

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-237613

(P2006-237613A)

(43) 公開日 平成18年9月7日(2006.9.7)

(51) Int. Cl.		F I			テーマコード (参考)	
HO 1 S	3/06	(2006.01)	HO 1 S	3/06	A	5 F 1 7 2
HO 4 B	10/16	(2006.01)	HO 4 B	9/00	J	5 K 1 0 2
HO 4 B	10/17	(2006.01)				

審査請求 未請求 請求項の数 28 O L (全 27 頁)

(21) 出願番号 特願2006-46498 (P2006-46498)
 (22) 出願日 平成18年2月23日 (2006.2.23)
 (31) 優先権主張番号 60/656, 111
 (32) 優先日 平成17年2月24日 (2005.2.24)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)
 (31) 優先権主張番号 11/274, 666
 (32) 優先日 平成17年11月15日 (2005.11.15)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)
 (31) 優先権主張番号 11/273, 868
 (32) 優先日 平成17年11月15日 (2005.11.15)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 390035493
 エイ・ティ・アンド・ティ・コーポレーション
 AT&T CORP.
 アメリカ合衆国 10013-2412
 ニューヨーク ニューヨーク アヴェニュー
 オブ ジ アメリカズ 32
 (74) 代理人 100075258
 弁理士 吉田 研二
 (74) 代理人 100096976
 弁理士 石田 純
 (72) 発明者 シャン シュウ
 アメリカ合衆国 ニュー ジャージー ミ
 ドルタウン ノルウッド ドライブ 22
 16

最終頁に続く

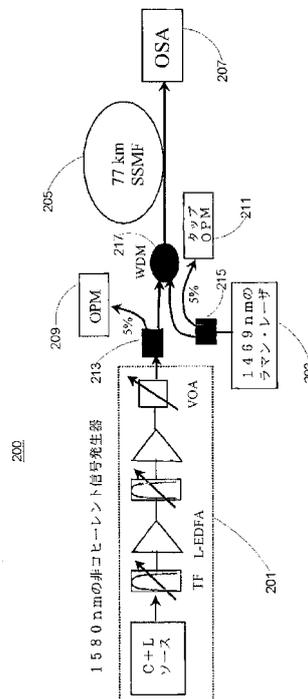
(54) 【発明の名称】 光ファイバ増幅器における高速動的利得制御

(57) 【要約】

【課題】本発明は、光ファイバ増幅器の利得を制御するための方法および装置を提供する。

【解決手段】利得回路が開ループ構成で動作し、少なくとも1つの波長領域のパワー変動を、少なくとも1つの光ポンプのためのポンプ・パワー調整に関連付けするあらかじめ決定済みの関数を使用する。入力信号パワー変動と必要ポンプ・パワー調整の間の2つの略線形の関係が、ラマン・ファイバ増幅器の制御に使用される。それぞれの略線形の関係は、特定波長領域についてのパワー変動および特定ラマン・ポンプのパワー調整を関連させる少なくとも1つの線形係数を含む。この動的利得制御・テクニックは、エルビウム・ドープ・ファイバ/導波増幅器に適用できる。また動的利得制御・テクニックは、パワー変動が1つの地理的な場所において決定され、光ポンプが別の地理的な場所において制御される逆方向ポンピング・ラマン増幅器の制御も行う。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数の光信号チャンネルをサポートする光ファイバ増幅器であって：

それぞれの光ポンプが光パワーを光ファイバ内に、割り当て済みポンプ周波数において注入する、少なくとも1つの光ポンプと；

前記複数の光信号チャンネルを少なくとも1つの波長領域に分割し、かつ前記少なくとも1つの波長領域の1つについての対応するパワー変動の表示を提供する分割ユニットと；

あらかじめ決定済みの関数を使用して前記少なくとも1つの光ポンプの1つのための対応するポンプ・パワー調整を決定する制御ユニットと；

を備え、

それにおいて前記あらかじめ決定済みの関数が、前記少なくとも1つの波長領域の1つについての前記対応するパワー変動を、前記少なくとも1つの光ポンプの前記1つのための前記対応するポンプ・パワー調整に関連付け、

前記少なくとも1つの光ポンプの前記1つが、前記対応するポンプ・パワー調整に従って対応するパワー出力を調整する、ことを特徴とする光ファイバ増幅器。

10

【請求項 2】

請求項 1 に記載の光ファイバ増幅器であって、

前記分割ユニットは：

前記光ファイバから結合された光信号を獲得するカプラ、およびそれにおいて前記結合された光信号は、前記光信号チャンネルの合計のパワーの一部を有し；

前記結合された光信号を少なくとも1つの波長領域に分割する $1 \times K$ バンドの波長分割マルチプレクサ (B W D M)、およびそれにおいて K は 1 より大きいかそれに等しい整数とし；

前記少なくとも1つの波長領域の前記1つの前記対応するパワー変動の表示を提供する少なくとも1つの光検出器；を備えることを特徴とする光ファイバ増幅器。

20

【請求項 3】

請求項 1 に記載の光ファイバ増幅器であって、

前記光ファイバ増幅器は、ラマン・ファイバ増幅器 (R F A) であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

30

【請求項 4】

請求項 1 に記載の光ファイバ増幅器であって、

前記光ファイバ増幅器は、エルビウム・ドープ・ファイバ増幅器 (E D F A) であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の光ファイバ増幅器であって、

前記対応するパワー変動は、前記光ファイバ・システムのチャンネル負荷に基づくことを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項 6】

請求項 1 に記載の光ファイバ増幅器であって、

前記あらかじめ決定済みの関数は、前記対応するポンプ・パワー調整と前記少なくとも1つの波長領域の前記1つの前記対応するパワー変動の間における線形関係に対応することを特徴とする光ファイバ増幅器。

40

【請求項 7】

請求項 6 に記載の光ファイバ増幅器であって、

パワー調整スケールが線形スケールに対応することを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項 8】

請求項 6 に記載の光ファイバ増幅器であって、

パワー調整スケールがデシベル・スケールに対応することを特徴とする光ファイバ増幅器。

50

【請求項 9】

光ファイバ・システム内の N 個の光信号チャンネルをサポートするラマン・ファイバ増幅器であって：

それぞれのラマン・ポンプが光パワーを光ファイバ内に、割り当て済みポンプ周波数において注入する M 個のラマン・ポンプと；

前記 N 個の光信号チャンネルを K 個の波長領域に分割し、かつそれぞれの波長領域についての対応するパワー変動の表示を提供する分割ユニットと；

あらかじめ決定済みの関数を使用して前記ラマン・ポンプのそれぞれのための対応するポンプ・パワー調整を決定する制御ユニットと；

を備え、

それにおいて前記あらかじめ決定済みの関数が、それぞれの前記波長領域についての前記対応するパワー変動を、前記ラマン・ポンプのそれぞれのための前記対応するポンプ・パワー調整に関連付け、

前記ラマン・ポンプのそれぞれが、前記対応するポンプ・パワー調整に従って対応するパワー出力を調整する、ことを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 10】

請求項 9 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

1. 前記ラマン・ファイバ増幅器が逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器を含み、

2. 前記分割ユニットが、第 1 の地理的な場所に配置され、

3. 前記 M 個のラマン・ポンプが第 2 の地理的な場所に配置され、かつ、

前記ラマン・ファイバ増幅器が、さらに：

前記第 1 の地理的な場所から前記第 2 の地理的な場所に、それぞれの前記ラマン・ポンプを制御するための制御情報を運ぶ通信チャンネルを有することを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 11】

請求項 9 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

前記あらかじめ決定済みの関数は、前記対応するポンプ・パワー調整とそれぞれの前記波長領域の前記対応するパワー変動の間における線形関係に対応することを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 12】

請求項 11 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

前記あらかじめ決定済みの関数は、

【数 1】

$$\Delta P_L(j) \approx \sum_{k=1}^K T_{LL}(j, k) \Delta S_L(k) \quad \dots (1)$$

を包含し、それにおいて k は k 番目の波長領域に対応し、j は j 番目のラマン・ポンプに対応し、 $S_L(k)$ は k 番目の波長領域についての線形スケールの前記対応するパワー変動に対応し、 $P_L(j)$ は j 番目のラマン・ポンプの線形スケールの前記対応するポンプ・パワー調整に対応し、かつ $T_{LL}(j, k)$ は前記 j 番目のラマン・ポンプの前記対応するポンプ・パワー調整および前記 k 番目の波長領域についての前記対応するパワー変動を関連させる線形係数に対応する、ことを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 13】

請求項 11 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

前記あらかじめ決定済みの関数は、

【数 2】

$$\Delta P_d(j) \approx \sum_{k=1}^K T_{dL}(j, k) \Delta S_L(k) \quad \dots (2)$$

10

20

30

40

50

を包含し、それにおいて k は k 番目の波長領域に対応し、 j は j 番目のラマン・ポンプに対応し、 $S_L(k)$ は k 番目の波長領域についての線形スケールの前記対応するパワー変動に対応し、 $P_d(j)$ は j 番目のラマン・ポンプの対数スケールの前記対応するポンプ・パワー調整に対応し、かつ $T_{dL}(j, k)$ は前記 j 番目のラマン・ポンプの前記対応するポンプ・パワー調整および前記 k 番目の波長領域についての前記対応するパワー変動を関連させる線形係数に対応する、ことを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 14】

請求項 9 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

前記分割ユニットは：

前記光ファイバから N 個の結合された光信号を獲得するカプラと、およびそれにおいて前記 N 個の結合された光信号は、前記 N 個の光信号チャンネルの合計のパワーの一部を有し；

前記 N 個の結合された光信号を前記 K 個の波長領域に分割する $1 \times K$ バンドの波長分割マルチプレクサ (B WDM) と；

前記波長領域のそれぞれの前記対応するパワー変動の表示を提供する少なくとも 1 つの光検出器と；

を備えることを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 15】

請求項 10 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

前記第 2 の地理的な場所に配置され、前記通信チャンネルを介して前記制御情報を受信し、かつ前記ラマン・ポンプのそれぞれについて対応するパワー出力を制御する別の制御・ユニットを包含する、ことを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 16】

請求項 12 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

それぞれの線形係数は、複数のパワー領域の 1 つに依存する、ことを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 17】

請求項 13 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

それぞれの線形係数は、複数のパワー領域の 1 つに依存する、ことを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 18】

請求項 9 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

前記ラマン・ファイバ増幅器は、順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器を備えることを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 19】

請求項 9 に記載のラマン・ファイバ増幅器であって、

前記ラマン・ファイバ増幅器は、逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器を備えることを特徴とするラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 20】

光ファイバ・ファシリティによって伝送される N 個の光信号チャンネルをサポートする順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器であって：

それぞれのラマン・ポンプが光パワーを前記光ファイバ・ファシリティ内に、割り当て済みポンプ周波数において注入する M 個のラマン・ポンプと；

前記 N 個の光信号チャンネルを K 個の波長領域に分割し、かつそれぞれの波長領域についての対応するパワー変動の表示を提供する分割ユニットと；

あらかじめ決定済みの関数を使用して前記ラマン・ポンプのそれぞれのための対応するポンプ・パワー調整を決定する制御・ユニットと；

を備え、

それにおいて前記あらかじめ決定済みの関数が、それぞれの前記波長領域についての前記対応するパワー変動を、前記ラマン・ポンプのそれぞれのための前記対応するポンプ・

10

20

30

40

50

パワー調整に関連付け、および前記ラマン・ポンプのそれぞれが前記対応するポンプ・パワー調整に従って対応するパワー出力を調整することを包含し、それにおいて前記線形関数は：

【数 3】

$$\Delta P_d(j) \approx \sum_{k=1}^K T_{dl}(j,k) \Delta S_L(k) \quad \dots (3)$$

を包含し、それにおいて k は k 番目の波長領域に対応し、j は j 番目のラマン・ポンプに対応し、 $S_L(k)$ は k 番目の波長領域についての線形スケールの前記対応するパワー変動に対応し、 $P_d(j)$ は j 番目のラマン・ポンプの対数スケールの前記対応するポンプ・パワー調整に対応し、かつ $T_{dl}(j,k)$ は前記 j 番目のラマン・ポンプの前記対応するポンプ・パワー調整および前記 k 番目の波長領域についての前記対応するパワー変動を関連させる線形係数に対応し；かつ、

10

前記光ファイバ・ファシリティに対する前記分割ユニットの結合ポイントと、前記光ファイバ・ファシリティに対する前記 M 個のラマン・ポンプの注入ポイントの間における、前記制御・ユニットによる処理に関連付けされる遅延時間を補償するためのファイバ遅延ラインを包含する、ことを特徴とする順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器。

【請求項 2 1】

複数の光信号チャンネルをサポートする少なくとも 1 つの光ポンプを光ファイバ・システム内に有する光ファイバ増幅器の利得を制御するための方法であって：

20

(a) 前記複数の光信号チャンネルを少なくとも 1 つの波長領域に分割し；

(b) 各波長領域について対応するパワー変動を決定し；

(c) あらかじめ決定済みの関数を使用してそれぞれの前記光ポンプのための対応するポンプ・パワー調整を決定し、およびそれにおいて前記あらかじめ決定済みの関数が、それぞれの前記波長領域についての前記対応するパワー変動を、前記光ポンプのそれぞれのための前記対応するポンプ・パワー調整に関連付け；および、

(d) 前記対応するポンプ・パワー調整に従ってそれぞれの前記光ポンプを調整する；ことを含むことを特徴とする方法。

【請求項 2 2】

請求項 2 1 に記載の方法であって、さらに：

30

(e) 前記 (b) から (d) までを反復する；ことを含むことを特徴とする方法。

【請求項 2 3】

請求項 2 1 に記載の方法であって、

前記光ファイバ増幅器は、ラマン・ファイバ増幅器 (RFA) であることを特徴とする方法。

【請求項 2 4】

請求項 2 1 に記載の方法であって、

前記光ファイバ増幅器は、エルビウム・ドープ・ファイバ増幅器 (EDFA) であることを特徴とする方法。

【請求項 2 5】

40

請求項 2 1 に記載の方法であって、

前記対応するパワー変動は、前記光ファイバ・システムのチャンネル負荷に基づくことを特徴とする方法。

【請求項 2 6】

請求項 2 1 に記載の方法であって、

前記あらかじめ決定済みの関数は、前記対応するパワー調整と前記波長領域のそれぞれの前記対応するパワー変動の間における線形関係に対応する、ことを特徴とする方法。

【請求項 2 7】

請求項 2 6 に記載の方法であって、

パワー調整スケールが線形スケールに対応する、ことを特徴とする方法。

50

【請求項 28】

請求項 26 に記載の方法であって、
パワー調整スケールがデシベル・スケールに対応する、ことを特徴とする方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本件出願は、2005年2月24日に出願された米国特許仮出願第60/656,111号（『ファースト・ダイナミック・ゲイン・コントロール・イン・アン・オプティカル・ファイバ・アプリファイア（Fast dynamic gain control in an optical fiber amplifier）』）に対する優先権を主張する。 10

【0002】

本発明は、光ファイバ増幅器の利得の動的な制御に関する。

【背景技術】

【0003】

分布型ラマン・ファイバ増幅は、長距離の波長分割多重（WDM）システムにおける光信号対雑音比（OSNR）のマージンを改善する強力な手法であることが知られている。分散型ラマン・ファイバ増幅器もまた、分散型ファイバ・モジュールの損失の補償および/または追加の帯域幅の提供をもたらす効果的な方法である。ラマン・ファイバ増幅器は、順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器（RFA）もしくは逆方向ポンピングRFAのいずれとしても構成することができる。順方向ポンピングRFAおよび逆方向ポンピングRFAの両方を使用すると、純粋な逆方向ポンピングより良好なノイズ・パフォーマンスならびにレイリークロストークパフォーマンス（Rayleigh crosstalk performance）が達成され、これにより非常に長いスパンでのWDM伝送が可能になる。一方、光通信は、現在のポイント・ツー・ポイントシステムから動的な光ネットワークへと進化している。動的な光ネットワークにおいては、変動する容量の需要に合わせてチャンネルの追加および削除が行われる。それに加えて、ファイバの切断もしくは増幅器の障害に起因する偶発的なチャンネルの損失もまた、伝送システム内における全体的な光パワーの変動を導くことになる。生存チャンネルのパワーを一定レベルに維持するためには、高速動的利得制御が、順方向ポンピング分布型/分散型RFAおよび逆方向ポンピング分布型/分散型RFAをはじめ、EDFAにとって不可欠である。近年では、2つの制御アプローチが知られている。最初のアプローチの場合は、ラマン・ポンプのパワーが負帰還の閉ループによって制御され、それにおいては信号利得が継続的にモニタされ、目標利得と比較される。通常、誤差制御信号が比例積分微分（PID）アルゴリズムを介して生成される。図1Aは、従来技術による複数波長順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための動的利得制御装置100を示している。図1Bは、従来技術による複数波長逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための動的利得制御装置150を示している。このアプローチは、代表的な値として数十～数百マイクロ秒の制御速度を呈する。対応する速度は、逆方向ポンピング分布型RFAの場合に許容可能である。このアプローチは、通常、順方向ポンピングRFA（分布型および分散型両方）にとって十分に高速ではなく、多くの場合は、分布型RFAよりはるかに短いファイバ長を有する逆方向ポンピング分散型RFAにとっても十分に高速ではない。この所見は、順方向ポンピングRFAの利得遷移が、信号とポンプの間におけるウォーク・オフ時間（サブマイクロ秒）によって決定されることに対して、逆方向ポンピングRFAがファイバを通る通過時間（代表的な分布型RFAの場合は数百マイクロ秒）によって決定されるという事実起因する。 30 40

【0004】

2番目の立証された方法は、全光利得クランプ技術（all-optical gain clamping technique）と呼ばれ、光の閉帰還ループを基礎とする。しかしながら、この方法は、雑音劣化を招き、最初の方法より、同一の性質（閉帰還ループ）に起因して高速では 50

ない。検出済み出力信号パワーの変動と、必要なポンプ・パワーの調整の間におけるあらかじめ決定済みのテーブルに基づく動的利得制御・スキームが、逆方向ポンピング R F A について提案されている。ルックアップテーブルが負荷（すなわち入力信号のパワー）に応じて変化することから負荷の検出のために追加の制御ループが必要となるだけでなく、制御回路内に非常に多くのテーブルをストアすることが必要となる。これは、実装化の複雑性 / コストを増加させるだけでなく、その動的利得制御の能力を遅くする。

【 0 0 0 5 】

【非特許文献 1】YIHONG, CHEN et al., "Bi-directionally pumped broadband Raman amplifier," ECOC, Sept. 2001, pp.230-231, Freehold, NJ.

【非特許文献 2】KADO, SOKO et al., "Broadband flat-noise Raman amplifier using low-noise bi-directionally pumping sources," ECOC, 2001, pp.1-2, Kanagawa, Japan 10

【非特許文献 3】ESSIANMRE, RENE-JEAN et al. "Design of Bidirectionally Pumped Fiber Amplifiers Generating Double Rayleigh Backscattering," IEEE Photonics Technology Letters, July 2002, pp.914-916, vol. 14, no.7, USA

【非特許文献 4】BROMAGE, J. et al., "High co-directional Raman gain for 200-km spans, enabling 40 x 10.66 Gb/s transmission over 2400km," OFC, 2003, pp.PD24-1, Holmdel, NJ.

【非特許文献 5】CHEN, C.J. et al., "Control of transient effects in distributed and lumped Raman amplifier," Electronic Letters, Oct. 2001, pp. 1304-1305, vol. 37, no.21, USA 20

【非特許文献 6】WANG, L.L., et al., "Gain transients in co-pumped and counter-pumped Raman amplifiers," IEEE Photonics Technology Letters, May 2003, pp.664-666, vol. 15, no. 5, USA

【非特許文献 7】ZHOU, XIANG et al., "Theoretical investigation of fiber Raman amplifier with dynamic gain control", OFC, 2001, pp. WDD17-1-WDD17-3, Singapore

【非特許文献 8】Bolognini, G. et al., "Transient effects in gain-clamped discrete Raman amplifier cascades", IEEE Photonics Technology Letters, Jan. 2004, pp. 66-68, vol. 16, no. 1, USA

【発明の開示】 30

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 6 】

この分野では、順方向ポンピング分布型 / 離散型 R F A および逆方向ポンピング離散型 R F A の両方をはじめ、そのほかのタイプの、エルビウム・ドーブ・ファイバ増幅器 (E D F A) 等の光ファイバに適した高速かつ効率的な動的利得制御の手法が強く求められている。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 7 】

本発明は、光ファイバ増幅器の利得を制御するための方法および装置を提供する。利得回路は、開ループ構成で動作し、少なくとも 1 つの波長領域のパワー変動と少なくとも 1 つの光ポンプのためのポンプ・パワー調整を関連付けるあらかじめ決定済みの関数を使用する。 40

【 0 0 0 8 】

本発明の 1 つの側面によれば、入力信号パワー変動と必要ポンプ・パワー調整の間における 2 つの略線形の関係がラマン・ファイバ増幅器 (R F A) の制御に使用される。R F A は、これら 2 つの略線形の関係の 1 つを使用する順方向ポンピング R F A もしくは逆方向ポンピング R F A のいずれかとして構成することができる。

【 0 0 0 9 】

本発明の別の側面によれば、各略線形の関係が、特定波長領域についてのパワー変動および特定ラマン・ポンプのパワー調整を関連させる少なくとも 1 つの線形係数を含む。 50

【0010】

本発明のさらに別の側面によれば、略線形の関係の各線形係数が、光ファイバ・システムの実験的観察もしくはシミュレーションによって決定される。光信号チャンネルが、すべての波長領域のパワー変動が特定の波長領域を除いて無視できるように構成される。対応する線形係数は、特定のポンプについての対応するパワー調整を特定波長領域のパワー変動により除することによって決定される。

【0011】

本発明のさらに別の側面によれば、順方向ポンピング分布型/離散型RFAおよび逆方向ポンピング離散型RFA両方のための動的利得制御・テクニックが、非常に短い時間期間($<< 1 \mu s$)内において1ステップだけで完了するポンプ・パワー調整を可能にする。順方向ポンピングRFAの場合は、入力信号のパワー変動と同時的に光ポンプのパワーを調整すること、したがって高速の動的利得制御を実行することが可能になる。

10

【0012】

本発明のさらに別の側面によれば、動的利得制御の手法を、エルビウム・ドープ・ファイバ/導波増幅器(EDFA/EDWA)に適用することもできる。

【0013】

本発明のさらに別の側面によれば、動的利得制御の手法が、信号パワー変動が1つの地理的な場所において決定され、光ポンプが別の地理的な場所において制御される逆方向ポンピング・ラマン増幅器を制御する。

【発明を実施するための最良の形態】

20

【0014】

本発明ならびにその利点のより完全な理解は、添付図面を考察しつつ以下の説明を参照することによって得られることになるが、図面においては類似の特徴に類似の番号が用いられている。

【0015】

以下の種々の実施態様の説明においては、本発明が実施できる種々の実施態様を例示するために示されており、かつその一部を形成する添付図面を参照する。ここで理解する必要があるが、このほかの実施態様を使用すること、および構造的ならびに機能的な修正を本発明の範囲から逸脱することなしに行うことはできる。

【0016】

詳細な説明の理解を促進するため、以下の用語の定義を含める。「光ファイバ増幅器」とは、光ファイバ・ファシリティからの光信号の増幅を、光エネルギーから電気エネルギーへの変換および光エネルギーへの逆変換を伴うことなく行うデバイスのことである。「光ポンプ」とは、1ないしは複数のより長い波長の増幅を提供するエネルギーを用いて長い光ファイバのポンピングに使用される、より短い波長のレーザのことである。

30

【0017】

図2は、本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための実験装置200を示している。実験装置200は、信号発生器201、カプラ213、215、マルチプレクサ217、ファイバ・ファシリティ205、ラマン・レーザ203、光パワー・メータ(OPM)209、211、および光スペクトル分析器(OSA)207を備えている。カプラ213は、信号発生器201から生成されたパワーの一部(約5%)をOPM209に提供する。ラマン・レーザ203は、約1469nmにおいて、波長分割マルチプレクサ(WDM)217を介してパワーを注入し、生成された信号を増幅する。ラマン・レーザ203から注入されたパワーは、カプラ215を介してOPM211によって測定される。結果として得られる信号がファイバ205を介して伝達され、OSA207によって分析される。

40

【0018】

実験装置200からの実験結果は、順方向ポンピングRFAおよび逆方向ポンピングRFAの両方について、入力信号のパワー変動と必要なポンプ・パワー調整の間に2つの略線形の関係が存在することを示唆している(2つの略線形関係については後述する)。す

50

なわち、本発明の実施態様によれば、順方向ポンピング分布型 / 離散型 R F A および逆方向ポンピング離散型 R F A 両方のための動的利得制御の手法が、閉ループ構成で動作する間の非常に短い時間期間 ($\ll 1 \mu s$) 内において 1 ステップだけで完了するポンプ・パワー調整を可能にする (閉帰還ループを基礎とする従来技術の方法は、通常、利得の安定までのステップ数が 3 を超える)。順方向ポンピング分布型 / 離散型 R F A の場合は、本件の方法によって入力信号のパワー変動と同時的にポンプ・パワーを調整することが可能になる (従来技術の方法は、通常、出力 / 後方散乱信号の変動を検出しており、その結果、閉ループ・制御の安定に、より長い時間を必要とする)。

【0019】

ラマン・ファイバ増幅器を動的な光ネットワークに使用する場合、入力信号パワーが変化するときには一定の利得を維持するためには、それに応じてポンプ・パワーが調整される必要がある。実験装置 200 からの実験結果は、順方向ポンピング R F A における必要なポンプ・パワー調整と入力信号パワー変動の関係を示している。実験装置 200 は、約 77 km の標準シングル・モード・ファイバ (S S M F) を包含するファイバ・ファシリティ 205 を含み、それが伝送ファイバとして機能する。ラマン・ポンプは、ラマン・ファイバ・レーザ 203 (1469 nm; 3 dB スペクトル幅 1 nm) を包含し、信号は狭帯域フィルタリング後の A S E (増幅自己発振) ソース (1580 nm; 3 dB スペクトル幅 1 nm) である。入力ポンプ・パワーおよび入力信号パワーは、それぞれ光パワー・メータ 209 および 211 によってモニタされ、ラマン利得は O S A 207 によって測定される。

10

20

【0020】

図 3 は、本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器について線形スケールのラマン・ポンプ・パワーが線形スケールの入力信号パワーの関数 (関係式) となる関数 300 を示している。種々の目標ラマン利得 (6 dB、9.5 dB、および 13 dB) について、必要なラマン・ポンプ・パワー 303 は、入力信号パワー 301 (0.001 mW ~ 40 mW) の関数としてそれぞれプロット 305、307、および 309 に対応する。

【0021】

図 4 は、本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器について、ラマン・ポンプ・パワー 403 がデシベル・スケールとして示された関数 400 (図 3 に示されている関数 300 に関連する) を、線形スケールで表された入力信号パワー 401 の関数として示している。種々の目標ラマン利得 (6 dB、9.5 dB、および 13 dB) について、必要なラマン・ポンプ・パワー 403 は、入力信号パワー 401 (0.001 mW ~ 40 mW) の関数としてそれぞれプロット 405、407、および 409 に対応する。

30

【0022】

図 3 および 4 に示されているとおり、入力信号パワー 301 および 401 は線形スケールで示されている。ここでは、図 3 に示されているとおり、ラマン利得が実質的に大きくないとき、必要なポンプ・パワー 303 が入力信号パワー 301 の略線形関数によって記述されることが観察される。必要なポンプ・パワーを (図 4 に示されるとおりに) デシベル・スケールで表し、入力信号を線形スケールのまま維持すると、比較的小さいラマン利得についてだけでなく、比較的大きい (13 dB に達する大きさの) ラマン利得についても線形関係 (プロット 405、407、および 409 に対応) が維持されることが明らかになる。

40

【0023】

実験装置 200 においては、1 つのラマン・ポンプおよび 1 つの信号だけが考慮されている。しかしながら、本発明の実施態様は、ポンプとポンプの間、ポンプと信号の間、および信号と信号の間のラマン相互作用が強くなりすぎない限り (基礎となる理由は、3 つのラマン相互作用の同一の性質に起因する)、複数の信号ならびに複数のラマン・ポンプを伴う順方向ポンピング R F A について線形関係 (図 3 および 4 に示されているとおりの

50

2つの線形関係に類似)を使用する。

【0024】

以下の説明においては、M個のラマン・ポンプおよびN個の信号チャンネルが存在するものと仮定する。本発明の実施態様においては、N個の信号がK個の波長領域に分割される。本発明の実施態様においては、K個の波長領域内における必要な個別のポンプ・パワー調整(基準ポイント たとえば一様なチャンネル・パターンを伴う半負荷 に対する相対的な調整)と入力信号パワー変動の間の相関関係を記述する2つの略線形関数のうちの1つが選択される。2つの略線形関数(関係式)は、次に示すとおりに与えられる。

【数1】

$$\Delta P_L(j) \approx \sum_{k=1}^K T_{LL}(j,k) \Delta S_L(k) \quad \dots (1)$$

10

【数2】

$$\Delta P_d(j) \approx \sum_{k=1}^K T_{dL}(j,k) \Delta S_L(k) \quad \dots (2)$$

これにおいて $P_L(j)$ 、 $P_d(j)$ は、それぞれ線形スケールおよびデシベル・スケールにおけるj番目のポンプの必要パワー調整を表し、 $S_L(k)$ は、k番目の波長領域内における線形スケールの入力信号パワー変動を表す。特定の目標ラマン利得プロファイルについて、線形係数 $T_{LL}(j,k)$ および $T_{dL}(j,k)$ が、ファイバ長、ファイバ損失ならびにラマン利得係数等の受動的光リンク・パラメータに一意的に依存し、したがって直接測定もしくは測定済みの基本光リンク・パラメータを使用する数値シミュレーションのいずれかによって決定することが可能である。

20

【0025】

数値結果は、目標ラマン利得が比較的小さいときには、式(1)および式(2)がともに成立することを示唆している。目標ラマン利得を増加すると、式(2)の方が、必要ポンプ・パワー調整と入力信号パワー変動の間の関係の記述により好ましいことが明らかになり、それは、1つのポンプと1つの信号だけを用いた場合(実験装置200によって支持されたとおり)の実験に符合している。

【0026】

図5は、本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための動的利得制御回路500を示している。動的利得制御回路500は、式(1)および式(2)を、順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器(RFA)のための決定的制御アルゴリズム(deterministic control algorithm)として使用する。動的利得制御回路500は、ファイバ遅延ライン505に入力信号501を結合するカプラ503を包含する。入力信号パワーは、伝送ファイバ507に入る前にその一部が取り出され、それが、1×Kバンド波長分割マルチプレクサ(BWDM)504によってK個の波長領域に分割される(それに代えて、この実施態様は、1×Kのパワー・スプリッタおよびそれに続くK個の並列バンド・パス・フィルタを使用することもできる)。K個の波長領域内の光パワー(K個の並列光検出器(PD)509~511によって検出される)が制御・ユニット513に対する入力パラメータとして使用され、それがM個のラマン・ポンプ519の必要出力ポンプ・パワー515~517を、単純な線形関数計算(式(1)または式(2)のいずれか)を介して決定的に生成する。制御・アルゴリズム(式(1)または式(2))が開帰還ループ構成を直接使用することから、この実施態様は、わずか1ステップで、非常に短い時間期間(一般的なDSPの場合であっても<<1μs)内にポンプ・パワー調整が完了することを可能にする。M個のラマン・ポンプ519は、WDM521を介して伝送ファイバ507にパワーを注入する。

30

40

【0027】

動的利得制御回路500は、1つの増幅段だけを示しているが、本発明の実施態様は、各増幅段が光ファイバ伝送ファシリティに沿って地理的に配置され、式(1)および式(

50

2) に従って設計される複数の増幅段をサポートすることができる。各増幅段は、順方向ポンピング R F A、逆方向ポンピング R F A、または順方向ポンピング R F A および逆方向ポンピング R F A の組み合わせを含むことができる。

【0028】

伝送ブランチと制御・ブランチの間にファイバ遅延ライン 505 を用いて短い遅延を導入することによって、この実施態様は、ポンプのパワーが入力信号パワーと同時に調整されることを可能にする。ファイバ遅延ライン 505 によって導入される遅延は、デマルチプレクサ 504、フォトダイオード 509 ~ 511、制御・ユニット 513、およびポンプ 519 によって導入される時間遅延と概略で等しい。その結果、この実施態様の制御・テクニックは、一般に、従来技術によってサポートされる制御・テクニック (サブミリ秒) より高速になる (サブマイクロ秒)。

10

【0029】

式 (2) に含まれている線形係数 $T_{dL}(j, k)$ は、80 チャンネルの WDM システムのための次のプロシージャによって決定することができる。ここでは、 $K = 2$ を仮定し、好ましいポイントとして一様なチャンネル・パターン (1, 3, . . . , 79) を伴う半負荷を使用する。最初に、チャンネル 41、43、. . . 79 における入力信号だけを構成し、対応する必要なパワー調整 $P_d(j)$ を見つける。続いて、 $S_L(2) = 0$ の観察から $P_d(j) / S_L(1)$ によって $T_{dL}(j, 1)$ が与えられる。次に、チャンネル 1、3、および 39 における入力信号だけを構成し、対応する必要なパワー調整 $P_d(j)$ を見つける。続いて、 $S_L(1) = 0$ の観察から $P_d(j) / S_L(2)$ によって $T_{dL}(j, 2)$ が与えられる。同一のプロセスを $K > 2$ もしくは $K = 1$ についても適用する。図 7 ~ 14 から、図 5 に示されている実施態様が、入力信号スペクトル・パターンの広い範囲にわたって生存チャンネルのラマン利得変動を 0.2 dB 未満に抑える能力を有することが観察される。しかしながら利得制御を使用しなければ、生存チャンネルのラマン利得変動が、1 つの生存チャンネルだけを伴う場合に 2 dB まで、全 80 チャンネルを伴う場合に 1.6 dB までになり得る。

20

【0030】

図 6 は、本発明の実施態様に従った目標のラマン・ファイバ増幅器の利得プロファイル 600 を示している。選択された基準動作ポイントは、半負荷 (40 チャンネル) および一様なチャンネル分布 (1, 3, 5, . . . 79) を伴う。図 6 に示されているとおり、ラマン利得は、ラマン・ポンプからの利得ならびにそのほかの信号からの利得をともに含む。基準ポイントとして半負荷を選択することは、それによって必要な最大ポンプ・パワー調整が半分に縮小されることから、一般に使用されている全負荷を伴う基準ポイントより好ましい。

30

【0031】

図 7 は、本発明の実施態様に従った 80 のアクティブ・チャンネルを伴う動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第 1 の例 700 を示している。

【0032】

前述したとおり、図 7 ~ 14 (4 波長 (1458、1469、1483、および 1503 nm) 順方向ポンピング R F A を伴う 50 GHz 間隔、80 チャンネル、L バンド WDM システムのための生存チャンネルの信号利得変動のシミュレーションを示している) は、図 5 に示した実施態様の効果を立証している。線形関数 (式 (2)) が制御・ユニット内の制御・アルゴリズムとして使用されている。図 7 ~ 14 には、比較として、利得制御を伴わない信号の利得変動を示した。80 km の SSMF を伝送ファイバとして使用し、入力信号パワーは、3 dB / チャンネルとなるように選択した。タップされた信号を、1570 ~ 1584 nm、および 1584 ~ 1604 nm の 2 つの波長領域 (すなわち $K = 2$) に分割した。

40

【0033】

図 8 は、1 つのアクティブ・チャンネルを伴う、動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第 2 の例 800 を示している。図 9 は、60 のアクティブ・チ

50

チャンネルを伴う第3の例900を示している。図10は、チャンネル21～80をアクティブ・チャンネルとして伴う第4の例1000を示している。図11は、20のアクティブ・チャンネルを伴う第5の例1100を示している。図12は、チャンネル31～50をアクティブ・チャンネルとして伴う第6の例1200を示している。図13は、チャンネル61～80をアクティブ・チャンネルとして伴う第7の例1300を示している。図14は、40のアクティブ・チャンネルを伴う第8の例1400を示している。これらの例は、図5に示した実施態様の効果を立証している。

【0034】

図15は、本発明の実施態様に従った全チャンネル(1～80)がアクティブの2つの制御・スキームを比較したプロット1500を示している。これから両方のスキームが信号利得変動を効果的に抑圧する能力を有することが観察されるが(ピーク利得変動は、式(2)によって1.6dBから0.15dBに、式(1)によって1.6から0.3に抑圧されている)、式2に基づくアルゴリズムが式(1)に基づくアルゴリズムより良好であることが明らかになった。この観察は、ラマン利得($10.2 + / 0.3 \text{ dB}$)が十分に小さくないことに起因する。シミュレーションを行い、動的利得制御のパフォーマンスに対するKの影響を調査した。数値的な結果は、純粋なLバンド/Cバンドのシステムについて、Kをさらに増加することがもたらすパフォーマンスの改善が軽微であるのに対して、コストが有意に増加し得ることから、 $K=2$ が好ましい選択肢であると示唆している。これに対し、 $K=1$ の選択はシステムの要件に応じて許容可能である。この特定のWDMシステムについては、 $K=1$ の場合にピーク利得変動を0.3dB未満に抑えることが可能であり、 $K=2$ の場合には0.2dB未満に抑えることが可能である。 $K=1$ を選択する場合には、図5に示した装置500に対して動的利得制御回路が簡略化される。以上の調査は、分布型RFAを基礎としているが、類似のアプローチを分散型RFAにも適用可能であり、それにおいてはファイバの長さおよびファイバのタイプだけが異なる。

【0035】

図16は、本発明の実施態様に従った必要ポンプ・パワー調整と入力信号パワー変動の関係の調査するための、逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器に関する実験装置1600を示している。実験結果は、逆方向ポンピングRFAについても順方向ポンピングRFAの場合(図3および4を参照して前述)と類似の線形関係(図17および18に示す)を示した。

【0036】

図17は、本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器について線形スケールのラマン・ポンプ・パワーが線形スケールの入力信号パワーの関数となる関数1700を示している。図18は、本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器についてデシベル・スケールのラマン・ポンプ・パワーが線形スケールの入力信号パワーの関数となる関数1800を示している。

【0037】

順方向ポンピングRFAと同様に、本発明の実施態様は、図19および20に示すが、逆方向ポンピングRFAについても入力信号パワー変動と必要なポンプ・パワー調整の間の2つの略線形関係の1つを使用する。さらにこれらの線形関係は、順方向ポンピングRFAおよび逆方向ポンピングRFAの両方を使用するファイバ・システムに適用可能な関係である。

【0038】

本発明の実施態様は、式(1)および(2)に対応する線形関数を使用する制御・スキームに限定されない。このほかの、入力信号パワー変動と必要なポンプ・パワーの調整を直接関係付ける複雑な関数(線形または非線形)も適用可能である。一例として、入力信号パワー変動をいくつかのパワー領域に分けることができる。各領域内においては、線形関数(式(1)または式(2))が使用されて、必要なポンプ・パワー調整が入力信号パワー変動に結びつけられるが、線形係数は、異なるパワー領域の間において異なることが

10

20

30

40

50

許される。対応する制御・アルゴリズムは、より良好な利得変動の抑圧を提供し得るが、制御速度および複雑性がその代償となる。

【0039】

図19は、本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器1900を示している。RFA1900は、図19に示されている逆方向ポンピング分散型RFAのための決定的制御アルゴリズムとして式(1)または式(2)を使用する動的利得制御回路である(RFA2000は、 $K=1$ についての簡略バージョンであり、それにおいてはラマン・ファイバを従来のDCFまたは何らかの特殊高非線形ファイバとすることができる)。分散型RFAが分布型RFAよりはるかに短いファイバ長を有することから、逆方向ポンピング分散型RFAがチャンネルの追加/ドロップの間に経験する利得遷移は、逆方向ポンピング分布型RFAより非常に高速となり得る。その決定的性質(1ステップ)に起因して、図19および20に示されている制御回路は、信号利得が安定するまでに通常は数制御・サイクルを必要とする従来の閉帰還ループを基礎とする方法より本質的に高速である。本発明の実施態様を用いると、適切な電氣的遅延を制御回路内に追加し、入力信号パワー変動に対する必要なポンプ・パワー調整のタイミングを最適化することによって制御速度をさらに改善することが可能になる。制御・アルゴリズムについては、図17および18に示されているとおり、式(1)を基礎とするアルゴリズムが式(2)を基礎とするアルゴリズムより一般に良好に機能する。この観察は、式(2)が一般に式(1)より良好に機能する順方向ポンピングRFAと異なる。基礎となる理由は、逆方向ポンピングRFAについてポンプの減損の多くがファイバのエンドの近くで生じており、したがって、ポンプの減損において指数関数的なファイバの損失の果たす役割が、はるかに長いファイバ長内においてポンプの減損を生じる順方向ポンピング・ラマン増幅器よりはるかに重要でないという観察に起因する。

10

20

【0040】

図19を参照すると、入力信号1901から入力信号パワーの一部が、カプラ1903によってB WDM1907に提供される。フォトダイオード1909~1911は、 K 個の波長領域のそれぞれについて入力パワー変動(PD)を測定する。制御・ユニット1913は、式(1)もしくは式(2)のいずれかを用いてポンプ・パワー調整1915~1917を決定する。 M 個のポンプ1919が、光サーキュレータ(OC)1921を介してラマン・ファイバ1905に逆方向からパワーを注入する。

30

【0041】

逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器2000は、図20に示されているとおり、逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器1900に類似である；しかしながら、逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器2000の場合には $K=1$ である(すなわち、1つの波長領域しかない)。その結果、制御・ユニット2013が、フォトダイオード2009を介し、1つの波長領域について入力パワー変動(PD)を処理する。制御・ユニット2013は、 M 個のポンプ1919にポンプ・パワー調整2015~2017を提供することによって M 個のポンプ1919を制御する。

【0042】

図21および22は、以上について示した例を提供する。図21は、本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための動的利得制御の例を示している。次に示す線形関数が使用される。

40

【数3】

$$P_L(j,t) \approx P_{L0}(j) + \sum_{k=1}^K T_{LL}(j,k) [S_L(k,t) - S_{L0}(k)] \quad \dots (3)$$

【数 4】

$$P_d(j,t) \approx P_{d0}(j) + \sum_{k=1}^K T_{dL}(j,k)[S_L(k,t) - S_{L0}(k)] \quad \dots (4)$$

これにおいて $P_L(j, t)$ は、時点 t における j 番目のポンプの必要ポンプ・パワーを線形単位で示しており、 $S_L(k, t)$ は、 k 番目の波長領域内において検出される入力信号パワーを同じく線形単位で示している。 $S_{L0}(k)$ および $P_{L0}(j)$ は、それぞれ基準動作ポイントにおける対応の入力信号パワーおよびポンプ・パワーである。式(3)および式(4)における下付き文字の L および d は、それぞれ線形スケールおよび対数スケールを示す。式(4)は、順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器に適していると思われる。

10

【0043】

図21に示した例においては、 $K = 1$ であり、利得媒体として機能する80 kmのTWリーチ伝送ファイバを伴う4波長の順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器に対応する。ポンプ波長は、1425、1436、1452、および1466 nmである。全負荷(基準ポイントとして参照される)は、次のとおりに構成される: 40チャンネル、100 GHz 間隔のCバンド信号、1530 nm ~ 1561 nm、3 dB /チャンネルの入力信号パワー、およびCバンドにわたる14 + / 0.6 dBの目標ラマン利得。

【0044】

この例は、次に示す線形制御式を使用する。

20

【数 5】

$$P_d(j,t) \approx P_{d0}(j) + T_{dL}(j)[S_L(t) - S_0] \quad \text{where } j=1,2,3,4 \quad \dots (5)$$

これにおいて $P_{d0}(1) = 24.3$ dBm、 $P_{d0}(2) = 23.0$ dBm、 $P_{d0}(3) = 21.63$ dBm、 $P_{d0}(4) = 19.3$ dBm、かつ $S_{L0} = 20$ mWである。

【0045】

図21を参照するが、プロット2101は第1のポンプ(1425 nm)に対応し、プロット2103は第2のポンプ(1436 nm)に対応し、プロット2105は第3のポンプ(1452 nm)に対応し、プロット2107は第4のポンプ(1466 nm)に対応する。線形係数 $T_{dL}(1)$ 、 $T_{dL}(2)$ 、 $T_{dL}(3)$ 、および $T_{dL}(4)$ は、それぞれ0.159、0.167、0.115、および0.098に決定されている。

30

【0046】

図22に、本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器についての動的利得制御の例を示す。次に示す動的制御の式が使用されている。

【数 6】

$$P_L(j,t) \approx P_{L0}(j) + \sum_{k=1}^K T_{LL}(j,k)[S_L(k,t-T) - S_{L0}(k)] \quad \dots (6)$$

40

【数 7】

$$P_d(j,t) \approx P_{d0}(j) + \sum_{k=1}^K T_{dL}(j,k)[S_L(k,t-T) - S_{L0}(k)] \quad \dots (7)$$

これにおいて $P_L(j, t)$ は、時点 t における j 番目のポンプの必要ポンプ・パワーを線形単位で示しており、 $S_L(k, t)$ は、 k 番目の波長領域内において検出される入力信号パワーを同じく線形単位で示している。 $S_{L0}(k)$ および $P_{L0}(j)$ は、それぞれ基準動作ポイントにおける対応の入力信号パワーおよびポンプ・パワーである。 T は、ポンプ・パワー調整と入力信号パワー変動の間において導入される時間遅延を示しており、概略でファイバ内における信号の伝搬時間に等しい。式(6)および式(7)における下付

50

き文字のLおよびdは、それぞれ線形スケールおよび対数スケールを示す。式(6)は、逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器に適していると思われる。

【0047】

図22に示した例においては、 $K = 1$ である。この例は、12kmの分散型補償ファイバを利得媒体として伴う4波長の逆方向ポンピング分散型ラマン・ファイバ増幅器に対応する。ポンプ波長は、1425、1436、1452、および1466nmである。全負荷(基準ポイントとして参照される)は、次のとおりに構成される: 40チャンネル、100GHz間隔のCバンド信号、1530nm~1561nm、3dB/チャンネルの入力信号パワー。目標ラマン利得は、Cバンドにわたり16+/0.6dBである。

【0048】

この例は、次に示す線形制御式を使用する。

【数8】

$$P_L(j,t) \approx P_{L0}(j) + T_{LL}(j)[S_L(t) - S_0] \quad j=1,2,3,4 \quad \dots (8)$$

これにおいて $P_{L0}(1) = 246 \text{ mW}$ 、 $P_{L0}(2) = 197.2 \text{ mW}$ 、 $P_{L0}(3) = 122 \text{ mW}$ 、 $P_{L0}(4) = 140.6 \text{ mW}$ 、かつ $S_{L0} = 20 \text{ mW}$ である。

【0049】

図23に、本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器を示す。装置2300は、入力パワー変動の検出(カプラ2303、B WDM 2305、フォトダイオード2307~2309、制御・ユニット2311によって決定される)とM個のポンプ2317によるパワーの注入の地理的な離隔をサポートする。図23に示した実施態様においては、入力信号2301からのパワーの一部が、カプラ2303によってB WDM 2305に結合され、制御・ユニット2311によって処理される。M個のポンプ2317が制御・ユニット2311から地理的に離れていることから、制御・ユニット2311から制御・ユニット2323への制御情報が、伝送ファイバ2315、WDM 2313、およびWDM 2321を使用する遠隔測定チャンネルを介して送信される(伝送ファイバ2315は光信号チャンネルの伝送もサポートする)。遠隔測定チャンネルは、すでに多くの商業的WDMシステムにおいて使用されている従来の光スーパーバイザリ・チャンネルとすることができる。制御・ユニット2323は、この制御情報を使用して、M個のポンプ2317からコンバイナ2319に注入されるパワーを調整する。次に示す動的制御関数の1つが、図23に示されている逆方向ポンピング・ラマン増幅器の設計に使用される。

【数9】

$$P_L(j,t) \approx P_{L0}(j) + \sum_{k=1}^K T_{LL}(j,k)[S_L(k,t-T) - S_{L0}(k)] \quad \dots (9)$$

【数10】

$$P_d(j,t) \approx P_{d0}(j) + \sum_{k=1}^K T_{dL}(j,k)[S_L(k,t-T) - S_{L0}(k)] \quad \dots (10)$$

これにおいて $P_L(j,t)$ は、時点 t における j 番目のポンプの必要ポンプ・パワーを線形単位で示しており、 $S_L(k,t)$ は、 k 番目の波長領域内において検出される入力信号パワーを同じく線形単位で示している。 $S_{L0}(k)$ および $P_{L0}(j)$ は、それぞれ基準動作ポイントにおける対応の入力信号パワーおよびポンプ・パワーである。 T は、ポンプ・パワー調整と入力信号パワー変動の間において導入される時間遅延を示しており、概略でファイバ内における信号の伝搬時間に等しい。式(9)および式(10)における下付き文字のLおよびdは、それぞれ線形スケールおよび対数スケールを示す。式(9)は、逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器に適したパフォーマンスを提供する。

【0050】

図24は、本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器を示

10

20

30

40

50

す。装置 2400 は装置 2300 に類似であるが、 $K = 1$ である。その結果、入力パワー変動 (PD) の検出にフォトダイオードが 1 つだけ (フォトダイオード 2407) 必要になる。制御・ユニット 2411 は、検出された入力パワー変動を式 (11) もしくは式 (12) のいずれかに従って処理し、制御情報を伝送ファイバ 2315 上の遠隔測定チャンネルを介して制御・ユニット 2423 に送信する。

【数 11】

$$P_L(j,t) \approx P_{L0}(j) + T_{LL}(j)[S_L(t-T) - S_{L0}] \quad \dots (11)$$

【数 12】

$$P_d(j,t) \approx P_{d0}(j) + T_{dL}(j)[S_L(t-T) - S_{L0}] \quad \dots (12)$$

10

式 (12) に対して式 (11) は、逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器に好ましいパフォーマンスを提供する

【0051】

本発明の実施態様は、光ファイバ・システムおよびエルビウム・ドープ・ファイバもしくは導波増幅器における順方向ポンピング RFA ならびに逆方向ポンピング RFA の両方の動的制御をサポートする。

【0052】

図 25 は、本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器ならびに逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器両方のために動的制御を使用する光ファイバ・システムを示す。次に示す 2 つの利得制御関数のうちの 1 つが選択されて順方向ポンピング・ラマン増幅器の利得が制御される。

20

【数 13】

$$P_L^F(j,t) \approx P_{L0}(j) + \sum_{k=1}^K T_{LL}^F(j,k)[S_L(k,t) - S_{L0}(k)] \quad \dots (13)$$

【数 14】

$$P_d^F(j,t) \approx P_{d0}(j) + \sum_{k=1}^K T_{dL}^F(j,k)[S_L(k,t) - S_{L0}(k)] \quad \dots (14)$$

30

それに加えて、次に示す 2 つの利得制御関数のうちの 1 つが選択されて逆方向ポンピング・ラマン増幅器の利得が制御される。

【数 15】

$$P_L^B(j,t) \approx P_{L0}^B(j) + \sum_{k=1}^K T_{LL}^B(j,k)[S_L(k,t-T) - S_{L0}(k)] \quad \dots (15)$$

【数 16】

$$P_d^B(j,t) \approx P_{d0}^B(j) + \sum_{k=1}^K T_{dL}^B(j,k)[S_L(k,t-T) - S_{L0}(k)] \quad \dots (16)$$

40

これにおいて $P_L^F(j, t)$ は、時点 t における j 番目の順方向ポンプの必要ポンプ・パワーを線形単位で示しており、 $S_L(k, t)$ は、 k 番目の波長領域内において検出される入力信号パワーを同じく線形単位で示している。 $S_{L0}(k)$ および $P_{L0}^F(j)$ は、それぞれ基準動作ポイントにおける対応の入力信号パワーおよびポンプ・パワーである。式 (13)、式 (14)、式 (15)、および式 (16) における下付き文字の L および d は、それぞれ線形スケールおよび対数スケールを示す。上付き文字 F および B は、それぞれ順方向ラマン・ポンプおよび逆方向ラマン・ポンプを示す。 T は、伝送ファイバ内の光信号の伝搬時間である。式 (14) は順方向ポンピング・ラマン・ポンプに適しており、式 (15) は逆方向ポンピング・ラマン・ポンプに適している。それに加えて、遠隔測定チ

50

チャンネルとして光スーパーバイザリ・チャンネルを使用し、入力信号パワー情報を逆方向ラマン・ポンプの制御・ユニットに送信することができる。

【0053】

上記のとおり順方向ポンピング分布型ラマン・ファイバ増幅器および逆方向ポンピング分布型ラマン・ファイバ増幅器をともに使用するWDMシステムの場合、合計のラマン利得が3つの異なるソースから得られる：すなわち、信号 順方向ラマン・ポンプの相互作用を介した順方向ラマン・ポンプから、信号 信号のラマン相互作用を介したほかの信号から、および信号 逆方向ラマン・ポンプの相互作用を介した逆方向ラマン・ポンプから得られる。通常の効果的なラマン相互作用長が40kmより短いことから、スパン長が大きいとき（通常80km以上）にのみ双方向ポンピング・ラマン増幅器が必要となる。このことは、共伝搬する順方向ラマン・ポンプに起因する利得および共伝搬するほかの信号に起因する利得が、主として最初の40kmで得られ、逆方向ラマン・ポンプに起因する利得が、主として最後の40kmで得られることを含意する。結果として、双方向ポンピング分布型ラマン・ファイバ増幅器を2つの別々の増幅器として扱うことが可能である：すなわち、順方向ラマン増幅器およびそれに続く逆方向ラマン増幅器である。共伝搬する信号 順方向ポンプの相互作用および信号 信号のラマン相互作用に起因する利得遷移（サブマイクロ秒）の制御に式（13）または式（14）の制御関数が使用され、信号 逆方向ラマン・ポンプの相互作用に起因する比較的遅い利得遷移（サブミリ秒）の制御に式（15）および式（16）の制御関数が使用される。制御係数は、順方向ポンピング・ラマン増幅器および逆方向ポンピング・ラマン増幅器両方について、測定された基本ファイバ・リンク・パラメータを使用する数値計算によって、あるいはあらかじめ決定済みのK個の入力チャンネル・パターンを使用する直接測定によって以下のとおりあらかじめ決定することができる。最初にすべての逆方向ラマン・ポンプをディセーブルする。K個の入力チャンネル・パターンのそれぞれについて、 M_F 個の順方向ラマン・ポンプのそれぞれの必要パワー調整の計算もしくは測定を、目標順方向ラマン利得プロファイルに基づいて行う（順方向ラマン・ポンプからの利得および信号 信号のラマン相互作用からの利得をともに含む）。順方向ポンピング・ラマン増幅器のための制御係数のセットは、K個のチャンネル・パターンに従って測定された個別の順方向ポンプ・パワーの調整を式（13）または式（14）に代入することによって獲得される。次に、順方向ラマン・ポンプおよび逆方向ラマン・ポンプ両方をオンにする。K個のチャンネル・パターンのそれぞれについて、最初に順方向ポンプ・パワーの調整を行い（すでに最初のステップからわかっている）、その後 M_B 個の逆方向ラマン・ポンプのそれぞれの必要パワー調整を、順方向ラマン・ポンプからの利得、信号 信号のラマン相互作用からの利得、および逆方向ラマン・ポンプからの利得を含む合計の目標ラマン利得プロファイルを基礎として測定する。K個のチャンネル・パターンに従って測定された個別の逆方向ポンプ・パワー調整を式（15）または式（16）に代入すれば、逆方向ポンピング・ラマン増幅器のための制御係数のセットが得られる。

【0054】

図26は、本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器ならびに逆方向ラマン・ファイバ増幅器両方のために動的制御を使用する光ファイバ・システムを示す。この光ファイバ・システムは、図25に示した光ファイバ・システムに類似である；しかしながら、波長領域の数が1つだけ（すなわち $K=1$ ）である。

【0055】

本発明の実施態様は、離散型ラマン増幅器の異形として見ることで従来的なEDFA/EDWA増幅器のための利得制御もサポートする。

【0056】

最後に述べるが、伝送ファイバがエルビウム・ドープ・ファイバ/導波器に置き換えられ、ポンプの波長に980nmおよび/または1480nmが選択される場合においても、前述の考察がエルビウム・ドープ・ファイバ/導波増幅器のための動的利得制御に適用可能なことが認められる。

【 0 0 5 7 】

当業者であれば認識できるとおり、コンピュータ・システムを制御するためのインストラクションを含んだ関連コンピュータ可読メディアを伴うコンピュータ・システムを使用し、ここで述べた例示の実施態様を具体化することは可能である。コンピュータ・システムは、マイクロプロセッサ、デジタル信号プロセッサ等の少なくとも1つのコンピュータ、および関連する周辺電子回路を含むことができる。ほかのDSP（デジタル信号プロセッサ）およびFPGA（フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ）等のハードウェアのアプローチを使用して例示の実施態様を具体化することもできる。

【 0 0 5 8 】

以上、現在のところ本発明の実施に好ましい態様を含め、特定の例に関して本発明を説明してきたが、当業者であれば、ここで述べたシステムおよびテクニックに、付随する特許請求の範囲に示されている本発明の精神ならびに範囲内に含まれる多くの変形ならびに組み合わせがあることを認識することになる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 5 9 】

【 図 1 A 】従来技術に従った複数波長順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための動的利得制御方法を示した説明図である。

【 図 1 B 】従来技術に従った複数波長逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための動的利得制御方法を示した説明図である。

【 図 2 】本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための実験装置を示した説明図である。

【 図 3 】本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器について線形スケールのラマン・ポンプ・パワーを線形スケールの入力信号パワーの関数として示したグラフである。

【 図 4 】本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器についてデシベル・スケールのラマン・ポンプ・パワーを線形スケールの入力信号パワーの関数として示したグラフである。

【 図 5 】本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための動的利得制御回路を示した説明図である。

【 図 6 】本発明の実施態様に従った目標のラマン・ファイバ増幅器の利得プロファイルを示したグラフである。

【 図 7 】本発明の実施態様に従った動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第1の例を示したグラフである。

【 図 8 】本発明の実施態様に従った動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第2の例を示したグラフである。

【 図 9 】本発明の実施態様に従った動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第3の例を示したグラフである。

【 図 1 0 】本発明の実施態様に従った動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第4の例を示したグラフである。

【 図 1 1 】本発明の実施態様に従った動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第5の例を示したグラフである。

【 図 1 2 】本発明の実施態様に従った動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第6の例を示したグラフである。

【 図 1 3 】本発明の実施態様に従った動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第7の例を示したグラフである。

【 図 1 4 】本発明の実施態様に従った動的利得制御ありの利得変動と、それのない利得変動を比較した第8の例を示したグラフである。

【 図 1 5 】本発明の実施態様に従った2つの制御・スキームを比較したグラフである。

【 図 1 6 】本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための実験装置を示した説明図である。

10

20

30

40

50

【図 17】本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器について線形スケールのラマン・ポンプ・パワーを線形スケールの入力信号パワーの関数として示したグラフである。

【図 18】本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器についてデシベル・スケールのラマン・ポンプ・パワーを線形スケールの入力信号パワーの関数として示したグラフである。

【図 19】本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器を示した説明図である。

【図 20】本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器を示した説明図である。

【図 21】本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための動的利得制御の例を示したグラフである。

【図 22】本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器のための動的利得制御の例を示したグラフである。

【図 23】本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器を示した説明図である。

【図 24】本発明の実施態様に従った逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器を示した説明図である。

【図 25】本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器ならびに逆方向ラマン・ファイバ増幅器両方のために動的制御を使用する光ファイバ・システムを示した説明図である。

【図 26】本発明の実施態様に従った順方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器ならびに逆方向ラマン・ファイバ増幅器両方のために動的制御を使用する光ファイバ・システムを示した説明図である。

【符号の説明】

【0060】

100 動的利得制御装置、150 動的利得制御装置、200 実験装置、201 信号発生器、203 ラマン・レーザ；ラマン・ファイバ・レーザ、205 ファイバ・ファシリティ；ファイバ、207 光スペクトル分析器（OSA）、209 光パワー・メータ（OPM）、211 OPM、213 カプラ、215 カプラ、217 マルチプレクサ；波長分割マルチプレクサ（WDM）、300 関数、301 入力信号パワー、303 ラマン・ポンプ・パワー、305 プロット、307 プロット、309 プロット、401 入力信号パワー、403 ラマン・ポンプ・パワー、405 プロット、407 プロット、409 プロット、500 動的利得制御回路、501 入力信号、503 カプラ、504 バンド波長分割マルチプレクサ（BWDM）；デマルチプレクサ、505 ファイバ遅延ライン、507 伝送ファイバ、509～511 光検出器（PD）；フォトダイオード、513 制御・ユニット、515～517 ポンプ・パワー、519 ラマン・ポンプ、521 WDM、600 利得プロファイル、1600 実験装置、1900 逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器；RFA、1901 入力信号、1903 カプラ、1905 ラマン・ファイバ、1907 BWDM、1909～1911 フォトダイオード、1913 制御・ユニット、1915～1917 ポンプ・パワー調整、1919 ポンプ、1921 光サーキュレータ（OC）、2000 逆方向ポンピング・ラマン・ファイバ増幅器、2009 フォトダイオード、2013 制御・ユニット、2015～2017 ポンプ・パワー調整、2300 装置、2301 入力信号、2303 カプラ、2305 BWDM、2307～2309 フォトダイオード、2311 制御・ユニット、2315 伝送ファイバ、2317 ポンプ、2319 コンバイナ、2323 制御・ユニット、2400 装置、2407 フォトダイオード、2411 制御・ユニット、2423 制御・ユニット。

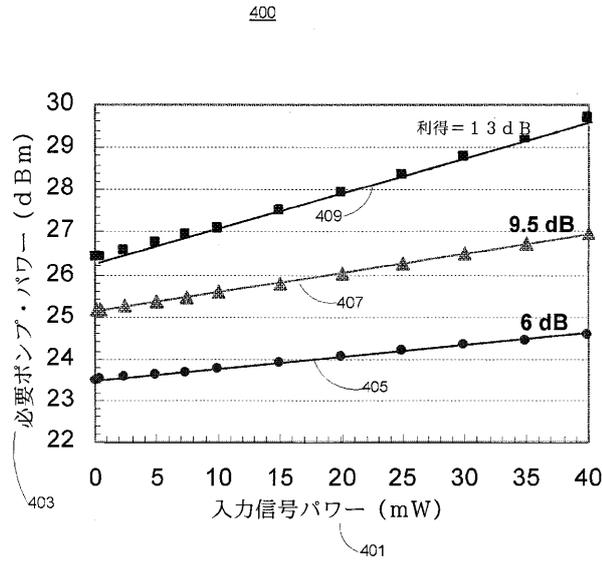
10

20

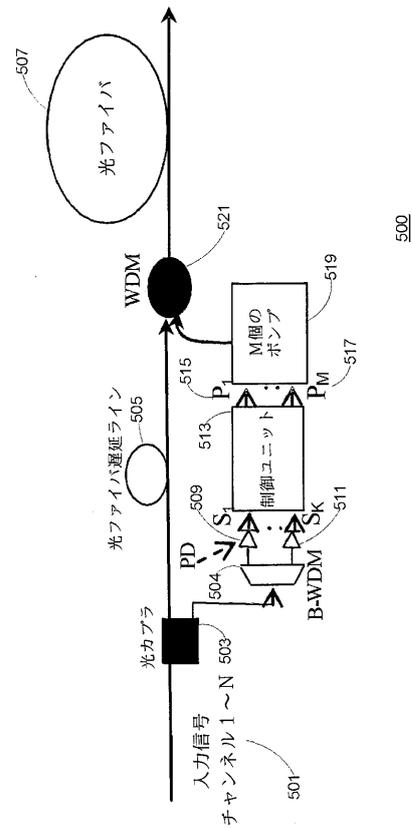
30

40

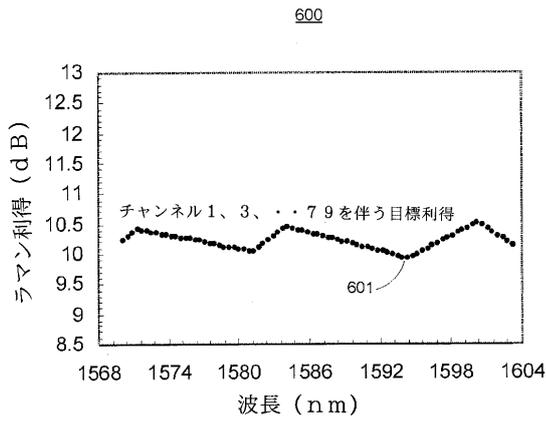
【 図 4 】



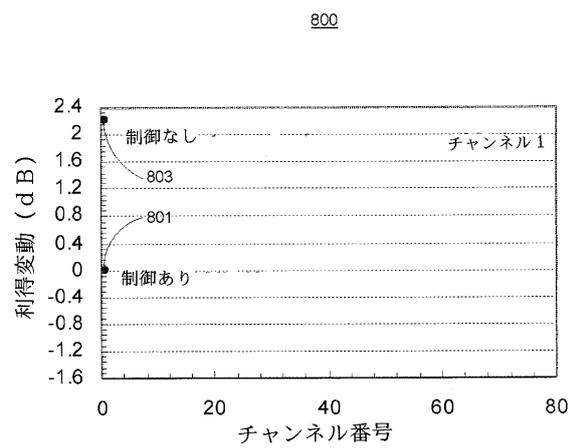
【 図 5 】



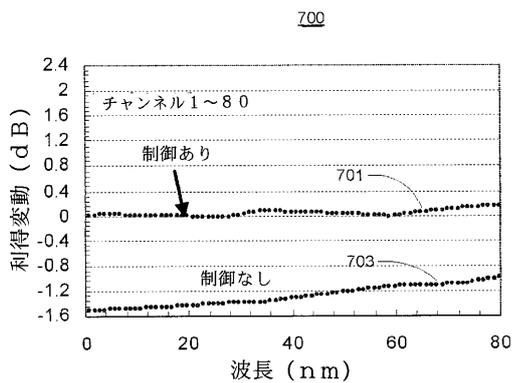
【 図 6 】



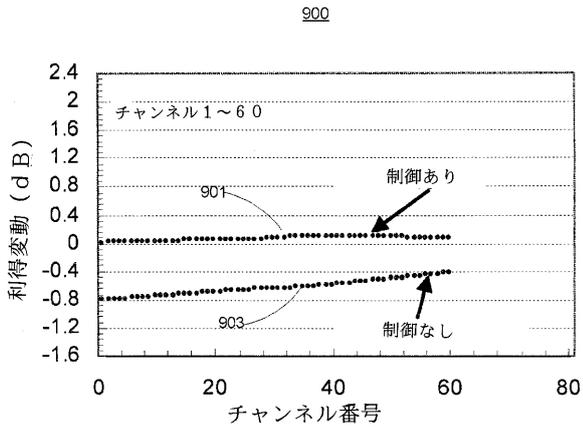
【 図 8 】



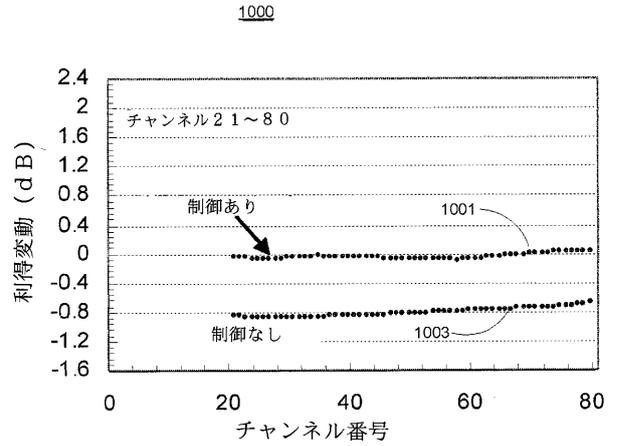
【 図 7 】



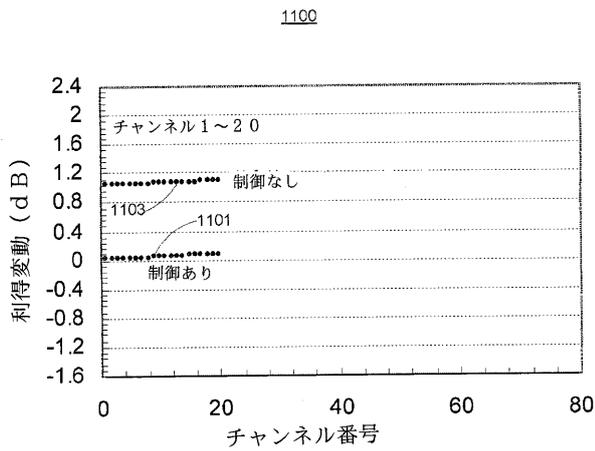
【 図 9 】



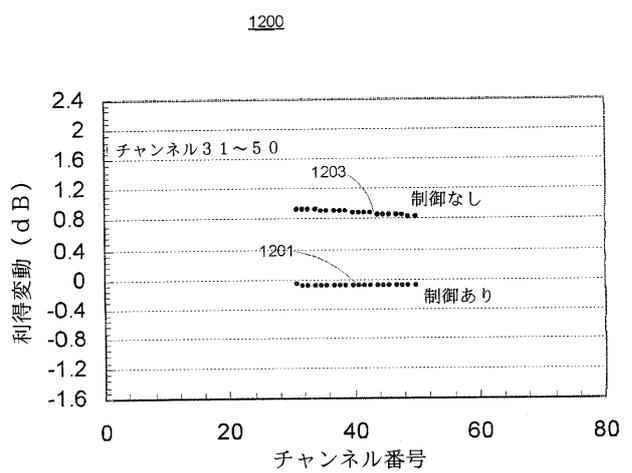
【 図 10 】



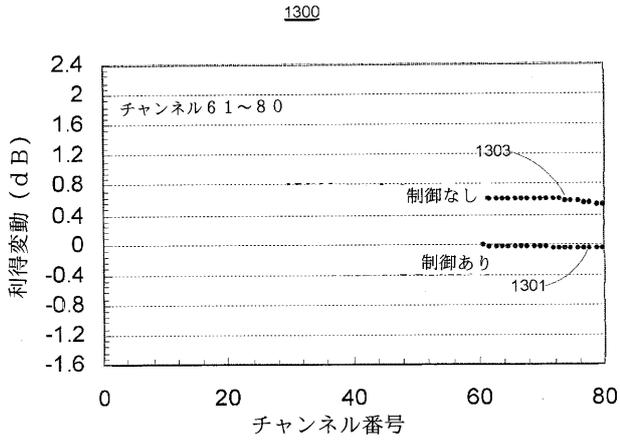
【 図 11 】



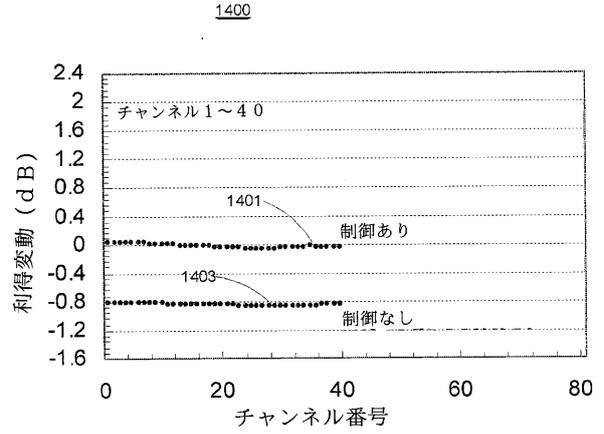
【 図 12 】



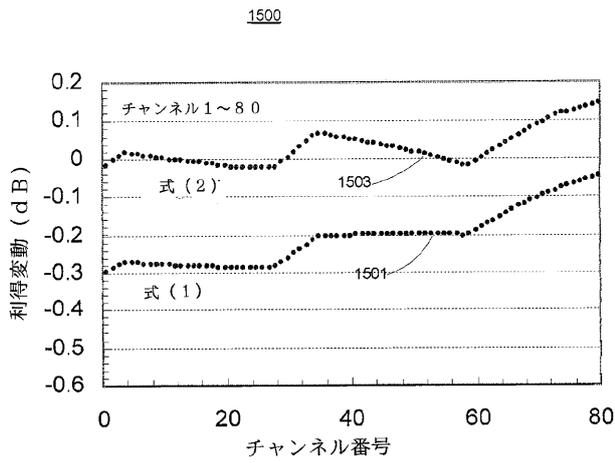
【 図 1 3 】



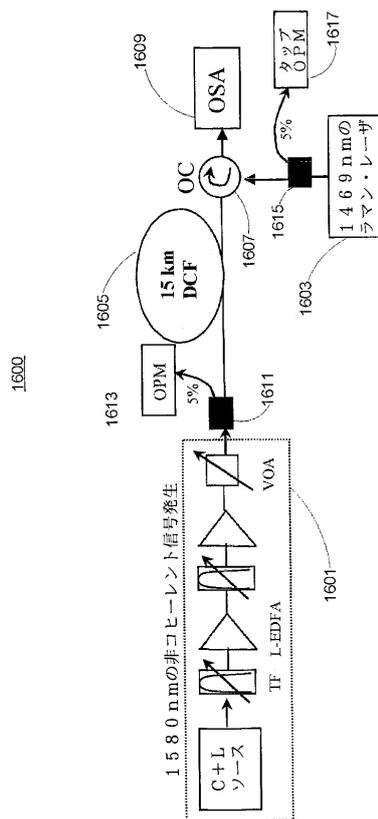
【 図 1 4 】



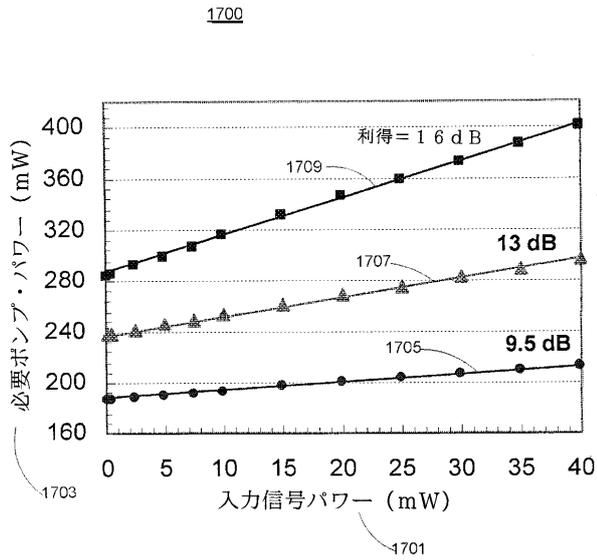
【 図 1 5 】



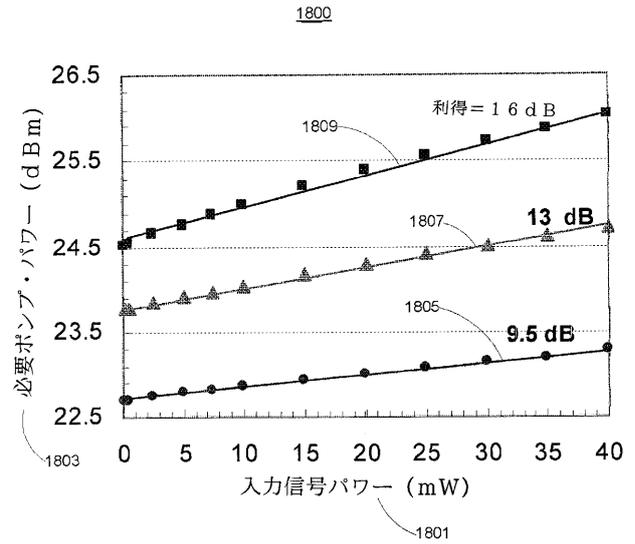
【 図 1 6 】



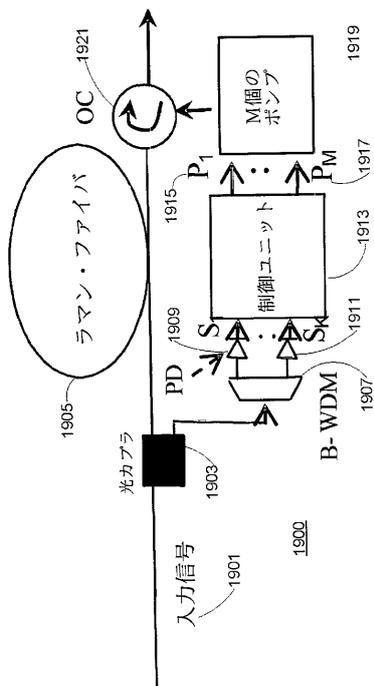
【図 17】



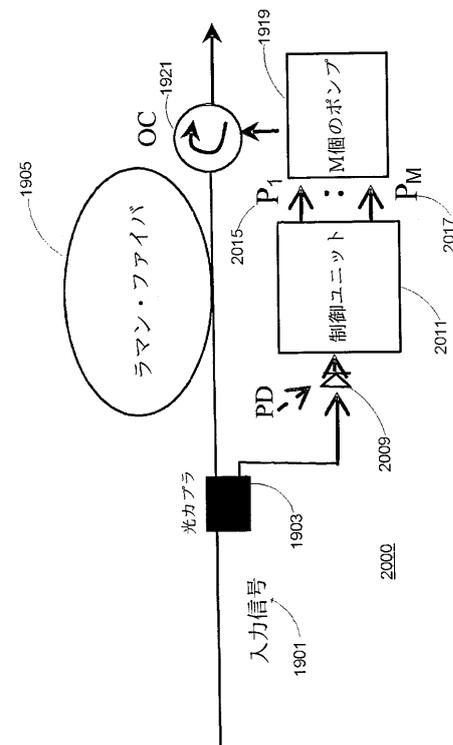
【図 18】



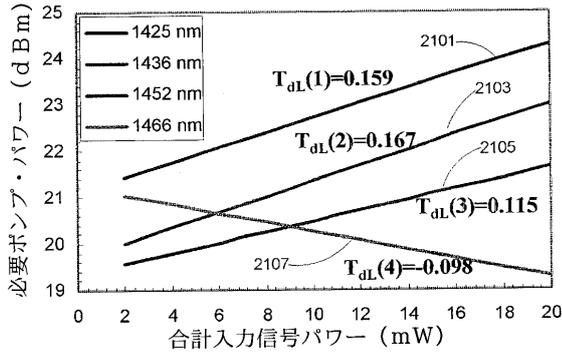
【図 19】



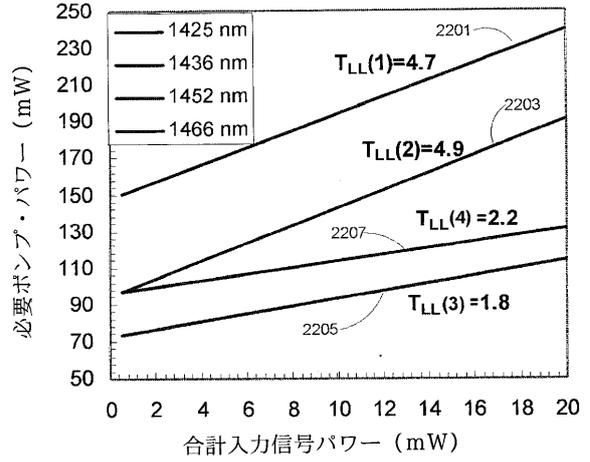
【図 20】



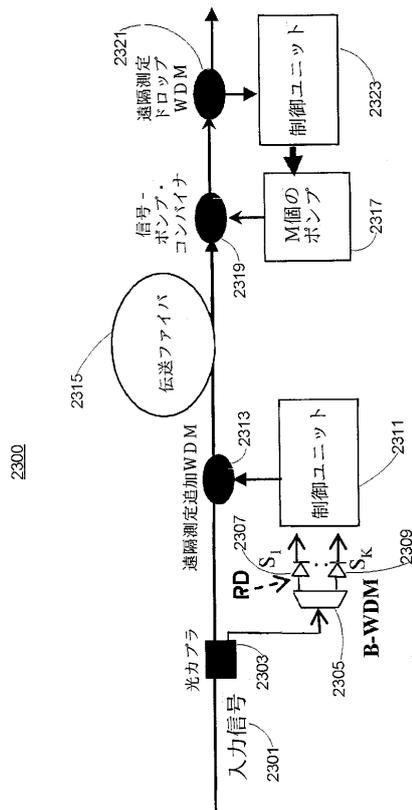
【 図 2 1 】



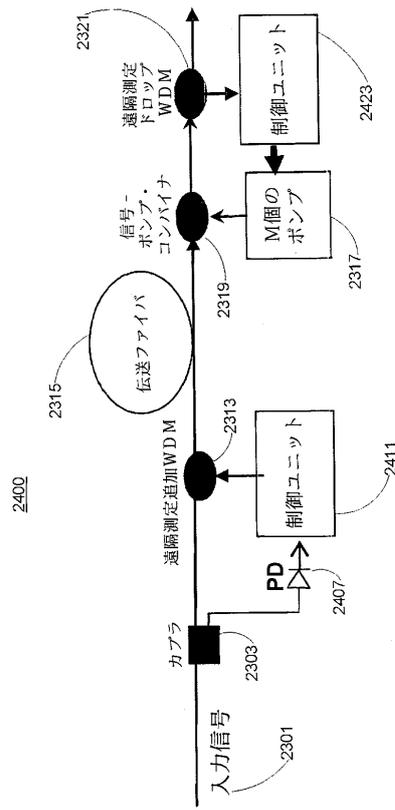
【 図 2 2 】



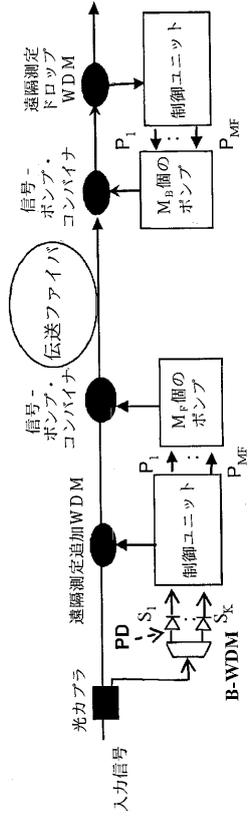
【 図 2 3 】



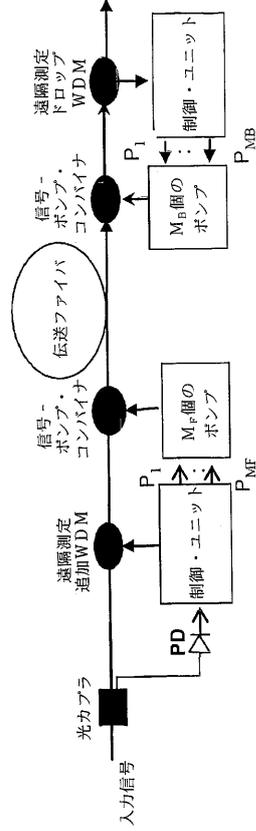
【 図 2 4 】



【 図 2 5 】



【 図 2 6 】



フロントページの続き

(72)発明者 マーティン バーク

アメリカ合衆国 ニュー ジャージー ベルフォード ウッドランド アベニュー 4 8 4

Fターム(参考) 5F172 BB04 BB12 BB13 BB18 BB35 BB45 BB46 BB47 BB65 BB84

BB86 BB94 BB99

5K102 AA53 MB05 MC11 PH13 PH14 PH47 PH48