

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7532263号

(P7532263)

(45)発行日 令和6年8月13日(2024.8.13)

(24)登録日 令和6年8月2日(2024.8.2)

(51)国際特許分類

F I

H 0 1 S 3/23 (2006.01)

H 0 1 S 3/23

H 0 1 S 3/10 (2006.01)

H 0 1 S 3/10

D

H 0 1 S 3/16 (2006.01)

H 0 1 S 3/16

請求項の数 25 (全16頁)

(21)出願番号 特願2020-573035(P2020-573035)

(86)(22)出願日 令和1年6月27日(2019.6.27)

(65)公表番号 特表2021-533555(P2021-533555  
A)

(43)公表日 令和3年12月2日(2021.12.2)

(86)国際出願番号 PCT/GB2019/051831

(87)国際公開番号 WO2020/002933

(87)国際公開日 令和2年1月2日(2020.1.2)

審査請求日 令和4年6月24日(2022.6.24)

(31)優先権主張番号 1810706.0

(32)優先日 平成30年6月29日(2018.6.29)

(33)優先権主張国・地域又は機関  
英国(GB)

(73)特許権者 514010047

エム スクエアード レーザーズ リミテ  
ッドM S Q U A R E D L A S E R S L I  
M I T E Dイギリス ストラスクライド州 ジー 2 0  
0 エスピー, グラスゴー, メアリーヒル  
ロード, ウェスト オブ スコットランド  
サイエンス パーク, ケルビン キャンパ  
ス 1, ベンチャー ビルディング

(74)代理人 110001302

弁理士法人北青山インターナショナル

(72)発明者 マルコム, グレアム

イギリス ストラスクライド州 ジー 2 0  
0 エスピー, グラスゴー, メアリーヒル  
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 複数のレーザ光源をコヒーレントに組み合わせるレーザシステム

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

レーザシステムにおいて、

第 1 のレーザであって、第 1 の周波数 ( $f_1$ ) および第 1 の出力 ( $P_1$ ) を有する第 1 の連続波出力場を生成するチタンサファイア (T i : s a p p h i r e) 利得媒質を含む第 1 のレーザと、

第 1 の光増幅器であって、第 2 の周波数 ( $f_2$ ) および第 2 の出力 ( $P_2$ ) を有する第 2 の連続波出力場を生成するチタンサファイア利得媒質を含む第 1 の光増幅器とを具備、

前記第 1 の連続波出力場の一部が前記第 1 の光増幅器に注入されて前記第 1 の光増幅器のシードとなり、それによって前記第 2 の連続波出力場が前記第 1 の連続波出力場と同じ周波数 ( $f_1$ ) となり、前記第 1 の連続波出力場の残りは前記第 2 の連続波出力場と組み合わせさせて、前記第 1 の周波数 ( $f_1$ ) で、および前記第 1 の出力 ( $P_1$ ) と第 2 の出力 ( $P_2$ ) との合計から前記第 1 の光増幅器に注入された前記第 1 の連続出力場の一部の出力を引いた出力 ( $P_{o u t}$ ) で前記レーザシステムの単一の出力場を形成することを特徴とするレーザシステム。

## 【請求項 2】

前記第 2 の出力 ( $P_2$ ) が、 $0.5 P_1 < P_2 < 1.5 P_1$  の範囲にある、請求項 1 に記載のレーザシステム。

## 【請求項 3】

前記第 1 の出力 ( $P_1$ ) が 1 ワット以上である、請求項 1 または 2 に記載のレーザシス

10

20

テム。

【請求項 4】

前記第 1 の出力 ( $P_1$ ) が 4 ワット以上である、請求項 1 乃至 3 のいずれか一項に記載のレーザシステム。

【請求項 5】

前記第 1 の光増幅器が、アーム内にチタンサファイア利得媒質が配置されているリングキャビティを含む、請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載のレーザシステム。

【請求項 6】

前記レーザシステムは、第 1 のレーザと第 1 の光増幅器との間の光路内に配置された第 1 のインジェクションロックモジュールをさらに具え、当該インジェクションロックモジュールは、前記第 1 の連続波出力場のモードが前記第 1 の光増幅器のものと一致するようにする手段を提供する、請求項 1 乃至 5 のいずれか一項に記載のレーザシステム。

10

【請求項 7】

前記レーザシステムが、前記第 1 のレーザと前記第 1 の光増幅器との間の光路内に配置された第 1 の光アイソレータをさらに具える、請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載のレーザシステム。

【請求項 8】

前記第 1 の光アイソレータが 1 つまたは複数のダイクロイックミラーを含む、請求項 7 に記載のレーザシステム。

【請求項 9】

前記レーザシステムが、前記第 2 の連続波出力場を前記第 1 の連続波出力場の周波数に周波数ロックするための第 1 の周波数ロック制御ループをさらに具える、請求項 1 乃至 8 のいずれか一項に記載のレーザシステム。

20

【請求項 10】

前記レーザシステムが、第 3 の周波数 ( $f_3$ ) および第 3 の出力 ( $P_3$ ) を有する第 3 の連続波出力場を生成するチタンサファイア利得媒質を含む第 2 の光増幅器をさらに具え、前記単一の出力場の一部が前記第 2 の光増幅器に注入されて前記第 2 の光増幅器のシードとなり、それによって前記第 3 の連続波出力場が前記第 1 の連続波出力場と同じ周波数 ( $f_1$ ) を有するものとなり、前記単一の出力場の残りは前記第 3 の連続波出力場と組み合わせさせて、前記第 1 の周波数 ( $f_1$ ) と、前記第 1 の出力 ( $P_1$ )、第 2 の出力 ( $P_2$ ) および第 3 の出力 ( $P_3$ ) の合計にほぼ等しい出力 ( $P_{out}$ ) とで前記レーザシステムの単一の出力場を形成する、請求項 1 乃至 9 のいずれか一項に記載のレーザシステム。

30

【請求項 11】

前記レーザシステムは、前記第 1 の光増幅器と前記第 2 の光増幅器との間の光路内に配置された第 2 のインジェクションロックモジュールをさらに具え、当該第 2 のインジェクションロックモジュールは、前記第 2 の連続波出力場のモードが前記第 2 の光増幅器のものと一致するようにする手段を提供する、請求項 10 に記載のレーザシステム。

【請求項 12】

前記レーザシステムがさらに、前記第 1 の光増幅器と前記第 2 の光増幅器との間の光路内に配置された第 2 の光アイソレータを具える、請求項 10 または 11 に記載のレーザシステム。

40

【請求項 13】

前記第 2 の光アイソレータが 1 つまたは複数のダイクロイックミラーを含む、請求項 12 に記載のレーザシステム。

【請求項 14】

前記レーザシステムが、前記第 3 の連続波出力場を前記第 2 の連続波出力場の周波数に周波数ロックするための第 2 の周波数ロック制御ループをさらに具える、請求項 10 乃至 13 のいずれかに記載のレーザシステム。

【請求項 15】

2 以上の光場を組み合わせる方法であって、

50

第 1 の周波数 ( $f_1$ ) および第 1 の出力 ( $P_1$ ) を有する第 1 の連続波出力場を生成するためのチタンサファイア利得媒質を含む第 1 のレーザを提供するステップと、

第 2 の周波数 ( $f_2$ ) および第 2 の出力 ( $P_2$ ) を有する第 2 の連続波出力場を生成するためのチタンサファイア利得媒質を含む第 1 の光増幅器を提供するステップと、

前記第 1 の連続波出力場の一部を前記第 1 の光増幅器に注入して前記第 1 の光増幅器のシードとし、前記第 2 の連続波出力場が前記第 1 の連続波出力場と同じ周波数 ( $f_1$ ) を有するようにするステップと、

前記第 1 の連続波出力場の残りとは前記第 2 の連続波出力場とを組み合わせ、前記第 1 の周波数 ( $f_1$ ) で、および前記第 1 の出力 ( $P_1$ ) と第 2 の出力 ( $P_2$ ) の合計から前記第 1 の光増幅器に注入された前記第 1 の連続出力場の一部の出力を引いた出力 ( $P_{out}$ ) でレーザシステムの単一の出力場を形成するステップとを含むことを特徴とする方法。

10

【請求項 16】

前記第 2 の出力 ( $P_2$ ) が、 $0.5 P_1 < P_2 < 1.5 P_1$  の範囲にある、請求項 15 に記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

【請求項 17】

前記第 1 の出力 ( $P_1$ ) は、1 ワット以上または 4 ワット以上である、請求項 15 または 16 に記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

【請求項 18】

前記第 1 の光増幅器を提供するステップは、アーム内にチタンサファイア利得媒質が配置されているリングキャビティを提供するステップを含む、請求項 15 乃至 17 のいずれか一項に記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

20

【請求項 19】

前記方法が、前記第 1 の連続波出力場のモードを前記第 1 の光増幅器のモードに一致させるステップをさらに含む、請求項 15 乃至 18 のいずれか一項に記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

【請求項 20】

前記方法が、前記第 1 のレーザを前記第 1 の光増幅器から光学的に分離するステップをさらに含む、請求項 15 乃至 19 のいずれか一項に記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

【請求項 21】

前記方法が、前記第 1 の光増幅器を前記第 1 の連続波出力場に周波数ロックするステップをさらに含む、請求項 15 乃至 20 のいずれかに記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

30

【請求項 22】

前記方法が、第 3 の周波数 ( $f_3$ ) および第 3 の出力 ( $P_3$ ) を有する第 3 の連続波出力場を生成するために、チタンサファイア利得媒質を含む第 2 の光増幅器を提供するステップと、

前記単一の出力場の一部を前記第 2 の光増幅器に注入して前記第 2 の光増幅器のシードとし、前記第 3 の連続波出力場が前記第 1 の連続波出力場と同じ周波数 ( $f_1$ ) を有するようにするステップと、

40

前記単一の出力場の残りとは前記第 3 の連続波出力場とを組み合わせ、前記第 1 の周波数 ( $f_1$ ) と、前記第 1 の出力 ( $P_1$ )、第 2 の出力 ( $P_2$ ) および第 3 の出力 ( $P_3$ ) の合計にほぼ等しい出力 ( $P_{out}$ ) でレーザシステムの単一の出力場を形成するステップとを含む、請求項 15 乃至 21 のいずれか一項に記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

【請求項 23】

前記方法が、前記第 2 の連続波出力場のモードを前記第 2 の光増幅器のモードに一致させるステップをさらに含む、請求項 22 に記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

【請求項 24】

前記方法が、前記第 1 の光増幅器を前記第 2 の光増幅器から光学的に分離するステップをさらに含む、請求項 22 または 23 に記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

50

**【請求項 2 5】**

前記方法が、前記第 2 の光増幅器を前記第 2 の連続波出力場に周波数ロックするステップをさらに含む、請求項 2 2 乃至 2 4 のいずれか一項に記載の 2 以上の光場を組み合わせる方法。

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0 0 0 1】**

本発明はレーザの分野に関し、より具体的には、複数のレーザ光源をコヒーレントに組み合わせるためのレーザシステムに関する。

**【背景技術】****【0 0 0 2】**

単一のビーム内で生成され、また非常に低いノイズ特性を示す、高出力のレーザ光源を必要とする多くのアプリケーションが存在する。このようなアプリケーションは、原子の光トラッピングである。ここでは、レーザ光源から発生した誘導双極子力はその出力場内にある原子に作用し、出力場の強度の最大（または最小）に引き付けられ（反発され）、トラップされる（光学ピンセットの一種）。出力場内の出力が高いほどトラップの深度が大きくなり、したがって高出力レーザ光源に望ましい。生じる光場の揺らぎ（すなわち、モード変動やその他の残留ノイズ）が、原子の望まない運動や加熱を引き起こす。したがって、高出力レーザ光源も低ノイズを示すことが望まれる。したがって、高出力と低ノイズの組み合わせは、光トラップアプリケーションに最適となる。原子は高度に構成可能な光場にトラップされるため、結晶性の固体システムのエミュレーションに光トラップを使用できる。光トラップはまた、光学時計、量子コンピューティング、光学ピンセット、および量子光学実験に使用されている。

**【0 0 0 3】**

2 以上の独立した利得媒質によって生成された出力光場をコヒーレントに合計するための手段を提供する多くのレーザシステムが当技術分野で知られている。例えば、米国特許第 4, 6 4 9, 3 5 1 号は、複数のレーザによって生成された出力光場を組み合わせるために回折格子が使用されるレーザシステムを開示している。回折格子は、照射時に、望まない高次の次数を抑制しながら、レーザの数に対応する回折次数の強度が実質的に等しくなるように構成されている。複数のレーザの位相ロックは、独立した単一のマスタレーザを使用して、回折格子を介して各レーザの参照ビームを生成することによって達成することができる。

**【0 0 0 4】**

米国特許第 4, 7 5 7, 2 6 8 号は、マスタレーザ光源からのパルス出力が一連のミラーおよび反射プリズムによって分割されて、複数のレーザ利得素子の同時駆動を実現するレーザシステムを開示する。利得素子に機能的に結合された位相共役反射器が、増幅された放射の位相共役を反射して利得素子に戻し、そこでさらに増幅される。次に、出力カプラが、レーザシステムを出る複数の利得素子からの増幅された放射を結合して、単一のコヒーレント出力として形成する。

**【0 0 0 5】**

複数のレーザデバイスをコヒーレントに組み合わせるための代替のレーザシステムが、米国特許出願公開第 2 0 0 4 / 1 6 5 6 2 0 号に開示されている。ここでは、レーザデバイスは、レーザ活性領域を有する光ファイバを含む。各ファイバは、一端にリフレクタが配置されており、他端が光コンバイナに接続されている。光コンバイナは、各光ファイバ内で生成された出力を結合して、単一のコヒーレント出力を形成するように機能する。

**【0 0 0 6】**

米国特許出願公開第 2 0 0 9 / 2 9 6 7 5 1 号では、レーザシステムが、直流注入によって位相ロックされる複数の半導体ダイオードレーザを含む。次に、各ダイオードレーザの光出力がファイバ増幅器によって増幅され、その後、複数のビームスプリッタプレートを用意するビーム結合モジュールによって結合されて、単一のコヒーレント出力ビームが形

10

20

30

40

50

成される。

【0007】

上記のレーザシステムは、レーザシステムに含まれる光学部品点数のために特に効率的ではなく、そのため生成できる出力は大幅に制限される。さらに、これらのレーザシステムによって生成される出力光場は、特に複数の出力が単一のビームではなくアレイ状に組み合わされた場合、モード品質が低く、個々のレーザ光源の出力を結合するために必要な複数の光学部品のために高いノイズレベルを示すことが知られている。結果として、これらのレーザシステムは、上記の高出力低ノイズのアプリケーションでの使用に適さない。

【0008】

自由空間通信で使用する、注入口ッキングモノリシック、単方向シングルモードNd : YAGリングレーザ(NPRO)に基づく高出力低ノイズのレーザシステムが当技術分野で知られている(例えば、SPIE Proceedings 第1417巻、Free Space Communication Technologies III(1991年6月)「Injection chaining of diode-pumped single-frequency ring lasers for free-space communication」、Chengら参照)。この論文は、独立したNPROレーザ(マスターレーザ)によって生成された連続波単周波出力に対する別のNPROレーザ(スレーブレーザ)のインジェクションロックを開示する。次に、インジェクションロックされたNPROレーザ(スレーブレーザ)の出力を使用して、第3のNPROレーザをインジェクションロックすることができる。各NPROレーザの出力は、Nd : YAGの通常の動作波長である1064nmで300ミリワットから350ミリワットの範囲である。上記のように構成された場合、開示されたレーザシステムは、1064nmで750ミリワットから1ワットの範囲の電力を有する単一周波数出力を提供する。実際には、そのようなシステムは非常に敏感であり、特に不安定であることがわかっている。

【0009】

米国特許第5,027,360号は、前述のNd : YAGインジェクションロックレーザシステムの安定性を高めるための解決策を開示している。米国特許第5,027,360号によって提供される解決策は、1064nmで30~40ミリワットの範囲の出力を持つNPROレーザ(マスターレーザ)を使用して、従来のNd : YAGリングキャビティレーザをインジェクションロックして、1064nmで最大13ワットの出力を持つ出力場をシステムから生成する。このシステムは、インジェクションロック状態を維持するために使用されるサーボループ制御システムをさらに含む。これは、スレーブレーザキャビティ内の変動を示すエラー信号を生成し、このエラー信号を使用してロック状態を維持するためにスレーブレーザキャビティの長さを調整することによって実現される。実際には、NPROレーザ(マスターレーザ)の出力を増大させるとシステム全体の安定性が低下するため、米国特許第5,027,360号に開示されているレーザシステムによって生成される出力は、Nd : YAGリングキャビティレーザによって生成できる出力に制限されることがわかっている。

【0010】

上記のNd : YAGベースのインジェクションロックレーザシステム、例えば重力波検出器用のレーザシステムで得られるよりも高出力を必要とする低ノイズアプリケーションがいくつか存在する。そのようなシステムの一例が、Applied Physics B、2011年3月、第102巻、Issue 3、頁529-538、「Injection-locked single-frequency laser with an output power of 220W」、Winkelmannらに開示されている。ここでは、出力2WのNPROレーザが、4ヘッドのNd : YVOレーザ増幅器によって35ワットの出力レベルに増幅される。次に、Nd : YVOレーザ増幅器からの光がNd : YAG発振器をインジェクションロックする。Nd : YAG発振器は、単一のリング共振器内に配置された4エンドポンプNd : YAG結晶で構成されており、1064nmで最大220ワットの出力を実現する。

10

20

30

40

50

## 【発明の概要】

## 【0011】

したがって、本発明の実施形態の目的は、当技術分野で知られているインジェクションロックレーザシステムの前述の欠点を防ぐか、少なくとも軽減することである。

## 【0012】

本発明の実施形態のさらなる目的は、高出力場を生成するための当技術分野で知られているものに代わるレーザシステムを提供することである。

## 【0013】

本発明の実施形態のさらに別の目的は、当技術分野で知られているレーザシステムと比較した場合に、動作波長の柔軟性が向上した出力場を生成するレーザシステムを提供することである。

10

## 【0014】

本発明の第1の態様によれば、レーザシステムにおいて、  
第1のレーザであって、第1の周波数( $f_1$ )および第1の出力( $P_1$ )を有する第1の連続波出力場を生成するチタンサファイア(Ti:sapphire)利得媒質を含む第1のレーザと、  
第1の光増幅器であって、第2の周波数( $f_2$ )および第2の出力( $P_2$ )を有する第2の連続波出力場を生成するチタンサファイア利得媒質を含む第1の光増幅器とを具備、  
前記第1の連続波出力場が前記第1の光増幅器に注入され、それによって前記第2の連続波出力場が、前記第1の周波数( $f_1$ )および前記第1の出力( $P_1$ )と第2の出力( $P_2$ )の合計にほぼ等しい出力( $P_{out}$ )で前記レーザシステムの単一の出力場を形成するレーザシステムが提供される。

20

## 【0015】

上記の構成は、高出力低ノイズの単一の出力場、すなわち単一の横および縦モード、単一の偏光、および第1の連続波出力場との高い位相コヒーレンスを示す第2の連続波出力場を有する固体レーザシステムを提供する。最も重要なことは、この単一出力場の波長は、第1のレーザの動作波長によって制御されるように、400nmの波長範囲(約660nm~1060nm)で調整可能である。これにより、当該レーザシステムは光トラップ内での使用に特に適している。

## 【0016】

第2の出力( $P_2$ )は第1の出力( $P_1$ )と同様、つまり $0.5P_1 > P_2 < 1.5P_1$ の範囲であることが望ましい。

30

## 【0017】

最も好ましくは、第1の出力( $P_1$ )は1ワット以上である。好ましくは、第1の出力( $P_1$ )は4ワット以上である。

## 【0018】

好ましくは、第1の光増幅器は、アーム内にチタンサファイア利得媒質が配置されているリングキャビティを具備する。

## 【0019】

好ましくは、レーザシステムは、第1のレーザと第1の光増幅器との間の光路内に配置された第1のインジェクションロックモジュールをさらに具備、当該インジェクションロックモジュールは、第1の連続波出力場のモードが第1の光増幅器のものと一致することを確実にする手段を提供する。

40

## 【0020】

最も好ましくは、レーザシステムは、第1のレーザと第1の光増幅器との間の光路内に配置された第1の光アイソレータをさらに具備する。任意で、当該第1の光アイソレータは、1つまたは複数のダイクロイックミラーを含む。

## 【0021】

最も好ましくは、レーザシステムは、第2の連続波出力場を第1の連続波出力場の周波数に周波数ロックするための第1の周波数ロック制御ループをさらに具備する。

50

## 【0022】

任意選択で、レーザシステムは、第3の周波数( $f_3$ )および第3の出力( $P_3$ )を有する第3の連続波出力場を生成するチタンサファイア利得媒質を含む第2の光増幅器をさらに具え、第2の連続波出力場は第2の光増幅器に注入され、それによって第1の周波数( $f_1$ )と、第1の出力( $P_1$ )、第2の出力( $P_2$ )および第3の出力( $P_3$ )の合計にほぼ等しい出力( $P_{out}$ )とでレーザシステムの単一の出力場を形成する第3の連続波出力場を生成する。

## 【0023】

上記の構成は、単一の出力場、すなわち、単一の横および縦モード、単一の偏光、および第1および第2の連続波出力場との高い位相コヒーレンスを示す第3の連続波出力場を有するレーザシステムを提供する。単一の出力場は、事実上、第1、第2、および第3の連続波出力場の出力の合計である出力レベルを示す。最も重要なことは、単一の出力場の波長が、最初のレーザの動作波長によって制御されるように、ここでも400nmの波長範囲(約660nm~1060nm)で調整可能であることである。

10

## 【0024】

好ましくは、レーザシステムは、第1の光増幅器と第2の光増幅器との間の光路内に配置された第2のインジェクションロックモジュールをさらに具え、当該第2のインジェクションロックモジュールは、第2の連続波出力場のモードが第2の光増幅器のものとは一致することを確実にする手段を提供する。

## 【0025】

最も好ましくは、レーザシステムは、第1の光増幅器と第2の光増幅器との間の光路内に配置された第2の光アイソレータをさらに具える。任意選択で、第2の光アイソレータは、1つまたは複数のダイクロイックミラーを含む。

20

## 【0026】

最も好ましくは、レーザシステムは、第3の連続波出力場を第2の連続波出力場の周波数に周波数ロックするための第2の周波数ロック制御ループをさらに具える。

## 【0027】

レーザシステムは、第1のレーザと直列に配置されたN個の光増幅器を含むように容易に拡張可能であり、これらは第1のレーザとN個の光増幅器からの出力場の出力の実質的な合計である出力を有する単一の出力場を生成することが理解されよう。したがって、システムは好ましくは、これらの構成要素間の光路内に配置されたインジェクションロックモジュールおよび/または光アイソレータを含むこととなる。さらに、各光増幅器は、光増幅器をシリーズ内の前の光増幅器に周波数ロックするための周波数ロック制御ループを具えることが好ましい。

30

## 【0028】

本発明の第2の態様によれば、2つ以上の光場を組み合わせる方法が提供され、この方法は、

ある周波数( $f_0$ )および第1の出力( $P_1$ )を有する第1の連続波出力場を生成するためのチタンサファイア利得媒質を含む第1のレーザを提供するステップと、

第2の周波数( $f_2$ )および第2の出力( $P_2$ )を有する第2の連続波出力場を生成するためのチタンサファイア利得媒質を含む第1の光増幅器を提供するステップと、

40

前記第1の連続波出力場を前記第1の光増幅器に注入するステップとを含み、これにより、前記第2の連続波出力場が、第1の周波数( $f_1$ )および前記第1の出力( $P_1$ )と第2の出力( $P_2$ )の合計と実質的に等しい出力( $P_{out}$ )でレーザシステムの単一の出力場を形成する。

## 【0029】

第2の出力( $P_2$ )は、第1の出力( $P_1$ )と同様、つまり $0.5P_1 > P_2 < 1.5P_1$ の範囲であることが望ましい。

## 【0030】

最も好ましくは、第1の出力( $P_1$ )は1ワット以上である。好ましくは、第1の出力

50

( $P_1$ )は4ワット以上である。

【0031】

好ましくは、第1の光増幅器を提供するステップは、アーム内にチタンサファイヤ利得媒質が配置されているリングキャビティを提供するステップを含む。

【0032】

好ましくは、2つ以上の光場を組み合わせる方法は、第1の連続波出力場のモードを第1の光増幅器のモードに一致させることをさらに含む。

【0033】

最も好ましくは、2つ以上の光場を組み合わせる方法は、第1の固体レーザを第1の光増幅器から光学的に分離するステップをさらに含む。

10

【0034】

最も好ましくは、2つ以上の光場を組み合わせる方法は、第1の光増幅器を第1の連続波出力場に周波数ロックするステップをさらに含む。

【0035】

任意選択で、2つ以上の光場を組み合わせる方法は、第3の周波数( $f_3$ )および第3の出力( $P_3$ )を有する第3の連続波出力場を生成するために、チタンサファイア利得媒質を含む第2の光増幅器を提供するステップをさらに含み、前記第2の連続波出力場が第2の光増幅器に注入され、前記第3の連続波出力場は前記第1の周波数( $f_1$ )と、前記第1の出力( $P_1$ )、第2の出力( $P_2$ )および第3の出力( $P_3$ )の合計に実質的に等しい出力( $P_{out}$ )でレーザシステムの単一の出力場を形成する。

20

【0036】

好ましくは、2つ以上の光場を組み合わせる方法は、第2の連続波出力場のモードを第2の光増幅器のモードに一致させるステップをさらに含む。

【0037】

最も好ましくは、2つ以上の光場を組み合わせる方法は、第1の光増幅器を第2の光増幅器から光学的に分離することをさらに含む。

【0038】

最も好ましくは、2つ以上の光場を組み合わせる方法は、第2の光増幅器を第2の連続波出力場に周波数ロックするステップをさらに含む。

【0039】

本発明の第2の態様の実施例は、本発明の第1の態様の好ましいまたは任意の特徴を実施するための特徴を含むことができ、その逆も同様である。

30

【0040】

本発明の第3の態様によれば、レーザシステムにおいて、

第1のレーザであって、第1の周波数( $f_1$ )および第1の出力( $P_1$ )を有する第1の連続波出力場を生成する利得媒質を具える第1のレーザと、

N個の光増幅器であって、Nは2以上の整数であり、それぞれある周波数( $f_N$ )および出力( $P_N$ )を有する連続波出力場を生成する利得媒質を有するN個の光増幅器とを具え、

第1の光増幅器の連続波出力場は、前記第1の連続波出力場にインジェクションロックされ、N番目の光増幅器の連続波出力場は、N-1番目の光増幅器の連続波出力場にインジェクションロックされ、その結果、第1の周波数( $f_1$ )と、前記第1の出力( $P_1$ )からN番目の出力( $P_N$ )の合計に実質的に等しい出力( $P_{out}$ )とでレーザシステムの単一の出力場を形成するN番目の連続波出力場を形成するレーザシステムが提供される。

40

【0041】

本発明の第3の態様の実施形態は、本発明の第1から第2の態様の好ましいまたは任意の特徴を実施するための特徴を含むことができ、その逆も同様である。

【0042】

本発明の第4の態様によれば、3つ以上の光場を組み合わせる方法が提供され、この方法は、

50

ある周波数 ( $f_0$ ) および第 1 の出力 ( $P_1$ ) を有する第 1 の連続波出力場を生成するための利得媒質を含む第 1 のレーザを提供するステップと、

N 個の光増幅器を提供するステップであって、ここで、N は 2 以上の整数であり、N 個の光増幅器のそれぞれは、周波数 ( $f_N$ ) および電力 ( $P_N$ ) を有する連続波出力場を生成する利得媒質を含む、ステップと、

前記第 1 の光増幅器の連続波出力場を前記第 1 の連続波出力場にインジェクションロックし、N 番目の光増幅器の連続波出力場を N - 1 番目の光増幅器の連続波出力場にインジェクションロックし、その結果、第 1 の周波数 ( $f_1$ ) と、前記第 1 の出力 ( $P_1$ ) から N 番目の出力 ( $P_N$ ) の合計に実質的に等しい出力 ( $P_{out}$ ) とでレーザシステムの単一の出力場を形成する N 番目の連続波出力場をもたらすステップとを含む。

10

【0043】

本発明の第 3 の態様の実施形態は、本発明の第 1 から第 2 の態様の好ましいまたは任意の特徴を実施するための特徴を含むことができ、その逆も同様である。

【図面の簡単な説明】

【0044】

ここで例としてのみ、図面を参照して本発明の様々な実施形態を説明する。

【図 1】図 1 は、本発明の実施形態によるレーザシステムの概略図を示す。

【図 2】図 2 (a) は、図 1 のレーザシステム内で採用されている光増幅器であり、図 2 (b) は図 1 のレーザシステム内で採用されている代替的な光増幅器の概略図である。

【図 3】図 3 は、本発明の代替的な実施形態によるレーザシステムの概略図を示す。

20

【図 4】図 4 は、本発明のさらなる代替的な実施形態によるレーザシステムの概略図を示す。以下の説明では、同じ部品には明細書および図面全体で同じ符号が付されている。図面は必ずしも原寸に比例しておらず、本発明の実施形態の詳細および特徴をよりよく説明するために、特定の部品の比率が誇張されている。

【発明を実施するための形態】

【0045】

図 1 を参照して、レーザシステムの詳細を説明する。特に、図 1 は、全体を符号 1 によって示すように、本発明の第 1 の実施形態によるレーザシステムの概略図を提示する。

【0046】

レーザシステム 1 は、システム 1 内のマスタ (またはシード) レーザとして使用されるチタンサファイア ( $Ti:sapphire$ ) レーザ 2 を具える。このマスタ・チタンサファイアレーザ 2 は、専用の連続波ダイオード励起固体 (DPSS) レーザ光源 3 によって 532 nm で光励起され、連続波出力場 4 を生成する。出願人による SolisTiS (商標名) レーザがマスタレーザ 2 として使用するチタンサファイアレーザの適切な例であり、一方で励起レーザ 3 は市販のダイオード励起固体 (DPSS) レーザを含み得る。

30

【0047】

励起レーザ 3 は、マスタ・チタンサファイアレーザ 2 に最大 18 ワットの励起出力を提供する能力を有する。ここに記載の実施形態では、励起レーザ 3 は、マスタ・チタンサファイアレーザ 2 に約 18 W のポンプ出力を提供して、880 nm で最大約 4.7 W の出力の調整可能な連続波出力場 4 (660 nm から 1060 nm の間で調整可能) を提供するように構成される。多数のキャビティ内要素 (例えば、エタロン) および制御電子機器の存在により、生成された調整可能な連続波出力場 4 は、単一の横および縦モードとして単一の周波数 ( $f_0$ ) で動作し、低位相ノイズを示す。実際には、マスタ・チタンサファイアレーザ 2 が 400 ミリワットという低い電力で動作するように構成されている場合、出力場 4 の品質を維持できる。

40

【0048】

図 1 から分かるように、連続波出力場 4 は、第 1 の光増幅器 5 に入射される。すなわち、連続波出力場 4 は第 1 の光増幅器 5 のシード光場として用いられ、したがって、第 1 の光増幅器 5 はマスタ・チタンサファイアレーザ 2 のスレーブとなる。第 1 のダイクロイックミラー 6 a を使用して、シード光場 4 を第 1 の光増幅器 5 に再配向する。

50

## 【 0 0 4 9 】

また、インジェクションロッキングモジュール7を、マスタ・チタンサファイアレーザ2とスレーブ光増幅器5との間の光路内に配置されることが好ましい。このインジェクションロッキングモジュールは、2つのダイクロイックミラー6bと6cの間に配置されたビーム成形光学系8を含む。ビーム成形光学系8の複合効果が、シード光場4のモードがスレーブ光増幅器5のモードと一致することを確実にするための手段を提供する。

## 【 0 0 5 0 】

図2(a)は、レーザシステム1内で使用される第1の光増幅器5の概略図を示す。第1の光増幅器5は、アーム内にチタンサファイア利得媒質10が配置されたリングキャビティ9を含み、チタンサファイア利得媒質10は、専用の連続波DPSSレーザ光源11によって532nmで光励起されて、連続波出力場12を生成する。出願人のSolisTiS(商標名)増幅器は、レーザシステム1内で使用するのに適した光増幅器5の例である。マスタ・チタンサファイアレーザ2とは異なり、第1の光増幅器5は、追加のキャビティ内要素を含まない。したがって、シード光場4がない場合、第1の光増幅器5は実質的に自由動作し、したがって、専用の連続波DPSSレーザ光源11によって532nmで励起されると、770nmで双方向出力を生成する。ここで説明する実施形態では、励起レーザ11は、チタンサファイアレーザ5に約18Wの励起出力を提供するように構成されている。

10

## 【 0 0 5 1 】

第1の光増幅器5のキャビティは、シード光場4すなわち880nmの出力場4の周波数( $f_0$ )で共振するように構成されている。上記のように、連続波出力場4は、第1の光増幅器5のシード光場として使用される。これは、連続波出力場4が第1の光増幅器5の出力カプラ13に入射するように構成することによって達成される。結果として、光場4の一部は、第1の光増幅器5のリングキャビティ9に入り、残りは第1の光増幅器5の出力カプラ13から反射される。

20

## 【 0 0 5 2 】

リングキャビティ9に入る出力場4の一部は、第1の光増幅器5の「シード」として機能する。この「シード」は、第1の光増幅器5内で、マスタ・チタンサファイアレーザ2の出力場4と同じ周波数で誘導発光をもたらすとともに、第1の光増幅器5を一方向に動作させる。

30

## 【 0 0 5 3 】

リングキャビティ9に入り、そこで増幅されるシード光場4の部分もまた、出力カプラ13から反射されるものと同相であり、これにより、シード光場4と第1の光増幅器5の出力場12との間の時間的位相コヒーレンスが保証される。

## 【 0 0 5 4 】

出力カプラ13から反射される光場4の部分とリングキャビティ9内で増幅される部分との間の空間位相コヒーレンスは、シード光場4と光増幅器5の出力場12の間の高度なモードマッチングをとることによって保証される。インジェクションロッキングモジュール7が、シード光場4と出力場12のモードマッチングを支援するために使用される。

## 【 0 0 5 5 】

このように、光増幅器5の出力場12がマスタ・チタンサファイアレーザ2の出力場4と組み合わせられ、レーザシステム1は、単一の偏光およびシード光場4との高い位相コヒーレンスを示す単一の横および縦モードのガウシアンビームを示す単一の出力を提供する。つまりそれらの周波数は同相から波形の $\ll 1$ サイクルである。出力場12は、マスタ・チタンサファイアレーザ2の出力場4と第1の光増幅器5の出力場12との出力の実質的な合計である約9.4Wの出力を有する。最も重要なことに、出力場12の波長は、マスタ・チタンサファイアレーザ2の動作波長によって制御されるように、400nmの波長範囲(約660nmから1060nm)にわたって調整可能である。比較すると、従来技術のNd:YAGレーザシステムは、約0.05nmの範囲でのみ調整可能である。したがって、従来のNd:YAGレーザシステムとは異なり、本レーザシステム1は、例え

40

50

ばバリウム、ベリリウム、セシウム、マグネシウム、ルビジウム、ストロンチウム、イッテルビウムなどのトラップすべき特定の原子に応じてレーザ光源を異なる原子波長に調整できる必要がある光トラップに使用することができる。

【 0 0 5 6 】

第 1 の光増幅器 5 は共振装置であり、上記のようにシード光場 4 が光増幅器 5 のリングキャビティ 9 と共振するときインジェクションロックが生じるため、第 1 の光増幅器 5 の共振条件をシード光場 4 に周波数ロックすることがレーザシステムの安定動作のために有益となる。

【 0 0 5 7 】

図 2 ( a ) に示す実施形態では、ハンシュ・クイヨー技術に基づく好ましい周波数ロック制御ループ 1 4 を使用して、所望の周波数ロックを達成する。この技術は、Optics Communication 第 3 5 巻、Issue 3、頁 4 4 1 ~ 4 4 4 ( 1 9 8 0 ) で最初に記載され、第 1 の光増幅器 5 のチタンサファイア利得媒質 1 0 がブリュースターカットクリスタルであるという事実を利用している。その結果、共振周波数の 2 つの直交する偏光成分に非対称性が存在する。この事実を利用するために、半波長板 1 5 を使用して、リングキャビティ 9 に入るシード光場 4 の一部の偏光にオフセットを導入して、ブリュースターカットのチタンサファイア利得媒質 1 0 への入射面に直交する偏光成分を導入する。その後、出力場 1 2 の成分 1 6 が分散形状共振を検出するために採用された偏光アナライザ 1 7 に向けられ、これが電子的な周波数安定化のためにロッキング電子機器 1 8 によって生成されたエラー信号をピエゾマウントされたキャビティミラー 1 9 を介して提供することができる。

【 0 0 5 8 】

図 2 ( b ) に示される代替の実施形態では、ポンドドレバーホール技術に基づく周波数ロック制御ループ 2 0 を使用して、所望の周波数ロックを達成する。この技術は、Applied Physics . B、第 3 1 巻、頁 9 7 ~ 1 0 5 ( 1 9 8 3 ) に記載されている。この技術では、周波数変調器 2 1 が、フォトダイオード 2 3 によって出力場 1 2 の成分 2 2 内で検出されるシード光場 4 に周波数変調を適用する。次に、この周波数変調信号が、周波数ミキサ 2 4 を介して復調されて、エラー信号が生成される。次に、周波数ロック電子機器 2 5 が、ピエゾマウントされたキャビティミラー 1 9 を介して電子周波数安定化のための補正信号を提供する。

【 0 0 5 9 】

光増幅器 5 の上記の周波数ロック技術は、それ自体では、シード光場 4 と出力場 1 2 との間の位相コヒーレンスを提供しないことに留意されたい。むしろ、位相コヒーレンスは、第 1 の光増幅器 5 内の増幅プロセスの直接の結果である。これらの周波数ロック技術は、第 1 の光増幅器 5 の共振の周波数がシード光場 4 の周波数と一致したままとなることを保証するだけである。

【 0 0 6 0 】

出力場 1 2 がマスタレーザ 2 と第 1 の光増幅器 5 の複合出力であることを確認するために、ファイバローンチモジュール 2 6 を使用して出力場 1 2 を分析した。図 1 に示すように、シングルモードファイバ 2 7 に結合される前に、出力場 1 2 の一部 ( 約 2 % ) がガラス基板を用いて取り出される。シングルモードファイバ 2 7 を介した 8 0 % 以上の結合効率は、出力場 1 2 が単一の横方向空間モードを占めることを実証している。ビーム品質の独立した測定では  $M^2$  値は 1 . 1 以下であり、これも出力場 1 2 が単一の横方向空間モードを占めることを示している。

【 0 0 6 1 】

上述のように、インジェクションロックが達成される前に、一方向動作を強制するための内部要素を含まない第 1 の光増幅器 5 は双方向に動作し、その出力の半分がマスタレーザ 2 に向けられる。しかしながら、ダイクロイックミラー 6 a、6 b、および 6 c の存在により、7 7 0 nm でフリーランニングする光増幅器 5 の逆行発振がマスタレーザ 2 に戻るのが防止される。好ましくは、ダイクロイックミラー 6 a、6 b および 6 c によって提

10

20

30

40

50

供される光学的分離は、 $-50\text{ dB}$ 以下の光学的分離を提供することができる。マスタレーザ2を第1の光増幅器5から光学的に分離する方法は、フリーランニングする光増幅器5の出力場の波長がマスタレーザ2の動作波長と著しく異なる（すなわち、 $10\text{ nm}$ を超えて異なる）レーザシステムに特に適している。

#### 【0062】

当業者には、マスタレーザ2と光増幅器5との間に代替型の光アイソレータを配置できることを理解されるであろう。例として、図3には、本発明の第2の実施形態による代替のレーザシステムが、全体を符号28で示されている。図3に示すレーザシステム28は、ダイクロイックミラー6が標準ミラー29に置き換えられ、光アイソレータ30がマスタレーザ2と光増幅器5との間の光学経路内に配置されることを除いて、図1および2に示す上述したレーザシステム1と同様である。この実施形態は、フリーランニングする光増幅器5の出力場の波長とマスタレーザ2の動作波長との間の差を必要としない。

10

#### 【0063】

上記のレーザシステム1および28は、マスタレーザ2または第1の光増幅器5のいずれかの独立した動作によって達成され得るものよりも大きい高出力場12（ $\sim 9.4\text{ W}$ ）を提供することができる。最も重要なことに、出力場12の波長は、マスタ・チタンサファイアレーザ2の動作波長によって制御されるように、 $400\text{ nm}$ の波長範囲（約 $660\text{ nm}$ から $1060\text{ nm}$ ）にわたって調整可能である。これは、従来技術で知られているNd:YAGレーザシステム、例えば米国特許第5,027,360号に開示されているものよりも約2桁大きい。これは、マスタレーザ2によって生成される出力場4の出力が、米国特許第5,027,360号のレーザシステムで採用されているものよりも少なくとも1桁大きい場合でも達成される。出願人は、より高出力のマスタレーザを採用することによる安定性の低下は、自由空間通信システムや重力波検出器では許容できないが、生成された出力場の動作波長の調整可能性を高めることが非常に有益である光トラップレーザシステムにとっては、許容できるトレードオフであることを見出した。

20

#### 【0064】

図1～3に示されているレーザシステム1、28のさらに重要な利点は、追加の光増幅器5を含めることで容易に拡張できるという事実である。例として、図4は、全体を符号31で示すように、本発明の実施形態による代替的なレーザシステムを示す。

#### 【0065】

図4にあるように、連続波出力場12が第2の光増幅器5bのシード光場として使用される。すなわち、連続波出力場12は、第2の光増幅器5bのシード光場として使用されて、結果として、第2の光増幅器5bもマスタ・チタンサファイアレーザ2のスレーブとなる。第4のダイクロイックミラー6dが、光場12を第2の光増幅器5bに再配向するために使用される。

30

#### 【0066】

シード光場12のモードが第2の光増幅器5bのモードと一致することを確実にするために、ここでも第2のインジェクションロックモジュール7bが第1および第2のスレーブ光増幅器5、5b間の光路内に配置されることが望ましい。上記と同様の方法で、第2の光増幅器5bの共振条件をシード光場12に周波数ロックすることも、レーザシステム31の安定動作にとって有益である。

40

#### 【0067】

このように第2の光増幅器5bの出力場32は、第1の光増幅器5bの出力場12と組み合わせられ、すなわちマスタ・チタンサファイアレーザ2の出力と組み合わせられ、これによりレーザシステム31は、単一の横および縦モード、単一の偏光、および第1のシード光場4および第2のシード光場12との高い位相コヒーレンスを示す単一の出力を提供する。最も重要なことは、出力場32は、マスタ・チタンサファイアレーザ2の出力場4、第1の光増幅器5の出力場12、および第2の光増幅器5bの出力場の出力のほぼ合計である約 $14\text{ W}$ の出力を有するという事実である。重要なことに、出力場32の波長は、マスタ・チタンサファイアレーザ2の動作波長によって制御されるように、 $400\text{ nm}$ の波

50

長範囲（約660nmから1060nm）にわたって再び調整可能である。

【0068】

上記のレーザシステム1は、実際には、マスタレーザ2の出力場4の出力とN個の追加の光増幅器5との出力の合計に等しい出力を有する出力場を提供するようにスケールアップできることが想定される。

【0069】

いくつかの位相ロックインジェクションロックレーザシステムも開示されている。これらのシステムには、単一の横モードと縦モード、単一の偏光、およびそれぞれのシード光場との高い位相コヒーレンスを示す単一の出力を提供するという利点がある。開示されたレーザシステムの利点は、インジェクションロックレーザシステムの出力場が非常に拡張性が高く、したがって、生成された出力場の出力を増大させるための手段を提供するという事実である。

10

【0070】

開示されたレーザシステムのさらなる利点は、生成される出力場が、マスタレーザ2の動作波長によって制御されるように、400nmの波長範囲（約660nm～1060nm）にわたって調整可能であるという事実にある。これは、チタンサファイア利得媒質がマスタレーザ2およびマスタレーザ2と直列配置された1つまたは複数の光増幅器5内で使用されているという事実の結果である。比較すると、従来技術のNd:YAGレーザシステムは約0.05nmの範囲にわたってのみ調整可能である。したがって、従来のNd:YAGレーザシステムとは異なり、本レーザシステムは、トラップする必要のある特定の原子に応じてレーザ光源を異なる原子波長に調整できる必要がある光トラップに使用することができる。

20

【0071】

2以上の光場を組み合わせる方法およびシステムが開示されている。固体マスタレーザによって生成された第1の連続波高出力場が、第1の固体光増幅器に入射され、マスタレーザの出力場と高い位相コヒーレンスを示すレーザシステムからの単一の出力場を生成する。出力場の出力は、マスタレーザの出力と第1の光増幅器によって生成された出力の合計に等しく、一方でマスタレーザの出力場によって生成されたものと同様のビーム特性を示す。つまり、単一の横および縦モードのガウシアンビームで、単一の偏光の、低ノイズを示す。このレーザシステムは、N個の光増幅器をマスタレーザと直列に配置して、単一の低ノイズ高出力場を提供できるという点で、非常に拡張性が高い。

30

【0072】

明細書全体を通して、文脈上別段の要求がない限り、「具える」または「含む」という用語、またはこれらの変形語は、記載された数またはグループ数を含むが、他の数またはグループ数を除外しない意味として理解される。

【0073】

さらに、説明における先行技術への言及は、その先行技術が一般的な共通知識の一部を形成していることを示すものと解釈されるべきではない。

【0074】

本発明の上記説明は、例示および説明の目的で提示されており、網羅的であること、または本発明を開示された正確な形態に限定することを意図するものではない。記載された実施形態は、本発明の原理およびその実際の適用を最もよく説明し、それによって当業者が様々な実施形態において、企図される特定の使用に適した様々な修正を加えて本発明を最もよく利用できるようにするために選択および説明されたものである。したがって、添付の特許請求の範囲によって規定される本発明の範囲から逸脱することなく、さらなる修正または変更を組み込むことができる。

40

【 図 面 】

【 図 1 】

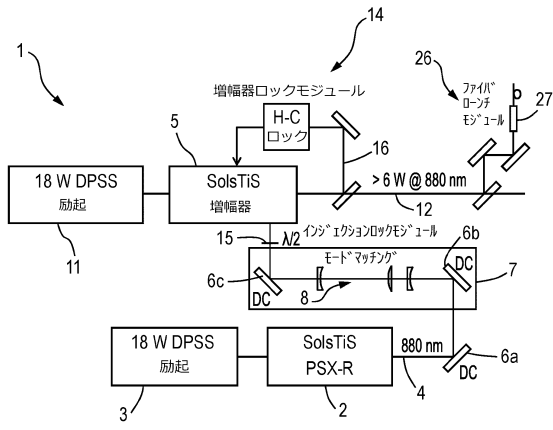


Fig. 1

【 図 2 ( a ) 】

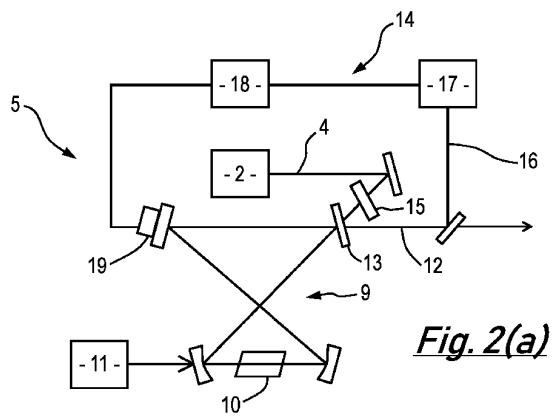


Fig. 2(a)

【 図 2 ( b ) 】

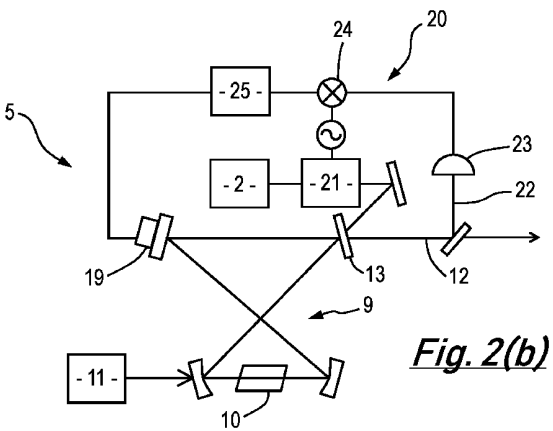


Fig. 2(b)

【 図 3 】

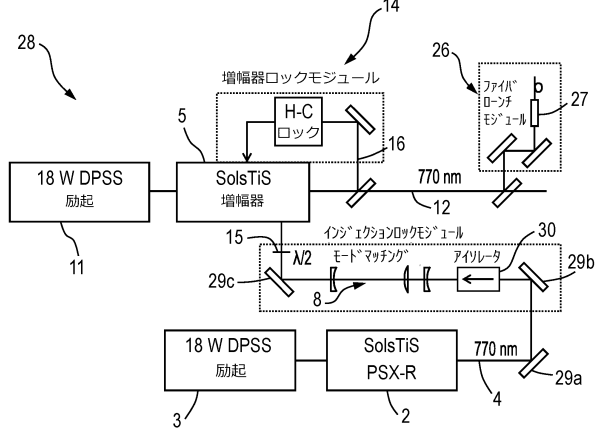


Fig. 3

10

20

30

40

50



## フロントページの続き

- ロード, ウエスト オブ スコットランド サイエンス パーク, ケルビン キャンパス 1, ベンチャー ビルディング, シー/オー エム スクエアード レーザーズ リミテッド
- (72)発明者 マーカー, ガレス  
イギリス ストラスクライド州 ジー20 0エスピー, グラスゴー, メアリーヒル ロード, ウエスト オブ スコットランド サイエンス パーク, ケルビン キャンパス 1, ベンチャー ビルディング, シー/オー エム スクエアード レーザーズ リミテッド
- (72)発明者 ウェブスター, スティーヴン  
イギリス ストラスクライド州 ジー20 0エスピー, グラスゴー, メアリーヒル ロード, ウエスト オブ スコットランド サイエンス パーク, ケルビン キャンパス 1, ベンチャー ビルディング, シー/オー エム スクエアード レーザーズ リミテッド
- 審査官 大和田 有軌
- (56)参考文献 米国特許第05027360 (US, A)  
特公昭48-022315 (JP, B1)  
米国特許出願公開第2016/0315441 (US, A1)  
特開2001-230478 (JP, A)  
特開2007-003616 (JP, A)  
国際公開第2016/103483 (WO, A1)  
特開平11-317567 (JP, A)  
特公昭48-022316 (JP, B1)  
特許第7336447 (JP, B2)  
N. J. Vasa, et al., "Comparative study of spectral narrowing of a pulsed Ti:Sapphire laser using pulsed and CW injection seeding", Applied Physics B, 1996年01月, Vol.62, No.1, p.51-57  
L. Winkelmann, et al., "Injection-locked single-frequency laser with an output power of 220 W", Applied Physics B, 2011年02月11日, Vol.102, No.3, p.529-538  
Yong-Ho Cha, et al., "Development of a Continuous-wave 3-W 756-nm Injection-locked Ti:Sapphire Laser", 2007 Conference on Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim, 2007年08月26日  
Holger Muller, et al., "Phase-locked, low-noise, frequency agile titanium:sapphire lasers for simultaneous atom interferometers", Optics Letters, 2006年01月15日, Vol.31, No.2, p.202-204
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
H01S 3/00 - 3/30