(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第3795253号
(P3795253)
(45)発行日　平成18年7月12日(2006.7.12)　(24)登録日　平成18年4月21日(2006.4.21)

(51)Int.Cl.　　F I
G02F 1/35 (2006.01)　　G02F 1/35 501
H01S 3/30 (2006.01)　　H01S 3/30 Z

請求項の数 8　(全 15 頁)

(21)出願番号　特願平11-107330
(22)出願日　平成11年4月15日(1999.4.15)
(65)公開番号　特開2000-29083(P2000-29083A)
(43)公開日　平成12年1月28日(2000.1.28)
審査請求日　平成12年7月27日(2000.7.27)
審判番号　不服2003-14977(P2003-14977/J1)
審判請求日　平成15年8月4日(2003.8.4)
(31)優先権主張番号　60/081825
(32)優先日　平成10年4月15日(1998.4.15)
(33)優先権主張国　米国(US)
(31)優先権主張番号　09/145324
(32)優先日　平成10年9月1日(1998.9.1)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者　596092698
ルーセント　テクノロジーズ　インコーポレーテッド
アメリカ合衆国．０７９７４－０６３６　ニュージャーシィ，マレイ　ヒル，マウンテン　アヴェニュー　６００
(74)代理人　100064447
弁理士　岡部　正夫
(74)代理人　100085176
弁理士　加藤　伸晃
(74)代理人　100106703
弁理士　産形　和央
(74)代理人　100096943
弁理士　臼井　伸一

最終頁に続く

(54)【発明の名称】カスケード型ラマン共振器システムおよび装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

入力波長がλ_pである光エネルギー源を含んでいる光通信システム（１０）内で光エネルギーを入力波長λ_pより大きい出力波長λ_nに変換するための装置において、

前記光エネルギー源に結合されている光伝送メディア（３２）、

前記光伝送メディアに形成され、前記出力波長λ_nにおいて光エネルギーを放射するための光学的キャビティを規定する少なくとも１つのペアの格子（４４、４６、５２、５４）、

前記光伝送メディアの中で第１の入力波長λ_{p1}において光エネルギーの最大反射を提供する波長で形成されている第１の反射格子、及び

第２の入力波長λ_{p2}において光エネルギーの最大反射を提供する波長で前記光伝送メディア内に形成されている第２の反射格子とを含み、第１および第２の入力波長のうちの少なくとも１つが入力波長λ_pとは異なっており、

前記格子の少なくとも１つのペアはラマン・ストークス・オーダのシフトに対する最大利得には対応しない波長において前記光伝送メディアに書き込まれ、ラマン・ストークス・オーダのシフトについての最大利得に対応する波長において書き込まれた場合よりも小さい効率で光エネルギーが変換されており、最大の反射効率はラマン・ストークス・オーダのシフトに対応する波長において発生するようになっており、

前記規定された光学的キャビティは選択的に第１の入力波長λ_{p1}又は第２の入力波長λ_{p2}の光エネルギーを出力波長λ_nの光エネルギーに変換するようになっている装置。

【請求項２】
請求項１に記載の装置において、ラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得に対応していない波長における前記格子が、ラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得に対応する波長の約±２０ｎｍの範囲内にある装置。
【請求項３】
請求項１に記載の装置において、最大効率より低い効率で反射を提供する波長において、前記伝送メディアの出力領域において形成されている少なくとも１つの反射格子を含み、その反射格子の波長は入力波長λ_pのラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得には対応しないが、入力波長λ_pのラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得に対応する波長の約±２０ｎｍの範囲内にあるようになっている装置。
【請求項４】
請求項１に記載の装置において、前記光伝送メディアは入力領域および出力領域を含み、前記少なくとも１つのペアの格子は、前記入力領域において書き込まれる少なくとも１つの格子および、前記出力領域において書き込まれる補完用の格子をさらに含む装置。
【請求項５】
光エネルギーを出力波長λ_nに変換するためのカスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）（１２）であって、
入力領域（３６）および出力領域（３４）を含んでいる、入力波長がλ_pである光エネルギー源に結合するための光伝送メディア（３２）と、
出力波長λ_nに対応していて、前記光伝送メディアの入力領域の中に形成されている第１の反射格子（５４）と、
ｎ≧２の中間のラマン・ストークス・オーダのシフトλ_1，λ_2，．．．，λ_nに対応している、前記光伝送メディアの入力領域内に形成されている少なくとも１つの第２の反射格子（５２）と、
ｎ≧２の中間のラマン・ストークス・オーダのシフトλ_1，λ_2，．．．，λ_nに対応していて前記光伝送メディアの出力領域内に形成され、それぞれの第２の格子を補完し、ラマン散乱の前記光伝送メディア内に光学的キャビティが規定される方法で対になっている格子を形成する少なくとも１つの第３の反射格子（４４）と、
出力波長λ_nにおいて光エネルギーの最大反射を提供する波長において前記光伝送メディアの出力領域の中で書き込まれ、前記第１の反射格子を補完していて、前記光伝送メディアの内部で格子のペアを形成している少なくとも１つの透過性の格子（４６）と、
第１の入力波長λ_{p1}において光エネルギーの最大反射を提供する波長で前記光伝送メディアの入力領域内に形成された第４の反射ポンプ格子（４２）、及び
第２の入力波長λ_{p2}において光エネルギーの最大反射を提供する波長で前記光伝送メディアの出力領域内に形成された第５の反射ポンプ格子（４３、４５）を含み、ここで該第１と第２の入力波長の少なくとも１つは入力波長λ_pとは異なっており、
第２の反射格子およびそれぞれの第３の反射格子によって形成される少なくとも１つの格子ペアの格子が、ラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得に対応しない波長において書き込まれ、光エネルギーは、前記反射格子がラマン・ストークス・オーダのシフトについての最大利得に対応する波長において書かれた場合より低い効率で変換されるようになっているカスケード型ラマン共振器。
【請求項６】
請求項５に記載の装置において、ラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得に対応していない波長における格子が、ラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得に対応している波長の約±２０ｎｍの範囲内の波長において書き込まれるようになっている装置。
【請求項７】
請求項５に記載の装置において、最大効率より低い効率で反射を提供する波長において、前記伝送メディアの出力領域において形成されている少なくとも１つの反射格子をさらに含み、その反射格子の波長は入力の波長λ_pのラマン・ストークス・オーダのシフトの

最大利得には対応しないが、入力波長λ_pのラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得の約±２０ｎｍの範囲内にあるようになっている装置。

【請求項８】

光通信システム（１０）であって、

入力波長がλ_pである光エネルギー源（１４）と、

前記エネルギー源に対して光学的に結合されていて、入力領域（３６）および出力領域（３４）を有している光伝送メディア（３２）を含むカスケード型ラマン共振器（１２）であって、前記入力領域は出力波長λ_nに対応している波長においてその中に形成されている第１の反射格子（５４）、およびｎ≧２の中間のストークス・オーダのλ_1，λ_2，．．．，λ_nに対応している波長においてその中に形成されている少なくとも１つの第２の反射格子（５２）とを含み、そして前記出力領域は中間のストークス・オーダλ_1，λ_2，．．．λ_nに対応している波長においてその中に形成されている少なくとも１つの第３の反射格子（４４）と、第１の入力波長λ_{p1}において光エネルギーの最大反射を提供する波長で前記光伝送メディアの出力領域に形成された第４の反射格子（４２）及び第２の入力波長λ_{p2}において光エネルギーの最大反射を提供する波長で前記光伝送メディアの出力領域に形成された第５の反射格子（４３、４５）とを含み、ここで該第１と第２の入力波長の少なくとも１つは入力波長λ_pとは異なるものであり、

出力波長λ_nに対応している波長においてその中に形成されている透過性の格子（４６）を含んでいるラマン共振器とを含み、

入力領域の格子および対応している出力領域の格子によって形成されている格子のペアのうちの少なくとも１つが、ラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得には対応しない波長において書き込まれ、光エネルギーはその格子がラマン・ストークス・オーダのシフトの最大利得に対応する波長において書き込まれた場合よりは低い効率で変換され、最大の反射効率はラマン・ストークス・オーダのシフトに対応する波長において発生するようになっているシステム。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光増幅器およびレーザに関する。特に、本発明は、カスケード型ラマン共振器を使っている光増幅器およびレーザの装置および方法に関する。

【０００２】

【従来の技術】

光増幅器およびレーザは、光通信システムの中で使われ、そのシステム全体にわたって生じた損失を補償する。光増幅器は特定の波長における光をポンプするためにラマン増幅器またはレーザを含むことが多い。たとえば、米国特許第５，３２３，４０４号を参照されたい。

【０００３】

一般に、ラマン増幅器およびラマン・レーザは光源からの光を非線形の光伝送メディア（たとえば、光ファイバ、通常はシリカベースの光ファイバ）の振動モードに変換し、異なる（通常は、より長い）波長において再放射することを伴う非線形の光学的プロセスである刺激型ラマン散乱に基づいている。

【０００４】

たとえば、カスケード型のラマン・レーザは出力波長λ_nの放射に対する光学的キャビティを規定する一対の反射器の他に、波長$\lambda_{n-1}<\lambda_n$（ここで、ｎ≧２）の放射に対する対応している光学的キャビティを規定している少なくとも１つのラマン・ストークス・オーダの反射器ペアを有する非線形光伝送メディアを伴うラマン・レーザである。その反射器は、たとえば、ブラッグ（Ｂｒａｇｇ）格子、エッチングされた格子またはインライン屈折率格子である。溶融シリカが非線形メディアとして使われるとき、最大ラマン利得は１３．２テラヘルツ（ＴＨｚ）の周波数シフトにおいて発生し、それは約１．０～１．５ミクロン（μｍ）のポンプ波長に対するほぼ５０～１００ナノメートル（ｎｍ）の波長シフ

トに対応する。
【０００５】
カスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）は、特定の出力波長（λ_n）においてラマン・レーザのエネルギーを発生するための非線形の光伝送メディアを含む。さらに詳しく言えば、カスケード型ラマン共振器は、ポンプ波長（λ_p）において動作しているポンプ・レーザなどの光源からの光を所望の出力波長（λ_n）へ変換する。そのようなカスケード型ラマン共振器の適切な応用としては、たとえば、リピータのない光ファイバ通信システムにおけるリモートにポンプされるエルビウム（Ｅｒ）ファイバ増幅器などがある。
【０００６】
【発明が解決しようとする課題】
しかし、従来のカスケード型ラマン共振器は、通常は所望のカスケード型ラマン共振器の出力波長（λ_n）によって変わる特定のポンプ波長（λ_p）において動作する光源を必要とする。たとえば、出力波長（λ_n）が１４８０ｎｍであるカスケード型ラマン共振器は、１１１７ｎｍのポンプ波長（λ_p）において動作するポンプ・レーザなどの光源についてのみ使える。それは最大のラマン利得、すなわち、約１３．５ＴＨｚの周波数シフトに対応している波長において隔てられている一連の共振器に対応する。同様に、出力波長（λ_n）が１４５０ｎｍであるカスケード型ラマン共振器は、１１００ｎｍのポンプ波長（λ_p）において動作しているポンプ・レーザなどの光源についてのみ使える。
【０００７】
したがって、パワーがスケーラブルで、装置の入力波長（λ_p）についての独立性がより大きいラマン・レーザ装置が利用できることが望ましい。そのような装置はその装置の所望の出力波長（λ_n）へ導く、ラマン・ストークス・オーダに対応する特定のポンプ波長（λ_p）のみを有する光源での使用に限定されないような、多様性の大きい装置となる。
【０００８】
【課題を解決するための手段】
本発明は、特許請求の範囲に規定されている。本発明の実施形態としては、光ファイバ通信システムの中で光を変換するための装置などがある。本発明の実施形態は一連のラマン・ストークス・オーダの反射器およびその中の１つの出力反射器を有している光エネルギー伝送メディアを有するカスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）または他の適切なラマン周波数シフト・デバイスを提供する。変換効率は最大効率より小さいが、異なるポンプ・レーザ波長がそれによって変換されるのに十分な効率の変換を提供する１つまたはそれ以上の反射器が書き込まれる。たとえば、カスケード型ラマン共振器の内部の反射器はポンプ波長（λ_p）に対する最大のラマン利得においてでは必ずしもないが、それでも十分な変換効率を提供する波長において書き込まれる。
【０００９】
本発明の１つの実施形態においては、カスケード型ラマン共振器は１つのポンプ反射器および一対の高反射格子によって規定される光学的キャビティを伴う光ファイバを含み、その最大反射波長は理論的な最大ラマン利得が発生する波長には対応しないが、十分な変換効率に対して受け入れ可能な範囲内にある。代わりに、一連の中間のラマン・ストークス反射器の中の１つまたはそれ以上の反射器および低反射の出力反射器は必ずしも理論的に最大のラマン利得に対応する波長において書き込まれないが、変換効率が十分な許容できる範囲内にある波長において書き込まれる。
【００１０】
本発明の他の代替実施形態によると、カスケード型ラマン共振器はポンプ反射器を使用しない。さらに詳しく言えば、たとえば、約４Ｗを超える十分に大きなポンプ・パワーで動作しているとき、ポンプ波長（λ_p）の範囲内で通常書き込まれる、ポンプ反射器が不要であるファイバの最初の約５００ｍにおいて十分な変換が存在する。
【００１１】
本発明の実施形態に従って設計されたカスケード型ラマン共振器は、ポンプ波長（λ_p）が異なるポンプ・レーザについても使える。たとえば、普通は１１１７ｎｍからの光エネ

ルギーを１４８０ｎｍの出力信号波長に変換する１４８０ｎｍのカスケード型ラマン共振器は、たとえば、１１００ｎｍのポンプ・レーザからの光エネルギーを１４８０ｎｍの出力信号波長に変換するためにも使える。

【００１２】

代わりに、たとえば、約４W以下の低いポンプ・パワーで動作するとき、カスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）は吸収されない光を反射するために約１１００ｎｍにおいて書き込れる追加の高反射格子を含む。この方法で、１４８０ｎｍのカスケード型ラマン共振器は、１１１７ｎｍのポンプ・レーザに加えて、１１００ｎｍのポンプ・レーザ光源で使える。従来の装置においては、１１００ｎｍのポンプ・レーザは、１１００ｎｍのポンプ・レーザからの光エネルギーを１４５０ｎｍの出力信号波長に変換するように従来は設計されている１４５０ｎｍのカスケード型ラマン共振器でのみ使われる。

【００１３】

また、同様に、本発明の実施形態によると、普通は１１００ｎｍのポンプ・レーザからの光エネルギーを１４５０ｎｍの出力信号波長に変換する１４５０ｎｍのカスケード型ラマン共振器は、１１１７ｎｍのポンプ・レーザからの光エネルギーを１４５０ｎｍの出力信号波長に変換するのにも使える。代わりに、たとえば、約４W以下の低いポンプ・パワーで動作しているとき、１４５０ｎｍのカスケード型ラマン共振器は吸収されない光を反射するために約１１１７ｎｍにおいて書き込まれる追加の高反射格子を含む。従来の装置においては、１１１７ｎｍのポンプ・レーザは、通常は、１１１７ｎｍのポンプ・レーザからの光エネルギーを１４８０ｎｍの出力信号波長に変換するように設計されている１４８０ｎｍのカスケード型ラマン共振器でのみ使われる。

【００１４】

本発明の実施形態によるカスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）デバイスは、与えられた複数のポンプ波長に対して所望の出力波長において各種の応用に対して十分な光出力を提供するという意味でパワー・スケーラブルである。また、本発明の実施形態によるデバイスは複雑でなく、そして従来の装置のものより安価である。

【００１５】

【発明の実施の形態】

次の説明においては、図面の説明全体を通して本発明の理解を深めるために、類似のコンポーネントは同じ参照番号によって参照される。

以下には特定の機能、構成および装置が説明されるが、そのような説明は例を示す目的だけのために行われていることを理解されたい。この分野の技術に熟達した人であれば、本発明の精神および適用範囲から逸脱することなしに、他のステップ、構成および装置も使えることが分かる。

【００１６】

本発明の実施形態は理論的に最大の効率以下での光の変換が多くの光ファイバ・レーザの応用に対してそれでも十分であるという有利な実現に基づいている。したがって、ラマン周波数シフト・デバイスの内部に含まれている光エネルギー伝送メディアにおいて書き込まれる少なくとも１つの反射格子ペアは、中間のスポークス・オーダの理論的な最大利得に直接対応して書かれる必要はない。そのような実現は、たとえば、異なるポンプ波長で動作している与えられた複数のポンプ・レーザに対して所望の出力波長において光ファイバ増幅（ラマン・シフトによる）を提供するのに十分であるという意味でパワーがスケーラブルな、カスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）および他の適切な光変換デバイスを作るために使われる。

【００１７】

また、本発明の実施形態は、たとえば、約４Wより大きい高ポンプ・パワーに対して、ポンプされる光に対する十分なポンプ・パワーにおける光ファイバの長さの関係において、ポンプされる光は完全には効率的にではないにしても、光ファイバの最初の１００ｍにおいて吸収されるという有利な実現に基づいている。したがって、そのような高いポンプ・パワーにおいて動作しているとき、ポンプの反射器はその光変換デバイスの内部では不要

である。

【００１８】

ここで図１を参照すると、光ファイバのレーザ・システム１０が示されている。この光ファイバ・レーザ・システム１０は、たとえば、λ_p のポンプ波長においてポンプ・レーザ１４からの光エネルギーを受け取り、その光エネルギーをλ_nの出力波長において出力の光エネルギーに変換するように適応されているカスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）１２を含む。そのポンプ・レーザは、たとえば、高パワーのダイオード・レーザ１６およびクラッディングのポンプ型ファイバ・レーザ１８を含む。ポンプ・レーザ１４のコンポーネントは例を示す目的だけのために与えられ、本発明の実施形態の制限であることを意味するものではない。本発明の実施形態に従って、ポンプ・レーザ１４は従来型の構造のものであってよいことを理解されたい。適切なポンプ・レーザは、たとえば、１１１７ナノメートル（ｎｍ）のクラッディング・ポンプ型ファイバ・レーザ（ＣＰＦＬ）である。

【００１９】

カスケード型ラマン共振器１２は１つの出力領域３４に対して書き込まれる少なくとも１つの反射格子、および入力領域３６に対して書き込まれる少なくとも１つの反射格子セットを有している、ある長さの光ファイバ３２または他の適切な光伝送メディアを含む。反射格子は、たとえば、ブラッグ格子、エッチ型の格子、インラインの屈折率格子または他の適切な高反射率のファイバ反射手段である。もう１つの観点から、図１に示されているカスケード型ラマン共振器１２は、ファイバ３２の両端に対してスプライスされている一組の、あるいは複数のマッチされたファイバのブラッグ格子を含む。

【００２０】

光ファイバ３２の出力領域３４に対して書き込まれるファイバ格子のセットは、たとえば、最大の反射波長がポンプ・レーザ１４からのポンプ波長（λ_p ）にほぼ等しい、少なくとも１つの高反射ポンプ格子４２を含む。また、出力ファイバの格子セットは最大の反射波長が最大の利得に対応する中間ストークス・オーダ（λ_{n-1} ，λ_{n-2} ，λ_{n-3} ，．．．）の中の波長に本質的に対応する高反射格子４４を含む。また、出力ファイバ格子セットは最小の反射率が光ファイバ・レーザ・システム１０の所望の出力波長（λ_n ）にほぼ等しい少なくとも１つの低反射または透過性の格子４６を含む。

【００２１】

光ファイバ３２の入力領域３６に対して書き込まれるファイバ格子セットは、最大反射の波長が最大の利得に対応する中間のストークス・オーダ（λ_{n-1} ，λ_{n-2} ，λ_{n-3} ，．．．）の範囲内の波長に本質的に対応する高反射格子５２を含む。また、入力のファイバ格子セットは最大反射波長が所望の出力波長（λ_n ）にほぼ等しい少なくとも１つの高反射格子５４を含む。

【００２２】

前にここで説明されたように、中間のストークス・オーダの最大利得は、たとえば、ポンプ・レーザの動作波長（λ_p ）から出発して約１３．２テラヘルツ（ＴＨｚ）の周波数シフトにおいて発生する。１３．２ＴＨｚのシフトは約１．０～１．５ミクロン（μｍ）のポンプ波長に対する約５０～１００ナノメートル（ｎｍ）の波長シフトに対応する。中間のラマン・ストークス・オーダのパワーはそれが連続したラマン・ストークス・オーダにほとんど完全に変換されるまで、カスケード型ラマン共振器１２のキャビティの中に循環される。たとえば、動作において、図１に示されている光ファイバ・レーザ・システム１０はポンプ波長λ_p においてポンプ・レーザ１４から受信し、そしてその光エネルギーを出力波長λ_n における出力の光エネルギーに効果的に変換する。

【００２３】

ここで図２ａを参照すると、従来の光ファイバ・レーザ・システム装置２０が示されている。装置２０は入力の、動作波長、すなわち、ポンプ波長（λ_p ）が約１１１７ｎｍであるポンプ・レーザ１４を含む・ポンプ・レーザ１４は、たとえば、スプライス（一般的に、「ｘ」によって示されている）によってカスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）１２に対して接続されている。

【００２４】
カスケード型ラマン共振器１２は書き込まれる少なくとも１つの屈折率格子の付いた出力領域３４、および少なくとも１つの書き込まれる屈折率格子の付いた入力領域３６を有しているある長さの光ファイバ３２を含む。出力領域３４は中心波長が約１１７５ｎｍ、１２４０ｎｍ、１３１０ｎｍおよび１３９６ｎｍである反射率の高い複数の格子４４を含む。また、出力領域３４は、たとえば、ポンプ・レーザ１４の動作波長λ_pにほぼ等しい約１１１７ｎｍの最大反射波長を有している、たとえば、高反射格子４２の形式での、ポンプ反射器を含む。また、出力のファイバ格子セットも最小の反射が光ファイバ・レーザ・システム２０の所望の出力波長（λ_n）にほぼ等しい低反射または透過性の格子４６を少なくとも１つ含む。

【００２５】
入力領域３６は中心波長が約１１７５ｎｍ、１２４０ｎｍ、１３１０ｎｍおよび１３９６ｎｍである反射率の高い複数の格子５２を含む。また、入力領域３６は最大の反射が、所望の出力波長λ_nにほぼ等しい１４８０ｎｍである高反射格子５４を少なくとも１つ含む。

【００２６】
入力領域３６の反射格子５２は、出力領域３４の対応している反射格子４４と組み合わさって、それらの間に以前にここで説明されたようにラマン散乱を許容する光キャビティを規定する。詳しく言えば、反射格子４４、５２はそれらの中心波長がポンプ波長（λ_p＝１１１７ｎｍ）と出力波長（λ_n＝１４８０ｎｍ）との間の中間のラマン・ストークス・オーダに対応するように書き込まれる。動作において、図２ａの従来の装置は、入力またはポンプの波長が１１１７である光のエネルギーを１４８０ｎｍの波長の出力波長エネルギーに変換する。

【００２７】
ここで図２ｂを参照すると、波長（λ_p）が約１１００ｎｍであるポンプ・レーザ１４を使っている従来の光ファイバ装置２２が示されている。装置２２はそれに対して動作するように接続されているカスケード型ラマン共振器１２を、たとえば、スプライス（一般に「Ｘ」で示されている）によって含む。

【００２８】
カスケード型ラマン共振器１２は出力領域３４および入力領域３６を備えている光ファイバ３２を含む。出力領域３４は通信波長が約１１５６ｎｍ、１２１８ｎｍ、１２８７ｎｍおよび１３６６ｎｍである複数の高反射格子４４、および、たとえば、最大反射波長が約１１００ｎｍ（ポンプ・レーザ１４の動作波長、すなわち、ポンプ波長λ_p）である高反射格子４２の形式でのポンプ反射器を含む。また、出力フィルタ格子セットは最小反射率が光ファイバ・レーザ・システム２０の所望の出力波長（λ_n）にほぼ等しい低反射の、すなわち、透過性の格子４６を少なくとも１つ含む。

【００２９】
入力領域３６は、中心波長が約１１５６ｎｍ、１２１８ｎｍ、１２８７ｎｍ、および１３６６ｎｍである複数の高反射格子５２を含む。また、領域３６は最大反射が１４８０ｎｍ、すなわち、所望の出力波長λ_nにほぼ等しい少なくとも１つの高反射格子５４を含む。

【００３０】
光ファイバ３２の入力および出力の領域３６、３４に対して書き込まれる反射格子は、それぞれの最大反射波長（すなわち、それぞれの中心波長）が、入力ポンプ波長（１１００ｎｍ）と出力波長（１４５０ｎｍ）との間の中間のラマン・ストークス・オーダ（すなわち、１１５６ｎｍ、１２１８ｎｍ、１２８７ｎｍ、１３６６ｎｍ）に対応するように書き込まれる。動作において、図２ｂに示されている光ファイバ装置２２は、入力の、すなわち、ポンプの波長が１１００ｎｍである入力の光エネルギーを１４５０ｎｍの波長の出力光エネルギーへ変換する。

【００３１】
図２ａ～ｂに示されている従来の装置についての前記の説明から明らかであるように、従

来の装置においては、入力および出力の領域３６、３４は特定の動作波長の入力源についてのみ使えるように構成されている。たとえば、図２ａに示されている装置２０は動作（ポンプ）波長λ_pが約１１１７ｎｍであるポンプ・レーザ１４についてのみ使える。同様に、図２ｂに示されている装置２２は、動作（ポンプ）波長λ_pが約１１００ｎｍであるポンプ・レーザ１４についてのみ使える。したがって、異なる所望の出力波長λ_nを得るために、異なる入力波長（したがって異なるポンプ・レーザ）が必要である。したがって、従来の装置においては、カスケード型ラマン共振器は、通常は、ある波長で動作している単独のポンプ・レーザについてのみ使える。

【００３２】

経済的な観点から、カスケード型ラマン共振器は総合の光ファイバ・レーザ・システム装置の合計コストの約４０％を占める。したがって、ポンプ・レーザはその合計コストの約６０％に寄与し、そして最初のポンプ・レーザに加えて必要な追加の各ポンプ・レーザは光ファイバ・レーザ・システムの総合コストに対してさらに６０％を追加する。

【００３３】

本発明の実施形態によれば、光は多くの光ファイバ・レーザの応用に対して最大ではないが十分な変換効率によって特徴付けられる波長において拡散する刺激型のラマン拡散を使って変換される。この方法で、ポンプ・レーザなどの光エネルギー源の有用性が有利に拡大される。たとえば、従来は単独のカスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）の構成だけでしか使えなかったポンプ・レーザが、本発明によると、複数のカスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）の構成で使える。

【００３４】

ここで図３を参照すると、ラマン利得スペクトルのグラフ３０が示されている。グラフ３０から、ラマン利得は約３ＴＨｚ～１５ＴＨｚの範囲で延びている「実用的」ラマン利得で４２ＴＨｚまでの周波数シフトに対して発生するが、最大のラマン利得に対応している周波数シフトにおいて得られるよりも効率の低い動作で発生することがわかる。したがって、本発明の実施形態によると、カスケード型ラマン共振器および他の適切な光ファイバ・レーザ・デバイスは、共振キャビティの周波数シフトがこの周波数範囲内に落ちるが、理論的に最大の変換効率を提供する周波数では必ずしもないように構成される。さらに詳しく言えば、１つまたはそれ以上の格子または他の反射手段は、それぞれの中心波長が必ずしもラマン・ストークス・オーダの最大利得に対応する必要がないように書き込まれる。そのような構成はカスケード型ラマン共振器および他の適切なデバイスの有用性を、ある種の応用において、たとえば、特定の波長において動作するポンプ・レーザまたは他の光エネルギー源に対して設計されているデバイスが、他の波長において動作する光源と一緒に使える範囲に拡大する。

【００３５】

たとえば、本発明の実施形態によると、カスケード型ラマン共振器は示されている周波数範囲内で最大化されていないが、十分な周波数シフトを考慮するポンプ反射器、出力反射器およびラマン・ストークス・オーダの反射器を有する。すなわち、これらの反射器を形成する格子ペアの１つまたはそれ以上が、１つまたはそれ以上のポンプ・レーザの動作波長の中間ストークス・オーダの最大利得に対応して書き込まれる必要は必ずしもない。しかし、その格子は理論的な最大反射波長の許される範囲内で書き込まれ、したがって効率は低いが入力の、すなわち、ポンプの波長λ_pから所望の出力波長λ_nへの十分な光変換が可能である。この方法で単独のカスケード型ラマン共振器は従来のカスケード型ラマン共振器の装置と違って、２つ以上のレーザ波長（たとえば、λ_{p1}、λ_{p2}）から所望の出力波長λ_nへ光を変換するのに十分に柔軟性がある。

【００３６】

ここで図４を参照すると、本発明の実施形態に従って光ファイバ・レーザ・システム装置４０が示されている。装置４０は、入力または出力の波長（λ_p）が、たとえば、１１００ｎｍ、１１１７ｎｍまたは他の適切な波長、たとえば、波長が約１０８５ｎｍ～１１３０ｎｍの範囲内のポンプ・レーザ１４などの光エネルギー源を含む。ポンプ・レーザ１４

は、たとえば、スプライス（一般的に、「ｘ」で示されている）によってカスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）１２に接続されている。

【００３７】

カスケード型ラマン共振器１２は、出力領域３４および入力領域３６を備えている光ファイバ３２などの光伝送メディアを含む。出力領域３４は、たとえば、高反射格子４２の形式での約１１１７ｎｍの波長において最大反射が発生する出力領域３４の中に書き込まれるポンプ反射器を含む。以下にさらに詳細に説明されるように、高反射ポンプ格子４２によって、カスケード型ラマン共振器１２が１１１７ｎｍの入力波長に対して１４８０ｎｍのレージングを提供すること（すなわち、１１１７／１４８０のＣＲＲ）が可能となる。

【００３８】

本発明の代わりの実施形態によると、出力領域３４も約１１００ｎｍの波長において最大反射が発生する出力領域３４の中に書き込まれる、たとえば、高反射格子４３の形式での別の反射格子を含む。以下にさらに詳しく説明されるように、高反射ポンプ格子４２および／または高反射格子４３においてカスケード型ラマン共振器１２が１１００ｎｍの入力波長に対して１４８０ｎｍのレージング（すなわち、１１００／１４８０のＣＲＲ）を提供することができる。

【００３９】

また、出力領域３４はラマン・ストークス・オーダの波長シフトに少なくとも概略対応する波長において反射するように出力領域３４の設計の中に書き込まれる複数の反射格子４４も含む。たとえば、図に示されているように、出力領域３４の中の反射格子は、中心波長が約１１７５ｎｍ、１２４０ｎｍ、１３１０ｎｍおよび１３９０ｎｍである。しかし、本発明の実施形態によると、１つまたはそれ以上の反射格子４４が、たとえば、それぞれの中心波長がラマン・ストークス・オーダの波長シフトの最大利得には対応しないが、最大利得に対する理論的なラマン・シフトの約±２０ｎｍの範囲内のシフトに対応し、理論的には理想的ではないが、与えられた応用に対しては十分な変換効率を提供するように書き込まれる。

【００４０】

また、出力領域３４は最小の反射がラマン・ストークス・オーダの波長シフトに対応する、たとえば、約１４８０ｎｍの、光ファイバ・レーザ・システム４０の所望の出力波長（λ_n）にほぼ等しい、少なくとも１つの低反射または透過性の格子４６も含む。しかし、本発明の実施形態によると、低反射または透過性の格子４６は、たとえば、その最大反射がラマン・ストークス・オーダの波長シフト（１４８０ｎｍ）、すなわち、１４８０ｎｍ±２０ｎｍの最大利得に対応しないように書き込まれる。

【００４１】

本発明の実施形態によると、入力領域３６の中の１つまたはそれ以上の格子５２および出力領域３４の中の格子４４はラマン・ストークス・オーダの利得の最大値に対応しないが、それらは依然として互いにマッチしているか、あるいは補完し合っていることに留意する必要がある。すなわち、格子５２、４４はやはり前のように光学的キャビティを規定する必要がある。たとえば、出力領域の中の格子４４が、たとえば、１２４５ｎｍ（理論的な１２４０ｎｍの代わりの）において最大の反射に対して書き込まれる場合、入力領域３６の中の対応している格子５２も同様に１２４５ｎｍにおいて最大の反射に対して書き込まれる必要がある。この方法で、適切なラマン散乱に対して必要な規定された光学的キャビティが維持される。

【００４２】

入力領域３６は出力領域３４の中の複数の反射格子４４にマッチするか、あるいは補完するように、すなわち、少なくとも概略的にラマン・ストークス・オーダの波長シフトに対応するように書き込まれる複数の高反射格子５２を含む。詳しく言えば、反射格子４４と反射格子５２の両方が約１１７５ｎｍ、１２４０ｎｍ、１３１０ｎｍおよび１３９６ｎｍの中心波長を持つように書き込まれる。

【００４３】

また、入力領域３６は、たとえば、高反射格子５４の形式での高反射出力反射器も含む。高反射格子５４はその最大反射がほぼ所望の出力波長λ_nにおいて発生するように入力領域３６の内部に書き込まれる。

【００４４】

動作において、入力領域３６の反射格子５２は、出力領域３４の対応している反射格子４４と組み合わさって、それらの間に以前にここで開示されたように、ラマン散乱を許容する光学的キャビティを規定する。詳しく言えば、ポンプ・レーザ１４（たとえば、入力波長λ_pが約１１００ｎｍまたは１１１７ｎｍである）からの入力光エネルギーが本質的に妨げられないで入力領域３６を通過する。そのとき、光エネルギーは実質的に、入力領域３６と出力領域３４との間の光ファイバ３２の領域におけるラマン散乱によって１１７５ｎｍに変換される。初期に変換されない光は高反射格子４２（１１１７ｎｍ）および／または高反射格子４３（１１００ｎｍ）によって、２つの１１７５ｎｍの格子によって規定される光学的キャビティの中へ反射される。

【００４５】

その（変換された）１１７５ｎｍの光は次に２つの１１７５ｎｍの格子によって入力領域３６と出力領域３４との間の光ファイバ３２の領域の中に反射されて戻され、そこでラマン散乱によって１２４０ｎｍに実質的に変換される。その１２４０ｎｍの光は、次に２つの１１７５ｎｍの格子によって入力領域３６と出力３４との間の光ファイバ３２の領域に反射されて戻され、ラマン散乱によって実質的に１３１０ｎｍに変換される。同様に、その１３１０ｎｍの光は１３９６ｎｍに変換され、次に１４８０ｎｍに変換される。

【００４６】

所望の出力波長（λ_n）において伝搬する、その（変換された）１４８０ｎｍの光は、次に入力領域３６の中の高反射格子５４によって反射される。１４８０ｎｍの光は次に低反射または透過性の格子４６および出力領域３４の残りの部分を通過して共振器１２の出力に達する。

【００４７】

従来の装置においては、高反射ポンプ反射器の格子はポンプ・レーザの波長（λ_p）にほぼ等しい反射が最大となる波長を持つように書き込まれる。ラマン・ストークス・オーダの反射器格子は所望の入力波長（λ_p）から最大利得に対する理論的な最大周波数シフトに基づいて書き込まれ、低反射出力反射器の格子は所望の出力波長（λ_n）に対応している反射を満足するように書き込まれる。

【００４８】

たとえば、従来の装置においては、動作波長が１１００ｎｍのポンプ・レーザの場合、ポンプ反射器は最大の反射が１１００ｎｍの波長において発生するように書き込まれる。また、最大の利得に対応するラマン周波数シフトは、たとえば、１１５６ｎｍ、１２１８ｎｍ、１２８７ｎｍおよび１３６６ｎｍの波長において発生し、したがって、ラマン・ストークス・オーダの反射器格子はこれらの周波数シフトに対応するように書き込まれる。最後に、出力反射器の格子は最小の反射が１４５０ｎｍの波長において発生するように書き込まれる。たとえば、図２ａおよび上記の対応している説明を参照されたい。

【００４９】

同様に、従来の装置においては、動作波長が１１１７ｎｍのポンプ・レーザの場合、ポンプ反射器は１１１７ｎｍの波長において反射が最大になるように書き込まれる。また、最大利得に対応するラマン周波数シフトは、たとえば、１１７５ｎｍ、１２４０ｎｍ、１３１９ｎｍ、および１３９６ｎｍの波長において発生し、したがって、ラマン・ストークス・オーダの反射器格子はこれらの周波数シフトに対応するように書き込まれる。出力反射器の格子は最小の反射が１４８０ｎｍの波長において発生するように書き込まれる。たとえば、図２ｂおよび上記の対応している説明を参照されたい。

【００５０】

しかし、本発明の実施形態は、ラマンの利得スペクトルの幅が約６０ｎｍであることを有利に認識する。したがって、たとえば、１１００ｎｍの波長において動作しているポンプ

・レーザはたとえば、１１２０ｎｍ～１１８０ｎｍの波長から利得を提供する。そのような利得は、たとえば、１１１７ｎｍのポンプ・レーザで動作するように設計され（すなわち、１１１７／１４８０のＣＲＲ）、１１１７ｎｍからの第１のラマン・シフトに対する最大利得は１１７５ｎｍにおいて発生する。したがって、本発明の実施形態に従って、たとえば、図４に示されているように構成された１１１７／１４８０のＣＲＲは、１１１７ｎｍのポンプ・レーザによってポンプされるだけでなく（従来行われているように）、１１００ｎｍのポンプ・レーザによっても同様にポンプされる。

【００５１】

同様に、６０ｎｍの幅の利得のスペクトルは１１００ｎｍのポンプ・レーザで動作するように設計されているカスケード型ラマン共振器（すなわち、１１００／１４５０のＣＲＲ）が１１１７ｎｍのポンプ・レーザによってポンプされるだけでなく（従来行われているように）、１１００ｎｍのポンプ・レーザによってもポンプされるのに十分である。本発明の実施形態に従って構成された１１００／１４５０のＣＲＲが、光ファイバ・レーザ・システム装置５０の一部として図５に示されている。

【００５２】

光ファイバ・レーザ・システム装置５０はポンプ波長（λ_p）が約１１００ｎｍであるポンプ・レーザ１４などの光エネルギー源を含む。ポンプ・レーザ１４は、カスケード型ラマン共振器（ＣＲＲ）１２に接続されている。カスケード型ラマン共振器１２は出力領域３４および入力領域３６を備えた光ファイバ３２を含む。出力領域３４は最大反射が約１１００ｎｍにおいて発生するように書き込まれるポンプ反射器（たとえば、高反射格子４２）を含む。

【００５３】

本発明の実施形態によると、出力領域３４は、たとえば、高反射格子４５の形式で、最大反射が約１１１７ｎｍの波長において発生するように出力領域３４において書き込まれる別のポンプ反射器を含む。カスケード型ラマン共振器１２が１１１７ｎｍの入力波長に対して１４５０ｎｍのレージング（すなわち、１１１７～１４５０のＣＲＲ）を提供することができるのは、高反射格子４５の追加によるものである。

【００５４】

出力領域３４において書き込まれる反射格子４４は、少なくとも概略的に、最大利得に対応しているラマン・ストークス・オーダの波長シフトに対応する。したがって、１１００／１４５０のＣＲＲの場合、反射格子４４の中心波長は、理論的な最大のラマン散乱の変換効率に対して約１１７５ｎｍ、１２４０ｎｍ、１３１０ｎｍおよび１３９６ｎｍである。しかし、本発明の実施形態によると、１つまたはそれ以上の反射格子４４は最大利得のラマン・ストークス・オーダの波長シフトには対応せず、理論的に理想的な場合より低いが、与えられた応用に対しては十分な変換効率を提供するシフトに対応する。さらに詳しくいえば、１つまたはそれ以上の格子４４は前記の中央波長の±２０ｎｍの範囲内で書き込まれる。

【００５５】

また、出力領域３４は約１４５０ｎｍにおいて最大反射に対して書き込まれる少なくとも１つの低反射または透過性の格子４６も含む。しかし、本発明の実施形態によると、透過性の格子４６は、たとえば、その反射がラマン・ストークス・オーダの波長シフト（１４５０ｎｍ）の最大利得に対応しないように書き込まれる。たとえば、格子４６はその最大反射が１４５０±２０ｎｍにあるように書き込まれる。

【００５６】

入力領域３６は、たとえば、中心波長が理論的な最大のラマン散乱変換効率に対する約１１７５ｎｍ、１２４０ｎｍ、１３１０ｎｍ、および１３９６ｎｍとなるように書き込まれる複数の高反射格子５２を含む。また、入力領域３６はその高反射格子の最大反射が約１４５０ｎｍ（すなわち、λ_n）において発生するように書き込まれる高反射格子５４も含む。しかし、本発明の１つの実施形態によると、少なくとも１つの格子５２および／または格子５４が、たとえば、その最大反射がラマン・ストークス・オーダの波長シフト（１

４５０ｎｍ）の最大利得に対応しないように書き込まれる。さらに詳しく言えば、１つまたはそれ以上の格子５２、５４が前記の中央波長の±２０ｎｍの範囲内で書き込まれる。

【００５７】

ここで前に説明されたように、１つまたはそれ以上の格子５２および４４は、本発明の実施形態によると、ラマン・ストークス・オーダの最大利得には対応しないが、その格子は依然としてそれぞれの対応している格子にマッチするか、あるいはそれらを補完する必要がある。すなわち、格子５２、４４は、やはり前記のように光学的キャビティを規定する必要がある。たとえば、出力領域３４の中の格子４４が、たとえば、１３６０ｎｍ（理論的な１３６６ｎｍの代わりに）において最大反射となるように書き込まれる場合、入力領域３６の中の対応している格子５２も同様に最大反射が１３６０ｎｍにおいて発生するように書き込まれる必要がある。この方法で、適切なラマン散乱のために必要な規定された光学的キャビティが維持される。

【００５８】

動作において、光ファイバ・レーザ・システム装置５０は入力波長（λ_p）が１１００ｎｍの入力光を１４５０ｎｍの出力波長（λ_n）の光に、従来の方法で変換する。しかし、本発明の実施形態によると、光ファイバ・レーザ・システム装置５０は１１１７ｎｍの入力波長（λ_p）の光も１４５０の出力波長（λ_n）の光に変換する。

【００５９】

また、本発明の実施形態による有利な実現によって、１つまたはそれ以上のラマン・ストークス・オーダ反射器格子ペアの書込みが単に理論的な最大利得のラマン周波数シフトにおいてではなく、カスケード型ラマン共振器の中で必要な変換周波数に基づいて変化することを許す。同様に、理論的な最大利得のラマン周波数シフトだけの代わりに、必要な変換周波数によって変わる高反射ポンプ反射器および／または低反射出力反射器の書込みを変化させることができる。

【００６０】

ここで図６ａ～ｂを参照すると、各種のポンプ・パワー強度に対するシミュレートされたポンプ吸収と光ファイバの長さとの関係のグラフが示されている。図６ａのグラフから、比較的大きいポンプ・パワー（たとえば、約４Ｗより大きいポンプ・パワー）に対して、ほとんどの光は実際的に、たとえば、光ファイバの最初の１００ｍの範囲内で吸収されることが分かる。したがって、本発明の代わりの実施形態によると、比較的大きいポンプ・パワー（たとえば、４Ｗ以上）において動作しているとき、ポンプ反射器は不要である。逆に、図６ｂに示されているように、ポンプのパワーが小さい場合、約５００ｍ後でも、光の大部分はファイバによって吸収されない。

【００６１】

ここで図７を参照すると、本発明の１つの代わりの実施形態による光ファイバ・レーザ・システム装置７０が示されている。詳しく言えば、光ファイバ・レーザ・システム装置７０は比較的大きいポンプ・パワー（たとえば、４Ｗ以上）で動作するポンプ・レーザ１４を備えたカスケード型ラマン共振器１２を組み合わせて使用している。図に示されているように、光ファイバ・レーザ・システム装置７０は、出力領域３４および入力領域３６を備えている光ファイバ３２を含む。出力領域３４はたとえば、中間のストークス・オーダ（λ_{n-1}，λ_{n-2}，λ_{n-3}，．．．）に少なくとも概略的に対応するように書き込まれる複数の格子４４を含む。同様に、入力領域３６は、たとえば、中間のストークス・オーダ（λ_{n-1}，λ_{n-2}，λ_{n-3}，．．．）に少なくとも概略的に対応するように書き込まれる複数の格子５２を含む。また、入力領域３６は最大反射の波長が所望の出力波長（λ_n）にほぼ等しい高反射格子５４を含む。

【００６２】

しかし、本発明のこの代替実施形態によれば、カスケード型ラマン共振器１２はポンプ反射器を含まない。ここで前に説明されたように、大きいポンプ・パワー（たとえば、約４Ｗより大きい）で動作しているポンプ・レーザ１４の場合、光ファイバの最初の１００ｍ以内で十分な吸収が発生し、したがって、その光変換デバイスの内部にはポンプ反射器が

不要となる場合が多い。したがって、ポンプ・パワーが比較的小さい（たとえば、約４Ｗより小さい）場合、ポンプ・レーザの特定の波長（λ_p）に対応しているポンプ反射器は、その出力格子セットにおいて書き込まれなければならない場合がある。

【００６３】

図７に示されている本発明のカスケード型ラマン共振器装置７０は、たとえば、図４に示されている本発明の装置４０と比較される。図４の装置においては、カスケード型ラマン共振器１２は、最大反射が１１１７ｎｍの波長において発生するように書き込まれるポンプ反射器４２を含み、図５に示されている本発明の装置５０では、カスケード型ラマン共振器１２は１１００ｎｍの波長において最大反射となるように書き込まれるポンプ反射器４２を含む。

【００６４】

本発明による光ファイバ・レーザ・システム装置およびデバイスは従来の装置より複雑でなく安価である。さらに、本発明による装置のスケーラブルなパワーの特徴は追加の柔軟性を提供する。

【図面の簡単な説明】

【図１】代表的な光ファイバ・レーザ・システムの概略図である。

【図２ａ】従来の光ファイバ・レーザ・システム装置の概略図である。

【図２ｂ】従来の光ファイバ・レーザ・システム装置の概略図である。

【図３】溶融シリカ・ファイバの光伝送メディアで、約１μｍのポンプ波長の場合のラマン利得のスペクトルのグラフを示す図である。

【図４】本発明の１つの実施形態による光ファイバ・レーザ・システムの概略図である。

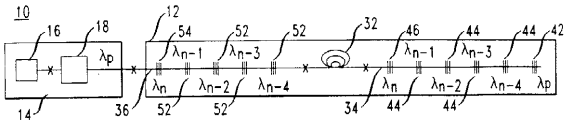
【図５】本発明の別の実施形態による光ファイバ・レーザ・システムの概略図である。

【図６ａ】大きいポンプ・パワーに対する光の吸収と光ファイバの長さとの関係を示すグラフを示す図である。

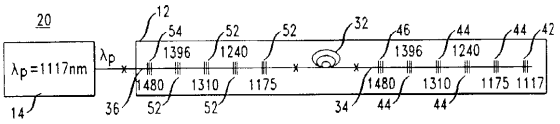
【図６ｂ】小さいポンプ・パワーに対する光の吸収と光ファイバの長さとの関係を示すグラフを示す図である。

【図７】本発明の代わりの実施形態による光ファイバ・レーザ・システムの概略図である。

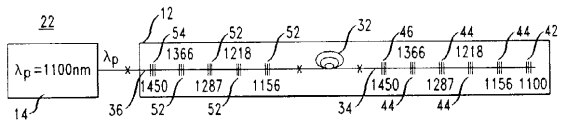
【図１】



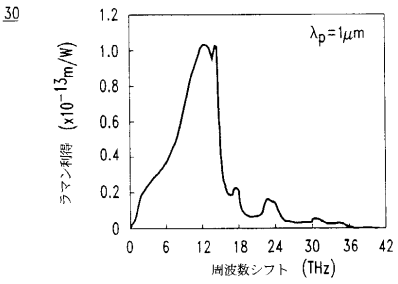
【図２ａ】



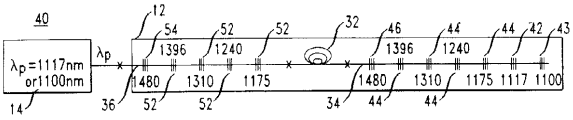
【図２ｂ】



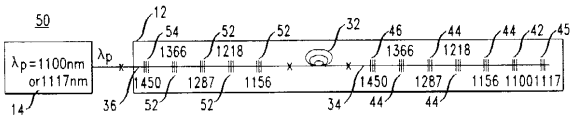
【図３】



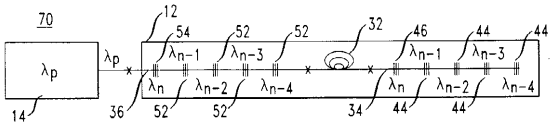
【図４】



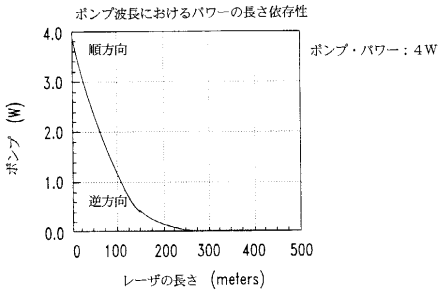
【図５】



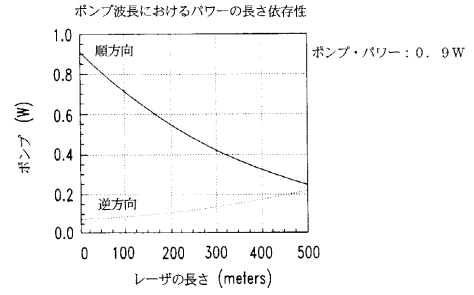
【図６ａ】



【図６ｂ】



【図７】



フロントページの続き

(74)代理人 100091889
弁理士 藤野 育男
(74)代理人 100101498
弁理士 越智 隆夫
(74)代理人 100096688
弁理士 本宮 照久
(74)代理人 100102808
弁理士 高梨 憲通
(74)代理人 100104352
弁理士 朝日 伸光
(74)代理人 100107401
弁理士 高橋 誠一郎
(74)代理人 100106183
弁理士 吉澤 弘司
(72)発明者 グロリア アール. ジャコヴィツーベセルカ
アメリカ合衆国 ０７７５１ ニュージャーシィ，モーガンヴィル，ウェムブレイ プレイス ３０４
(72)発明者 ウィリアム アルフレッド リード
アメリカ合衆国 ０７９０１ ニュージャーシィ，サミット，ブラックバーン ロード １４３

合議体
審判長 平井 良憲
審判官 鈴木 俊光
審判官 樋口 信宏

(56)参考文献 特開平７－１８１５２９（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
G02F1/35