

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5269764号
(P5269764)

(45) 発行日 平成25年8月21日 (2013. 8. 21)

(24) 登録日 平成25年5月17日 (2013. 5. 17)

(51) Int. Cl.	F I
GO2F 1/37 (2006.01)	GO2F 1/37
GO2F 1/35 (2006.01)	GO2F 1/35 502
HO1S 3/10 (2006.01)	HO1S 3/10 Z

請求項の数 6 (全 30 頁)

(21) 出願番号	特願2009-507817 (P2009-507817)	(73) 特許権者	397068274
(86) (22) 出願日	平成19年4月26日 (2007. 4. 26)		コーニング インコーポレイテッド
(65) 公表番号	特表2009-535666 (P2009-535666A)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 148
(43) 公表日	平成21年10月1日 (2009. 10. 1)		31 コーニング リヴァーフロント プ
(86) 国際出願番号	PCT/US2007/010208		ラザ 1
(87) 国際公開番号	W02007/127356	(74) 代理人	100073184
(87) 国際公開日	平成19年11月8日 (2007. 11. 8)		弁理士 柳田 征史
審査請求日	平成22年3月11日 (2010. 3. 11)	(74) 代理人	100090468
(31) 優先権主張番号	60/795, 915		弁理士 佐久間 剛
(32) 優先日	平成18年4月28日 (2006. 4. 28)	(72) 発明者	ククセンコフ, ドミトリ ヴィー
(33) 優先権主張国	米国 (US)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 148
(31) 優先権主張番号	60/810, 520		70 ペインテッド ポスト ブルック
(32) 優先日	平成18年6月2日 (2006. 6. 2)		ロード 117
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 パルス動作UV及び可視ラマンレーザシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

レーザシステムにおいて、

原波長を中心とする光スペクトルを有するパルス光を発生するパルス光源、

前記パルス光源に結合された非線形ラマン変換ファイバであって、前記パルス光は前記非線形ラマン変換ファイバを通過し、多段誘導ラマン散乱過程によって、最終次数ストークス光に相当し、前記原波長より長い第1の出力波長を中心とする光スペクトルを有する、第1のパルス光出力に変換されるものである非線形ラマン変換ファイバ、

少量のCW光またはパルス光を前記非線形ラマン変換ファイバに注入するためのシード光源であって、前記少量のCW光またはパルス光が前記パルス光源からの前記パルス光とともに前記非線形ラマン変換ファイバを伝搬することにより、ラマン変換効率を高めるようにラマン変換をシードするシード光源、及び

前記非線形ラマン変換ファイバに動作可能な態様で結合された高調波発生器であって、150～775nmの範囲内におかれた最終出力波長の光出力を前記高調波発生器が発生するように、前記第1のパルス光出力を受け取り、前記受け取られた第1のパルス光出力をより高い光周波数に変換するための高調波発生器、を備え、

前記非線形ラマン変換ファイバが、ファイバ長にわたって一様な常色分散を有し、前記常色分散が前記原波長、前記出力波長及び複数の中間次数ストークス光の全ての波長に対して常色分散であるような、単一の非線形ファイバを含むことを特徴とするレーザシステ

10

20

ム。

【請求項 2】

波長変換及び波長変換のための多段誘導ラマン散乱の制御のための方法において、前記方法が、

原波長を中心とする光スペクトルを有すると共にパルス幅及びピークパルスパワーを有するパルス光を発生する工程、

シード波長を有するシード光を発生する工程、

前記パルス光および前記シード光を、前記原波長の原パワーを多段誘導ラマン散乱過程によって前記原波長より長い出力波長のパワー出力に変換するために、ファイバ長及び分散パラメータを有する非線形ラマン変換ファイバに結合し、前記非線形ラマン変換ファイバを通して伝搬させる工程、

前記非線形ラマン変換ファイバの 1 回通過における前記出力波長の最終次ストークス光のパワー出力への前記原パワーの変換を最大化するために、前記パルス幅、前記ピークパルスパワー、前記シード波長、前記ファイバ長及び前記分散パラメータを設定する工程、及び

少なくとも 1 つの高調波発生器に、前記高調波発生器が 1 5 0 ~ 7 7 5 n m の範囲内におかれた最終出力波長の光出力を発生するように、前記ラマン変換ファイバによって供給される前記光をより高い光周波数に変換するために前記光を結合する工程、

を含み、

前記設定する工程が非線形ファイバセグメントの直列接続を提供する工程を含み、

前記非線形ファイバセグメントのそれぞれは、特定のファイバセグメントを通過している入力波長、出力波長及び中間次数ストークス光波長の特定の組合せに対して常色分散を有し、

前記組合せの波長のそれぞれにおける前記常色分散の値が 4 光波混合によって生じるスペクトル拡幅を含む変換効率に有害な非線形光効果を最小限に抑えるための要件及びいずれの 2 つの連続する変換次数（波長）に対してもパルスウォークオフを最小限に抑えるための要件によって決定され、

前記ファイバセグメントのそれぞれがファイバセグメント長を有し、

前記ファイバセグメント長が、前記誘導ラマン散乱の閾値を、特定のセグメントで発生して前記特定のセグメントを通過する次数のストークス光が発生するように、該セグメントに入る初めの次数のストークス光のピークパルスパワー及び、該ファイバセグメントのラマン利得、減衰及び実効面積から決定され、

最終ファイバセグメント長が、ストークス光の N 次までの変換はおこなわれるが、(N + 1) 次のストークス光の変換は行われない光強度の閾値を有し、

その結果、前記原パワーの大部分が N 次ストークス光に変換されることを特徴とする方法。

【請求項 3】

レーザシステムにおいて、

原波長を中心とする光スペクトルを有するパルス光を発生するパルス光源、

前記パルス光源に結合された非線形ラマン変換ファイバであって、前記パルス光は前記非線形ラマン変換ファイバを通過し、多段誘導ラマン散乱過程によって、最終次数ストークス光に相当し、前記原波長より長い第 1 の出力波長を中心とする光スペクトルを有する、第 1 のパルス光出力に変換されるものである非線形ラマン変換ファイバ、

少量の C W 光またはパルス光を前記非線形ラマン変換ファイバに注入するためのシード光源であって、前記少量の C W 光またはパルス光が前記パルス光源からの前記パルス光とともに前記非線形ラマン変換ファイバを伝搬することにより、ラマン変換効率を高めるようにラマン変換をシードするシード光源、及び

前記非線形ラマン変換ファイバに動作可能な態様で結合された高調波発生器であって、1 5 0 ~ 7 7 5 n m の範囲内におかれた最終出力波長の光出力を前記高調波発生器が発生するように、前記第 1 のパルス光出力を受け取り、前記受け取られた第 1 のパルス光出力

10

20

30

40

50

をより高い光周波数に変換するための高調波発生器、
を備え、

前記シード光源が、第1のシード光源および第2のシード光源からなり、前記第1のシード光源は、前記出力波長に対してシード光を与え、前記第2のシード光源は、前記原波長の中間次数ストークス光波長に対してシード光を与えることを特徴とする請求項1記載のレーザシステム。

【請求項4】

レーザシステムにおいて、

原波長を中心とする光スペクトルを有するパルス光を発生するパルス光源、

前記パルス光源に結合された非線形ラマン変換ファイバであって、前記パルス光は前記非線形ラマン変換ファイバを通過し、多段誘導ラマン散乱過程によって、最終次数ストークス光に相当し、前記原波長より長い第1の出力波長を中心とする光スペクトルを有する、第1のパルス光出力に変換されるものである非線形ラマン変換ファイバ、

少量のCW光またはパルス光を前記非線形ラマン変換ファイバに注入するためのシード光源であって、前記少量のCW光またはパルス光が前記パルス光源からの前記パルス光とともに前記非線形ラマン変換ファイバを伝搬することにより、ラマン変換効率を高めるようにラマン変換をシードするシード光源、及び

前記非線形ラマン変換ファイバに動作可能な態様で結合された高調波発生器であって、150～775nmの範囲内におかれた最終出力波長の光出力を前記高調波発生器が発生するように、前記第1のパルス光出力を受け取り、前記受け取られた第1のパルス光出力をより高い光周波数に変換するための高調波発生器、

を備え、

前記シード光源が、前記出力波長に対してシード光を与えることを特徴とするレーザシステム。

【請求項5】

レーザシステムにおいて、

原波長を中心とする光スペクトルを有するパルス光を発生するパルス光源、

前記パルス光源に結合された非線形ラマン変換ファイバであって、前記パルス光は前記非線形ラマン変換ファイバを通過し、多段誘導ラマン散乱過程によって、最終次数ストークス光に相当し、前記原波長より長い第1の出力波長を中心とする光スペクトルを有する、第1のパルス光出力に変換されるものである非線形ラマン変換ファイバ、

少量のCW光またはパルス光を前記非線形ラマン変換ファイバに注入するためのシード光源であって、前記少量のCW光またはパルス光が前記パルス光源からの前記パルス光とともに前記非線形ラマン変換ファイバを伝搬することにより、ラマン変換効率を高めるようにラマン変換をシードするシード光源、及び

前記非線形ラマン変換ファイバに動作可能な態様で結合された高調波発生器であって、150～775nmの範囲内におかれた最終出力波長の光出力を前記高調波発生器が発生するように、前記第1のパルス光出力を受け取り、前記受け取られた第1のパルス光出力をより高い光周波数に変換するための高調波発生器、

を備え、

前記シード光源が、前記原波長の中間次数のストークス波長のシード光を提供することを特徴とするレーザシステム。

【請求項6】

レーザシステムにおいて、

原波長を中心とする光スペクトルを有するパルス光を発生するパルス光源、

前記パルス光源に結合された非線形ラマン変換ファイバであって、前記パルス光は前記非線形ラマン変換ファイバを通過し、多段誘導ラマン散乱過程によって、最終次数ストークス光に相当し、前記原波長より長い第1の出力波長を中心とする光スペクトルを有する、第1のパルス光出力に変換されるものである非線形ラマン変換ファイバ、

少量のCW光またはパルス光を前記非線形ラマン変換ファイバに注入するためのシード

10

20

30

40

50

光源であって、前記少量のCW光またはパルス光が前記パルス光源からの前記パルス光とともに前記非線形ラマン変換ファイバを伝搬することにより、ラマン変換効率を高めるようにラマン変換をシードするシード光源、及び

前記非線形ラマン変換ファイバに動作可能な態様で結合された高調波発生器であって、150～775 nmの範囲内におかれた最終出力波長の光出力を前記高調波発生器が発生するように、前記第1のパルス光出力を受け取り、前記受け取られた第1のパルス光出力をより高い光周波数に変換するための高調波発生器、

を備え、

前記シード光源が、第1のシード光源および第1のグループのシード光源を有してなり、前記第1のシード光源は、前記出力波長に対してシード光を与え、前記第1のグループのシード光源は、前記原波長の間接ストークス光波長に対してシード光を与えることを特徴とするレーザシステム。

10

【発明の詳細な説明】

【関連出願の説明】

【0001】

本出願は、2006年4月28日に出願された、名称を「パルス動作UV及び可視ラマンレーザシステム (Pulsed UV and Visible Raman Laser System)」とする、米国仮特許出願第60/795915号、及び2006年6月2日に出願された、名称を「UV及び可視光出力発生のためのレーザシステム (Laser Systems for Producing UV and Visible Light Output)」とする、米国仮特許出願第60/810520号の恩典を主張する。

20

【技術分野】

【0002】

本発明は全般的には固体レーザに関し、さらに詳しくは、紫外 (UV) 波長範囲及び／または可視波長範囲における出力を発生するために非線形波長変換を用いるファイバレーザに関する。

【背景技術】

【0003】

可視波長範囲 (400～775 nm) 及びUVないし深UV (DUV) 波長範囲 (150～400 nm) におけるコヒーレント光源には、(医学、生命科学、材料処理、フォトリソグラフィ及び計測学のような) 多くの重要な用途がある。一般に、高出力パワーが望まれ、異なる用途には異なる波長が必要とされる。

30

【0004】

しかし、近IRスペクトル範囲用に開発された広範に入手できる光源とは対照的に、より短い波長 (例えば可視またはUV) の光源の選択範囲は極めて限られている。エキシマレーザは、248 nm, 193 nm及び157 nmのUV光の発生によく利用される。しかし、これらのレーザは高価であり、メンテナンスに費用がかかり、ビーム品質が比較的劣り、波長可変ではない。

【0005】

ダイオードポンプ固体 (DPSS) レーザのIR (赤外) 波長出力をUV及び可視範囲に変換するために、非線形結晶における高調波変換が一般に用いられる。残念なことには、DPSSレーザからは僅かな数の離散波長しか利用できず、したがって、この方法で発生される出力波長も基本波長またはポンプ波長の (例えば、二次、三次、四次の) 高調波に限定される。そのようなレーザ出力は、例えば1064 nm Nd:YAGレーザ出力の高調波変換で発生される、532 nm, 355 nm及び266 nmである。

40

【0006】

適する透過波長範囲及び位相整合条件をもつ非線形結晶が存在すれば、出力波長可変性をさらに提供するため、光パラメトリック発振 (OPO) をDPSSレーザとともに用いることができる。これは必ずしも可能ではない。さらに、OPOからの出力波長は非線形結晶の位相整合条件によって決定されるから、OPOを用いるレーザシステムは、高調波変換を用いるレーザシステムに比較して、一般に複雑であり、安定性が乏しいという問題

50

をかかえている。

【0007】

D P S S レーザの別の欠点は、熱問題（レーザ結晶内の熱散逸）によって、平均パワー出力が比較的低い値（10～25 W）に制限されることである。高効率非線形周波数変換に必要な高ピーク光パワー値を達成するため、D P S S レーザは一般に、パルス繰返し周波数が数kHzに限定されるQスイッチ（長い30～50 nsパルス）方式、または出力のスペクトル幅がかなり広く、したがってレーザ出力のコヒーレンス長が連続波レーザすなわちC Wレーザのコヒーレンス長より短い、モードロック（5～10 psパルス）方式で動作される。したがって、そのようなD P S S レーザは、光パルスが高コヒーレンスを保つに十分に長く、同時に繰返し周波数が特定の検出器にとって出力光が実効的にC Wに見えるように十分に高い、擬似C W出力を発生するには適していない。

10

【0008】

新しい部類のダイオードポンプレーザである、希土類ドープガラスファイバレーザが最近かなり注目されており、初めての工業用途が見つかっている。活性媒質長が長い（数m）ことから、ファイバレーザでは熱散逸問題がD P S S レーザほど大きな問題にはならず、したがって、完全な横単一モードビーム品質を保ちながら、平均パワー出力をかなり高くすることができる。すなわち、ファイバレーザは高調波変換による可視及びU V範囲における高パワーC W源または擬似C W源形成のための完璧な候補である。さらに、ファイバレーザ出力波長は離散値に限定されず、比較的広い範囲、例えばY bドープデバイスについては1030～1120 nm、で同調させることができる。しかし、このさらなるフレキシビリティをもってしても、高調波発生によって全ての所望の出力波長を達成することはできない。O P Oは追加の波長を提供できるが、上述したように、O P Oを用いるレーザシステムは一般に複雑であり、高調波変換器を用いるレーザシステムに比較して、安定性に劣るという問題をかかえている。

20

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

したがって、0.15～0.775 μm の範囲において高パワーで高効率であり、安定な、擬似C Wレーザ源の開発が未だに必要とされている。

【課題を解決するための手段】

30

【0010】

本発明の一実施形態は、（i）原波長を中心とする光スペクトル範囲を有するパルス光を発生するパルス光源、（ii）パルス光源に結合された非線形ラマン変換ファイバ、ここで、パルス光は非線形ラマン変換ファイバを通過し、多段誘導ラマン散乱過程によって原波長より長い第1の出力波長を中心とする光スペクトルを有する第1のパルス光出力に変換される、及び（iii）非線形ラマン変換ファイバに動作可能な態様で結合された高調波発生器であって、高調波発生器が150～775 nmの範囲内におかれた最終出力波長の最終光出力を発生するように、第1のパルス光出力を受け取り、これをより高い光周波数に変換するための高調波発生器、を備えるラマンレーザシステムである。

【0011】

40

本発明の一実施形態は、光を発生する光源であって、可視スペクトル範囲で動作するファイバレーザまたはファイバ増幅器を有する光源及び、光源に動作可能な態様で結合された周波数変換器であって、周波数変換器が150～400 nmの範囲内におかれた最終光波長の光出力を発生するように、光源によって供給される光を受け取り、これをより高い光周波数に変換するための周波数変換器、を備えるレーザシステムである。最終出力波長は150～300 nmの範囲内におかれることが好ましい。

【0012】

本発明のさらなる特徴及び利点は以下の詳細な説明に述べられ、当業者には、ある程度は、その説明から容易に明らかであろうし、あるいは、以下の詳細な説明及び特許請求の範囲を含み、また添付図面も含む、本明細書に説明されるように本発明を実施することに

50

よって容易に認められるであろう。

【0013】

上記の全般的説明及び以下の詳細な説明のいずれもが、本発明の実施形態を提示し、特許請求されるような本発明の本質及び特徴を理解するための概要または枠組みの提供が目的とされていることは当然である。添付図面は本発明のさらなる理解を提供するために含まれ、本明細書に組み入れられて、本明細書の一部をなす。図面は本発明の様々な実施形態を示し、記述とともに本発明の原理及び動作の説明に役立つ。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

サブ200nmレーザ光源は半導体工業における計測用途に非常に重要である。集積回路の最小寸法が縮小するにつれて、フォトリソグラフィに用いられる光の波長が短くなる。したがって、マスク及びウエハの検査に、また光学素子の作成にも、同じかまたは同様のDUV光波長が必要になる。現在用いられている、固体レーザ源、高調波変換及びOPOに基づくシステムは、一般に非常に低い繰返しレートで作動し、非常に大きくて扱いにくく、複雑で、高価であり、頻繁で煩雑なメンテナンスが必要である。

【0015】

新しい部類のダイオードポンブレザである、希土類ドープガラスファイバレーザが最近かなり注目されており、初めての工業用途が見つかった。活性媒質長が長い（数m）ことから、ファイバレーザでは熱散逸問題がDPSSLレーザほど大きな問題にはならず、したがって、完全な横単一モードビーム品質を保ちながら、平均パワー出力をかなり高くすることができる。すなわち、ファイバレーザは高調波変換による可視及びUV範囲における高パワーCW源または擬似CW源形成のための完璧な候補である。さらに、ファイバレーザ出力波長は離散値に限定されず、比較的広い、例えばSmドープファイバレーザまたは増幅器については約570～630nmの、範囲で可変とすることができる。この可調性はレーザシステムで供給される最終出力波長の同調または調整を提供する。

【0016】

コヒーレント光を発生するための無キャビティまたは無共振の方法及び装置が本明細書に教示される。本発明のいくつかの実施形態にしたがえば、好ましくは常分散（負分散）を有する光ファイバにおけるパルスポンプ光の多段誘導ラマン散乱（SRSS）が、初期の短い波長のより長い波長への複次波長シフトを生じさせるために、本発明の方法及び装置に用いられる。

【0017】

次いで、（例えば、二次、三次または四次の）高調波発生が150～775nmの範囲内におかれた最終出力波長の光出力を発生するように、高調波発生器が最終次ストークス光のパワー出力をより高い光周波数（より短い波長）に変換するために用いられる。

【0018】

ここで本発明の、その例が添付図面に示される、現在好ましい実施形態を詳細に参照する。可能であれば必ず、図面を通して同じ参照数字が同じかまたは同様の要素を指して用いられる。本発明のレーザシステムの一実施形態が図1に示され、本明細書にわたり、全体として参照数字10で指定される。

【0019】

図1を参照すれば、レーザシステム10は、原波長 λ_p を中心とする光スペクトルを有するパルス光104を発生するパルス光源102（例えば初「親発振器」パルス光源102'を有する「親発振器-パワー増幅器」（MOPA））を有する。非線形ラマン変換ファイバ106'を有するラマン波長変換器106がパルス光源102に動作可能な態様で結合される。パルス光104は非線形ラマン変換ファイバ106'を通過し、多段誘導ラマン散乱過程によって（原波長 λ_p より長い）出力波長 $\lambda_{1出力}$ を中心とする光スペクトルを有する第1のパルス光出力信号108に、出力波長 $\lambda_{1出力}$ が非線形ラマン変換ファイバ106'のガラス材料に対す原波長 λ_p のN次ストークス光波長（ $N=1, 2, 3$ または4）に相当し、パルス光源102からの光パワーのかなりの部分（>25%）が非線形ラ

マン変換ファイバ106'の1回の通過でN次ストークス光に変換されるように、変換される。パルス光源102によって与えられるパルス幅及びピークパルスパワーも、ラマン変換ファイバ長も、またこのファイバの分散パラメータも、好ましくは、原パワーの非線形ラマン変換ファイバ106'の1回の通過における出力波長の最終次ストークス光のパワー出力への変換を最大化するように選ばれるべきである。

【0020】

さらに詳しくは、ファイバ作成に用いられるガラス材料が透明であるいずれかの波長のコヒーレント光出力を発生させるために、光ファイバにおけるラマン波長シフトが用いられる。初波長のi次ストークス光が(i+1)次ストークス光の発生のためのポンプとしてはたらく、複次誘導ラマン散乱(SRS)発生器が、光ファイバの作成に用いられるガラス材料の透明ウインドウ内でかなりの波長シフトを達成し、その結果、他のタイプのレーザー源では利用できないであろう新しい出力波長 $\lambda_{1出}$ を発生するための、(短波長から長波長への)多段波長変換器として用いられる。

【0021】

誘導ラマン散乱過程の自己位相整合性により、ピークパワーが十分に高い光パルスが単一モード光ファイバ106'に投射されて、ファイバ106'内を伝搬すると、ポンプ光波長(すなわち原波長) λ_p の、一次、二次、三次ないしさらに高次のストークス光波長への連続変換がおこるのであろう。ポンプ光とストークス光の間のスペクトル内間隔または光周波数間隔は、いわゆるストークスシフト(すなわち、光ファイバ106'が作成される特定のガラス材料においてラマン利得が最大である、波長(周波数)シフト)によって決定される。変換は連続的におこるから、何次のストークス光がラマン変換ファイバの出力に存在するかは入力ピークパワー及びファイバ長によって一意的に決定される。変換が与えられたストークス次数で終結するように、波長依存損失を生じさせることによって(例えばファイバを曲げることによって)ある程度の制御をさらに実行することができる。ラマン変換光ファイバ106'は、色分散が原波長、出力波長及び複数の中間次数ストークス光波長に対して常分散であるような、ファイバ長にわたって一様な色分散を有する単一モード非線形ファイバとすることができる。原波長、出力波長及び複数の中間次数ストークス光波長のそれぞれにおける色分散の値は、4光波混合により生じるスペクトル拡幅を含む、変換効率に有害な非線形光効果を最小化するための要件及びいずれの2つの連続変換次数光(波長)に対するパルスウォークオフも最小化するための要件によって、少なくともある程度、決定される。ラマン変換光ファイバ106'の長さは、誘導ラマン散乱閾値がN次ストークス光には優越されるが、(N+1)次ストークス光には優越されず、よって原パワーの大部分がN次光パワーに変換される結果となるように、光源のピークパルスパワー及びファイバのラマン利得、減衰及び実効面積から決定されることが好ましい。

【0022】

あるいは、ラマン変換光ファイバ106'は非線形ラマンファイバセグメントの直列接続で作成することができて、それぞれのファイバセグメントは、特定のファイバセグメントを通過する入力波長、出力波長及び中間次数ストークス光波長の特定の組合せに対して常色分散を有し、特定の組合せの波長のそれぞれにおける色分散の値は、4光波混合によって生じるスペクトル拡幅を含む変換効率に有害な非線形光効果を最小化するための要件及びいずれの2つの連続変換次数光(波長)に対するパルスウォークオフも最小化するための要件によって、決定される。それぞれのファイバセグメントがセグメント長を有し、ファイバセグメント長は、誘導ラマン散乱閾値が特定のセグメントで発生される次数のストークス光及びその特定のセグメントを通過する次数のストークス光に優越され、最終ファイバセグメント長はN次ストークス光閾値に優越するに十分に長い、(N+1)次ストークス光閾値に優越するには十分ではなく、この結果、原パワーの大部分がN次光パワーに変換されるように、そのセグメントに入る初次ストークス光のピークパルスパワー及び、そのファイバセグメントのラマン利得、減衰及び実効面積からあらかじめ決定されることが好ましい。

【0023】

波長 $\lambda_{1出力}$ の第1のパルス光出力信号108を受け取り、これをより高い光周波数に変換するために、高調波発生器110が動作可能な態様で非線形ラマン変換ファイバ106'に結合され、高調波発生器110は150~775 nmの範囲内におかれた出力波長 $\lambda_{出力}$ の最終パルス光出力112を発生する。高調波発生器110は、例えば、二次、三次または四次等の高調波発生器とすることができ、これは高調波発生器110が第1の出力波長 $\lambda_{1出力}$ を、 $\lambda_{出力} = \lambda_{1出力} / 2$ 、 $\lambda_{1出力} / 3$ または $\lambda_{1出力} / 4$ の最終波長に変換していることを意味する。

【0024】

パルス光のラマン変換は光ファイバ106'の1回の通過でおこり、いかなる共振キャビティまたは波長選択素子も必要ではない。しかし、そのような自走変換については、ガラスのラマン利得スペクトルは比較的広く、新しい次数のストークス光の発生は自然ラマン放射光の増幅によっておこるから、後続する次数のストークス光のそれぞれは直前の次数のストークス光より若干広いスペクトルを有するであろう。4光波混合の影響によりさらなるスペクトル拡幅がおこる。これらの理由のため、出力波長の精確な選択が困難になり得る。したがって、発明者等は、第1のパルス光出力波長 $\lambda_{1出力}$ に対し、及び（必要に応じて）それぞれの間接次数ストークス光波長に対し、ラマンファイバ入力においてシード光を与えることが好ましいと示唆する。これが、例えば、（第1のパルス光出力に対する）シード光源112及び（間接次数ストークス光の1つに対する）シード光源114を示す、図1に示される。原理的には、それぞれのシード光において数マイクロワットのパワーを与えるだけで十分であるが、より高い（10 mWまでの）パワーを与えることによって、必要なラマンファイバ長が短くなり、変換効率が若干高くなり、雑音が若干低くなるであろう。（本明細書でポンプとも称される）パルス光源102も、間接次数ストークス光にシード光を与えるレーザ104も、ラマン利得の比較的弱い（1 nm未満で一般に十分である）波長依存性により、非常に狭いスペクトル出力を有することが必要であり、多重縦モード構造を有することができる。第1の出力波長 $\lambda_{1出力}$ に対するシード光源112に対するシード光源112は狭いスペクトル線を与えることが好ましく、単一周波数を与えることがさらに好ましい。誘導ラマン散乱で上げられるであろうから、ラマン波長変換器106の出力のスペクトル幅はシード光源112のスペクトル幅とほぼ同じになるであろう。すなわち、狭いスペクトル線を持っていれば、高調波変換段において高変換効率を達成し得ることを（好ましくは線幅が100 pmより狭い）高コヒーレントシード光源112が保証するであろう。外部キャビティ型、DFB型、DBR型または縦キャビティ型の半導体ダイオードレーザが最も適しているが、単一周波数DFB型または単一周波数DBR型のファイバレーザも、また固体レーザも、第1の出力のシード光源112として用いることができる。

【0025】

ラマン過程は偏波選択性であるから、ポンプ光102並びにシード光112、114の全てが偏極していて、それぞれの出力の偏波状態がラマン変換ファイバ106'の入力において揃えられていることが重要である。ラマン変換ファイバ106'は偏波保存ファイバであることも好ましく、そうでなければ、変換器出力の楕円性を補正し、高調波発生器（変換器）110に用いられる非線形結晶の光軸に対してそれぞれの偏波状態を揃えるために、1/2波長板と1/4波長板の組合せが必要であろう。技術上周知のように、位相整合を達成するため、あるいは次数の異なる高調波光が結晶を通して同じ速度で伝搬することを保証するために、非線形結晶の光学複屈折特性が普通用いられる。

【0026】

ラマン変換器106は用いられるラマン変換ファイバ106'のタイプにしたがって構成されなければならない。発明者等の数値計算及び予備実験により、以下で説明されるように、シリカベースファイバ106'は比較的短い長さで高変換効率を達成するに十分に大きいラマン利得を有することが示された。所望のピークパワーレベル及び平均パワーレベルに依存して、大きなモード面積を有するように、また光損傷を避けるように、ファイバが構成される必要があり得るであろう。シリカベースファイバについてのラマン利得は

、ポンプ（すなわちパルス光源 102）の光周波数からほぼ 13.4 THz 及び 14.6 THz にある、2つの近接するピークを有する。ポンプ光波長 λ_p 、中間次数ストークス光波長及び出力シード光波長は、光周波数ドメインにおいていずれの連続する2つも、好ましくは 12.5 THz と 14.7 THz の間にあるように、さらに好ましくは与えられた変換ファイバについてのラマン利得の最大値に正確にあるように、選ばれる。

【0027】

本実施形態にしたがえば、光源 102 によって与えられるパルス幅は 0.1 ~ 100 ns であり、パルスのデューティサイクルは 1 : 2 ~ 1 : 1000 である。最適効率のためには、光パルス幅及び繰返し周波数に対する要件を考察することが重要である。原理的に、光パルス幅に上限は全くない。しかし、数ナノ秒より長いパルスに対しては、ファイバにおける誘導ブリュアン散乱（SBS）が変換され得る最大パワー量を制限することができ、ポンプ光スペクトルが SBS を抑制するに十分に広いことが保証されなければならない。また、結晶における非線形変換効率を高めるためには、デューティサイクル（パルス幅と繰返し時間の比、ピークパワーに対する平均パワーの比でもある）が 1 : 100 より低い値であることが望ましいが、これは、10 ns より長いパルスに対して、繰返し周波数を、目標が擬似 CW 源を形成することであれば望ましくない 1 MHz より低い値に制限するであろう。他方で、光パルスが短すぎれば、ラマン変換効率はファイバ分散によって生じるポンプ光とストークス光の間の時間に関するウォークオフによって影響を受けるであろう。したがって、ラマン変換ファイバがポンプ光及びストークス光の群速度を整合させるように特に設計されていない限り、パルスを 300 ps（0.3 ns）より短くしないことが好ましい。したがって、パルス幅に対する好ましい範囲は 0.3 ~ 10 ns であり、対応する繰返し周波数範囲は 1 ~ 30 MHz である。いかなるパルス「ウイング」の存在も不完全な変換を生じさせるであろうから、パルス形状は可能な限り完全な矩形に近いことも好ましい。別の重要な問題は、以降の高調波変換の効率に有害であり得る、自己位相変調（SPM）として知られる非線形光効果によりラマン変換器出力に課せられるスペクトル拡幅の大きさである。技術上周知であるように、光強度が時間的に変化していれば、SPM は光周波数変化だけをおこさせ、その結果、スペクトル拡幅が生じる。したがって、上辺が平坦で立ち上がり時間及び立下がり時間が可能な限り最短の、ほぼ完全な矩形パルスが SPM の影響を最小限に抑えるために好ましい。

【0028】

本明細書に定義されるように、術語「非線形ファイバ」は、（ファイバを含む）光導波路であって、少なくとも 1 つの（一次の）ストークス光の発生に対する光パワー閾値が光導波路を構成している材料に対する光損傷閾値をこえない基本導波路モードに対して十分大きなラマン利得、十分大きい長さ、十分低い減衰及び十分小さな有効面積を有する光導波路を指す。

【0029】

透明（すなわち低損失、すなわちラマンファイバだけで与えられるラマン利得の 1/2 より小さい損失）であり、ポンプ光波長及び必要な全ての次数のストークス光波長において十分なラマン利得を有する、適するガラス材料が存在すれば、多段誘導ラマン散乱過程によって、任意の大きさの波長シフトを達成することができる。したがって、パルスレーザ、ラマン波長変換過程及び適切な高調波発生器を用いれば、原理的に、可視範囲及び UV 範囲の波長を含むいかなる所望の出力波長も発生させることができる。非線形ラマン変換ファイバ 106' は、中赤外波長範囲で透明な光学ガラスで作成することができ、ガラスは、硫化物、セレン化物、テルル化物、（GeO₂ ベースの）ゲルマニウム酸塩、（Al₂O₃ ベースの）アルミン酸塩及び（TeO₂ ベースの）亜テルル酸塩からなる群から選ばれる材料でつくられることが好ましい。

【0030】

レーザシステム 10 の出力パワーは、ラマンファイバ 106' の作成に用いられたガラスへの光損傷によってのみ制限され、原理的には数 100 ワットに達し得る。ラマンファイバを作成するためのガラス材料の選択は出力波長及び出力パワーの要件で規定される。

石英ガラスベースの材料は、800～1900nmの波長範囲において、透明度が高く、光損傷閾値が高く、比較的短いファイバ長における高効率変換を達成するに十分にラマン利得が高いことから、好ましい。さらに高いラマン利得または異なる波長範囲が望ましければ、他のタイプのガラスも用いることができる。

【0031】

ピークパワーが高いパルス光源102からのポンプ光パルスを用いれば、比較的短い長さのラマンファイバ106'において変換を完了することが可能になる。理論最大パワー変換効率はポンプ104の光子エネルギーに対するラマンファイバ出力108の比で定義され、したがって90%に達することが（こえることさえも）できる。例えば、1056.3nmのポンプ光波長 λ_p のシリカファイバにおける1178nmの二次ストークス光

10

【0032】

必要に応じて、パルス光源102の平均パワー及びピークパルスパワーを高めることができるようにパルス光104を増幅するため、初パルス光源102'（本実施形態においてはパルス動作親発振器）と非線形ラマン変換ファイバ106'の間に高パワー光増幅器105が結合される。このようにすれば、十分に開発されたファイバ増幅器技術に基づく、費用効果の高いポンプ源を増幅器105のために用いることができる。高パワー光増幅器105は初パルス光源102'とともに親発振器-パワー増幅器(MOPA)を形成する。本発明の方法及び装置はYbドープまたはErドープのファイバ光増幅器を含むポンプ源に特に適するが、他のタイプのパワー増幅器105を有する他のポンプ源とも用いること

20

【0033】

本発明のいくつかの実施形態にしたがえば、光源102は原波長 λ_p の同調のために波長可変レーザを有し、原波長の同調により最終出力波長 $\lambda_{出力}$ を微調することができる。

【0034】

励起状態の寿命が非常に長い（数ms）ことから、希土類（例えば、ErまたはYb）ドープファイバ増幅器は本質的に入り信号の平均パワーを増幅し、非常に小さいデューティサイクルに対しては平均パワー出力が中程度でしかない増幅器105で非常に大きなピークパルスパワーを発生することができる。例えば、親発振器102'からの（例えば分布帰還(DFB)型レーザダイオードの直接変調による）1ns長パルスは、多段ErまたはYbドープ増幅器105において20kWのピークパワーに増幅することができるが、繰返しレートが100kHzであれば（ピークパワーは10000×平均パワーになる）、パワー増幅器105の平均出力パワーは2Wに過ぎない。そのような大ピークパワーにより、数m長でしかないシリカベースファイバにおいて高効率ラマン変換を行うことができるであろう。

30

【0035】

パルス幅を設定するための電気パルス発生器による半導体レーザダイオードの直接変調またはダイオード出力の個別の電気光学強度変調器への接続を、さらに増幅するかまたは増幅せずに（すなわち光増幅器105を用いるかまたは用いずに）パルス光104を発生するための、初パルス光源102を作成するために用いることができる。上述したように、変換効率を最大化すし（パルスウイングにおける不完全変換の効果を最小限に抑え）、（自己位相変調(SPM)による）スペクトル拡幅を最小限に抑えるためには、矩形パルスを形成することが好ましい。Er、Yb、Tm及びNdドープ増幅器105は比較的広い（数10ナノメートル）スペクトル利得帯域幅を有するから、パルス光源102を、またはレーザシステム10全体を、（直接に変調されるかまたは個別の変調器に結合された、外部キャビティ型半導体レーザのような）波長可変親発振器パルス源102'を用いることで波長同調可能とすることができる。

40

50

【0036】

多段ラマン波長変化の順次性を説明するため、図2は、ジー・ヴァレイユ (G. Vaireille), オー・オウドゥイン (O. Audouin), イー・デザーヴィル (E. Desurvire) の論文 (Electronics Letters, 1998年, 第34巻, 第7号, p.675) に提示されているパワー方程式と単一モードシリカベースファイバの代表的パラメータの結合に基づく単純化した数値モデル計算の結果を示す。モデルにおいて、光源102のパルス光性は(簡単化のため)無視され、代わりに、1000Wの、原波長 λ_p が1056.3nmの連続波(CW)ポンプ光パワーが一次ストークス光及び二次ストークス光のための少量(10^{-6} W)のシードパワーとともに、非線形ラマン変換ファイバの入力に直接に供給される。図2は光パワー対ラマン変換ファイバ106'の長さのグラフである。図2に示されるように、ポンプ波長 λ_p の出力光パワーは、二次ストークス光への変換段階が始める前に、波長1114nmの一次ストークス光に完全に変換される。グラフはそれぞれの変換段階に対してほぼ12.5mのファイバ長が必要であり、全パワーが25mの長さにおいて90%の効率で二次ストークス光(1178nmの出力波長 $\lambda_{1出力}$)に変換されることも示す。変換はファイバの1回通過で達成され、誘導ラマン散乱の無共振性及び自己位相整合性により、ファイバ分散、減衰または実効面積のファイバの長さに沿う変動にほとんど影響されない。すなわち、パルス動作多段ラマン波長変換器の動作は、非線形変換ファイバ106'の分散、損失及び実効面積の変動に左右されない点で有利である。

10

【0037】

本発明を理解するためには、非線形ラマン変換ファイバ106'の色分散に対する要件を論じることが重要である。パルス動作多段ラマン波長変換器106の動作に対する主要要件は、非線形ラマン変換ファイバ106'がその長さに沿ういかなる点においても、少なくとも、原波長 λ_p 及び第1の出力波長 $\lambda_{1出力}$ 、またその点を通ずるいずれの中間次ストークス光の波長に対しても、常(負)分散を有することである。常(負)分散は、ソリトン効果によって生じるパルス分裂、4光波混合、雑音増幅及びパラメトリックまたは変調不安定性効果による自然放出で生じるスペクトル線拡幅、及び「寄生」スペクトル線発生のような、多段ラマン変換効率に有害な非線形光効果を防止するために必要である。

20

【0038】

ファイバ導波路設計の既知の手法を用いてファイバ分散が常(負)分散であることを保証することができる。標準的なドープトファイバまたは、クラッド層がファイバ長に沿って走る多数の孔を含む、微細構造化ファイバを用いることができる。

30

【0039】

上で論じた有害な非線形効果を抑制するに十分であり続けるファイバ分散の最小絶対値を定めることは、その値がポンプパルスの立ち上がり時間及び立下がり時間を含む多くの要因に依存するから、困難である。最近の光通信システムにおいて、4光波混合を抑制するには約2~3ps/nm/kmの分散で十分であると通常考えられている。しかし、光伝送に用いられるパワーレベルは通常、本明細書で論じられるパワーレベルよりかなり低い。したがって、本発明は、ファイバ分散が-5ps/nm/kmよりも負であれば好ましいと教示する。ファイバ分散は-10~-100ps/nm/kmの範囲にあることが好ましい。

40

【0040】

他方で、非線形ラマン変換ファイバ分散の絶対値が大きすぎることは、変換効率の低下及びパルス形状歪を生じさせる、次数の相異なるストークス光のパルスの時間に関する「分散ウォークオフ」(すなわち、分散による、異なる波長の光パルスの分離)を避けるため、許容され得ない。許容値はパルス幅及び1つの変換段階が完了するに必要なファイバ長(図2の例では12.5m)に依存するが、一般には、ウォークオフ量がパルス幅の10%より小さいことが好ましい。

【0041】

発明者等は、上述したラマン変換器106において高変換効率及び高平均出力パワーとともに得られる可能性の予備解析を行った。純シリカクラッド層及び、コアとクラッド層

50

の間の屈折率すなわち屈折率デルタの差が0.0007になるようにGeO₂を僅かにドーピングした、22 μm径コアをもつ光ファイバ106'を作成した。ラマン変換器106の数値モデルには、光強度の時間依存性、自己位相変調及び相互位相変調及び4光波混合のような非線形光効果を考慮に入れ、例えば、実効モード面積、色分散及びラマン利得のような、ファイバの実測パラメータ値を組み入れた。図3A及び3Bは、立ち上がり時間及び立下がり時間が100 psでピークパワーが25 kWの400 ps長光パルスを供給するパルス光源102を備えるレーザシステム10に対するモデル計算結果を示す。発明者等は、シード光源112, 114等が四次までのストークス光の全てに対して1.0 mWのCWパワーを与えると仮定した。図3Aは二次ストークス光の（デューティサイクルにわたって平均した）平均パワーのファイバ106'内の位置に関する依存性を示す。図3Aから明らかなように、26 m長ファイバ106'に対してほぼ80%の二次ストークス光波長への平均パワー変換効率を達成できる。三次ストークス光への変換について、モデルは36 mのファイバ長に対して最大で69%の平均パワー変換効率を予測している（図示せず）。図3Bはファイバ内の様々な位置での二次ストークス光信号パルス形状を示す。ピークパワー変換効率は、図3Bに見られるように、波長変換されたパルスが、パルスウィングにおける不完全変換により、入力パルスより若干短くなり、さらに矩形に近づいていることから、上記のパーセント値よりさらに高いと結論することができる。

【0042】

Nd:YAGレーザからの1064 nmの400 ps長パルスでラマン変換ファイバ106'をポンピングする実験も行った。図4は、38 mのファイバ長について、非線形多マン変換ファイバ106'の終端における出力パルス信号スペクトルを示す。上に説明したように、与えられた入力パルスピークパワーに対するファイバ長の選択によって、どの次数のストークス光で変換が終結するであろうか（図4の場合については二次ストークス光）が一意的に決定される。図4は、ラマン変換ファイバの出力における原波長 λ_p 、一次ストークス光波長及び二次ストークス光波長に対応する相対パワーを示す。図4からわかるように、Nd:YAGレーザによって供給される1064 nm光から二次ストークス光への変換効率はほぼ60%（すなわち、 $\sim 4/7$ ）であるが、一次ストークス光及び二次ストークス光のいずれにもシード光は与えられておらず、入力パルス形状は、最適な矩形とは非常に異なる、二重指数形であり、この結果、かなりの量のポンプ光（ λ_p ）及び一次ストークス光が出力に未だに存在している。二次ストークス光パルスエネルギーの測定値は約10 μJであり、これは出力パルスピークパワーが約25 kWであったことを意味する。1:100のデューティサイクルに対し、これはラマン変換器106からの250 Wの平均出力パワーに相当するであろう。提示された数値計算結果及び実験結果に基づけば、平均出力パワーが数100 W及びピーク出力パワーが数10 kWの二次及び三次のストークス光への、50%をこえる変換効率での、パルス光信号のラマン波長変換が完全に可能であると結論付けることができる。三次より高い次数のストークス光も発生させることができるが、効率は漸減的に低下していく。

【0043】

上に既述したように、Ybドーピングファイバレーザシステムではほぼ1030~1120 nmの出力波長範囲を直接に扱うことができる。三次ストークス光までの（ラマン変換器106による）ラマン波長変換により、この範囲は実効的に1030~1340 nmまで拡張できる。したがって、二次高調波発生によって515~770 nmの範囲、三次高調波発生によって343.3~446.7 nmの範囲、四次高調波発生によって257.5~335 nmの範囲、以下同様の、出力波長 $\lambda_{出力}$ を発生させることができる。1530~1570 nmの範囲に対してはEr-Yb共ドーピング、890~930 nmの範囲に対しては（3準位遷移で動作する）Ndドーピング、また1800~2000 nmの範囲に対してはTmドーピングの、シリカベースファイバを備えるシステムのようなその他のタイプのファイバレーザシステムも、ラマン波長変換器106のポンピングに用いることができる。本発明の実施形態にしたがう、唯一の要件は、対応するラマン変換器106の出力波長に適する狭スペクトル線シード光源の利用可能性である（中間次ストークス光波長へのシード光

10

20

30

40

50

供給は肝要ではないが、変換効率を向上させるであろう)。それぞれにおそらくラマン波長変換器及び高調波発生器が後続する、2つの異なるファイバレーザの出力の、適する非線形結晶内での、和周波混合によってさらに別の出力波長 $\lambda_{出力}$ を発生させることができる。本発明の教示にしたがえば、150～775 nmの範囲のいかなる所望の出力波長 $\lambda_{出力}$ も、以下で説明されるように、1つないし2つのパルスファイバレーザ、ラマン変換器、高調波発生器及び和周波混合段の適する組合せによって発生させることができる。

【0044】

発明者等は、特定の用途に注目した、いくつかの特定の出力波長を発生するレーザシステム10の実施例を以下に提示する。以下の例示の実施形態において、高調波発生器110に用いられる非線形結晶を、光損傷閾値が最も高く、したがって高調波変換によってより高いパワーを発生することができることが知られている、ホウ酸塩結晶(LBO, BBO, CLBO)に限定して、高調波発生器110を設計することを発明者等は選択する。当業者であれば、これらの実施例がラマン波長変換技術の使用によって開かれるほぼ無限の数の可能性の内の数例でしかないこと、及びその他の非線形結晶も用い得ることを認めるであろう。

【実施例1】

【0045】

$\lambda = 589.16 \text{ nm}$ のナトリウムD2線を発生させるためのレーザシステム

上層大気内の原子ナトリウム励起で発生する、ナトリウムビーコンは適応光学系に対する「案内星」として用いることができ、したがって先端レーザベース防衛システム用途で非常に注目されている。この目的には、波長が589.1 nmのナトリウムD2吸収線に同調させた高パワーのCW源または擬似CW源が必要である。

【0046】

589.1 nmの出力を発生するための例示的レーザシステム10が図5に示される。図5に示される実施形態において、パルス光源102はYbドープファイバシステム(親発振器-パワー増幅器(MOPA))である。このMOPA102がラマン変換器106に $\lambda_p = 1056.3 \text{ nm}$ のパルス光を供給する。1056.3 nmパルス光104はラマン変換器106により、多段誘導ラマン散乱過程を介して、第1の出力波長 $\lambda_{1出力} = 1178.32 \text{ nm}$ を中心とする光スペクトルをもつ第1の出力信号108に変換される。 $\lambda_{1出力} = 1178.32 \text{ nm}$ は石英ガラスについての二次ストークス光波長1056.3 nmに対応するから、損失が低く、光損傷閾値が高いシリカベース変換ファイバ106'をラマン変換器106に用い得ることが利点である。高調波発生器110は非線形結晶LBO(三ホウ酸リチウム(LiB_3O_5))結晶110Aを有し、必要に応じて、いずれも参照数字110Bで示されるラマン変換器106からの第1の光出力108を集束するレンズとLBO結晶110Aからの最終光出力をコリメートするレンズを有する、二次高調波発生器である。本実施形態の二次高調波発生器110は第1の出力波長 $\lambda_{1出力} = 1178.32 \text{ nm}$ を、 $\lambda_{出力} = \lambda_{1出力} / 2 = 1178.32 / 2 = 589.16 \text{ nm}$ の、最終出力波長に変換する。

【0047】

レーザシステム10が所望の出力波長 $\lambda_{出力}$ で動作するように設計するために、課題を逆行的に処理することができる。すなわち、非線形結晶に関して入手できるデータから、 $\lambda_{出力} = 589.16 \text{ nm}$ を1178.32 nmの二次高調波としてLBO結晶110Aで発生させ得ることが知られる。したがって、 $\lambda_{1出力} = 1178.32 \text{ nm}$ が利用できれば、 $\lambda_{出力} = 589.16 \text{ nm}$ を得ることができる。シリカベース光ファイバのラマン利得に関して入手できるデータから、1178.32 nmが、Ybドープファイバレーザシステムで扱うことができる波長範囲内に入る、1056.3 nmからの2次のストークスシフト波長であることが知られる。したがって、本発明にしたがう、589.16 nmの出力をもつレーザシステムは、 $\lambda_p = 1056.3 \text{ nm}$ のYbドープMOPAを始めにして設計することができる。所要の最終波長 $\lambda_{出力}$ が589.16 nmから若干異なれば(例えば576～622 nmの範囲内にあれば)、適切な波長 λ_p を供給するようにYbド

10

20

30

40

50

ープMOPAを同調させ得ることに注意されたい。さらに詳しくは、1030～1120 nmの出力を供給するようにYbドープMOPAを同調させることができ、この波長範囲はシリカファイバ内で2次ストーク光波長1152～1244 nmにシフトさせることができ、この波長は続いて576～622 nmの $\lambda_{出力}$ に相当する。

【0048】

図1を参照して上述したように、図5に示される例示実施形態において、ラマン変換器出力波長、すなわち1178.32 nmに対するシード光がラマン変換ファイバ106'の入力に与えられなければならない。対応するシード光源112は、外部キャビティ型ダイオードレーザまたは縦キャビティ型レーザまたは、好ましくは単一の狭幅スペクトル線出力をもつ、固体レーザとすることができる。必要に応じて、変換効率を高めるため、1114 nmの一次ストークス光の波長の、第2のシード光も第2のシード光源114から与えられる。1114 nmはYbドープレーザで得られる波長範囲内にあるから、第2のシード光源114はファイバブラッグ格子反射器をもつYbドープファイバレーザとすることができるが、もちろん、他のダイオードレーザ、ファイバレーザまたは固体レーザを用いることもできる。

【0049】

図5のMOPA（光源102）の例示的構成が図6に示される。初光源102'（親発振器）は、レーザダイオード102A'及び光増幅器105（パワー増幅器）に供給されるパルス光104を発生するための電気光学変調器（EOM）102B'を有する。この変調器は、光パルスを形成し、パルス幅を設定するために用いられる。本実施形態のレーザダイオード102A'は1056.3 nmにおいて100 mWを出すファイバブラッグ格子（FBG）安定化CWダイオードレーザであり、EOM102B'は2 MHzの繰返しレートにおいて2 ns長パルスを形成する（デューティサイクル1：250）ために用いられるニオブ酸リチウム強度変調器である。EOM102B'による挿入損失を6 dBとすれば、EOM102B'の出力における平均光パワーは0.1 mWまで減少する。MOPAのパワー増幅器部分は4段のファイバ増幅器105A～105Dを有し、2つの増幅段105A及び105BにはYbドープ単一モード偏波維持ファイバが用いられ、2つの増幅段105C及び105DにはYbドープ偏波維持二重クラッドファイバが用いられる。Ybドープファイバは増幅を行うために976 nmのポンプ光でポンピングされる。第1の増幅器段105Aが30 mWの平均パワー出力を供給し、第2の増幅段105Bがこれを400 mWまで増幅し、第3の増幅段105Cがさらに5 Wまで増幅し、最終増幅段105Dは繰返しレートが2 MHzの2 nsパルスにおいて140 Wの平均光パワー出力及び35 kWのピーク光出力パワーを供給する。変調器102B'が5 GHzより広い電氣的帯域幅を有するとすれば、立ち上がり時間及び立下がり時間が100 psより短いほぼ矩形のパルスを生成することができるはずである。挟帯域光フィルタ105Eが、最終増幅段105Dを除く、増幅段105A～105Cのそれぞれの後に挿入される。単一モードファイバ段105A、105Bに続く2つのフィルタは光サーキュレータ及びFBGを用いて構成され、増幅段105Cの最終フィルタは自由空間光アイソレータ内の薄膜デバイスであり、よって、同時に増幅段の相互分離のため及びスペクトル帯域が広い増幅された自然放出の蓄積の低減のためにはたらく。当業者であれば、この例示構成に対し、異なるファイバ、異なる増幅段数、異なるパワー、異なるパルス幅及び異なる繰返しレートをもつ、多くの変形が可能であることを認めるであろう。外部変調器をもつ別のタイプのCW光源あるいは直接変調ダイオードレーザをMOPAのための初光源として用いることができる。

【0050】

シード光源112、117からのラマンシード光と混合されたMOPA出力は、図1に示されるように、ラマン変換ファイバ106'に投射される。波長変換は1114 nmの一次ストークス光を経て1178.32 nmの出力二次ストークス光に進行する。ポンプ光と一次ストークス光の間の周波数シフト及び一次ストークス光と二次ストークス光の間の周波数シフトはいずれも、石英ガラスにおけるラマン利得のピークの1つに対応する、

14.69 THzになるように選ばれる。上述したモデル計算及び予備実験の結果に基づけば、MOPA出力パワーの少なくとも50%すなわち70Wが1178.32 nmの単一周波数出力に変換されるであろうと期待される。上述したように、第1の出力信号108は次いで、本実施形態ではLBO結晶110Aを有する（図5を見よ）、高調波発生器110に供給される。LBO結晶110Aは二次高調波発生器である。LBO結晶110Aはラマン変換器106から1178.32 nmの第1の出力波長 $\lambda_{1出力}$ を受け取り、所望の589.16 nmの波長 $\lambda_{出力}$ を供給する。さらに詳しくは、1178.32 nmの二次高調波に対して、0.84 pm/Vの実効非線形係数値をもってノンクリティカル位相整合を達成するため、LBO結晶温度は313 Kに調節される（ $\theta = 90^\circ$ におけるいわゆるノンクリティカル位相整合は、これによって第2高調波発生に対する角度及びスペクトルの最大アクセプタンスが可能になり、ポンプ光ビーム及び二次高調波光ビームの複屈折ウォークオフがゼロまたはほぼゼロという特徴をもち、このことから中程度のピークパワーレベルで高変換効率を達成するために長い結晶を用いることが可能になるから、最も好ましいタイプの位相整合である）。

10

【0051】

下表Iは実施例1のレーザシステム10に用いられた結晶（LBO110A）のパラメータの摘要を与える。

【表1】

表I：図5のレーザシステム10に対する位相整合パラメータ計算値

20

結晶	LBO
非線形過程	SHG
第1の入力 λ , nm	1178.32
第2の入力 λ , nm	1178.32
出力 λ , nm	589.16
位相整合温度, K	313
位相整合角 θ , $^\circ$	90
位相整合角 ϕ , $^\circ$	0
実効非線形係数 $d_{実効}$, pm/V	0.84
複屈折ウォークオフ, mrad	~0

30

【0052】

表Iでは、以降の実施例の全てと同じく、用いられる非線形結晶のタイプが第1行に示され、結晶が行う非線形過程が第2行に示される。出力波長及び2つの入力波長（非線形過程が二次高調波発生である場合、2つの入力波長は同じである）が第3行～第5行に示される。第6行は結晶温度を与え、第7行～第8行は位相整合に必要な結晶光軸に対する伝搬方向角を与える（LBOはいわゆる双軸結晶である）。第9行に実効非線形係数（与えられた入力パワー及び結晶長に対して変換効率がどれだけであり得るかの尺度）が提示され、第10行は結晶の複屈折によって生じる入力ビーム及び出力ビームの角度ウォークオフ（結晶内の入力光と高調波光の僅かな角度ずれ）を与える。

40

【0053】

$\theta = 90^\circ$ （双軸結晶については、 $\psi = 0^\circ$ ）におけるノンクリティカル位相整合（NCPM）は、第2高調波発生に対する角度及びスペクトルの最大アクセプタンス（変換効率の有意な低下をおこさずに許容される伝搬方向及び波長の偏差）を可能にし、ポンプ光ビーム及び二次高調波光ビームの複屈折ウォークオフがゼロまたはほぼゼロという特徴をもち、このことから中程度のピークパワーレベルで高変換効率を達成するために長い結晶を用いることを可能にするから、最も好ましいタイプの位相整合である。

【0054】

本実施例及び以降の実施例についての、位相整合角及び温度の計算は、ホウ酸塩結晶の

50

実効非線形係数の計算とともに、Sandia National Lab.によるフリーソフトウェアパッケージの、S N L Oを用いて行った。二次高調波発生効率は少なくとも50%に達することができ、589.16 nmの波長で35 Wの出力が得られると考えられる。さらに高いM O P A出力パワー及び／またはさらに高いラマン変換効率を用いることにより、ナトリウムD2線において50 Wより大きな平均出力パワーを与えるレーザシステムの構築が可能である。

【実施例2】

【0055】

$\lambda = 198.7 \text{ nm}$ の出力を発生させるためのレーザシステム I

サブ200 nmレーザ光源は半導体工業における計測用途に非常に重要である。集積回路の最小寸法が縮小するにつれて、リソグラフィに用いられる光の波長が短くなる。したがって、マスク及びウエハの検査に、また光学素子の作成にも、同じかまたは同様のD U V光波長が必要になる。現在用いられている、固体レーザ源、高調波変換及びO P Oに基づくシステムは一般に、非常に低い繰返しレートで作動し、非常に大きくて扱いにくく、複雑で、高価であり、頻繁で煩雑なメンテナンスが必要である。

【0056】

図7は本発明の一実施形態にしたがう198.7 nmレーザシステム10の一例を示す。図からわかるように、1067.6 nm Y b ドープファイバM O P A 102が、上に開示した設計原理にしたがい1192.2 nmの二次ストークス光波長 $\lambda_{1 \text{ 出力}}$ の挟線幅出力を発生する、ラマン波長変換器106をポンピングする。この場合、一次ストークス光波長が1126.5 nmであれば、ストークス周波数シフトは14.67 THzであって、石英ガラスにおけるラマン利得ピークの1つに対応する。ラマン波長変換器106からの第1の出力信号108は次いで、本実施形態では、2つのL B O結晶110 A, 110 B及び1つのB B O (ベータホウ酸バリウム ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$)) 結晶110 Cを有する、高調波発生器110に供給される。3つの非線形結晶、L B O 110 A, L B O 110 B及びB B O 110 Cは、(i) 596.1 nmの波長を発生するL B O 110 Aによる二次高調波発生 (S H G)、(ii) (L B O 110 Bが298.05 nmの波長を発生する) もう1つのS H G及び(iii) 198.7 nm出力を発生するB B O 110 Cによる596.1 nmと298.05 nmの和周数混合 (S F M) によって、波長1192.2 nmの六次高調波光を発生するために用いられる。さらに詳しくは、L B O結晶110 A及び110 Bは二次高調波発生器 (S H G) である。L B O結晶110 Aはラマン変換器106から1192.2 nmの第1の出力波長 $\lambda_{1 \text{ 出力}}$ を受け取り、596.1 nmの出力を第2のL B O結晶110 Bに供給する。波長1192.2 nmのいかなる残留光もフィルタ (ダイクロイックミラー) 110 Dによって濾波されてシステムから除去される。L B O結晶110 Bは596.1 nm光を受け取り、その一部 (1~90%, 好ましくは50%) を298.05 nm光に変換する。L B O結晶110 Bを出た、この298.05 nm光は次いで、残留 (99%~10%) の596.1 nm光とともに、和周波混合 (S F M) によって所望の波長 $\lambda_{\text{出力}} = 198.7 \text{ nm}$ の光を発生する、B B O結晶110 Cに供給される。S N L Oソフトウェアによって予測されるように、第1のL B O結晶110 Aに最適な温度は304 ケルビンである。この温度において、結晶は、 $d_{\text{実効}} = 0.84 \text{ pm/V}$ の実効非線形係数及び1192.2 nmの二次高調波発生に対して本質的にゼロの複屈折ウォークオフをもって、(結晶の光軸に対して $\theta = 90^\circ$ 及び $\psi = 0^\circ$ の角度で伝搬する光に対して) ノンクリティカル位相整合で動作する。第2のL B O結晶110 Bはノンクリティカル位相整合させることができない。光軸に対して $\theta = 90^\circ$ 及び $\psi = 64.6^\circ$ で伝搬する光に対し、596.1 nmの二次高調波発生に対する位相整合温度は453 K (180°C) であり、実効非線形係数は $d_{\text{実効}} = 0.4 \text{ pm/V}$ であって、複屈折ウォークオフは14 ミリラジアン (m r a d) である。B B O結晶110 Cは単軸結晶である。光軸に対して $\theta = 81.3^\circ$ で伝搬する光に対し、596.1 nmと298.05 nmの和周波混合の非線形プロセスについての、位相整合結晶温度は453 Kであり、実効非線形係数は $d_{\text{実効}} = 0.59 \text{ pm/V}$ であって、複屈折ウォークオフは29.2 m r a dである

10

20

30

40

50

。表IIは実施例2のレーザシステム10に用いられる結晶パラメータの摘要を与える。

【表2】

表II：図7のレーザシステム10の結晶に対する位相整合パラメータ計算値

結晶	LBO	LBO	BBO
非線形過程	SHG	SHG	SFM
第1の入力 λ , nm	1192.2	596.1	596.1
第2の入力 λ , nm	1192.2	596.1	298.05
出力 λ , nm	596.1	298.05	198.7
位相整合温度, K	304	453	453
位相整合角 θ , °	90	90	81.3
位相整合角 ϕ , °	0	64.6	N/A
実効非線形係数 $d_{\text{実効}}$, pm/V	0.84	0.4	0.59
複屈折ウォークオフ, mrad	~0	14	29.2

注：BBOは単軸結晶であり、よって表IIには位相整合角が1つしか挙げられていない

【0057】

図7には、(i)それぞれの非線形結晶に付随する、一方はビームを集束して与えられた結晶についての変換効率最大化に最適なウエスト径にするためのレンズであって、他方は出力光を再コリメートするためのレンズである、2つのレンズL1及びL2、(ii)利用されない1192.5nm光を除去するダイクロイックミラーM、(iii)特注波長板WP、及び(iv)高調波分離光学素子セット110Eも示される。ビーム集束のための最適ウエスト径は、変換されている光のピークパワー、結晶の長さ及び光損傷閾値、複屈折ウォークオフの量、及びその他のパラメータに依存し、モデル計算から、または実験で決定することができる。波長板WPは、596.1nm光及び298.05nm光の偏極がBBO結晶の入力において同じであるように、これらの光の偏極のいずれか（ただし一方だけ）を回転させるように特注設計される。高調波分離光学素子セット110Eは、596.1nm光及び298.05nm光の両者からから198.7nm光出力を分離するために用いられ、分散ガラスでつくられた1つないしいくつかのプリズムを通常有する。簡単のため、これらの補助光学素子は以降の実施例に対して与えられる光学構成図には示されない。当業者であれば、いつ、どこで、そのような素子が用いられるべきかを決定できるであろう。

【0058】

図7のレーザシステム10の利点は、サブ200nm波長出力を発生させるために最小数（3個だけ）の非線形結晶が用いられることである。しかし、BBO結晶110Cにはかなりの複屈折ウォークオフがおり得る。ウォークオフが大きいとレーザビームの緊密な集束が可能にならず、したがって、より短い結晶またはより大きなビーム径（より低い光パワー密度）を用いなければならないから、変換効率が低くなる。ウォークオフの影響は180°回転された同じタイプの複数の結晶を用いれば軽減できるが、より多くの表面が高光パワーにさらされるであろうから、デバイスの有用寿命が短くなるであろう。拡散接合または無接着剤接合を用いて180°回転された結晶を合せてシームレスに接合することにより、余分な露出結晶表面を無くすることができる。数値モデル評価から、ラマンシフトを含む、総合変換効率は1：250のデューティサイクル（例えば、2MHzの繰り返しレート、2nsのパルスまたは8MHzの繰り返しレート、0.5nsのパルス）で動作している、平均パワーが100W、ピークパワーが25kWのMOPAに対して0.2%に達することができ、この結果、198.7nmにおいて200mWの平均パワー出力を得ることができる。

【実施例3】

【0059】

10

20

30

40

50

$\lambda = 198.7 \text{ nm}$ の出力を発生させるためのレーザシステムII

198.7 nm光出力を発生させるためのレーザシステム10の別の実施形態が図8に示される。本実施形態において、パルス光源102は1041 nm YbドープMOPAである。この光源102は、中間の1096.7 nm（一次）ストークス光及び1158.7 nm（二次）ストークス光（14.63 THzステップ）を経て1228.2 nm三次ストークス光の出力波長 $\lambda_{1 \text{ 出力}}$ を発生する、ラマン波長変換器106をポンピングする。高調波発生器110は4つの変換段、すなわち、3つのLBO結晶110A、110B、110C及び1つのCLBO（ホウ酸セシウムリチウム（ $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ ））結晶110Dを有する。2つのLBO結晶110A及び110Bは周波数通倍すなわちSHGによってラマン変換器出力の二次高調波（614.1 nm）及び四次高調波（307.05 nm）を順次に発生させるために用いられる。第3のLBO結晶110Cは、SFM（和周波混合）により、第1のLBO結晶110Aの出力における残留（10～90％、好ましくは50％）1228.2 nm光を第2のLBO結晶110Bの出力からの四次高調波（307.05 nm）と混合して、245.64 nm（1228.2 nmの五次高調波）の光出力を発生する。第2の高パワー増幅段102Bが1041 nmの第2の出力の発生のためにMOPAに付加され（2つの個別高パワー段を有する理由は、それぞれの高パワー段のピークパワーを増幅器ファイバに対する非線形歪及び損傷の閾値より低い値に保つことである）、この1041 nm光はCLBO結晶110Dで245.64 nm光と混合されて、SFMにより、最終的に198.7 nmの出力波長 $\lambda_{\text{出力}}$ が発生される。表IIIは実施例3のレーザシステム10に用いられる結晶のパラメータの摘要を与える。

【表3】

表III：図8のレーザシステム10に用いられる結晶に対する位相整合パラメータ計算値

結晶	LBO	LBO	LBO	CLBO
非線形過程	SHG	SHG	SFM	SFM
第1の入力 λ , nm	1228.2	614.1	1228.2	1041
第2の入力 λ , nm	1192.2	614.1	307.05	245.64
出力 λ , nm	614.1	307.05	245.64	198.7
位相整合温度, K	290	453	453	453
位相整合角 θ , °	90	90	90	85.7
位相整合角 ϕ , °	0	59.3	62.8	N/A
実効非線形係数 $d_{\text{実効}}$, pm/V	0.83	0.47	0.46	1.08
複屈折ウォークオフ, mrad	～0	15.8	16	6.5

【0060】

本発明のこの実施形態にしたがうレーザシステム10の設計においては、本実施形態ではLBO110C及びCLBO110Dに相当する、第3及び第4の変換段（SFM）の入力において「色」（すなわち）波長の異なる光パルスが時間に関して確実に揃えられるように特に注意が払われなければならない。これは、例えば、補助のミラーまたは平行平面ガラスブロックを導入することによって、光路長を慎重に整合させることで達成できる。198.7 nm光出力に加えて、残留の614.1 nm光、307.05 nm光及び245.64 nm光を、必要とされる用途があればレーザシステム出力において供給することができ、あるいは、波長選択性（例えばダイクロイック）ミラーまたは高調波分離器のような、フィルタで除去することができる。当業者であれば、本実施例及び他の実施例において、正確に同じ波長の組合せであっても、必要な変換を行うために異なる非線形結晶を用い得ることを認めるであろう。例えば、第2変換段（四次高調波発生）においてLBO

110Bの代りにADA（ヒ酸二水素アンモニウム（ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$ ））結晶を用い、第3次変換段（SFMによる五次高調波発生）においてLBO110Cの代りにADP（リン酸二水素アンモニウム（ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ））結晶を用いれば、いずれも、対応する非線形過程に対して、温度調整によりノンクリティカル位相整合させる（すなわち、双軸結晶に対して $\theta = 90^\circ$ 及び $\psi = 0^\circ$ とする）ことができる。図8のレーザシステム10は図7のレーザシステムより複雑である。図8のレーザシステム10は3つの結晶の代りに4つの結晶を用い、ラマン変換器は三次と二次のストークス光を供給する。しかし、図8のレーザシステム10は1つの極めて重要な利点を有する。最後の結晶（CLBO）はノンクリティカル位相整合条件にさらに一層近づいており、したがって、複屈折ウォークオフをほとんど無視することができる。さらに、高ピークIR（1041nm）光パワーがYbドープMOPAから直接に供給される。この結果、UV光パワーに関する変換効率を80%に近づけることができ、したがって、同じDUV（深UV）光パワー出力を達成するためには、CLBO結晶への入りUV光パワーを最小にし、よってCLBO結晶への光損傷を最小限に抑える必要があるであろう。図8に示される光パワー値も、さらに温度、位相整合角、実効非線形係数及び複屈折ウォークオフ値も、ガイドラインとして与えられているに過ぎないことに注意されたい。別の構成及び動作温度も用いることができる。SNLOソフトウェアの予測に基づけば、それぞれが100W及び32Wの平均パワーを送り出すYbドープMOPAの2本の分枝から、198.7nmで2Wの出力を発生することができ、これは総合変換効率に換算すると、図7のレーザシステム10の総合変換効率より少なくとも7倍高い、1.5%になる。

【実施例4】

【0061】

$\lambda = 198.7\text{nm}$ の出力を発生させるためのレーザシステムIII

図9のレーザシステム10は図8のレーザシステムと同様である。図9のレーザシステム10は同じパルス光源102及び、最初の結晶110A及び最後の結晶110Dに波長 $\lambda_{1\text{出力}}$ が1228.2nmの光出力を供給する、ラマン変換器106を備える。しかし、ラマン変換器の1228.2nmの三次高調波（409.4nm）光出力はLBO結晶110Bにおける二次高調波（614.1nm）光と原1228.2nm光を混合するSFMによって発生され、1228.2nmの五次高調波（245.64nm）光は、ここでは、CLBO結晶110Cにおける二次高調波（614.1nm）光と三次高調波（409.4nm）光を混合するSFMによって発生される。第2及び第3の変換段における結晶110B及び110Cの実効非線形係数がより高いこと及び第2変換段への（すなわちLBO結晶110Bへの）入力により高いパワーを利用できることから（それぞれの数値は図9に示される）、本実施形態のレーザシステム10に対する（数値モデルで予測される）総合変換率は図8のレーザシステムの総合変換率よりさらに高く（2.1%をこえ）、高調波変換器110の第4変換段（CLBO結晶110D）の出力において少なくとも3Wの198.7nmDUV光が得られるはずである。表IVは実施例4のレーザシステム10に用いられる結晶のパラメータの摘要を与える。

【表 4】

表IV：図 9 のレーザシステム 10 に用いられる結晶に対する
位相整合パラメータ計算値

結晶	LBO	LBO	CLBO	CLBO
非線形過程	SHG	SFM	SFM	SFM
第 1 の入力 λ , nm	1228.2	1228.2	614.1	1041
第 2 の入力 λ , nm	1228.2	614.1	409.4	245.64
出力 λ , nm	614.1	409.4	245.64	198.7
位相整合温度, K	290	453	453	453
位相整合角 θ , °	90	90	71.4	85.7
位相整合角 ϕ , °	0	22.9	N/A	N/A
実効非線形係数 $d_{\text{実効}}$, pm/V	0.83	0.81	0.88	1.08
複屈折ウォークオフ, mrad	~0	12.4	23.8	6.5

10

【実施例 5】

【0062】

 $\lambda = 193 \text{ nm}$ の出力を発生させるためのレーザシステム I

20

193 nmレーザシステム 10 の一実施形態が図 10 に示される。本実施形態のレーザシステム 10 は 1 つの親発振器及び前置増幅器並びに 2 つの高パワー光増幅器を有するパルス光源 102 を備える。さらに詳しくは、1049.5 nm Yb ドープ前置増幅器の出力が分割され、2 つの高パワー増幅器で個々に増幅される。第 1 の増幅器 105₁ は 1169 nm の二次ストークス光信号を発生するラマン変換器 106₁ をポンピングし、第 2 の増幅器 105₂ は 1106 nm の一次ストークス光信号を発生する別のラマン変換器 106₂ をポンピングする。この場合、構成にはいくつかの変形が可能であり、例えば、一次及び二次のストークス光波長において同時に、当然より低いパワーで、光出力を発生するように単ラマン変換器を構成することができる。図示される構成において、第 1 のラマン変換器 106₁ に対して二次及び中間次のストークス光のための最終出力波長へのシード光供給に同じ狭線幅 1106 nm 光源を用いることができる。1169 nm 光の二次高調波 (584.5 nm) 光が第 1 の LBO 結晶 110A で周波数通倍 (SHG) によって発生され、三次高調波 (389.7 nm) 光が第 2 の LBO 結晶 110B で SFM によって発生される。二次及び三次の高調波光は CLBO 結晶 110C で SFM により混合されて、233.8 nm の五次高調波光が発生される。最後に、233.8 nm 光は別の CLBO 結晶 110D で第 2 のラマン変換器 106₂ の出力 (1106 nm) 光と混合されて、193 nm 光出力が発生される。

30

【0063】

表 V は実施例 5 のレーザシステム 10 に用いられる結晶のパラメータの摘要を与える。

【表 5】

表V：図 10 のレーザシステム 10 に用いられる結晶に対する
位相整合パラメータ計算値

結晶	LBO	LBO	CLBO	CLBO
非線形過程	SHG	SFM	SFM	SFM
第 1 の入力 λ , nm	1169	1169	584.5	1106
第 2 の入力 λ , nm	1169	584.5	389.7	233.8
出力 λ , nm	584.5	389.7	233.8	193
位相整合温度, K	320	453	420	453
位相整合角 θ , °	90	90	90	90
位相整合角 ϕ , °	0	27.1	N/A	N/A
実効非線形係数 $d_{\text{実効}}$, pm/V	0.84	0.79	0.95	1.12
複屈折ウォークオフ, mrad	~0	14.1	~0	~0

10

【0064】

4つの非線形結晶 110A, 110B, 110C, 110Dの内の3つがノンクリティカル位相整合で動作し、4つの結晶の全てが対応する変換に対して比較的高い実効非線形係数を示すという事実により、発明者等は、本構成手法が従前の4つの実施形態の内の最高変換効率（約2.0%）を達成でき、2つの高パワーYbドープ増幅器 105₁, 105₂から利用できる200WのIRパワーから出発して、193nmで4Wもの平均パワー出力を得られるであろうと期待している。

20

【実施例 6】

【0065】

$\lambda = 193 \text{ nm}$ の出力を発生させるためのレーザシステムII

193nmレーザシステム10の別の実施形態が図11に示される。本実施形態のレーザシステム10においては、 $\lambda_p = 1041 \text{ nm}$ で動作しているYbドープファイバMOPA102がこの波長のパルス光をラマン変換器106に供給する。次いでラマン変換器106は波長 λ_p の光を $\lambda_{1\text{出力}} = 1158 \text{ nm}$ の二次ストークス光に変換する。高調波発生器110は4つの非線形結晶—それぞれ、SHG及びSFMにより波長1158nm光の二次、三次、五次及び六次の高調波光を発生する、LBO110A, LBO110B, BBO110C及びCLBO110D—を有する。最終出力の六次高調波光の波長は $\lambda_{\text{出力}} = 193 \text{ nm}$ である。非線形変換パラメータの計算値が表VIに示される。この表からわかるように、BBO結晶110Cの動作にはかなりの複屈折ウォークオフがともない、このため、用いられるパワーレベルに依存して、長さが短い結晶または（楕円の長軸がウォークオフ方向に沿う）楕円ビーム集束を用いるか、あるいはこれらのいずれをも用いることが必要になり得る。表VIは実施例6のレーザシステム10に用いられる結晶のパラメータの摘要を与える。

30

40

【表 6】

表VI：図 11 に示されるレーザシステム 10 の結晶に対する
位相整合パラメータ計算値

結晶	LBO	LBO	BBO	CLBO
非線形過程	SHG	SFM	SFM	SFM
第 1 の入力 λ , nm	1158	1158	579	1158
第 2 の入力 λ , nm	1158	579	386	231.6
出力 λ , nm	579	386	231.6	193
位相整合温度, K	327	453	453	453
位相整合角 θ , °	90	90	58.4	80.4
位相整合角 ϕ , °	0	27.9	N/A	N/A
実効非線形係数 $d_{\text{実効}}$, pm/V	0.84	0.78	1.49	1.1
複屈折ウォークオフ, mrad	~0	14.4	79.8	14.6

10

【実施例 7】

【0066】

 $\lambda = 195.1$ nm の出力を発生させるためのレーザシステム

20

図 12 に示される本実施形態において、2つのパルス動作ファイバベース MOPA 源—
913 nm (Nd イオンに対するいわゆる 3 準位遷移) で動作する Nd ドープ MOPA 1
02₁ 及び 1081 nm で動作する Yb ドープ MOPA 102₂—が用いられる。Nd ド
ープ MOPA 102₁ は 952 nm (シリカファイバにおける 913 nm ポンプ光に対す
る一次ストークス光波長) の第 1 の出力を発生するラマン変換器 106 をポンピングする
。高調波発生器 110 は 3 つの非線形結晶を有する。初めの 2 つの結晶 110A 及び 11
0B はいずれも LBO であり、それぞれ、ラマン変換器の 952 nm 出力の二次 (476
nm) 及び四次 (238 nm) の高調波光を発生する。第 3 の結晶 110C は CLBO で
あり、238 nm 光と 1081 nm 光の和周波混合を行って 195.1 nm の最終出力光
を発生する。非線形変換パラメータ計算値が表 VII に提示される。本例示実施形態は、通
常の 1064 nm の 4 準位遷移動作より達成が困難である、3 準位遷移で動作する Nd ド
ープファイバ MOPA システムを用いるが、非線形結晶を 3 つしか用いず、それぞれが全
てノンクリティカル位相整合 (NCPM) 条件またはそれに近い条件で動作するという点
でかなりの利点を有する。

30

【表 7】

表VII：図 12 のレーザシステム 10 の結晶に対する位相整合パラメータ計算値

結晶	LBO	CLBO	CLBO
非線形過程	SHG	SHG	SFM
第 1 の入力 λ , nm	952	476	1081
第 2 の入力 λ , nm	952	476	238
出力 λ , nm	476	238	195.1
位相整合温度, K	453	431	433
位相整合角 θ , °	90	90	90
位相整合角 ϕ , °	14.0	N/A	N/A
実効非線形係数 $d_{\text{実効}}$, pm/V	0.84	0.935	1.1
複屈折ウォークオフ, mrad	8	~0	~0

40

【0067】

50

上記実施例においてレーザシステム10の実施形態はOPOを用いておらず、したがって所望の出力波長で安定な出力を発生することに注意されたい。さらに、OPOからの出力は位相整合条件によって決定されるが、レーザシステム10の実施形態はラマン波長変換器106を用いるから、上に開示されたレーザシステム10は光を高調波発生器／変換器110に供給する前に位相整合を行う必要がない。

【0068】

本発明の別の実施形態にしたがえば、周波数変換器が150～400nmの範囲内におかれる最終出力波長における光出力を発生するように、光周波数をより高い周波数に変換する周波数変換器に光を供給するため、本発明の方法及び装置において可視光源が用いられる。可視光源はファイバレーザまたは光増幅器（レーザ増幅器）とすることができ、本明細書においてはいずれもレーザ源またはレーザと称される。

10

【0069】

図13A、13Bを参照すれば、本実施形態のレーザシステム10は、可視光ファイバ増幅器または可視光ファイバレーザを有する光源102を備える。光源102は、例えば初「親発振器」パルス光源202'及び増幅器206Aを有する、「親発振器-パワー増幅器」（MOPA）とすることができ、レーザシステム10はCWシステム（図13B）とすることができ、あるいは、必要に応じて備えられる、増幅器206Aに入るシード光のパルス変調を与える電気パルス発生器204Bによって駆動される光変調器204Aを用いることができる（図13A）。

20

【0070】

図13A及び13Bの実施形態においては、可視光ファイバ増幅器206AがSmドープシリカベースファイバ206A'を有する。高パワー光増幅器206Aは可視シード光源212からの光（必要に応じてパルス光）204を増幅する。周波数変換器210が、150～400nmの範囲内におかれた波長 $\lambda_{出力}$ で最終パルス光出力を発生するように、波長が $\lambda_{1A出力}$ の光出力208Aを受け取り、これをより高い光周波数に変換するために（図13Aの実施形態においてはパルス光源であり、図13Bの実施形態においてはCW光源である）光源202に動作可能な態様で結合される。光源202は10Wをこえる光パワーを供給することが好ましく、20Wをこえる光パワーを供給することがさらに好ましい。周波数変換器210は、例えば、二次、三次または四次、等の高調波発生器とすることができ、これは、周波数変換器210が第1の出力波長 $\lambda_{1A出力}$ を、 $\lambda_{出力} = \lambda_{1A出力} / 2$ 、 $\lambda_{1A出力} / 3$ または $\lambda_{1A出力} / 4$ 、等の最終波長に変換することを意味する。

30

【0071】

レーザシステム10がパルス動作レーザシステムの場合には、ファイバ206A'が変調器204A及び電気パルス発生器204Bを有するパルス光源202'に動作可能な態様で結合される。高パワー光増幅器206Aは、パルス光源202'の平均パワー及びピークパルスパワーを高めることができるように、シード光源212からのパルス光204を増幅する。高パワー光増幅器206Aは、初パルス光源202'とともに、親発振器-パワー増幅器（MOPA）を形成する。594nmシード光源212からの変調されたパルス光は増幅器206Aに入り、増幅器206Aは、出力波長 $\lambda_{1A出力}$ を中心とする光スペクトルを有する、増幅されたパルス光出力信号208Aを発生する。図13Aのレーザシステムの実施形態にしたがえば、光源202によって与えられるパルス幅は0.01～100nsであり、デューティサイクルは1：2～1：1000000であって、例えばパルス幅は0.1～80ns、デューティサイクルは1：2～10000である。効率を最適化するには、光パルスの幅及び繰返しレートに対する要件を考察することが重要である。原理的に、光パルス幅に上限はない。しかし、数ナノ秒より長いパルスについては、増幅器（すなわちレーザ）ファイバ内の誘導ブリュアン散乱（SBS）が変換され得るパワーの最大量を制限し得るから、SBSを抑制するに十分にポンプ光スペクトルを広いことが保証されなければならない。また、結晶内の非線形変換効率を高めるには、デューティサイクル（パルス幅と繰返し時間の比であり、平均パワーとピークパワーの比でもある

40

50

）が1：100より小さいことが望ましく、この結果、10 nsより長いパルスに対しては、擬似CW源を形成することが目標であれば望ましくない、1 MHzより低い値に繰返し周波数が制限されるであろう。

【0072】

励起状態の寿命が非常に長い（数ms）ことから、希土類（たとえばSm）ドープファイバ増幅器は本質的に入り信号の平均パワーを増幅し、非常に小さいデューティサイクルに対しては、平均パワー出力は中程度でしかない増幅器206Aでも非常に大きなピークパルスパワーを発生することができる。例えば、親発振器202'（例えば直接変調レーザダイオード）からの1 ns長パルスを、多段Smドープ（ファイバ）増幅器206Aの平均出力は2 Wに過ぎなくとも、繰返しレートが100 kHzであれば（ピークパワーは10000×平均パワーになり）、パワー増幅器206Aで20 kWのピークパワーまで増幅することができる。

10

【0073】

パルス幅を設定するための、半導体レーザダイオードの電気パルス発生器による直接変調またはダイオード出力の、上述したような、個別の電気光学強度変調器への接続を、パルス光発生のための初パルス光源202'を作成するために用いることができる。上述したように、変換効率を最大化し（パルスウイングにおける不完全変換の効果を最小化し）、（自己位相変調（SPM）による）スペクトル拡幅を最小化するためには矩形パルスを形成することが好ましい。

【0074】

20

Sm, PrまたはEuドープファイバ増幅器206Aは比較的広いスペクトル利得帯域幅（数10ナノメートル）を有するから、光源202を、またある程度はレーザシステム10全体を、波長可変または波長調節可能とすることができる。すなわち、本発明のいくつかの実施形態にしたがえば、光源202は原波長同調のための波長可変レーザを有し、原波長の同調により、最終出力波長 $\lambda_{出力}$ の微調すなわち精密調節が得られる。

【0075】

上に既述したように、Smドープファイバレーザシステムではほぼ575～625 nmの出力波長範囲を直接に扱うことができる。550～600 nmの範囲の出力に対して（425 nm±25 nmポンプ光でポンピングされる）Dyドープシリカベースファイバレーザを含み、さらにはPrドープ及びEuドープのファイバレーザも含む、レーザシステムのようなその他のタイプのファイバレーザシステムも用いることができる。所望の出力波長を供給するために、二次、三次または四次の高調波発生器を用いる周波数変換器210を用いることができる。例えば、レーザ106A及び第1の非線形結晶210Aからの出力を、適切な非線形結晶において、和周波混合することによって出力波長 $\lambda_{出力}$ を発生させることもでき、あるいは結晶210Aで発生された光の波長を、結晶210BにおいてSHGにより1/2にすることができる。

30

【0076】

例示実施形態において、用いる非線形結晶を、光損傷閾値が最も高く、したがって高調波変換によってより高いパワーを発生できることが知られているホウ酸塩（LBO, BBO, CLBO）に限定して、周波数変換器210を設計することを発明者等は選択した。これらのレーザシステム10は、比較的高い変換効率を達成し、同時に、短波長（UV）の高パワービーム入射によって生じ得る結晶損傷を避けるかまたは最小限に抑える点で有利である。これは、少なくともある程度、非線形結晶の数を最小限に抑えることによってなされる。当業者であれば、これらの実施例が多くの可能性のほとんどの内の数例でしかないこと及び他の非線形結晶も用い得ることを認めるであろう。図13A, 13Bに示されるように、レーザシステム10のこれらの実施形態にはOPOが全く用いられていない。表VIIIは図13A及び13Bのレーザシステム10に用いられる結晶のパラメータの摘要を与える。どの結晶も30 mradより大きい複屈折ウォークオフを示さないことが好ましく、どの結晶の複屈折ウォークオフも25 mrad以下であることがさらに好ましい。

40

【0077】

表VIIIにおいては、先行実施例の全てと同じく、用いられる非線形結晶のタイプを第1行が示され、結晶が行う非線形過程を第2行に示される。出力波長及び2つの入力波長（非線形過程が二次高調波発生である場合、2つの入力波長は同じである）を第3行～第5行が示される。第6行は結晶温度を与え、第7行～第8行は位相整合に必要な結晶光軸に対する伝搬方向角を与える（LBOはいわゆる双軸結晶である）。第9行に実効非線形係数（与えられた入力パワー及び結晶長に対して変換効率がどれだけであり得るかの尺度）が提示され、第10行は結晶の複屈折によって生じる入力ビーム及び出力ビームの角度ウォークオフ（結晶内の入力光と高調波光の僅かな角度ずれ）を与える。

【表8】

表VIII：図13A及び13Bのレーザシステム10の結晶に対する
位相整合パラメータ計算値

結晶	LBO	BBO
非線形過程	SHG	SFG
第1の入力 λ , nm	594	594
第2の入力 λ , nm		297
出力 λ , nm	297	198
位相整合温度, K	433	433
位相整合角 θ , °	90	82.9
位相整合角 ϕ , °	65.4	N/A
実効非線形係数 $d_{\text{実効}}$, pm/V	0.39	0.505
複屈折ウォークオフ, mrad	13.85	23.89

【0078】

594 nm光出力はサマリウムドープまたはジスプロシウムドープのファイバレーザから発生させることができ、プラセオジムドープフルオリドガラスファイバレーザによって供給することもできることに注意されたい。

【0079】

図13A及び13Bに示される実施形態において、光源102は青色ブロードエリアレーザ（BAL）、例えば青色GaInベースレーザ（425 nm±25 nm光出力）でポンピングされた、Smドープファイバレーザを有する。上述したように、さらに短波長の可視光ポンプ源でポンピングされた、その他の可視光ファイバレーザをSmドープファイバレーザの代りに用いることができる。（例えば425 nm±25 nm光源でポンピングされる）Dyドープファイバレーザ及びPrドープまたはEuドープのファイバレーザ206Aも、例えば、用いることができる。本実施形態において、光源202は波長 $\lambda_p = 594$ nmのパルス光を周波数変換器210に供給している。さらに詳しくは、光源202は（必要に応じて発振器であるかまたは必要に応じてパルス動作の）初光源202'及び光源202'に動作可能な態様で結合されたレーザ206Aを有することができる。周波数変換器210は、非線形形LBO（三ホウ酸リチウム（ LiB_3O_5 ））結晶210Aに基づく二次高調波発生器及びBBO（ベータホウ酸バリウム（ $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ））結晶210Bに基づく三次高調波発生器を有する。本実施形態の二次高調波発生器210Aは第1の出力波長 $\lambda_{1A\text{出力}} = 594$ nmを波長297 nmに変換する。次いでBBO結晶210Bが297 nm光及び残留595 nm光を、SFM（和周波混合）によって、最終出力波長 $\lambda_{\text{出力}} = 198$ nmの光に変換する。もちろん、297 nm光出力が所望であれば、BBO結晶は必要ではなく、周波数変換器は、LBO110Aのような、非線形結晶を1つだけと残留594 nm光を濾過して除去するためのフィルタを有することになるであろう。

【0080】

光源202は変換効率を高めるために挟線幅（1～100 pm）出力を有することが有利である。これは、例えば、低パワー発振器出力を高パワー増幅器で増幅することによって達成することができる。

【0081】

さらに詳しくは、LBO結晶210Aの温度が、594 nmの二次高調波発生に対し、0.39 pm/Vの実効非線形係数値及び、ポンプ光ビームと二次高調波光ビームの間の、（長結晶を用いる中程度レベルのピークパワーでの高変換効率の達成が可能になる）比較的小さい（14 mrad）複屈折ウォークオフをもって、光軸に対して90°及び65.4°の角度で伝搬する光に位相整合を達成するために、433 Kに調整される。BBO結晶210Bの温度も、その光軸に対して82.9°の角度（BBOは単軸結晶である）で伝搬する594 nm光と297 nm光の和周波混合に対して位相整合を達成するために、433 Kに調整される。このSFM過程に対し、入り594 nm波長光及び入り297 nm波長光と198 nm三次高調波出力光の間の複屈折ウォークオフの大きさは比較的小さく（22 mrad）、長結晶を用いる中程度レベルのピークパワーでの高変換効率の達成が可能になる。本実施形態には、結晶表面の数を最小限に抑える（本実施形態で用いられる非線形結晶は2つまでである）ことにより、及び短波長パワーを長波長パワーと「交換」する（BBO結晶の入力において用いる297 nm光を少なくし、594 nm光を多くして、同じ量の198 nm出力を発生する）ことにより、高パワーレーザビームによる非線形結晶への光損傷が最小限に抑えられるという利点がある。

【0082】

上記実施例においては、光システム10にOPOが用いられておらず、したがって（出力波長は入力波長の高調波であり、位相整合条件では決定されないから）より安定な出力波長 $\lambda_{出力}$ が発生されることに注意されたい。

【0083】

当業者には、本発明の精神及び範囲を逸脱することなく本発明に様々な改変及び変形がなされ得ることが明らかであろう。したがって、本発明の改変及び変形が添付される特許請求項及びその等価物の範囲内に入れば、本発明はそのような改変及び変形を包含するとされる。

【図面の簡単な説明】

【0084】

【図1】本発明の一実施形態にしたがうパルス動作多段ラマンレーザシステム10のブロック図である

【図2】本発明のいくつかの態様にしたがう、ポンプ光、中間次ストークス光の1つ及び出力光に対する、光パワー対ファイバ長の（数値モデル計算による）グラフである

【図3A】変換効率対ファイバ長のグラフである

【図3B】本発明のいくつかの実施形態にしたがう二次ストークス光への変換に対するファイバ内の相異なる点における光パルス形状を示す

【図4】Nd:YAGパルスレーザシステムにより発生された1064 nmの原波長を中心とするスペクトルをもつ400 ps長光パルスでポンピングされた38 m長非線形ラマン変換ファイバの出力のスペクトル図である

【図5】本発明にしたがうレーザシステムの第1の例を簡略に示す

【図6】図5のレーザシステムに用いられるパルスレーザ源（MOPA）の一実施形態を簡略に示す

【図7】本発明にしたがうレーザシステムの第2の例を簡略に示す

【図8】本発明にしたがうレーザシステムの第3の例を簡略に示す

【図9】本発明にしたがうレーザシステムの第4の例を簡略に示す

【図10】本発明にしたがうレーザシステムの第5の例を簡略に示す

【図11】本発明にしたがうレーザシステムの第6の例を簡略に示す

【図12】本発明にしたがうレーザシステムの第7の例を簡略に示す

【図 1 3】 本発明にしたがう別のレーザシステムの 2 つの実施形態のブロック図である

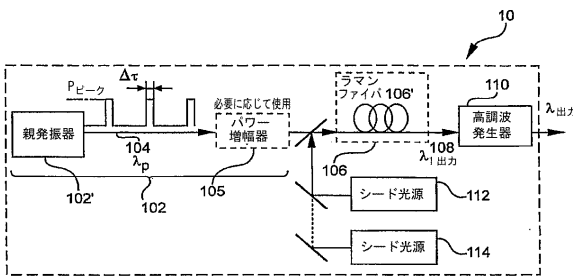
【符号の説明】

【0085】

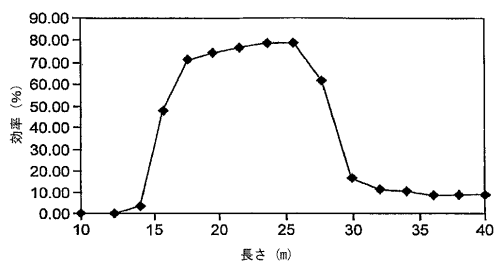
- 10 レーザシステム
- 102 パルス光源
- 102' 親発振器パルス光源
- 104 パルス光
- 105 光増幅器
- 106 ラマン波長変換器
- 106' ラマン変換光ファイバ
- 108 第 1 のパルス光出力信号
- 110 高調波変換器
- 110A, 110B 非線形結晶
- 112, 114 シード光源

10

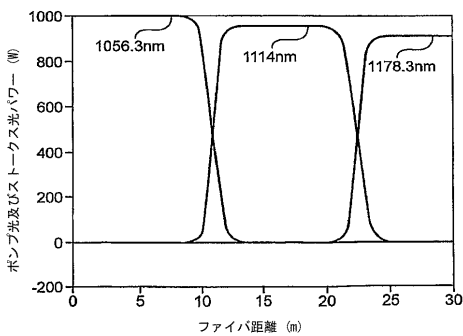
【図 1】



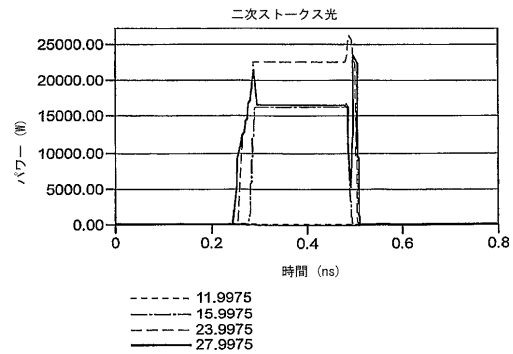
【図 3 A】



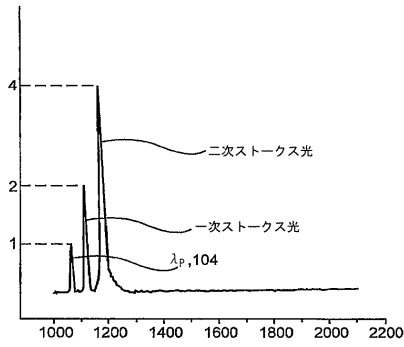
【図 2】



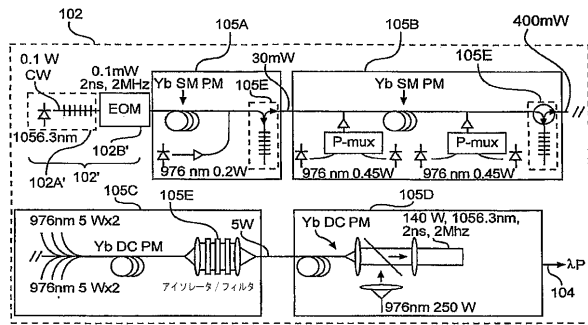
【図 3 B】



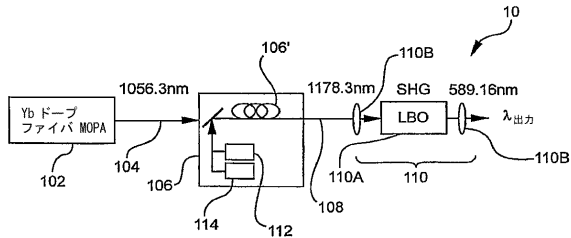
【図 4】



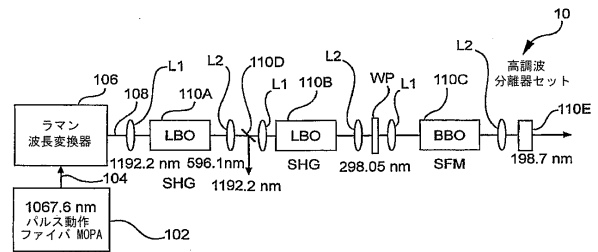
【図 6】



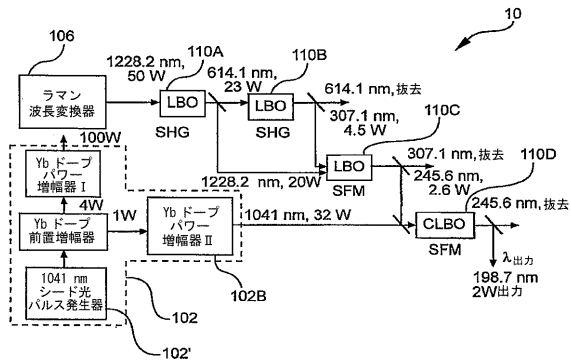
【図 5】



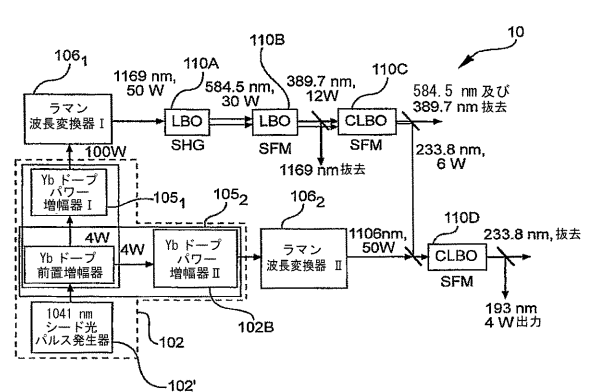
【図 7】



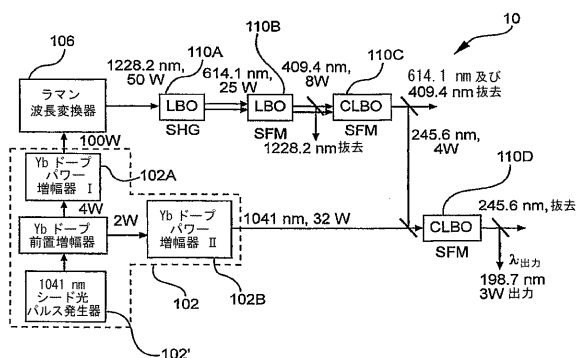
【図 8】



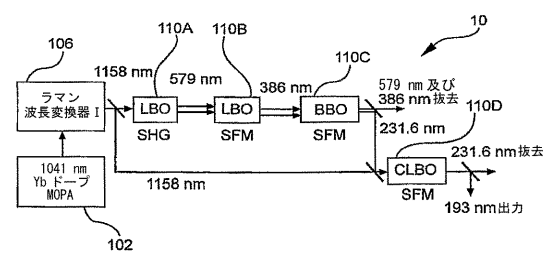
【図 10】



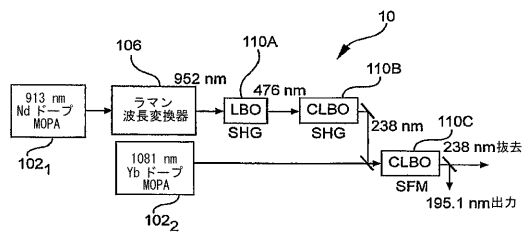
【図 9】



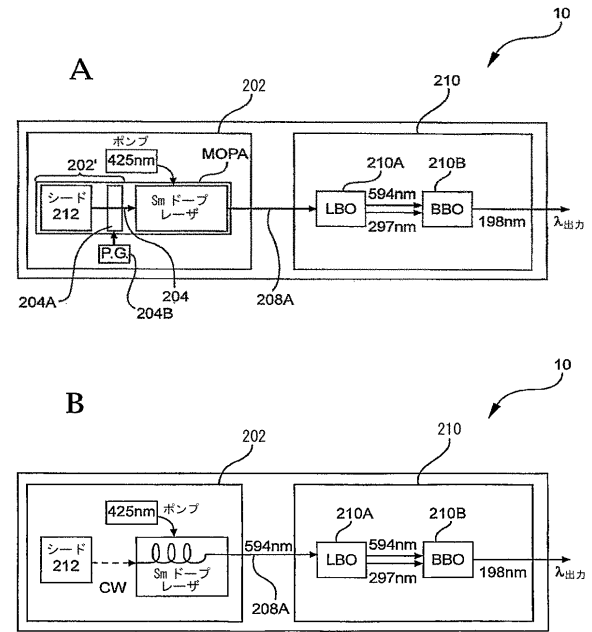
【図 11】



【図 12】



【図 13】



フロントページの続き

- (72)発明者 スダルシャナム, ヴェンカタプラム エス
アメリカ合衆国 コロラド州 80920 コロラド スプリングス ペPPERリッジ ドライヴ
8515
- (72)発明者 ゼンテノ, ルイス エイ
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 14870 ペインテッド ポスト ケイティール レイン 3
8

審査官 山本 貴一

- (56)参考文献 特表2004-527001 (JP, A)
特開2002-118315 (JP, A)
再公表特許第2004/054050 (JP, A1)
再公表特許第2005/114317 (JP, A1)
特開昭56-148360 (JP, A)
特表2008-532323 (JP, A)
特開2003-080604 (JP, A)
特表2003-515957 (JP, A)
特開平06-061590 (JP, A)
国際公開第2006/032105 (WO, A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G02B 6/12-6/14
G02F 1/35-1/39
H01S 3/00, 3/10, 3/109
- JSTPlus (JDreamII)
JST7580 (JDreamII)