

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4422720号
(P4422720)

(45) 発行日 平成22年2月24日(2010.2.24)

(24) 登録日 平成21年12月11日(2009.12.11)

(51) Int.Cl.

F I

HO 1 S	3/16	(2006.01)	HO 1 S	3/16	
HO 1 S	3/113	(2006.01)	HO 1 S	3/113	
HO 1 S	3/23	(2006.01)	HO 1 S	3/23	
HO 1 S	3/091	(2006.01)	HO 1 S	3/091	Z

請求項の数 26 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2006-513437 (P2006-513437)	(73) 特許権者	503455363
(86) (22) 出願日	平成16年4月29日(2004.4.29)		レイセオン カンパニー
(65) 公表番号	特表2006-525681 (P2006-525681A)		アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 O
(43) 公表日	平成18年11月9日(2006.11.9)		2451 ウォルサム ウィンター スト
(86) 国際出願番号	PCT/US2004/013241		リート 870
(87) 国際公開番号	W02004/100330	(74) 代理人	100058479
(87) 国際公開日	平成16年11月18日(2004.11.18)		弁理士 鈴江 武彦
審査請求日	平成19年3月2日(2007.3.2)	(74) 代理人	100091351
(31) 優先権主張番号	10/429, 102		弁理士 河野 哲
(32) 優先日	平成15年5月1日(2003.5.1)	(74) 代理人	100088683
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 中村 誠
		(74) 代理人	100108855
			弁理士 蔵田 昌俊
		(74) 代理人	100075672
			弁理士 峰 隆司

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 アイセーフの固体レーザシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ポンプ光駆動される固体アイセーフレーザにおいて、

第1の波長でレーザエネルギーを発生するように動作する第1のレージング媒体と、前記第1のレージング媒体の第1の端面に形成されている第1の透過／反射層と、アイセーフ波長帯域内の第2の波長でレーザエネルギーを発生するように動作し、前記第1の透過／反射層の第1のレージング媒体と反対側の表面に第1の端面が接合されて前記第1のレージング媒体と結合されている第2のレージング媒体と、

前記第1のレージング媒体の前記第1の端面と反対側の第2の端面に形成され、前記第1の波長に対して反射性である第2の透過／反射層と、

前記第2のレージング媒体の前記第1の端面と反対側の第2の端面に形成され、前記第1の波長に対して反射性であり、前記第2の波長に対して透過性である第3の透過／反射層と、

前記第2のレージング媒体に前記第3の透過／反射層を介して結合されているQスイッチと、

前記Qスイッチの前記第3の透過／反射層と反対側の端面に結合されている出力結合器とを具備し、

前記第1の透過／反射層は、前記第1の波長に対しては透過性であり、前記第2の波長に対しては反射性であり、第1の波長に対して反射性である前記第2の透過／反射層と前記第3の透過／反射層とによって前記第1のレージング媒体を含む第1の共振空洞が形成

10

20

され、前記第2の波長に対して反射性である前記第1の透過／反射層と前記Qスイッチとの間に前記第2のレージング媒体を含む第2の共振空洞が形成されている固体のアイセーフレーザ。

【請求項2】

前記第1及び第2のレージング媒体は固体材料である請求項1記載のレーザ。

【請求項3】

前記第1のレージング媒体はネオジウムイオンをドープされたイットリウムアルミニウムガーネットであり、ポンプ光波長は800ナノメートルである請求項1記載のレーザ。

【請求項4】

前記第1のレージング媒体はイッテルビウムイオンをドープされたイットリウムアルミニウムガーネットであり、ポンプ光波長は940ナノメートルである請求項1記載のレーザ。

10

【請求項5】

前記第2のレージング媒体はエルビウムイオンをドープされたイットリウムアルミニウムガーネットである請求項1記載のレーザ。

【請求項6】

前記第2のレージング媒体は次の材料、 Sc_2SiO_7 、 Sc_2SiO_5 、 Y_2SiO_5 、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 、 YVO_4 または BeAl_2O_4 のうちの1つから選択されたエルビウムイオンをドープされたホスト材料である請求項1記載のレーザ。

【請求項7】

前記第1の波長は1ミクロンである請求項1記載のレーザ。

20

【請求項8】

前記第2の波長は1.5ミクロンである請求項1記載のレーザ。

【請求項9】

前記第2の波長は1.4ミクロン乃至1.8ミクロンの範囲である請求項1記載のレーザ。

【請求項10】

ポンプ光エネルギーはパルスで与えられる請求項1記載のレーザ。

【請求項11】

前記Qスイッチは飽和可能な吸収性Qスイッチである請求項1記載のレーザ。

30

【請求項12】

前記各透過／反射層は誘電体被覆である請求項1記載のレーザ。

【請求項13】

レーザはパルス駆動動作モードで動作する請求項1記載のレーザ。

【請求項14】

940ナノメートルの波長でパルスエネルギーを放射する発光ダイオードのポンプ光アレイと、

固体のイッテルビウムイオンをドープされたイットリウムアルミニウムガーネットから形成され、前記ポンプ光のエネルギーを吸収して1ミクロンの第1の波長でレーザエネルギーを発生するように動作する第1のレージング媒体と、

40

エルビウムイオンをドープされた結晶またはエルビウムイオンをドープされたイットリウムアルミニウムガーネットから形成され、第1のレージング媒体と結合され、前記第1の波長のエネルギーをそこで反射的に維持するために第1のレージング媒体と共に第1の共振空洞を規定し、前記第1の波長のエネルギーの吸収の結果として1.5乃至1.6ミクロンの第2の波長でレーザエネルギーを発生するように動作する第2のレージング媒体と、

前記第1のレージング媒体と前記第2のレージング媒体との間の結合端面に配置され、前記第1の波長に対して透過性であり、前記第2の波長に対して反射性であり、それによって前記第2のレージング媒体内で前記第2の波長を反射的に維持するための第2の共振空洞を規定している第1の誘電体被覆と、

前記第1の誘電体被覆から前記第1のレージング媒体の反対側の端面に位置する前記第

50

1の波長に対して反射性である第2の誘電体被覆と、

前記第1の誘電体被覆の設けられた端面と反対側の前記第2のレージング媒体の端面に設けられ、前記第1の波長に対して反射性であり、前記第2の波長に対して透過性である第3の誘電体被覆と、

前記第3の誘電体被覆を介して前記第2のレージング媒体の端部に配置され、漂白動作によって透過状態に切換えられるまで前記第2の波長で吸収性であり、それによってレーザ光のパルスとして前記第2の波長エネルギーが前記第2の共振空洞から出力されることを可能にするコバルト結晶Qスイッチとを具備し、前記第1の共振空洞は前記第2の誘電体被覆と第3の誘電体被覆との間に形成されている固体のアイセーフレーザ。

【請求項15】

第1の透過/反射層を挟んで結合され、両端に第2と第3の透過/反射層を有している第1および第2のレージング媒体とQスイッチとを使用して、ポンプ光駆動されたアイセーフレーザビームを発生する方法において、

供給されるポンプ光エネルギーの吸収により第1のレージング媒体をレーザ動作させて第1の波長でエネルギーを発生し、

前記第1の波長エネルギーに対して反射性である前記第2と第3の透過/反射層により規定される第1のレージング媒体を含む第1の共振空洞中において前記第1の波長エネルギーを反射的に維持し、

第2のレージング媒体に前記第1の波長のエネルギーを吸収させることによって第2のレージング媒体をレーザ動作させてアイセーフ波長帯域内で第2の波長でエネルギーを発生させ、

第2のレージング媒体の前記第1のレージング媒体側の1端部に位置する前記第1の透過/反射層と、第2のレーザ媒体の前記第1のレージング媒体と反対側の端部に設けられたQスイッチとの間に形成される第2の共振空洞中において前記第2の波長のエネルギーを反射的に維持し、

前記第1の透過/反射層は前記第1の波長で透過性であり、前記第2の波長で反射性であり、

吸収状態から透過状態へQスイッチを切換え、それによって前記第2の波長のエネルギーを放射するステップを含んでいる方法。

【請求項16】

前記第1および第2の媒体のレーザ動作は固体材料中において行われる請求項15記載の方法。

【請求項17】

前記第1のレーザ動作はネオジムイオンをドープされたイットリウムアルミニウムガーネットである媒体中で行われ、ポンプ光波長は800ナノメートルである請求項15記載の方法。

【請求項18】

前記第1のレーザ動作はイッテルビウムイオンをドープされたイットリウムアルミニウムガーネットである媒体中で行われ、ポンプ光波長は940ナノメートルである請求項15記載の方法。

【請求項19】

前記第2のレーザ動作はエルビウムイオンをドープされた結晶である媒体中で行われる請求項15記載の方法。

【請求項20】

前記第1の波長は1ミクロンである請求項15記載の方法。

【請求項21】

前記第2の波長は1.5ミクロンである請求項15記載の方法。

【請求項22】

前記第2の波長は1.4ミクロン乃至1.8ミクロンの範囲である請求項15記載の方法。

10

20

30

40

50

【請求項 2 3】

ポンプ光エネルギーはダイオードバレーから結合される請求項 1 5 記載の方法。

【請求項 2 4】

さらに、ポンプ光エネルギーをパルスで供給するステップを含んでいる請求項 1 5 記載の方法。

【請求項 2 5】

前記各透過 / 反射層は誘電体被覆である請求項 1 5 記載の方法。

【請求項 2 6】

さらに、前記切換えステップの複数の反復によってレーザをパルス駆動するステップを含んでいる請求項 1 5 記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明はレーザ、特に肉眼に対して安全なアイセーフレーザに関する。

【背景技術】

【0002】

固体のレーザはしばしばドープ処理された絶縁体のレージング媒体を使用する。ガラスと結晶媒体の両者が使用されている。レージング媒体への入力パワーソースはポンプ光エネルギーであり、これはドープ処理された媒体へ光学的に結合される。ポンプ光エネルギーは高パワー発光ダイオードアレイ、フラッシュランプまたはその他の光源から得られる。ポンプ光エネルギーはレージング媒体内のドープ剤イオンのエネルギーレベルを上昇させる。

【0003】

従来技術にしたがって使用されるレージング媒体はしばしばホストガラスまたは結晶内に分散されたドープ剤イオンを含んでいる。例えばイットリウムをドープされたイットリウムアルミニウムガーネット (Yb : YAG)、ネオジウムをドープされたイットリウムアルミニウムガーネット (Nd : YAG)、またはエルビウムをドープされたイットリウムアルミニウムガーネットまたはガラス (Er : YAG、Er 結晶 Er : ガラス) である。単一の発振器 / 出力段または 1 以上の増幅器段が後続する発振器段から構成されている固体レーザが発明されている。

【0004】

レーザシステムの各増幅器段では、発振器または前の増幅器段からのレーザビームは利得媒体の入口端部に誘導される。駆動レーザビームは媒体を通して誘導され、これらがその以前の安定な低エネルギー状態に戻るのに、ドープ剤イオンがエネルギーをビームに解放するとき、レーザ動作が生じる。解放されるエネルギーの一部は光に変換され、スラブを横切るレーザビームにエネルギー利得を生じる。単一段の発振器レーザでは、出力ビームは発振器段から直接取られる。

【0005】

固体レーザは種々の波長で動作するように設計されており、赤外線帯域で特に有用であることが証明されている。任意の所定の波長では、人間の網膜に対する損傷のしきい値を表す流量またはエネルギーの幾つかのレベルが存在する。しかしながら、約 1 . 4 ミクロンから 1 . 8 ミクロンの波長帯域は目の損傷のしきい値に到達する前に数桁大きいエネルギーレベルを必要とすることが示されている。事実、この帯域は米国の政府機関によって “アイセーフ” 帯域と見なされている。したがって、人間が存在する動作環境では、非常に高いレーザビーム流が許容されるので、アイセーフレーザが好ましい。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

レーザは当然目的とする価格と信頼性の制約を満たしながら、最大の効率に設計されることが望ましい。システム効率の 2 つの重要な点はポンプ光の電気対光効率とレージング媒体の変換効率である。ダイオードポンプされた固体レーザの重要な変換効率の尺度はシ

10

20

30

40

50

システムの“量子欠陥”である。量子効率はポンプ光エネルギーと発生されたレーザービームとの間の波長差により本質的に制御される。基本的に、量子欠陥はエミッタ光の波長をポンプ光の波長から減算することにより決定され、ポンプ光の波長内で正規化される。これによっていわゆる量子欠陥が生じ、割合として、これはシステムから実現可能な理論的に最高の効率である。

【0007】

明らかに、ポンプ光波長がレーザー波長に近いシステムは効率の観点から好ましい。例えば800ナノメートルのポンプ光ダイオードによりポンプされた1ミクロンのNd:YAGレーザーの場合、80%よりも低い量子効率が実現される。従来技術の別の例では、940ナノメートルのダイオードと1ミクロンのレーザーを使用するYb:YAGのような共振的にポンプされたレーザーは90%を超える量子効率を生む。それ故、他のあらゆるものを等しくすると、ポンプ光波長が実用的であるようにレーザー波長に近いことが好ましい。同様に、この所望性をサポートする他のファクタが存在する。例えば、最終的にポンプ光とレーザーとの間のエネルギーの差はレージング媒体の熱負荷を決定し、これは最大のビーム出力パワーを限定する。

【0008】

1.4乃至1.8ミクロンの帯域で放射するように設計されているアイセーフレーザーに関して、レーザー波長に近いポンプ光ダイオードを使用することが好ましい。しかしながらEr:結晶レーザーのように効率的な直接共振でポンプされるレーザーの構造は、入手可能な高いパワーの1500ナノメートルダイオードアレイがないことにより制限を受ける。反対に効率的なダイオードポンプされるNd:YAGレーザーならびにYb:YAGレーザーは市販の既成の高いパワーである800ナノメートルまたは940ナノメートルのダイオードソースを容易に利用可能である。したがってアイセーフ波長範囲で利用可能な固体のポンプ光ソースの経済性により、従来技術のアイセーフレーザーの設計者はシステム設計における代わりの方針を模索している。

【0009】

従来技術のアイセーフレーザー設計に対する基本的な方法は効率的な共振的にポンプされる1ミクロンレーザーと、レーザービーム波長をスペクトルのアイセーフ領域へシフトまたは変換する非線形装置を使用することである。2つの利用可能な非線形変換装置はRAMANセルと光学パラメトリック発振器(“OPO”)である。すなわち、従来技術のアイセーフレーザーは直接変換とは反対に間接的な変換を使用する。直接変換はNd:YAGまたはYb:YAGのようなレージング媒体が存在することを意味し、それにおいてはポンプ光エネルギーはレーザー動作によってレージング媒体内のレーザービーム波長に直接変換される。Nb:YAGレーザーは840-900ナノメートルのポンプ光ソースにより1.064ミクロンでレーザー光を発生するレーザー転移を使用する。したがってレージング媒体が励起されるとき、これは直接的に1.064ミクロンでレーザー光を発する。しかしながらアイセーフ帯域の場合、1.5ミクロンで直接的にNd:YAG媒体をレーザー動作させることは可能ではない。それ故、前述の非線形変換媒体がシステムに付加される。従来技術のアイセーフレーザーでは、非線形変換媒体は1ミクロンの放射を1.5ミクロンに変換する。この非線形変換プロセスは固体結晶、液体または気体媒体を含んでいる種々の媒体で実現されることができる。例えば、メタンは1.5ミクロンの波長の発生に使用されることができる。

【0010】

前述の設計と価格の妥協のために、1つの現在の最新技術のアイセーフレーザー設計はモノブロック固体構造として構成されているOPOシフトされたNd:YAGレーザーに基づいており、これはNettletonによる2002年4月16日出願の米国特許第6,373,865号明細書(発明の名称“PSEUDO-MONOLITHIC LASER WITH INTRACAVITY OPTICAL PARAMETRIC RESONATOR”)で開示されており、これは本出願の参考文献とされている。この設計は通常、良好な効率を有するが、評価可能なエネルギー出力で動作することを可能にするため幾つかの高いパワーのダイオードバーを必要とするので、本質的にかさばり、扱いにくい。さらに、

OP Oベースのエネルギー変換は本質的に非効率的であり、ビーム品質との妥協が必要である。エルビウムドープ剤をベースとする直接的なアイセーフレーザもまた技術で知られている。エルビウム (Er) レーザは燐酸塩ガラスホスト中でイッテルビウム - エルビウムエネルギー転移ポンピング機構を使用する。しかしながら、ガラスホストはその貧弱な熱特性により非常にパワーを限定され、それによって高い平均パワーでこれらのレーザを動作することは禁じられる。この機能的なイッテルビウム - エルビウムエネルギー転移ポンピングプロセスを (YAGのような) 結晶ホストで再生する試みは非常に限定されたレーザ性能を生じる。この限定はT. Schweizer、T. Jensen、E. Heumann、G. Huberによる参考文献 "Spectroscopic properties and diode pumped 1.6 μ m performance in Yb-codoped Er:Y₃Al₅O₁₂ and Er:Y₂SiO₅"、Optics Communications 118、557-561頁 (1995) に示されている。これは結晶ホスト中のエネルギーレベル力学が燐酸塩ガラスのエネルギーレベル力学よりも非常に好ましくない事実によるものである。

10

【0011】

したがってダイオードポンプ光ソース数を大幅に減少した出力エネルギーおよびパワーの大きなスケーリングを可能にする本質的にコンパクトで廉価な空洞内エネルギー変換を使用してアイセーフビームを効率的に発生しながら、Nd:YAGレーザの性能特性を与えるアイセーフレーザを発生するシステムおよび方法が技術的に必要とされている。

【課題を解決するための手段】

【0012】

技術の必要性は本発明の装置および方法により解決される。ポンプ光駆動の固体アイセーフレーザが提供される。このレーザはポンプ光エネルギーの吸収の結果として第1の波長でエネルギーをレージングするように動作する第1のレージング媒体を含んでいる。第2のレージング媒体は第1のレージング媒体と結合され、共に第1の波長エネルギーを反射的に維持するための第1の共振空洞を規定する。第2のレージング媒体は第1の波長エネルギーを吸収した結果としてアイセーフ波長帯域でエネルギーをレーザ動作する。透過/反射層は第1のレージング媒体と第2のレージング媒体との間の結合に沿って配置され、その層は第1の波長では透過性であるが第2の波長では反射性である。この配置は第2のレージング媒体内で第2の波長を反射的に維持するための第2の空洞を規定する。出力結合器は透過/反射層と対向する第2のレージング媒体の端部に配置される。出力結合器は透過状態に切換えられるまで第2の波長で反射性であり、したがって第2の波長エネルギーがアイセーフレーザビームとして第2の空洞を出ることを可能にする。

20

30

【0013】

特別な実施形態では、第1および第2のレージング媒体は固体材料である。第1のレージング媒体はネオジムイオンドープされたイットリウムアルミニウムガーネットであり、約800ナノメートルのポンプ光波長を有する。或いは、第1のレージング媒体は約940ナノメートルのポンプ光波長を有するイッテルビウムイオンドープされたイットリウムアルミニウムガーネットであってもよい。第2のレージング媒体はイットリウムアルミニウムガーネットのようなエルビウムイオンドープされた結晶であることができる。さらに一般的には第2のレージング媒体はSc₂SiO₇、Sc₂SiO₅、Y₂SiO₅、Ca₂Al₂SiO₇、YVO₄またはBeAl₂O₄の1つから選択されたホスト材料に対してエルビウムイオンドープされることができ

40

【0014】

システムの光波長に関しては、第1の波長は恐らく約1ミクロンであり、第2の波長は約1.5ミクロンである。通常、アイセーフ動作では、第2の波長は約1.4ミクロン乃至1.8ミクロンの範囲である。特定の実施形態では、ポンプ光エネルギーは高パワーのダイオードバースレイにより与えられる。ポンプ光エネルギーはパルスで与えられることができる。レーザはパルス駆動された動作モードで動作することができる。

【0015】

前述の発明のさらに改善された構造では、出力結合器はQスイッチであり、これはコバルト結晶Qスイッチであってもよい。透過/反射層は特定の実施形態では誘電体被覆であ

50

る。別の改善では、第1の波長で反射する誘電体被覆は透過／反射層から第1のレージング媒体の反対側の端部に位置される。更に別の改善では、第1の波長で反射性であり、第2の波長で透過性である誘電体被覆は第2のレージング媒体と出力結合器との間に配置される。

【0016】

例示的な実施形態は特別な固体のアイセーフレーザを教示している。このレーザは約940ナノメートルの波長でパルスエネルギーを放射する高パワー発光ダイオードのポンプ光アレイにより駆動される。固体のイッテルビウムイオンドープされたイットリウムアルミニウムガーネットから形成される第1のレージング媒体はポンプ光エネルギーの吸収の結果として約1ミクロンの第1の波長でレーザエネルギーを発生するように動作する。イットリウムアルミニウムガーネットのようなエルビウムイオンドープされた結晶から形成された第2のレージング媒体は第1のレージング媒体と結合される。共に、これらは第1の波長エネルギーをそこに反射的に維持するための第1の共振空洞を規定している。第2のレージング媒体は第1の波長のエネルギーの吸収の結果として約1.5乃至1.6ミクロンでレーザエネルギーを発生するように動作する。第1の誘電体被覆は第1のレージング媒体と第2のレージング媒体との間の結合に沿って配置される。第1の誘電体被覆は第1の波長で透過性であり第2の波長で反射性である。したがって、第2の波長を第2のレージング媒体内で反射的に維持するために第2の空洞を規定する。第1の波長で反射性である第2の誘電体被覆は第1の誘電体被覆から第1のレージング媒体の反対側の端部に位置される。第1の波長で反射性であり、第2の波長で透過性である第3の誘電体被覆は第1の誘電体被覆から第2のレージング媒体の反対側の端部に配置される。最後に、コバルト結晶Qスイッチが第3の誘電体被覆を超えて第2のレージング媒体の端部に配置される。Qスイッチは漂白動作によって透過状態に切換えられるまで第2の波長で反射性である。一度、漂白されるか切換えられると、Qスイッチはレーザ光のパルスとして第2の波長エネルギーが第2の空洞を出ることを可能にする。

【0017】

本発明はまた、ポンプ光駆動されたアイセーフレーザビームを発生する方法を教示している。この方法は間に透過／反射層を有する第1および第2のレージング媒体と、出力結合器とを使用する。その方法はポンプ光エネルギーの吸収により第1の波長でエネルギーを発生するために第1のレージング媒体をレーザ動作させるステップを含んでいる。そして第1および第2のレージング媒体の範囲により規定される共振空洞中に第1の波長エネルギーを反射的に維持する。次に、第2のレージング媒体により第1の波長のエネルギー吸収によりアイセーフ波長帯域内で第2の波長でエネルギーを発生するために第2のレージング媒体をレーザ動作させる。また、第2のレージング媒体の1端部の透過／反射層と、第2のレーザ媒体の反対側の端部の出力結合器との間に形成される第2の共振空洞に第2の波長のエネルギーを反射的に維持する。透過／反射層は第1の波長で透過性であり、第2の波長で反射性である。最後に、反射状態から透過状態へ出力結合器を切換え、それによって第2の波長のエネルギーを放射する。

【0018】

特別な実施形態では、第1および第2の媒体のレージングステップは固体材料で行われる。特に第1のレージングステップはネオジウムイオンドープされたイットリウムアルミニウムガーネットであり、約800ナノメートルのポンプ光波長を有する。代わりに、第1のレージングステップは約940ナノメートルのポンプ光波長を有するイッテルビウムイオンドープされたイットリウムアルミニウムガーネットである媒体中で行われることができる。第2のレージングステップはイットリウムアルミニウムガーネットのようなエルビウムイオンドープされた結晶である媒体中で行われることができる。第1の波長は恐らく約1ミクロンであり、第2の波長は約1.5ミクロンであることができる。通常第2の波長は約1.4ミクロン乃至1.8ミクロンのアイセーフ範囲である。

【0019】

前述の方法の特別な実施形態では、ポンプ光エネルギーは高パワーのダイオードバーアレ

10

20

30

40

50

イから結合される。この方法はまたポンプ光エネルギーをパルスで供給するステップを含むことができる。切換えステップはQスイッチを使用して行われることができる。透過/反射層は誘電体被覆であることができる。この方法はさらに切換えステップの複数の反復によってレーザをパルス駆動するステップを含んでいてもよい。

【発明を実施するための最良の形態】

【0020】

本発明の有効な教示を説明するために、添付図面を参照にして図示の実施形態と例示的な応用を説明する。

【0021】

本発明を特定の応用の例示的な実施形態を参照にしてここで説明するが、本発明はそれ
10
に限定されるものと理解すべきである。当業者はその技術的範囲内および本発明が非常に有用である付加的な分野で付加的な変形、応用、実施形態を認識するであろう。

【0022】

従来技術は直接的または間接的な固体アイセーフレーザ技術を含んでいる。直接変換アイセーフレーザはエルビウムのみまたはエルビウムおよびイッテルビウムドープされた燐酸塩ガラス技術を用いて使用されている。エルビウムのみレーザは約1500ナノメートルで動作するポンプ光ダイオードを必要とし、これは800乃至940ナノメートル範囲でGaAsダイオードと競合する効率、パワーおよび性能特性で利用可能ではない。エルビウム-イッテルビウムドープされたガラスレーザは800乃至940ナノメートルの帯域で
20
廉価のGaAs技術のダイオードアレイを合理的に利用するが、それらのスケールアップおよび応用を制限する幾つかの基本的な問題を受けており、これを以下説明する。従来技術の間接的な変換アイセーフレーザはネオジウムまたはイッテルビウムドープされたイットリウムアルミニウムガーネットレーザ媒体を使用し、それは800乃至940ナノメートルのダイオードアレイで励起するとき1ミクロンのレーザエネルギーを出力する。1ミクロンから1.4ミクロン乃至1.8ミクロンのアイセーフ波長へエネルギーをシフトするためにRAMENセルまたはOPOのような非線形変換装置が付加される。

【0023】

種々の戦略的な大きく隔った応用のためのアイセーフレーザにおける現在の最新技術はOPOシフトされたNd:YAGレーザである。しかしながら、これらのレーザの優秀な
30
効率にかかわらず、これらは認識可能なエネルギー出力レベルで動作するために典型的に多数のダイオードアレイバーを必要とするので、本質的に大型となり、厄介である。さらに、OPOに基づくエネルギー変換は本質的に不十分であり、妥協されたビーム品質となる。図1は前述のNettletonの参考文献で教示されたような、従来技術のモノブロック固体アイセーフレーザを示している。Nd:YAGレージング媒体4は複数のダイオードポンプ光アレイまたはバー6、8により駆動される。ダイオードバーは6のようにエッジでポンプされるか、8のように端部でポンプされ、或いはその両方でポンプされる。Cr⁴⁺:YAG Qスイッチ10はQスイッチのCr⁴⁺イオンが漂白されるまでレージング媒体のエネルギーレベルを共振させ、増加することを可能にするために使用され、レーザビームエネルギーを得る媒体4から放射する。Qスイッチの理論と動作は当業者に知られている。光学的パラメトリック発振器(“OPO”)12は1ミクロンから1.5ミクロンへビームエ
40
ネルギーを変換するために使用される。OPO装置は当業者に知られている。

【0024】

図1に示されているようにモノブロックレーザ2の特別な動作特性に関して、ネオジウムは840乃至900ナノメートルのポンプ光で励起されるとき1.064ミクロンでレーザ光を発するレーザ転移を有している。しかしながらアイセーフ帯域でネオジウムを直接的にレーザ発振させることは非常に非効率的である。1ミクロンの放射を1.5ミクロンに変換することのできる外部の非線形媒体が存在しなければならない。図1ではOPO12がこの機能を行っている。通常、これは非線形プロセスであり、固体結晶、液体または気体の媒体中で生じる。例えば、メタンは1.5ミクロンの波長を発生することに使用されることが
50
できる。対照的に、エルビウムレーザはアイセーフ領域で本質的(直接的)にレーザ

ングすることができる。例えばEr:YAG結晶では、レーザビームは赤色に僅かにシフトされ、約1.6ミクロンでレーザ光を発生する。ガラス媒体では、1.5ミクロンのビームが発生される。

【0025】

Nd:YAGモノブロックレーザの応用では、図1に示されているように、効率的な高パワーの800ナノメートルのダイオードバーでさえも、ネオジミイオンの短い上部状態寿命はレーザの全体的に不十分なエネルギーの蓄積を生じる。それ故、単一の800ナノメートルのダイオードポンプ光バーにより、1ミリジュール程度のパルスエネルギー出力が得られれば最良である。さらに多くのパルスエネルギーが必要とされるならば、ダイオードバーの数が増加されなければならない。これはこれらのエネルギーレベルを実現するために高価なアレイを必要にする。より大きいパルスエネルギーを得るための他の方法はフラッシュランプポンピングを使用することである。しかしながらフラッシュランプポンプされたモノブロックレーザは適用されることのできる反復率に限界を有する。ダイオードアレイポンプ光は数10Hzから100Hzにわたる範囲で反復率を実現できる。

【0026】

Nd:YAG、OPOシフトされたレーザはその構造のためにモノブロックレーザと呼ばれている。これは共にモノリシックユニットに接着または融着されるためにモノブロックと呼ばれている。構造は全ての他のドープ結晶が結合されるドープされていないYAGのモノリシックレールで開始する。モノブロックは比較的頑丈なユニットである。Qスイッチ動作の特性と動作環境の可変性のために、パルスの間のパルス幅と出力エネルギーに大きな不一致が存在する。モノブロックレーザビームのダイバージェンスはまた他の技術程、狭くはない。過剰なビームダイバージェンスはOPOのような非線形変換器の使用から生じる。これは、設計者はできれば非線形装置を使用することを好まない理由である。実際に、非線形装置は高品質で、単一モードで、回折が限定されたレーザビームの実現に関してはしばしば“代表的なもの”である。これは、さらに回折が限定されたビームと少ないエネルギーがシステムのターゲットおよび距離測定の要求を満たすために必要であるために重要である。

【0027】

直接変換レーザがビーム品質および他の設計および製造理由の見解から好ましいので、アイセーフ帯域の直接レーザ動作を可能にするポンプ光源の問題を考慮することが合理的である。例えばエルビウムイオンレーザは1500ナノメートルのソースでポンプされるならば、アイセーフ帯域で直接的にレーザ光を発生できる。しかしながら、利用可能なポンプ光波長は半導体物理学および製造能力の問題である。発光ダイオードはスペクトルおよび帯域の広い選択肢で利用可能である。GaAsおよびGaAlAsダイオードは750乃至980ナノメートルの範囲で利用可能である。これらは廉価の市場の既製の装置として入手可能であり、高いパワーレベルで動作する。例えば808ナノメートルのダイオードは典型的にネオジムレーザで使用される。または940ナノメートルのダイオードは典型的にイッテルビウムレーザで使用される。直接変換アイセーフレーザに適切なダイオードを生成するために、設計業者は約1500ナノメートルで動作するダイオードを必要とする。異なる半導体材料はこの波長を発生するために必要とされる。ある材料が知られており、それはインジウム - ガリウム - アルミニウムおよび、インジウム燐酸塩ダイオードを含んでいる。しかしながらこれらの材料はGaAs技術と同じ程度に容易に入手可能ではない。このような材料が容易に入手可能であっても、それらの使用を取巻く他の緩和問題が存在する。通常、これらの材料はGaAs材料とほぼ同様に作用しない。例えばダイオード対ダイオードまたはバー対バーの1対1の比較では、パワーにおいて4倍の係数が存在する。固定した量の駆動電流が与えられると、940ナノメートルのダイオードは1500ナノメートルのダイオードよりも4倍の光を発生する。また頑丈さの視点から、GaAs製品は優秀である。価格は同様に940nmのダイオードでは低い。

【0028】

従来技術の直接変換エルビウムアイセーフレーザのレーザポンプ方式の図である図2を

10

20

30

40

50

参照する。レーザはYAG媒体に分散されるエルビウムイオン 24 を使用する。1540ナノメートルレーザポンプソース16は $^4I_{13/2}$ エルビウムエネルギーレベル18を励起することにより $^4I_{15/2}$ エルビウムエネルギーレベル22をポピュレートする。結果的なレーザ動作20は1640ナノメートルでエネルギーを発生する。これは共振的にEr:YAGをポンプされ、標準で50%程度の高さの勾配効率と空洞内ポンプ構造を発生できる。一般的にK. Spariosu、M. Birnbaum、B. Vianaの参考文献(“Er³⁺:Y₃Al₅O₁₂ laser dynamics: effects of upconversion”、Opt. Soc. Am. B、11(5)、894-900、(1994))および、K. Spariosu、M. Birnbaumの参考文献(“Intracavity 1.549 μm pumped 1.634 μm Er:YAG Lasers at 300K”、IEEE J. Quantum Electron. 30(4)、1044-1049、(1994))を参照されたい。ポンプエネルギーは効率的にEr:結晶ホストにより変換される。このポンピング方式は量子欠陥が非常に小さいために高い効率と優秀な熱放散を誇る。しかしながら、これらの波長において効率的な高いパワーのダイオードソースがないことはしたがってこのタイプのレーザの実行を著しく限定する。さらに、低いエネルギーレベルのマニホールドにおけるシュタルクのエネルギーレベル構造に依存する共振ポンピング方法のために、実現されることのできる反転密度はこの共振の漂白により限定される。全体的なイオン密度に関して説明すると、このタイプのポンピングで実現されることのできる最大の分布反転は以下の式1に示される。

$$N = (f_1 f_3 - f_2 f_4) / (f_1 + f_2) \quad (\text{式1})$$

Er:YAGにおけるこの最大の反転密度は例えば1540 nmのポンプ波長で約0.1 N_Tであることがわかった。

【0029】

代替のポンピング方法は $^4I_{11/2}$ エルビウムエネルギーレベルを励起することであり、これは1600ナノメートルのレーザ動作のためにさらに高い反転分布密度を潜在的に実現する $^4I_{13/2}$ エルビウムエネルギーレベルをポピュレートする。1つのこのような励起方法はイッテルビウム - エルビウムエネルギー転移であり、これはYb、Er:ガラスレーザをポンプするための良好に設定された技術である。この方法は図3に示されている。

【0030】

従来技術のイッテルビウム - エルビウムイオン間エネルギー転移アイセーフレーザのレーザポンプ方式を示す図である図3では、940ナノメートルのポンプソース28はイッテルビウムイオン26中に $^2F_{5/2}$ エネルギーレベルを分布させるために使用される。非放射性のイオン間エネルギー転送30が生じ、それは $^4I_{11/2}$ エルビウムイオン36エネルギーレベルを励起する。高速度の緩和が生じ、したがって $^4I_{13/2}$ エルビウムレベルをポピュレートする。結果的なレーザ動作34は1600ナノメートルのアイセーフビームを発生する。このポンピング方法についての問題はエネルギー転移の効率が低いことである。YAGのような結晶ホストでは、大きな逆転転移によって変換効率をガラスよりも低いレベルまで減少する。この効率減少に対する1つの重要な影響ファクタは例えば文献[2]のように燐酸塩ガラスと比較して、結晶において $^4I_{11/2}$ レベルがかなり長い寿命であることである。このイオン間エネルギー転移の非効率性はホスト材料の大きな加熱を生じ、高い動作パワーに対するスケールアップを阻止する。

【0031】

図4は、エルビウムアイセーフレーザにおける $^4I_{11/2}$ と $^4I_{13/2}$ エネルギーレベル励起による従来技術の直接変換のレーザポンプ方式の概略図を示している。図4の方法は980ナノメートルのポンピング40により直接的にエルビウムイオン38の $^4I_{11/2}$ レベルを励起するさらに好ましいポンピング方式を表している。この方法により、損失のあるイオン間エネルギー転移機構は避けられる。 $^4I_{11/2}$ から $^4I_{13/2}$ レベルの緩和42が生じる。結果的なレーザ動作は1600ナノメートルのビームを発生する。しかしながら、このポンピング方式に関する問題は $^4I_{15/2}$ と $^4I_{11/2}$ 転移での非常に低い吸収断面である。

【0032】

10

20

30

40

50

エルビウムドーピング濃度は過酷な上方変換と濃度消滅損失のために、1%程を超えて増加されることができないので、唯一の緩和方法は980ナノメートルのポンプ40をエルビウムレージングエネルギーレベルへ効率的に付着するための非常に長い吸収長を使用することである。これは吸収長が数メートルである場合、エルビウムドープされた光ファイバ中で適切に行われている。多数の電気通信グレードのエルビウムドープされたファイバ増幅器(EDFA)と、10ワットよりも大きい出力容量を有する市場で入手可能なEr:ファイバレーザはこの技術に基づいている。

【0033】

YAGのようなさらに普通のホストは磷酸塩ガラスと比較して非常に長い $^4I_{11/2}$ 寿命を有するが、他の有望なホストが存在する。これらのホストには Y_2SiO_5 (YSO)、 Sc_2SiO_7 、 Sc_2SiO_5 、 $Ca_2Al_2SiO_7$ (CAS)、 $Ca_2Al_2SiO_7$ (CGS)、 YVO_4 および $BeAl_2O_4$ が含まれており、ここで $^4I_{11/2}$ 寿命は非常に短く、したがって潜在的に改良された効率をこのポンプ方式に提供する。以下の表1はこれらの潜在的なホストおよびそれらの対応するエネルギーレベル寿命を列挙している。

【表1】

結晶ホスト	Er ⁴ I _{13/2} 寿命 (ms)	Er ⁴ I _{11/2} 寿命 (ms)
Sc ₂ SiO ₇	6.6	0.0056
Sc ₂ SiO ₅	5.6	0.0089
Y ₂ SiO ₅ (YSO)	8	0.016
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ (CAS)	7.6	0.041
Ca ₂ Ga ₂ SiO ₇ (CGS)	6.4	0.08
YVO ₄	2.5	0.03
BeAl ₂ O ₄	5	0.008
YAG	8	0.1

表 1

【0034】

本発明は2つの技術的方法を統合することにより従来技術の問題を解決する。例示的な実施形態では、ポンプソースは非常に効率的なネオジムまたはイットルビウムレーザであり、エネルギー変換は空洞内ポンプされたエルビウムレーザである第2のレーザによって行われ、これはエネルギー蓄積/増強能力を提供し、それと共にアイセーフ出力を直接的に発生する。このようにして、2つのレーザ技術は相乗的に組合わされ、それによって減少されたダイオードポンプソース数で所望のエネルギーの増強と、本質的に良好なビーム品質を有する直接的なアイセーフレージングの両者が実現される。

【0035】

図示の実施形態では、本発明は、非線形周波数変換器を使用する必要なく、既に非常に効率的であるダイオードポンプされた1ミクロンのNd:YAG、Nd:YVO₄、またはYb:YAGレーザの効率的なエネルギー変換を行う空洞内ポンプされたEr結晶レーザが開示されている。さらに重要なことは、Er:結晶は高いパワー出力レベルを依然として提供しながら、ダイオードまたはダイオードバー数の大きな減少が使用されることができるよう効率的なエネルギー蓄積媒体であることである。これは低パワーで廉価のアイセーフレーザソースから便宜性を得られる種々のプラットフォームで構成されることのできる実用的で、廉価な装置に変形される。さらに、本発明は本質的にコンパクトで廉価である空洞内エネルギー変換を使用するので、非常に減少された数のダイオードポンプソースで出力エネルギーおよびパワーの大きなスケーリングを可能にする。適切なEr:結晶により、空洞内ポンプ方式はまたこれらのレーザの超短いQスイッチパルス動作の効率的な生成

を行う。

【 0 0 3 6 】

本発明の例示的な実施形態は、媒体を通してポンプ光が反復して往復通過するために、
Er：結晶媒体の吸収長が基本的に多数倍増加される空洞内ポンプ方式を実行する。透過
/ 反射被覆が異なるスペクトルの透過および反射を処理するために空洞の端部に設けられ
る。この方法により、効率的な直接ポンプされたEr：結晶アイセーフレーザが可能であ
る。本発明の例示的な実施形態にしたがったアイセーフレーザの機能ブロック図である図
5を参照する。疑似モノブロック構造は単一の構造に組立てられているYb：YAGレー
ザ54、Er：結晶レーザ50、Co：結晶Qスイッチ58から構成されている。誘電体被覆（
図示せず）とQスイッチ58の機能により、2つの共振レーザ空洞が規定される。第1の空
洞はYb：YAG空洞64である。第2の空洞はEr：結晶レーザ空洞62である。ダイオ
ードバー52、54はエッジポンプ52または端部ポンプ54としてYb：YAGレーザ空洞に対
して位置されている。ポンプ光波長（940ナノメートル）で透過性であり、Yb：YAGレ
ーザ波長（1ミクロン）で反射性である第1の誘電体被覆はダイオードバー54に隣接した
Yb：YAG媒体の端部に配置されている。Yb：YAGレーザ波長（1ミクロン）で反
射性であり、Er：結晶レーザ波長（1.6ミクロン）で透過性である第2の誘電体被覆
はEr：結晶媒体と共通結晶のQスイッチとの間に配置されている。これらの2つの被覆
はYb：YAGレーザ空洞64の範囲を規定する。同様に、Yb：YAGレーザ波長（1ミ
クロン）で透過性であり、Er：結晶波長（1.6ミクロン）で反射性である第3の誘電
体被覆はYb：YAG媒体50とEr：結晶媒体56との間に配置されている。漂白されるま
でEr：結晶波長（1.6ミクロン）で反射性である第3の被覆とQスイッチはEr：結
晶レーザ空洞62の範囲を規定する。

【 0 0 3 7 】

動作において、ダイオードバー52、54はポンプ光エネルギーをYb：YAG媒体50に注入
するために数十ヘルツ程度の反復率で容量性放電電源によりパルス駆動される。Yb：Y
AG媒体50はそれによって励起され、1ミクロンでレーザを発生する。1ミクロンのレー
ザエネルギーはEr：結晶媒体56を励起し、これは1.6ミクロンでレージングする。1.
6ミクロンのエネルギーはEr：結晶レーザ空洞62内で共振的に反射する。エネルギーが成長
されるとき、共通の結晶のQスイッチ60は漂白され、これが行われるとき、1.6ミクロ
ンのエネルギーはパルスのレーザ光60としてQスイッチ58を経て放射される。

【 0 0 3 8 】

この空洞内ポンプされたEr：結晶レーザのエネルギー出力は、同一のパワーダイオード
ポンプソースを使用して空洞内ポンプされたOPOを有するNd：YAGレーザと比較す
るとき10倍増加されることができることが非常に注目される。これは以下の表2に示さ
れている。

【表2】

アイセーフ レーザ システム	通常の パルス エネルギー (J)	光-光 効 率	ダイオード バーの パワー	上レーザレベル 寿命ダイオード ポンプパルス期間S	必要な ダイオード バー数
Nd-OPO	0.01	0.07	70	0.0002	10
I/C Er:Crystal	0.01	0.03	70	0.008	1

表 2

【 0 0 3 9 】

この表2では、空洞内（I/C）Er：結晶レーザに対する仮定された3%の光-光効
率でさえも、投射されたダイオードバーの要求は10分の1に減少されることに注目すべ
きである。

【 0 0 4 0 】

本発明の例示的な実施形態にしたがったエルビウムイオンドープされたイットリウムアルミニウムガーネットレーザ媒体の吸収グラフである図 6 を参照する。注目されるように、主な吸収ピークは 9 6 0 ナノメートルと 9 9 0 ナノメートルとの間にあり、これはイッテルビウムレーザによりアクセスされることができる。しかしながら、他の吸収ピークが 1 ミクロン以上で存在し、それによってネオジウムおよび / またはイッテルビウムレーザが使用されることができる。結局、エルビウムに対するより好ましいホストは、ここで注目するように最も好ましい 1 ミクロンの空洞内ポンプ構造を確実にするためにスペクトルについて評価されることができる。

【 0 0 4 1 】

したがって、本発明を特定の応用に対する特別な実施形態を参照にしてここで説明した。当業者はその技術的範囲内で付加的な変形、応用、実施形態を認識するであろう。

【 0 0 4 2 】

それ故、特許請求の範囲によって、本発明の技術的範囲内で任意および / または全てのこのような応用、変形、実施形態がカバーされることを意図している。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 4 3 】

【図 1】従来技術のモノブロック固体アイセーフレーザの機能ブロック図。

【図 2】従来技術の直接変換エルビウムアイセーフレーザのレーザポンプ方式の概略図。

【図 3】従来技術のイオン間エネルギー転送アイセーフレーザのレーザポンプ方式の概略図

10

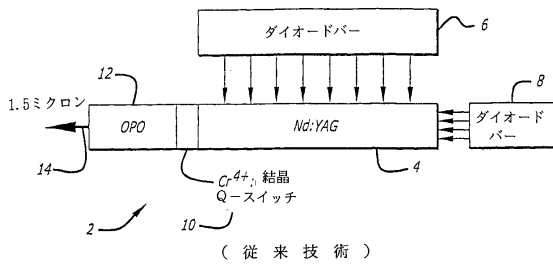
20

。【図 4】状態転移による従来技術の直接変換エルビウムアイセーフレーザのレーザポンプ方式図。

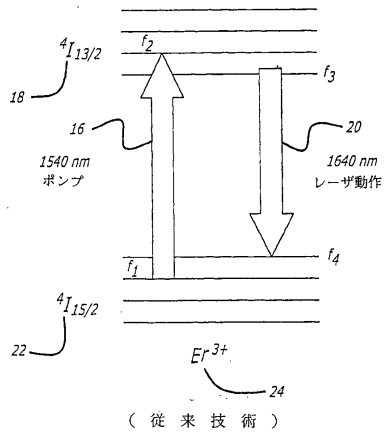
【図 5】本発明の例示的な実施形態にしたがったアイセーフレーザの機能ブロック図。

【図 6】本発明の例示的な実施形態にしたがったエルビウムイオンドープされたイットリウムアルミニウムガーネットレーザ媒体の吸収グラフ。

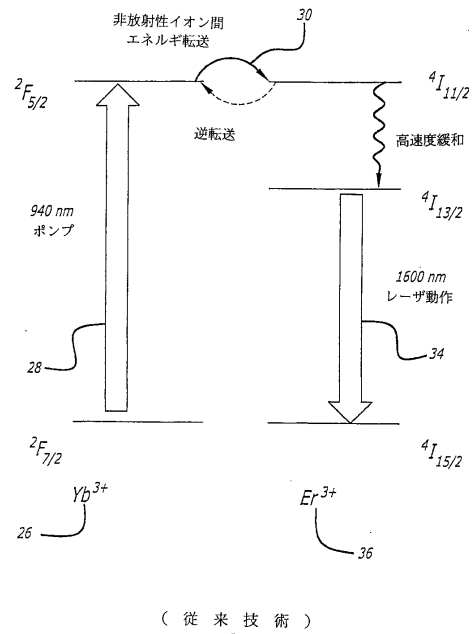
【図 1】



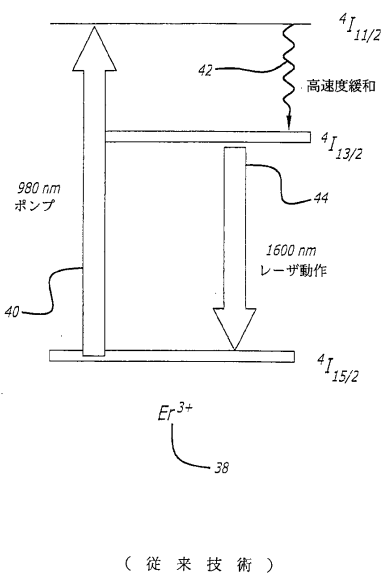
【図 2】



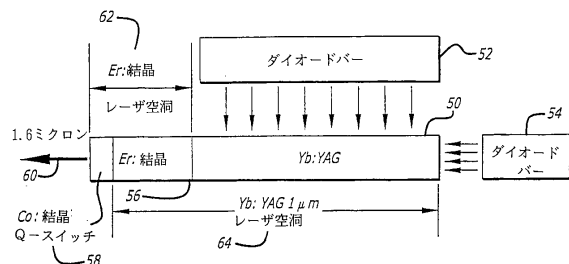
【図 3】



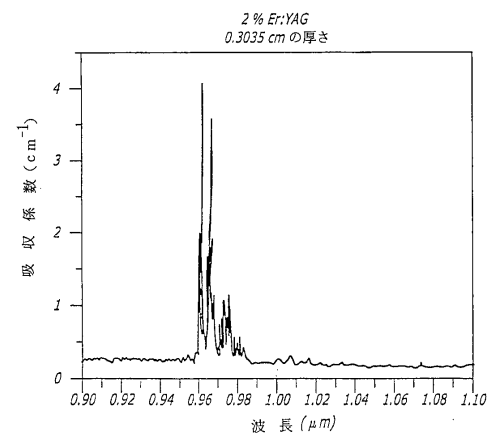
【図 4】



【図 5】



【図 6】



フロントページの続き

- (74)代理人 100109830
弁理士 福原 淑弘
- (74)代理人 100095441
弁理士 白根 俊郎
- (74)代理人 100084618
弁理士 村松 貞男
- (74)代理人 100103034
弁理士 野河 信久
- (74)代理人 100092196
弁理士 橋本 良郎
- (74)代理人 100100952
弁理士 風間 鉄也
- (72)発明者 スパリオス、カリン
アメリカ合衆国、カリフォルニア州 9 1 3 6 0 - 7 0 3 6、サウザンド・オークス、カレ・デ・
オロ 1 2 6 2
- (72)発明者 バーンバウム、ミルトン
アメリカ合衆国、カリフォルニア州 9 0 2 7 5、ランチョ・パロス・ベルデス、ピア・ポリカ
3 0 3 3 2

審査官 傍島 正朗

- (56)参考文献 特公昭46-038066(JP, B1)
米国特許第06373865(US, B1)
米国特許第06002704(US, A)
米国特許出願公開第2002/0101893(US, A1)
米国特許第05123026(US, A)
米国特許第05227913(US, A)
特開平06-013693(JP, A)
特開平06-152018(JP, A)
米国特許第05557624(US, A)
国際公開第03/001247(WO, A1)
K. SPARIOSU, SPIE VISIBLE AND UV LASERS, 1994年, V2115, P45-51

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01S 3/00 - 3/30