードバック手段は該第１の波長で反射性をもつ狭帯域反射器である、光空洞と；
該光空洞の光経路内に用意されている希土類ドーパント種を組み入れた光ファイバ利得媒質と；
該第１の波長とは異なる第２の波長で光入力信号を該光空洞内に接続するための入力ポートと；
増幅された該入力信号が該空洞から出るときに経由する出力ポートと；
定常状態のレーザ作用を支持する正味の密度反転を作るために、該利得媒質をポンプする光源と、を備え；
該光空洞は、該正味の密度反転が該空洞の該入力ポートにおける高い局部的な反転から該出力ポートにおける低い局部的な反転まで該空洞全体にわたって分布されるように配置され、また該第１の波長は実質的に該ドーパント種の吸収及び放出断面積の和のピークにあ

るように配置されていることを特徴とする光増幅器。
【請求項１４】
前記出力ポートが前記第２のフィードバック手段を含み、該第２のフィードバック手段は前記第２の波長で低い反射率を有する請求項１３に記載の光増幅器。
【請求項１５】
前記第２のフィードバック手段は、前記第１の波長で、少なくとも９０％の反射率を有する請求項１３又は１４に記載の光増幅器。
【請求項１６】
前記増幅器が、上記第２のフィードバック手段の下流に、前記第１の波長で伝送損失を提供し、かつ前記第２の波長では前記第1の波長よりも少ない伝送損失を提供する手段を含む、請求項１３ないし１５のいずれか１項に記載の光増幅器。
【請求項１７】
光ファイバ増幅器を用いて光信号を増幅する方法であって、希土類ドーパント種を含み、かつ第１の波長で共振するように同調された光空洞内に組み入れられた、光ファイバホストを、密度反転を作るためにポンプするステップと；該第１の波長とは異なる第２の波長で光信号を該空洞の入力端に接続するステップと；
該光空洞の出力端からの増幅され該光信号を接続するステップとを備え；
該密度反転が非対称であり、該空洞の入力から該空洞の出力に向けて高レベルからより低いレベルに降下することを特徴とする方法。
【請求項１８】
通信網における波長分割多重光信号の利得安定化増幅を提供する方法であって、該通信網の光ファイバからの該波長分割多重光信号を、該光信号のうちのいずれの信号の波長とも異なる第１の波長で共振する光空洞を含んだ、希土類がドープされた光ファイバ増幅器の入力に接続することと；
該増幅器の出力から出る増幅された該光信号を該通信網の別な光ファイバに接続することとを備え；
該光空洞は使用時に該空洞に沿って非対称の密度反転分布を有し、この分布は該増幅器入力における高い方のレベルから該増幅器出力における低い方のレベルまで降下していることを特徴とする方法。
【請求項１９】
前記第１の波長が該ドーパント種の吸収及び放出断面積の和のピークの波長と実質的に等しい請求項１７又は１８に記載の方法。
【請求項２０】
前記希土類ドーパント種がフルオライドファイバホスト内のプラセオジミウムである請求項１７ないし１９のいずれか１項に記載の方法。
【請求項２１】
前記希土類ドーパントがエルビウムである請求項１７ないし１９のいずれか１項に記載の方法。
【発明の詳細な説明】
この発明は光増幅器、とくに、それに限定されるわけではないが、希土類をドープした光ファイバ増幅器であって改善された動作特性を備えたものに関する。
希土類をドープした光ファイバ増幅器は、光通信システムにおける中継器、前置増幅器などとして理想的なものである。この種の増幅器にとって望ましい特徴に低雑音動作、偏向に敏感でないこと及び低挿入損失が含まれる。希土類ドーパントを用いることから得られる１つの大きな利点は、一般に鋭いスペクトル特徴を示すことにある。反対に、遷移金属イオンをドープした媒質は非常に広い吸収と蛍光との特徴を示す。希土類ドーパントの中で、エルビウムは、シリカファイバ中のドーパントとして使用されるときは、光通信用に好ましい１５５０ｎｍ窓でのレーザ作用性質を備え、また同様に、プラセオジミウムは好ましい１３００ｎｍ窓内で動作する。単に便宜上の理由から、エルビウムとプラセオジミウムをドープしたシリカファイバについて以下に記述していくが、ここでの記述は他の希

土類ドーパント種とホストとの構成にも等しく適用できることを強調しておく。
エルビウムにおける増幅作用遷移の上方の状態の比較的長い蛍光の寿命は、例えば半導体レーザ遷移との比較で言えることであるが、多くの重要な意味合いをもっている。１つの意味合いは次のようなことである。すなわち、エルビウムをドープしたファイバ増幅器をポンプするために使用される半導体ポンプレーザへのバイアス供給源上にある電気的雑音は、１００ｋＨｚ以下のポンプ雑音成分の低周波数で増幅器の利得にある程度の変調を生じさせる。したがって、ポンプレーザ用の電気的バイアス源は、少なくともこういつた低周波数では雑音のないものとする必要がある。別な意味合いは、エルビウムをドープしたファイバ増幅器を通る信号の伝搬が密度反転に変化を生じさせて、それ自身及び他の波長の増幅器利得に変化を生じさせることができる。この効果は利得を飽和させるのに十分なパルスについて特に目立つものである。この過程の結果、厳格なパルスの整形が生じうる。
多波長多重伝送、例えば波長分割多重（ＷＤＭ）システムでは、多重化された信号の１つによる増幅器利得の変調は、他の信号に対して低周波数クロストーク（漏話）効果を生じさせることができる。これらの効果は、チャンネルのオフ及びオンの切替えに関係する過渡的効果が他の波長に著しく妨害を加えるところでは特に顕著なものとなる。この効果は、増幅器の利得、したがって利得スペクトラムが入力信号レベルとは独立して制御される場合には、除去することができる。
独立した増幅器利得制御を実現するための既知のシステムは自動利得制御（ＡＧＣ）を光電子もしくは全光フィードバックループの形で使用し、この場合、複雑さやコストを低減するという意味では全部光のものを選ぶのがより好ましいこととなる。また、光電子フィードバックループは応答速度に限界があり、また増幅器雑音応答の面で劣った点がある。
全部光のフィードバックループを用いる入力信号に独立な増幅器利得の作成の一方法が欧州特許出願９２３００５１９．３で提供されている。この方法は半導体でポンプしたエルビウムドープのファイバ増幅器（ＥＤＦＡ）であって、増幅器の出力を増幅器の入力に接続している光フィードバックループに接続されたものを記述している。フィードバックループに接続された狭帯域幅フィルタにより、増幅されたスポンタネアス放出の選定された制御波長はファイバ増幅器の出力からファイバ増幅器の入力へ進むことができる。フィードバック信号は制御波長を有し、それはポンプの波長とは違い、増幅すべき信号の波長である。フィードバック制御信号は実際にリングレーザ構成で増幅器をロックする。よって、レーザ作用条件はフィードバック制御信号の波長とフィードバックループ内の減衰とによって制御されるのであって、ポンプ又は信号波長の入力パワーによっては制御されない。リングレーザ構成は波長選択性カップラ（ＷＳＣ）と３つの３ｄＢカップラもしくは別の３つのＷＳＣｓの使用を必要とし、製造という面からすると、複雑構成ということになる。
別な構成が論文“Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by lasing at 1480nm with photoinduced Bragg gratings written on fibre ends”, Delevaque et al., Electronic Letters, 10th June, Vol. 29, No. 12で提案されている。この構成はＥＤＦＡのファイバの両端に制御波長で書込み用Bragg反射器を含み、反射器と溶融スプライスに原因する結合損失とを除けば、信号に対して本来的に無損失の機構を備えている。
この発明の第１の特徴によると、光増幅器として次の構成のものが提案されている：
第１及び第２の反射手段で定義されている光空洞であって、第１の波長で共振するように同調され、希土類ドーパント種を含む光ファイバホストで成る利得媒質と合体された光空洞；
第１の波長とは異なる第２の波長で空洞内に光信号を結合させるための手段；
空洞からの光信号を増幅器に結合させるための手段；
利得媒質を光学的にポンプするためのポンプ手段；とで成り、
第１の波長はドーパント種の吸収及び放出断面積の和のピークの波長と実質的に等しく、エルビウムがドーパント種の場合には、第１の波長がピークの少なくとも９８％となって使用されるようにしてあることを特徴とする。

希土類元素の放出及び吸収特性はある程度までは調査されており、どの原子（もしくはそのイオン）がシリカ又はフルオライドをベースとした光ファイバ内のドーパントとしての可能性をもつかが知られている（参考文献［１］参照）。
以下にさらに詳細に記述するが、出願人は周囲の変化、例えば温度の変化に対する空洞の感度を最小とすることが、空洞の共振波長をドーパント種の吸収及び放出断面積の和のピークの近くに置くことによって可能であることを突き止めた。
ドーパント種としてのエルビウムに関して、出願人は共振空洞波長を実質的にほぼ１５３０ｎｍのピークに置くことが可能であり、かつ望ましいと判断した。その理由は、信号波長を約１５００ｎｍ～１６００ｎｍの間のどこにでもすることができるからである。
プラセオジミウムに関しては、吸収及び放出断面積の和のピークと約１３００ｎｍの最適信号伝送波長とが実質的に一致するから、この場合は共振波長をピークにもってくることは正常時には不可能である。その理由は、信号波長と共振波長とを違うものとする必要があることによる。しかし、信号波長がピークであっても、ピークと極めて接近した波長で共振が生ずるように空洞を設計することは可能である。
都合の良いことに、エルビウムを使うことはレーザ作用、したがってシリカファイバ光通信にとって重要な１５５０ｎｍ窓における増幅を支持し、またプラセオジミウムを使うことはレーザ作用、したがってシリカファイバ光通信にとって重要な１３００ｎｍ窓における増幅を支持する。他のドーパント種とホストの組合せ方は関心のあるいろいろな他の波長における利得を生み出す。例えば、ネオジウムは１３００ｎｍ窓での動作に対して可能性を示し、ツリウムは１５００ｎｍ窓における動作に対して可能性を示すことが分かっている（文献１）。
入力ポート、出力ポート及びポンプの配置については幾つかの構成があって、所望の効果を達成できる。入力信号で増幅すべきもの、又は増幅された出力信号は直接空洞に接続されるか、あるいは第１もしくは第２の反射器を介して空洞に接続される。同様に、ポンプ源も直接に、又は第１もしくは第２の反射器を介して空洞に接続される。どちらの配置を選ぶにしても、適切なカップラ（結合器）が組込まれなければならないことは明らかである。
好ましくは、この発明の光増幅器では、ポンプは入力信号と結合されて波長分割マルチプレクサ（ＷＤＭ）によって増幅され、後に結合された信号は第１の反射器を経て光空洞内に接続される。
光空洞のレーザ作用波長は反射器により固定され、反射器は求められた波長でのレーザ作用を強制する。一般に、反射器はファイバのコア内に書き込まれたグレーテング（回折格子）であり、既知の方法でファイバ増幅器のいずれかの側に書き込まれる。１つの方法は、Kashyap et al., Electronic Letters, pp. 730-731, 24 May 1990, Vol. 26, No. 11に詳述されており、その内容はここで参照に供するものとする。光グレーテングは高度に波長特有の反射率を示し、ミラーとは違って、グレーテングは光ファイバ及び光ファイバ系内に容易かつ堅牢に組み入れられる。
ポンプ手段はレーザ空洞を光学的にポンプするためのエネルギーを提供する。継続的で確実なポンプ作用のために、ポンプ源は一般にＭＱＷ構造を用いる高パワー半導体ダイオードレーザで、エルビウムを希土類ドーパントとするときに１４８０ｎｍもしくは９８０ｎｍで動作するものを用いることができる。エルビウムイオンを他のポンプ波長、例えば８０７ｎｍでポンプすることも可能である。しかし、８０７ｎｍポンプは励起状態吸収による効率の低下を受忍しなければならない。１４８０ｎｍのポンプと９８０ｎｍのポンプとでは１４８０ｎｍの方が好ましい。その理由は、標準の１５５０ｎｍファイバでは１４８０ｎｍの単一モード伝送が可能だからである。しかしながら、標準の１５５０ｎｍファイバで９８０ｎｍでの数モード動作があり、これはポンプパワーをもっと非効率に使用する結果となる。
この発明の実施例では、第１と第２の反射器との間の第２の反射器に近いところで、ファイバ内にサイド・タップ・グレーテングを組入れている。このグレーテングはレーザ作用波長で光の一部をファイバのクラッド層に接続する働きをする。これによって波長特有の

減衰が光空洞内部に組入れられ、第１と第２の反射器がともにレーザ作用波長で高い反射性をもつことができる。反射器が高い反射性をもつと、レーザ作用波長で迷光が外部から空洞内に入り込んでいくことが妨げられもする。
別な実施例では、サイド・タップ・グレーテングが外部から空洞のいずれかの側に加えられる。ファイバ内の高度に反射性をもつグレーテングでも約９５％の反射率しかもてないから、これは有用な改良となる。別なサイド・タップ・グレーテングはレーザ波長で残りの光を減衰させることができ、そうでないとこの光はレーザ空洞から網ファイバのクラッド層を通って逃げ出してしまう。
Delevaqueらによって提案されたシステムと違って、この発明の増幅器はエルビウムに対しては光通信の１５５０ｎｍの窓における動作で、またプラセオジミウムに対しては１３００ｎｍ窓における動作で最適化された制御パラメータを有している。エルビウムをドープしたファイバ増幅器についての１つの特定の例の性質についての完全な解析が提示され、ここではレーザ作用波長に対する最適値と特定信号利得に対する損失とが適用できるようにする。この解析はエルビウムをドープしたＡｌＧｅ：シリカファイバ増幅器に基づくものではあるが、他の希土類ドーパント種とホストの構成についても適用されることを当業者は評価されよう。
この発明の実施例は付属の図を参照して、例として記述していく。
図１はこの増幅器の実施例を示す。
図２はいろいろなポンプパワーに対する増幅器利得対入力信号を表すグラフである。
図３は入力信号がオンに切り替えられたとき、この発明の過渡応答を表すグラフである。
図４はエルビウムをドープしたファイバ増幅器の一例の相対的利得がいろいろな反転（インバージョンＩＮＶ）の値に対してレーザ作用波長とともにどのように変わるかを示すグラフである。
図５は１５５０ｎｍの入力信号波長に対する利得の変化対レーザ作用波長の変化を表すグラフである。
図６は１５５０ｎｍの入力信号波長での利得対レーザ作用波長を表すグラフで、単一パス空洞損失のいろいろな値に対して示してある。
図７は１５５０ｎｍの入力信号波長での利得対レーザ作用波長シフトの効果を減らすように最適化されたときのレーザ作用波長を示すグラフである。
図８は置換可能なファイバグレーテングユニットの例である。
図９はこの発明の別な実施例を示す。
図１はこの発明の実施例を示す。１５５０ｎｍ光通信窓での応用に対して、エルビウムをドープしたファイバ増幅器２９はレーザ空洞のための光利得媒質となっていて、空洞は第１の光グレーテング２６と第２の光グレーテング２８によって定義され、第１及び第２の光グレーテングは必要とされるレーザ作用波長で高い反射性を示し、かつその他の波長、特にポンプ及び入力信号波長で高い透過性を示す。この実施例では空洞のレーザ作用波長を１５２０ｎｍと規定している。ＷＤＭ２１はポート２２で入力される１４８０ｎｍのポンプを、ポート２０で入力される１５５０ｎｍ入力信号で増幅させるべきものと結合させる。結合された信号は後に第１の光グレーテング２６を介して光空洞に接続される。利得制御動作では、レーザ作用波長におけるレーザ空洞の利得はレーザ空洞の損失と等しく、レーザ作用波長とは異なる波長の信号レベルによっても、またポンプパワーレベルによっても影響されない。１５５０ｎｍで増幅されたデータ信号を第２の光グレーテング２８を介して増幅器を出て、出力ポート２４から出力される。
図１では、実施例はアイソレータ２３を含み、これは迷反射及び増幅されたスポンタネアス放出（ＡＳＥ）が増幅器から後方へ進んで前段の増幅器と干渉するおそれがあるのを防いでいる。
サイド・タップ・グレーテング２５は、動作時に、レーザ作用波長の光の一部を光ファイバのクラッド層内に接続するように働く。この部分的反射は安定なレーザ動作に必要な損失を用意する。適切なレベルの損失を用意することは、両方の光グレーテング２６，２８がレーザ作用波長で高い反射性となることができ、好ましくは高い反射性であることを意

味する。
高い反射率をもつグレーテング２６，２８がエルビウムをドープしたファイバ増幅器の周りに置かれていて光フィードバックを作り、レーザ空洞を形成している。レーザ動作条件の下では、レーザ作用波長での増幅器の利得は空洞損失によって決まる。増幅用媒質が均質に広がっていると仮定する（これは室温ではＡｌＧｅ：シリカファイバ内のエルビウムに非常に良く近似している）と、１つの波長で得られる利得をクランプすることによって利得スペクトラム内部の他の全ての波長での利得が定義される。グレーテング２６，２８はエルビウムをドープしたファイバ増幅器のいずれかの側で光ファイバのコア内に書き込まれており、３つの主な理由からフィードバック素子として使用される。第１は、増幅器を全部ファイバ装置にすることができるからであり、このことは整列問題を避け、またコストの面で利点を持つ。第２に、グレーテングが比較的狭い反射スペクトラムをもってレーザ作用波長を極めて正確に定義することができることであり、したがって光増幅器の反転も正確なレベルでクランプされる。このことは、同じ空洞損失に対してさえも、異なるレーザ作用波長が異なる全体の反転を生じさせ、したがって他の波長で異なる利得を生じさせるから重要とされる。第３に、光に感ずるグレーテングからの損失と帯域外反射のレベルとが極めて低いことであり、これは増幅器の安定動作にとって非常に重要である。
増幅器の雑音性能をできる限り低下することを確実とするためには、増幅器レーザ空洞の入力端における制御波長のパワーを最低として、局所的な反転のレベルがこの点で低下しすぎないようにすることが必要である。これを達成するには制御空洞を非対称に作り、入力付近の反射器を一体に近づけ、出力反射器又はサイド・タップ・グレーテングと高反射器との組合せが制御された利得の最適値を与えるように選ぶことである。実際の実現に当たっては、さらにサイド・タップ・グレーテング２７，３０、あるいはレーザ作用波長での別な何等かの損失源を備えて（残留レーザパワーをさらに排除するためにはレーザ空洞の外に備えるようにする）、システム内部の別なところで下流の干渉を避けるようにすることも必要とされる。この発明による制御された増幅器の基本的性能は図２に示され、ポンプのいろいろなレベルに対して増幅器利得が入力パワーでどのように変わるかを示している。
図２は典型的なエルビウムをドープしたシリカファイバの利得制御増幅器の特性を示す。この場合、増幅器は２５ｍのファイバで成り、ファイバは$SiO_2-Al_2O_3-G_2-P_2O_5$ホストガラスにエルビウムがあり、屈折率差は0.013、LP_{01}モードカットオフは1.2μｍ、コア直径が5.3μｍ、Er^{3+}濃度はピーク吸収が１５３２ｎｍで室温において6.1ｄＢ／ｍのものであった。増幅用媒質は均質に広げられるという非常によい第１次近似を仮定した。グラフは制御された信号利得レベルが、ポンプパワーが２０ｍＷ以上の時に、信号レベルがほぼ－１０ｄＢｍまでは１６ｄＢであることを示している。１３ｍＷ以下では、増幅器は制御範囲外となる。その理由は、ポンプによって作られた全体の密度反転が不足していてレーザ作用波長でのレーザ動作を維持するのに十分な利得を用意することができないからである。
ポンプパワー４７ｍＷに対しては、利得は約－２ｄＢｍ入力パワーまでは必要とされる利得（１６ｄＢ）の上下１ｄＢの範囲内に留まり、変動はこの範囲の大部分にわたって0.2ｄＢより小さい範囲であるということがグラフから分かる。
利得制御なしには、ポンプパワーのこのレベル（４７ｍＷ）では、制御されていない増幅器の小さな信号利得（すなわち、反転のレベルに与える効果が無視できる利得）は、約３０ｄＢ周辺となる。これは、この発明による利得制御機構が入力パワーレベルの広い範囲にわたって利得一定を保つ上で著しく効果的であることを示している。
さらにまた、制御された領域の範囲内でのポンプパワー変動に対して比較的感応しないという性質の利点も見ることができる。このグラフから、－１０ｄＢよりも小さな入力信号レベルに対し、２０ｍＷから４７ｍＷまでのカーブについてそれが真であることが分かる。
実際には、有用な制御された信号利得が１５５０ｎｍ周辺でほぼ１０ｄＢから２５ｄＢの利得の間であるのが適当である。しかし、制御は他の利得に対しても等しく可能である。

レーザ波長の限界は装置（デバイス）を適当に飽和させるのに十分な利得が得られるかどうかによって決められる。これについては後に特定の例について述べるが、例えば１６ｄＢの信号利得を得るには、レーザ波長は与えられた増幅器に対して約１５１０ｎｍよりも長いものでなければならない。

利得制御機構の効果の別な尺度は入力信号の過渡状態に対する増幅器の応答を見ることである。図３は入力データ信号が単純にオフにされ次にオンとされたときの応答を示す。このグラフでは、参考のために入力信号を幾つかのトレースで－１０ｄＢｍから＋２ｄＢｍまでの幾つかの異なる入力レベルについて採ったものを一緒に示した。トレースの相対的なレベルは見やすいように調節してある。制御されたトレースは入力と非常に近いところに従っており、他方、制御の範囲外のものはオーバーシュートがいろいろと変わっていることを示している。制御なしでは－１０ｄＢ信号はかなりのオーバーシュートを示す。このオーバーシュートは制御されていないファイバ増幅器内で過渡的な飽和を生じさせている。

実際には、この発明の利得制御した増幅器は最適化されることが重要となる。最適化できるパラメータの２つは空洞損失とレーザ波長である。利得制御された増幅器の可能性のある用途を評価するには環境変化に対する感度と構造パラメータとを評価することも必要とされる。この発明は利得制御されたレーザの最適化を可能とし、とくに周囲の変化に対する感度の欠如と安定性の点でそれが可能とされる。

制御された範囲での増幅器の利得はポンプパワーと信号パワーとに依存せず、レーザ空洞パラメータによってのみ決定される。空洞損失（定常状態ではレーザ波長における利得に等しい）とレーザ作用波長における変化はドープされたファイバ内の密度反転を変え、したがって増幅帯域幅をまたいで他の波長での利得を変える。利得媒質の温度変化も、レーザ利得及びそれと他の波長における利得との関係の両方に僅かに影響する。

空洞損失の変化は次のような原因で生じ得る。すなわち、ファイバもしくはグレーテング反射器の長期間劣化によるか、もしくは短期間には、温度変化が２つのグレーテング反射ピークを互いに離調させることによる。信号波長における利得の変化g_sでレーザ空洞損失γの変化によって生じたものは次式により与えられる。

$$\frac{dg_S}{d\gamma} = \frac{\sigma_{as} + \sigma_{es}}{\sigma_{al} + \sigma_{el}} = \frac{\sigma_{as}}{\sigma_{al}} R$$

ここで

式1

$$R = \frac{\left(1 + e^{\frac{h}{kT}(\nu_o - \nu_s)}\right)}{\left(1 + e^{\frac{h}{kT}(\nu_o - \nu_l)}\right)}$$

ただし、

γは単一パス空洞損失（g_1，レーザ波長における利得）、

N_tはドーパントイオン密度、

σ_{al}，σ_{as}＝レーザ及び信号波長における吸収断面積、

σ_{el}，σ_{es}＝レーザ及び信号波長における放出断面積、

γ_l，γ_s　＝レーザ及び信号周波数

γ_o　＝吸収及び放出断面積が等しくなる周波数、

h　＝プランク定数

k　＝ボルツマン定数

T　＝絶対温度（ケルビン）である。

この発明による増幅器における利得安定化動作のためには、レーザ作用が発生するためのレーザ空洞波長で十分な利得がなければならない。一度レーザ作用があると、空洞内での

レーザ光束による飽和がレーザ波長における全体の利得（２パス）と全体の空洞損失（２パス）とを等しくなるように強制する。空洞損失は空洞波長に従って選ばれて、信号波長で必要とされる利得が得られるようにする。Delevaqueらによる論文では、提供された増幅器がレーザ波長を有し、その波長が相当高い密度反転に対してほんの僅かの利得しかないスペクトルの部分にある。したがって、この増幅器の空洞損失を大きく低減させることが不可能であること、それに、たとえ損失をゼロにまで低減できたとしても、最大可能反転は依然として６５％あたりに留まり、利得抑制はほとんどないということが出願人には明らかなこととなっている。結果として、レーザ作用の停止なしには利得制御した信号入力を増大させることは不可能なのである。

この発明による増幅器の利得はレーザ波長における動作での利得によって決定される。その理由は、増幅器の利得媒質が本質的に均一であることによる。レーザの光束が存在する限り、レーザ波長における利得はレーザ空洞損失に等しいところに固定される。レーザ光束内のパワーの変化は信号パワーレベルの変化を補償する。信号パワーは、臨界レベルを越えると、レーザ動作を維持するのに必要なレベル以下に反転を低減させる。この点で、レーザ波長における利得はレーザ空洞損失により維持されたレベル以下に落ちて、レーザ作用が停止する。この臨界レベルよりも大きな信号パワーレベルでは、増幅器の性能は同等の制御されていない装置のそれと同じになる。

測定した吸収断面積データを用いて、dg_s／ｄγを図５に示すようにプロットした。図５のグラフが示すところは、Delevaqueらが提案したような、レーザ波長が１４８０ｎｍである利得制御された増幅器に対しては、空洞損失の変化０．１ｄＢは１５５０ｎｍ信号の利得に0.22ｄＢの変化をもたらす。レーザ波長の１５３０ｎｍに対する空洞損失の同じ変化は、信号利得には0.055ｄＢの変化しかもたらさない。このグラフから明らかなことは、１５２０ｎｍにおけるレーザ動作は、１４８０ｎｍにおけるよりも明らかに良くはなっているが、（我々の上記例のように）動作の最適波長ではないということである。しかしながら、動作の最適範囲が何かは提示した結果から明らかであろう。

上述のように、レーザをできるだけ放出及び吸収断面積の和のピークに近いところで動作させるのが優れて良いことは明らかである。図５に示すように、エルビウムをドープしたＡｌＧｅ：シリカファイバに対しては、これが1.52μｍから1.55μｍの間である。

レーザ波長を利得g_1を備えたレーザ空洞に対して最適化するという意味では、信号は調における利得g_sは式２で与えられる。

$$g_S = \frac{\sigma_{as}}{\sigma_{al}} R\gamma + \sigma_{as} N_t(R-1) \qquad \text{式2}$$

ここで、N_tはドーパントのイオン密度である。

シリカファイバホスト内のエルビウムイオンの密度はファイバのピーク吸収、ピーク吸収断面積、その長さ、ピーク波長モードとファイバコア内部のイオンの半径方向の分布とから計算することができる。我々の計算で使用した数値は3×10^{25}イオン／m^3である。

図６はレーザ空洞損失１～３７ｄＢに対してg_sをプロットしたものを示す。曲線の曲がりの点は、レーザ波長の変化が信号利得の変化を最小とするレーザ波長を示している。予期される利得が単一パス空洞損失の関数としてプロットされている。このグラフから、設定されている増幅器の感度を異なるレーザ動作波長を持つ同様の利得と比較することができる。例えば、信号利得２８ｄＢで動作し、９８０ｎｍでポンプされ、１４８０ｎｍでレーザ作用をする増幅器の場合には、レーザ波長の±１ｎｍのシフトで利得が0.7ｄＢ変化する。比較では、１４８０ｎｍでポンプされた増幅器でレーザ作用波長が１５３１ｎｍのものは、レーザ波長に１ｎｍの同じくシフトがあると、信号利得が0.25ｄＢ変化する。より低い１６ｄＢの信号利得で動作する装置を例にとると、１ｎｍのレーザ波長シフトに対しては0.1ｄＢよりも小さい信号利得の変化をもたらす。

式２の微分から、ある特定の利得で動作する増幅器が波長不感応となるレーザ波長を抽出することが可能である。微分は次のように表現することができる。

$$\frac{dg_S}{d\nu_l} = \sigma_{as} R \left[\frac{h}{kT} \left(\frac{g_l}{\sigma_{al}} + N_t \right) Z_{l(\nu)} - \frac{g_l}{\sigma_{al}^2} \frac{d\sigma_{al}}{d\nu_l} \right]$$

ここで、

式3

$$Z_l(\nu) = \frac{e^{\frac{h}{kT}(\nu_o - \nu_l)}}{\left(1 + e^{\frac{h}{kT}(\nu_o - \nu_l)}\right)}$$

限定された範囲について、レーザ周波数の変化で信号利得に変化がないような１又は複数のレーザ波長を一次近似に対して見つけることができる。dg_s／$d\gamma_1$＝０と置くと、次式を得て、それが図７にプロットしてある。

$$g_S = \sigma_{as} N_t \left[R \left(\frac{kT}{hZ_{l(\nu)}\sigma_{al}} \frac{d\sigma_{al}}{d\nu_l} \right)^{-1} + R - 1 \right]$$

式4

レーザ空洞を形成するために使用されるグレーテングの温度での周波数シフトは、一般に1.5μｍ付近で0.01ｎｍ／℃である。したがって、１００℃の温度シフトは波長を１ｎｍシフトさせる。図６から、質的に見て、レーザ作用波長におけるこのシフトは、図７を用いてレーザ波長を選んだ場合信号利得に対しては無視できる程度の効果を持つことになる。

ドープしたイオンの断面積の温度依存性に由来する利得の変化は小さく、室温付近の一般的な温度変動に対してはほぼ直線的である。この変化の効果は無視できるし、最適レーザ波長内の僅かなシフトによって補償することもできる。

図４は典型的なエルビウムをドープしたＡｌＧｅ：シリカファイバの相対的な利得係数のプロットである。これらのプロットは相対的な吸収及び放出断面積のデータから求められたもので、次に白色光吸収測定と側光（ファイバの側部から出るもの）の完全反転蛍光スペクトラムとで正規化されている。両端の２本の曲線の間には、いろいろな密度反転に対する相対的な利得係数がプロットされている。

曲線は特定の反転に対する帯域をまたいだ異なる波長間の関係を示し、例えば密度反転７０％、相対利得が１５２０ｎｍで約0.2で動作している増幅器は１５６０ｎｍで約0.35の利得を持つことになる。

この発明による利得制御された増幅器に対しては、レーザ作用波長と光空洞損失とが反転のレベルを決める。もし空洞損失が例えば0.4（図４における相対的な単位で）であるとすると、１５３２ｎｍのレーザ波長に対して増幅器は７２％の反転で動作し、１５２０ｎｍに対しては反転は約９０％となるが、１５１５ｎｍよりも短い波長かあるいは１５７０ｎｍよりも長い波長では、レーザ作用は生じない。その理由は、上記の波長ではシステム内の利得がレーザ作用を支持するのに不十分なことによる。

無損失でレーザ波長が１５１０ｎｍの空洞に対しては、増幅器が制御可能に動作できる最小反転は約６０％である。レーザ波長が短くなるほどこの最小反転は高くなる。例えば、もし反転７０％が望ましいときは、１４９０ｎｍよりも短い波長のレーザでこれを得ることは不可能である。

上記の性質は３レベル増幅器性質の一般的なものである。４レベル系の例を見ると、プラセオジミウムを組み入れた系ではこのような無損失空洞に基本的に制限されない。それより低いレーザ状態での吸収がないから、レーザ波長では常に何某かの利得がある。このことは、レーザ波長が利得帯域内部のどこであっても良いということを意味する。

３レベル増幅器における特定点における信号対雑音比の劣化はその点における利得媒質の密度反転によって決定される。このことは、寄生的損失機構を伴う４レベルレーザにも適用される。

上のレーザレベルに直接ポンプされる増幅器に対して、達成できる最大密度反転はポンプ源の波長によって支配され、ポンプ光束が短いほど大きな反転を得ることができる。ポンプ波長よりも長い波長でレーザ作用光束があることは、密度反転を引き下げることによって信号対雑音比を劣化させることとなる。利得制御されたレーザ空洞の設計ではこの影響を最小とすることが重要である。

増幅器の雑音性能はその入力端の条件によって支配される。レーザ光束のパワーレベルを増幅器入力端で最小とすることにより、高い密度反転がこの点で維持され、結果として全体の増幅器雑音性能が改善される。こうするためには、その主要な損失がファイバの出力端に向かって位置するようにレーザ空洞を非対称に構成し、レーザ光束が、増幅器の入力では低く、出力では高くなるようにする。こうして、空洞全体で所定の総反転を維持する一方、増幅器の入力端では高い局部的な反転を得ることが可能となる。

この非対称を達成する１つの方法は、光空洞の出力端近くにサイド・タップ・グレーテングを採用し、ファイバコアが出て来る光を特定のレーザ波長でファイバのクラッド層内に分散させるようにすることである。サイド・タップ・グレーテングの形成には、例えば上記で参照したKashyapらの文献に記述された方法を用いることができる。参考文献では、光反射グレーテングはファイバ部分を紫外光に感応させ、紫外光を用いてファイバ部分の本体に干渉パターンを刻み込むことによってファイバ部分内に書込まれる。ファイバ部分が干渉パターンに対して直交する方位に配置されると、標準的な光反射グレーテングが形成される。もしファイバ部分が干渉パターンに対して角度をもって配置されると、角度のついた、あるいはサイド・タップの、光反射グレーテングが形成される。

レーザ波長でのサイド・タップ・グレーテングは、レーザ空洞内のエルビウムをドープした増幅器と第２の光グレーテングとの間に挿入され、空洞損失を決定することになる。こうして、第１及び第２のファイバ空洞グレーテングはレーザ作用波長において２つの高い反射性を持つグレーテングとなる。高反射性グレーテング内にレーザを包含することの利点は、レーザ空洞がレーザ波長での迷光に対して感度を下げることであり、迷光は例えば他の装置からのＡＳＥや外部反射に起因して周辺の網内を伝搬している。別な利点は、レーザ空洞内のレーザ波長での光からの外部システムへの影響を低減することである。

この発明による利得制御された増幅器の主たる利点の１つは、この発明は反転が独特に定義され、単一の受動フィルタが増幅器の帯域幅にわたって増幅器の利得を等化するように構成できる点にある。

図８に示したグレーテングの構成の例を見ると、広い反射帯域幅を有する高反射グレーテング２６が増幅器の入力端で使用されている場合、レーザ波長は出力端にある狭い方の反射帯域幅グレーテング３８の反射波長によって独自に決められる。サイド・タップ・グレーテング３９は空洞損失を制御し、出力端グレーテング３８と関係する利得平坦化グレーテング４０の組は増幅器からの信号出力の波長スペクトラムを制御する。利得平坦化グレーテング４０は複数のサイド・タップ・グレーテングで成り、異なる波長で異なる量の光をファイバクラッド層内に結合して、出力光の増幅器利得スペクトラムを等化する。

別の固定利得で使用するためには、増幅器を再構成できるようにすると有用である。これをするための有効な方法は、利得変換が図８の全ての要素を単一の置換可能ユニット、すなわち増幅器と適当な取り外し可能なコネクタを含む置換可能部品として成る単一部品の置き換えで達成できるように増幅器を構成することである。

出力グレーテングをレーザ作用波長において部分的にだけ反射をするように出力グレーテングを構成することができる。実際には、これは不利得を伴う。すなわち、レーザ作用波長で動作する高効率減衰器は、レーザ作用波長の光が増幅器から後段の光学系に漏れていかないように、増幅器とレーザ空洞の外部で共働する必要がある。

一部の増幅器の始点と終点に第１及び第２の光学的グレーテングを置くことによって、全部の増幅器とまとめて安定化することができる。したがって長距離通信リンクで数十とか数百キロメータといったものが、単一の入力及びフィルタ装置と、単一の出力及びフィルタ装置と、いくつもの別な長さの増幅用ファイバとで構成される利得制御された増幅器と共働できるようになる。ここで、増幅用ファイバは網損失で決まる距離だけ離れているも

のとする。追加のフィルタをもし必要ならばチェーンの中に加えることができる。このような配置は受動的な光網（ＰＯＮ）、例えば局部的な分配網として提案されている型式のものに応用されよう。この種の分配システムはＷＤＭシステムでは極めて重要である。
一般に、ファイバ増幅器をモデル化して実際に期待される利得に関する特定の情報を得ることは、ファイバパラメータについてかなり詳しい知識を必要とする。これには関心のある全ての波長（少なくともポンプと信号について）の断面積データ、希土類イオンドーピング密度、ファイバコア内のドーピング分布、ポンプ及び信号モードのファイバコア内の分布及びファイバ長を含む。この情報が結合されて、相対利得係数（図４に示す）用の曲線でグラフがプロットできるようにする。
スケーリングファクタがこれを実際の利得に変換するのにいかほどであるかを知ることが条件となる。通常の増幅器ではこれは動作条件を意味し、増幅器の利得とその利得レベルでの反転との両方が知れていることである。
これに続いて、利得制御された装置の設計が可能となる。まずグラフ（図４）から、所望の信号利得を得るのに用いることができるレーザ波長の範囲を読み取らねばならない。利得と波長の範囲とを知ると、空洞損失に関してシステムを最適化する必要がある。最適化の第１段階はレーザ波長を選ぶことで、吸収及び放出断面積の和が最大となる波長（図５）に近づけるようにする。実際には、全ての希土類ファイバシステムに対して、吸収断面積ピークと放出断面積ピークとは非常に接近しているので、レーザ波長をそのいずれかに置くことは良い近似となる。これに加えて、もし増幅器が著しい温度変化を受けるのであれば、最適化の次の段階は信号利得（又は等価的な全体の反転）対レーザ波長（図７）の適当な最小を探すことになる。図５及び図７から、このような極小は損失最適の近くにあり、全体の安定度が確保できることになる。さらに、温度での断面積の変化が一般的な動作温度範囲内で温度に対してほぼ線形であるという事実は、付加的な小さな波長シフトで、この効果もまた最小化できることを物語っている。
この発明の利得制御された増幅器の別な用途は、飽和して使われるように特に設定された増幅器の使用である。飽和された増幅器では、増幅された信号の出力パワーはその入力値と相対的に独立したものであり、信号の増加とともに利得が減衰していることを示している。
飽和した増幅器に利得制御を加えることによって、その増幅器が提供できる最大利得は制限される。正常動作では、反転は大きな信号光束によって決定され、レーザ空洞波長でのレーザ作用はない。しかし、入力信号レベルが低下すると利得制御が働いて、高パワー増幅器における非常に高レベルとなり得るところまで利得が持ち上がることがないようにする。これはスパイク振舞いを妨げ、好ましくないレーザ発振がスプライス、マルチプレクサ及び他の網素子からの僅かな反射が原因となって突如伝送波長で開始されるという問題を回避する。
既に示したように、エルビウムをドープした増幅器について述べた詳細は例示である。他の希土類ドーパント種を別の波長範囲の動作に対して使用することができる。プラセオジミウムは一例である。
エルビウムと違って、プラセオジミウムは４レベルレーザ作用システムを有し、１３００ｎｍ遷移帯域幅内のどこででも密度反転を支持できる。したがって、１３００ｎｍ遷移内部ではレーザ作用波長についての制限はない。また、プラセオジミウムに対する利得スペクトラムは非常に対称性があり、それは吸収及び放出断面積（プラセオジミウムの場合には放出断面積のピークと等しい）の和のピークの周りの波長領域は一般に信号によって占有される。プラセオジミウムをドープした増幅器に対するレーザ作用波長は、１２５０ｎｍないし１３５０ｎｍの範囲内のどこにもとることができるが、最適レーザ作用波長は長い方の波長で生ずる傾向がある基底状態吸収（ＧＳＡ）効果を避けるために、約１２７５ｎｍである。
プラセオジミウムをドープした増幅器のレーザ作用波長を吸収及び放出断面積の和のピークに置くことが可能でないとしても、レーザ波長をできるだけピークの近くとして良い制御を得るという利点は維持される。

プラセオジミウムをドープした増幅器用に適した光ファイバホストはフッ素系ファイバであり、例えばＺＢＬＡＮファイバもしくはＺＨＢＬＡＹＬｉＮＰ（高いＮＡ値ファイバ）ファイバで５００～２０００ｐｐｍ（重量で）をドープしたものである。適切なＺＨＢＬＡＹＬｉＮＰ組成［Ｚｒ：Ｈｆ：Ｂａ：Ｌａ：Ｙ：Ａｌ：Ｎａ：Ｌｉ：Ｐｂ］はコアに対してモル百分率で［５１：０：１９：３．７：３：２．３：０：１４：７］であり、クラッドに対してモル百分率で［８．７：３９．３：１９：２．５：２：４．５：２４：０：０］である。適切なポンプ源でこのファイバ用のものはＮｄ：ＹＬＦレーザで約７００ｍＷで駆動されて、約１０４７ｎｍの光を送出するものであり、これが９５０ｎｍないし１０７０ｎｍの光のプラセオジミウムポンプ波長帯の中に良く納まっている。

図９ａ－９ｅはこの発明の別な代わりの構成を示し、この利点は自明と思われる。これらの図で破線は任意的な（オプション）配置を示すことに留意されたい。

出願人は一般にある種のドーパント、例えばエルビウムでは吸収及び放出断面積の和のピークが所望の信号伝送窓波長と一致しないこと、またそのような場合に共振波長を最適利得安定化のためのピークに置くことができることを判断した。他の種のドーパント、例えばプラセオジミウムは吸収及び放出断面積に和のピークが実質的に所望の信号伝送窓と一致する。したがって、これらのドーパント種は増幅器の共振波長はピークではなくできるだけピークの近くに置くことを求めている。

信号と共振波長との間の隔たりの量は、増幅器の空洞が波長を区別する能力又は反射器、波長選択性フィルタ、もしくはカップラで空洞共振波長を規定するもので得られる波長選択性、それに入力及び出力手段に大きく依存する。典型的な場合は、波長選択性素子、例えば光学的グレーテングは５ｎｍという近い波長差を区別することができる。したがって、１つの波長をピークに置くと、他は５ｎｍだけ離れておくことができる。しかし、波長選択性素子は１ｎｍまで離れた波長差を区別できるように示してきた。

明らかに、ＷＤＭシステムに対しては、信号が複数の波長成分で成り、全ての波長が共振波長とは異なるので、共振波長に一番近い波長成分に対して上記の制限が適用されることとなる。

参考文献：

［１］．　Rare earth doped fluorozirconate glasses for fibre devices, S. T. Davey & P. W. France, BT Technology Journal, Vol. 7, No. 1, January 1989.

【図１】

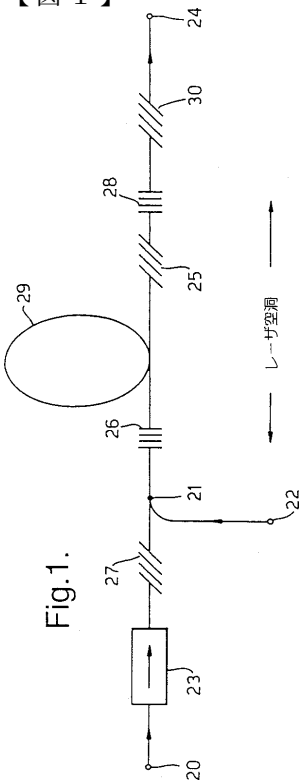


Fig.1.

【図８】

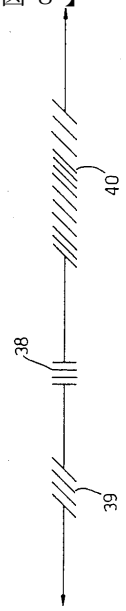
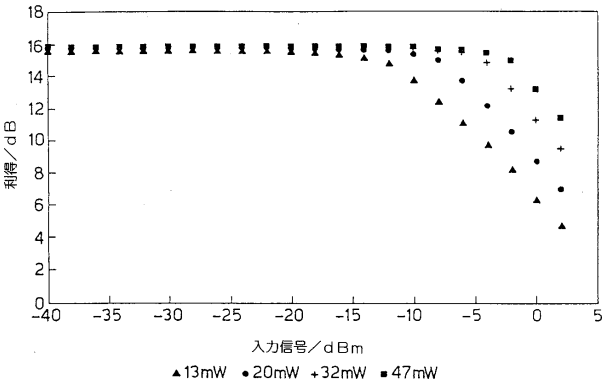


Fig.8.

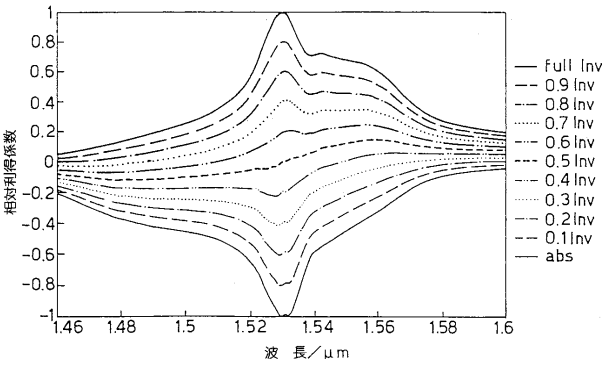
【図２】

Fig.2.



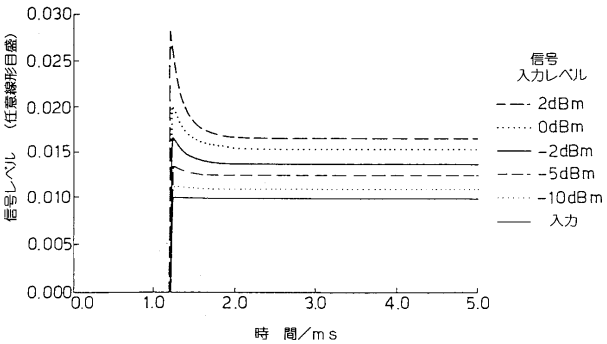
【図４】

Fig.4.



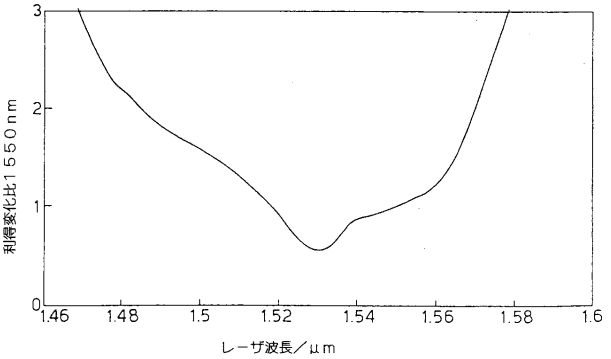
【図３】

Fig.3.



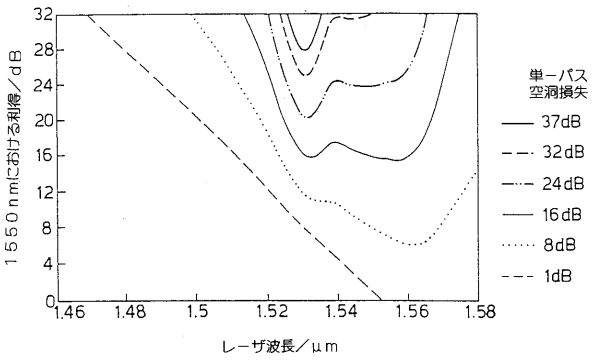
【図５】

Fig.5.



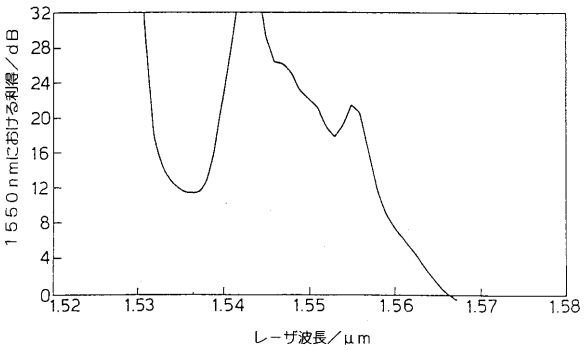
【図６】

Fig.6.



【図７】

Fig.7.



【図９】

レーザ波長における反射グレーテング

レーザ波長におけるサイド・タップ・グレーテング

利得等化用のサイド・タップ・グレーテングは
利得媒質内部又は後段のどこにも加えられる

Fig.9a.

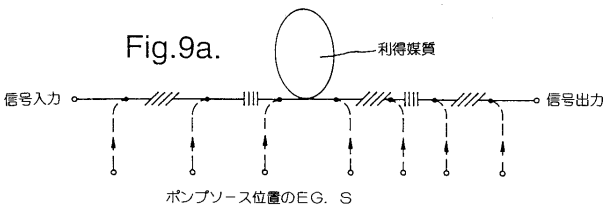


Fig.9b.

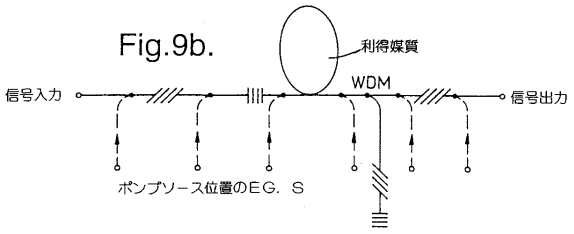


Fig.9c.

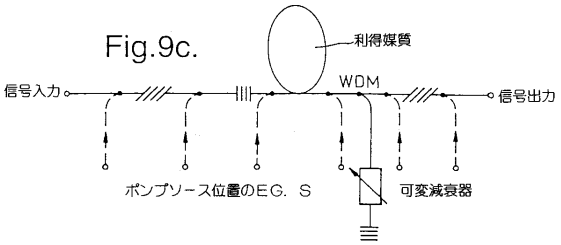


Fig.9d.

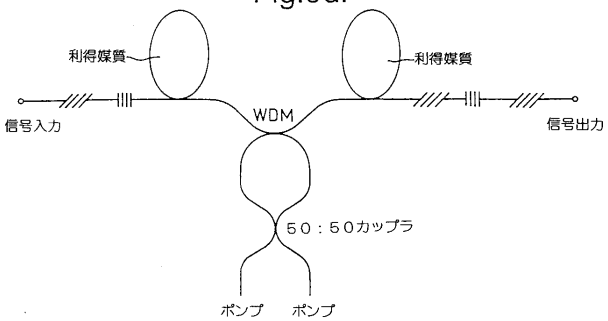
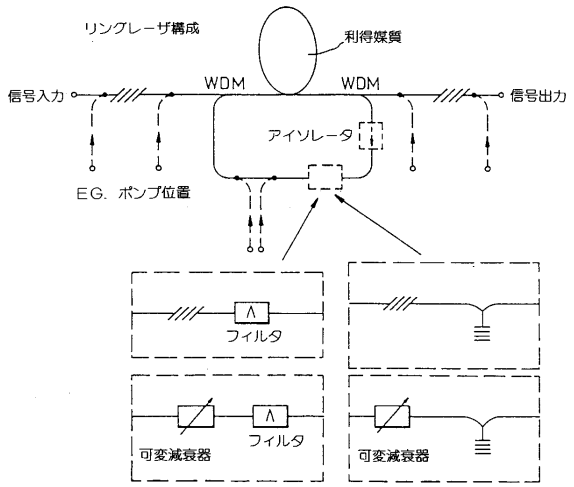


Fig.9e.



フロントページの続き

(72)発明者　マシコット、ジェニファー
イギリス国、アイピー４・１エヌ２、サフォーク、イプスウイッチ、グローブ・レーン　８９ビー
(72)発明者　ワイアット・リチャード
イギリス国、アイピー１１・９イージェイ、サフォーク、フェリックストウ、ウォルトン、マーガレット・ストリート４２

審査官　金高　敏康

(56)参考文献　特開平０５－１２９６８１（ＪＰ，Ａ）
米国特許第５２３９６０７（ＵＳ，Ａ）
Journal of Lightwave Technology, １９９２年　8月, Vol.10, No.8, p.1110-1116
Electronics Letters, １９９３年　6月１０日, Vol.29, No.12, p.1112-1114

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)
H01S 3/00 - 4/00
G02F 1/35
WPI
JSTPlus(JDream2)