

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5069825号
(P5069825)

(45) 発行日 平成24年11月7日(2012.11.7)

(24) 登録日 平成24年8月24日(2012.8.24)

(51) Int.Cl.

F I

H O 1 S 3/067 (2006.01)

H O 1 S 3/06

B

H O 1 S 3/10 (2006.01)

H O 1 S 3/10

Z

H O 1 S 3/30 (2006.01)

H O 1 S 3/30

Z

請求項の数 24 (全 36 頁)

(21) 出願番号 特願2000-555336 (P2000-555336)
 (86) (22) 出願日 平成11年6月16日(1999.6.16)
 (65) 公表番号 特表2002-518854 (P2002-518854A)
 (43) 公表日 平成14年6月25日(2002.6.25)
 (86) 国際出願番号 PCT/US1999/013551
 (87) 国際公開番号 WO1999/066607
 (87) 国際公開日 平成11年12月23日(1999.12.23)
 審査請求日 平成18年5月31日(2006.5.31)
 審判番号 不服2011-13517 (P2011-13517/J1)
 審判請求日 平成23年6月24日(2011.6.24)
 (31) 優先権主張番号 60/089,426
 (32) 優先日 平成10年6月16日(1998.6.16)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 500577437
 エクステラ コミュニケーションズ イン
 コーポレイテッド
 アメリカ合衆国 テキサス州 75013
 -0030 アーレン ウェスト ベサニ
 ー ドライブ 500
 (73) 特許権者 500047572
 ザ、リージェンツ、オブ、ザ、ユニバーシ
 ティ、オブ、ミシガン
 THE REGENTS OF THE
 UNIVERSITY OF MICHIGAN
 アメリカ合衆国ミシガン州 48109、
 アン、アーバー、セカンド フロア、
 ヒューロン パークウェイ 1600
 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 分散、利得傾斜、及び帯域ポンピング非線形性の光ファイバーの補償

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

伝送リンクに関連する分散を補償するように動作可能な光学素子であって、

少なくとも一つの伝送リンクから、1つ又はそれより多くの光学信号波長を有する光学信号を受け取るように動作可能な入力ポートであって、前記少なくとも一つの伝送リンクは、前記入力ポートに結合しており、かつ、長さ、光学損失、分散、分散の符号及び遮断波長を有する分布ラマン増幅器を含むものである入力ポートと、

前記入力ポートに結合しており、前記光学信号を増幅し、前記少なくとも一つの伝送リンクに関連する分散を補償するように動作可能なラマン利得ファイバであって、当該ラマン利得ファイバは、前記少なくとも一つの伝送リンクの分散 - 長さ積の大きさから 10 パーセントの範囲内である分散 - 長さ積を有し、当該ラマン利得ファイバは前記少なくとも一つの伝送リンクと関連する分散と反対の符号である分散の符号を有するようなラマン利得ファイバと、

前記ラマン利得ファイバと結合し、第1の方向に前記ラマン利得ファイバを伝播する第1のポンピング信号を生成するように動作可能な第1のポンピングソースと、

前記ラマン利得ファイバと結合し、前記第1の方向と逆方向に前記ラマン利得ファイバを伝播する第2のポンピング信号を生成するように動作可能な第2のポンピングソースと、を有し、

前記第1のポンピング信号と前記第2のポンピング信号は、前記伝送リンクの光学損失及び前記ラマン利得ファイバの光学損失を補償するように動作可能であり、前記第1のポ

10

20

ンピング信号及び前記第 2 のポンピング信号は、前記光学信号が前記ラマン利得ファイバ中で有効利得を受けるのに十分に高いパワーであり、前記第 1 のポンピング信号及び前記第 2 のポンピング信号は、前記光学信号が前記ラマン利得ファイバ及び前記伝送リンクの両方における光学損失を補償するのに十分に高いパワーであって、

前記増幅された光学信号を出力する出力ポート、
をさらに有することを特徴とする光学素子。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記ラマン利得ファイバは、前記利得ファイバがポンピング波長及び前記信号波長の両方に対して単一の空間モードとなるように、前記ポンピング波長より短い遮断波長を有することを特徴とする光学素子。

10

【請求項 3】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記光学信号は、開ループで増幅される光学素子。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記光学信号は、閉ループで増幅されることを特徴とする光学素子。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記ラマン利得ファイバは、前記ポンピングソースによって双方向にポンピングされる広帯域キャビティを少なくとも部分的に画定することを特徴とする光学素子。

20

【請求項 6】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記広帯域キャビティはサニャック・ラマン・キャビティであることを特徴とする光学素子。

【請求項 7】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記分布ラマン利得ファイバは、循環ループ・キャビティを含み、前記分布ラマン利得ファイバは、前記ポンピングソースによって逆伝播でポンピングされる二つの個別のセグメントを有することを特徴とする光学素子。

【請求項 8】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記伝送リンクは、異なる波長チャンネルに亘って非均一的な利得を有する多重波長伝送リンクであり、さらに前記異なる波長チャンネルに亘って非均一的な利得を均一化するための第二の光学素子を具備する光学素子。

30

【請求項 9】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記第 1 のポンピングソース及び前記第 2 のポンピングソースのそれぞれは、少なくとも一つのレーザダイオードであることを特徴とする光学素子。

【請求項 10】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記第 1 のポンピングソース及び前記第 2 のポンピングソースの少なくとも一つは、ラマン・オシレータであることを特徴とする光学素子。

【請求項 11】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記第 1 のポンピングソース及び前記第 2 のポンピングソースの少なくとも一つは、ラマン波長シフタであることを特徴とする光学素子。

40

【請求項 12】

請求項 1 に記載の光学素子において、前記ラマン利得ファイバは、前記第 1 のポンピングソース又は前記第 2 のポンピングソースの少なくとも一つによってポンピングされる時に、ラマン拡散を示すことを特徴とする光学素子。

【請求項 13】

請求項 3 に記載の光学素子において、前記ラマン利得ファイバは 2 つの個別の利得セグメントを有することを特徴とする光学素子。

【請求項 14】

50

請求項 7 に記載の光学素子において、前記分布ラマン利得ファイバはチャープ・ブラグ回折格子を含むことを特徴とする光学素子。

【請求項 1 5】

請求項 8 に記載の光学素子において、前記第 2 の光学素子は、少なくとも一段のマッハ・ツェンダ干渉計を含むことを特徴とする光学素子。

【請求項 1 6】

請求項 1 3 に記載の光学素子において、2 つのセグメントを接続するアイソレータをさらに含む光学素子。

【請求項 1 7】

請求項 1 3 に記載の光学素子において、2 つのセグメントを接続する利得等価素子をさらに含む光学素子。

【請求項 1 8】

請求項 1 3 に記載の光学素子において、2 つのセグメントを接続する光学アド／ドロップ・マルチプレクサをさらに含む光学素子。

【請求項 1 9】

請求項 1 8 に記載の光学素子において、前記光学アド／ドロップ・マルチプレクサに結合した利得等価素子をさらに含む光学素子。

【請求項 2 0】

請求項 1 に記載の光学素子において、
前記ラマン利得ファイバは、
光学損失を有し、

第 1 のラマン利得セグメント及び第 2 のラマン利得セグメントを含み、前記光学信号は前記ラマン利得ファイバを第 1 の方向に伝播するものであるラマン利得ファイバと、

前記ラマン利得ファイバと結合するように構成されたポンピングソースであって、当該ポンピングソースは、前記伝送リンクの光学損失及び前記ラマン利得ファイバの光学損失を補償するために前記ラマン利得ファイバをポンピングするポンピング信号を生成するように動作可能であり、前記ポンピング信号はポンピング波長及びポンピング電力を有し、前記ポンピングソースは、前記光学信号が有効利得を受けるのに十分な高さのポンピングレベルのポンピング信号を生成することを特徴とするポンピングソースと、

前記光学信号を出力する信号出力ポートと、を含み、

前記第 2 のポンピングソースは、前記信号入力ポート及び前記信号出力ポートと結合したポンピング分路であって、当該ポンピング分路は、前記第 1 のラマン利得セグメントと前記第 2 のラマン利得セグメントの間で前記ポンピング信号の少なくとも一部を結合することによって前記第 1 のポンピング信号から前記第 2 のポンピング信号を生成するように動作可能であり、前記第 1 のラマン利得セグメントは、前記信号入力ポートと結合し、前記第 2 のラマン利得セグメントは、前記信号出力ポートと結合し、前記第 1 のポンピング信号は、前記第 1 の方向と逆方向に前記第 1 のラマン利得セグメントを伝播し、次に前記第 2 のポンピング信号は、前記第 1 のポンピング信号のポンピング電力を使い果たすまで前記第 2 のラマン利得セグメントを伝播するようなポンピング分路と、
を有することを特徴とする光学素子。

【請求項 2 1】

請求項 2 0 に記載の光学素子において、前記第 1 及び第 2 のラマン利得セグメントを接続するためのアイソレータをさらに含む光学素子。

【請求項 2 2】

請求項 2 0 に記載の光学素子において、前記第 1 及び第 2 のラマン利得セグメントを接続するための利得等化素子をさらに含む光学素子。

【請求項 2 3】

請求項 2 0 に記載の光学素子において、前記第 1 及び第 2 のラマン利得セグメントを接続するための光学アド／ドロップ・マルチプレクサをさらに含む光学素子。

【請求項 2 4】

10

20

30

40

50

請求項 20 に記載の光学素子において、前記第 2 のラマン利得セグメントは、前記第 1 のポンピングソースによって双方向にポンピングされることを特徴とする光学素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

(技術分野)

本発明は一般的には、電気通信、ケーブル・テレビ (cable television) 及び他のファイバ光学アプリケーションのためのファイバ光学において使用される光学増幅器に関連する。より特定的には、本発明は、利得傾斜を最小化するための方法及び帯域ポンピングの間の非線形相互作用を最小化するための装置と同様に、ファイバ光学リンクに対する分散補償も供給する光学増幅器に関連する。

【0002】

(背景技術)

帯域幅に対する要求は、データ通信及びインターネット等のアプリケーションにより、ファイバ光学スーパーハイウェイ (fiber-optic superhighway) で急激に増加し続けている。その結果、各チャネルに対してより速い速度 - いわゆる時分割多重伝送システム - 及び複数の波長の光 - いわゆる波長分割多重伝送 (wavelength-division multiplexing) (WDM) を使用することによって、光学ファイバの帯域幅を活用することに多くの努力が費やされる。

【0003】

現在使用されているファイバ光学ネットワークのほとんどは、2 種類のファイバ：スタンダード単一モード・ファイバ (standard single-mode fiber) (「スタンダード」ファイバ) 又は分散シフト・ファイバ (dispersion-shifted fiber) (DSF) のうち一つを使用する。スタンダード・ファイバは、およそ 1310 ナノメートルのゼロ分散波長を有し、及び前記分散は主に前記固有のガラス分散から生じる。アメリカ合衆国及び世界のほとんどにおける地上ネットワークのほとんどは、実際には、スタンダード・ファイバに基づく。一方で、DSF においては、前記ゼロ分散波長をより長い波長にシフトする (shift) ために、導波路分散が使用される。従来の DSF は、石英ファイバ (fused silica fiber) における最小限の損失と同時に、1550 ナノメートルでのゼロ分散波長を有するであろう。しかしながら、前記ゼロ分散波長は、追加される導波路分散の量を変化させることによって、シフトされることができる。DSF は、新しい長距離リンクにおけるのと同様に、日本及びイタリアの 2 カ国だけで使用される。

【0004】

ファイバ光学伝送線に対する制約要素は、損失、分散及び利得等化を含む。損失は、内在的拡散、吸収及び欠損等の他の外在的効果によって、信号がファイバにおいて通過すると減弱するという事実を意味する。例えば光学増幅器は、前記損失を補償するために使用されることができる。分散とは、異なる周波数の光が異なる速度で移動することを意味し、及びそれは物質的な特性並びに導波効果の両方に起因する。多重波長システムを使用する時、及び周波数と利得の非均一性によって、利得等化は、異なる波長チャネルに亘って前記利得を安定化することを要求される。

【0005】

これらの制約を克服するための典型的な解決法は、これらの問題の各々を補償するために、伝送システム素子に周期的に置かれることである。例えば、図 1 は、分散コンペンセータ (dispersion compensator) 40 が前記分散を補償するために使用されることができ、光学増幅器 50 は前記損失を相殺させるために使用されることができ、及び利得等化素子 60 は、前記利得を均すために使用されることができを示す。分散コンペンセータの例は、チャープ・ファイバ回折格子及び分散補償ファイバ (dispersion compensating fiber) (DCF) を含む。光学増幅器の例は、エルビウムドープファイバ増幅器 (erbium-doped fiber amplifier) (EDFA)、ラマン増幅器、及び非線形ファイバ増幅器 (non-linear fiber amplifier) (NLFA) を含む。アメリカ合衆国特許第 5,778,014 号は、サニャック・ラマン増幅器及びカスケード・レーザ (cascade laser) を開

10

20

30

40

50

示する。

【 0 0 0 6 】

最後に、利得イコライザ (gain equalizer) は、マッハ・ツェンダ干渉計及び長期回折格子を含む。これら個別の構成要素からシステムを構築するよりも、図 1 に記載の機能の二つ以上を、アメリカ合衆国特許第 5, 887, 093 号に記載の単一の構成要素へと結合させる方が簡単であり、より費用効果的であるかもしれない。

【 0 0 0 7 】

WDMシステムにおいて生じる他の問題は、前記ファイバにおける非線形性を通じたチャネルの間の相互作用及びクロストーク (crosstalk) である。特に、四波混合 (four-wave mixing) (4WM) は、異なる波長チャネルの間のエネルギー交換を生じさせるが、4WMのみが、ほぼゼロ分散波長で位相整合する。その結果、ファイバ・リンクが従来のDSFから作られる場合、およそ1540乃至1560ナノメートルからWDMシステムを操作することは困難である。典型的なEDFAは、1535乃至1565ナノメートルの利得を有するので、これは大変に残念なことであることがわかり、及びより均一な利得帯域は、およそ1540乃至1560ナノメートルである。問題となりうる第二のファイバ非線形性は、変調不安定性 (modulation instability) (MI) であり、それは前記ファイバの非線形屈折率が位相整合に役立つ4WMである。しかしながら、前記分散が正であり又はいわゆるソリトン状況 (soliton regime) である時、MIのみが位相整合する。それゆえに、MIはゼロ分散波長よりも短い波長で動作することによって避けられることができる。

【 0 0 0 8 】

個別のファイバに対する帯域幅利用が増加するにつれて、伝送に使用される帯域の数が増加する。多くの帯域を使用するWDMシステムに対して、多重帯域シナリオ (multi-band scenario) における増幅の間の相互作用によってさらなる複雑性が生じる。特に、特定のシステム設計が、多重帯域伝送システムにおけるラマン増幅に必要となる。第一に、新しい非線形性ペナルティが、チャネル間のラマン効果からの利得傾斜から生じる。これは、長波長チャネルが、短波長チャネルからエネルギーを奪う傾向にあるので、生じる。それゆえに、新しいWDMチャネルの追加を伴う、現存チャネル上の利得傾斜を最小化するための手段が必要とされる。

【 0 0 0 9 】

4WM及びラマン利得傾斜の両方の効果を最小化するために、他の技術手段は分布ラマン増幅を使用するであろう。多重帯域を有するWDMシステムにおいて、前記伝送線に沿った、異なるポンピングの間の相互作用から、複雑性が生じる。

【 0 0 1 0 】

アメリカ合衆国特許第 5, 883, 736 号は、ER添加光学ファイバ増幅器を開示する。

【 0 0 1 1 】

アメリカ合衆国特許第 5, 673, 280 号は、低ノイズ光学ファイバ・ラマン増幅器を具備する物品を開示する。

【 0 0 1 2 】

アメリカ合衆国特許第 5, 623, 508 号は、逆ポンピング光学ファイバ・ラマン増幅器を具備する物品を開示する。

【 0 0 1 3 】

(発明の開示)

本発明の目的は、前記増幅器の利得ファイバが同時に前記分散補償を実行するラマン増幅器等、単一の光学素子を通して、分散補償と光学増幅器機能を結合させることである。

本発明の他の目的は、前記ファイバ光学リンクがスタンダードか、又はDSファイバを使用するかによって、前記ラマン増幅器の異なる設計を供給することである。

本発明のさらに他の目的は、WDMシステムが、DSファイバ・リンクを介して、分散補償ファイバを有するラマン増幅器における「紫色」帯域を使用することによって、4WM

10

20

30

40

50

及びM Iからの非線形性の制約を避けることができるようにすることである。

【0014】

本発明のさらに他の目的は、現存する帯域の下及び上の帯域の対称的追加によって、現存する従来の帯域への利得傾斜の効果を最小化することである。前記より長い波長チャネルが、エルビウムドープファイバ増幅器で増幅される一方で、前記より短い波長システムは、ディスクリット又は分布ラマン増幅器で有利に増幅されてもよい。

【0015】

最後に、本発明のさらに他の目的は、分布ラマン増幅を使用することによって、高密度WDMシステムにおけるファイバ非線形効果を避けることである。多重帯域システムにおけるポンピングの間の相互作用を避けるために、ラマン利得を通したポンピングの間の相互作用を最小化するために、隣接する帯域ポンピングを直交させるための手段が説明される。それゆえに、異なる帯域に対するポンピングの間の相互作用を低減させるために、それらが空間的、方向的又は極性的に直交又は非重複になるように、異なる帯域に対するポンピングを多重送信する手段が供給される。

10

【0016】

長さ、光学損失、分散、分散の符号、及び遮断波長を有する少なくとも一つの伝送リンクを含むファイバ光学伝送システムにおける、本発明の上述の目的及び他の目的を実行するにあたり、本発明は、分散を補償するため及び前記光学損失を相殺させるための単一光学素子を含む。前記光学素子は、信号波長を有する光学信号を受信するための入力ポートと、光学損失を有し並びに前記光学信号を増幅するための入力ポートに接続された分布利得媒体と、及び前記光学信号が、前記伝送リンク並びに前記利得媒体の光学損失を補償するための有効利得を受けるのに十分に高いポンピングレベルで、前記分布利得媒体をポンピングするためのポンピング光を生成するためのポンピング波長を有するポンピング機構を含む。前記光学素子はさらに、前記増幅された光学信号を出力するための出力ポートを含む。

20

【0017】

前記分布利得媒体は、典型的には長さ、分散及び分散の符号を有する利得ファイバである。前記利得ファイバは、実質的な大きさにおいて、反対の符号のものを除く、前記少なくとも一つの伝送リンクの分散 - 長さ積と等しい分散 - 長さ積を有する。また、前記利得ファイバが、前記ポンピング波長及び前記信号波長の両方に対する単一空間モードになるように、前記利得ファイバは、前記ポンピング波長より短い遮断波長を有する。

30

【0018】

前記光学信号は、開ループで増幅されてもよい。

【0019】

前記ポンピング機構は、少なくとも一つのレーザ・ダイオード、ラマン・オシレータ、又はラマン波長シフタでもよい。

【0020】

一つの実施形態において、前記利得ファイバは、前記ポンピング機構によって双方向にポンピングされる。

【0021】

他の実施形態において、前記利得ファイバは、二つの個別の区分を有し、及び前記ポンピング機構は、逆伝播で前記二つの区分をポンピングする。

40

本発明はさらに、アイソレータ、利得等化素子及び/又は前記二つの区分を接続するための光学アド/ドロップ・マルチプレクサを含む。

【0022】

さらに他の実施形態において、ポンピング分岐は、前記ポンピング機構を分岐させるために前記入力及び出力ポートに結合され、前記利得ファイバは、前記入力及び出力ポートによって分割された個別の第一及び第二の区分を有し、及び前記ポンピング機構は、逆伝播で前記第一の区分をポンピングし並びに前記ポンピング機構の力を使い果たすまで前記第二の区分をポンピングする。

50

【 0 0 2 3 】

前記光学信号は、閉ループでも増幅されてよい。

【 0 0 2 4 】

前記利得ファイバは、前記ポンピング機構によって双方向にポンピングされる広帯域キャビティを少なくとも部分的に画定してもよい。この場合、前記利得ファイバは、ラマン利得ファイバでもよく、及び前記広帯域キャビティは、サニャック・ラマン・キャビティでもよい。

【 0 0 2 5 】

他の実施形態において、前記分布利得媒体は、チャープ・ブラグ回折格子を有する循環ループ・キャビティを含み、及び前記利得ファイバは、前記ポンピング機構によって逆伝播でポンピングされる二つの個別の区分を有する。

10

【 0 0 2 6 】

前記伝送線が、異なる波長チャンネルに亘って非均一の利得を有する多重波長伝送線である時、前記異なる波長チャンネルに亘る非均一の利得を均一にするための、第二の光学素子が供給されてもよい。前記第二の光学素子は、マッハ・ツェンダ干渉計の少なくとも一つの段を含む。前記分布利得機構は、二つの個別の区分を有する利得ファイバでもよく、及び前記第二の光学素子は、前記二つの区分を接続する。

【 0 0 2 7 】

前記少なくとも一つの伝送リンクが、少なくとも一つのファイバ非線形性効果及びゼロ分散波長を有するDSFを含む、1430乃至1530ナノメートルの紫色帯域で動作する伝送システムにおいて、前記単一光学素子は、前記少なくとも一つのリンクにおいて、前記少なくとも一つのファイバ非線形性効果を避けるために、前記ゼロ分散波長から十分に離れた紫色帯域において、利得を供給する。前記利得ファイバは、スタンダード分散ファイバでもよい。

20

【 0 0 2 8 】

前記少なくとも一つのファイバ非線形性は、四波混合及びノ又は変調不安定性でもよい。

【 0 0 2 9 】

前記少なくとも一つの伝送リンクは、異なる波長チャンネルに亘る非均一利得を有してもよく、及び本発明はさらに、前記異なる波長チャンネルに亘る前記非均一利得を均一にするための前記単一光学素子に接続された第二の光学素子を含む。前記第二の光学素子は、マッハ・ツェンダ干渉計の少なくとも一つの段を含んでもよい。

30

【 0 0 3 0 】

前記利得ファイバは、集積分散が、実質的に紫色帯域の真中に相殺されるように選択された分散補償ファイバでもよい。

【 0 0 3 1 】

さらに、本発明の上述の目的及び他の目的を実行するにあたり、多重波長伝送線を含むファイバ光学多重帯域システムにおいて、波長の追加の帯域が追加される時に、波長の少なくとも一つの現存する帯域内で利得傾斜を最小化させるための方法が、供給される。前記方法は、前記波長の少なくとも一つの現存する帯域におけるエネルギー変化を最小化するために、より短い及びより長い波長帯域を得るために前記波長の少なくとも一つの現存する帯域の上及び下の両方に実質的に等しい数の追加帯域を追加することを含む。前記方法はまた、前記より短い及びより長い波長帯域の各々が利得を有するように、前記より短い及びより長い波長帯域を増幅することを含む。

40

【 0 0 3 2 】

前記より短い波長帯域を増幅する段階は、ディスクリット又は分布ラマン増幅器のいずれかで達成されてもよい。

【 0 0 3 3 】

前記より長い波長帯域を増幅する段階は、エルビウムドープファイバ増幅器で達成されてもよい。前記より短い波長帯域の少なくとも一つにおける利得は、前記より長い波長帯域の少なくとも一つにおける利得よりも大きい。

50

【 0 0 3 4 】

前記より短い波長帯域を増幅する段階は、分布の形態でなされてもよい。

【 0 0 3 5 】

さらに、多重波伝送線を含むファイバ光学多重帯域伝送システムにおける本発明の上述の目的及び他の目的を実行するにあたり、一つの装置が供給される。前記装置は、増幅を得るための前記伝送線の異なる帯域をポンピングするための複数の帯域ポンピングを含み、異なる帯域に対する帯域ポンピングは、エネルギーを交換することによって非線形に相互作用する。前記装置は、前記非線形相互作用を最小化するために、隣接する帯域ポンピングを直交させるための手段も含む。

【 0 0 3 6 】

前記増幅は分布ラマン増幅でもよく、及び前記エネルギーはラマン・エネルギーである。

【 0 0 3 7 】

交互の帯域ポンピングは、前記異なる帯域に対する帯域ポンピングの間の相互作用を最小化するために、空間的に分散されてもよい。

【 0 0 3 8 】

交互の帯域ポンピングは、前記異なる帯域に対する帯域ポンピングの間の相互作用を最小化するために、交差偏光されてもよい。

前記複数の帯域ポンピングは、分布ラマン増幅器の純粋分布システムを画定してもよい。

【 0 0 3 9 】

代替的には、前記複数の帯域ポンピングは、ディスクリット及び分布増幅器の複合システムを画定してもよい。

【 0 0 4 0 】

前記複数の帯域ポンピングは、ディスクリット・レーザ・ダイオード又は前記伝送線をポンピングするためのラマン・オシレータを含んでもよい。

【 0 0 4 1 】

本発明に従って、分散管理ラマン増幅器 (Dispersion Managing Raman Amplifier) (DMRA) は、これも分散コンペンセータとして機能する利得ファイバを使用して実行される。前記遮断波長が、前記ポンピング波長よりも短くなるように、前記ファイバは、前記ポンピング及び信号波長の両方に対して単一モード (single mode) であるべきである。前記ファイバの長さ及び分散は、理想的には伝送リンクと同じ大きさの分散 - 長さ積を有するが、分散の反対の符号を有するように選択されるべきである。前記ポンピングレベルは、前記分散補償ファイバ及び前記伝送リンクからの損失の合計よりも大きい利得を供給するように選択されるべきである。また、前記ポンピング体系は、前記ポンピング光に対して

3 デシベル損失長内にとどまるように選択されるべきである。

一つの実施形態において、大きな負の分散 (例; $D < -80$ 毎秒 / ナノメートル - キロメートル) を有する分散補償ファイバ (dispersion-compensating fiber) (DCF) が、スタンダード・ファイバを使用してリンクの分散を補償するために使用される。前記ファイバ・リンクが 45 キロメートルの長さである場合、前記 DCF は、1500 ナノメートルでの分散補償に対して約 7.8 キロメートルの長さであるべきである。また、前記利得は、14.2 デシベルを超え、及び前記利得ファイバは、双方向か又は二つの区分においてポンピングされる必要があるかもしれない。

【 0 0 4 2 】

他の実施形態において、スタンダード・ファイバは、従来の DS ファイバを使用し、及び「紫色帯域」において動作することで、リンクの分散を補償するために使用される。前記ファイバ・リンクが 45 キロメートルの長さである場合、前記スタンダード利得ファイバは、1500 ナノメートルにおける分散補償に対して約 13.3 キロメートルの長さであるべきである。また、前記利得は 14.2 デシベルを超えるべきであり、前記利得ファイバは、双方向に又は二つの区分において、ポンピングされる必要があるかもしれない。

【 0 0 4 3 】

前記利得ファイバが、二つの区分に分割される実施形態においては、多くの素子が前記二つの区分を接続するために使用されることができる。最も簡単なことは、前記二つのポンピングの間の相互作用を避けるために、アイソレータを挿入することである。代替的には、利得等化素子又は光学アド/ドロップ・マルチプレクサは、前記二つの区分の間の結合点に配置されてもよい。

【0044】

本発明はまた、伝送リンクにおいてDSファイバを使用する分散及び非線形性管理ファイバ光学システムを実行することにも関連する。多重波長WDMシステムに関して、従来のDSFにおけるゼロ分散波長にごく近い波長を避けるための、1430乃至1530ナノメートルの「紫色帯域」におけるオペレーションが必要とされる。利得はラマン増幅器によって供給され、及び前記利得ファイバはまた同時に、分散補償に備える。4WMは、ゼロ分散波長から離れて位相整合しないので、前記ファイバ非線形性は管理され、及び前記伝送ファイバは、通常の分散（すなわち、 $D < 0$ ）の状況で動作するので、MIは避けられる。

【0045】

前記増幅及び分散補償素子を結合することで、前記システムの実行を単純化し、及びラマン増幅器に対してより費用が効果的である。さらに、マッハ・ツェンダ干渉計の一つ又は二つの段を具備する利得等化素子が、ラマン増幅器における利得帯域を均すために使用されることができる。また、前記リンクにわたるゼロの平均分散を有する正及び負の分散区分の間で交替する分散管理システムへの関心は増加している。この関心は、非ゼロ復帰、ゼロ復帰及びソリトンを含む、事実上すべてのデータ形式に及ぶ。前記ラマン増幅器は、分散補償ファイバを使用して、当然に分散及び非線形性管理システムに通じる。

【0046】

さらに、本発明に従って、現在使用される従来の帯域にわたる前記利得傾斜変化は、短波長帯域におけるチャンネルにおよそ等しい数で、前記長波長帯域にチャンネルを追加することによって、最小化されることができる。（チャンネル数の点で）前記ほぼ対称的なチャンネル追加は、従来の帯域におけるラマン・エネルギー交換を相殺する。前記従来の及び長波長帯域は、エルビウムドープファイバ増幅器を使用することができる一方で、前記短波長帯域は、ディスクリット又は分布ラマン増幅器によって増幅されることができる。

【0047】

最後に、本発明はまた、多重帯域を有する分布ラマン増幅にも関連する。多重帯域分布システムにおいて、異なる帯域に対するポンピングの間の非線形相互作用は、交互の帯域ポンピングを空間的に分散させることによって、及び/又は交互のポンピング帯域を交差偏光させることによって最小化されることができる。前記分布ラマン増幅は、ディスクリット・レーザ・ダイオードで伝送線をポンピングすることによって、又はラマン・オシレータによって達成されることができる。

【0048】

本発明の上述の目的及び他の目的、特徴及び効果は、添付の図面を考慮する時に、本発明を実行するための最善の方法に関する以下の詳細な説明から容易に明らかになるであろう。

【0049】

（発明を実施するための最良の形態）

本発明は、分散管理システムの実行を単純化するために、光学増幅及び分散補償の機能を有利に結合させる。前記DMRAは、分散が周囲の伝送リンクを補償するファイバにおいてラマン増幅を使用する。

【0050】

より特定的には、本発明のDMRAは、波長 λ を有する光学信号を入力するための入力ポートと、前記光学信号を受信し、及びラマン拡散を通してそこにある光学信号を増幅し並びにスペクトル的に広げるための分布利得媒体と、前記分布利得媒体をポンピングするためのポンピング光を生成するための、波長 P で操作されるポンピング手段と、及び前記

10

20

30

40

50

増幅され並びにスペクトル的に広げられた光学信号を出力するための出力ポートとを具備する。前記分布利得媒体の分散及び長さは、分散の反対の符号のものを除く、伝送リンクと同じ大きさの分散・長さ積になるように選択される。前記ファイバは、 P よりも短い利得ファイバの遮断波長を作ることによって、前記ポンピング及び信号波長に対する単一空間モードに作られる。また、前記増幅器は、有効利得が、伝送リンク及び分散補償ファイバにおける損失の合計を超えるようにポンピングされる。

【0051】

前記DMRAの第一の実施形態は、光学ファイバ利得媒体を有する開ループ増幅を使用する。前記ファイバが、双方向にポンピングされ又はアイソレータを通して接続される二つの区分においてポンピングされる、ポンピングソース (pump source) が使用される。代替的に、前記二つの利得区分は、利得等化素子及び/又は光学アド/ドロップ・マルチプレクサを通して接続されることができ、前記DMRAの第二の実施形態は、ポンピングされ、及び前記ループ内の分散補償ファイバを使用するサニャック・ラマン・キャビティを使用する。前記サニャック・ラマン・キャビティにおけるフィードバック (feedback) は、要求されるポンピング力を低減させ、及び前記広帯域キャビティ設計は、前記生成された帯域幅のほとんどをサポートする (support)。また、前記サニャック・ラマン設計は、前記双方向ポンピングを自動的に達成する。前記DMRA増幅器の第三の実施形態は、厳格な逆伝播ポンピング体系を維持するために、前記ファイバが二つの部分でポンピングされる、チャープ・ブラグ回折格子を有する循環ループ・キャビティを使用する。これらの実施形態のすべてにおける前記利得ファイバ長及び分散は、前記伝送リンクがスタンダード・ファイバを使用するか又はDSファイバを使用するかに依存する。

【0052】

本発明はまた、前記伝送リンクがDSFを具備する分散及び非線形性管理システムにも関連する。多重波長WDMシステムを達成するために、1430乃至1530ナノメートルの「紫色」帯域内になるようにオペレーションが選択され、それによってゼロ分散波長を取り囲む波長領域を避ける。前記利得ファイバも分散補償をするDMRAが使用される。前記リンク全体に亘る平均分散は、およそゼロになるように調整されるにもかかわらず、前記局地的分散は、ファイバ・リンクの中のどの点においても小さくない。こうして、4WMは位相整合しないので、前記4WMペナルティは除去される。また、オペレーションは、前記伝送ファイバの通常の分散状況内にあるので、MIもまた位相整合しない。

【0053】

本発明は、現存帯域への、より長い及びより短い波長でのチャンネルの(数に関して)対称的な追加によって、現存する従来の帯域への利得傾斜を最小化することにも関連する。短波長S帯域に対して対称的に、長波長L帯域に波長を加えることによって、従来のC帯域におけるエネルギー変化を最小化する。前記C帯域及びL帯域は、エルビウムドープファイバ増幅器で増幅されることができ、一方で、前記S帯域は、ディスクリット又は分布ラマン増幅器を使用することができる。前記S帯域における利得は、前記C帯域における利得よりも大きくなければならず、同様に前記C帯域は前記L帯域よりも多くの利得を必要としてもよい。

【0054】

さらに、本発明は、非線形ファイバ伝播効果を低減させるために、多重帯域システムにおいて分布ラマン増幅を使用することに関連する。広帯域分布ラマン増幅において、異なる帯域に対するポンピングの間の前記非線形相互作用は、空間的に交互の帯域ポンピングを分散することによって、及び/又は交互のポンピング帯域を交差偏光させることによって最小化されることができ、隣接する帯域ポンピングの直交は、純粋な分布システム又は複合ディスクリット/分布システムにおいてなされることができ、

【0055】

本発明において稼動する増幅機構及び非線形性をより理解するために、最初に誘導ラマン拡散、ラマン・カスケード (Raman cascading)、MI及び4WMを説明する。誘導ラマン拡散効果、MI及び4WMは、光学ファイバ等の誘電素材が、強い光にさらされる時に

発生する三次非線形性の結果物である。前記三次非線形効果は、瞬間的な光の強度に比例する。

【 0 0 5 6 】

1．誘導ラマン拡散

誘導ラマン拡散は、光学ファイバを増幅器及び調整可能レーザにする重要な非線形処理である。ラマン利得は、石英ファイバにおける光学フォノン（phonon）と強い光との相互作用から生じ、及びラマン効果は、一つの光学ビーム（beam）（ポンピング）から他の光学ビーム（信号）へのエネルギーの伝送に通じる。前記信号は、石英ファイバの振動モード（vibrational mode）によって決定される量だけ、周波数に関して減退される（又は波長に関して高められる）。石英ファイバに関するラマン利得係数 g_r は、図 2 に記載される。特筆すべきは、ラマン利得 g_r は、 13.2 テラヘルツ（ 440 cm^{-1} の波長に対応する）に中心がある幅広いピークを有する（ 40 テラヘルツまでの）大きな周波数域に及ぶことである。前記大きな周波数域に対するこの振舞いは、石英ガラスのアモルファスな（amorphous）性質によるものであり、ラマン効果が広帯域増幅器で使用されることができるようになる。前記ラマン利得は、ファイバ・コア（fiber core）の構成に依存もし、及び異なるドーパント（dopant）濃度とともに変化することができる。

10

【 0 0 5 7 】

ラマン増幅は、いくつかの魅力的な特性を有する。第一に、ラマン利得は、現存するファイバにおける光学フォノンとポンピング光との相互作用に基づいているので、現存するファイバ光学リンクを更新するための良い候補である。第二に、システムの信頼性に関する重要な考慮の対象である、挿入されるファイバの損失を除いて、ポンピング力がない場合の過剰な損失がない。

20

【 0 0 5 8 】

2．ラマン・カスケード

カスケードは、ポンピング波長における光学エネルギーが、一連の非線形偏光を通して、より長い波長における光学信号へと変えられる機構である。前記誘電体の各非線形偏光は、刺激を生成した光の波長からずれている波長に対応して、分子の振動状態を生成する。前記非線形偏光効果は、前記誘電体全体に分布し、一つの波長におけるエネルギーが、より長い波長で光を生成する振動モードをポンピングする時の、カスケード状の一連の波長シフトを生じる。この処理は、多くのオーダを通して流れることができる。前記ラマン利得の特徴は、石英ファイバにおいて 13.2 テラヘルツに中心を有するピークを有するので、一つのラマン・オーダは、 13.2 テラヘルツで、以前のオーダから分離されるように編成されることができる。

30

【 0 0 5 9 】

カスケードは、大変望ましい誘導ラマン拡散増幅器を作る。ラマン増幅そのものは、前記利得スペクトルが大変広いので（ 13.2 テラヘルツ周辺にピークがある 5 テラヘルツよりいも大きい帯域幅）、（波長分割多重送信におけるような）多重波長又は短い光学パルス（short optical pulse）を増幅するために使用されることができる。さらに、カスケードによって、異なる波長の広い範囲に対するラマン増幅が可能になる。前記ポンピング波長を変化させることによって、又はラマン利得のカスケードされたオーダを使用することによって、前記利得は、 1300 ナノメートルから 1600 ナノメートルの間の電気通信ウィンドウ全体に対して供給されることができる。

40

【 0 0 6 0 】

3．変調不安定性及び四波混合

$MI/4WM$ は、ストークス（ S ）及び反ストークス（ A ）フォトンを生成する二つのポンピング（ P ）フォトンを伴う。 $MI/4WM$ 及びラマン増幅の両方は、光学ファイバにおける三次感受率（ 3 ）から生じる。より特定的には、（ 3 ）の実数の部分、いわゆる非線形屈折率 n_2 は、 $MI/4WM$ を担当し、一方で分子振動と関連する（ 3 ）の虚数部分は、ラマン利得効果に対応する。石英ファイバにおいては、前記 n_2 の約 $4/5$ が、紫外共振（ultraviolet resonance）によって生じる電子的、瞬間的非線形性であり

50

、 n^2 の約 $1/5$ は、例えば光学フォノン（M・N・イスラム、超高速ファイバ・スイッチ装置及びシステム、ケンブリッジ大学出版、1992年におけるさらなる詳細を参照のこと）等のラマン活性振動から生じる。この後者の寄与（contribution）の虚数部分は、図2に記載のラマン利得スペクトルに対応する。

【0061】

ラマン増幅におけるのと同様に、MI/4WM利得は、全てのファイバにおいて存在する。しかしながら、ラマン効果とは異なり、MI及び4WMの両方は、位相適合を必要とする。4WMは、オペレーションがゼロ分散波長に近くない限り、位相適合を要求するために、長いファイバにおいては通常重要ではない。しかしながら、非線形屈折率は、前記ポンピング及び側波帯を位相適合するために使用されるので、MIは、自己位相適合として機能することができる。これは、ファイバにおいて、ほぼゼロ分散波長を操作するとき、特に当てはまることである。4WMにおいて、前記信号波長が、（前記信号波長が、ゼロ分散波長よりも短い）通常の分散状況に入る時に、測波帯は利得なく生成される。MIは、非線形屈折率が、前記信号及び測波帯を位相適合させるために使用される4フォトン増幅又はパラメトリック増幅（parametric amplification）である。MIに関しては、前記ポンピング波長は、異常群速度状況になければならず（すなわち、前記信号波長は、ゼロ分散波長よりも長い）、及び適切な位相適合は、信号及び測波帯が順伝播（co-propagating）であることを要求する。

10

【0062】

4．分散及び非線形性管理伝送システム

20

最近まで、従来の知識は、最大システム帯域幅は、ファイバにおける約ゼロの分散波長のオペレーションに対して発生するというものであった。しかしながら、WDMシステムに関しては、この考えは非線形性が考慮に入れられる場合には間違いであることがわかった。前記システムは、ファイバのゼロ分散波長で、又はそれに近く動作する時、隣接する波長チャンネルでの信号及び増幅器ノイズは、類似の速度で進む。これらの条件の下で、前記多重波長信号及びノイズは、長い相互作用長を有し、及び混合することができる。

【0063】

色彩分散（chromatic dispersion）によって、異なる波長が異なる群速度で、伝送ファイバを進む。色彩分散は、位相整合又は近接した波長が重複する伝播距離を低減させることができ、及びファイバにおける非線形指数を通して相互作用の量を低減させることができる。このように、長い伝送システムにおいて、前記非線形の振舞いは、位相整合の長さが短くなり、エンド・ツー・エンド（end-to-end）分散が小さくなるように、集積分散を調整することによって管理されることができる。この技術は、分散マッピング（dispersion mapping）として公知である（詳細は、光学ファイバ電気通信IIIA、I・P・カミノウ及びT・L・コック編、アカデミック出版、1997年の第8章及び10章を参照のこと）。

30

【0064】

分散マッピングにおいて、集積分散を解除するために、分散補償素子が、周期的に伝送線に挿入される。DMRAを使用することによって、前記分散補償の周期性は、前記増幅器の間隔の周期性と同じになる。WDMシステムに関して、集積分散は、前記伝送線に対する平均ゼロの分散波長に近い一つの波長のみに関して、ゼロに戻ることが注目される。このWDMチャンネルに関する異なる集積分散は、分散カーブの非ゼロ・スロープ（nonzero slope）から生じる。前記分散補償素子が、前記伝送ファイバから分散スロープの反対の符号（単なる分散の反対の符号ではない）を有する場合にのみ、これは避けられる。この場合を除いて、信号分散を最小化するために、前記相殺する波長から離れたチャンネルに対する集積分散は、受信側の反対の分散で補償されることができる。

40

【0065】

5．分散管理ラマン増幅器

DMRAは、分散補償ファイバを、ラマン増幅器における利得ファイバとして使用することによって、増幅及び分散補償機能を結合する。前記利得ファイバの遮断波長は、前記ポ

50

ンピング及び信号が単一モードになるように、前記ポンピング波長よりも短くなるように調整されなければならない。前記伝送ファイバ及び前記利得ファイバのゼロ分散波長から離れて動作することによって、4WMは位相整合しないので、分散及び非線形性管理が達成される。

【0066】

本発明の手段は、利得ファイバ特性の適切な選択である。特に、平均光学波長における分散に、増幅ファイバの長さをかけたもの $(D \times L)_{\text{GAIN}}$ が、前記リンクに集積した分散をほぼ補償する（好ましくは、ピーク集積分散値の大きさの10パーセント以内）ように、ラマン増幅器において使用されるファイバが選択される。すなわち

$$(D \times L)_{\text{GAIN}} - (D \times L)_{\text{LINK}}$$

である。

【0067】

これはいくつかのことを示す：

- ・前記増幅ファイバに対する分散の符号は、前記伝送リンクファイバのそれとは反対である。

- ・前記増幅ファイバにおける分散値Dは、前記利得ファイバにおける前記動作波長及びゼロ分散波長によって決定される。

- ・前記ファイバの長さは、前記所望の分散補償を供給するように調整されることができる。

- ・前記伝送ファイバがスタンダード・ファイバである場合、前記利得ファイバは、有効ラマン利得に潜在的に通じることができる。これは、いわゆるDCF（又は大きな負の分散ファイバ）が、典型的には小さなコアサイズ並びに有効領域、及び前記コアにおける有効なゲルマニウム内容物を有するからであり、その両方が大きなラマン効果に貢献する。

- ・唯一の条件は、伝送リンク区分に対する全体の又は平均の分散×長さの値が、相殺されることである。すなわち、所望されれば、分散補償を達成するために、異なるファイバ区分が、前記ラマン増幅器内で連結されることができる。

前記ラマン利得は、ポンピング強度に依存する非線形処理なので、利得は、前記ポンピング強度が高いまま維持される間だけ達成されることを理解することが重要である。例えば、ラマン増幅に関する有効な長さは

$$L_{\text{eff}} \equiv \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]$$

と定義され、Lは前記ファイバの物理的な長さであり、 α は減衰定数である（典型的なメートル逆数又はキロメートル逆数の単位）。デシベル/キロメートルで与えられるこの減衰定数は、

$$[\text{dB} / \text{km}] = 4.34 \times [\text{km}^{-1}]$$

によるこの減衰定数に関連する。それゆえに、ラマン利得に関する有効な長さは、およそ、前記ポンピング強度が、ファイバ入力においてその半分の強度に落ちる距離である。前記ポンピング波長における有効損失はおよそ6乃至7デシベルである場合、前記ラマン利得は、前記ファイバを双方向にポンピングすることにより、又は前記ファイバを半分ずつに分割し及び各々半分をポンピングすることによって達成されることができる。

【0068】

最後に、適切な損失補償に関して、前記ラマン増幅器に適用されるポンピング電力は、前記伝送リンク損失、前記利得ファイバ損失及び関連するカプラ（coupler）又はスプリッタ損失（splitter losses）を補償するのに十分でなければならない。例えば前記有効利得がGによって与えられ、及び前記損失が減衰因子Lとして示される場合、

$$G[\text{dB}] = L_{\text{LINK}}[\text{dB}] + L_{\text{GAIN FIBER}}[\text{dB}] + L_{\text{COUPLING \& SPLITTING}}[\text{dB}]$$

である。

【0069】

6. スタンダード及びDSファイバに関するDMRAの例示的設計

DMRAの概念を説明するために、スタンダード及びDS両方のファイバを使用する伝送システムにおける例示的なシステム設計を選択する。特定のするために、前記ラマン増幅器における波長、リンク・ファイバ、増幅器間隔、及び利得ファイバに関して以下の仮定が作られる。

・波長。ラマン増幅器は、1430乃至1530ナノメートルに及ぶ紫色帯域のために開発されている。特に、前記青紫帯域は1430乃至1480ナノメートルである一方で、赤紫帯域は、1480乃至1530ナノメートルである。特定の例として、 $\lambda_0 = 1500$ ナノメートルの波長は、以下の例において使用され、それは赤紫帯域の中間近くに入る。

・スタンダード単一モード・ファイバに関する分散。使用されるスタンダード・ファイバは、コーニング(Corning)SMF-28であると仮定され、それに対して製造者は：

1200 1600 nmで

$$D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left\{ \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right\} [ps/nm-km]$$

$\lambda_0 = 1310$ nm (公称)

$S_0 = 0.092 ps/nm^2-km$

$= 1500$ nmにおいて、 $D = +14.4 ps/nm-km$

の分散を供給する。

・DSファイバに関する分散。使用されるDSFは、コーニングSMF/DSと仮定され、それに対して製造者は：

$D(\lambda) = S_0 \left\{ \lambda - \lambda_0 \right\} [ps/nm-km]$ で

1500 1600 nm

$\lambda_0 = 1550$ nm (公称)

$S_0 = 0.085 ps/nm^2-km$

$= 1500$ nmにおいて、 $D = -4.25 ps/nm-km$

の分散を供給する。

【0070】

・リンク長。増幅器間隔は、 $L_{LINK} = 45$ kmになると仮定され、それは、ファイバ光学ネットワークにおける典型的なハット間隔(hut spacing)である。

・利得ファイバ。利得ファイバは、前記ポンピング波長よりも短い遮断波長を常に有していなければならない。利得ファイバに対する可能性のある候補は、以下のものを含む(正確にはこれらのファイバではないかもしれないが、類似の分散特性を有するファイバである)

(a) 1500 nmで、 $D = 14.4 ps/nm-km$ であるスタンダードSMF-28ファイバ

(b) 商業的にはライコム(Lycom)から入手可能であるDCF又は高負分散ファイバである。例えば、図3は、そのようなファイバに関する損失及び分散を示す。特に、1500 nmでの分散は、およそ

$D = -83 ps/nm-km$ である。

設計#1：スタンダード・ファイバを具備するファイバ・リンク

45 kmの長さのリンクに関して、 $\lambda = 1500$ nmでのリンクにおける合計分散

$(D \times L)_{LINK} = (+14.4 ps/nm-km) \times (45 km)$

$= +648 ps/nm$

である。

【0071】

ラマン増幅器における利得ファイバに関して、図3に記載のようなDCFを使用する場合、要求される利得ファイバの長さは

10

20

30

40

50

$$L_{\text{LINK}} = (D \times L)_{\text{LINK}} / (-D_{\text{DCF}}) = (648 \text{ ps/nm}) / (83 \text{ ps/nm} - \text{km}) = 7.8 \text{ km}$$

である。

【0072】

この長さは、ラマン増幅器において通常使用される典型的な長さである1キロメートルと比較して長い。

【0073】

要求される最小限の利得を計算するために、利得ファイバ及びリンク損失の挿入損失が計算される必要がある。DCFの損失はおよそ

$$L_{\text{GAIN}} = 0.55 \text{ dB/km} \times 7.8 \text{ km} = 4.3 \text{ dB}$$

10

である。

【0074】

1500 nmでの伝送リンク損失はおよそ

$$L_{\text{LINK}} = 0.22 \text{ dB/km} \times 45 \text{ km} = 9.9 \text{ dB}$$

である。

【0075】

それゆえに前記ポンピング電力は、少なくとも

$$G > L_{\text{GAIN}} + L_{\text{LINK}} = 14.2 \text{ dB}$$

の利得を供給するように調整されなければならない。

【0076】

20

利得ファイバにおいて、約1400ナノメートルのポンピング波長に関する損失（すなわち、1500 nmの動作波長の上の一つのラマン・オーダー）を計算することも重要である。図3より、1500ナノメートルの外挿された損失値は、およそ0.8 dB/kmである。それゆえに、利得ファイバにおけるポンピング損失は、およそ

$$L_{\text{PUMP}} = 0.8 \text{ dB/km} \times 7.8 \text{ km} = 6.24 \text{ dB}$$

である。これは、非線形処理に関する前記 L_{eff} を超えるので、前記利得ファイバは、双方向にポンピングされるか、又は前記利得ファイバの半分にされたものの二つが、個別にポンピングされなければならない。

設計#2：分散シフトファイバを具備するファイバ・リンク

45キロメートルの長さのリンクに関して、1500ナノメートルでのリンクにおける合計分散に関して

30

$$(D \times L)_{\text{LINK}} = (-4.25 \text{ ps/nm} - \text{km}) \times (45 \text{ km}) = -191.25 \text{ ps/nm}$$

である。ラマン増幅器における利得ファイバに関して、スタンダードSMF-28を使用する場合、要求される利得ファイバの長さは

$$L_{\text{LINK}} = (D \times L)_{\text{LINK}} / (-D_{\text{SMF-28}}) = (-191.25 \text{ ps/nm}) / (-14.4 \text{ ps/nm} - \text{km}) = 13.28 \text{ km}$$

である。この長さは、ラマン増幅器において通常使用される典型的な長さである1キロメートルと比較して、長い。

【0077】

40

要求される最小限の利得を計算するために、前記利得ファイバ及び前記リンク損失の挿入損失を計算する必要がある。スタンダード・ファイバにおける損失はおよそ

$$L_{\text{GAIN}} = 0.22 \text{ dB/km} \times 13.28 \text{ km} = 2.92 \text{ dB}$$

である。前記DSFにおける1500ナノメートルでの伝送リンク損失はおよそ

$$L_{\text{LINK}} = 0.25 \text{ dB/km} \times 45 \text{ km} = 11.25 \text{ dB}$$

である。それゆえに、前記ポンピング電力は少なくとも

$$G > L_{\text{GAIN}} + L_{\text{LINK}} = 14.2 \text{ dB}$$

の利得を供給するように調整されなければならない。

利得ファイバにおいて、約1400ナノメートルのポンピング波長に関する損失を計算することも重要である。スタンダード・ファイバにおいて、1500ナノメートルでの損失

50

値は、およそ 0.5 dB/km である。それゆえに、利得ファイバにおけるポンピング損失は、およそ

$$L_{\text{PUMP}} = 0.5 \text{ dB/km} \times 13.28 \text{ km} = 6.64 \text{ dB}$$

である。これは、非線形処理に関する前記 L_{eff} を超えるので、前記利得ファイバは再度、双方向にポンピングされるか、又は前記利得ファイバの半分にされたものの二つが、個別にポンピングされなければならない。

【0078】

7. DMR A 増幅器の好ましい実施形態

図4(a)は、分散管理ラマン増幅器を供給するための開ループ設計を使用する本発明の第一の実施形態を示す。開ループ設計は、最も簡単なDMR Aであるが、それは高いポンピング電力を必要とするかもしれない。図4(a)に記載のDMR A増幅器において、光学信号は、入力ポート110から光学利得ファイバ100に入力される。光学利得ファイバ100は、ポンピングレーザ120及び150によって生成されるポンピング光によって、双方向にポンピングされる。前記利得ファイバ100は、信号及びポンピング波長の両方で、単一空間モードであり、前記利得ファイバは、説明されたすべての属性を所有する。増幅された信号は、出力ポート160を通して出力される。前記ポンピングは、信号波長を伝送するがポンピング波長に亘って結合する、波長分割伝送方式(WDM)を通して結合される。

【0079】

ポンピング光の揺らぎが前記増幅された信号に結合しないように、厳格な逆伝播ポンピング及び信号形状を有することがしばしば望ましい。図4(b)に記載の開ループ構造は、前記利得ファイバを二つの区分200及び210に分割することでこれを達成する。二つのポンピング(pump)240及び270は、各区分をポンピングするために使用され、及びWDM230及び260は、前記ポンピングにおいて結合するために使用される。さらに、各光学アイソレータ250は、WDM230において発生するかもしれない、270から240へのポンピング・エネルギーの間の干渉を避けるために、前記二つの区分の間に配置される。

【0080】

図4(b)は前記二つの利得区分の間のアイソレータを使用するが、他の素子ができるということが、明確であろう。例えば、利得等化素子及び/又は光学アド/ドロップ・マルチプレクサ(図1)が、前記アイソレータ(図4(c))の代わりに、又は一緒に使用されてもよい。アド/ドロップ・マルチプレクサと関連する、典型的には高い挿入損失のために、前記二つの区分におけるポンピングの間に、有効な絶縁が達成される。

【0081】

前記利得ファイバポンピングに関する交互の構成も、図4(d)に記載される。従来の特許(すなわち特許第5,623,508号及び第5,673,280号)も、前記アイソレータ周辺のポンピング分岐が使用される、アイソレータを使用した実行を説明していたことが認められる。しかしながら、より良い構成が図4(d)に記載される。ここで、前記利得ファイバは、二つの長さに分割され、前記ポンピングは第一のファイバへと導入され、前記信号が導入され及び抽出される前記ポンピングが分岐され、及び前記ポンピングは第二の利得ファイバに入る。前記アイソレータへの損害を避けるように、残りのポンピングを取り除くために任意のWDMが使用されてもよい。前記アイソレータは、前記二つの利得ファイバの間に配置される。従来技術に対する、この構成の長所は：

- ・前記第一の段は、低ノイズ前置増幅器である；
- ・前記信号パスにおける前記アイソレータはさらにノイズを低減する；
- ・前記第二の段は、電力増幅器であり、ポンピング電力を使い果たす；
- ・微弱信号がより高い利得を見てからのより良いノイズ値
- ・より良い利得飽和性能；及び
- ・二重レイリー散乱(Rayleigh scattering)の同じ防止

10

20

30

40

50

を含む。

【 0 0 8 2 】

さらに、二段増幅器の中段において、アドノドロップ・マルチプレクサ等の他の素子も配置されることができることが明確であろう。例えば、図 4 (e) は、前記中段での光学アドノドロップ・マルチプレクサとともに、図 4 (d) に記載の二段設計を示す。また、図 4 (d) 及び 4 (e) に記載の構成は、分散補償ファイバが、利得ファイバとして使用されていなくても、独自のものであり、効果的である。さらに、合成増幅器のノイズ値に大きな影響を与えることなく、電力増幅器利得を増加させるように、二段増幅器の第二段に双方向ポンピングを有することも、望ましいかもしれない。これは、図 4 (f) に記載される。

10

【 0 0 8 3 】

前記ポンピング電力の要求を低減するために、サニャック・ラマン・キャビティ等の広帯域キャビティが使用されることができ。図 5 は、双方向ポンピングを伴うサニャック・ラマン・キャビティ設計を使用する D M R A の実施形態を示す。図 5 を参照すると、前記 D M R A のサニャック・ラマン・キャビティは、広帯域ミラ (broadband mirror) 3 1 0 及びラマン利得ファイバを具備するループ・ミラ (loop mirror) 3 0 0 及びそれに接続された光学カプラ (optical coupler) 3 5 0 によって形成される。前記サニャック・ラマン・キャビティ設計は、アメリカ合衆国特許第 5 , 7 7 8 , 0 1 4 号に記載され、この特許は、ここに参照のために採用されている。光学信号 3 7 0 は、入力ポート 3 8 0 を通して前記ラマン利得ファイバ 3 0 0 に入力される。ポンピングレーザ 3 2 0 は、結合手段 3 3 0 を通して前記ファイバ 3 0 0 をポンピングするポンピング光を生成する。前記光学信号は増幅され、及び出力ポート 3 9 0 を通して出力する。この構成においては、前記ポンピングは、本来的に前記利得ファイバ 3 0 0 に関して双方向であることが認められる。

20

【 0 0 8 4 】

前記ラマン利得ファイバは、前記開ループ設計に関する上述のものとおなじ特性を有する。同様に、第一の実施形態で使用されるポンピングレーザは、この第二の実施形態で使用される。サニャック D M R A はさらに、偏光状態を制御するために、サニャック・ラマン・キャビティに偏光コントローラ (polarization controller) 3 6 0 をさらに含んでもよい。しかしながら、前記ファイバが偏光を維持される場合、前記偏光コントローラは必要ない。前記光学カプラ 3 5 0 は、少なくとも前記ポンピングと前記信号波長の下の一つのラマン・オーダー (Raman Order) との間で、公称で 5 0 : 5 0 である。前記結合手段 3 0 0 は、信号及び中間ラマン・オーダーを伝送するが、前記ポンピングに亘って結合する W D M カプラである。さらに、前記入力ポート及び出力ポートの各々は、様々なポンピング・オーダーを伝送するが、前記信号に亘って結合する W D M カプラを具備する。前記サニャック・ラマン・キャビティの重要な効果は、それが、様々なラマン・オーダーのより静止したカスケードに通じる受動ノイズ減衰特性を有することである。特に、差動周波ノイズは、リジェクション・ポート 3 8 5 を通して出力される。

30

【 0 0 8 5 】

前記 D M R A の他の構成は、図 6 に記載のとおり、チャープ・ファイバ回折格子 (chirped fiber grating) を伴う循環ループ・キャビティを使用する。前記循環ループ・キャビティ設計は、上述のアメリカ合衆国特許出願「循環ループ・キャビティにおけるラマン増幅に関するチャープ・ピリオド回折格子 (Chirped Period Grating) 」に記載されている。この特許出願は、参照のためにここに採用されている。図 6 に記載の構成は、二つの所望の目的を達成する。第一に、前記信号及びカスケード・ラマン・ポンピングは、逆伝播であり、クロストークを低減する。第二に、チャープ・ブラグ回折格子 4 7 0 は、波長制御のために前記ループに導入される。前記チャープ・ブラグ回折格子は、様々なラマン・カスケード・オーダーで広帯域反射 (broadband reflection) を供給する。このように、前記様々なカスケード・ラマン・オーダーに関する波長が選択される一方で、次の各々のカスケードのオーダーで広げられた帯域幅を許可するために、十分に広帯域の反射が供給される。

40

50

【0086】

前記チャープ・ブラグ回折格子470は、様々なラマン・オーダで帯域幅を調整する一方で、前記ファイバ挿入損失を低減することを可能にする。商業用の回折格子は、40乃至50ナノメートルの大きさの帯域幅のものが入手可能である。また、前記回折格子の周期性における長さ及び変形を調節することで、前記帯域幅を制御することができる。前記回折格子の各々の中央における前記ブラグ状態は、前記カスケード・ラマン・オーダの最大利得波長と一致する。しかしながら、ファイバ・ブラグ回折格子の一つの特徴は、それらが反射モードのみで動作することである。そして、前記回折格子は、前記サーキュレータ(circulator)460のポート2に導入される。

【0087】

光学サーキュレータ460は、一つの方向のみに、ポートからポートへと順番に光の方向を変える、非相互装置(non-reciprocal device)である。特定すれば、ポート1からの入力、ポート2へと方向を変えられる。しかしながら、ポート2に入る逆信号は完全に、使用可能な信号として、ポート3に伝送される。ポート1及び3は、完全に絶縁される。光学サーキュレータは、偏光独立に、及び低挿入損失であるように作られる3ポート結合装置である。また、光学サーキュレータは、光学アイソレータ技術に基づいており、それはこの点で確立されている。

【0088】

前記サーキュレータ460は、前記ポンピング及びカスケード・ラマン・オーダ波長で適切に動作するのに十分広い帯域であるべきである。前記サーキュレータの二つのポート(ポート1及び3)は、ラマン利得ファイバ400及び410の長さによって接続される。このラマン利得ファイバは、上述のとおり、分散補償のすべての属性を有する。前記利得ファイバは、二つの区分に分割され、その各々は有効にポンピングされる。波長 λ_p における前記ポンピング420及び440は、WDMカプラ430及び450を使用して、時計回りに導入される。これらのカプラは、前記ポンピング波長に亘って伝送する一方で、前記カスケード・ラマン・オーダ及び前記信号波長を通過する。前記ポンピング及び様々なカスケード・ラマン・オーダは、前記ループの周りを時計方向に循環する。

【0089】

前記信号は、前記ポンピング及び前記様々なカスケード・ラマン・オーダとは反対に、時計とは逆周りで、前記サーキュレータ・ループを渡る。前記信号490は、WDM480を使用して、前記ラマン利得ファイバの一端に導入され、及びWDM495を使用して前記ファイバの他の一端から除去される。これらWDMは、前記信号波長に亘って伝送する一方で、前記ポンピング及び前記カスケード・ラマン・オーダを通過する。

【0090】

8. ラマン増幅器を伴うWDMシステムに関する利得等化

多重波長WDMチャンネルを伴うこれら実施形態のいずれかを使用するために、前記利得を等化するためのいくつかの手段を、前記増幅器の出力において含むことは、最も必要であろう。交替に、図4(c)に記載のとおり、前記利得等化は、二区分利得ファイバにおける中段アクセスに配置されることができる。この波長依存性又は前記利得帯域の非均一性は、単一チャンネル伝送に対してほとんど影響を持たない。しかしながら、それは前記増幅器を、一連の増幅器を通して、多重チャンネル・オペレーションに適さないものにする。異なる波長でのチャンネルが一連の増幅器を通して伝播すると、それらは利得及び信号対ノイズの比に関して、それらの間の増加する不一致を集積する。利得均化素子を使用して、長い一連の増幅器の使用可能な帯域を、顕著に増加させることができる。例えば、前記DMRAは、異なるチャンネルに対して利得等化を供給するために、利得均化素子がそれに続くことができる(図1を参照)。

【0091】

前記利得均化素子を実行することの問題は、要求されるフィルタ機能の複雑性によって決定され、それは前記利得スペクトルに適合するために必要とされるガウス又はフーリエの項(Gaussian or Fourier term)の数に従って特徴付けられることができる。例えば、典

10

20

30

40

50

型的なE D F A利得帯域は、5つのガウスの項が使用可能な帯域に適合することを要求する(図7(a))。一方で、前記ラマン利得スペクトル(図7(b))は、もっと滑らかであり、たった二つのガウスの項を使用することで適度に適合されることができる。その結果ラマン増幅器に対する利得等化は、E D F Aに対するものよりも単純である。

【0092】

利得均化フィルタ・タイプに対して、少なくとも4つのアプローチ(approach)がある。異なるアプローチ及びそれらの間のトレードオフ(trade-off)は、以下を含む:

- ・マッハ・ツェンダ干渉計。単純な機能。赤又は青色帯域フィルタに有用。ノッチ(notch)又は広帯域フィルタにはあまり有用ではない。

- ・格子装置。一連のカブラ及び遅延線。フーリエ級数(Fourier series)を使用して、ノッチ・フィルタ及び前記広帯域エルビウム・スペクトルに適合することができる。

- ・誘電フィルタ。広帯域及びノッチ・フィルタが可能である。フーリエ級数も同様である。

- ・長期回折格子。広帯域及びノッチ・フィルタが可能である。ガウス級数も同様である。これらの選択のうち、マッハ・ツェンダ干渉計は、おそらく最も安く、最も簡単に作られる。それゆえに、図1に記載の前記利得等化素子60は、二つのマッハ・ツェンダ干渉計を使用して費用効果的に実行されることができる。

【0093】

9. D Sファイバを使用した伝送リンクに関するW D Mシステム

約1550ナノメートルのゼロ分散波長を伴う従来のD Sファイバに基づいた伝送システムは、多重W D Mチャンネル及びE D F Aを使用してそれらの容量を更新するときに、大きな問題に直面する。E D F Aに関する利得帯域は、およそ1535乃至1565ナノメートルに及び、典型的には1540乃至1560ナノメートルの均された利得区分を伴う。4 W Mからのペナルティによって、前記ゼロ分散波長に近接した波長(すなわち、およそ1540乃至1560ナノメートル)は、W D Mシステムには使用できない。それゆえに、E D F Aの有用な帯域幅のほとんどは、伝送リンクにおいてD S Fを使用する時は、W D M更新に対して使用できない。

【0094】

しかしながら、W D Mシステムは、ゼロ分散波長から十分に離れた、「紫色帯域」(すなわち1430乃至1530ナノメートル)へと動くことによって、D S Fに基づいた伝送システムにおいて実行されることができる。ラマン増幅器は、ここに説明された従来技術及びD M R Aに基づいた設計を含む、この波長ウィンドウに利得を供給するために使用されることができる。紫色帯域におけるD S Fに対する分散の有限の負の値のために、W D Mシステムに関する主な非線形性ペナルティが管理される。すなわち、有限分散値のために、4 W Mはもう位相整合しない。また、オペレーションは、通常の分散状況(すなわち、 $D < 0$)なので、M Iは前記伝送リンクにおいては避けられる。

【0095】

伝送線が分散管理されることができるよう、D M R Aを使用することはより効果的である。4 W Mを避けるために、局所分散が高い一方で、分散パルスの広がりを避けるために、前記リンクに亘る平均分散はおよそゼロである伝送システムを参照する。分散管理は、伝送線分散が、正と負の値の間の符号が変化することを要求し、一定の伝送スパンに亘る集積分散の打ち消し(cancellation)を可能にする。D S Fに基づいた伝送システムにおいて、D M R Aは、前記利得ファイバとしてスタンダード分散ファイバを使用することによって、分散管理を簡単に供給することができる。スタンダード・ファイバは大量需要がある成熟した商品であるので、これは前記利得ファイバの費用を低減させる追加的效果を有する。

【0096】

D S Fリンクを伴う分散管理W D M伝送システムの例示的な設計が、図8(a)乃至8(c)に記載される。入力信号530及び出力信号540は、多重波長W D Mチャンネルであり、それらは典型的には100ギガヘルツ(又は0.8ナノメートル)で均一に間隔を置

10

20

30

40

50

かれる。DSF 510 及び DMRA 570 のリンクを含む区分を伴う前記伝送線は、周期的である。例えば、前記 DMRA は、1430 乃至 1530 ナノメートルの紫色帯域において動作すると仮定され、及び前記利得ファイバは、スタンダード分散を都合よく有する。必要であれば、利得イコライザ 580 はまた、前記伝送線内に周期的に配置される。上述のとおり、利得イコライザは、マッハ・ツェンダ干渉計のたった一つ又は二つの段でもよい。前記利得イコライザは、各 DMRA に沿って都合よく含まれることができる。

【0097】

図 8 (a) 乃至 8 (c) は、この例示的なシステムにおける分散及び非線形性管理も示す。特に、前記局所分散は、伝送リンクにおいては負であるが、DMRA においては正である。前記 DMRA に関する分散補償ファイバの適切な選択をすると、上述のとおり、前記集積分散は、前記 WDM 波長帯域の中間における各伝送区分において相殺するように作ることができる。

【0098】

10. 多重帯域 WDM システムにおけるチャネルの対称的追加による利得傾斜の最小化
前記ファイバの帯域幅利用が増加すると、予想される主な問題は、前記ラマン効果から生じるエネルギー交換による、前記帯域にわたる利得傾斜である。特に、前記ラマン効果は、エネルギーを、より短い波長からより長い波長にシフトする。また、前記ラマン利得は、およそゼロの周波数差から、13.2 テラヘルツ（又は 1550 ナノメートルの波長周辺のおよそ 100 ナノメートル）でのそのピークに増加させる。それゆえに、前記ラマン効果は、小さな周波数差から 13.2 テラヘルツまでの周波数分離に間隔を置かれた WDM チャンネルに重要であり、及び CW チャンネルに関するエネルギー交換の大きさは、増加する周波数分離とともに増加する。また、上述の説明から、新しい波長帯域が加えられると、ラマン利得傾斜は、次第に重要な効果になることが明らかになるであろう。ラマンからの一次効果は、エネルギー交換であり、二次効果は、チャンネル・クロストークであるかもしれない。

【0099】

今日の長距離のファイバ光学伝送システムは、エルビウムドープファイバ増幅器 (erbium-doped fiber amplifier) (EDFA) を使用する。EDFA に関する従来の帯域 (C 帯域) は、およそ 1530 乃至 1565 ナノメートルであり、35 ナノメートルの幅である。いくつかのスペンがカスケードされ、及び波長の数が増加すると、ラマン利得傾斜からの影響（すなわち、より短い波長におけるより少ない利得及びより長い波長におけるより多い利得）は、すでに認められている。前記傾斜は、前記システム帯域幅が増加するにつれて悪化すると思われる。

【0100】

帯域幅に対する要求が増え続けるにつれて、新しい波長帯域：長波長又は L 帯域を加える方法がある。この L 帯域は、およそ 1565 乃至 1610 ナノメートルに及ぶので、前記 C 及び L 帯域の間のその結果の合計帯域幅は、およそ 80 ナノメートルになるであろう。前記より広い波長範囲は、ラマン利得のピークに近づき始めることが認められる。それゆえに、前記新しい帯域の追加は、すでに配置された C 帯域にわたる顕著なラマン利得傾斜を生じると思われる。

【0101】

ラマン利得傾斜変化を説明するための、多くのグループが、理論的及び実験的の両方で、前記効果を研究してきた。例えば、シーメンス (Siemens) のグループは C 帯域のみ、及び結合された C 及び L 帯域にわたる利得傾斜の効果を研究してきた（光学ファイバ通信会議 OFC 1999 年、サン・ディエゴ、カリフォルニア州、1999 年 2 月、投稿論文 WJ-6 に掲載された、P. M. クルムリック、E. ゴットヴァルト、A. マイヤ、C. J. ヴァイス及び G. フィッシャ、「双方向 WDM 伝送におけるチャネル電力バランスに対する SRS の影響」）。彼らは、以下の帯域を定義する：

「青色帯域」 - C 帯域における 1530 乃至 1545 ナノメートル

「赤色帯域」 - C 帯域における 1545 乃至 1560 ナノメートル

10

20

30

40

50

「高帯域」 - L帯域における1570乃至1605ナノメートル

図9(a)及び(b)は、前記C帯域のみに関する、シーメンスからの実験結果を示し(青色帯域から赤色帯域へのラマン利得傾斜)、及び前記最大変化は、前記帯域のどちらか半分にわたり、およそ1デシベルよりも小さい。一方で、図10は、L帯域追加を伴うC帯域に関するシーメンスの計算を示し、及びいずれかの帯域における最大変化は、4デシベルの大きさでもよい。

【0102】

新しい帯域が、現存する帯域における変化を要求することなく、及び現存する帯域への影響を最小化することなく導入されることができるとき、それは有効である。しかしながら、前記ラマン効果によって、現存するC帯域EDFAは、調整可能な利得傾斜を供給するための装置に後付けされなければならない。前記利得傾斜は、チャンネルの数、前記チャンネル間隔、前記スパン長、及び前記全体の帯域幅に依存するので、調整可能な利得傾斜を有することは価値がある。しかしながら、新しい帯域を追加する一方で現存するC帯域における変化を最小化することが、望ましいであろう。新しい「ノブ(knob)」は常に追加される新しい帯域へ導入されることができ、現存する帯域から新しい特性を要求することは難しい。

【0103】

C帯域における変化を最小化するための帯域の対称的追加

C帯域における変化を最小化するための簡単な方法は、C帯域の短波長及び長波長サイドの両方に、対照的にチャンネル又は帯域を追加することである。そして、より長い波長チャンネルは、C帯域からエネルギーを除去するかもしれないが、より短い波長チャンネルは、前記エネルギーを補給するであろう。前記利得傾斜のスロープは、有効電力のみに依存しているが、帯域の対称的追加は、利得変化のゼロ交差又は支点を、C帯域の中央に移動させることができる。

【0104】

実験は、前記C帯域への変化を最小化するための、帯域の対称的追加の潜在的な効果を説明してきた。例えば、NTT未来ネットワーク研究所(NTT Network Innovation Laboratories)は、分散シフト・ファイバの100キロメートルに亘る3帯域伝送を実行した(光学ファイバ通信会議OFC1999年、サン・ディエゴ、カリフォルニア州、1999年2月、投稿論文WJ-2に掲載された、J.カニ、K.ハットリ、M.ジンノ、S.アイサワ、T.サカモト及びK.オグチ、「分散シフト・ファイバを通した三重波長帯域WDM伝送」)。図11は、三つの帯域を伴う彼らの実験結果を示す：より短い波長帯域が有効損失を受け、より長い波長帯域が利得を受ける一方で、前記C帯域(又は彼らが呼ぶところのM帯域)は、前記帯域にわたり最小の変化を有する。

【0105】

より特定の、すでに配置されたファイバ及びそれらの低損失ウィンドウに適用される以下の帯域を説明する：

S⁺帯域：1430乃至1480ナノメートル

S帯域：1480乃至1530ナノメートル

C帯域：1530乃至1565ナノメートル

L帯域：1565乃至1610ナノメートル

EDFAは、C帯域及びL帯域のために存在する。しかしながら、より短い波長S帯域及びS⁺帯域に関しては、ラマン光学増幅器が使用されることができ、前記C帯域周辺の周波数又はエネルギーに対照的に配置されるようにチャンネルを追加する場合(すなわち、前記L帯域における一つのチャンネル及び前記S帯域における対称チャンネル)、前記ラマン利得傾斜からの効果は、C帯域において最小化されるであろう。

増幅器に対するラマン利得傾斜の影響

前の図から、前記S帯域は、ラマン・エネルギー交換による損失を補償するためだけよりも、光学増幅器からより多くの利得を必要とするであろうことが明らかであろう。同様に、損失を補償するためだけよりも少ない、前記L帯域光学増幅器からの利得が、ラマン・エ

10

20

30

40

50

エネルギー交換のために必要とされるであろう。

【0106】

ほとんどのデジタル・システム (digital system) は、2.4 Gb/s システムに対して約 20 デシベルの信号対ノイズ (SNR) 比を必要とする。同じ SNR が三つすべての帯域に要求されるので、前記 S 帯域において必要とされるより高い利得はまた、前記 S 帯域光学増幅器に対して追加の要求をする。すなわち、より高い利得は通常、より多くのノイズ (すなわち、増幅された自然放出) を意味し、それは SNR に悪い影響を与える。S 帯域及び C 帯域において同じ SNR を維持するための一つの方法は、S 帯域におけるビット・レート (bit rate) を低減することである。交替に、同じ SNR は、C 帯域におけるよりも S 帯域においてより低いノイズ値 (NF) を伴う光学増幅器を使用することによって、維持されることができる。

10

【0107】

前記 C 帯域及び L 帯域は、前記光学増幅器のために EDFA を使用する。しかしながら、前記 S 帯域は、ラマン増幅器を使用することができる。原理上は、ラマン増幅器は、4 段階システムであるので、EDFA よりも低いノイズ値を有することができる。すなわち、前記ノイズ値は、 $N_2 / (N_2 - N_1)$ に比例し、 N_2 は上位キャリア密度 (upper level carrier density) であり、 N_1 は基底状態キャリア密度である。このパラメータは通常 EDFA に関する 1 よりも大きい一方で、ラマン増幅器における 1 とおよそ等しい。

【0108】

前記 S 帯域に関する向上した NF を達成するための他の手段は、(次の項で説明されたとおり) 分布ラマン増幅を使用することである。例えば、タイコ・サブマリン・システム (Tyco Submarine System) による実験 (M. X. マ、H. D. キドルフ、K. ロットウィット、F. W. ケルフット、及び C. R. デビッドソン、"8 x 2.5 Gb/s NRZ 伝送を使用する 5280 キロメートル WDM システム実験における 240 キロメートルのリピータ間隔 (repeater spacing)" IEE Photronics 技術報告、第 10 巻、893 乃至 896 ページ (1998 年)) は、分布増幅が、ディスクリート増幅器と比較して、NF における 2 デシベルの低減又は向上を生じること示す。各増幅器の場所にディスクリート S 帯域増幅器を配置する代わりに、前記 S 帯域波長から -13.2 テラヘルツ、波長が短いポンピングが導入されるであろう (すなわち、ポンピングは、1330 ナノメートル乃至 1430 ナノメートルでよい)。

20

30

【0109】

前記 C 帯域周辺の新しいチャネルの対称的追加は、ラマン効果の一次影響を解決するだけであることが認められる - すなわち、前記利得傾斜は、エネルギー交換から生じる。チャネル間干渉からの第二の効果もあるかもしれない。これら第二の項は、チャネル間の十分な分散を保証することによって、小さく維持されることができるので、パターン依存クロストークを低減するために、チャネル間に十分なウォーク・オフ (walk-off) がある。

【0110】

11. 多重帯域 WDM システムにおける分布ラマン増幅

上述の項は、新しい帯域が追加され、及び前記チャネル数が増加するにつれて、次第に重要になる 4 WM 及びラマン利得傾斜からの非線形性減衰を説明した。これら非線形性減衰を最小化するための他の方法は、波長チャネル当たりの電力を低減することである。これは、分布ラマン増幅を使用することによって、レシーバにおける信号対ノイズ比のグラデーションなく達成されることができる。特に、分布ラマン増幅は、ラマン・オシレータ又はレーザ・ダイオードを伴う伝送線を構成するファイバを直接ポンピングすることによって、達成されることができる。前記ポンピング光は、前記伝送ファイバにおける固有ラマン利得を使用して、信号に対するラマン利得を生成する。前記利得は前記伝送線に固有であるので、これは現存するファイバ光学システムを更新する適切な手段を供給する。

40

【0111】

分布ラマン増幅は、前記ファイバにおける損失を取り消し又は補償するので、チャネル当たりの電力は低減されることができる。前記他の方法、分布ラマン利得は、そのディス

50

リート増幅器に相当するものよりも効果的により良いノイズ値を有する。前記チャンネル電力は、非線形性が重要でなくなる点まで下げられることができる。例えば、典型的な伝送システムにおいて、チャンネル当たり、0 dBm (1 mW) の電力はOC - 48又は2.5 Gb/sで使用され、6 dBm (4 mW) はOC - 192又は10 Gb/sで使用される。分布増幅を追加することで、OC - 192システムは、-13 dBm (0.05 mW) くらい低いチャンネル当たりの電力を伴い、実験室で実証された。

【0112】

分布ラマン増幅はまた、利得制御又は利得クランプ (gain clamping) にも役立つことができる。すなわち、チャンネルが加えられ又は落とされる時、例えば光学アド/ドロップ・マルチプレクサが使用される時、前記利得レベルの変化を有することは望ましくない。チャンネル当たりの電力は、顕著に低減されるので、この利得クランプ問題は、分布ラマン増幅を使用することによって、大幅に解決することができる。前記より低い電力は、無視できる利得すなわちポンピング枯渇があることを保証する。それゆえに、チャンネル当たりの低電力と無視できる利得枯渇の組み合わせは、有効な利得クランプを供給する。

向上したノイズ値を示す計算

分布ラマン増幅は、伝送線における増幅器の有効ノイズ値を向上する。異なる増幅体系に対するノイズ値の例は、伝送長の関数 (すなわち、周期的に増幅されるシステムにおける一つの期間の長さ) として図12乃至14に記載される。

【0113】

ヤリヴ (Yariv) は、彼の論文「周期的又は分布光学増幅を伴うファイバ・リンクにおける信号対ノイズの考察」(オブティクス報告、15巻、1064乃至1066ページ(1990年))において、信号対ノイズ比を計算する方法を説明した。E. デサビルは、彼の本「エルビウムドープファイバ増幅器、原則と応用」ジョン・ウィレー・アンド・サン、1994年の中で、分布増幅器を説明した。その方法体系の詳細は、デサビルの論文「ラマン活性ファイバ遅延線の論理と実践」(光波技術のIEEEジャーナル、1986年4月、426乃至443ページ)で見ることができる。しかしながら、この論文は双方向ポンピングを扱っておらず、前記信号及び前記ポンピングの両方に対する減衰定数が同じである場合のみを検討する。ヤリヴは、ポンピングの効果については一切触れていない。彼らの一般的なアプローチに続いて、我々は異なる減弱定数及び前方並びに後方ポンピングの変化する挿入を伴う双方向ポンピングの場合に関する一般的な場合の、閉形式の解決法を引き出すことができた。前記双方向の場合に関する我々の方法によって、前記前方並びに後方ポンピングに関する減衰定数は、前記信号のそれとは異なることができる。予想のとおり、我々の方法は、コンピュータを使用して評価される必要があるいくつかの積分を伴う。前記信号及びポンピング減衰定数が同じである場合には、我々はデサビルの公式に解析的に賛同するために、我々の一般的な式を削減することができた。双方向ポンピングの場合に関しては、我々の式は、交差点を前記伝送線の始まりにする、デサビルの後方ポンピングの場合へと削減する (すなわち後方ポンピングではない)。

【0114】

その結果が、いくつかの図に示される。図12は、前記信号及び前記ポンピングに関する減衰定数が同じである特別な場合に関して、我々のノイズ値が、デサビルが彼の本(図2.20、126ページ)で提示したものと同一であることを示すが、我々の最長の線の長さは、デサビルの最大の線の長さがたった50キロメートルであるのと比較して、80キロメートルである。前記減衰定数は、0.2 デシベル/キロメートルと仮定される。この図には5つのグラフがある：それらはA、B、C、1、及び2が付けられている。曲線A及びCは、まとめられた増幅器の場合である：Aは前記線の始めにおける前記増幅器の場合で、前記線がその後続く；Cは、その反対の場合で、すなわち線が最初で、それから増幅器、という場合である。曲線Bは、均一に分布した増幅に関する。一方で、グラフ1は前方分布ラマンポンピングに関し、及びグラフ2は後方分布ラマンポンピングに関する。図13は、前記ポンピング減衰定数が0.5 デシベル/キロメートルであると仮定される一方で、前記信号減衰定数が0.2 デシベル/キロメートルで維持されることを除いて

、図12と同じである。この後半の状態は、ほとんどの現在配置されたファイバに関する現実により近い。

【0115】

これらの図から明らかであるとおり、ケースAは、最低ノイズ値を有し、及びケースCは最高値を有する（80キロメートル線で、それぞれ4.7デシベル及び18.96デシベル）。前記均一分布利得は、80キロメートルの長さで9.23デシベルのノイズ値（グラフB）を与え、それはケースA及びCの間である。前記増幅器によって導入されるノイズは、前記ファイバ伝送によっても減衰される一方で、より悪い場合（ケースC）においては、前記ノイズは、正に端部において導入されるので、第一の増幅器（ケースA）が最善である。前記ポンピング減衰定数を0.2デシベル/キロメートルから0.5デシベル/キロメートルに増加させる時、前記前方ラマン・ポンピングに関するノイズ値は、6.23デシベルから5.20デシベルに下がるが、前記後方ラマン・ポンピングに関しては、13.33デシベルから16.10デシベルに上がる。これは、前記ポンピング減衰が増加するにつれて、前記分布増幅器が、前記ディスクリット増幅器の場合により近づくからである。

【0116】

図14は、（1）前方ラマン・ポンピング、（2）後方ラマン・ポンピング、及び（3）双方向ラマン・ポンピングに関するノイズ値を示し、そのすべては0.2デシベル/キロメートルの減衰定数を有する。グラフ4は、0.5デシベル/キロメートルに設定されたポンピング減衰定数を有する双方向の場合に関する。双方向の場合に関しては、前記前方及び後方ポンピングの挿入が、前記線の部分の中間になると仮定する。80キロメートル部分での前記四つのグラフに関するノイズ値は、それぞれ6.23、13.33、15.00及び16.25デシベルである。前記グラフは、長距離を置いた、前記双方向の場合に関するノイズ値が、前記後方ポンピングの場合のそれよりも悪いことを示す。しかしながら、前記線の長さが小さい（40キロメートル以下である）場合、前記後方ポンピングされた場合に対していくつかの改良が可能である。デサビルによって指摘されたとおり、双方向ポンピングは、（改良されたノイズ値の可能性に加えて）二つの効果を有する：（1）両方のファイバの端部における低減された入力ポンピング電力と；及び（2）前記ファイバに沿ったより均一な媒体の反転であり、それは短いパルスを使用して高ビット・レートにおいて特に重要となりうる。

分布ラマン増幅を使用する実験

ファイバ伝送システムにおける前記非線形効果は、多くの最近の実験で説明された分布又は複合ラマン増幅の使用によって、避けることができる。例えば、NTT未来ねっと研究所における研究は、単一波長帯域におけるゼロ分散領域周辺のDSFでの伝送を実証した。特に、彼らは50ギガヘルツ間隔及び8×80キロメートルに対する10Gb/sを伴う32チャンネルの高密度WDM（DWDM）伝送を実証する（N.タカチオ、H.スズキ、H.マサダ及びM.コガ、光学ファイバ通信会議OFC1999年、1999年2月、サン・ディエゴ、カリフォルニア州、締め切り後論文PD-9に掲載）。通常は、前記ゼロ分散波長の近隣におけるDWDMシステムは、4WMペナルティに苦しむ。しかしながら、分布ラマン増幅の使用を伴う-13dBmに前記チャンネル電力を下げることによって、4WMは避けられ、及びその結果はDSFにおけるDWDM伝送の実施可能性を立証する。

【0117】

ほぼ同時に、ベル研究所/ルーセント・テクノロジーにおける他のグループが、単一波長帯域における4WM又は他の非線形性ペナルティのない、前記ゼロ分散波長に近いDWDM伝送を実証した（P.B.ハンセン、A.ステンツ、T.N.ニールセン、R.エスピンドラ、L.E.ネルソン及びA.A.アブラモフ、光学ファイバ通信会議OFC1999年、1999年2月、サン・ディエゴ、カリフォルニア州、締め切り後論文PD-9に掲載）。彼らは、いくつかの実験をする：（a）25チャンネル、10Gb/sチャンネルの100ギガヘルツ間隔、8×83キロメートルの伝送；（b）49チャンネル、10Gb/s

s チャンネルの 50 ギガヘルツ間隔、 4×83 キロメートルの伝送である。かれらは、複合ラマン/エルビウムドープファイバ増幅器を使用することによって、DSFにおけるたった 440 mW のポンピング電力で、顕著な改善が得られるという結論に達する。

【0118】

これら二つの実験は、分布ラマン増幅が、単一帯域実験において効果的に、WDM チャンネルの間の非線形効果を最小化することができることを示す（すなわち、前記実験は、いわゆる「C 帯域」又は 1535 乃至 1565 ナノメートルの従来の帯域においてのみ実施される。）しかしながら、多重帯域伝送が検討される時、帯域当たり一つ以上のポンピング波長に対する必要性があるであろう。この場合、ポンピング間の非線形相互作用は、異なる帯域における利得レベルでの大きな変化に通じうる。例えば、ポンピング間の前記ラマン効果は、より短い波長ポンピングからエネルギーを奪って、より長い波長ポンピングに通じるであろう。この相互作用を最小化するために、それらの間の相互作用を最小化するように前記ポンピングを直交させる手段が必要とされる。

多重帯域の場合における分布ラマン増幅

広帯域分布ラマン増幅において、異なる帯域に対するポンピング間の非線形相互作用は、交互の帯域ポンピングを空間的に分散することによって、及び/又は交互の帯域ポンピングを交差偏光することによって、最小化されることができる。一例として、すべての L_{amp} に配置されディスクリット増幅器で周期的に増幅されたシステムを検討する。典型的には、前記増幅器の間隔は、 $L_{amp} = 80$ キロメートルのオーダでもよい。いくつかの場合において、いくつかの中間点にアクセスがあってもよく、それは典型的には増幅器間のおよそ中間でもよい。分布ラマン増幅を追加することが望ましい。これは、ラマン・オシレータ又は前記伝送線をポンピングするためのレーザ・ダイオードのみを使用することによって、達成されることができる。増幅される必要がある多くの帯域があるかもしれないので：

i = 帯域 i における利得に対するラマン・ポンピング波長（一つ以上のポンピング波長でもよい）

j = 帯域 j における利得に対するラマン・ポンピング波長（一つ以上のポンピング波長でもよい）

i, k, m . . . 一組のポンピング帯域

j, l, n . . . 交互の組のポンピング帯域（すなわち上述の組から交互配置される）を指定する。

【0119】

ディスクリット及び分布増幅器を具備する複合システムに関して、図 15 (a) 乃至 15 (d) は、異なる波長帯域に対する前記ラマン・ポンピングを追加するための異なる構成を示す。図 15 (a) は、分布増幅が、逆伝播ラマン・ポンピングのみとともに追加され、及び中段におけるアクセスが存在すると仮定する状況を示す。特に、交互の帯域ポンピングは、ポンピング間の非線形相互作用を最小化するために、異なる空間点に追加される。中スパン・アクセス (mid-span access) は利用可能ではないが、双方向ポンピングは可能である場合、図 15 (b) に記載の構成は使用されることができ、ポンピング間の相互作用を最小化するために、異なる方向に交互の帯域ラマン・ポンピングが着手される。双方向ポンピングが可能であり、及び中段アクセスも可能である場合、図 15 (c) に記載の構成を使用して、より均一なポンピングが達成されることができる。最後に、逆伝播ポンピングのみが可能であり、中段アクセスがない場合、前記交互ポンピング帯域が、図 15 (d) に記載のとおり、交互のポンピング帯域は、直交偏光に着手されることができる。この配列は、交差偏光された光に関するラマン利得が、順偏光された光に関するラマン利得の強さのおよそ 10 分の 1 であるという事実を利用する。図 15 (d) に記載の偏光多重伝送はまた、図 15 (a) 乃至 15 (c) に記載の他の体系のいずれかと有利に結合されることができることが明らかであろう。

【0120】

上述の複合利得よりもむしろ、分布ラマン利得のみを使用することも、有利かもしれない

。図16(a)乃至16(d)は、分布ラマン増幅のみに関する対応するポンピング構成を示す。再度、 L_{amp} の期間を伴う周期的に増幅されたシステムを仮定する。図16(a)は、中段アクセスが存在する純粋な逆伝播ポンピング体系を示す。前記交互のポンピング帯域は、この場合空間的に分散される。図16(d)は、中段アクセスがない双方向にポンピングされた状況を示し、交互のポンピングが、異なる方向に着手される。図16(c)は、より空間的に均一な利得を作るために、中段アクセスを加えた双方向ポンピングの組み合わせを示す。最後に、図16(d)は、交差偏光された交互のポンピング帯域の着手を示す。再度、図16(d)に記載の交差偏光されたポンピングは、図16(a)乃至16(c)に記載の構成のいずれかと有利に結合されることができる。

【0121】

10

要約すると、本発明の特徴は：

A) ラマン・アンプ(Raman amp)と結合された分散補償：

(1) 前記利得ファイバが、伝送線に対する分散補償をするラマン・アンプ

(2) ファイバはポンピング及び信号に対する単一モードであり、前記ファイバに対する遮断波長が、前記ポンピング波長よりも短いことを意味する

(3) 前記増幅器利得レベルは、前記ファイバ・リンクの一分区における損失と同様に、前記分散補償ファイバにおける損失の合計より大きい又は等しく設定される

(4) 前記利得ファイバの長さ及び分散は、前記増幅器の有効分散 $(D \times L)_{amp}$ が、前記ファイバ伝送リンク $(D \times L)_{Link}$ における有効分散をほぼ相殺するように選択される

(5) 同じ素子における光学利得を供給する光学増幅器はまた、前記リンクの分散も補償する

20

(6) 前記利得媒体は、レーザ・ダイオード又はラマン・オシレータによってポンピングされる分布利得媒体として機能するファイバである

(7) 前記利得が、前記ファイバ・リンクにおける損失及び前記分散補償ファイバにおける損失をほぼ補償するように、前記ポンピングレベルは調整される

(8) 前記ラマン・オシレータは、カスケードされたラマン・オシレータである

(9) 前記ファイバは、分散補償ファイバである

(10) ファイバは、ポンピング及び信号に対して単一モードである(ファイバに対する遮断波長は、前記ポンピング波長よりも短い)

(11) 前記ファイバ分散及び長さは、 $(D \times L)_{Link}$ にほぼ等しくかつ反対である前記伝送リンク $(D \times L)_{amp}$ における合計の分散を相殺するように選択される

30

(12) 前記ファイバは、前記ポンピングに対して $4 L_{eff}$ より小さい場合、一方向からポンピングされる

(13) 前記ファイバの長さが、前記ポンピングに対する前記 L_{eff} を超える場合、前記ファイバは双方向にポンピングされることができる

(14) 前記ファイバの長さが、前記ポンピングに対する前記 L_{eff} を実質的に超える場合、前記ファイバは二つのポンピングを有する二つの部分に分割されることができる。前記二つの増幅器区分は、アイソレータ、利得等化素子及び/又は光学アド/ドロップ・マルチプレクサによって結合されてもよい。

(15) 前記利得ファイバが、伝送線に対して分散補償をするラマン・アンプ

40

(16) 前記利得は、1390乃至1530ナノメートルの波長範囲である

(17) 前記利得ファイバが分散補償ファイバであるラマン増幅器

(18) 前記ファイバ伝送リンクの有効分散を補償するように選択される長さ及び分散を有するファイバ

(19) 前記ファイバの長さが $2 L_{eff}$ より大きい場合、それは双方向にポンピングされる

(20) 前記ファイバの長さが $2 L_{eff}$ より大きい場合、それは個別にポンピングされる二つの部分に分割される。前記二つの区分は、アイソレータ、利得等化素子及び/又は光学アド/ドロップ・マルチプレクサによって結合されてもよい

(21) 図4、5、及び6に記載の特定の構成

50

B) D S F を伴う「紫色」帯域ラマン・アンプの使用

(1) 分散シフト・ファイバの使用を具備し、及び 1 4 3 0 乃至 1 5 3 0 ナノメートルの波長範囲でのオペレーションを伴うファイバ・リンク・システム

(2) 多重波長 W D M システムが、最小限の非線形性ペナルティで動作することができるように、ゼロ分散波長を避けるように選択された波長範囲

(3) 前記 1 4 2 0 乃至 1 5 3 0 ナノメートルの範囲内の増幅器は、ラマン増幅器である

(4) 前記ラマン増幅器における前記ファイバは、分散補償素子としても機能するように選択される

(5) 前記 1 4 3 0 乃至 1 5 3 0 ナノメートルの範囲で動作するラマン増幅器を使用した、分散シフト・ファイバにおけるファイバ伝送システム

10

(6) 前記システムは、多重チャネル W D M システムである

(7) 4 W M 及びパラメトリック増幅クロストークを低減するように選択された前記波長範囲

C) 分散管理システムを伴うラマン・アンプの使用

(1) 前記分散補償素子が、ラマン・ポンピングによってポンピングされる分散管理システム

(2) 前記ラマンの利得レベルは、前記分散補償素子と同様に、前記ファイバ・リンクにおける損失を補償するように選択される

(3) 前記分散補償素子は、一つのラマン・ポンピングでポンピングされることができ、又は L 及び L_{eff} に従って、双方向に又は二つの区分においてポンピングされることができ

20

(4) 図 8 に記載の特定の構成

D) 帯域の対称的追加

(1) 前記 C 帯域における利得傾斜変化を最小化するために、前記 L 帯域におけるチャネルは、前記 S 帯域におけるチャネルにほぼ等しい数で追加される。(チャネル数に関して) 前記ほぼ対称的なチャネル追加は、前記 C 帯域におけるラマン・エネルギー交換を相殺する

(2) 前記 S 帯域における利得は、前記ラマン・エネルギー交換の責任を負うための線形損失を補償するために必要とされるよりも大きくなければならない。同様に、前記 L 帯域における利得は、線形損失を補償するために必要とされるよりも小さいべきである。

30

(3) 前記 C 帯域及び S 帯域における同じ S N R を有するために、前記 S 帯域におけるビット・レートは下げられることができ、又は前記 S 帯域増幅器は、低ノイズ値を有する必要がある。

(4) 前記 S 帯域における増幅器は、ラマン増幅器でもよく、それは前記増幅器の 4 段階性質により、より低いノイズ値を有することができる。

(5) 前記ファイバに対する前記ゼロ分散波長は、十分なウォーク・オフがチャネル間干渉を最小化することができるようにするために、3 つの帯域すべての外側に留められるべきである。

(6) 前記 C 及び L 帯域における増幅器が、ディスクリート増幅器でもよい一方で、前記 S 帯域増幅器は、向上したノイズ値を達成するために、分布増幅器でもよい。

40

(7) 前記 S 帯域における分布ラマン増幅は、ディスクリート・レーザ・ダイオードを伴う前記伝送線をポンピングすることによって、又はラマン・オシレータによって達成されることができる。

E) 多重帯域を伴う分布ラマン増幅

(1) 多重帯域分散システムにおいて、ポンピング間の相互作用又はエネルギー交換を最小化するための、前記ポンピングを直交させる手段。

(2) 広帯域分布ラマン増幅において、異なる帯域に対するポンピング間の非線形相互作用は、交互の帯域ポンピングを空間的に分散することによって及び / 又は交互のポンピング帯域を交差偏光することによって、最小化されることができる。

(3) 図 1 5 (a) 乃至 1 5 (d) に記載の前記複合システム。

50

(4) 図16(a)乃至16(d)に記載の前記分布システム。

(5) 前記分布ラマン増幅は、ディスクリート・レーザ・ダイオードを伴う前記伝送線をポンピングすることによって、又はラマン・オシレータによって達成されることができ
る。

【0122】

本発明の実施形態が記載され及び説明されてきた一方で、これらの実施形態は、本発明のすべての可能性のある形式を記載し及び説明するものではない。むしろ、本明細書で使
用される単語は、限定よりも説明のための単語であり、本発明の精神と範疇から逸脱する
ことなく、様々な変更がなされてもよいことが理解される。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は、典型的な伝送システムを示す図であり、周期的に前記リンク素子内に、
分散補償、光学増幅及び利得等化を供給する構成要素が挿入される。

【図2】図2は、1000ナノメートルのポンピング波長での石英に対する測定されたラ
マン利得スペクトル(spectrum)を示すグラフである。

【図3】図3は、大きな負の分散を有する分散補償ファイバ(DCF)に関する波長に対
する典型的な分散及び損失を示すグラフである；特に、これらの特性はライコム(Lycom
)製品で測定される。

【図4】図4(a)乃至4(f)は、前記DMRAに対する開ループ構成を示す図である
；図4(a)においては、双方向にポンピングされた利得ファイバが使用され、図4(b)
においては、前記利得ファイバは二つの部分に分割され、及び前記構成は前記ポンピ
ング及び信号に対して逆伝播する；図4(b)に対する代替として、図4(c)は、利得等
化フィルタ又は光学アド/ドロップ・マルチプレクサ等の他の素子が、前記増幅器の前記
二つの区分の間に配置されてもよいことを示す；図4(d)は、前記ポンピングが前記第
一の段の逆伝播へと挿入され、及び前記増幅器の第二の段に送られる、改良された二段増
幅器を示す；図4(e)は、光学アド/ドロップ・マルチプレクサ等の中段素子を有する
、図4(d)に記載の二段設計の他のバージョン(version)を示す；及び図4(f)は
、前記合成増幅器に対するノイズ値における厳しい減衰なく、前記電力利得を上昇させる
ために、前記第二段において双方向ポンピングが使用される、図4(d)に記載の基本的
設計のさらなる変形を示す。

【図5】図5は、サニャック・ラマン・キャビティに基づいたDMRAを示す図である。
この構成に関する一つの特性は、それが前記利得ファイバの双方向ポンピングを自動的
に有することである。

【図6】図6は、チャープ・ブラグ回折格子を有する循環ループ・キャビティに基づくD
MRAのさらに他の設計を示す図である；前記循環ループ・キャビティは、前記信号及び
ラマンポンピングオーダが逆伝播する一方で、前記チャープ・ブラグ回折格子が波長制御
を供給することを保証する。

【図7】図7(a)及び7(b)は、前記EDFA及びラマン利得帯域の、異なるガウス
関数との適合を示すグラフである；図7(a)に記載の前記EDFA帯域が、5つのガウ
ス関数を必要とする一方で、図7(b)に記載のラマン利得帯域は、二つのガウス関数で
十分に概算されることができ
る。

【図8】前記伝送ファイバがDSファイバに基づいている、例示的な分散管理WDM伝送
システムを示す、図8(a)は図であり、図8(b)及び(c)はグラフである。；例と
して、前記ラマン利得ファイバは、スタンダード分散ファイバでもよい；さらに多重波長
に対して、利得イコライザは前記増幅器とともに周期的に配置されることができ
る。

【図9】図9(a)及び9(b)は、従来のC帯域(光学ファイバ通信会議 O F C 1 9
9 9 年、サン・ディエゴ、カリフォルニア州、1 9 9 9 年 2 月、投稿論文 W J - 6 に掲載
された、P . M . クルムリック、E . ゴットヴァルト、A . マイヤ、C . J . ヴァイス
ク及び G . フィッシャ、「双方向 W D M 伝送におけるチャネル電力バランスに対する S R S
の影響」から引用)の青色及び赤色帯域に対する利得傾斜を示すグラフである。

【図10】図10(a)及び10(b)は、長波長L帯域(光学ファイバ通信会議 O F

10

20

30

40

50

C 1 9 9 9 年、サン・ディエゴ、カリフォルニア州、1 9 9 9 年 2 月、投稿論文 W J - 6 に掲載された、P . M . クルムリック、E . ゴットヴァルト、A . マイヤ、C . J . ヴァイスク及び G . フィッシャ、「双方向 W D M 伝送におけるチャネル電力バランスに対する S R S の影響」から引用)を補足される時の、前記従来の C 帯域に対する利得傾斜を示すグラフである。

【図 1 1】図 1 1 は、各帯域が個別に着手され及び三つすべての帯域が一緒に着手される時の、異なる帯域における電力ペナルティを示すグラフである(光学ファイバ通信会議 O F C 1 9 9 9 年、サン・ディエゴ、カリフォルニア州、1 9 9 9 年 2 月、投稿論文 W J - 2 に掲載された、J . カニ、K . ハットリ、M . ジンノ、S . アイサワ、T . サカモト及び K . オグチ、「分散シフト・ファイバを通した三重波長帯域 W D M 伝送」から引用)。

【図 1 2】図 1 2 は、異なる場合に関するファイバ長に対する算出された光学ノイズ値を示すグラフである；前記ポンピング及び信号減弱の両方は、ファイバにおいて 0 . 2 デシベル/キロメートルになると仮定される；(A) ファイバの前の増幅器、(B) 均一に分布した増幅器、(C) 増幅器の前のファイバ、(1) 前方ポンピングラマン増幅器、及び(2) 後方ポンピングラマン増幅器である。

【図 1 3】図 1 3 は、異なる場合のファイバ長に対する算出された光学ノイズ値を示すグラフである；図 1 2 においてより現実的であり、ここでは前記ポンピング減弱は、0 . 5 デシベル/キロメートルと仮定される一方で、前記信号減弱は、前記ファイバにおいて 0 . 2 デシベル/キロメートルであると仮定される；(A) ファイバの前の増幅器、(B) 均一に分布した増幅器、(C) 増幅器の前のファイバ、(1) 前方ポンピングラマン増幅器、及び(2) 後方ポンピングラマン増幅器である。

【図 1 4】図 1 4 は、異なる種類の分布ラマン増幅器のファイバ長に対する算出された光学ノイズ値を示すグラフである；(1) 0 . 2 デシベル/キロメートルのポンピング及び信号減弱を仮定する前方ポンピングラマン増幅器、(2) 0 . 2 デシベル/キロメートルのポンピング及び信号減弱を仮定する後方ポンピングラマン増幅器、(3) 0 . 2 デシベル/キロメートルのポンピング及び信号減弱の両方を仮定する双方向ポンピングラマン増幅器、及び(4) 前記ポンピング減弱定数が、0 . 5 デシベル/キロメートルであると仮定される点を除いて、(3) と同じ条件である双方向ポンピングラマン増幅器である。

【図 1 5】図 1 5 (a) 乃至 1 5 (d) は、ディスクリット及び分布増幅器を具備する複合システムを示す図である；図 1 5 (a) においては、分布増幅は、逆伝播ラマンポンピングのみが加えられ、中点段においてアクセスが存在すると仮定する；ポンピングの間の非線形相互作用を最小化するために、異なる空間点において交互の帯域ポンピングが加えられる；図 1 5 (b) においては、中スパン・アクセス (mid-span access) は使用できないが、双方向ポンピングは使用でき、ポンピングの間の相互作用を最小化するために、交互の帯域ラマンポンピングが異なる方向に着手されるこの構成が使用されることができ；図 1 5 (c) においては、双方向ポンピングが使用されることができ、中段アクセスも使用可能であり、この体系を使用してより均一なポンピングが達成されることができ；図 1 5 (d) においては、逆伝播ポンピングのみが使用されることができ、中段アクセスはなく、前記交互のポンピング帯域は、直交偏光されて着手されることができ；図 1 5 (d) に記載の前記偏光多重送信は、図 1 5 (a) 乃至 1 5 (c) に記載の他の体系のいずれかと、有利に結合されることもできる。

【図 1 6】図 1 6 (a) 乃至 (d) は、図 1 5 (a) 乃至 (d) に記載された複合利得よりもむしろ、分布ラマン利得のみを示す図である；図 1 6 (a) においては、中段アクセスが存在し、及びこの場合、前記交互のポンピング帯域は空間的に分散される純粋な逆伝播ポンピング体系が示される；図 1 6 (b) においては、交互のポンピングが異なる方向に着手される、中段アクセスがない双方向にポンピングされた状態が示される；図 1 6 (c) においては、より空間的に均一な利得を作るための、双方向ポンピングに中段アクセスを加えた結合が示される；図 1 6 (d) においては、交差偏光された交互のポンピング帯域の着手が示される；図 1 6 (d) に記載の交差偏光されたポンピングは、図 1 6 (a) 乃至 (c) に記載の構成のいずれかと有利に結合されることができ。

【図 1】

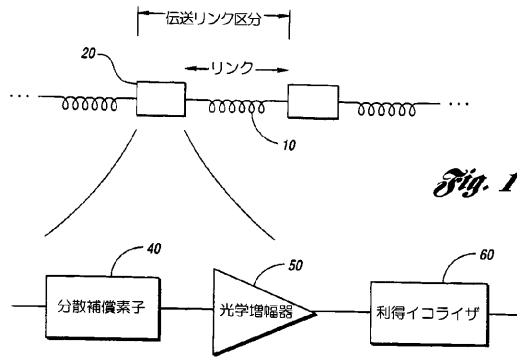


Fig. 1

【図 2】

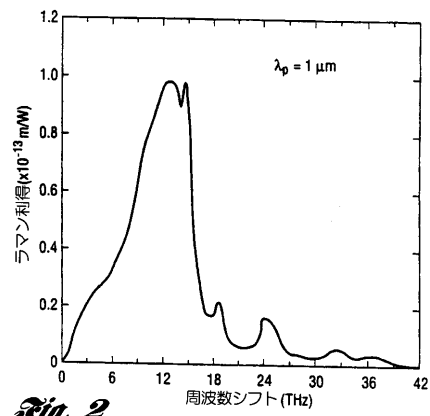


Fig. 2

【図 3】

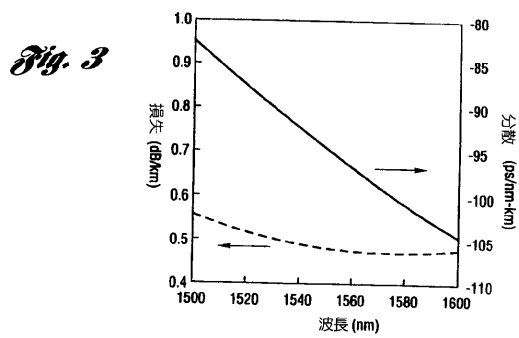


Fig. 3

【図 4 a】

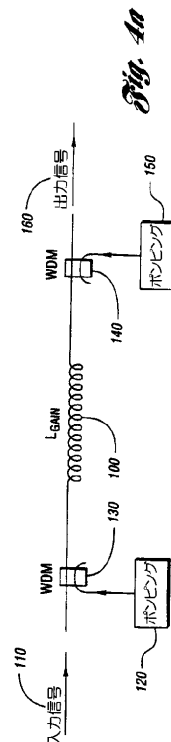
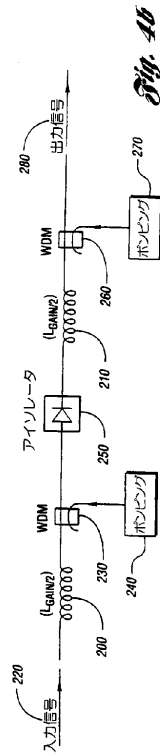
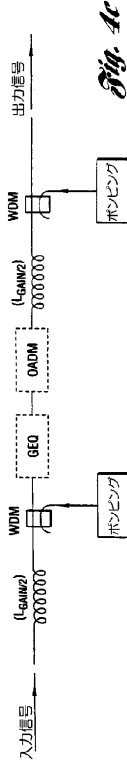


Fig. 4a

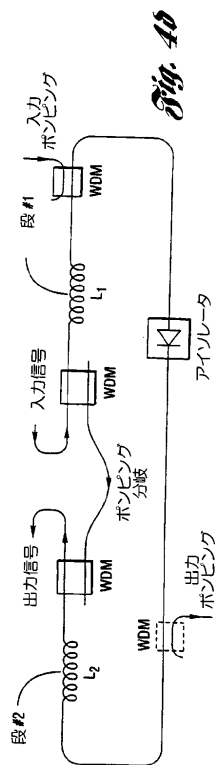
【図 4 b】



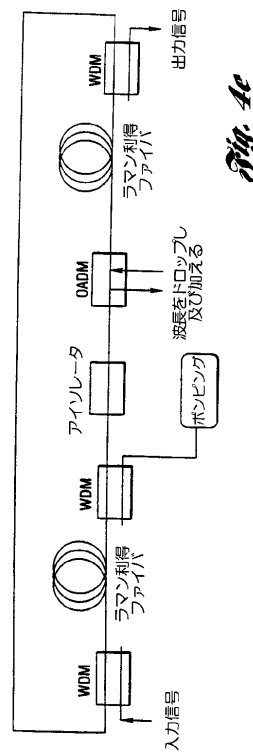
【図 4 c】



【図 4 d】



【図 4 e】



【図 4 f】

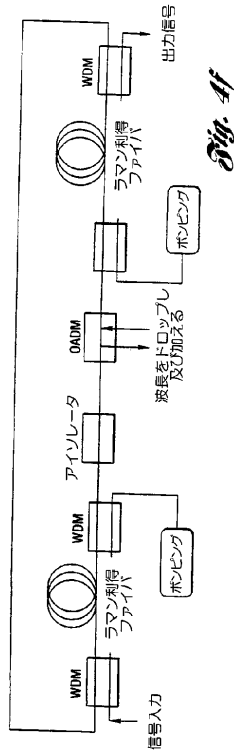


Fig. 4f

【図 5】

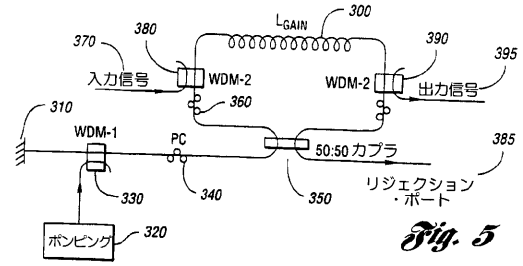


Fig. 5

【図 6】

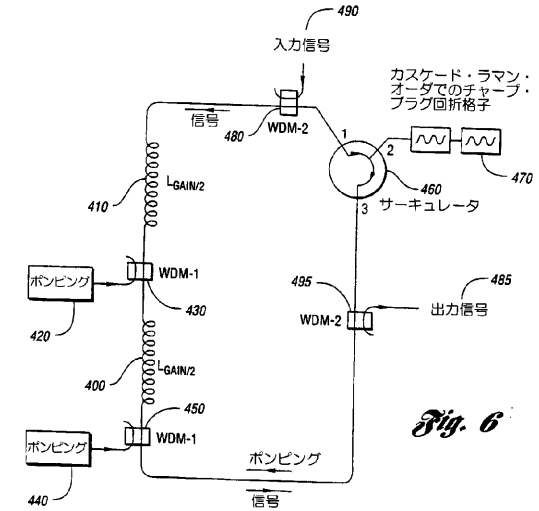


Fig. 6

【図 7 a】

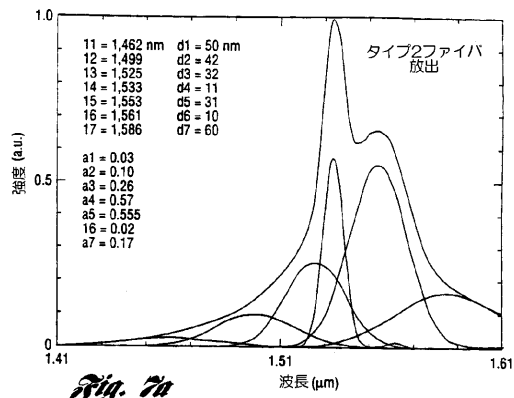


Fig. 7a

【図 7 b】

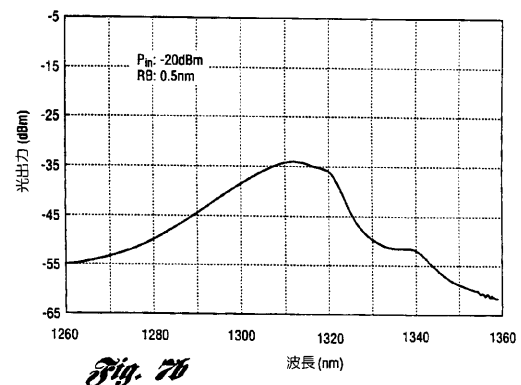


Fig. 7b

【図 8 a】

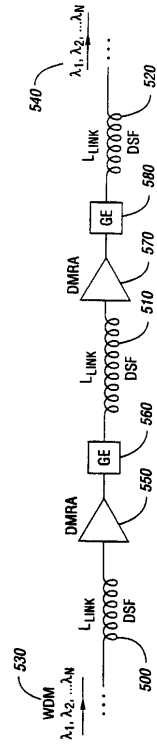


Fig. 8a

【図 8 b】

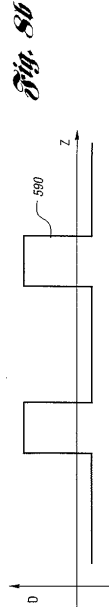


Fig. 8b

【図 8 c】

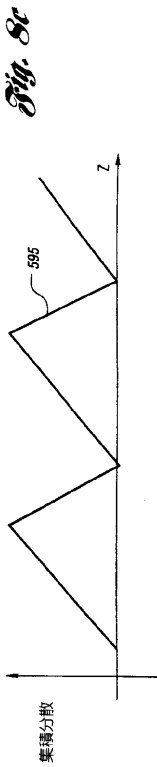


Fig. 8c

【図 9 a】

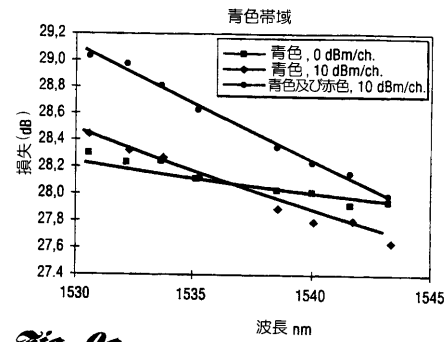


Fig. 9a

【図 9 b】

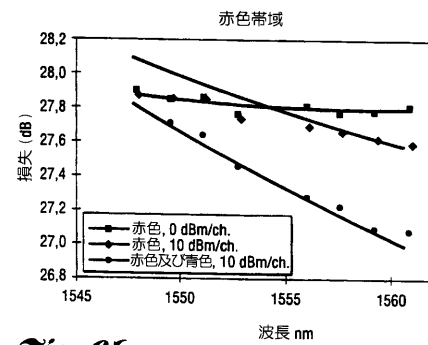
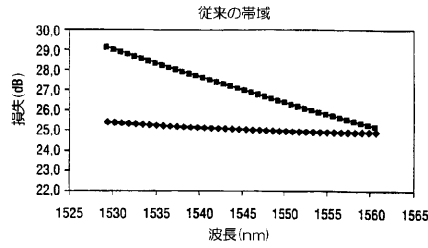


Fig. 9b

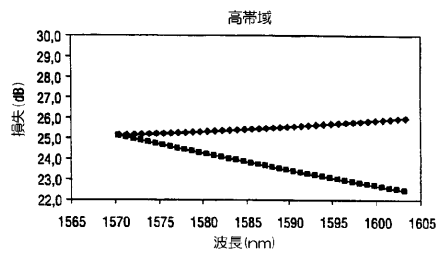
【図 10 a】



チャンネル数 : 40 高帯域 : 1570.4 - 1603.2 nm 線形損失 : 25 dB
 入力電力 : +6 dBm/ch. チャネル間隔 : 100 GHz モード・フィルタ・エリア : 80 μm^2
 従来帯域 : 1529.6 - 1560.6 nm スパン長 : 100 km ラマン係数 : 4.4×10^{-14} m/W

Fig. 10a

【図 10 b】



チャンネル数 : 40 高帯域 : 1570.4 - 1603.2 nm 線形損失 : 25 dB
 入力電力 : +6 dBm/ch. チャネル間隔 : 100 GHz モード・フィルタ・エリア : 80 μm^2
 従来帯域 : 1529.6 - 1560.6 nm スパン長 : 100 km ラマン係数 : 4.4×10^{-14} m/W

Fig. 10b

【図 11】

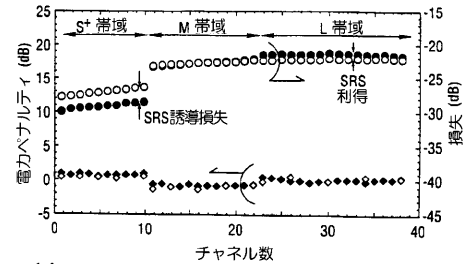


Fig. 11

【図 12】

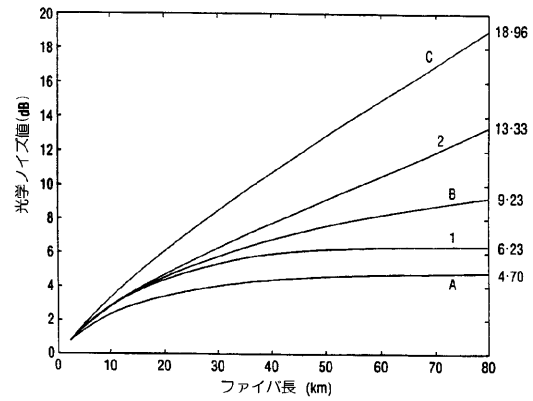


Fig. 12

【図 13】

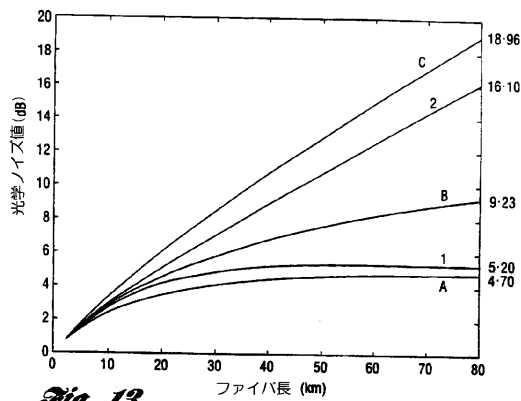


Fig. 13

【図 14】

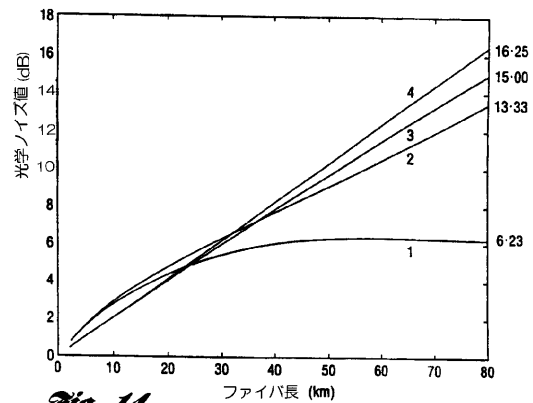


Fig. 14

【図 15 a】

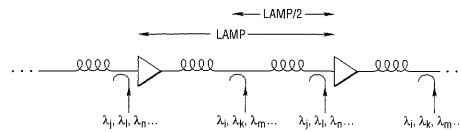


Fig. 15a

【図 15 b】

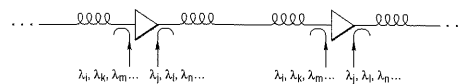


Fig. 15b

Fig. 15c

Fig. 15d

Fig. 16a

Fig. 16b

Fig. 16c

Fig. 16d

フロントページの続き

(74)代理人 100059959

弁理士 中村 稔

(74)代理人 100067013

弁理士 大塚 文昭

(74)代理人 100082005

弁理士 熊倉 禎男

(74)代理人 100086771

弁理士 西島 孝喜

(74)代理人 100084663

弁理士 箱田 篤

(72)発明者 イスラム モハメッド ナズルール

アメリカ合衆国 テキサス州 75013 アーレン ツイン クリークス ドライヴ 907

(72)発明者 イスラム モハメッド アジズール

アメリカ合衆国 ニューヨーク州 13760 エンディコット マイナー サークル 1408

(72)発明者 スローソン マイケル アール

アメリカ合衆国 ジョージア州 30005 アルファレッタ バーナーホーン ラン 6260

合議体

審判長 江成 克己

審判官 北川 創

審判官 星野 浩一

(56)参考文献 特開昭62-102585(JP,A)

木下進、大塚和恵、近間輝美、ラマン増幅を用いた分散補償ファイバの低損失化の検討、電子情報通信学会総合大会講演論文集、1996年、Vol.1996年 通信、No.2(19960311)、p.610

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 3/00 - 3/30