

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5467864号  
(P5467864)

(45) 発行日 平成26年4月9日(2014.4.9)

(24) 登録日 平成26年2月7日(2014.2.7)

(51) Int. Cl.		F I			
HO 1 S	3/10	(2006.01)	HO 1 S	3/10	Z
HO 1 S	3/067	(2006.01)	HO 1 S	3/06	B

請求項の数 16 (全 34 頁)

(21) 出願番号	特願2009-508486 (P2009-508486)	(73) 特許権者	503443773
(86) (22) 出願日	平成19年5月10日 (2007.5.10)		エスピーアイ レーザーズ ユーケー リ
(65) 公表番号	特表2009-536785 (P2009-536785A)		ミテッド
(43) 公表日	平成21年10月15日 (2009.10.15)		イギリス国 エスオー30 2キューユー
(86) 国際出願番号	PCT/GB2007/001707		サウサンプトン ヘッジ エンド トー
(87) 国際公開番号	W02007/132182		ルバー ウェイ ウェリントン パーク
(87) 国際公開日	平成19年11月22日 (2007.11.22)		3
審査請求日	平成22年5月10日 (2010.5.10)	(74) 代理人	100099759
(31) 優先権主張番号	60/799,456		弁理士 青木 篤
(32) 優先日	平成18年5月11日 (2006.5.11)	(74) 代理人	100092624
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 鶴田 準一
(31) 優先権主張番号	60/812,164	(74) 代理人	100122965
(32) 優先日	平成18年6月9日 (2006.6.9)		弁理士 水谷 好男
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100141162
			弁理士 森 啓

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光放射を提供する装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1の帯域幅を有する光放射を提供する装置であって、シーディング放射を提供するシードレーザーと、前記シーディング放射を増幅する少なくとも1つの増幅器と、反射器と、を有する装置において、

・前記シードレーザーは、光学的有効走行時間とスペクトルと第2の帯域幅とによって規定される、ファブリペロー半導体レーザーであり、前記光学的有効走行時間は、光が前記シードレーザーを進行方向に伝搬する為に要する時間であり、

・前記シードレーザーは、前記反射器を介して前記増幅器に接続され、

・前記反射器は、前記シードレーザーによって放射された前記シーディング放射の中の  
ある比率を前記シードレーザー内に反射して戻すべく構成され、且つ、

・前記増幅器は、屈折率 $n_1$ を具備したコアと、屈折率 $n_2$ を具備したペDESTALと、を有する光ファイバを有し、且つ、この場合に、前記光ファイバは、前記ペDESTALを取り囲む屈折率 $n_3$ を具備したガラスから製造された第1クラディングを含み、この場合に、

・ $n_1$ は $n_2$ より大きく、

・ $n_2$ は $n_3$ より大きく、更に、

・前記増幅器は、ポンプ放射を前記第1のクラディング内に結合することによってクラディングポンピングされ、

更に前記装置は、

10

20

・使用中において前記増幅器は、前記シードレーザーによってシードされた場合、1 k Wよりも大きなピークパワーを有するパルスを放射し、

・前記反射器からの光学的フィードバックは、前記第1の帯域幅が前記第2の帯域幅よりも小さくなるようなものであり、更に、

・前記ペDESTALは、前記コアから漏洩した光放射を導波するように適応されていることを特徴とする、装置。

【請求項2】

請求項1に記載の装置において、前記光学的有効走行時間は10 ps ~ 50 psである、装置。

【請求項3】

前記2に記載の装置において、前記光学的有効走行時間は25 ps ~ 40 psである、装置。

【請求項4】

請求項1に記載の装置において、前記スペクトルは約0.045 nmだけ分離した個々のレーザーラインを備える、装置。

【請求項5】

請求項1乃至4の何れか1項に記載の装置において、前記反射器は、0.5 nmよりも大きな第3の帯域幅によって特徴付けられるファイブラッグ格子である、装置。

【請求項6】

請求項5に記載の装置において、前記第3の帯域幅は1 nmよりも大きい、装置。

【請求項7】

請求項6に記載の装置において、前記第3の帯域幅は約2 nmよりも大きい、装置。

【請求項8】

請求項5乃至7の何れか1項に記載の装置において、前記反射器は、前記第3の帯域幅にわたる往復反射時間遅延変動によって特徴付けられ、前記往復反射時間遅延変動は、光が前記反射器に入り反射器から出てくるまでの時間の、前記第3の帯域幅に亘る最大の間隔であり、更に、前記往復反射時間遅延変動は前記光学的有効走行時間よりも大きい、装置。

【請求項9】

請求項8に記載の装置において、前記往復反射時間遅延変動は、約50 ps ~ 1000 psである、装置。

【請求項10】

請求項1乃至9の何れか1項に記載の装置において、前記反射器は、前記シードレーザーから5 m未満の距離に位置している、装置。

【請求項11】

請求項1乃至10の何れか1項に記載の装置において、前記光ファイバは、前記コア及び前記ペDESTALの少なくとも1つの中に配置された、少なくとも1種類の希土類ドーパントによってドーブされている、装置。

【請求項12】

請求項1乃至11の何れか1項に記載の装置において、前記光ファイバは0.15未満の開口数を有する導波路を備え、

・前記コアは、シリカ、約0.1 ~ 4 モルパーセントの濃度のアルミナ、2 ~ 20 モルパーセントの濃度の燐酸塩、2000 ~ 6000 ppmの濃度のイッテルビウムを有し、且つ、

・前記ペDESTALは、シリカ、燐酸塩、及び酸化ゲルマニウムを有し、前記光ファイバは、976 nmにおける約400 mWのポンプ光によって長さが0.1 ~ 1 mの光ファイバをコアポンピングする場合、1000 nm ~ 1100 nmの波長において2000時間で5%以下の減衰における増加によって特徴付けられるフォトダークニング耐性の光ファイバである、装置。

【請求項13】

10

20

30

40

50

請求項 1 2 に記載の装置において、前記減衰における増加は、2000 時間において 1 % 未満である、装置。

【請求項 1 4】

請求項 1 乃至 1 3 の何れか 1 項に記載の装置であって、コントローラと 2 個のポンプを含み、前記光放射は、ピークパワー、パルスエネルギー、パルス繰り返し周波数及びパルス幅によって特徴付けられ、且つ、前記コントローラは、パルス繰り返し周波数が 1 Hz ~ 500 kHz に渡って前記ピークパワーを 5 kW 以上に維持する一方で、0.04 mJ を超えるパルスエネルギーを供給するように、前記 2 個のポンプ、パルス繰り返し周波数及びパルス幅を制御する、装置。

【請求項 1 5】

請求項 1 4 に記載の装置であって、レーザー供給ファイバおよび加工ヘッドを含み、前記装置は、材料を加工するためのレーザーの形状である、装置。

【請求項 1 6】

請求項 1 乃至 1 5 の何れか 1 項に記載の装置であって、前記増幅器はサイドポンピングされる、装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光放射を提供する装置に関する。この装置は、材料加工用の装置の基礎を形成しうる。

【背景技術】

【0002】

ファイバパルスレーザーは、微細機械加工、穿孔、及びマーキングなどの多数の産業用アプリケーションにおいて、人気のあるレーザーとして益々導入されている。マーキングなどのピークパワー駆動型のアプリケーションにおいては、高速の文字マーキング及び増大したスループットを実現するべく、高反復レートにおいて高ピークパワー（2.5 ~ 5 kW 超）を保持することが不可欠である。

【0003】

従来の単一段の Q スイッチレーザーは、エネルギーの保存において非常に効率的である。しかしながら、これらは、反復レートの増大に伴う可変平均パワー及び大きなピークパワーの降下を特徴とする。大部分のケースにおいて、ピークパワーは、プロセス（例えば、マーキング）閾値未満に降下可能であり、速度及びスループットに対する悪影響を伴う。一方、主発振器パワーアンプ（MOPA）構成は、パルスレーザーのパルス特性及びパワー性能と比べて、大きな制御性を提供することができ、且つ、マーキングユニットの動作領域を更に高い反復レートに拡張することにより、増大したマーキング速度を提供することができる。パルスレーザーが、200 kHz 超の反復レートにおいて 5 kW レベル超のピークパワーを維持するためには、ある要件が必要である。平均パワーが 10 W 超であり、パルスエネルギーが、0.1 ~ 0.5 mJ の範囲又はこれを上回っており、パルス持続時間が、10 ns ~ 200 ns において変化可能であることを要し、且つ、ピークパワーが、10 kHz ~ 200 kHz の範囲の反復レートにおいて、約 5 kW 又は 10 kW のレベルにおいて実質的に一定に留まることを要する。更なる要件は、例えば、低モード型又はシングルモード型ファイバレーザーによって提供な、良好なビーム品質である。

【0004】

これらの強度及びピークパワーにおいては、光学的非線形性及び光学的損傷の発現を回避するべく、パルスシステムに特別な注意が必要とされる。更には、パルスシステムの効率及び寿命を低減することになることから、結果的に得られる高利得、高反転動作条件下において、活性ファイバは、フォトダークニングの影響を被るべきではない。

【0005】

スタンドアロン方式において、又は主発振器パワーアンプ構成の一部として、いくつかの異なるパルスファイバレーザー構成が提案及び使用されている。特に、Q スイッチファ

10

20

30

40

50

イバレーザは、相対的に単純且つ安定した構成において、高ピークパワー及び数 mJ のパルスエネルギーを生成可能であるため、非常に魅力的である。アプリケーション領域を拡大するべく、様々な方式において産業用アプリケーションに使用されることを目的としたスタンドアロン Q スイッチレーザの主要な欠点の 1 つは、パルス繰り返し数、エネルギー、ピークパワー、及びパルス幅などの対象のすべてのパラメータが、相互に関係しており、且つ、独立的に制御不能であるという点にある。特に、ピークパワーは、パルス繰り返し周波数の増大に伴って低下する。

【 0 0 0 6 】

いくつかのこれらの性能上の課題は、解決可能であり、且つ、複数増幅段の M O P A 構成を使用することにより、必要とされる高ピークパワー性能を高 P R R 型に拡張可能である。

10

【 0 0 0 7 】

この場合には、パルスシードは、低パワー Q スイッチレーザ又は直接変調半導体レーザのいずれかであってよい。後者は、直接制御可能であり、且つ、パルス形状及び P R R を定義する際に格段に大きな自由度を提供すると共に、これらを意図的に変更する可能性を付与してアプリケーションニーズを更に良好に充足する。更には、これは、通信産業において多年にわたって育まれた十分に発達し、且つ、極めて信頼性の高い半導体技術に基づいている。増幅チェーンに沿った利得分布を制御することにより、増幅パルスシーケンスの様々なパラメータが正確に定義される。

【 0 0 0 8 】

20

増幅器の出力端に向かうパルスが到来する前に、ファイバ増幅器内における局所的な反転が相当に増大する。反転分布に関する知識は、この性能劣化効果の傾向を有するファイバを使用する場合には、フォトダークニングレートを定義する際に非常に重要である。パルスは、その伝播に伴って、反転を減少させ、この結果、その強度を増大させる。又、増幅プロセスは、著しいパルス整形及びフロントエンドシャープニングをも結果的にもたらず。これは、パルス幅及びピークパワーを定義する際に極めて重要であり、且つ、この結果、誘導ラマン散乱 ( S R S ) 及び誘導ブリルアン散乱 ( S B S ) などの様々な非線形性の開始を定義する。特定のエネルギーレベルを超える場合、すべてのパルスは、相当に整形され ( 鋭くなり ) 、且つ、そのパルス幅を低減する。これは、増幅器の飽和を開始するのに十分なエネルギーをパルスが獲得するという事実に起因する。このような条件下においては、エネルギーがパルスのリーディングエッジによって主に抽出され、この結果、パルスの整形及び歪がもたらされることが知られている。ピークパワーは、パルスエネルギーに伴って非線形的に増大し、この結果、不可避に S R S 閾値を超過する。この S R S 閾値は、通常、ファイバ設計及びパルス形状に応じて、約 5 k W ~ 1 0 k W である。

30

【 0 0 0 9 】

パルスファイバレーザの出力パワーを制限する別の重要な効果は、ジャイアントパルスの形成である。これらは、システム内の光学コンポーネントを破滅的に損傷可能である。この効果は、レーザのピークパワー及びスペクトル特性に非常に依存するものと考えられ、且つ、誘導ブリルアン散乱 ( S B S ) に由来すると考えられる。非線形閾値に到達した際に、前方伝播パルスが反射される。ジャイアントパルスが観察され、且つ、これらは、パルスレーザシステム内の増幅器 ( 並びに、その他の装置 ) を破滅的に損傷可能である。残念ながら、この効果は、その特性が確率論的であり、且つ、それ自体、非常に予測不能である。ライン幅を狭める ( レーザダイオードなどの ) シードレーザの瞬間的なスペクトル特性における単一の変動は、S B S イベントを結果的に生成する可能性があり、且つ、ジャイアントパルスの形成及び後続の破滅的な損傷をトリガ可能である。このような損傷は、産業用の加工装置内に設置された数ヶ月後のレーザ内において観察された。

40

【 0 0 1 0 】

ファイバレーザは、しばしば、レーザダイオードによってポンピングされる。これらのレーザダイオードは、レーザからダイオードに伝播する望ましくない光放射によ

50

って損傷されることがある。レーザーダイオードは、パルスのエネルギーではなく、ピークパワーによって損傷するため、影響は、特に、パルスレーザーにおいて深刻である。パルスレーザーは、連続波レーザーよりも格段に大きなピークパワーを有する。従って、レーザーからポンプを分離する要求は、連続波レーザーよりもポンプレーザーにおいて更に切実である。

【0011】

Yb<sup>3+</sup>ドーピング型ファイバレーザー及び増幅器の長期にわたる動作に関係した非常に重要な課題は、フォトダークニングの効果である。この効果は、時間に伴うファイバの背景損失の漸進的な増大として現れ、これにより、光学システムの出力パワー及び全体的な効率が低下する。これは、既存のファイバ色中心の光学的な活性化に関係すると考えられ、吸収帯域は、主にUVスペクトル領域内に位置する。しかしながら、吸収帯域の尾部が、近IR内に延長し、これにより、光学性能に悪影響を付与する。フォトダークニングは、漸進的な劣化を結果的にもたらずが、破滅的な突然のファイバ障害を結果的にもたらずものとはされていない。フォトダークニングの速度及び最終的なレベルは、活性ファイバの反転の程度に依存するとされており、この結果、異なる増幅システムは、異なる劣化を示すことになる。

10

【0012】

光ファイバの多くのアプリケーションは、光ファイバの透明度を時間に伴って劣化させる強度を有する、光学信号の生成及び伝送を必要としている。この効果は、フォトダークニングと呼ばれており、これは、光によって誘発されたガラスの吸収の変化である。吸収の増大は、スペクトルのUV及び可視部分の光を強力に吸収する色中心の形成又は活性化に起因すると考えられる。

20

【0013】

スペクトルドメインにおいては、フォトダークニングは、約800nmの波長未満の鋭い損失の増大として現れる。この強力な吸収帯域の尾部は、十分に1ミクロン～1.5ミクロン領域内に延長し、この結果、ポンプ及び信号波長の両方における損失に悪影響を与える。これは、この波長域において動作する、ファイバレーザー及び増幅器の性能及び全体効率を深刻に限定する効果を有する。

【0014】

時間ドメインにおいては、フォトダークニングは、レーザー又は増幅器の出力パワーが徐々に漸近値にまで減少する、擬似指数的減少として現れる。最終的なパワーの降下及び関係する時間スケールは、ファイバレーザー又は増幅器の動作条件、最も顕著には、ポンプ及び平均反転レベル、並びに、動作温度に依存するものと思われる。出力パワーの降下は、更なるポンプ源の提供及び/又は駆動ポンプ電流の増大によって補償することが可能である。前者は、結果的にユニットコストの増大をもたらす、後者は、結果的にポンプユニットの経年変化の加速及び破滅的な障害確率の増大をもたらすため、いずれの対策も、望ましいものではない。

30

【0015】

光ファイバレーザー及び増幅器は、しばしば、多重光子プロセスを介してフォトダークニングに結び付く可能性を有する希土類ドーパントを含む。この効果は、少なくとも、Tm<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>、Ce<sup>3+</sup>、Pr<sup>3+</sup>、及びEu<sup>3+</sup>ドーピング型のシリカガラスにおいて観察される。

40

【0016】

フォトダークニングは、光ファイバが産業用の材料加工において使用される際に、問題となる。フォトダークニングは、レーザー放射を(周波数倍増、周波数三倍増ロッドレーザー、ディスクレーザー、及びファイバレーザーなどの)レーザーから被加工物に供給するべく使用されるファイバ内における伝播を劣化させ得る。又、これは、ファイバレーザー内において生成可能である又は光学増幅器内において増幅可能である光学パワーの量を、大幅に制限し得る。

【0017】

50

ガラス内のフォトダークニングを低減する従来の方法は、所謂「ウェットシリカ」と呼ばれるヒドロキシル基(OH)の高い含有量を有するシリカを使用するものである。これは、重水素によって充填可能であり、且つ、紫外(UV)光によって照射可能である。但し、OHは、光ファイバの背景損失を増大させることになるため、これらの方法は、ファイバレーザーには、あまり適してはいない。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0018】

ピークパワーを広い範囲の繰り返し周波数にわたって維持すると共に、非線形効果を制御することが可能なパルスレーザーに対するニーズが存在する。

10

【0019】

ポンプ損傷に対する耐性を有するファイバレーザーのニーズが存在する。

【0020】

ジャイアントパルス形成に起因した破滅的な損傷に対する耐性を有するファイバレーザーのニーズが存在する。

【0021】

耐フォトダークニング型光ファイバに対するニーズが存在する。フォトダークニングに対する耐性を有するファイバレーザー及び増幅器に対する関連ニーズが存在する。フォトダークニングとは、一時的であるか又は永久的であるかとは無関係に、光によって誘発されたガラスの透過率の減少を意味している。

20

【課題を解決するための手段】

【0022】

本発明の非限定的な実施例によれば、光放射を提供する装置が提供され、この装置は、シーディング放射を提供するシードレーザー、シーディング放射を増幅する少なくとも1つの増幅器、及び反射器を有し、この場合に、シードレーザーは、ファブリペロー半導体レーザーであり、シードレーザーは、反射器を介して増幅器に接続され、反射器は、シードレーザーによって放射されたシーディング放射のある比率をシードレーザー内に反射するべく構成され、且つ、増幅器は、屈折率 $n_1$ を具備したコアと、屈折率 $n_2$ を具備したペDESTALと、を有する光ファイバを有し、且つ、この場合に、光ファイバは、ペDESTALを取り囲む屈折率 $n_3$ を具備したガラスから製造された第1クラディングを含み、この場合に、 $n_1$ は $n_2$ より大きく、 $n_2$ は $n_3$ より大きい。

30

【0023】

驚いたことに、このような反射器の使用法は、誘導ブリルアン散乱の結果として生じると考えられるジャイアントパルスの発生を効果的に除去することが判明した。

【0024】

ペDESTALの包含は、第1クラディングに対する信号パワーの交差結合を低減するため、有利である。これは、クラディングポンピング型ファイバレーザー及び増幅器におけるポンプダイオード障害を劇的に低減することが判明した。

【0025】

本発明の利点は、光ファイバが、高強度の光放射を伝播させる能力を有するという点にある。コアが低開口数を具備する場合には、ファイバは、所謂ラージモードエリアファイバとして構成可能であり、これは、高強度との組み合わせにおいて、ファイバレーザー及び増幅器の出力パワー及び/又は製品寿命の増大を許容する。ファイバレーザー及び増幅器の設計における更なる利点は、光ファイバが、製品寿命にわたってその透過率品質を維持するため、必要とされるポンプダイオードが相対的に少ないという点にある。

40

【0026】

反射器は、分散型反射器であってよい。

【0027】

シードレーザーは、光学的有効走行時間によって特徴付け可能である。反射器は、帯域幅及び帯域幅にわたる往復反射時間遅延変動によって特徴付け可能である。往復反射時間

50

遅延変動は、光学的有効走行時間を上回るものであってよい。

【0028】

シードレーザー内に反射によって戻されるシードレーザーによって放射されたシーディング放射の比率は、20%未満であってよい。比率は、1%~10%であってよい。

【0029】

反射器は、シードレーザーから5m未満の距離に配置可能である。距離は、2m未満であってよい。距離は、0.5m~1.5mであってよい。

【0030】

反射器は、シードレーザーから5mm~50cmの距離に配置可能である。

【0031】

装置から放射されるピークパワーは、1kWを超過し得る。

【0032】

コアは、シリカ、0.1~4モルパーセントの範囲の濃度のアルミナ、2~20モルパーセントの範囲の濃度の燐酸塩を含むことが可能であり、且つ、ペDESTALは、シリカ、燐酸塩、及び酸化ゲルマニウムを含むことができる。

【0033】

光ファイバは、コア及びペDESTALの少なくとも1つのものの内部に配置された少なくとも1つの希土類ドーパントによってドーピング可能である。希土類ドーパントは、2000~60000ppmの範囲の濃度を有するイッテルビウムであってよい。イッテルビウムの濃度は、約15000~50000ppmであってよい。イッテルビウムの濃度は、約20000~45000ppmであってよい。

【0034】

コアは、12~17モルパーセントの濃度の燐酸塩を含むことが可能である。コア内の燐酸塩の濃度は、約15モルパーセントであってよい。

【0035】

コアは、約0.20~1モルパーセントの濃度のアルミナを含むことが可能である。アルミナの濃度は、約0.3~0.8モルパーセントであってよい。

【0036】

光ファイバは、信号波長においてマルチモード導波路であってよい。光ファイバは、大きな長さにわたって、大きな歪を伴うことなしに、シングルモード光を伝播させるべく構成し得る。

【0037】

光ファイバは、シングルモード導波路であってよい。光ファイバは、コア内に複屈折性を誘発する少なくとも1つのストレス生成領域を有することができる。

【0038】

光ファイバは、0.15未満の開口数を具備した導波路を有することができる。

【0039】

光ファイバは、0.15未満の開口数を具備した導波路を有する耐フォトダークニング型光ファイバであってよい。コアは、シリカ、約0.3~0.8モルパーセントの濃度のアルミナ、実質的に15モルパーセントの濃度の燐酸塩、及び実質的に20000~45000ppmの濃度のイッテルビウムを有することができる。ペDESTALは、シリカ、燐酸塩、及び酸化ゲルマニウムを有することができる。

【0040】

導波路は、信号波長においてマルチモード導波路あってよく、且つ、この場合に、導波路は、大きな長さにわたって、大きな歪を伴うことなしに、シングルモード光を伝播させるべく構成される。導波路は、シングルモード導波路であってよい。

【0041】

反射器は、ファイバブラッグ格子であってよい。ファイバブラッグ格子は、チャープされ得る。

【0042】

10

20

30

40

50

帯域幅は、1 nmを上回るものであってよい。

【0043】

往復反射時間遅延変動は、約50 ps ~ 1000 psであってよい。往復反射時間遅延変動は、100 ps ~ 600 psであってよい。

【0044】

光学的有効走行時間は、10 ps ~ 50 psであってよい。光学的有効走行時間は、25 ps ~ 40 psであってよい。

【0045】

装置は、レーザー供給ファイバ及び加工ヘッドを包含可能であり、装置は、材料を加工するレーザーの形態であってよい。

10

【0046】

装置は、パルス繰り返し周波数のレンジにわたって材料を加工するべく十分な平均パワー及びピークパワーを光放射が具備するように、シードレーザー及び増幅器を制御するべく構成されたコントローラを包含可能である。

【0047】

装置は、コントローラを包含可能であり、この場合に、光放射は、パルス幅を具備したパルスによって特徴付けられ、且つ、コントローラは、パルス繰り返し周波数の変化に伴ってパルス幅を変化させる。

【0048】

本発明は、シードレーザー、少なくとも1つの増幅器、及び反射器を有する光放射を提供する装置を有することが可能であり、この場合に、シードレーザーは、反射器を介して増幅器に接続され、増幅器は、ペDESTALを具備した光ファイバを有し、シードレーザーは、光学的有効走行時間によって特徴付けられたレーザーダイオードを有し、反射器は、シードレーザーによって放射されたシーディング放射の中のある比率をシードレーザー内に反射するべく構成され、反射器は、帯域幅及び帯域幅にわたる往復反射時間遅延変動によって特徴付けられ、且つ、往復反射時間遅延変動は、光学的有効走行時間を上回る。

20

【0049】

本発明は、マーキングの方法を含み、この方法は、シードレーザー、少なくとも1つの増幅器、及び反射器を有する光放射を提供するマーキングレーザー内に反射器を提供する段階を含み、この場合に、シードレーザーは、反射器を介して増幅器に接続され、増幅器は、クラディングポンピングされる光ファイバを有し、シードレーザーは、光学的有効走行時間によって特徴付けられたレーザーダイオードを有し、反射器は、シードレーザーによって放射されたシーディング放射の中のある比率をシードレーザー内に反射するべく構成され、反射器は、帯域幅及び帯域幅にわたる往復時間遅延変動によって特徴付けられ、且つ、往復時間遅延変動は、光学的有効走行時間を上回る。

30

【0050】

ペDESTAL内の燐酸塩及び酸化ゲルマニウムの濃度は、所望の開口数を実現するべく選択される。酸化ゲルマニウムの包含は、光ファイバ製造プロセスにおいて、ペDESTALの仮想温度を増大させ、且つ、この結果、真円度とペDESTALに対するコアの同軸性の両方と、従って、第1クラディングに対するコアの同軸性の保持を支援するという利点を具備する。コアの同軸性は、低損失融着接続の生成の際に重要である。

40

【0051】

好ましくは、コア内には、実質的にゼロのトリウムドーパントが存在する。好ましくは、その他の微量の希土類ドーパントも、回避されることを要する。トリウムドーパントを含むファイバは、フォトダークニングの影響を特に受け易いことが判明しているため、トリウムドーパントを除去することの重要性は、ファイバレーザー及び増幅器の設計において重要である。従って、わずかな少ない量のトリウムを具備した希土類ドーパントを使用することが重要である。トリウム濃度は、約10 ppm未満、好ましくは、1 ppm未満であることを要する。

【0052】

50

光ファイバは、コア内に複屈折性を誘発する少なくとも1つのストレス生成領域を有することができる。

【0053】

耐フォトダークニング型光ファイバは、0.15未満の開口数を具備した導波路を有することが可能であり、この場合に、導波路は、屈折率 $n_1$ を具備したコアと、屈折率 $n_2$ を具備したペDESTALと、を有し、且つ、この場合に、ファイバは、ペDESTALを取り囲む屈折率 $n_3$ を具備した第1クラディングを含み、この場合に、 $n_1$ は $n_2$ より大きく、 $n_2$ は $n_3$ より大きい。コアは、シリカ、約0.3~0.8モルパーセントの濃度のアルミナ、実質的に15モルパーセントの濃度の燐酸塩、実質的に20000~45000 ppmの範囲の濃度のイッテルビウムを有する。ペDESTALは、シリカ、燐酸塩、及び酸化ゲルマニウムを有することができる。好ましくは、コアは、実質的にゼロのツリウムドーパントを有する。

10

【0054】

光ファイバは、少なくとも1つのポンプエネルギーの供給源を有するクラディングポンピング型増幅光学装置の形の装置内において、使用可能である。この装置は、低開口数のコアから散乱又は漏洩する信号光が、ペDESTALによって優先的に捕獲及び導波され、この結果、ポンプ内に返送されないため、特に有利である。従って、この装置は、クラディングポンピング型レーザーの主要な障害メカニズムの1つ、即ち、望ましくない信号光によって生じるポンプダイオードの破滅的な障害、を除去する。

【0055】

20

光ファイバは、増幅器、レーザー、主発振器パワーアンプ、Qスイッチレーザー、或いは、少なくとも1つのポンプエネルギー供給源を有する超高速レーザーの形の装置内において使用可能である。

【0056】

本発明は、少なくとも1つのポンプエネルギー供給源、光ファイバ、レーザー供給ファイバ、及び加工ヘッドを有する材料加工用のレーザーの形の装置であってよい。

【0057】

本発明は、マーキングの方法であってよく、この方法は、マーキングレーザー内に反射器を提供する段階を含む。

【0058】

30

本発明は、前項までの請求項の中のいずれか一項記載の装置を使用して加工された際の材料であってよい。材料は、半導体パッケージ(プラスチック又はセラミック)、携帯電話機上のキーパッド、iPOD、コンピュータ、コンポーネント、パッケージ、又は商用又は産業用製品であってよい。

【0059】

本発明の別の態様は、シードレーザー及び反射器を、面発光LED(SLED)によって置換するというものである。その使用によってSBSの発現が劇的に低減されるように、SLEDを増幅し得る。装置は、好ましくは、前述の光ファイバを有する。

【図面の簡単な説明】

【0060】

40

【図1】本発明による装置を示す。

【図2】光ファイバの屈折率プロファイルを示す。

【図3】コア内に複屈折性を誘発するストレス生成領域を含む光ファイバを示す。

【図4】クラディングポンピング型増幅光学装置を示す。

【図5】材料加工用のレーザーの形態における装置を示す。

【図6】4つの連続波ファイバレーザーにおけるフォトダークニングの効果を示す。

【図7】アルミナドーピング型シリカ内におけるフォトダークニングの効果を示す。

【図8】1ファイバ内における加速エージング試験の結果を示す。

【図9】他のファイバ内における加速エージング試験の結果を示す。

【図10】さらに他のファイバ内における加速エージング試験の結果を示す。

50

【図11】0.6mJのパルスエネルギー及び35nsのパルス幅を具備した20kHzのパルスを有する12Wの平均パワーを放射するMOPA内におけるフォトダークニング効果の除去を示す。

【図12】10kHzにおいて変調されたファイバレーザー内におけるフォトダークニング効果の除去を示す。

【図13】好適な実施例の屈折率プロファイルを示す。

【図14】楕円形のペDESTALを具備した光ファイバを示す。

【図15】200Wの連続波ファイバレーザーにおける出力パワーの計測値を示す。

【図16】200Wの連続波ファイバレーザーにおける出力パワーの計測値を示す。

【図17】MOPAを示す。

10

【図18】シードが面発光LED(SLED)であるMOPAを示す。

【図19】反射器を含むMOPAを示す。

【図20】正常動作におけるパルス形状を示す。

【図21】追加のスパイクを含むパルス形状を示す。

【図22】ジャイアントパルスの一例を示す。

【図23】レーザーダイオードからの代表的なスペクトルを示す。

【図24】定位置に反射器を有するレーザーダイオードのスペクトルを示す。

【図25】反射器として使用されたファイブラッグ格子の設計を示す。

【図26】ファイブラッグ格子の計測反射率を示す。

【図27】異なる反復レートにおける出力パルスを示す。

20

【図28】シードレーザーによって放射された対応するパルスを示す。

【図29】図27に示された個々のパルスを重畳して示す。

【図30】図28に示された個々のパルスを重畳して示す。

【図31】反復周波数に伴うピークパワー及びパルスエネルギーの変動を示す。

【図32】ポンプパワーの増大に伴うMOPAからの出力パワーを示す。

【図33】図32に示されたパルスの光学スペクトルを示す。

【図34】出力パルスの形状に対する、パルス繰り返し周波数及びパルス幅の変化による効果を示す。

【図35】出力パルスの形状に対する、パルス繰り返し周波数及びパルス幅の変化による効果を示す。

30

【図36】出力パルスの形状に対する、パルス繰り返し周波数及びパルス幅の変化による効果を示す。

【図37】出力パルスの形状に対する、パルス繰り返し周波数及びパルス幅の変化による効果を示す。

【図38】反射器及びペDESTALを有する装置を示す。

【発明を実施するための形態】

【0061】

以下、添付の図面を参照し、本発明の実施例について説明するが、これは、一例に過ぎない。

【0062】

40

図38を参照すれば、光放射381を提供する装置380が提供され、この装置は、シーディング放射387を提供するシードレーザー382と、シーディング放射387を増幅する少なくとも1つの増幅器383と、反射器384と、を有し、この場合に、シードレーザー382は、ファブリペロー半導体レーザーであり、シードレーザー382は、反射器384を介して増幅器383に接続され、増幅器383は、(図1との関係において示されているように)ガラスから製造されたペDESTAL4を有する光ファイバ1を有する。反射器384は、シードレーザー382によって放射されたシーディング放射387のある比率388をシードレーザー382内に反射して戻すべく構成されている。

【0063】

ペDESTAL4は、光ファイバ1から漏洩する光放射381による損傷から装置380を

50

保護している。

【0064】

反射器384は、損傷から装置380を保護している。反射器384は、シードレーザー382が、1個のシングル縦モード(又は、いくつかの縦モード)においてシーディング放射387を放射することを妨げ、これにより、誘導ブリルアン散乱(SBS)の開始を抑圧していると考えられる。

【0065】

好ましくは、反射器384は、分散型反射器である。

【0066】

好ましくは、シードレーザー382は、光学的有効走行時間386によって特徴付けられ、反射器384は、帯域幅3810及び帯域幅3810にわたる往復反射時間遅延変動389によって特徴付けられ、且つ、往復反射時間遅延変動389は、光学的有効走行時間386を上回る。

10

【0067】

比率388は、20%未満であってよい。この比率は、好ましくは、1%~10%である。

【0068】

反射器384は、シードレーザー382から距離3811に配置される。1mの距離は、光ファイバにおける約10nsの往復遅延に対応する。光ファイバ内における誘導ブリルアン散乱のビルドアップ時間は、材料組成に応じて、約20ns~40nsである。フィードバックがシードレーザー382からの放射に影響を与えるための時間を有するように、反射器384を配置することが重要である。距離3811は、5m未満であることを要する。距離3811は、理想的には、2m未満であることを要する。この距離は、好ましくは、0.5m~1.5mである。或いは、この代わりに、反射器384は、シードレーザー382と共にパッケージングすることも可能であり、且つ、距離3811は、5mm~50cmであってよい。

20

【0069】

本発明は、スイッチオンから最初の200nsにおいて1kWを上回るピークパワーを有するパルスファイバレーザーとして構成された装置380において、最大の有用性を具備する。前述の距離3811は、装置380が1kWを上回るパワーを放射している際に、反射器384からのフィードバックが発生することを保証するべく選択可能である。

30

【0070】

光学的有効走行時間386とは、光がシードレーザー382全体を前方方向に伝播するのに要する時間を意味している。

【0071】

図1は、導波路2を含む光ファイバ1を示している。導波路2は、屈折率 $n_1$ を具備したコア3と、屈折率 $n_2$ を具備したペDESTAL4と、ガラスから製造された屈折率 $n_3$ を具備する第1クラディング5と、を有する。好ましくは、 $n_1 > n_2 > n_3$ である。光ファイバ1は、好ましくは、 $n_3$ 未満の屈折率を具備したコーティングによって被覆される。この結果、ファイバ1は、ポンプ放射を少なくとも第1クラディング5内に結合することにより、クラディングポンピング可能である。コーティングは、好ましくは、ポリマーである。図1に示されているものなどのペDESTALファイバを増幅器内において使用した際には、クラディングポンピング型ファイバレーザーは、ポンプダイオードを損傷する光放射に対する耐性をあまり有していないことが判明した。好ましくは、光ファイバ1は、サイドポンピングされる。

40

【0072】

光ファイバ1は、好ましくは、フォトダークニング耐性を有する光ファイバである。「耐性」により、本発明者らは、動作の際の光ファイバ1の減衰の増大が10%を上回らないことを意味している。好ましくは、減衰の増大は、2,000時間において5%を上回

50

らないことを要する。好ましくは、増大は、2,000時間内において1%未満であることを要する。フォトダークニングに関する計測データについては、後程詳述する。

【0073】

光ファイバ1は、好ましくは、0.15未満の開口数を具備する。

【0074】

以下においては、シリカ、燐酸塩、アルミナ、及び酸化ゲルマニウムなどの材料を頻繁に参照している。シリカとは、純粋なシリカ、ドーピングされたシリカ、並びに、高度にドーピングされたシリカガラスを意味し、これらのガラスは、しばしば、シリケート又はシリシクガラスと呼ばれる。燐酸塩とは、五酸化燐( $P_2O_5$ )などの燐の酸化物を意味している。アルミナとは、 $Al_2O_3$ などのアルミニウム(aluminum)の酸化物を意味している(欧州においては、「アルミニウム(aluminium)」と呼ばれる)。酸化ゲルマニウムとは、ゲルマニウムの酸化物、特に $GeO_2$ を意味している。イッテルビウムとは、酸化物としてガラス内に含まれたイッテルビウムを意味しており、且つ、ppmを単位とする濃度は、イッテルビウムイオン、特に $Yb^{3+}$ の濃度である。同様に、(トリウム、エルビウムなどの)その他の希土類金属と称することにより、酸化物としてガラス内に含まれた希土類金属を意味しており、且つ、ppmを単位とする濃度は、希土類金属のイオン濃度である。

10

【0075】

図2は、ファイバ1の屈折率プロファイル20を示している。コア3、ペDESTAL4、及び第1クラディング5の屈折率は、それぞれ、 $n_1$ 、 $n_2$ 、及び $n_3$ である。 $n_1$ が $n_2$ より大きく、且つ、 $n_2$ が $n_3$ より大きいことが好ましい。

20

【0076】

好適な実施例は、約0.3~0.8モルパーセントの濃度のアルミナと、実質的に15モルパーセントの濃度の燐酸塩と、を有するシリカガラスを有するコア3を具備する。トリウムドーパントは実質的にゼロであることが好ましい。ペDESTAL4は、シリカ、燐酸塩、及び酸化ゲルマニウムを有することが好ましい。第1クラディング5は、純粋なシリカ、フッ素ドーピングされたシリカ、又は光ファイバを製造する際に使用されるその他のクラディング材料(ポリマーを含む)であってよい。第1クラディング5がガラスである場合には、ファイバ1は、好ましくは、ポンプ光を増幅器及びレーザー内において導波するべく、第1クラディング5の屈折率を下回る屈折率を具備し得るポリマーによってコーティングされる。ファイバレーザー及び増幅器内の利得媒質としてのアプリケーションの場合には、コア3及びペDESTAL4の少なくとも1つのものは、希土類ドーパントによってドーピングされる。希土類ドーパントは、その濃度が、好ましくは、実質的に20000~45000ppmの範囲にあるイッテルビウムであってよい。

30

【0077】

耐フォトダークニング型ファイバを使用する利点は、光ファイバ1が、高ポンピング及び反転状態、並びに、高強度下において光放射を伝播させる能力を有するという点にある。低開口数は、所謂ラージモードエリアファイバとなるように、ファイバ1を構成し得ることを意味しており、これにより、高ポンピング及び反転状態との組み合わせにおいて、ファイバレーザー及び増幅器の出力パワー及び/又は製品寿命を増大可能である。大きなモードエリアファイバの設計は、米国特許第6,614,975号に記述されている。ファイバレーザー及び増幅器の設計における更なる利点は、光ファイバがその透過率品質を製品寿命にわたって維持するため、必要とされるポンプダイオードが相対的に少ないという点にある。

40

【0078】

前述の図面は、好適な実施例を表しているが、コア3は、0.1~4モルパーセントの範囲の濃度のアルミナ及び2~20モルパーセントの範囲の濃度の燐酸塩と共に、シリカを有することができる。アルミナドーピングされたコアは、酸化ゲルマニウム燐ドーピングされたペDESTALとの組み合わせにおいて、従来技術と比較し、改善された再現性を有する低開口数ファイバの製造を可能にする。0.06~0.1、又は、好ましくは、約0

50

． 08 という小さな開口数を容易に実現可能である。

【 0079 】

ペDESTAL 4 は、シリカ、燐酸塩、及び酸化ゲルマニウムを有することができる。燐酸塩及び酸化ゲルマニウムの濃度は、所望の開口数を実現するべく選択される。酸化ゲルマニウムの包含は、光ファイバ製造プロセスにおいて、ペDESTAL 4 の仮想温度 ( f i c t i v e t e m p e r a t u r e ) を増大させ、且つ、これにより、真円度及びペDESTAL 4 に対するコア 3 の同軸性の両方と、従って、第 1 クラディング 5 に対するコア 3 の同軸性の保持を支援するという利点を具備する。コアの同軸性は、低損失融着接続の生成において重要である。

【 0080 】

好ましくは、コア 3 内には、実質的にゼロのトリウムドーパントが存在する。トリウムドーパントを除去することの重要性は、トリウムドーパントを含むファイバは、特にフォトダウニングの影響を受け易いことが判明していることから、ファイバレーザ及び増幅器の設計において重要である。従って、わずかな少ない量のトリウムを具備した希土類ドーパントを使用することが重要である。トリウムの濃度は、約 10 ppm 未満、好ましくは、1 ppm 未満であることを要する。

【 0081 】

光ファイバ 1 は、コア 3 及びペDESTAL 4 の少なくとも 1 つのものの内部に配置された少なくとも 1 つの希土類ドーパントによってドーピング可能である。希土類ドーパントは、2000 ~ 60000 ppm の範囲の濃度を具備したイッテルビウムであってよい。イッテルビウムの濃度は、約 15000 ~ 50000 ppm であってよい。イッテルビウムの濃度は、好ましくは、約 20000 ~ 45000 ppm である。

【 0082 】

コア 3 内の燐酸塩の濃度は、約 12 ~ 17 モルパーセントであってよい。コア 3 内の燐酸塩の濃度は、好ましくは、約 15 モルパーセントである。

【 0083 】

アルミナの濃度は、約 0.20 ~ 1 モルパーセントであってよい。アルミナの濃度は、好ましくは、約 0.3 ~ 0.8 モルパーセントである。

【 0084 】

光ファイバ 1 は、化学気相蒸着法及び溶液ドーピング法を使用して製造可能である。技法については、米国特許第 4,787,927 号、第 4,815,079 号、第 4,826,288 号、第 5,047,076 号、及び第 5,151,117 号に記述されている。

【 0085 】

導波路 2 は、信号波長においてマルチモード導波路であってよい。導波路 2 は、大きな長さにわたって、大きな歪及び / 又はモード結合を伴うことなしに、シングルモード光を伝播させるべく構成し得る。このような設計は、高パワーファイバレーザ及び増幅器の設計において、特に、分光法、産業用の材料加工、レーザ手術、及び航空宇宙アプリケーションにおいて、重要である。コア設計、シングルモード光を伝播させる技法、並びに、望ましくない高次モードを ( 少なくとも部分的に ) 除去するための曲げ損失の使用法の例については、米国特許第 5,818,630 号、第 6,496,301 号、第 6,614,975 号、及び第 6,954,575 号に記述されている。

【 0086 】

導波路 2 は、シングルモード導波路であってよい。

【 0087 】

図 3 は、コア 3 内に複屈折性を誘発するストレス生成領域 31 を含む光ファイバ 30 を示している。コア 3 は、円形又は楕円形であってよい。或いは、この代わりに、又はこれに加えて、複屈折性は、ペDESTAL 4 及びコア 3 の少なくとも 1 つのものを楕円形に製造することによって誘発させることも可能である。図 14 は、複屈折性を誘発する楕円形のペDESTAL 4 を具備した光ファイバ 140 を示している。又、光ファイバ 140 は、ペデ

10

20

30

40

50

スタル4のものよりも高い粘度を具備するべく設計された内部クラディング141をも含む。これは、例えば、その屈折率を低下させるべく、ペDESTAL4内に硼素ドーパントを包含することによって実現可能である。このような複屈折ファイバを製造する技法については、米国特許第4,274,854号及び第4,426,129号に記述されている。このようなファイバにおいては、楕円形ジャケット内にペDESTALを整形することができるように、ペDESTAL内の酸化ゲルマニウムのドーパント濃度を低減又は除去することが有利であることに留意されたい。或いは、この代わりに、又はこれに加えて、前述の特許番号によって開示されているように、楕円形ジャケットを形成するべく、硼素の酸化物によってドーピングされた追加のクラディング(図示されてはいない)をファイバ1に包含することも可能である。又、光ファイバ30及び140は、米国特許第6,496,302号及び同時係属中の本明細書と同一の譲受人に譲渡された米国特許出願第10/528,895号に記述された、シングルモード又はマルチモードであり得る単一偏光光ファイバであってもよい。

#### 【0088】

図4は、ポンプ44と、光ファイバ41と、を有するクラディングポンピング型増幅光学装置40の形の装置を示している。光ファイバ41は、光ファイバ1、30、又は140であってよい。クラディングポンピング型光学装置40は、共通コーティング46内に、光ファイバ41と、ポンプファイバ43と、を有する複合ファイバ42を利用している。複合ファイバ42については、米国特許第6,826,335号に記述されている。米国特許第4,815,079号、第5,854,865号、第5,864,644号、及び第6,731,837号に記述されたものなどのその他のクラディングポンピング型ファイバ及び構成も可能である。低開口数のコア3から散乱又は漏洩する信号光は、ペDESTAL4により、優先的に捕獲及び導波され、この結果、ポンプ44に返送されないため、本発明は、特に有利である。従って、本装置は、クラディングポンピング型レーザーの主要な障害メカニズムの1つのもを、即ち、望ましくない信号光によって生じるポンプダイオードの破滅的な障害を除去する。クラディングポンピング型光学装置40は、増幅器、レーザー、主発振器パワーアンプ、Qスイッチレーザー、或いは、少なくとも1つのポンプエネルギーの供給源を有する超高速レーザーであってよい。超高速レーザーとは、例えば、1nm未満の、更に好ましくは、10ps未満のパルス幅を具備したパルスを放射する、モードロックされたレーザー及び/又は主発振器パワーアンプの形のレーザーを含むレーザーを意味している。超高速レーザーの設計及びアプリケーションについては、米国特許第6,885,683号、第6,275,512号、第5,627,848号、第5,696,782号に開示されている。

#### 【0089】

図5は、材料加工用のレーザー50の形の装置を示している。レーザー50は、増幅光学装置40、レーザー供給ファイバ51、及び加工ヘッド52を有する。加工ヘッド52は、スキャナ、ガルバノメーター、又は合焦レンズであってよい。レーザー50は、金属、プラスチック、及びその他の材料のマーキング、微細溶接、印刷、微細機械加工、及び切断に特に有用である。

#### 【0090】

図6は、それぞれが、イッテルビウム、アルミナ、酸化ゲルマニウム、及び硼素の酸化物によってドーピングされたコア3を有する、4つの連続波ファイバレーザー内におけるフォトダークニングの効果を示している。この図は、4つの異なるファイバレーザーにおける時間66に伴う出力パワー61の計測値を示している。これらのファイバレーザーのそれぞれのコア3は、標準的な市販品のイッテルビウムドーパントによってドーピングされた。ライン62は、高いトリウム含有量を具備した標準的な市販のイッテルビウムドーパントによってドーピングされた、ファイバレーザーからの計測値を示している。出力パワー61の迅速な減少が観察される。ライン63は、60Wの連続波出力パワーを出力するファイバレーザーから30において採取された計測値を示している。ファイバコア1は、標準的な市販のイッテルビウムによってドーピングされた。この場合にも、観察可能

10

20

30

40

50

な出力パワー61の迅速な減少が存在する。ライン64は、110Wの連続波出力パワーを出力するファイバレーザーから70において採取された計測値を示している。最後に、ライン65は、60Wの連続波出力パワーを出力するファイバレーザーから30において採取された計測値を示している。イッテルビウムドーパントは、高純度であり、百万分の1未満の規定の不純物レベルを有する。イッテルビウムドーパントは、高純度であり、百万分の1(1ppm)未満の規定の不純物レベルを有する。ライン63及び65を比較することにより、高純度イッテルビウムの使用は、同一レベルの出力パワー及び温度において計測された際のフォトダークニングの効果を低減している。ライン64をライン65と比較することにより、30から70への温度の上昇は、フォトダークニングの増大を引き起こしている。非常に低レベルのトリウム及びその他の不純物を有するYbドーパントを利用することによって実現されたフォトダークニングに対する耐性の大きな改善が、明らかに存在する。残りのフォトダークニング効果は、その他の屈折率制御コアドーパント、即ち、アルミナ、酸化ゲルマニウム、及び硼素の酸化物に起因すると考えられる。

10

## 【0091】

Kitabayashi他は、Proceedings of Optical Fiber Communications 2006 Conferenceにおいて発表された「Population inversion factor dependence of photodarkening of Yb-doped fibers and its suppression by highly aluminum doping」という名称の自身の論文において、Ydドーピングされたファイバ内のフォトダークニングは、アルミニウムドーピングを包含することによって低減可能ではあるが、完全には除去することができないことを開示している。この内容は、本引用により、本明細書に包含される。

20

## 【0092】

驚いたことに、本発明者らは、ファイバ1のコア3から酸化ゲルマニウムを除去し、且つ、燐酸塩ドーパントを包含することにより、更なる改善を実現可能であることを発見した。図7は、アルミナドーピングされたコア1内に燐酸塩ドーパントを包含することによって得られた改善を示している。コア1は、酸化ゲルマニウム及び硼素ドーピングを含まない。コア1は、トリウム及びその他の希土類に起因した汚染を最小限に維持するべく、イッテルビウムの高純度の酸化物(1ppmよりも良好になるように規定された合計不純物含有量)によってドーピングされた。曲線67は、アルミナドーパントを有する結果を示しており、曲線68は、アルミナ及び燐酸塩ドーパントを有する結果を示している。Kitabayashi他の結果によれば、アルミナは、単独では、フォトダークニング効果を完全に抑圧することができないとされている。しかしながら、本発明者らは、アルミナに加えて燐酸塩ドーパント(codopant)を包含することにより、結果的に劇的な改善もたらされ、この結果、イッテルビウムドーピングされたファイバ内のフォトダークニング効果が劇的に低減されることを発見した。又、重要なことは、コア内におけるアルミナドーパントの使用は、燐酸塩ドーピングのみによるものよりも高い再現性を有する低開口数の導波路の製造をも可能にすることである。

30

40

## 【0093】

又、光ファイバのフォトダークニングは、加速エージング試験に晒された状態において、光ファイバの(対象である1ミクロン領域の周囲の)吸収の増大を監視することにより、特徴付けすることも可能である。エージングは、イッテルビウムドーピングされたコアをポンピングして可能な最大反転を実現することにより、加速される。図8~図10を参照して示された計測値は、976nmにおける約400mWのポンプ光によって長さが約0.1~1mのファイバをコアポンピングし、且つ、タングステンフィラメントからの白色光をコア内に結合することにより、得られた。次いで、スペクトル吸収をカットバック計測によって計測した。計測法は、L.L. Koponen他による「Photodarkening in ytterbium-doped silica fibers

50

「Proceedings of SPIE Volume 5990」という論文に発表された方法に準拠しており、この内容は、本引用により、本明細書に包含される。損失81対波長83の計測値を加速エージングの前及び後において採取した。図8は、そのコアが高純度のYb、酸化ゲルマニウム、及び硼素によってドーピングされたファイバレーザ内における加速エージングの前84及び後85における損失81の計測値を示している。図9は、市販の耐フォトダークニング型Ybドーピングファイバを使用した同一の計測値を示している。図10は、図1に示されたファイバ1を含むファイバレーザに関する同一の計測値を示している。図8～図10のそれぞれのものにおいて、約850～1050nmのイッテルビウムの吸収ピークが明らかである。この理由から、(図8及び図9の)曲線86及び87により、且つ、図10の曲線101により、減衰曲線84及び85を外挿した(曲線84及び85の間に識別可能な差が存在しないため)。フォトダークニングは、波長83の減少に伴って増大する損失81の増大により、図8において明らかである。対象の領域88は、1000nm～1100nmにおける損失81の増大を示す、図8及び図9のハッチングエリアによって示されている。図9に対応するファイバは、図8に対応するファイバよりも、格段に小さな損失の増大を明らかに示している。しかしながら、図10から明らかなように、強調表示されたエリア102によって明白に示されているように、この波長帯域には、明らかなフォトダークニングは存在していない。従って、本発明のこの態様によるファイバ設計は、フォトダークニングを除去している。

#### 【0094】

図11及び図12は、図10の加速エージング試験において使用されたものに類似したドーパントを有する図1のファイバを利用したファイバレーザからの出力パワー110対時間111を示している。それぞれの図中の上部計測ラインは、出力パワー110であり、下部ラインは、計測値が採取された周辺温度112である。図11に示された結果を得るべく使用されたファイバレーザは、0.6mJのパルスエネルギー及び35nsのパルス幅を具備した20kHzのパルスを有する12Wの平均パワーを放射する主発振器パワーアンプ(図示されてはいない)であった。図12に示された結果を得るべく使用されたファイバレーザは、ポンプ源として使用されたレーザーダイオードを10kHzにおいて且つ70%のデューティサイクルにおいて反復的にターンオン及びオフすることにより、10kHzにおいて変調された連続波レーザーであった。高ピークパワーのパルス主発振器パワーアンプ及び連続波レーザーの両方において、2～3ヶ月の連続運転にわたって、時間111に伴う出力パワー110の劣化が生じていないことを図11又は図12の両方において観察可能である。

#### 【0095】

図13は、本発明の好適な実施例における屈折率プロファイル130を示している。プロファイル130は、崩壊(collapse)におけるドーパント(特に、燐酸塩)の蒸発に起因したコア3内の中央の落ち込み130を含むという点において、図2の理想的なプロファイルとは異なっている。コア3とペDESTAL4の間の屈折率差131は、 $n_1 - n_2$ によって付与され、これは、約0.0032である。これは、約0.096の開口数に対応する。同様に、ペDESTAL4と第1クラディング5の間の屈折率差132は、約0.0097であり、これは、約0.17の開口数に対応する。コア3は、約0.70モルパーセントのドーパント濃度を有するアルミナと、約15モルパーセントのドーパント濃度を有する燐酸塩と、約25000ppmのドーパント濃度を有するイッテルビウムと、によってドーピングされた。イッテルビウムドーパントは、1ppm未満の不純物含有量を有するイッテルビウムの酸化物によって提供され、従って、コア3内には、実質的にトリウムドーパントが含まれていなかった。ペDESTAL4は、約0.0032という所望のペDESTAL4に対するコア3の屈折率131を提供するのに十分なレベルにおいて、燐及びゲルマニウムによってドーピングされた。ペDESTAL4内の燐酸塩は、堆積されるコア3により、プレフォームの崩壊の際に蒸発することにならないため、ペDESTALの屈折率差132は、高精度で製造可能であることに留意されたい。又、燐酸塩とは異なり、アルミナドーパントは、プレフォームの崩壊の際に蒸発の影響を相対的に受けなため、

コア屈折率差 131 も、同様に、高精度で製造可能である。従って、好ましい実施例は、高精度において、且つ、製造の際のコア 3 からのドーパントの大規模な蒸発を伴うことなく製造可能であるフォトダークニング問題に対する解決策を提供している。25000 ppm というイッテルビウムドーパント濃度は、約 20000 ppm ~ 40000 ppm において変化可能である。更に大きな値は、ファイバレーザー又は増幅器内におけるポンプ吸収の増大を許容する。これは、使用する活性ファイバの必要な長さを低減するという更なる利点をも具備する。5  $\mu\text{m}$  ~ 50  $\mu\text{m}$  の範囲の又は (非常に大きなパワーのレーザー及び増幅器に使用される場合の 100  $\mu\text{m}$  などの) これよりも大きな直径を有するコアを製造するべく、製造の際にプレフォームをオーバースリーピングすることにより、又は当産業において既知のその他の技法により、コア 3 の直径 133 を変更可能である。コア 3 は、シングルモード又はマルチモードであってよく、且つ、コア 3 及び / 又はペDESTAL 4 に伴うドーパント濃度を調節することにより、等価な開口数が約 0.06 ~ 0.15 の範囲、好ましくは、0.08 ~ 0.15 の範囲になるように、屈折率差 131 を変更可能である。ペDESTAL 4 の直径 134 は、コア 4 の直径 133 の約 1 ~ 5 倍の範囲、好ましくは、コア 4 の直径 133 の 1.5 ~ 4 倍のレンジ、更に好ましくは、コア 4 の直径 133 の約 2.0 ~ 4 倍であってよい。図 13 に示された設計は、本明細書に記述されたファイバ 1、30、41、又は 140 のコア 3 及びペDESTAL 4 の基礎として使用可能である。

10

**【0096】**

主発振器パワーアンプパルスレーザーの増幅の最終段内における (図 13 に示された) 中央の落ち込みを有する活性ファイバの使用は、低パワーの前置増幅器段によって後続された半導体シードレーザーを有する主発振器パワーアンプ構成において、非常に有益であることが判明した。

20

**【0097】**

中央の落ち込みの存在によって生成された非ガウスモードプロファイルは、フラットトップ屈折率におけるモードとの関係において、ファイバピグテールに対する乏しい整合性を有するため、これは意外であった。信号接続損失の増大は、増幅器内において使用されたポンプパワーと出力信号パワーの間の比率として定義される増幅器効率の低減を結果的にもたらすものと考えられた。逆に、活性ファイバコア内に落ち込みを導入することにより、増幅器効率の改善が得られた。所望のレーザー出力パワーに到達するべく必要とされるポンプダイオードの数が相対的に少なくなるため、高効率は、大きな利点を提供する。

30

**【0098】**

様々な活性ファイバの特徴判定において、300 mW の入力信号パワーを使用した。これは、半導体シードレーザーからの 5 ~ 10 mW の平均出力パワー及び前置増幅器段における ~ 25 dB の増幅を有する対象の主発振器パワーアンプ構成において、一般的なものである。

**【0099】**

フラットトップ屈折率プロファイルを有するファイバの計測された効率は、複数の横モードが活性ファイバ内において励起された際には、50 ~ 55 % であり (マルチモード効率)、更に低次のモードが励起された際には、25 ~ 35 % と低かった (略して、シングルモード効率と呼ばれる)。良好な出力ビーム品質を目標としているため、ファイバレーザーにおいては、後者のほうが関係している。

40

**【0100】**

この代わりに、中央の落ち込みを有するファイバは、65 ~ 70 % のマルチモード効率を、そして、50 ~ 55 % という高いシングルモード効率を示した。コアの中央に異なる落ち込みを有する様々なファイバについて、これらの結果を得た。屈折率低下の変化は、-0.003 ~ -0.010 の範囲であった。

**【0101】**

これは、媒質内において入手可能な最大エネルギーに対するレーザー媒質から抽出されたエネルギーの比率として定義される、様々な設計の様々なエネルギー抽出効率を考慮す

50

ることにより、説明可能である。エネルギー抽出効率は、活性媒質の入力飽和を増大させることにより、即ち、更に大きな信号入力パワーを使用するか又は活性媒質とファイバモードのオーバーラップを改善することにより、増大可能である。半導体シード+1つの前置増幅段から取得可能である相対的に低いパワーは、良好なオーバーラップを目標としないければならないことを意味している。

#### 【0102】

フラットトップのファイバにおいては、相対的に低次のモードがコアの中心の周りに集中し、これにより、コアエッジの近傍における大量のYbイオン内に保存されたエネルギーの効率的な使用が妨げられる。実際に、Ybドーパントプロファイルは、Ybイオンの高いモル屈折度に起因し、コアの屈折率プロファイルに略準拠していると仮定することが妥当である。

10

#### 【0103】

逆に、相対的に低次のモードプロファイルは、中央の落ち込みを有するファイバ内のYb分布プロファイルと整合している。ドーパントのすべてのセクションが効率的に入力信号によって使用され、この結果、相対的に良好な飽和の平均レベル及び良好な抽出効率を得られる。屈折率において-0.003という小さな低下が導入された際には、大きな利点が理論的に見出されるが、低下が更に増大した場合には、変化は、無視可能である。

#### 【0104】

更なる利益は、ファイバの製造における製造公差の緩和と（この理由は、落ち込みは、プレフォームの崩壊プロセスにおけるドーパントの蒸発に関係しており、これは、制御が困難であるためである）、中央の落ち込みが所与の出力エネルギーにおける基本のピーク強度を低下させ、これによって非線形効果が低減されるという点にある。

20

#### 【0105】

可能な欠点は、増幅器内におけるパルス整形の増大によって付与される。相対的に良好な抽出効率は、増幅器内における相対的に不良なパルス変形と、同一の合計パルスエネルギーにおけるパルスリーディング端部のピークパワーの増大を結果的にもたらす。これは、非線形効果及びパルス形状制御の両方にとって有害である。小さな落ち込み（約0.003の屈折率の変化）により、相対的に厳格な製造要件を代償として、効率と整形の間の最適なバランスが得られる。

#### 【0106】

図15は、連続波200Wレーザーにおける出力パワー110対時間111を示している。200Wレーザーは、その出力が200W光ファイバ増幅器によって増幅される200Wファイバレーザーを有する。200Wファイバ増幅器は、図13に示されたものに類似した屈折率プロファイルを有するファイバを使用した。コア3は、アルミナ、燐酸塩、及びイッテルビウムによってドーピングされた。出力パワー110は、70時間において、約2W（0.7%）だけ減少した。この小さな減少は、フォトダークニング以外の理由によって発生した可能性がある。対照的に、図16は、窪んだ内部クラッキングを有する従来の屈折率ステップ型ファイバを、200Wの光学増幅器内において使用した等価的な結果を示している。コアは、アルミナ、硼素、イッテルビウムによってドーピングされた。出力パワー110は、35時間において、約25W（10%）だけ劣化したことが観察される。コア内においてアルミナ及び燐酸塩ドーパントを使用することによって得られた改善が明らかに実証されている。

30

40

#### 【0107】

フォトダークニングが、mWから数百ワットのパワーレベルにおいて発生することを実証する実験結果を提示した。主要な要因は、ドーパントの組成と、実際的に可能な限り低減することを要するファイバ内における反転の量である。反転の低減は、光学増幅システムの全体を通じて、すべての段においてわずかな信号利得を低減することにより、実現可能である。フォトダークニングは、10dBを上回る光学利得において問題となり、特に、20dBを上回る光学利得において問題となる。

#### 【0108】

50

本明細書に記述された解決策は、1ワット未満から数千ワットのパワーレベルにおいて、連続波レーザー及び数十フェムト秒～数百ミリ秒のパルス幅を具備するパルスレーザーにおいて、シングルモード及びマルチモード出力の両方において、且つ、ランダム偏光された及び偏光された出力の両方において、適用可能であると考えられる。記述された内容は、イッテルビウムドーピングに合焦しているが、本発明者らは、これらの結果は、誘導ラマン散乱(SRS)に基づいたファイバレーザー及び増幅器、並びに、ネオジミウム、イッテルビウム、エルビウム、ネオジミウム、プラセオジミウム、ツリウム、サマリウム、ホルミウム及びジスプロシウム、イッテルビウムコドーピングされたエルビウム、或いは、イッテルビウムコドーピングされたネオジミウムを含むものにも適用可能であると考えられる。これらの解決策は、約1350nm未満の波長において動作するファイバレーザー及び増幅器にとって重要であり、特に、1100nm未満の波長において動作するファイバレーザー及び増幅器にとって重要である。又、これらの結果は、特にファイバレーザーからの出力が800nm未満の波長を具備する際には、(図5のファイバ51などの)ビーム供給ファイバの設計にも適用可能である。これは、例えば、非線形結晶、導波路、又はファイバ、或いは、チャープされた周期的に分極されたニオブ酸リチウムなどの材料を使用し、周波数倍増又は三倍増を通じて実現可能である。解決策は、高いヒドロキシル基(OH)含有量を有するシリカ、所謂「ウェットシリカ」の使用などの、フォトダークニングを低減するための従来の方法との関連において使用可能である。これは、重水素によって充填可能であり、且つ、紫外光によって照射可能である。

10

#### 【0109】

20

図17は、光源172、少なくとも1つの増幅器173、及びコントローラ174を有する光放射1713を提供する装置171を示している。光源172は、出力パルス1719を生成するべく増幅器173によって増幅される光学パルス175を放射する。出力パルス1719は、パルス繰り返し周波数176、パルス持続時間177、ピークパワー179、平均パワー178、及びパルスエネルギー1710によって特徴付けられている。パルスエネルギー1710は、パルス1719の下部のシェーディングエリアとして、図17に示されている。装置171は、増幅器173と光放射1713を材料1714に導波する任意選択の加工ヘッド1712の間に任意選択の光ファイバケーブル1711を具備する。コントローラ174は、装置171が材料1714を加工できるように、光源172及び増幅器173の少なくとも1つを制御する。図17においては、加工は、マーク1715として描かれている。光源172は、図38のシードレーザー382を有することができる。光源172は、図38の反射器384を有することができる。増幅器173は、図38の増幅器383を有することができる。

30

#### 【0110】

又、加工は、マーキング、印刷、切断、穿孔、溶接、微細溶接、蝟付け、アニーリング、並びに、その他の材料加工アプリケーションを包含することも可能である。又、加工は、(皮膚などの)組織の治療、歯科医術、及び外科などの生物学的プロセスを包含することも可能である。

#### 【0111】

加工ヘッド1712は、光放射1713をスキャンするスキャンヘッド又はガルバノメーターを有することができる。或いは、この代わりに、又はこれに加えて、加工ヘッド1712は、光放射1713をコリメート及び/又は合焦する少なくとも1つのレンズを有することも可能である。好ましくは、加工ヘッド1712は、材料1714から由来する後方反射による増幅器173の不安定化を防止するべく、ハイパワー光学アイソレータを包含可能である。

40

#### 【0112】

装置171を使用して加工される材料1714は、半導体パッケージ(プラスチック又はセラミック)、携帯電話機上のキーパッド、iPOD、コンピュータ、コンポーネント、パッケージ、又は商用又は産業用の製品などの物品であってよい。

#### 【0113】

50

前置増幅器、パワー増幅器、並びに、図17の装置内において使用可能である光学構成は、反射器196を除いて、米国特許第6,433,306号に記述されており、この内容は、本引用により、本明細書に包含される。この特許が記述しているように、装置171のピークパワー179の増大に伴い、非線形効果が出現し始める。誘導ブリルアン散乱(SBS)を回避するべく提案された解決策は、増幅段が相対的にSBSから免れるように、存在する多数のモードの数だけSBS閾値を増大させるべく、複数波長を具備したレーザーダイオードを光源2として使用するというものである。本発明者らは、この方法は、約1kW~5kW未満のピークパワー179において一般的に好適であることを見出した。しかしながら、以下において観察されるように、この解決策に基づいた主発振器パワーアンプ(MOPA)は、レーザーを損傷可能であるランダムパルシングの傾向を有する。この効果は、SBSに起因するものと考えられる。ファイバのモードエリアを増大させるなどの解決策は、SBS閾値を増大させるが、確実に約5kW超に増大させることは困難であることが証明された。米国特許第6,433,306号は、SBS閾値を増大させるための又はランダムパルシングを回避するための反射器196の使用法を開示又は提案してはしない。

10

## 【0114】

SBSによって生じる問題の一例として、12kWのピークパワーを放射する装置内において、50を超える数のモードを具備したレーザーダイオードを使用した。(1時間~数ヶ月などの)かなりの期間にわたって20kHzにおいて変調された際に、増幅器173を有する導波路に内部的な損傷を生成するランジェントパルスが、出力において観察された。この効果は、時折発生するライン幅のナローイング及びこの結果としてSBSの発生をもたらす半導体レーザー内のランダム効果に起因して発生すると考えられる。この効果は、恐らくはSBSに起因すると思われるが、これは証明されてはいない。しかしながら、ランジェントパルス損傷は、特に、これがまれにしか発生しないことから、定量化すること、そして、このような装置から除去することが、非常に困難であることが判明した。

20

## 【0115】

驚いたことに、本発明者らは、図18の装置180を使用し、この問題を解決することができた。半導体レーザーを、スーパーLEDダイオード(SLED)181、アイソレータ186、及び前置増幅器182によって置換した。前置増幅器182は、ポンプ189によってポンピングされている。前置増幅器182の出力は、光学アイソレータ186を介して増幅器183に結合され、次いで、これは、別の光学アイソレータ186を介してパワー増幅器1810に結合されている。増幅器183及びパワー増幅器1810は、ポンプ184及び1811によってそれぞれポンピングされている。ポンプ189、184、及び1811は、好ましくは、半導体レーザーである。

30

## 【0116】

半導体レーザーをSLED181によって置換することは、直観に反した方法である。これは、SLED181が、半導体レーザーよりも格段に小さなパワーを具備するためである。この結果、前置増幅器182は、飽和せず、且つ、増幅器183とパワー増幅器1810の利得を飽和させるASEをパルス1719の間に生成する。ASEは、ポンプ189が常にオンである場合に生成される。これは、ポンプ189が前置増幅器182をポンピングすることにより、反転及び後続のASEの生成をもたらすためである。パルスの間においてターンオフされ、且つ、SLED181から到来するパルスの前にターンオンされるようにポンプ189を変調することにより、ASEの効果を低減可能である。正確なタイミングは、前置増幅器182の設計と、特に、ポンプ189から入手可能であるパワーに依存しており、ポンプパワーが大きいほど、ポンプ189をターンオン状態に維持するべく必要とされる時間は少なくなる。或いは、この代わりに、又はこれに加えて、前置増幅器182とパワー増幅器1810の間に光学スイッチ1812を挿入することも可能である。好ましくは、光学スイッチ1812は、前置増幅器182と増幅器183の間に挿入される。或いは、この代わりに、又はこれに加えて、フィルタ(図示されていない

40

50

)を使用し、ASEをフィルタリングすることも可能であるが、これは、ポンプを変調するか又は光学スイッチ1812を使用するほどに効率的であるとは考えられない。光学スイッチ1812は、音響光学変調器、導波路スイッチ、ケラーセル、又はポッケルスセルであってよい。

【0117】

SLED181及びポンプ189、184、及び1811は、コントローラ25によって制御されており、このコントローラは、装着されている場合には、光学スイッチ1812をも制御することになる。これらの装置は、同期状態となると共に非線形及び損傷効果を低減するべく、制御されることになる。

【0118】

前置増幅器182、増幅器183、及びパワー増幅器1810は、コアポンピング又はクラディングポンピング可能である。好ましくは、前置増幅器182は、コアポンピング型の前置増幅器である。これは、コアポンピング型の前置増幅器は、相対的に短い装置であって、こちらのほうが効率的であるためである。好ましくは、増幅器183及びパワー増幅器1810は、クラディングポンピングされる。このような構成は、低コストで製造可能な効率的な装置を提供する。

【0119】

前置増幅器182、増幅器183、及びパワー増幅器1810内に含まれた光ファイバは、それぞれ、ソリッドコアファイバ又は所謂ホーリーファイバであってよい。これらは、好ましくは、イッテルビウム、エルビウム、ネオジミウム、ホルミウム、ツリウム、又はプラセオジミウムなどの希土類ドーパントによってドーピングされる。好ましくは、光ファイバは、フォトダークニングに対する耐性を有する。このようなファイバについては、図1～図16を参照して説明されている。

【0120】

好ましくは、SLED181は、10nmを上回る、好ましくは、20nm～40nm、又はこれを上回る帯域幅を具備する。帯域幅が大きいほど、SBS閾値も大きく、この結果、本発明の装置の信頼性が高くなる。

【0121】

その他の形態の(エッジ発光LEDなどの)LEDや(格子によってフィルタリングされたASE源などの)スーパーluminescentファイバ源などのその他の広帯域源を図17の光源172として使用し、SLED181を置換可能である。

【0122】

本発明者は、図19に示された装置を使用することにより、SBSイベントを防止可能であることを発見した。シードレーザー192は、好ましくは、シードレーザー382である。反射器196は、好ましくは、反射器384である。増幅器193は、好ましくは、増幅器383である。実験においては、装置190は、デポライザ191、アイソレータ186、ポンプ199によってポンピングされた前置増幅器192、及びポンプ194によってポンピングされたパワー増幅器193を有していた。コントローラ174は、光源172、並びに、ポンプ199及び194を制御した。

【0123】

シードレーザー192は、約1060nmの中心波長において約50～100個の縦モードを放射するシングル横モードファブリペロー半導体レーザーであった。反射器196は、約2nmの帯域幅を具備し、且つ、チャープされたファイバブラッグ格子であった。この反射率は、約4%であった。デポライザ191は、互いに45度において接続された2つの長さの偏光保持ファイバを有していた。デポライザ191の使用は、偏光変動によって発生する加工状態の変動を低減するべく、多くの材料加工アプリケーションにおいて好ましい(但し、すべてにおいてそうであるわけではない)。従って、シードレーザー192は、その放射の偏光を解消できるように十分な光学帯域幅を具備することが重要である。アイソレータ186は、増幅された自発放射がシードレーザー192内に反射して戻ることを防止するべく選択された市販の在庫品のアイソレータであった。前置増幅器

10

20

30

40

50

192及びパワー増幅器193は、イッテルビウムドーピングされたクラディングポンピング型ファイバ増幅器であった。ポンプ194、199は、1つに組み合わせられた多くのシングルエミッタ半導体レーザーダイオードを有していた。パワー増幅器193からの後方伝播光放射を監視するべく、タップカプラ197を提供した。タップカプラ197及び後方反射検出器198は、診断のために包含されたものであり、従って、最終的な装置の一部を形成する必要はない。

#### 【0124】

正常動作においては、シードレーザー192は、1kHz~500kHzの周波数において10ns~250nsのパルス175を提供するべくパルスングされる。25kHzにおいて、シードレーザーからのピークパワーは、約300mWであり、前置増幅器192からのピークパワーは、約100Wであり、且つ、パワー増幅器193からのピークパワーは、約10~15kWである。

10

#### 【0125】

反射器196を使用しない場合には、装置190は、破滅的な障害を被ることが判明した。障害メカニズムは、パワー増幅器193内のイッテルビウムドーピングされた短い長さ(最大で100mm)の光ファイバが自動的に破壊されることによって特徴付けられる。短い長さのファイバは、白色パウダーに変化する。別の障害メカニズムは、障害が発生するパワー増幅器の一端における融着接続である。これらの及びその他の障害は、製造及び試験の両方において発生可能であり、但し、十分に試験済みの製品の場合にも、数ヶ月の動作の後に、発生可能である。

20

#### 【0126】

図20は、正常な動作において後方反射検出器198によって計測された(パワー増幅器193の出力において計測された)前方伝播パルス1719の光学パワー201及び出力パワー202を示している。出力パワー201は、光学パワー202よりも格段に大きなパワーを具備するため、光学パワー201及び202は、異なるスケールでプロットされている。出力パワー202は、第1反射203及び第2反射204を有する。第1反射203は、タップ197とパワー増幅器193の間の接続(図示されてはいない)に由来する。第2反射204は、光ファイバケーブル1711の出力からの反射に由来する。図20に示されたパルス形状は、装置190から出現するパルスの大部分を代表するものである。

30

#### 【0127】

図21は、後方伝播パルスの2つの例211、212を示している。パルス211及び212は、以前と同様に光学パワー203及び204を有するが、更なるスパイク213及び214をも含む。これらの追加のスパイク213及び214は、まれにしか発生せず、且つ、発生及び大きさがランダムである。発生の頻度は、シードレーザー192の動作条件(温度、駆動電流、及びパルス形状など)を変更することによって変化させることができる。25kHzのパルス繰り返し周波数において、追加のスパイクは、約1計測/週末~30,000計測/5分のレートで観察された。更には、発生のレートは、異なる又は同一の製造者によって供給された異なるシードレーザー192を使用することによっても変化可能である。後方伝播方向においては、追加のスパイク213、214が観察されたが、前方伝播パルス形状201においては、その徴候を観察不能である。スパイク213及び214は、誘導ブリルアン散乱(SBS)の徴候であると考えられる。

40

#### 【0128】

図22は、前方方向において発生した正常な外観のパルス201上に重畳されたジャイアントパルスの一例221を示している。後方反射検出器198によって計測された関係するパルス222は、複雑な形状を有し、且つ、図20に示されたパルス202よりも数倍大きな規模を有する。実際に、光学パワー203及び204は、このスケールにおいては可視状態にはない。パルス222は、スパイク223、トレーリングエッジ224、及び落ち込み225を具備する。これらのデータは、後方スパイク213及び214が約100Hzにおいて発生するように、装置190をセットアップすることにより、得られた

50

。この反復周波数において、ジャイアントパルス 2 2 1 及び関連するパルス 2 2 2 は、約 1 回 / 5 分において発生することが観察された。換言すれば、ジャイアントパルス 2 2 1 は、後方伝播パルス 2 1 3 及び 2 1 4 よりも格段に頻度が低く、且つ、ランダムに発生する。

#### 【 0 1 2 9 】

落ち込み 2 2 5 は、この場合にも、S B S の徴候であると考えられる。後方伝播パルス 2 2 2 は、S B S を介して前方伝播パルスをポンピングするべく十分なエネルギーを具備する。これが、前方伝播方向においてジャイアントパルス 2 2 1 を結果的にもたらし、従って、これが、後方伝播パルス 2 2 2 からエネルギーを抽出することにより、結果的に落ち込み 2 2 5 をもたらししている。前述のパルスは、いずれも、パワー増幅器 1 9 3 内の活性利得媒質によって更に増幅される。

10

#### 【 0 1 3 0 】

図 2 2 を参照すれば、図示のジャイアントパルス 2 2 1 の振幅 2 2 6 は、( ジャイアントパルス 2 2 1 の重畳を伴うことのない ) パルス 2 0 1 の振幅 2 2 7 の約 2 倍である。振幅 2 2 6 は、ランダムに変化しており、且つ、パルス 2 0 1 の振幅 2 2 7 の数倍になる可能性がある。ジャイアントパルス 2 2 1 の振幅は、パワー増幅器 1 9 3 内のファイバの光学損傷閾値を超過するべく十分なものになる可能性があり、且つ、前述のランダムで予測不能な破滅的な障害を引き起こしたのは、恐らくは、S B S 伝播と関連する音波によって引き起こされた追加エネルギーと共に、これであろうと考えられる。但し、この説明は、理論に過ぎず、且つ、可能な障害メカニズムを説明するための本発明者らの試みは、本発明の範囲を制限することを意図したものではない。

20

#### 【 0 1 3 1 】

図 2 3 は、シードレーザー 1 9 2 からの代表的なスペクトル 2 3 0 を示している。中心波長 2 3 1 は、約 1 0 6 2 nm であり、且つ、全体帯域幅 2 3 2 は、約 6 nm である。スペクトル 2 3 0 は、約 0 . 0 4 5 nm だけ離隔した約 1 5 0 個のレーザーライン 2 3 3 を有する ( すべてが図示されてはいない ) 。スペクトル 2 3 0 は、パルス 1 7 1 9 の進展に伴って変化することが観察されたレーザーライン 2 3 3 の 3 つのファミリー 2 3 4 、 2 3 5 、 2 3 6 を有する。具体的には、第 1 ファミリー 2 3 4 は、パルス持続時間 1 7 7 の第 1 段階において優勢であり ( この間に、パルス 1 7 1 9 はチャープする ) 、且つ、この後に、中央ファミリー 2 3 5 が、より優勢となる。

30

#### 【 0 1 3 2 】

図 2 5 は、図 1 9 の装置において反射器 1 9 6 として使用されたファイバブラッグ格子 2 5 0 ( 図示されてはいない ) の設計を示している。図 2 5 は、波長 2 5 3 の関数としてプロットされた反射率 2 5 1 ( 左軸 ) 及び群遅延 2 5 2 ( 右軸 ) を示している。群遅延 2 5 2 は、ゼロからオフセットされている。群遅延 2 5 2 は、その計測位置に依存することから、オフセットは任意である。反射率曲線 2 5 1 及び群遅延曲線 2 5 2 の両方には、非常に小さな数値を伴う演算に起因した数学的な特性を有する雑音が存在する。格子 2 5 0 は、約 4 nm の帯域幅 2 5 5 によってチャープされる。その中心波長 2 5 4 は、図 2 4 の中央ファミリー内に略アライメントされた状態において、1 0 6 1 nm となるように設計された。図 2 6 は、格子 2 5 0 の計測反射率 2 6 1 を示している。中心波長 2 6 2 は、約 1 0 6 0 . 7 nm であり、且つ、帯域幅 2 6 3 は、約 2 nm である。帯域幅 2 6 3 は、格子 2 5 0 の製造におけるデチューニング効果に起因し、設計帯域幅 2 5 5 未満である。これらの効果については、ファイバ格子の製造分野における当業者には既知である。このような格子を設計及び製造する技法は、米国特許第 6 , 4 4 5 , 8 5 2 号及び第 6 , 0 7 2 , 9 2 6 号に記述されており、これらの特許の内容は、本引用により、本明細書に包含される。

40

#### 【 0 1 3 3 】

ここでは、格子 2 5 0 を追加する目的が、レーザーダイオード 2 からの放射を安定化させることではなかったことに留意されたい。放射波長をロックするべく、モードパーティション雑音を防止するべく、サイドモードの振幅を低減するべく ( 所謂サイドモード抑圧

50

)、及び/又はライン幅を狭めるべく、しばしば、狭帯域格子(帯域幅が、約0.5nm未満、並びに、しばしば、約0.1nm未満)がレーザーダイオードパッケージングに内蔵されている。このようなすべての目的は、SBSを促進すると共にジャイアントパルスの発生頻度を増大させることになる(と考えられる)相対的に安定した放射を結果的にもたらす傾向を有することになり、且つ、従って、装置190の破滅的な障害を回避することにはならないであろう。

#### 【0134】

図24は、定位置に格子250を有する状態において計測されたレーザーダイオード2のスペクトル240を示している。中心波長214は、約1061nmである。スペクトル240は、スペクトル230の帯域幅232未満である帯域幅242を具備する。帯域幅242は、約2nmであり、これは、格子250からの光学的フィードバックによって決定される。米国特許第6,433,306号の開示内容によれば、このような帯域幅のナローイングは、SBS性能を劣化させると予想されよう。驚いたことに、格子250の使用は、後方伝播ランダムパルス213及び214の両方、並びに、関連する更にランダムな前方伝播ジャイアントパルス221をも除去した。装置190は、無障害(failure free)であることが判明した。その他のレーザーダイオードを有し、且つ、デポライザを有する、及び有さない更なる実験は、装置190内に反射器196を包含することの有益な効果を確認した。格子250は、シングル横モードにおける少なくとも10%の光放射を具備し、且つ、1kW~40kWの範囲のピークパワーを具備するパルスレーザーにおいて、信頼性の高い動作を提供することを示した。SBSによる問題の発生を伴うことなしに、最大で100kW又はこれを上回る更に大きなピークパワーを実現可能であると考えられる。

#### 【0135】

格子250は、シードレーザー192(この場合には、レーザーダイオード)を不安定化させたと考えられる。即ち、パワー増幅器193内におけるSBS生成の条件が回避されるように、個別のレーザーライン233が拡張されるか、チャープされるか、又は変調されている。SBSの生成を回避するためのその他の方法は、光ファイバカプラを介して結合可能である部分反射ミラー又は表面、或いは、0.5nmを上回る、好ましくは、1nmを上回る、更に好ましくは、2nmを上回る帯域幅を具備した格子などの、広帯域反射器として反射器196を実装するというものである。格子250は、チャープされることが好ましいが、必ずしも、このようにする必要はない。チャープされた格子250は、シードレーザー192のスペクトルの広がりにより更に寄与すると考えられる波長に依存した有効外部空洞長を提供することになる。チャープされた格子250は、好ましくは、その偏光軸がシードレーザー192の偏光保持ファイバピグテールの偏光軸とアライメントされた又は角度を有する状態において、偏光保持光ファイバ内に刻み込まれる。格子250は、非偏光保持ファイバ内にも同様に刻み込み可能である。又、シードレーザー192のピグテールも、必ずしも偏光保持ファイバである必要はない。反射器196は、レーザー放射をシードレーザー192の前面又は後面(図示されてはいない)内に反射するべく配置可能である。又、反射器196は、誘電体コーティングを有することも可能である。反射器196の反射率は、約0.1%~10%であってよい。パルス213、214を伴わない結果が、34%という高い反射率において取得されたが、これらのレベルにおいては、パルス歪が観察された。好ましくは、反射率は、約2%~6%である。正確な数値は、使用する特定のレーザーダイオードに依存することになり、且つ、実験によって見出すことが可能である。反射器196の反射率は、シードレーザー192の前面において使用された反射率を上回ることを要すると考えられる。又、シードレーザー192の帯域幅は、好ましくは、反射器196の帯域幅に匹敵するか又はこれを下回ると考えられる。これは、前述の実験には当て嵌まらず、従って、シードレーザー192の動作条件(温度及びドライブ電流)をシードレーザー192の異なるバッチについてセットアップする必要があった。或いは、この代わりに、又はこれに加えて、シードレーザー192の全体帯域幅及び放射波長の製造公差を包含するように、格子反射器196の帯域幅を増大させること

10

20

30

40

50

も可能である。又、後方伝播パルスの完全な欠如は、高信頼性動作の確実な表れであるため、タップ197の提供が、このようなセットアップを可能にすることに留意されたい。

【0136】

格子250は、シードレーザー192から40cm~1mに配置された。性能に差は観察されなかった。従って、反射フィードバックによってシードレーザー192を安定化させるのに不十分な時間しか存在しないほどに距離が大きくない場合には、正確な位置は、重要ではないと考えられる。

【0137】

シードレーザー192及びポンプ199及び194は、コントローラ25によって制御されている。光学パルス1719のパルス形状を制御するためのコントローラの使用法、並びに、材料加工におけるアプリケーション及び装置の使用法に関する更なる情報については、後述する。

【0138】

前置増幅器192及びパワー増幅器193は、コアポンピング又はクラディングポンピング可能である。前置増幅器192は、コアポンピング型前置増幅器であってよい。コアポンピング型の前置増幅器は、クラディングポンピング型前置増幅器よりも短い装置であり、且つ、効率的である。或いは、この代わりに、前置増幅器192は、クラディングポンピング型前置増幅器であってよい。これは、コストを低減するために好ましい。好ましくは、パワー増幅器193は、クラディングポンピングされる。このような構成は、低コストによって製造可能な効率的な装置を提供する。クラディングポンピング型増幅器の設計及び構造は、米国特許第6,826,335号に記述されており、この内容は、本引用により、本明細書に包含される。

【0139】

前置増幅器192及びパワー増幅器193内に含まれた光ファイバは、それぞれ、ソリッドコアファイバ又は所謂ホーリーファイバであってよい。これらは、好ましくは、イッテルビウム、エルビウム、ネオジミウム、ホルミウム、ツリウム、又はプラセオジミウムなどの希土類ドーパントによってドーピングされる。好ましくは、光ファイバは、フォトダークニングに対する耐性を有する。このようなファイバは、同時係属特許出願である代理人ドケット番号S001-P20に記述されており、この内容は、本引用により、本明細書に包含される。

【0140】

図19を使用し、図19の光源172及び増幅器173を置換可能である。後程詳述するように、コントローラ174は、パルス繰り返し周波数176の範囲にわたって材料1714を加工するべく、十分なレベルにおいて平均パワー178及びピークパワー179が維持されるように、前置増幅器192及び増幅器193をポンピングするシードレーザー192及びポンプ194を制御する。

【0141】

図27は、それぞれ、115kHz、46kHz、30kHz、及び24kHzのパルス繰り返し数における出力パルス271、272、273、及び274対時間275を示している。シードレーザー192によって放射された対応する光学パルス175は、図28においては、それぞれ、パルス281、282、283、及び284として示されている。出力パルス271~274及び光学パルス281~284は、それぞれ、個々のパルスが重畳された図29及び図30に再生成されている。図31は、パルス繰り返し周波数176に伴うピークパワー179及びパルスエネルギー1710の変動を示している。ピークパワー179は、5kWを上回る状態において維持され、且つ、パルスエネルギー1710は、24kHz~115kHzのパルス繰り返し周波数176において、0.1mJを上回る状態に維持されている。更には、平均パワー178は、パルス繰り返し周波数176とパルスエネルギー1710の積であるため、平均パワー178は、24kHz~115kHzのパルス繰り返し周波数176において約10Wを上回ることを観察可能である。2段の増幅のみにより、100kHzを上回るパルス繰り返し周波数において0.

10

20

30

40

50

1 mJ のパルスエネルギーによって 5 kW のピークパワーを実現可能であることを証明しているため、図 2 7 ~ 図 3 1 に示された結果は非常に重要である。M O P A 1 9 0 は、匹敵する平均出力パワー 1 7 8 のその他の光ファイバパルスレーザーと比較し、加工速度の増大における大きな有用性を具備することになる。

【 0 1 4 2 】

図 3 2 は、ポンプ 1 9 4 からのパワーの増大に伴う M O P A 1 9 0 からの出力パワー 3 2 0 を示している。3 5 kW のピークパワーが、(ピークパワーの半分において計測された) 約 1 0 n s のパルス幅によって実現されている。図 3 3 は、波長 3 3 2 に対してプロットされた状態において、パルスの光学スペクトル 3 3 1 を示している。シードレーザー 1 9 2 からのパルスの信号波長 3 3 3 は、約 1 0 6 2 n m であった。パワーの大きな比率が、信号波長 3 3 3 よりも長い波長に存在しており、このパワーは、誘導ラマン散乱 (S R S) などの非線形プロセスに起因し、波長シフトされている。図 3 2 を再度参照すれば、1 0 7 0 n m を上回る波長を減衰させる光学フィルタを使用し、出力パワー 3 2 1 を計測した。図 3 2 及び図 3 3 から、約 8 kW を上回る出力パワーが波長においてシフトされることが観察される。8 kW の出力パワーを非線形閾値 3 2 2 として定義可能である。従って、材料加工のための M O P A 1 9 0 の使用法は、図 1 7 の加工ヘッド 1 7 1 2 内における広帯域オプティクスの使用を必要とする可能性がある。「広帯域オプティクス」とは、約 1 0 n m を上回る帯域幅を具備した信号波長を透過及び合焦可能であるオプティクスを意味している。これにも拘わらず、このモードにおいて動作する M O P A 1 9 0 は、約 8 kW を上回るピークパワー 1 7 9 を必要とする材料加工において大きな有用性を具備する。

【 0 1 4 3 】

コントローラ 1 7 4 を使用し、ポンプ 1 9 4 及び 1 9 9 によって放射されるパワーを低減するか、又は出力パルス 1 7 1 9 の形状を制御することにより、波長変換される出力パルス 1 7 1 9 の比率を低減可能である。波長変換される比率を 5 0 % 未満に、且つ、好ましくは、1 0 % 未満に低減可能である。実質的に出力パルス 1 7 1 9 のいずれもが、図 2 7 ~ 図 3 1 を参照して実証されたものなどの広いレンジのパルス繰り返し周波数 1 7 6 にわたって波長変換されないことが好ましい。コントローラ 1 7 4 の制御機能は、(例えば、実験及び特徴判定を通じて実現される) 開ループ制御により、或いは、M O P A 1 9 0 内の (例えば、増幅器 1 9 3 の入力又は出力又は別の場所における) ポイントからパワー (平均パワー又はピークパワー又は波長シフトされたパワー) の計測値を採取し、望ましい値と比較し、且つ、計測値と望ましい値の間の差を使用してコントローラ 1 7 4 によって提供された制御機能を変更する閉ループ制御により、実現可能である。

【 0 1 4 4 】

図 3 4 ~ 図 3 7 は、パルス繰り返し周波数 (p r f) 1 7 6 及びパルス幅 1 7 7 の変化が M O P A 1 9 0 内の出力パルス 1 7 1 9 の形状に対して具備する効果を示している。4 つの図は、いずれも、同一スケール上にプロットされており、出力パワーは、任意の単位においてプロットされている。コントローラ 1 7 4 は、平均パワー 1 7 8 が 1 2 W に維持されるように、ポンプ 1 9 4 及び 1 9 9 を制御した。又、コントローラ 1 7 4 は、パルス繰り返し周波数 1 7 6 をその望ましい値に設定した。次いで、コントローラ 1 7 4 は、パルス幅 1 7 7 (即ち、それぞれのパルス 1 7 1 9 の全体パルス幅) を変化させ、ピークパワー 1 7 9 を望ましい値に設定した。

【 0 1 4 5 】

図 3 4 は、2 5 k H z のパルス繰り返し周波数、0 . 6 m J のパルスエネルギー 1 7 1 0、及び 1 2 W の平均パワー 1 7 8 によって計測された出力パワー 3 4 0 対時間 2 7 5 を示している。パルス幅 3 4 3 (即ち、コントローラ 1 7 4 によって制御される全体パルス幅) は、約 2 0 0 n s であった。出力パワー 3 4 0 は、ピークパワー 3 4 1 と、約 3 5 n s の半値全幅パルス幅 3 4 2 を具備する。

【 0 1 4 6 】

図 3 5 は、それぞれ、2 つの異なるパルス幅 3 5 5 及び 3 5 6 について計測された出力

パワー350及び351対時間275を示している。パルス繰り返し周波数176は、50kHzであり、パルスエネルギー1710は、0.24mJであり、且つ、平均パワー178は、12Wであった。出力パワー350の半値全幅パルス幅354は、約35nsであった。ピークパワー352、353は、パルス幅355、356の増大に伴って低下する。

【0147】

図36は、それぞれ、3つの異なるパルス幅367、368、及び369について計測された出力パワー360、361、及び362対時間275を示している。パルス繰り返し周波数176は、100kHzであり、パルスエネルギー1710は、0.12mJであり、且つ、平均パワー178は、12Wであった。出力パワー360の半値全幅パルス幅126は、約35nsであった。ピークパワー363、364、365は、パルス幅367、368、369の増大に伴って低下する。

10

【0148】

図37は、それぞれ、2つの異なるパルス幅375及び376について計測された出力パワー370及び371対時間275を示している。パルス繰り返し周波数176は、200kHzであり、パルスエネルギー1710は、0.06mJであり、且つ、平均パワー178は、12Wであった。出力370の半値全幅パルス幅374は、約20nsであった。ピークパワー372及び373は、パルス幅375及び376の増大に伴って低下する。

【0149】

20

図19の装置内のシードレーザーパルス175の形状を変化させることにより、ピークパワー179は、1Hz~200kHzのパルス繰り返し周波数176のレンジにわたって、0.1mJを上回るパルスエネルギー1710を提供しつつ、5kWのレベルを上回る状態に維持された。ピークパワー179は、1Hz~500kHzのパルス繰り返し周波数の範囲にわたって、0.04mJを上回るパルスエネルギー1710を提供しつつ、3kWのレベルを上回る状態に維持された。重要なことに、これらの結果は、いずれも、SBSの徴候を伴うことなしに、且つ、2つの増幅段のみにより、実現された。

【0150】

図19の装置内のシードレーザーパルス175の形状を制御し、増幅器192、193の利得を増大させ、且つ、これらの相対的な利得を制御することにより、本発明者らは、20~25Wの平均パワー178、0.8~1mJの範囲のパルスエネルギー1710、15~20nsの範囲の半値全幅パルス幅374、18~26kWの範囲のピークパワー179、1Hz~25kHzのパルス繰り返し周波数を更に実証した。重要なことに、これらの結果も、SBSの徴候を伴うことなしに、且つ、2つの増幅段のみにより、実現された。

30

【0151】

又、本発明は、前述のレーザー及びコントローラの中の1つ又は複数のものを有する材料加工装置(例えば、材料の切断、溶接、穿孔、マーキング、又は加工用のもの)の形態であってもよい。

【0152】

40

添付の図面を参照した前述の本発明の実施例は、一例として付与されたものに過ぎず、且つ、性能を向上させるべく変更及び追加コンポーネントを提供可能であることを理解されたい。

【0153】

本発明は、単一で又は任意の組み合わせにおいて採用された前述の特徴を包含する。

【図1】

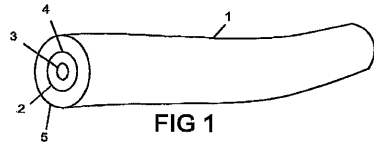


FIG 1

【図2】

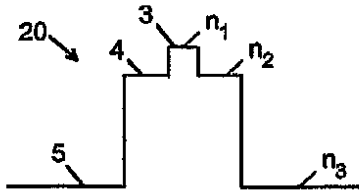


FIG 2

【図3】

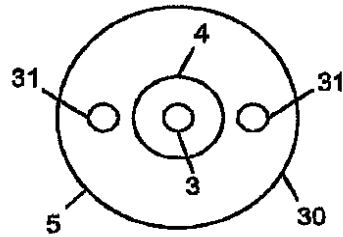


FIG 3

【図4】

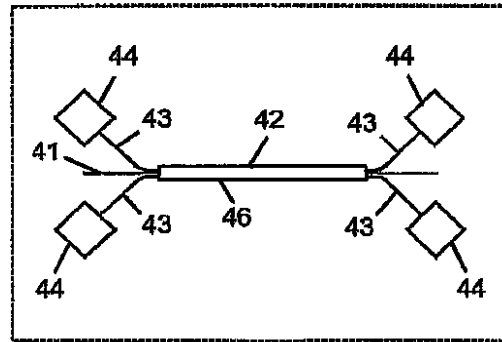


FIG 4

【図5】

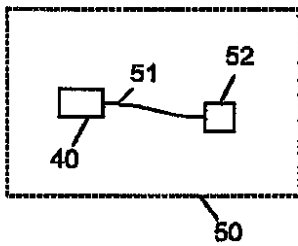


FIG 5

【図7】

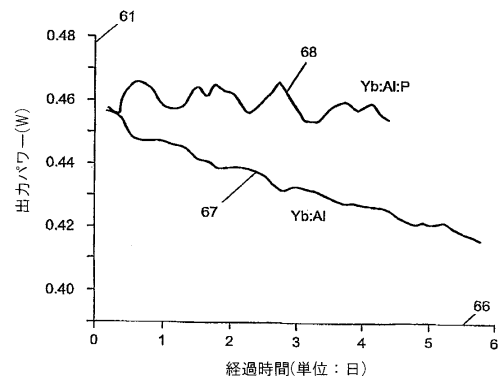


FIG 7

【図6】

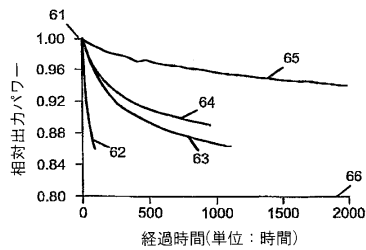


FIG 6

【図8】

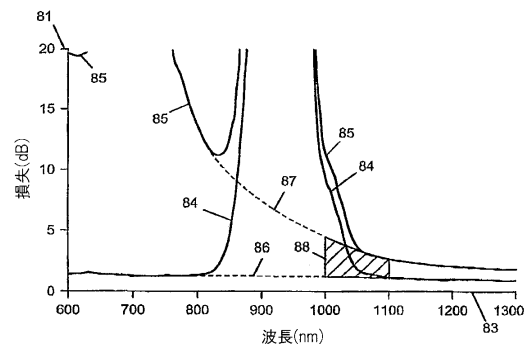
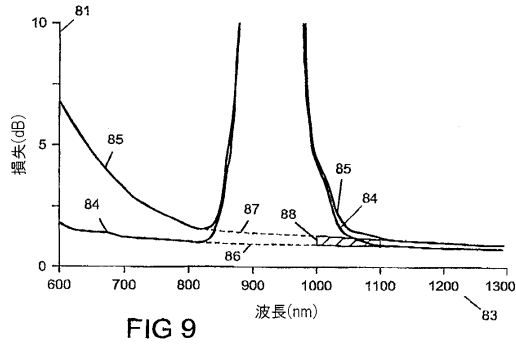
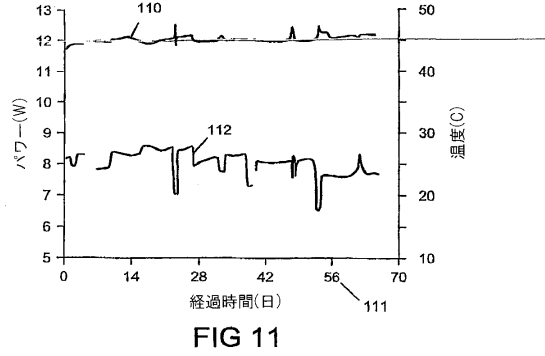


FIG 8

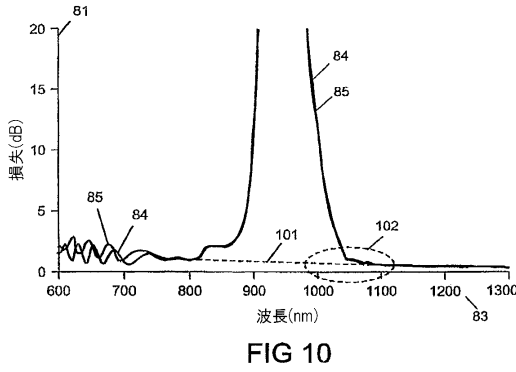
【図9】



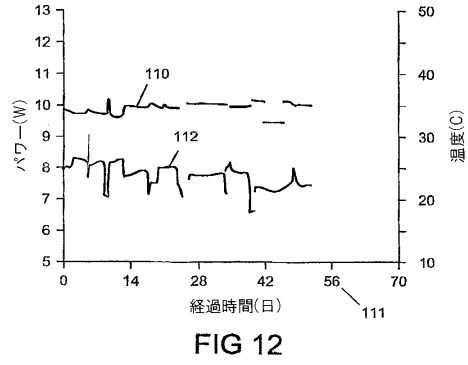
【図11】



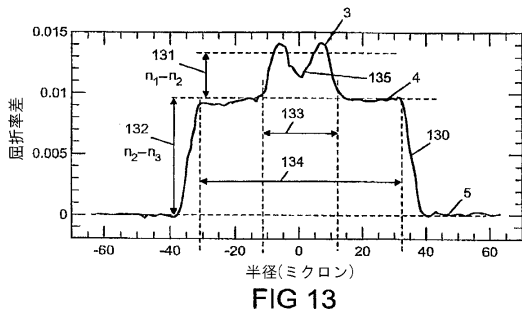
【図10】



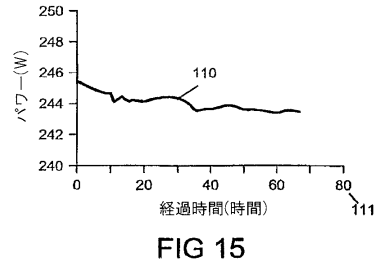
【図12】



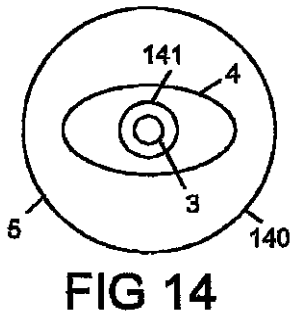
【図13】



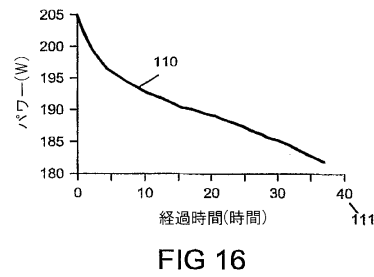
【図15】



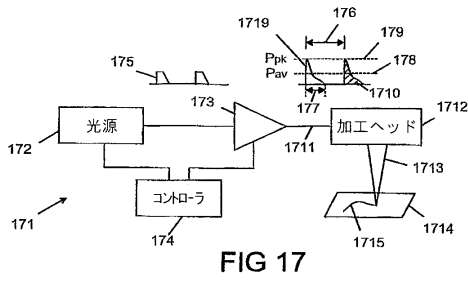
【図14】



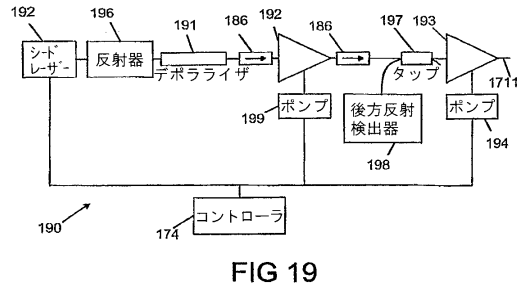
【図16】



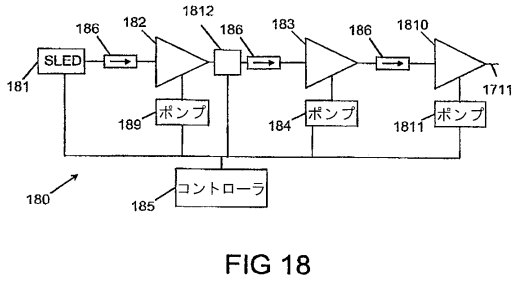
【図17】



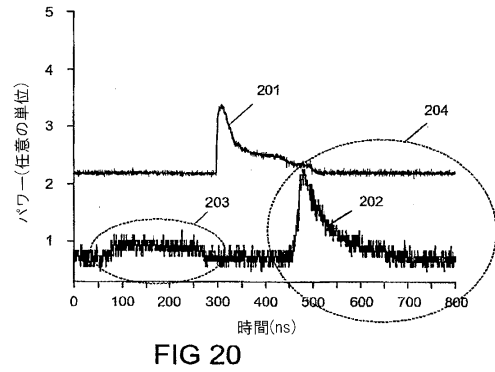
【図19】



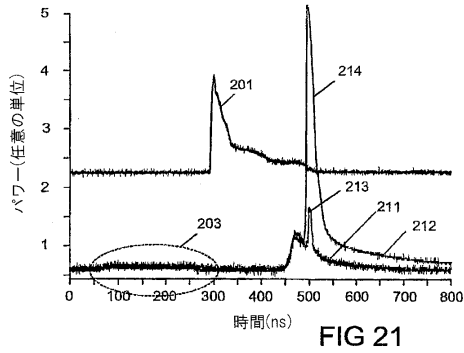
【図18】



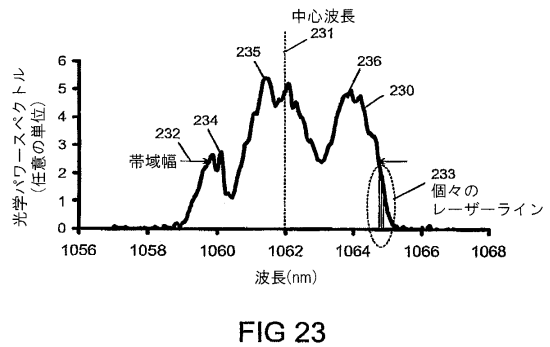
【図20】



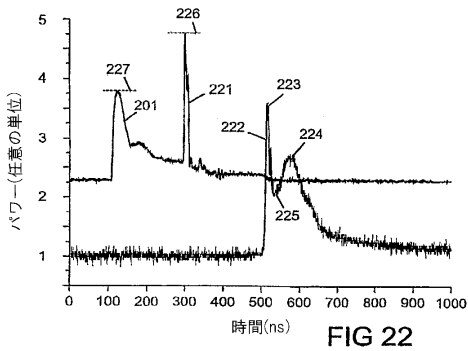
【図21】



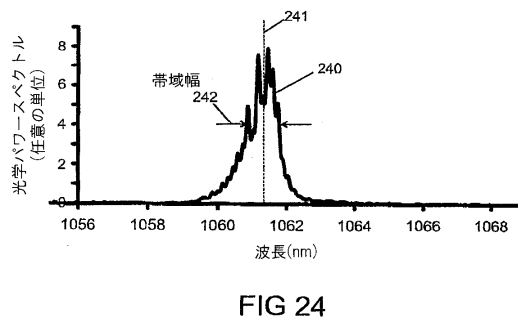
【図23】



【図22】



【図24】



【図 25】

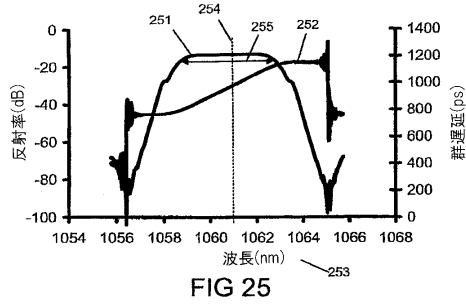


FIG 25

【図 26】

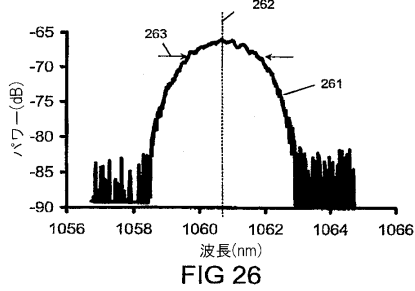


FIG 26

【図 29】

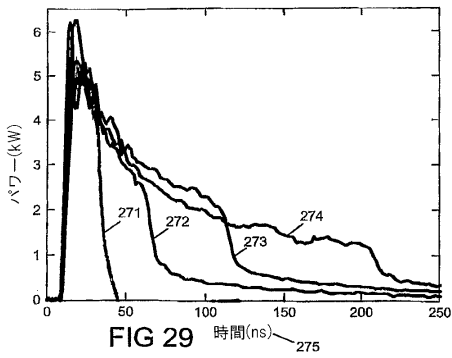


FIG 29

【図 30】

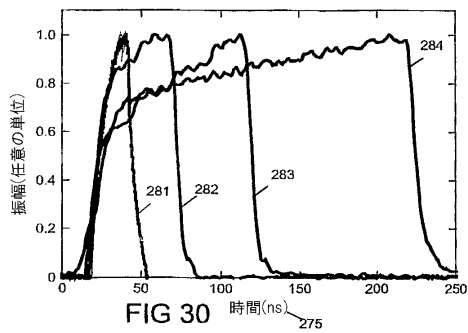


FIG 30

【図 27】

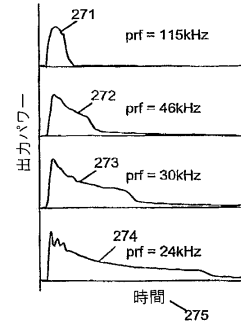


FIG 27

【図 28】

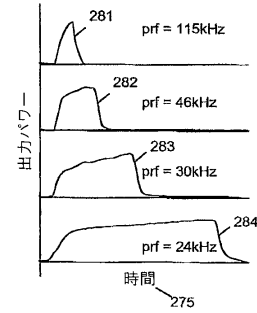


FIG 28

【図 31】

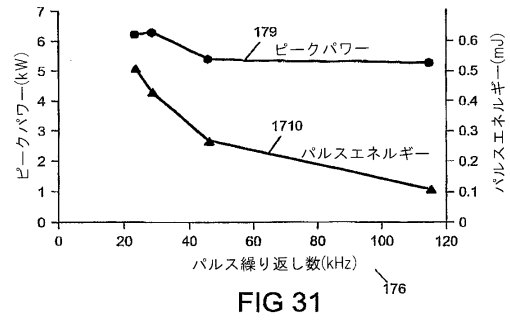


FIG 31

【図 32】

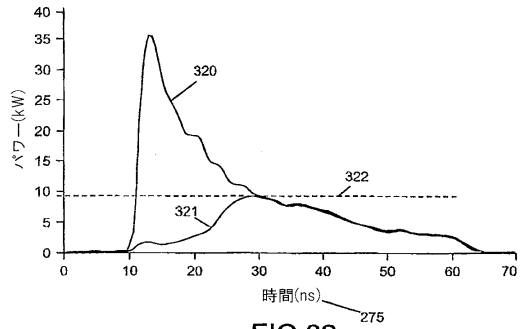


FIG 32

【図 33】

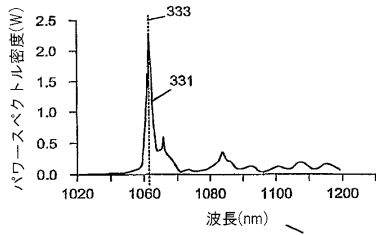


FIG 33

【図 35】

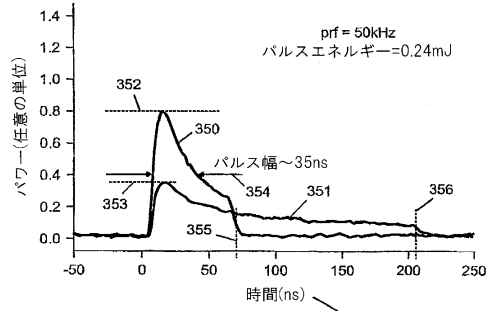


FIG 35

【図 34】

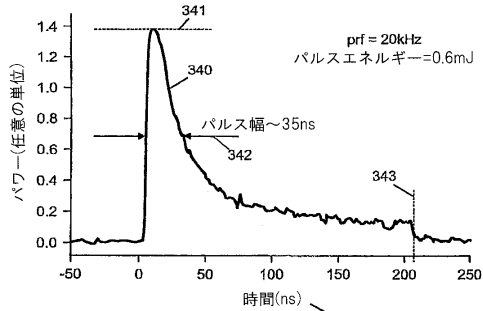


FIG 34

【図 36】

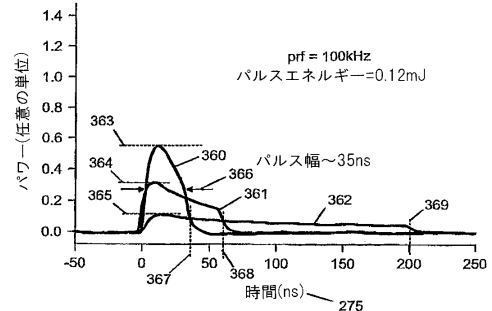


FIG 36

【図 37】

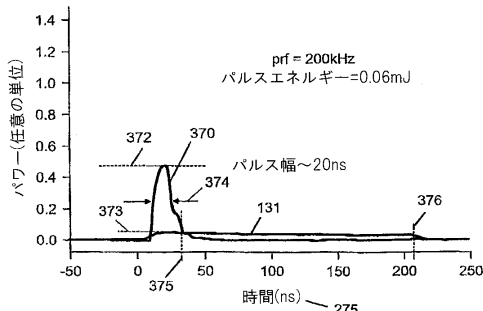


FIG 37

【図 38】

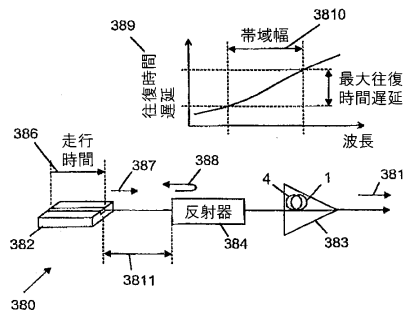


FIG 38

## フロントページの続き

- (31)優先権主張番号 60/819,439  
 (32)優先日 平成18年7月7日(2006.7.7)  
 (33)優先権主張国 米国(US)
- (31)優先権主張番号 60/834,974  
 (32)優先日 平成18年7月31日(2006.7.31)  
 (33)優先権主張国 米国(US)
- (72)発明者 ダーキン, マイケル ケバン  
 イギリス国, エスオー18 1ジーエフ ハンプシャー, サウサンプトン, ビターン パーク, ホ  
 イットワース ロード 34エー
- (72)発明者 ギリンゲッリ, ファビオ  
 イギリス国, エスオー16 7ピービー サウサンプトン, バセット, バセット クレセント イ  
 ースト 16
- (72)発明者 ジルーリー, アンドリュウ マイケル  
 イギリス国, エスオー19 9ティーワイ ハンプシャー, サウサンプトン, ハルトン クローズ  
 58
- (72)発明者 ヒッキー, ルイーズ メアリー ブレンダン  
 イギリス国, エスエル4 3エヌゼット パークシャー, ウィンザー, ウィンドミル クローズ  
 1
- (72)発明者 ノーマン, スティーブン ロイ  
 イギリス国, エスオー51 9ピーゼット アンプフィールド, フックウッド レーン, フックウ  
 ッド コテージ
- (72)発明者 ペイン, デイビッド ニール  
 イギリス国, エスオー31 4キュージー ハンプシャー, サウサンプトン, シルバン ロード  
 ハンプル 13
- (72)発明者 パイパー, アンディ  
 イギリス国, エスオー16 3ディーティー ハンプシャー, サウサンプトン, ピンステッド ク  
 ローズ 22
- (72)発明者 サファー, ジャヤンタ クマール  
 イギリス国, エスオー17 3アールディー サウサンプトン, マートン ロード 4
- (72)発明者 ゼルバス, ミカイル ニコラオス  
 イギリス国, エスオー15 5エスアール ハンプシャー, サウサンプトン, ヒル ファーム ロ  
 ード 34

審査官 岡田 吉美

- (56)参考文献 特開2002-033536(JP, A)  
 特表2003-536266(JP, A)  
 特表2007-516600(JP, A)  
 特開平11-112070(JP, A)  
 特表2003-512717(JP, A)  
 特開2002-280668(JP, A)  
 特開平10-221656(JP, A)  
 特開平08-095097(JP, A)  
 特開2003-307657(JP, A)  
 ACHTENHAGEN, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2001年 5月 1日, V13 N5, P415-4  
 17  
 ZERVAS M N, PROCEEDINGS OF THE SPIE, 米国, SPIE, 2006年 1月 1日, V6102, P61020

Q-1 - 61020Q-11

KOPONEN J J , PHOTODARKENING IN YTTERBIUM-DOPED SILICA FIBERS , PROCEEDINGS OF THE SPIE  
 , 米国 , SPIE , 2 0 0 5 年 1 月 1 日 , V5990

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

H 0 1 S 3 / 0 0 - 5 / 5 0