

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2021-523562
(P2021-523562A)

(43) 公表日 令和3年9月2日(2021.9.2)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 S 3/08 (2006.01)	HO 1 S 3/08	5 F 1 7 2
HO 1 S 3/098 (2006.01)	HO 1 S 3/098	5 F 1 7 3
HO 1 S 5/14 (2006.01)	HO 1 S 5/14	
HO 1 S 5/065 (2006.01)	HO 1 S 5/065	
HO 1 S 5/06 (2006.01)	HO 1 S 5/06	

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 39 頁)

(21) 出願番号 特願2020-561720 (P2020-561720)
 (86) (22) 出願日 平成31年4月15日 (2019.4.15)
 (85) 翻訳文提出日 令和2年11月30日 (2020.11.30)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2019/027534
 (87) 国際公開番号 W02019/212735
 (87) 国際公開日 令和1年11月7日 (2019.11.7)
 (31) 優先権主張番号 62/666,677
 (32) 優先日 平成30年5月3日 (2018.5.3)
 (33) 優先権主張国・地域又は機関 米国 (US)

(71) 出願人 516144164
 クアンタム-エスアイ インコーポレイテッド
 QUANTUM-S I INCORPORATED
 アメリカ合衆国 06437 コネチカット州
 ギルフォード オールド ウィットフィールド
 ストリート 530
 (74) 代理人 100105957
 弁理士 恩田 誠
 (74) 代理人 100068755
 弁理士 恩田 博宣
 (74) 代理人 100142907
 弁理士 本田 淳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学素子の特徴付け

(57) 【要約】

光学素子の特徴付けるための方法および装置において、光学素子はレーザーの一部分であり、キャビティ内レーザービームを横切る光学素子を走査するように移動ステージに取り付けられている。レーザーの性能特性は、光学素子の位置の関数として記録される。

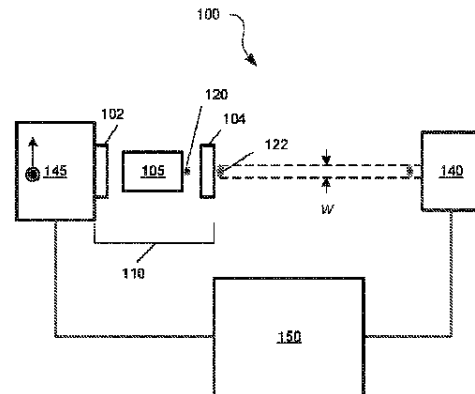


FIG. 1

【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

光学特徴付け装置であって、
レーザービームを生成するように構成されたレーザーを備え、
前記レーザーは、
第 1 のミラーと、
第 2 のミラーを第 1 の方向および第 2 の方向に移動させるように構成された二次元移動
ステージに取り付けられた前記第 2 のミラーであって、前記第 1 の方向および第 2 の方向
は、前記第 2 のミラーの位置においてレーザービームの伝搬方向によって規定される第 3
の方向に実質的に垂直であり、前記第 1 のミラーおよび第 2 のミラーは、前記レーザーの
レーザーキャビティを規定する、前記第 2 のミラーと、を含む、光学特徴付け装置。

10

【請求項 2】

前記第 1 のミラーは、前記レーザーキャビティから前記レーザービームの少なくとも一
部分を放出するように構成された出力カプラである、請求項 1 に記載の光学特徴付け装置
。

【請求項 3】

前記レーザーは、前記レーザーキャビティをさらに規定する複数のキャビティ内ミラー
をさらに含む、請求項 1 または 2 に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 4】

前記複数のキャビティ内ミラーの第 1 のキャビティ内ミラーは、第 2 の偏光タイプの光
よりも良好に第 1 の偏光タイプの光を反射するように構成され、前記複数のキャビティ内
ミラーの他のキャビティ内ミラーは、前記第 1 の偏光タイプの光よりも良好に前記第 2 の
偏光タイプの光を反射するように構成される、請求項 3 に記載の光学特徴付け装置。

20

【請求項 5】

前記レーザービームは、前記第 1 のミラーと前記第 1 のキャビティ内ミラーとの間の第
1 の平面内を伝搬し、
前記レーザービームは、前記第 1 の平面内ではない第 3 の方向に伝搬する、請求項 4 に
記載の光学特徴付け装置。

【請求項 6】

前記レーザービームの少なくとも 1 つの特性を測定するように構成された光学検出シス
テムをさらに備える請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

30

【請求項 7】

前記光学検出システムは、パワーメーターを備える、請求項 6 に記載の光学特徴付け装
置。

【請求項 8】

前記光学検出システムは、第 1 のフォトダイオードを備える、請求項 6 または 7 に記載
の光学特徴付け装置。

【請求項 9】

前記光学検出システムは、パルス特徴付け検出器を含む、請求項 6 ~ 8 のいずれか一項
に記載の光学特徴付け装置。

40

【請求項 10】

前記パルス特徴付け検出器は、自己相関器を含む、請求項 9 に記載の光学特徴付け装置
。

【請求項 11】

前記レーザービームが前記第 2 のミラーの少なくとも選択された部分に入射するように
、二次元移動ステージを使用して前記第 2 のミラーを移動させるように構成されたコント
ローラをさらに備える請求項 1 ~ 10 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 12】

前記コントローラは、前記第 2 のミラーの複数の部分の各々について少なくとも 1 つの
検出器から測定結果を受信するようにさらに構成される、請求項 11 に記載の光学特徴付

50

け装置。

【請求項 13】

前記測定結果は、高速フォトダイオード信号、時間的パルス幅、および光パワー測定値のうちの一つまたは複数である、請求項 12 に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 14】

前記コントローラは、モードロック電流閾値を決定するようにさらに構成される、請求項 12 または 13 に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 15】

前記コントローラは、高速フォトダイオード信号に基づいてモードロック電流閾値を決定するようにさらに構成される、請求項 14 に記載の光学特徴付け装置。

10

【請求項 16】

前記コントローラは、二分探索を使用してモードロック電流閾値を決定するように構成される、請求項 14 または 15 に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 17】

前記コントローラは、前記光学特徴付け装置の損傷閾値を決定するように構成される、請求項 12 ~ 16 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 18】

前記コントローラは、光パワー測定値に基づいて損傷閾値を決定するように構成される、請求項 17 に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 19】

前記コントローラは、前記光学特徴付け装置の寿命を決定するように構成される、請求項 12 ~ 18 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

20

【請求項 20】

前記コントローラは、光パワー測定値に基づいて前記寿命を決定するように構成される、請求項 19 に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 21】

前記コントローラは、前記第 2 のミラーの 1 つまたは複数の特性の 2 次元マップを作成するようにさらに構成される、請求項 12 ~ 20 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 22】

ベースプレートを含むハウジングをさらに備え、
前記第 1 のミラーは、前記ハウジング内のベースプレートに取り付けられ、
前記第 2 のミラーは、前記ハウジングの外側に配置されている、請求項 1 ~ 21 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

30

【請求項 23】

前記第 2 のミラーは、可飽和吸収体ミラー (SAM) である、請求項 1 ~ 22 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 24】

前記レーザービームの経路において前記第 1 のミラーと前記第 2 のミラーとの間に配置された利得媒体をさらに備える請求項 1 ~ 23 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

40

【請求項 25】

前記第 2 のミラーは、前記レーザーキャビティのエンドミラーである、請求項 1 ~ 24 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 26】

光学特徴付け装置であって、
ビーム軸を有するキャビティ内レーザービームを生成するように構成されたレーザーと、
光学素子が前記キャビティ内レーザービームを受け取るように前記光学素子を保持するように設けられた位置決めマウントであって、前記光学素子を前記ビーム軸を実質的に横

50

切って動かすことができる前記位置決めマウントと、を備える光学特徴付け装置。

【請求項 27】

前記キャビティ内レーザービームは、前記光学素子の非線形特性を探查する、請求項 26 に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 28】

前記キャビティ内レーザービームは、光学顕微鏡では実質的に視認できない前記光学素子の光学特性を探查する、請求項 26 または 27 に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 29】

前記光学素子は、前記レーザーのレーザーキャビティを規定する、請求項 26 ~ 28 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

10

【請求項 30】

前記光学素子は、前記レーザーのエンドミラーである、請求項 26 ~ 29 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 31】

前記光学素子は、可飽和吸収体である、請求項 26 ~ 29 のいずれか一項に記載の光学特徴付け装置。

【請求項 32】

光学素子を特徴付ける方法であって、
レーザーのキャビティ内ビームを実質的に横切る光学素子を走査すること、
走査された光学素子の位置の関数として前記レーザーの性能特性を記録すること、を備える方法。

20

【請求項 33】

前記性能特性の複数の値を前記光学素子上の複数の位置にマッピングする表示情報を提供することをさらに備える請求項 32 に記載の方法。

【請求項 34】

前記性能特性は、前記光学素子の光学的に非線形な特性に関連付けられている、請求項 32 または 33 に記載の方法。

【請求項 35】

前記性能特性は、光学顕微鏡では実質的に視認できない前記光学素子の光学特性に関連付けられている、請求項 32 ~ 34 のいずれか一項に記載の方法。

30

【請求項 36】

前記光学素子は、前記レーザーのレーザーキャビティを規定する、請求項 32 ~ 35 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 37】

前記光学素子は、前記レーザーのエンドミラーである、請求項 32 ~ 36 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 38】

前記光学素子は、可飽和吸収体である、請求項 32 ~ 37 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 39】

前記性能特性は、前記レーザーの光パワーを含む、請求項 32 ~ 38 のいずれか一項に記載の方法。

40

【請求項 40】

前記性能特性は、前記レーザーの時間的パルス幅を含む、請求項 32 ~ 39 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 41】

前記性能特性は、モードロックポンプ閾値を含む、請求項 32 ~ 40 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 42】

二分探索を使用してモードロックポンプ閾値を決定することを備える請求項 41 に記載

50

の方法。

【請求項 4 3】

前記二分探索を使用してモードロックポンプ閾値を決定することは、ポンプ電流範囲を規定すること、前記ポンプ電流範囲の中間点に実質的に等しい電流を使用して前記レーザーをポンピングすること、をさらに含む、請求項 4 2 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

関連出願

本出願は、「35 USC 119(e)」の下で、2018年5月3日に提出された「光学素子の特徴付け」と題する米国特許出願番号62/666,677号に基づく優先権を主張する。

【0002】

本出願は、光学素子の特徴付ける装置および方法に関する。

【背景技術】

【0003】

ミラー、(限定されないが)光学的非線形結晶、可飽和吸収体、非線形自己集束光学素子、およびビーム成形部品などの光学素子は、さまざまな用途で使用されている。レーザーが期待通りに動作することを保証するために非常に特殊な特性を必要とする、光学素子を使用してレーザーを形成する等の特定の用途がある。

【0004】

例として、可飽和吸収体ミラー(saturable absorber mirror: SAM)をレーザーキャビティのエンドミラーとして使用され得る。SAMにより、レーザーは受動的にモードロックされ、超短レーザーパルスを生成する。超短光パルス(すなわち、約100ピコ秒未満の光パルス)は、研究開発のさまざまな分野だけでなく、時間領域分析を含む商用用途でも有用である。例えば、超短光パルスは、時間領域分光法、光学的距離測定、時間領域イメージング(time-domain imaging: TDI)、光コヒーレンストモグラフィ(optical coherence tomography: OCT)、蛍光寿命イメージング(fluorescent lifetime imaging: FLI)、および遺伝子配列決定のための寿命分解蛍光検出に有用であり得る。超短パルスはまた、光通信システム、医療用途、および光電子デバイスの試験を含む商用用途にも有用であり得る。

【0005】

上述の用途は、典型的には、超短光パルスが所与の用途において有効であるための特定の要件を有する。例えば、(時間的パルス幅または単に「パルス幅」とも呼ばれる)パルス持続時間は、幾つかの用途によっては閾値レベル未満であるべきであり、光パワーは、幾つかの用途によっては閾値レベルよりも大きくなければならない。レーザーのパルス幅および光パワーは、主にSAMの特性に基づいている。したがって、SAMは、特定の用途において有用な十分な大きさの光パワーを有する十分に短いパルスを生成することができなければならない。

【0006】

さらに、レーザーを製造するとき、SAMは、Qスイッチング等の望ましくないレーザー挙動を伴わずに、指定されたポンプパワーおよびモードロックにおいてまたは超えないでレーザーをモードロックさせるように選択されるべきである。ミラー及び/又はSAMは、寿命を示す特性及びレーザーの動作パワーよりも高い損傷閾値も示すべきである。

【発明の概要】

【0007】

本明細書において記載される技術は、光学素子の特徴付ける装置および方法に関する。本出願の一態様によれば、光学特徴付け装置が提供される。光学特徴付け装置は、レーザービームを生成するように構成されたレーザーを含む。レーザーは、第1のミラーおよ

10

20

30

40

50

び第2のミラーを含む。第2のミラーは、第2のミラーを第1の方向及び第2の方向に移動させるように構成された二次元移動ステージに取り付けられ、第1の方向及び第2の方向は、第2のミラーの位置においてレーザービームの伝搬方向によって規定される第3の方向に垂直である。第1のミラーおよび第2のミラーは、レーザーのレーザーキャビティを規定する。

【0008】

本出願の一態様によれば、光学特徴付け装置が提供される。光学特徴付け装置は、ビーム軸を有するキャビティ内レーザービームを生成するように構成されたレーザーを含む。光学特徴付け装置はまた、光学素子がキャビティ内レーザービームを受け取るように光学素子を保持するように設けられ且つ光学素子を軸を横切って移動させることができる位置決めマウントを含む。

10

【0009】

本出願の一態様によれば、光学素子を特徴付ける方法が提供される。方法は、ビーム軸を有するキャビティ内レーザービームを横切る光学素子を走査すること、走査された光学素子の位置の関数としてレーザーの性能特性を記録すること、を含む。

【0010】

本教示の上記の及び他の態様、実施態様、動作、機能、特徴及び実施形態は、添付の図面とともに以下の説明からより十分に理解することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

当業者であれば、本明細書において記載されている図面は例示目的のみであることを理解するであろう。いくつかの事例において、本実施形態の様々な態様は、本実施形態の理解を容易にするために、誇張又は拡大されて示されている場合があることを理解されたい。図面において、同様の参照符号は、概して様々な図面全体を通じて同様の特徴、機能的に類似する及び/又は構造的に類似する要素を参照する。図面は、必ずしも原寸に比例してはならず、むしろ、本教示の原理を例示しているところが強調されている。図面は、決して本教示の範囲を限定するようには意図されていない。

20

【図1】図1は、いくつかの実施形態による、光学特徴付け装置のブロック図である。

【図2】図2は、いくつかの実施形態による、一連のパルスを示す。

【図3】図3は、いくつかの実施形態による、光学検出システムの概略図である。

30

【図4】図4は、いくつかの実施形態による、パルスレーザーの概略図である。

【図5】図5は、いくつかの実施形態による、光学特徴付け装置の一部を示す。

【図6】図6は、いくつかの実施形態による、光学特徴付け装置のエンドミラーマウントを示す。

【図7】図7は、いくつかの実施形態による、光学特徴付け装置を確立するためのパルスレーザーを修正する方法を示す。

【図8】図8は、いくつかの実施形態による、パルス半導体レーザーを示す。

【図9】図9は、いくつかの実施形態による、パルスファイバレーザーを示す。

【図10】図10は、いくつかの実施形態による、光学素子を特徴付ける方法のフローチャートである。

40

【図11】図11は、いくつかの実施形態による、モードロックポンプ閾値を決定する方法のフローチャートである。

【図12】図12は、いくつかの実施形態による、コンピューティングデバイスである。

【図13A-C】図13Aは、いくつかの実施形態による、例示的なパワーマップであり、図13Bは、いくつかの実施形態による、例示的なパルス幅データであり、図13Cは、いくつかの実施形態による、例示的なパルス幅マップである。

【図14A-F】図14Aは、いくつかの実施形態による、例示的なパワーであり、図14Bは、いくつかの実施形態による、例示的なレーザー発振形態マップであり、図14Cは、いくつかの実施形態による、例示的なパルス幅マップであり、図14Dは、いくつかの実施形態による、例示的なパワーマップであり、図14Eは、いくつかの実施形態によ

50

る、例示的なレーザー発振形態マップであり、図14Fは、いくつかの実施形態による、例示的なパルス幅マップである。

【図15A - B】図15Aは、いくつかの実施形態による、例示的なレーザー発振形態マップであり、図15Bは、図15Aのレーザー発振形態マップと比較するための光学顕微鏡画像である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

本出願の特徴及び利点は、図面とともに取り上げられるときに下記に記載される詳細な説明からより明らかとなる。図面を参照して実施形態を説明するとき、方向に関する参照（「上（above）」、「下（below）」、「上部（top）」、「下部（bottom）」、「左（left）」、「右（right）」、「水平（horizontal）」、「垂直（vertical）」など）が使用される場合がある。そのような参照は、読者が図面を通常の向きで見るのを補助するものとしてのみ意図している。これらの方向に関する記載は、具現化されるデバイスの特徴の好適な向き又は唯一の向きを説明することを意図していない。デバイスは、他の向きを使用して具現化されてもよい。

10

【0013】

導入

本発明者らは、光学素子を特徴付ける従来の技術は、特定用途のレーザーシステムを構築するために重要な特性を十分に測定していないこと認識し、諒解している。例えば、ミラーおよび可飽和吸収体、例えば可飽和吸収体ミラー（saturable absorber mirror : SAM）は、従来、顕微鏡を用いた目視観察および/または外部レーザーシステムによる探査（probing）によって特徴付けられる。このような技術は光学素子の特定の特性を測定することができるが、光学素子を特徴付ける従来の技術は、光学素子を使用するレーザーの性能に間接的に関連する特性を測定し、特定の特性を有するレーザーシステムを構築するための重要な特性を直接的に測定していない。したがって、本発明者らは、従来の技術を使用して測定することができない光学素子に関する情報を提供する光学特徴付け技術を考案した。

20

【0014】

限定ではなく例として、SAMは、光の超短パルスを生成するレーザーキャビティのエンドミラー（end mirror）として使用され得る。従来、SAMは、顕微鏡下でSAMを視覚的に検査すること、および/または別個のレーザーシステムを使用してSAMを探査することによって特徴付けられる。例えば、不飽和状態でのSAMの反射率および/または吸収は、レーザービームのリフレクトメトリー（reflectometry）を使用して測定され得る。さらに、SAMの緩和時間（relaxation time）、例えば、SAM内の光電子が伝導帯から価電子帯に緩和するのにかかる時間は、従来、パルスレーザーシステムを使用するポンププローブ技術を用いて測定され得る。本発明者らは、目視検査、反射率および緩和時間は、定量化するためのSAMの有用な特性であり得るが、これらの測定が特定の条件および/または基準を満たすことを確実にすることは、レーザーシステムにおいてSAMを使用することが期待される性能基準を満たすことを決定するのに十分ではないことを認識し、諒解した。例えば、従来の技術は、SAMの表面品質にいくつかのガイダンスを提供するが、SAMを使用するレーザーのモードロックおよび出力性能についての直接的な情報を提供しない。

30

40

【0015】

本発明者らは、SAMをレーザーシステムに含め、そのレーザーシステムの特性を測定することにより、その特定のSAMを組み込んだレーザーの性能に関する直接的な情報が得られることを認識し、諒解した。特に、モードロック（mode-locking）性能（繰り返し率、ポンプ閾値、品質（例えば、Qスイッチがない）およびレーザーの光パワーが直接的に測定されることができる。SAMの欠陥は、パワーの損失またはモードロック性能の不良によって証明され、レーザーシステムの製造者は、レーザーシステムの所望の性能基準を満たす高品質のSAMを選択することができる。

50

【0016】

本発明者らはさらに、レーザーシステムに光学素子を含む光学特徴付け技術が、SAM以外の光学素子の特徴付けに有用であることを認識し、諒解した。例えば、ミラーは、適切な出力レーザーパワーおよびモードロック性能を保証するために、そのようなシステムを使用して特徴付けられ得る。離れた別個のレーザーシステムの出力を用いて光学素子を探查することによって光学コンポーネントの特徴を測定する従来のアプローチとは対照的に、レーザーキャビティ内に特徴付けられる光学素子を含めることによって、従来の技術を用いては不可能な追加の感度(sensitivity)を提供し得る。この追加の感度は、レーザーシステムの出力レーザービーム特性が、レーザーシステムの構成コンポーネントの品質および特性に従ったものであるという事実に起因する。感度の向上は、部分的には、レーザーキャビティ内でコヒーレントな光のビームを生成することに固有の光フィードバックに起因し得る。ミラーを特徴付けることに加えて、非線形光学素子はレーザーキャビティ内で特徴付けられることができ、キャビティ内レーザービームを使用することによって、非線形光学素子の性能に関する追加の情報を提供することができ、この情報は、従来の技術を使用しては得られないばかりか、感度を高めることができる。

10

【0017】

さらに、本発明者らは、SAMなどの複数の光学素子が必ずしもそれらの表面全体で統一されているとは限らないことを認識し、諒解した。SAMには、レーザー出力の損失、モードロック性能の低下、または致命的な障害の原因となる可能性のある複数の欠陥が存在する。したがって、いくつかの実施形態は、SAM、または特徴付けられる他の光学素子を、レーザーキャビティの入射レーザービームに垂直な平面内でSAMを移動させるように構成された二次元移動ステージ上に取り付ける。二次元移動ステージを使用することにより、レーザービームの照射スポットがSAMの一部または全体にわたってラスタ化(rastered)され得る。したがって、SAMの二次元マップが作成されて、SAMのどの部分がレーザーシステムの性能に影響を与える欠陥を有するかを示すことができる。いくつかの例では、使用できない1つまたは複数の大きな領域を有するSAMは、廃棄されるか、またはレーザーシステムの製造に含めない。SAMの使用できない領域が小さいか、またはSAMの一部に局所化されている場合には、レーザービームの照射スポットが(例えば、レーザーシステムは、SAMの識別された部分を使用するとき、必要なパワーおよびモードロック能力を示す)SAMの使用可能と考えられる領域に入射するようにSAMが位置決めされて配置されている限り、SAMはレーザーシステムに含められることができる。

20

30

【0018】

本発明者らはまた、光学素子特徴付け装置において、複数の光学素子を効率的に特徴付けるように、光学素子を容易に取り除いて別の光学素子と置き換えることが有用であり得ることを認識し、諒解した。したがって、光学素子をレーザーシステムのハウジング内に配置するのではなく、光学素子をレーザーハウジングの外側に配置する。いくつかの実施形態では、光学素子は、レーザーシステムの平面に対して垂直に配向され得る。例えば、レーザーシステムのレーザーキャビティは、特徴付けられる光学素子にレーザービームが入射するように、レーザーキャビティを規定する光学系に垂直な方向にハウジングからレーザービームを反射するミラーを含み得る。特徴付けられる光学素子をレーザーハウジングの外側に配置することは、二次元移動ステージをハウジングに適合させる必要がなく、移動ステージの移動範囲がハウジングによって制限されないという追加の利点を有し得る。光学素子および移動ステージをハウジングに適合させる必要があるという制約を取り除くことにより、そうでなければ可能であるより大きな光学素子の特徴付けることが可能である。例えば、任意のサイズのSAMウェーハ(wafer)全体(例えば、直径1、2、3、4、または5インチのウェーハ)は、ウェーハを個々の構成コンポーネントにダイシングする前に特徴付けられる。ダイシングの前にウェーハを特徴付けることによって、SAMウェーハの低品質部分を廃棄することができ、完成したレーザーシステムでは最終的に使用できない個々の構成コンポーネントの製造に従来費やされていた時間および労力を節

40

50

約し得る。

【0019】

複数の光学素子を特徴付ける技術および複数の光学素子を特徴付ける装置の様々な例示的な例を以下に説明する。しかしながら、実施形態は、以下の実施例のいずれかに従って動作することに限定されず、他の実施形態が可能であることを理解されたい。

【0020】

図1は、いくつかの実施形態における超短パルスレーザー110、光学検出システム140、二次元移動ステージ145、およびコントローラ150を含む例示的な光学特徴付け装置100を示す。超短パルスレーザー110は、(いくつかの実施形態において固体材料であり得る)利得媒体105と、利得媒体を励起するポンプ源(pump source)(図示せず)と、光レーザーキャビティの端部を画定する少なくとも2つのキャビティエンドミラー(cavity end mirror)102, 104と、を含む。いくつかの実施形態では、ビーム成形、波長選択、および/またはパルス形成の目的で、レーザーキャビティ内に1つまたは複数の追加の光学素子が存在し得る。動作中、パルスレーザー110は、キャビティのエンドミラー102、104の間、および利得媒体105を通してレーザーキャビティ内を前後に伝搬する超短光パルス120を生成し得る。複数のキャビティミラー104の1つは、一連の光パルス122がパルスレーザー110から放出されるように、循環しているパルスの一部を部分的に伝達し得る。いくつかの実施形態では、エンドミラー102は、パルスレーザー110が受動的にモードロックすることを可能にするSAMであり得る。放出されたパルスは、(破線で示される)ビームウェスト(beam waist)wによって特徴付けられるビームを形成し得る。

10

20

【0021】

いくつかの実施形態では、パルスレーザー110は、パルス波長の少なくとも一部を周波数増倍によってより短い波長に、またはパラメトリック増幅(parametric amplification)によってより長い波長に変換する非線形結晶等の非線形光学素子(図示せず)を含み得る。そのような周波数変換が生じる場合、パルスレーザー110は、第1の波長の光を含む第1のビームと、第2の波長の光を含む第2のビームと、を含み得る。例えば、利得媒体105は、1064nmでレーザー発振して、1064nmでパルスを生成し得る。1064nmのパルスは、KTPまたはBBO等の非線形結晶を使用して、第二高調波発生(second harmonic generation: SHG)によって532nmのパルスに変換され得る。したがって、ビーム122は、1064nmのパルスと532nmのパルスとの両方を含み得る。

30

【0022】

放出されたパルス122の測定された時間的強度プロファイルは、図2に示されるように現れる。いくつかの実施形態では、放出された複数のパルスのピーク強度値はほぼ等しく、プロファイルはガウス時間プロファイルを有し得るが、 sech^2 プロファイル等の他のプロファイルも可能である。いくつかの場合では、複数のパルスは対称的な時間プロファイルを有しておらず、他の時間形状を有してもよい。いくつかの実施形態では、利得および/または損失のダイナミクスは、非対称プロファイルを有する複数のパルスを生成し得る。各パルスの持続時間は、図2に示すように、半値全幅(full-width-half-maximum: FWHM)値によって特徴付けられ得る。複数の超短光パルスのFWHM値は100ピコ秒未満であり得る。

40

【0023】

レーザーから放出される複数のパルスは、一定の間隔Tによって分離され得る。いくつかの実施形態では、Tは、レーザーにおける動的な利得および/または損失の変調率によって決定され得る。モードロックレーザーの場合、Tは、キャビティエンドミラー102、104間の往復移動時間によって決定され得る。いくつかの実施形態によれば、パルス分離時間Tは、約1ns~約100nsの間であり得る。いくつかの場合では、パルス分離時間Tは、約0.1ns~約1nsの間であり得る。いくつかの実装形態では、パルス分離時間Tは、約100ns~約2μsの間であり得る。

50

【 0 0 2 4 】

いくつかの実施形態では、光学検出システム 1 4 0 は、レーザー 1 1 0 からパルス 1 2 2 のビームを受け取り、レーザービームの 1 つまたは複数の特性を検出し得る。光学検出システム 1 4 0 からの検出結果は、分析のためにコントローラ 1 5 0 に供給される。光学検出システム 1 4 0 はまた、レーザービームを様々な検出器のうちの 1 つに案内するためのガイド光学系を含み得る。例えば、図 3 は、ガイド光学系の一例として、ダイクロイックミラー (dichroic mirror) 3 4 1 およびビームスプリッタ 3 4 2 を含む例示的な光学検出システム 1 4 0 を示している。ダイクロイックミラー 3 4 1 は、第 1 の波長の光を反射し、第 2 の波長の光を透過し得る。例えば、レーザービーム 1 2 2 が 1 0 6 4 nm パルスと 5 3 2 nm パルスとの両方を含む場合、1 0 6 4 nm の光は、1 0 6 4 nm の光のパワーを測定する第 1 のパワーメーター (power meter) 3 4 3 に向かって反射され得る。ビームスプリッタ 3 4 2 は、5 3 2 nm の光の一部を、5 3 2 nm の光のパワーを測定する第 2 のパワーメーター 3 4 4 に向けて伝達し得る。ビームスプリッタ 3 4 2 を透過する 5 3 2 nm の光は、パルス特徴付け検出器 3 4 5 に向けられる。パルス特徴付け検出器 3 4 5 は、レーザーシステム 1 1 0 によって出力された 5 3 2 nm のパルスのパルス幅を測定するように構成される。いくつかの実施形態では、パルス特徴付け検出器 3 4 5 は、A P E によって製造された p a l s e T e c h 自己相関器 (autocorrelator) 等の自己相関器であり得る。自己相関器は、レーザーパルスの時間的パルス幅を測定する。他の実施形態では、パルス特徴付け検出器 3 4 5 は、S P I D E R (direct electric field reconstruction) または F R O G (frequency resolved optical gating) のスペクトル干渉測定を実行するデバイスを含み、これらは両方とも、レーザーパルスの時間的パルス幅だけでなく、レーザーパルスの最大強度および位相プロファイルも提供し得る。光学検出システム 1 4 0 の複数の個別検出器の各々からの検出結果は、コントローラ 1 5 0 に供給される。

10

20

【 0 0 2 5 】

複数の実施形態は、特定の光学検出システム 1 4 0 に限定されない。例えば、図 1 は、光学検出システム 1 4 0 が、レーザーシステム 1 1 0 の完全に外部にあることを示している。しかしながら、いくつかの実施形態では、1 つまたは複数の検出器が、レーザーシステム自体の中にも含まれてもよい。例えば、レーザーキャビティが複数の内部ミラーから形成される複数の実施形態では、検出器は、複数のミラーのうちの 1 つまたは複数のミラーの後ろに配置されて、ミラーを透過するレーザービームの一部を検出してもよい。そのような検出器は、レーザーのパワーを測定するために、レーザーシステムのハウジング内に配置され得る。いくつかの実施形態では、光学検出システム 1 4 0 は、ハウジングの外側またはハウジングの内側にあり得る高速フォトダイオードを含み得る。

30

【 0 0 2 6 】

図 1 に戻ると、光学特徴付け装置 1 0 0 は、エンドミラー 1 0 2 上のレーザービームの照射スポットがエンドミラー 1 0 2 の表面全体にわたって走査され得るように、エンドミラー 1 0 2 を移動させるように構成された二次元移動ステージ 1 4 5 を含み得る。移動ステージ 1 0 2 の移動はレーザービームの入射光パルス 1 2 2 に対して垂直であるため、エンドミラー 1 0 2 を移動させてもレーザーキャビティの長さは変化しない。図 1 の二次元移動ステージ 1 4 5 の概略図内の矢印は、図示される実施形態において、移動ステージがエンドミラー 1 0 2 を移動させる (紙面の平面内において上下および紙面の内外の) 2 つの方向を示す。いくつかの実施形態では、二次元移動ステージ 1 4 5 は、コントローラ 1 5 0 によって制御される電動移動ステージである。いくつかの実施形態では、二次元移動ステージ 1 4 5 は、第 2 の一次元移動ステージ上に搭載された第 1 の一次元移動ステージを含み、2 つの移動ステージの移動方向が互いに直交している。二次元移動ステージ 1 4 5 に加えて、いくつかの実施形態は、エンドミラー 1 0 2 の傾斜を制御する 2 軸傾斜調整マウント (図示せず) を含み得る。傾斜調整マウントは、1 つまたは複数のパワー測定からのフィードバックを使用して、エンドミラー 1 0 2 が適切に位置合わせされてパルスレーザー 1 1 0 の性能を最適化することを確実にし得る。

40

50

【0027】

上述したように、光学特徴付け装置100は、移動ステージ145を制御し、光学検出システム140から測定データを受信するためのコントローラ150を含む。以下でより詳細に説明するように、コントローラ150は、記憶装置およびプロセッサを含み得る。記憶装置は、光学検出システム140から受信した測定データ、ならびにプロセッサによって実行されたときにプロセッサに測定データを分析させる複数の命令を記憶し得る。複数の命令は、移動ステージ145の移動をさらに制御し得る。

【0028】

複数の実施形態は、光学特徴付け装置100の特定の光学レイアウトに限定されない。いくつかの実施形態では、光学特徴付け装置100は、特徴付けられる光学素子が最終的に含まれるレーザーシステムのレイアウトと同様のレイアウトを有する。そのような事例では、光学特徴付け装置100の多くの特性がレーザーシステムと同じであることを保証することが有益であり得る。例えば、レーザーキャビティの長さは、光学特徴付け装置100および光学素子を対象としたレーザーシステムにおいて同じであり得る。いくつかの実施形態では、光学特徴付け装置100は、既存のレーザーシステムを変更することによって形成されてもよい。

10

【0029】

モードロックレーザーモジュール

図4を参照すると、光学特徴付け装置100を形成するように変更され得るコンパクトなモードロックレーザーモジュール1-108の一例が示されている。いくつかの実施形態による、コンパクトなモードロックレーザーモジュール1-108は、レーザーキャビティ（レーザーキャビティの第1のエンドミラーとして機能することができる出力カプラ1-111と、レーザーキャビティの第2のエンドミラーとして機能することができる可飽和吸収体ミラー（SAM）1-119との間の光学素子を含む）と、モードロックレーザー1-110の構成要素の一部または全部が取り付けられる（ハウジングとも呼称される）成形ベースシャーシ2-105と、モードロックレーザーの動作を安定させることができる少なくとも1つのキャビティ内光学素子2-128と、レーザーからの出力をより短い波長に変換する際に協働することができる周波数2倍化要素2-170、2-164、2-160と、（光パワー等の）レーザーの動作パラメータを監視し、レーザーによって生成された光パルスに同期した電子クロック信号を生成する電気部品2-190、2-154、2-182、2-116とを含む。ポンプモジュール2-140は、ベースシャーシ2-105に取り付けられ、かつモードロックレーザーの利得媒体1-105を励起するために使用されることができる。

20

30

【0030】

いくつかの実施形態によると、コンパクトなモードロックレーザーモジュール1-108のベースシャーシ2-105は、長さLが約20cmと約30cmとの間、高さHが約10cmと約20cmとの間であり、厚さは約10cmと約30cmとの間である。いくつかの事例では、1つ又は複数の寸法が最大20%大きくなることがある。いくつかの実施形態によれば、コンパクトなモードロックレーザーモジュール1-108によって占有される容積は、約30cm×18cm×3cm、または約1620cm³であり得る。いくつかの実施形態によれば、モードロックレーザーモジュール1-108の全体形状またはフォームファクタは、高さHよりも長い長さLと、長さまたは高さのいずれかよりもはるかに小さい厚さとを有し、2850立方cm未満の容積を占有し、かつ重さが約2キログラム未満、または約2キログラムであるスラブである。いくつかの事例では、モジュール1-108の重量は1キログラム～2キログラムである。

40

【0031】

いくつかの実施形態では、ベースシャーシ2-105は、アルミニウム、チタン、アルミニウムの合金、またはチタンの合金から形成することができる。他の実施形態では他の材料を使用することができる。いくつかの実施形態では、ベースシャーシ2-105は、ベースシャーシ内に機械加工または他の方法（例えば、鋳造または組み立てによって）で

50

形成された複数のキャビティ 2 - 1 0 2 を含むことができる。いくつかの実施形態では、直径 1 2 . 5 mm (またはそれ以下) の光学部品が、モードロックレーザー 1 - 1 1 0 を構築するために使用され、かつベースシャーシ 2 - 1 0 5 のキャビティ 2 - 1 0 2 内に部分的または完全に埋め込まれることができ、カバー (図示せず) をキャビティ 2 - 1 0 2 の上に配置して、キャビティ内の構成要素を外部の環境要因および汚染物質から保護することができる。いくつかの実施形態では、カバーをキャビティ 2 - 1 0 2 上に配置して、1 つまたは複数のキャビティを気密封止することができる。

【 0 0 3 2 】

キャビティ 2 - 1 0 2 の間には、ベースシャーシ 2 - 1 0 5 内に形成されたリブ 2 - 1 0 7 を設けることができる。いくつかのリブには、キャビティ内レーザービームがリブを通して隣接するキャビティへ通過することを可能にする穴または開口部 (視認できない) を設けることができる。いくつかの実施形態によれば、ベースシャーシ 2 - 1 0 5 の縁部に対して角度をなして延在する 1 つ又は複数の傾斜リブ 2 - 1 0 7 を設けることができる。例えば、傾斜リブ 2 - 1 0 7 は、ベースシャーシ 2 - 1 0 5 を横断する角部から角部への方向に延在することができる。傾斜リブ 2 - 1 0 7 は、傾斜リブを有しない場合と比較して、ベースシャーシ 2 - 1 0 5 のねじり剛性を 3 倍に増大させることができる。ねじり剛性が増加することで、レーザー動作の不安定性を防止し、ベースシャーシ 2 - 1 0 5 に作用する摂動力に対するモジュールの耐性を向上させるのに役立つ。いくつかの事例では、リブの少なくとも一部は、キャビティの底部からベースシャーシ 2 - 1 0 5 の上面まで延在して、レーザーモジュール 1 - 1 0 8 のための 1 つ又は複数のカバー (図示せず) をリブに取り付けることができる。これに関して、剛性金属カバー (例えば、約 1 mm を超える厚さを有する金属)、剛性ポリマーカバー (例えば、約 2 mm を超える厚さを有するポリマー)、またはベースシャーシ 2 - 1 0 5 に対してシールされるか、または支持片 (例えば、金属フレーム) でベースシャーシ 2 - 1 0 5 に対して保持されることができる可撓性材料 (金属またはポリマー) を含んだ任意の適切なカバーが使用され得るが、これらに限定されない。いくつかの事例では、カバー材料は、金属製フレーム (約 1 . 5 mm 厚) を用いてベースシャーシに対して保持されているタイベック (Tyvek (登録商標)) (約 0 . 2 5 mm 厚) を含む。

【 0 0 3 3 】

いくつかの実施形態では、1 つまたは複数の取り付け機構 2 - 1 0 3 を 1 つまたは複数のリブ 2 - 1 0 7 に配置することができる。取り付け機構 2 - 1 0 3 は、コンパクトなレーザーモジュール 1 - 1 0 8 を機器または他のプラットフォームに取り付けるために使用することができる。いくつかの場合において、取り付け機構はキネマティックマウントを提供して、各レーザーモジュール 1 - 1 0 8、または同じレーザーモジュールが、ほぼ同じ位置および位置合わせで (例えば、± 1 0 0 ミクロン以内まで) 再現可能に取り付けられるようになる。キネマティックマウントは、取り付け処理によって生じるストレスを軽減し得る。取り付け機構 2 - 1 0 3 は、タップが切られているか、または空の状態である穴を含み得る。穴は皿穴加工されるか、または座ぐり加工されることができる。キネマティックマウントの場合、底面 (図 4 には図示せず) が第 1 の取り付け機構のための円錐形接触面またはリング接触、第 2 の取り付け機構のためのくさび状接触面または 2 点接触面、および第 3 の取り付け機構のための平面または 1 点接触を含む 3 つの取り付け機構 2 - 1 0 3 を設けることができる。代替的に、取り付け機構 2 - 1 0 3 において 2 つの皿穴加工された穴を使用して、ベースシャーシ 2 - 1 0 5 を受承支持構造に位置合わせすることができる。

【 0 0 3 4 】

レーザーモジュール 1 - 1 0 8 のモードロックレーザー 1 1 0 は、レーザーのキャビティの出力端にある出力カプラ 1 - 1 1 1、利得媒体 1 - 1 0 5、およびレーザーキャビティの反対側の端部にある可飽和吸収体ミラー (SAM) 1 - 1 1 9 を含むことができる。レーザーキャビティ内に複数のミラー 2 - 1 1 6、2 - 1 1 7、2 - 1 2 0、2 - 1 2 1、2 - 1 2 2、2 - 1 2 3、2 - 1 2 4、2 - 1 2 5 を配置して、レーザーの光軸 1 - 1

10

20

30

40

50

25を折り返して、レーザーキャビティの長さを延長して、所望のパルス繰り返し率またはパルス分離間隔Tを達成することができる。レーザーキャビティ内にビーム整形光学系（例えば、レンズおよび/または曲面ミラー）を配置して、キャビティ内レーザービームのサイズおよび/または形状を変更することもできる。

【0035】

ここで、1064nmのレーザー発振波長で動作するモードロックレーザー用の例示的な光学部品について説明する。本発明の実施形態は記載された光学部品のみ限定されないことが理解されるであろう。いくつかの実施形態では、より少ないか、またはより多い光学部品を使用することができ（例えば、パルス繰り返し率を変更するためにミラーを追加または除去する）、部品上の光学コーティングは、異なる波長でレーザー発振するレーザーに対して異なるものとすることができる。

10

【0036】

利得媒体1-105は、ベースシャーシ2-105内に熱を放散する熱伝導性マウント（例えば、アルミニウムまたは銅のブロックまたは他の熱伝導性材料）に取り付けられたネオジムドープ材料を含むことができる。モードロックレーザーが高い平均パワー（例えば、300mWを超える）で動作すると、利得媒体1-105において熱レンズ効果が生じる。いくつかの事例では、そのような熱レンズ効果はレーザーの動作を不安定にする可能性がある。利得媒体から熱伝導性マウントへの熱伝達を改善するために、利得媒体1-105をインジウム箔または熱伝導性マウントへの熱伝達を改善する他の適切な材料で包装することができる。いくつかの事例では、銀エポキシまたは他の適切な熱伝導性接着剤を使用して利得結晶を熱マウントに固定することができる。いくつかの事例では、利得媒体1-105および熱伝導性マウントは、熱をベースシャーシ2-105に逃がすことができる熱電クーラー（TEC：thermo-electric cooler）に取り付けることができる。TECまたは液体冷却などの他の能動的冷却技術は、利得媒体1-105の能動的温度制御を提供し、熱レンズ効果を減少させることができる。

20

【0037】

利得媒体1-105の能動的冷却を排除することは、レーザーのコストおよび複雑性を低減することができる。最大10ワットの光ポンピングパワーが利得媒体をポンピングするために使用される場合であっても、利得媒体の能動的温度制御を本実施形態のモードロックレーザー110に使用する必要はない。驚くべきことに、関連する熱レンズ効果（正レンズ効果）がポンプの出力範囲に亘って利得媒体の熱誘起焦点距離を0から約15ジオプタに変えることができるとしても、モードロックレーザー110はこの範囲のポンプパワーに亘って安定してモードロックされたままである。15ジオプタを超える熱レンズ効果の場合、レーザーキャビティは、モードロック動作や連続波動作をサポートできない不安定な共振器になる可能性がある。利得媒体におけるこのような広範囲の熱レンズ効果にわたるモードロックの安定性は、部分的にはモードロックレーザー110のための光学部品の選択および配置によるものである。一実施形態によれば、モードロック動作の安定性および改善された性能は、ある量の熱レンズ効果を利得媒体内で生じさせることに大きく依存する。実施形態では、1ジオプタと15ジオプタとの間の正のレンズ効果の熱レンズ効果の量に対して、モードロックレーザー110の安定したモードロック動作を得ることができる。熱レンズ効果がこの範囲に亘って変化しても、安定したモードロックを維持するためにレーザーキャビティに対して機械的調整を行う必要はない。利得媒体1-105内の熱レンズ効果の量が8ジオプタと12ジオプタとの間の正の熱レンズ効果であるとき、モードロックレーザーの改善された性能を得ることができる。連続波動作では、0ジオプタと少なくとも15ジオプタとの間の正の熱レンズ効果があり得る。熱レンズ効果の量（約4ジオプタを超える）は、（例えば、ヘリウムネオンレーザーまたはレーザーダイオードからの）連続波レーザープローブビームを（例えば、ある角度で）利得媒体1-105を通過させて、「ポンプビームオン」状態と「ポンプビームオフ」状態との間で利得媒体から一定の距離を置いてプローブビームの相対変位を測定することによって測定することができる。ポンプビームオン状態は、レーザーダイオードのポンプビームがオンであり

30

40

50

、レーザー 110 のモードロックレーザー発振のために利得媒体 1 - 105 を励起するときである。相対変位が小さくなるため、4 ジオプタ以下の値を正確に測定することは困難である。

【0038】

利得媒体 1 - 105 における光ポンプビームの吸収は、利得媒体において熱レンズ効果を引き起こす可能性がある。実施形態では、利得媒体における熱レンズ効果の量は、利得媒体 1 - 105 に適用される光ポンプビームのパワー量を変化させること（例えば、ポンプモジュール 2 - 140 からのパワー量を変化させること）によって変化させることができる。追加的または代替的に、利得媒体内の熱レンズ効果の量は、利得媒体 1 - 105 を励起するために使用される光ポンプビームの光波長を調整することによって変化させることができる。光ポンプビームの波長の調整は、例えば、ポンプモジュール 2 - 140 内のレーザーダイオードの温度を調整することによって実行することができる。ポンプビームの波長を調整することは、利得媒体 1 - 105 における光ポンプビームの吸収量を変化させることができる。

10

【0039】

いくつかの実施態様では、利得媒体 1 - 105 は、1064 nm でのレーザー発振を提供することができるバナジウム酸ネオジム (neodymium vanadate) (例えば、 $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$) を含むことができる。他の実施形態では、Nd : YAG、Nd : YLF、および Cr : フォルステライトなどであるが、これらに限定されない他の固体結晶を使用することができる。いくつかの実施形態では、キャビティ内の光学部品がこの波長でレーザー発振するように設計されコーティングされている限り、バナジウム酸ネオジム利得媒体 1 - 105 を使用して 1342 nm でレーザー発振を代替的または付加的に提供することができる。利得媒体は、いくつかの事例では、3 mm ~ 11 mm の長さを有することができる。いくつかの実施形態では、利得媒体の長さは 5 mm ~ 9 mm であり得る。いくつかの事例では、ネオジムドーパントレベル (原子%) は 0.10% ~ 1% とすることができる。いくつかの実施形態では、ドーパントレベルは 0.10% ~ 0.50% とすることができる。いくつかの実施形態では、ドーパントレベルは 0.24% ~ 0.30% とすることができる。いくつかの実施形態によれば、結晶長は約 7 mm とすることができ、ドーパントレベルは約 0.27% とすることができる。約 7 mm の長さに対して 0.3% よりかなり高いドーピングレベル (原子%) が、より高い動作パワーでのレーザーの動作を不安定にし (例えば、高次空間モードでレーザー発振を誘発するか、またはモードロックを不安定にするかまたは終了させる)、これは、キャビティ内部品を再調整することを不所望に必要とする可能性がある。例えば、1% ドーピングでは、モードロックがあるポンプパワーレベルを超えて終了され、モードロックを回復するためにキャビティ内光学素子を再調整しなければならなかった。利得媒体 1 - 105 の横方向寸法 (単数または複数) は、任意の適切な値 (例えば、1 mm ~ 4 mm) とすることができる。利得媒体は、円筒形ロッド、矩形バー、または他の任意の形状の形態とすることができる。

20

30

【0040】

いくつかの実施形態では、利得媒体 1 - 105 の端面は、レーザー発振波長 λ_1 (バナジウム酸ネオジムの場合、約 1064 nm であり得る) およびポンプ波長 λ_p (バナジウム酸ネオジムの場合、約 808 nm であり得る) に対して反射防止コーティングされ得る。いくつかの実施形態では、利得媒体の一方の端面を出力カプラコーティングで被覆して、端面がレーザーキャビティのエンドミラーとして機能し、別個の出力カプラ 1 - 111 を使用する必要がないようにすることができる。

40

【0041】

利得媒体 1 - 105 は、レーザーキャビティの光軸 1 - 125 に対して約 1 度と約 3 度との間の角度に配向された法線ベクトルを利得媒体の端面が有するような向きで、非調整可能なマウント (微細な角度調整または位置調整を提供しないマウント) に取り付けることができる。例えば、利得媒体用の熱伝導性マウントは、利得媒体 1 - 105 が配置される凹部を含むことができる。凹部は、利得媒体を熱伝導性マウントに整列させることがで

50

きる。熱伝導性マウントは、ベースシャーシ 2 - 105 上の特徴（例えば、機械加工された表面、ピン、ねじ穴のうちのいずれか 1 つまたはそれらの組み合わせ）に位置合わせして、利得媒体をレーザーキャビティの光軸 1 - 125 に対してある角度で位置合わせさせることができる。いくつかの実施形態によれば、利得媒体 1 - 105 は、レーザー発振を目的とした好ましい偏光と整列するように、そのマウント内でカットおよび配向させることができる。例えば、利得媒体 1 - 105 は、図 4 の Y 軸に平行な直線偏光でレーザー発振するように配向することができる。

【0042】

いくつかの実施形態によれば、コンパクトなモードロックレーザー用の出力カブラ 1 - 111 は、表面品質が 10 ~ 5（スクラッチおよびディグ）であり、波面誤差が最大で / 10 の高品質のレーザー光学素子とすることができる。出力カブラ 1 - 111 の一方の表面は多層誘電体で被覆されて、レーザー発振波長 λ_1 に対して約 75% と約 95% との間の値を有する反射率を提供し、かつ（最小の反射率で）利得媒体 1 - 105 を励起するために使用されるポンプ波長 λ_p の透過を可能にする。いくつかの実施形態では、レーザー発振波長は約 1064 nm であり、ポンプ波長は約 808 nm であり得るが、他の実施形態では、他の波長を使用することができる。いくつかの実施形態では、レーザー発振波長での出力カブラの反射率は 82% と 88% との間である。この範囲の反射率内の出力カブラが、レーザーの安定動作で所望の量の出力パワーを提供し、かつレーザーの動作範囲に亘って可飽和吸収体ミラー 1 - 119 上に適切な量のフルエンスを提供する。

10

【0043】

出力カブラ 1 - 111 の第 2 の面（レーザー出力側）は、ポンプ波長とレーザー発振波長の両方に対して反射防止コーティングで被覆することができ、かつ出力カブラの反射面に対してある角度（例えば、約 1 度と約 4 度との間）で配向させることができる。出力カブラ 1 - 111 の出力（透過）面からのレーザー発振波長の少量の反射が、モードロックレーザーからのパルスを著しくかつ不利に広げる可能性がある。いくつかの実施形態によれば、出力カブラ上のコーティングは、ごくわずかな反射でポンプ波長 λ_p を透過させるように二色性である。

20

【0044】

いくつかの実施形態によれば、出力カブラ 1 - 111 は、2 つの直交軸（例えば、図 4 の Y 軸および X 軸を中心とする）の周りで光軸 1 - 125 に対して角度調整を提供する 2 軸調整マウントに取り付けることができる。いくつかの実施形態では、出力カブラ 1 - 111 は、ベースシャーシ 2 - 105 に一体化することができる非調整可能なマウントに取り付けることができる。非調整可能なマウントは、コンパクトなレーザーのコストおよび複雑性を低減する。さらに他の実施形態では、出力カブラ 1 - 111 は、透明基板と 1 つまたは複数の光学コーティングとを備える別個の光学部品の代わりに、利得媒体 1 - 105 の端面上の多層光学コーティングとして形成することができる。

30

【0045】

出力カブラ 1 - 111 と利得媒体 1 - 105 との間の距離を変更することによって、モードロックパルスの時間プロファイル（パルス持続時間とも呼ばれる）の FWHM 値を変更することができる。レーザーのモードロックは、出力カブラ 1 - 111 と利得媒体 1 - 105 との間の距離を 0 mm から 10 mm の間で変化させることによって達成することができ、パルス持続時間は、約 9 ピコ秒から約 38 ピコ秒の間で変化させることができる。この範囲の距離は、異なるパルス幅を得るために異なる距離を選択することによって得られる。いくつかの実施形態によれば、出力カブラ 1 - 111 と利得媒体 1 - 105 との間の距離は、4 mm と 8 mm との間に設定される。

40

【0046】

出力カブラ 1 - 111 におけるレーザーのキャビティ内ビームウェストが（ $1/e^2$ で測定されたビーム半径の）100 ミクロンから 180 ミクロンの間であるときに、ある範囲の平均レーザー発振パワーにわたって安定で効率的な動作が達成される。出力カブラ 1 - 111 におけるビームウェストの値は、曲面ミラー 2 - 117 のようなキャビティ内光

50

学素子によって、出力カブラから曲面ミラーまでの距離によって、および利得媒体 1 - 105 内のポンプビームウェストによって部分的に決定される。いくつかの実施形態によれば、利得媒体におけるレーザー発振波長のビームウェストは、利得媒体 1 - 105 におけるポンプビームウェストよりも著しく小さくすることができる。例えば、利得媒体におけるレーザー発振波長に対するビームウェストは、利得媒体において 100 ミクロンと 150 ミクロンとの間とすることができ、ポンプビームに対する最小ウェストは、180 ミクロンと 250 ミクロンとの間とすることができ、ポンプビームは、その光軸に関して完全に対称的ではないものとし得る。出力カブラ 1 - 111 における、かつ利得媒体 1 - 105 内のビームウェストの値はまた、第 2 の曲面ミラー 2 - 127 の焦点距離および可飽和吸収体ミラー 1 - 119 までの第 2 の曲面ミラー 2 - 127 の距離によって影響され得る。レーザーダイオードポンプビームよりもモードロックレーザー 1 - 110 のレーザー発振ビームに対するビームウェストを小さくすることは、モードロックレーザー動作の安定性を改善することができる（例えば、レーザーが利得媒体 1 - 105 内のレーザービームとレーザーダイオードポンプビームとの相対運動によるパワー変動およびモードロック変動の影響を受けにくくすることができる）。用語「ビームウェスト」は、レーザービーム強度がビームの両側でピーク値から $1/e^2$ 値まで低下する空間的範囲を指すために使用される。円形ビームは、単一ビームウェストによって特徴付けられ得る。楕円形のビームは、ビームの短軸に対するビームと長軸に対するビームの 2 つのビームウェストで特徴付けられ得る。

【0047】

レーザーキャビティの反対側の端部には、可飽和吸収体ミラー (SAM) 1 - 119 が取り付けられ得る。SAM は、非線形光吸収を示す多層半導体構造（例えば、多重量子井戸）と、基板上に形成された高反射器とを含むことができる。非線形光吸収は、レーザーに受動モードロックを誘起することができる。例えば、SAM は、低い光強度でより高い吸収および損失を示し、高い光強度でブリーチングするかまたはほとんど吸収を示さず、かつより少ない損失を示し得る。半導体構造は、高反射器に入射し、ほぼ、高反射器から反射される光場によって作成される光定在波のピーク強度に半導体構造が位置するように、SAM 内の高反射器から離間されることができる。SAM の一例は、BATOP オプトエレクトロニクス有限責任会社 (BATOP Optoelectronics GmbH) [独国イェナ (Jena) 所在] から入手可能な品番 SAM - 1064 - 5 - 10 ps - x である。SAM の非線形光吸収のため、高強度の光パルスは低強度の連続波レーザー動作よりもキャビティ内での損失が少ないので、レーザーはパルス動作モード (受動モードロック) で優先的に動作する。

【0048】

いくつかの実施形態によれば、SAM はヒ化ガリウム半導体組成物から形成することができる。SAM は、より大きな基板またはウェーハから切り取ることができ、SAM の面を横切る最大寸法が 1 mm と 3 mm との間で正方形の形状とすることができ、SAM の吸収の緩和時間は 10 ps と 30 ps との間とすることができ、SAM の不飽和吸収は、2% と 6% との間とすることができ、SAM の変調度は、SAM の不飽和吸収の 60% と 74% との間とすることができ、いくつかの実施形態では、緩和時間は約 25 ps であり、非飽和吸収は約 4% である。そのような SAM 1 - 119 は、12 ps と 20 ps との間でパルス持続時間を有するモードロックレーザー発振をサポートすることができる。いくつかの実施形態では、SAM の飽和フルエンスは、約 70 マイクロジュール / cm^2 ($\mu\text{J} / \text{cm}^2$) とすることができ、

【0049】

ヒ化ガリウム SAM の長期動作のためには、キャビティ内レーザービームからの SAM 上の光フルエンスが 2.5 ミリジュール / cm^2 (mJ / cm^2) 未満に保たれるべきであることを認識し、諒解した。5 mJ / cm^2 以上の値では、SAM が損傷する可能性がある。いくつかの実施形態では、SAM 上のフルエンスは、SAM の飽和フルエンスの約 10 倍未満に保つことができる。SAM 上のフルエンスは、SAM におけるビームウェス

トを制御することによって（例えば、レーザーキャビティ内に配置された曲面ミラー 2 - 1 2 7 を用いて）、および出力カプラ 1 - 1 1 1 の反射率を選択してキャビティ内パワーを制御することによって制御することができる。いくつかの実施形態によれば、SAM におけるビームウェストは、出力カプラ反射率が 8 2 % と 8 8 % との間であるとき、8 0 ミクロンと 1 2 0 ミクロンとの間とすることができる。

【 0 0 5 0 】

出力カプラ 1 - 1 1 1 と SAM 1 - 1 1 9 との間に、レーザーキャビティの光軸を複数回折り返す複数のミラーを設けることができる。これらのミラーのいくつか（例えば、ミラー 2 - 1 1 5、2 - 1 2 0、2 - 1 2 1、2 - 1 2 2、2 - 1 2 3、2 - 1 2 4、2 - 1 2 5）は、平坦な面を有することができ、かつ非調整可能なマウントに取り付けられることができる。いくつかの実施形態によれば、2 つのミラー 2 - 1 1 7、2 - 1 2 7 は曲面を有することができ、かつ集束反射器（focusing reflector）を含むことができる。いくつかの事例では、ミラー 2 - 1 1 7、2 - 1 2 7 用の集束反射器の代わりに、他のタイプの集束光学系（focusing optic）（例えば、レンズまたは複合レンズ）を使用することができる（例えば、キャビティ内ビームがミラー 2 - 1 1 7 またはミラー 2 - 1 2 7 の位置で折り返されない場合）。レーザーの光軸を折り返すために使用される平面ミラーおよび曲面ミラーに関して、ミラーの反射率は、ミラーが使用される入射角でのレーザー発振波長に対して非常に高くなり得る。例えば、そのようなミラーの反射率は、ある場合には 9 9 % よりも大きく、さらにある場合には 9 9 . 5 % よりも大きくすることができる。1 つまたは複数の折り返しミラーの表面品質は、少なくとも 1 0 ~ 5（スクラッチおよびディグ）とすることができ、波面誤差は最大で $\lambda / 1 0$ とすることができる。いくつかの事例では、1 つまたは複数の折り返しミラーの表面品質は、少なくとも 4 0 ~ 2 0（スクラッチおよびディグ）とすることができ、波面誤差は最大で $\lambda / 1 0$ とすることができる。スクラッチおよびディグの表面品質に対するより高い値は、折り返しミラーのコストを大幅に削減することができる。

【 0 0 5 1 】

いくつかの実施形態では、ミラーのうちの少なくとも 1 つ（たとえば、ミラー 2 - 1 2 4）は、利得媒体 1 - 1 0 5 から SAM 1 - 1 1 9 への単一の通過のためにキャビティ内ビームを複数回折り返すことができる。図 4 に示す例示的な構成では、利得媒体 1 - 1 0 5 から SAM 1 - 1 1 9 に進む光パルス 1 - 1 2 0 の跳ね返りシーケンスは、ミラー 2 - 1 1 5、2 - 1 1 7、2 - 1 2 0、2 - 1 2 1、2 - 1 2 2、2 - 1 2 3、2 - 1 2 4、2 - 1 2 5、2 - 1 2 4、2 - 1 2 7、2 - 1 2 4 から SAM 1 - 1 1 9 に達する反射のシーケンスである。このシーケンスでは、キャビティ内ミラーのうちの 1 つのミラー 2 - 1 2 4 が多重反射のために使用され、ビームがレーザーキャビティの一端から他端へ進むときに、少なくとも 2 回の反射に対してこのミラー上で入射角の符号が反転される。例えば、図 4 を参照すると、ビームが出力カプラ 1 - 1 1 1 から SAM 1 - 1 1 9 に進むとき、ミラー 2 - 1 2 4 上の第 1 の入射角は + Z 方向であり、第 2 の入射角は - Z 方向である。SAM 1 - 1 1 9 から反射した後、パルスは次に逆跳ね返りシーケンスで利得媒体に戻る。コンパクトなレーザーモジュール内で光軸が複数回折り返すことによって、キャビティ長を延長して、2 0 0 MHz 未満で 5 0 MHz 程度の低いパルス繰り返し率を得ることができる。パルス繰り返し率は、レーザーキャビティの長さに依存し、これは、キャビティ内のミラー間の跳ね返りの数およびミラー間の距離によって部分的に決定される。いくつかの実施形態によれば、パルス繰り返し率は、ミラーを再配置し、かつ第 1 の曲面ミラー 2 - 1 1 7 と第 2 の曲面ミラー 2 - 1 2 7 との間のキャビティ内のミラーを追加または除去して、出力カプラ 1 - 1 1 0 と可飽和吸収体ミラー 1 - 1 1 9 との間の光路長を増減することによって変更することができる。キャビティ内ビームは第 1 の曲面ミラー 2 - 1 1 7 と第 2 の曲面ミラー 2 - 1 2 7 との間でほぼコリメートされているので、ビームがこの領域でコリメートされていない場合よりも、パルス繰り返し率への変更をより容易に行うことができる。いくつかの実施形態では、ミラーを再配置して異なるパルス繰り返し率を得るために、追加の一体型光学マウントをベースシャーシ内に形成することができる。

【 0 0 5 2 】

上記のように、本発明者らは、バイオ光電子チップ上のサンプルの超並列分析には、200MHz未満で50MHz程度の低いパルス繰り返し率が望ましいことを認識し、諒解した。しかしながら、複数回使用されるいくつかのミラーを有する複数のミラーを使用することは、何時間にも亘る安定したモードロックレーザー発振を維持するために、ミラーの互いに対する非常に高度の安定性を必要とする。補強リブを含むベースシャーシ2-105内の支持面に対してミラーを一体的に取り付けることにより、ミラーの必要な安定性および安定したモードロック動作を達成することができる。

【 0 0 5 3 】

いくつかの実施形態では、1つの折り返しミラー2-115は、キャビティ内の放射の偏光を制御し、ポンプビーム放射（図4の太い破線として示される）の監視を可能にするように構成することができる。例えば、折り返しミラー2-115は、偏光（ベースシャーシの面外へのY方向への偏光）を99%を超える高い反射率、さらに、いくつかの事例では、99.5%を超える高い反射率で反射し、かつ直交p偏光に対する反射率が低くなって、p偏光のレーザー発振が防止されるようにコーティングされることができる。いくつかの事例では、折り返しミラー2-115は、20%を超えるp偏光を透過させ、かつs偏光を高い反射率で反射する偏光ビームスプリッタとすることができる。折り返しミラー2-115はさらに、ミラーの後方に位置する光検出器2-116にポンプビーム放射の大部分またはほぼ全部を伝達することができる。いくつかの実施形態では、折り返しミラーは、ポンプビーム放射の透過を可能にするための二色性コーティング（dichroic coating）を含むことができる。他の実施形態では、二色性コーティングを使用しなくてもよく、レーザー発振波長用のコーティングは、検出のために折り返しミラー2-115を通過するポンプビーム放射の適切な透過を可能にし得る。光検出器2-116からの出力は、信号処理および/または外部信号プロセッサへの送信のためにPCB2-190に供給することができる。

【 0 0 5 4 】

いくつかの実施形態では、利得媒体1-105およびSAM1-119内で所望のビームウェストサイズを得るために、2つの曲面ミラー2-117、2-127を設計し、レーザーキャビティ内に配置することができる。第1の曲面ミラー2-117は、利得媒体1-105の近傍のレーザーキャビティの第1の部分に配置することができる。第2の曲面ミラー2-127は、SAM1-119の近傍のレーザーキャビティの第2の部分に配置することができる。少なくとも曲面ミラーの間には、レーザーの光軸を折り返してキャビティ長延長領域においてレーザーキャビティの長さを延長する複数の折り返しミラーを設けることができる。キャビティ長延長領域においてキャビティの長さを延長するために、ミラー2-127とSAM1-119との間にキャビティ内レーザービームを複数回折り返すミラー2-124を追加的に設けることができる。例えば、図4に示すように、曲面ミラー2-127およびミラー2-124は、これら2つの反射器からのキャビティ内ビームを即時の連続的な跳ね返りで3回折り返すことができる。

【 0 0 5 5 】

いくつかの実施形態によれば、第1の曲面ミラー2-117は、球面反射器とすることができ、かつ240mmと260mmとの間の焦点距離 f_1 を有することができる。この反射器の焦点距離の許容誤差は、焦点距離の $\pm 1\%$ とすることができる。本発明者らは、焦点距離が約250mmの第1の曲面ミラー2-117を出力カブラ1-111から230mmと310mmとの間に配置することができ、異なる特性を有する安定したモードロック動作を得ることができることを見出した。いくつかの実施形態によれば、第1の曲面ミラーを出力カブラから280mmと300mmとの間に配置して、コンパクトなレーザーモジュールの広範囲の動作パワーに亘って安定したモードロック動作を得ることができる。この構成では、利得媒体1-105を出力カブラから4mmと8mmとの間に配置することができる。第1の曲面ミラー2-117の焦点距離と利得媒体1-105および出力カブラ1-111に対する第1の曲面ミラー2-117の位置、および第2の曲面ミラ

10

20

30

40

50

− 2 - 1 2 7の焦点距離とSAM 1 - 1 1 9に対する第2の曲面ミラー2 - 1 2 7の位置は、利得媒体内のキャビティ内ビームのビームウェストを決定することができる。

【 0 0 5 6 】

他の実施形態では、第1の曲面ミラー2 - 1 1 7の焦点距離は他の値を有してもよい。例えば、より低いパワーで動作するよりコンパクトなモードロックレーザーに対しては、より短い焦点距離 $f_1 < 230 \text{ mm}$ を使用することができる。実施形態において、出力カプラ1 - 1 1 1は、焦点距離 f_1 の30%以内の値の範囲（例えば、 $0.7 f_1 < d_1 < 1.3 f_1$ ）内にある第1の曲面ミラー2 - 1 1 7からの距離 d_1 に配置することができる。いくつかの事例では、 $0.9 f_1 < d_1 < 1.3 f_1$ である。

【 0 0 5 7 】

いくつかの実施形態では、第1の曲面ミラー2 - 1 1 7は、レーザーの光軸に対するミラーの配向角度（面内の角度および面外の角度）を調整するための2つの自由度のみを提供する調整可能なマウントに取り付けられることができる。調整可能なマウントは、オペレータが、レーザーの動作を安定性、ビーム品質、出力パワー、および/またはパルス特性に関して調整することができるように、レーザーがレーザー発振している間に、光学部品の位置（X、Y、Zのうちの一つまたは複数）および/または向き（入射キャビティ内ビームの光軸に対するピッチおよび/またはヨー）を微調整することを可能にする。微調整は、例えば、ミラーマウント上でのマイクロメータ及び/又は微細にねじ切りされたねじ調整によって達成することができる。調整可能であることは、第1の曲面ミラー2 - 1 1 7の要件ではないことに留意されたい。さらに、レーザーキャビティを形成するように使用される他のミラーが、キャビティの位置合わせを微調整するように使用されてもよい。

【 0 0 5 8 】

レーザーがレーザー発振している間にリアルタイムでレーザーキャビティを位置合わせするための唯一の調整として、第1の曲面ミラー2 - 1 1 7に対して2つの自由度のみを提供し、折り返しミラー（例えば、ミラー2 - 1 2 3）に対して1つの自由度のみを提供することにより、コンパクトなモードロックレーザーモジュールのコストおよび複雑性を低減することができる。他の事例では、例えば、第1の曲面ミラー2 - 1 1 7用のミラーマウントは、ミラーの位置を調整するための追加の自由度を含むことができる。いくつかの実施形態によれば、ポンプビームを整列または再整列させ、モードロックレーザーからの出力パワーを増大させるために、曲面ミラー2 - 1 1 7を調整した後にポンプモジュール2 - 1 4 0に対する調整を行うことができる。

【 0 0 5 9 】

第2の曲面ミラー2 - 1 2 7は球面反射器とすることができ、かつ240 mmと260 mmの間の焦点距離 f_2 を有することができる。この反射器の焦点距離の許容誤差は、焦点距離の±1%とすることができる。本発明者らは、焦点距離が約250 mmの第2の曲面ミラー2 - 1 2 7をSAM 1 - 1 1 9から260 mmと290 mmとの間に配置することができる、異なる特性を有する安定したモードロック動作を得ることができることを見出した。いくつかの実施形態によれば、第2の曲面ミラーをSAM 1 - 1 1 9から270 mmと285 mmとの間に配置して、コンパクトなレーザーモジュールの広範囲の動作パワーに亘って安定したモードロック動作を得ることができる。第2の曲面ミラー2 - 1 2 7の焦点距離およびSAM 1 - 1 1 9に対する第2の曲面ミラー2 - 1 2 7の位置は、SAM 1 - 1 1 9におけるキャビティ内ビームのビームウェストを決定することができ、かつ利得結晶におけるビームウェストにも影響を与えることができる。

【 0 0 6 0 】

他の実施形態では、第2の曲面ミラー2 - 1 2 7の焦点距離は他の値を有してもよい。例えば、より短いパワーで動作するよりコンパクトなモードロックレーザーに対しては、より短い焦点距離 $f_2 < 240 \text{ mm}$ を使用することができる。実施形態では、SAM 1 - 1 1 9は、焦点距離 f_2 の20%以内の値の範囲（例えば、 $0.8 f_2 < d_2 < 1.2 f_2$ ）内にある第2の曲面ミラー2 - 1 2 7からの距離 d_2 に配置することができる。いく

10

20

30

40

50

つかの事例では、 $f_2 < d_2 < 1.2 f_2$ である。

【0061】

レーザーモジュールのコストおよび複雑さを低減するために、第2の曲面ミラー2-127は、例えば、非調整可能なマウントに取り付けることができる。上述のように、(第1の曲面ミラー2-117および折り返しミラー2-123を除く)レーザーキャビティ内のすべての反射部品は、セルフアライニング式の非調整可能なマウントに取り付けることができる。さらに、第1の曲面ミラー2-117は角度調整に対して2つの自由度のみを有し、折り返しミラー2-123は角度調整に対して1つの自由度のみを有することができる。本発明者らは、いくつかの実施形態によれば、これら3つの調整のみを使用して、モードロックレーザーキャビティを長期間安定した動作のために位置合わせすることができることを見出した。例えば、第1の曲面ミラー2-117を使用して、利得媒体1-105からビームを受け取るために固定位置に取り付けられているSAM1-119へビームを導くことができる。(図4の±Y方向における)いかなる面外変位も、折り返しミラー2-123上の単一度の角度調整を調整することによって対処することができる。SAM1-119が、同じ経路に沿ってビームが反射して戻るように垂直入射でキャビティ内ビームを受け取らない場合、SAMへの入射角は、第2の曲面ミラー2-127上でキャビティ内ビームを並進させることによって調整することができる。SAM1-119はほぼ第2の曲面ミラーの焦点にあるので、このミラー上のビームの並進によって、SAMにおける入射角が変更される。第1の曲面ミラー2-117に対して角度調整を行うことによって、キャビティ内ビームを第2の曲面ミラーの表面を横切って並進させることができる。キャビティ内ビームがSAM1-119から第1の曲面ミラー上に反射して戻るまで、第1の曲面ミラーに対して調整を行うことができる。

10

20

【0062】

本発明者らは、SAM上のキャビティ内レーザービームのスポットサイズが、第2の曲面ミラー2-127とSAM1-119との間の距離の変化よりも、第1の曲面ミラー2-117とレーザーの出力カブラ1-111との間の距離の変化に対してより敏感であり得ることを見出した。この結果は、第1の曲面ミラー2-117と第2の曲面ミラー2-127との間の延長されたキャビティの長さに関連している。この延長されたキャビティの長さは、レーザーキャビティの長さの半分より長くすることができ、その長さを通してキャビティ内レーザービームはほぼコリメートされるることができる。曲面ミラー2-117と出力カブラ1-111との間の距離の変化は、延長されたキャビティ内のコリメーションに影響を与える可能性があり、それは第2の曲面ミラー2-127におけるビームサイズの変化を増幅する可能性がある。増幅は、第2の曲面ミラー2-127とSAM1-119との間の距離の変化よりも強くSAM1-119におけるスポットサイズに引き続き影響を与える。従って、第1の曲面ミラー2-117の配置は、SAM1-119上のフルエンスを調整するために使用することができる。いくつかの実施形態では、増幅効果は、第2の曲面ミラー2-127の焦点距離を長くすることによって低減することができる。

30

【0063】

利得媒体1-105内のビームウェストが100ミクロンと150ミクロンとの間であり、かつSAM1-119でのビームウェストが80ミクロンと120ミクロンとの間であるように、レーザーキャビティが上述のように位置合わせされかつ構成される場合、本発明者らは、利得媒体1-105における熱レンズ効果のジオプタから15ジオプタに変化が及ぶ光共振器(レーザーの当業者に公知の条件)に関し、かつ2つの曲面ミラー2-117、2-127の±1%の焦点距離誤差に関する「安定性基準」をレーザーキャビティが満たすことを見出した。高い光パワーでは、利得媒体1-105はポンプ放射から顕著な熱を獲得することができ、加熱された利得媒体は、媒体の温度に依存する合焦パワー(ジオプタ)を有する光学レンズ(熱レンズ効果とも呼ばれる)を作り出すことができる。光ポンピング高出力レーザーの場合、この熱レンズ効果による変化はレーザーを不安定にし、ポンプパワーの初期安定動作点からの50%の増加に対するレーザー発振を消滅

40

50

させる可能性がある。本発明者らは、コンパクトなモードロックレーザーモジュール 1 - 108 が 2 ワットから 8 ワットへのポンプパワーの変動、初期安定動作点からのポンプパワーの 300% の増加に対して安定したモードロック動作を維持することを確認した。レーザーキャビティの安定性の範囲は驚くほど広く、コンパクトなモードロックレーザーを広い範囲のキャビティ内パワーおよび出力パワーに亘って動作させることが可能となる。例えば、レーザーからの平均出力パワーは、この範囲のポンプパワーに亘って 350 ミリワットから 3.5 ワットの間で変化することができ、一方、FWHM パルス持続時間は、12 ピコ秒と 18 ピコ秒との間に維持される。この出力を周波数 2 倍化して、例えば、100 ミリワットと 1.5 ワットとの間の平均パワーレベルで、532 nm の波長で同じ持続時間のパルスを生成することができる。

10

【0064】

いくつかの実施形態によれば、モードロックレーザーの動作を安定化させるのに役立つ、かつ/またはモードロックレーザーのビーム品質を改善するために、レーザーキャビティ内に光学部品を取り付けることができる。例えば、空間モードフィルタ 2 - 118 をレーザーキャビティ内に配置し、高次空間モードでのレーザー発振を防止するように構成することができる。モードフィルタ 2 - 118 は、任意の適切な形状（例えば、円形、楕円形、三日月形、正方形、長方形、多角形など）の開口を含むことができる。開口は、非調整可能なマウントに取り付けることができ、あるいは開口がキャビティ内ビームの光軸を横切る方向に移動できるように取り付けることができる。いくつかの事例（例えば、絞り）では、開口のサイズは、調整可能とすることができる。様々な実施形態において、開口は、レーザー発振動作をレーザーキャビティの最低次の横方向空間モードに制限し、それはモードロックの安定性を向上させることができる。

20

【0065】

動的安定化および位置合わせのために、いくつかの実施形態では、ビームステアリング部品をレーザーモジュール 1 - 108 に含ませることができる。例えば、キャビティ内ビームに対してある角度で回転させることができる 1 つ又は複数の反射防止コーティングされたレーザー窓または光学平面 2 - 128 は、SAM 1 - 119 のキャビティ内ビームの入射角を並進および/または変更するためにアクチュエータ 2 - 162 によって自動的に動作されることができる。アクチュエータとレーザー窓との間の機械的リンク機構 2 - 164、およびレーザー窓 2 - 128 に対するピッチまたはヨーの自動調整を可能にするピッチまたはヨーマウントを設けることができる。アクチュエータ 2 - 162 は、ステッピングモータ、圧電トランスデューサ、容量トランスデューサ、または他の任意の適切なアクチュエータを含むことができる。

30

【0066】

キャビティ内レーザー窓の回転は、レーザー窓からの出射ビームを回転方向に横方向にシフトさせる。横方向のシフト量は、スネルの法則をレーザー窓の 2 つの界面に適用することにより決定することができる。レーザー窓が第 2 の曲面ミラー 2 - 127 と SAM 1 - 119 との間に位置する場合、レーザー窓の回転は主に SAM 上のキャビティ内ビームを並進させることとなる。そのようなレーザー窓の回転は、キャビティ内ビームを SAM を横切って移動させることによって SAM の寿命を延ばすように使用することができる。走査運動は SAM の疲労を減少させることができ、あるいは SAM が損傷を受けている場合、ビームを損傷を受けたスポットから離れるように移動させることができる。レーザー窓 2 - 128 が図 4 に示すように第 2 の曲面ミラー 2 - 127 の前方に配置されている場合、レーザー窓の回転は主に SAM 上へのキャビティ内ビームの入射角を変更することとなる。そのようなレーザー窓の回転は、レーザーキャビティを動的に整列または再整列して安定したモードロック動作を得るように、かつ/または維持するように使用することができる。

40

【0067】

レーザー性能を示し、かつキャビティ内ビームステアリング部品を自動的に調整するために使用され得る信号は、（光検出器 2 - 116 またはポンプモジュールに搭載されてい

50

るポンプ光検出器（図示せず）で検出される）ポンプ出力、レーザーパワーおよび/またはパルス特性（レーザー発振波長に感度が良いレーザー出力光検出器 2 - 1 5 4 で検出される）、および第 2 高調波パワー（2 倍化出力光検出器 2 - 1 8 2 で検出される）のうちの任意の 1 つまたはそれらの組み合わせを含むことができる。信号（単数または複数）は、1 つまたは複数のアクチュエータ 2 - 1 6 2 を動作させるためのフィードバック制御信号の処理および生成のために PCB 2 - 1 9 0 上の回路に供給することができる。いくつかの実施形態では、レーザー出力光検出器 2 - 1 5 4 および 2 倍化出力光検出器 2 - 1 8 2 の一方または両方は、PCB 2 - 1 9 0 上に取り付けられ、かつモードロックレーザーモジュール 1 - 1 0 8 の側面に配置された穴および/または窓（図示せず）を介して放射線を受け取ることができる。いくつかの実施形態では、キャビティ内ビームステアリング部品の回転は、1 つまたは複数のフィードバック信号に基づいて、キャビティアライメントを微調整し、かつ/または SAM 1 - 1 1 9 上のキャビティ内ビームの位置を変更するように自動化することができる。

10

20

30

40

50

【0068】

いくつかの実施形態によれば、追加的または代替的に、利得媒体 1 - 1 0 5 内に非対称熱勾配を誘起することによってキャビティアライメントを得ることができる。非対称の熱勾配は、熱レンズ効果に影響を及ぼし、利得媒体 1 - 1 0 5 を通過する際に、キャビティ内レーザービームに小さな角度偏向を生じさせるように利得媒体 1 - 1 0 5 内の屈折率を変化させることができる。いくつかの実施形態では、1 つまたは複数の温度制御デバイス（例えば、抵抗加熱素子、TECクーラー、またはそれらの組み合わせ）を利得媒体の 1 つまたは複数の側面に接続することができる。いくつかの実施形態によれば、利得媒体 1 - 1 0 5 は、利得媒体の 2 ~ 4 つの面（4 つの長手方向端部）に熱的に結合された 2 ~ 4 つの独立して動作可能な温度制御デバイス（図 4 には示さず）を有し得る。熱的結合は、温度制御デバイスと利得媒体 1 - 1 0 5 の面との間に位置する熱エポキシ又はインジウム箔を含むことができる。各温度制御デバイスはまた、温度制御デバイスの反対側のヒートシンク（レーザーブロックなど）への熱的結合をも含むことができる。いくつかの事例では、1 つまたは複数の温度制御デバイスの動作により、光軸 2 - 1 1 1 を横切る方向にビームを偏向させることができる。温度制御デバイスで温度を選択的に変更することによって、キャビティ内レーザービームをステアリングして再整列させることができる。いくつかの事例では、1 つまたは複数のキャビティ内レーザー窓 2 - 1 2 8 を利得媒体内での熱ビームステアリングと並行して調整して、たとえばキャビティ内ビームを SAM 上に再配置し、かつ/またはレーザーの安定したモードロック動作を維持することができる。

【0069】

本発明者らは、モードロックレーザーの平均パワーおよび/またはスペクトル特性が、安定したモードロック動作を決定することができることを認識し、諒解した。たとえば、モードロック動作中のレーザーの平均パワーが一定の値を下回って降下した場合、モードロックをサポートするのに十分な非線形光吸収が SAM 1 - 1 1 9 がない場合がある。レーザーはこのとき、Q スイッチして SAM 1 - 1 1 9 を損傷し得る。いくつかの事例では、レーザーの平均出力パワーの急速な変動により、レーザーがモードロックに加えて Q スイッチングしていることを示し、これは、SAM 1 - 1 1 9 を損傷する可能性がある。いくつかの実施形態では、レーザー 1 - 1 1 0 によって生成された光パワーおよび/またはレーザーの出力パルスまたはモードロック特性を検知するように少なくとも 1 つのセンサ 2 - 1 5 4（例えば、フォトダイオード）を含み、かつ配置することができる。例えば、第 1 のセンサ 2 - 1 5 4 からの信号をスペクトル分析してモードロック周波数付近の側波帯を検出することができ、これは Q スイッチングの開始および/またはレーザー 1 - 1 1 0 のモードロックパルス列における不安定性を示すことができる。第 2 のセンサ（図示せず）は、レーザー 1 - 1 1 0 によって生成された平均光パワーを検出することができる。検出された平均レーザーパワーが予め設定されたレベルを下回ってドリフトする場合、および/または側波帯変動またはパワー変動が第 1 のセンサ 2 - 1 5 4 によって検出された場合、自動キャビティアライメントルーチンを実行してパワーを回復し、かつ/または修

理のためにレーザーを遮断することができる。いくつかの事例では、モードロックパルス列の不安定性を示す側波帯は、高次空間キャビティモードのレーザー発振によるものである。このような不安定性は、例えば、キャビティ内空間モードフィルタ 2 - 1 1 8 を自動または手で調整することによって修正することができる。いくつかの実施形態によれば、レーザー発振波長に感度の良い 1 つまたは複数のセンサ 2 - 1 5 4 を PCB 2 - 1 9 0 上に取り付けることができる。

【 0 0 7 0 】

いくつかの事例では、追加の信号を処理してレーザーの動作を分析することができる。例えば、ポンプパワーは、レーザーからの平均パワーレベルと共に、(フォトダイオードまたは他の適切な光検出器とすることができる)ポンプパワーセンサ 2 - 1 1 6 を用いて評価することができる。いくつかの実施形態では、周波数 2 倍化パワーの量は、追加的にまたは代替的に、センサ 2 - 1 8 2 (フォトダイオードまたは他の適切な光検出器とすることができる)で監視することができる。例えば、平均レーザーパワーがほぼ一定を維持している間に、平均周波数 2 倍化パワーが減少することは、モードロックパルス長の変化、または周波数 2 倍化光学部品に関する問題を示す可能性がある。

10

【 0 0 7 1 】

コンパクトモードロックレーザーモジュール 1 - 1 0 8 の複数の構成要素は、レーザーキャビティが実質的に単一平面内にあるように、ベースシャーシ 2 - 1 0 5 に取り付けられている。本発明者らは、そのようなレーザーモジュールを光学特徴付け装置として適切であるように修正するために、SAM 2 - 1 2 8 を他の構成要素とは異なる平面に配置することが有用であることを理解した。特に、SAM 2 - 1 2 8 は、レーザーキャビティの他の光学構成要素に対して垂直な方向に SAM 2 - 1 2 8 を方向付けるレーザーモジュール 1 - 1 0 8 のハウジングの外側にあるマウント内に取り付けられ得る。

20

【 0 0 7 2 】

そのような実施形態の一例が図 5 に示され、光学特徴付け装置の一部分 5 0 0 が例示されている。モードロックレーザーモジュール 1 - 1 0 8 は、ハウジング 5 0 1 を含む。モードロックレーザーモジュール 1 - 1 0 8 の構成要素のほとんどは、ハウジング 5 0 1 内の単一平面内にある。ハウジング 5 0 1 の外側に配置されたマウント 5 0 2 は、ミラーまたは SAM などの光学部品を配置することができるレセプタクル (receptacle) を含む。マウント 5 0 2 は、光学部品が上方から落下するように設けられている。レーザービームは上方から光学部品に入射する。マウント 5 0 2 は、水平面内のマウント 5 0 2 内の光学部品の位置を制御し得る 2 つのモーター部分 5 1 0、5 1 1 を含む電動二次元移動ステージに取り付けられている。

30

【 0 0 7 3 】

図 6 は、マウント内に SAM 6 0 1 が配置されたマウント 5 0 2 の拡大図を示している。いくつかの実施形態では、マウント 5 0 2 は、SAM ウェーハ全体を収容するためにより大きな実装面積を有し得る。SAM ウェーハ全体は、ハウジング 5 0 1 内に適合しないが、マウント 5 0 2 をハウジング 5 0 1 の外側に配置することによって、完全なウェーハを走査するための十分な空間が存在する。

【 0 0 7 4 】

図 4 の既存のモードロックされたレーザーモジュール 1 - 1 0 8 をエンドミラーがハウジングの外側になるように修正するには、レーザービームをハウジング 5 0 1 の外に向け直さなければならない。これを達成するために、ベースシャーシ 2 - 1 0 5 において図 4 の黒丸 2 - 1 0 7 で示される位置に孔が形成される。ピックアップミラー (pick-off mirror) は、孔の上方に配置され、レーザービームがキャビティ内ミラー 2 - 1 2 4 および SAM 1 - 1 1 9 に入射することを許容するのではなく、孔を通してレーザービームを下方に反射する。図 4 のミラーのほとんどは、ベースシャーシ 2 - 1 0 5 によって確立された平面内で s 偏光された光を効率的に反射するように構成されているが、レーザーモジュール 1 - 1 0 8 に追加されるピックアップミラーは、p 偏光された光を効率的に反射するように構成されている。既存のモードロックされるレーザーモジュール 1 - 1 0 8 に対する修

40

50

正は、図7に示されており、レーザービームは、孔701を通してピックオフミラー703によって反射される。図7の点線は、SAM705からの反射を含む修正なしのレーザービーム経路を示す。いくつかの実施形態では、修正されていないシステム内のピックオフミラー703からSAM705の位置までの距離は、ピックオフミラー703からマウント502内のSAM601までの距離と等しい。距離を同じに保つことによって、このセットアップを用いて測定されるレーザーの特性は、修正されていない位置におけるSAMを含む修正されていないモードロックレーザーモジュール1-108の挙動に最もよく似ている。

【0075】

図4~7は、光学特徴付け装置として使用されるように修正され得る特定のレーザーモジュールを示すが、実施形態は、そのように限定されない。他のレーザーシステムもまた、光学特徴付け装置として機能するように変更され得る。図8は、いくつかの実施形態で使用され得るモードロック半導体レーザーを示し、図9は、いくつかの実施形態で使用され得るモードロック半導体レーザーを示す。

【0076】

図8を参照すると、モードロックレーザーダイオード4-100は、いくつかの実施形態に従って、試料のプロビングまたは測定を行うために直接的に使用される所望の波長で(例えば、青色、緑色、または赤色の波長で)パルスを生成し得る。いくつかの場合では、レーザーダイオードによって生成されたパルスは、プロビングまたは測定用途で使用するために、別の波長(たとえば、2倍の周波数)に変換され得る。例えば、モードロックレーザーダイオードは、赤外波長でパルスを生成し、これらのパルスは、光スペクトルの青色、緑色、または赤色領域に周波数を2倍にされてもよい。

【0077】

モードロック半導体レーザーは、レーザーダイオード4-105および可飽和吸収体ミラー3-120を含み得る。レーザーキャビティの端部は、いくつかの実施形態に従って、半導体レーザーダイオード4-105および可飽和吸収体ミラー3-120の一端に形成された反射コーティング4-112によって画定されてもよい。SAM3-120は、二次元移動ステージに取り付けられて、レーザービームの照射スポットがSAM3-120全体にわたって走査されることを可能にし得る。レーザーキャビティは、レーザーダイオードからの光ビームの発散を再形成および/または変更する第1の光学系OS₁を含み得る。レーザーキャビティは、キャビティ内ビームを可飽和吸収体ミラーに再形成および/または集束させ得る第2の光学系OS₂をさらに含み得る。いくつかの実施形態では、レーザーキャビティは、光遅延素子3-110を含み得る。モードロックレーザーダイオードは、波長 λ_1 でレーザーを放出し、持続時間が約100psよりも短い超高速パルス列を生成し得る。

【0078】

いくつかの実装形態では、レーザーダイオード4-105は、光導波路構造のいずれかの端部において光学コーティングを含み得る。光学コーティング4-110、4-112は、蒸着プロセスまたは物理堆積プロセスなどの任意の適切な堆積プロセスによって形成され得る。いくつかの実施形態では、レーザーダイオードの第1の端部は、レーザーキャビティの出力カプラとして機能する部分透過性コーティング4-112を含み得る。透過性コーティング4-112は、レーザービームの一部をキャビティの外側に伝達して、超高速パルス列を供給し得る。コーティング4-112の透過率は、いくつかの実施形態によれば、約2%~約15%の間であり、その反射率は、約98%~約85%の間であり得る。レーザーダイオード4-105の反対側の端部は、反射防止コーティング4-110でコーティングされて、レーザーダイオードからの放射の大部分を、大きな反射なしにレーザーキャビティ内に通過させることができる。例えば、反射防止コーティング4-110は、レーザー発振波長 λ_1 の1%未満を反射し得る。

【0079】

モードロックレーザーダイオードの使用は、例えば、約300mWを超える電力レベル

10

20

30

40

50

などの大量の電力を必要としないいくつかの実施形態にとって有利であり得る。モードロックレーザーダイオードの1つの利点は、コンパクトなサイズと、レーザー内で使用される光学素子の数が少ないことである。レーザー媒体は非常に小さく（例えば、5 mm未満の幅に）できるので、いくつかの実施形態では、モードロックレーザーダイオードのアレイを使用することが可能である。いくつかの実装形態では、モードロックレーザーダイオードのアレイは、共通の光学素子を共有し得る。例えば、2つ以上のレーザーダイオードは、1つ以上の光学素子（例えば、光学遅延素子3 - 110、光学系OS₁、OS₂、および可飽和吸収体ミラー3 - 120のうち1つ以上）を共有し得る。

【0080】

図9を参照すると、超高速パルスがモードロックファイバレーザーを用いて生成され得る。モードロックファイバレーザー5 - 200は、ダイオード励起固体レーザー（diode-pumped solid-state laser）で使用される光学素子を含み得る。しかしながら、モードロックファイバレーザーでは、利得媒体は、レーザーキャビティに光遅延素子を提供することもできる長さの光ファイバ5 - 120を含む。いくつかの実施形態によれば、ダイオードポンプ源3 - 105は、図9に示されるように、ファイバ5 - 120の端部に結合されるポンプ波長 λ_p を提供し得る。

10

【0081】

いくつかの実装形態では、複数の光結合素子は製造され、光ファイバ5 - 120の両端に結合され得る。例えば、第1の光学素子5 - 210は、光ファイバの第1の端部に結合または形成され得る。第1の光学素子は、光ファイバの端部に直接取り付けられているか、または支持構造を用いて取り付けられているボールレンズ（ball lens）または屈折率分布型レンズ（graded refractive index lens）を含み得る。さらに、第1の光学素子5 - 210は、ポンプ波長 λ_p の大部分（例えば、約98%以上）を透過し、かつレーザー発振 λ_l の大部分（約98%～約85%）を反射する二色性コーティングを含み得る。したがって、第1の光学素子5 - 210は、ファイバレーザー5 - 200用の出力カプラを備えてもよい。

20

【0082】

第2の光学素子5 - 220は、いくつかの実装形態では、光ファイバの端部上に形成された二色性コーティングを含んでもよく、このダイクロイックコーティングは、レーザー発振波長 λ_l の大部分（例えば、約98%以上）を透過し、ポンプ波長 λ_p の大部分（例えば、約98%以上）を光ファイバ中に反射するように構成されている。いくつかの実装形態では、第2の光学素子5 - 220は、光ファイバの端部に直接取り付けられるか、または支持構造を用いて結合されるボールレンズまたはGRINレンズを含み得る。例えば、GRINレンズは光学接着剤でファイバの端部に接着され、GRINレンズの露出した端部は、レーザー発振波長 λ_l の大部分（例えば、約98%以上）を透過し、ポンプ波長 λ_p の大部分（例えば、約98%以上）を光ファイバに反射するように構成された二色性コーティングでコーティングされ得る。いくつかの実装形態によれば、レーザーダイオード3 - 105からのポンプ放射を光ファイバに結合するために使用される第1の光学レンズ系OS₁と、光ファイバからの放射を可飽和吸収体ミラー3 - 120に集束するために使用される第2の光学レンズ系OS₂とがあり、これらは二次元移動ステージ上に取り付けられ得る。

30

40

【0083】

図10を参照すると、SAM等の光学素子を特徴付けるための方法1000が示されている。ブロック1001において、コントローラ（例えば、図1のコントローラ150）は、二次元移動ステージ（例えば、図1のステージ145）を使用してSAMを初期位置に移動させる。ブロック1003において、コントローラ（例えば、図1のコントローラ150）は、光学検出システムを使用してレーザービームの少なくとも1つの特性を測定する。ブロック1005において、コントローラは、測定対象のSAMの追加の部分がどうかを判定する。「Yes」の場合、方法1000はブロック1001に戻り、コントローラは移動ステージを使用してレーザービームの照射スポットに対するSAMの位

50

置を調整する。測定する追加の位置がない場合、方法1000は、コントローラがレーザービームの1つまたは複数の特性を決定するブロック1007に続く。ブロック1009において、コントローラは、レーザービームの1つまたは複数の特性に基づいて、SAMの2次元マップを作成する。方法1000の実施形態は、図10に示される動作の順序に限定されない。例えば、いくつかの実施形態は、ブロック1005の前に、各特性が測定されるときに（レーザーの1つまたは複数の特性を決定する）ブロック1007を実行してもよい。

【0084】

いくつかの実施形態では、任意の走査で複数の特性を測定することができる。様々な特性を測定するための様々なアプローチが存在する。いくつかの実装形態では、走査の各位置において複数の測定が実行されてもよい。あるいは、最初の測定のために最初のスキャンを完了し、続いて2番目の測定のために2番目のスキャンを完了することができる。各走査は、同じ数の位置または同じ「解像度」を有する必要はなく、走査の解像度は、SAMが取り付けられる移動ステージのステップサイズによって決定される。

10

【0085】

前述のように、光学検出システムは、パルス幅、各放出波長に関連するパワー、および/または高速フォトダイオード信号を含むパルスレーザーの多くの特性を検出し得る。ブロック1003で測定されたこれらの量は、SAMの品質に関連するレーザーの追加の特性を決定するために使用されることができる。しかし、いくつかの特性は追加分析なしにSAMを特徴付けるのに有用である。例えば、532nmでの光パルスおよび1064nmでの光パルスの両方を放射するレーザーシステムにおいて、光パルスの各ビームのパワーは、レーザーシステムの性能にとって重要であり得る。例えば、SAMを使用するレーザーシステムは、532nmで特定のパワーの光を生成することが期待され得る。したがって、SAMの面全体にわたって532nmでの光のパワーをマッピングすることは、実行する重要な特性付けである。

20

【0086】

同様に、パルス特徴付け検出器345によって測定されるレーザーパルスの時間的パルス幅は、SAMの面を走査することによって測定するレーザーシステムの有用な特性である。いくつかの実施形態では、自己相関器信号は、 sech^2 曲線に適合され、そのFWHMは、時間的パルス持続時間として使用される。

30

【0087】

測定された量から導出されることができる第1の特性は、パルスレーザーが連続波（continuous wave：CW）であるか、受動モードロック（passively mode-locking：ML）であるか、Qスイッチング（Q-switching：QS）であるかである。レーザーシステムのメーカーは、レーザーがQスイッチングではなくモードロックされていることを確認したいと考えている。特定のSAMはQスイッチングを起こしやすいため、SAMの表面全体にわたってモードロック能力をマッピングすることは、製造されたレーザーシステムにおいてSAMを使用すべきか否かを決定する際に有用な測定である。レーザーがCWであるか、モードロックであるか、Qスイッチングであるかを判定するための1つの技術は、高速フォトダイオードからの信号に基づいている。レーザーがCWであるとき、高速フォトダイオード信号はパルスを含まない。レーザーがモードロックされると、高速フォトダイオード信号は、ほぼ一定の強度を有する規則的な間隔のパルスを含む。レーザーがQスイッチングである場合、高速フォトダイオード信号は、比較的短い時間スケールで強度が変動するパルスを含む。したがって、高速フォトダイオード信号が、これら3つの動作条件のうちのいずれが動作パラメータの任意のセットに対して存在するか否かを判定するように分析され得る。

40

【0088】

測定された量から導き出されることができる第2の特性は、損傷閾値である。損傷閾値を測定するには永続的にSAMに損傷を与える必要があるため、損傷閾値のマップは形成されない。代わりに、損傷閾値は、SAMの周囲のいくつかの位置で試験され得る。損傷

50

閾値を測定するための1つの技術は、532 nmにおける光パルスのパワーに基づいている。ポンプ電流が増加されて、損傷閾値に達する前では532 nmでの光のパワーが増加し得る。損傷閾値に達すると、532 nmでの光パワーの急激な低下が生じる。したがって、損傷閾値を決定することは、532 nmでの光のパワーをパワーの低下について監視するパワーメーターからの信号を分析することを含み得る。

【0089】

測定された量から導出されることが第3の特性はSAMの寿命である。本発明者らは、品質が悪く寿命が短いSAMが、一定時間の動作後に、モードロックからQスイッチングに自発的に変化することを認識した。例えば、約24~72時間の連続動作の後、低品質のSAMを使用するレーザーは自発的にQスイッチングを開始し得る。従って、Qスイッチングの兆候について高速フォトダイオード信号を監視することは、SAMの寿命を決定するために使用され得る。代替的または追加的に、生成された光パルスのパワーを使用して、寿命を決定し得る。本発明者らは、レーザーを約24~72時間動作させると、532 nmおよび/または1064 nmの光パルスのパワーが低下し、その低下速度がSAMの寿命に関連することを認識した。したがって、パワーが特定の閾値速度よりも大きい速度で低下する場合、SAMは低品質であると考えられる。寿命測定は非常に遅い(例えば、24~72時間かかる)ので、SAMの走査が実行されてもよい。代わりに、SAMの信号測定を使用して、SAM全体を特徴付けることができる。

10

【0090】

測定量から導出されることが第4の特性は、モードロック電流閾値とも呼ばれるモードロックポンプ閾値(mode-locking pump threshold)である。この特性は、レーザーシステムが受動的にモードロックするレーザーポンプの電流の最小値である。モードロックポンプ閾値を決定するために使用され得る種々の技術が存在する。いくつかの実施形態では、(特に最悪ケースの)決定を行うのに要する時間を短縮するために、モードロックポンプ閾値は、図11に関連して説明される二分探索方式(binary search strategy)を使用して決定される。複数の実施形態は、このアプローチに限定されない。別のアプローチは、可能な限り最小のポンプ電流で開始し、レーザーのモードロックまで電流をステップサイズだけ増加させることである。しかしながら、このタイプのアプローチは、二分探索アプローチよりも時間がかかる。

20

【0091】

図11は、特定のSAMを備えた光学特徴付け装置のモードロックポンプ閾値を決定する方法1100のフローチャートである。ブロック1101において、コントローラ150は、二分探索のために電流範囲およびステップサイズを初期化する。初期電流範囲は、所定の最小ポンプ電流および所定の最大ポンプ電流によって定義され得る。初期の最大ポンプ電流は、例えば、ポンピングが生じる最大電流よりも1ステップまたは2ステップだけ低くてもよい。

30

【0092】

ブロック1103において、コントローラは、ポンプ電流を電流範囲の中間点に設定し、レーザーがモードロックされているかどうかを判定する。コントローラは、上記のように、高速フォトダイオード信号を使用してレーザーがモードロックされているかどうかを判定し得る。あるいは、パルス特徴付け検出器からの信号を用いて、レーザーがモードロックされているかどうかを判定してもよい。

40

【0093】

ブロック1105において、方法1100は、コントローラがブロック1113においてレーザーが中間点の電流値でモードロックされていないと判定した場合にブロック1103に進む。ブロック1113において、コントローラは、現在の中間点の値をその範囲の新しい最小ポンプ電流として記憶する。次に、方法1100は、ブロック1115に進み、コントローラは、新しい範囲がステップサイズよりも小さいかどうかを判定する。「yes」の場合、コントローラ150は、モードロックポンプ閾値が見つからないと判定し、方法1100は終了する。「no」の場合、コントローラ150はブロック1103

50

に戻る。

【0094】

ブロック1105において、方法1100は、コントローラがブロック1105においてレーザーが中間点の電流値でモードロックされていると判定した場合にブロック1107に進む。ブロック1107において、コントローラは、現在の中間点の値をその範囲の新しい最大ポンプ電流として記憶する。次に、方法1100は、ブロック1109に進み、コントローラは、これが、ブロック1103においてレーザーがモードロックされていると判定された3回連続の時間であるかどうかを判定する。「yes」の場合、コントローラ150は、現在の中間点の値をモードロックポンプ閾値として記憶し、方法1100は終了する。「no」の場合、コントローラ150はブロック1103に戻る。方法1100は、実際のモードロック閾値よりも下で生じるモードロックの偽の検出を回避するために、ブロック1109の判定を行う。

10

【0095】

いくつかの実施形態では、光学素子の特徴付けを実行するときに、上記した特性のすべてが決定されるわけではない。複数の特性の任意の一部は、任意の特徴付けルーチンに対して決定され得る。

【0096】

図1のコントローラ150は、コンピューティングデバイスを使用して具体化され得る。図12は、他のものが可能であるが、本明細書において説明される技術を実装するシステムで使用され得るコンピューティングデバイス1200の形態のコンピューティングデバイスの特定の実装例を示す。コンピューティングデバイス1200は、例えば、図1のコントローラ150として具体化され得る。図12は、コンピューティングデバイスがコントローラとして動作するために必要なコンポーネントの描写、または本明細書において説明された技術に従って動作するシステムの他のコンピューティングデバイスの描写でも、包括的な描写でもないことを理解されたい。

20

【0097】

コンピューティングデバイス1200は、少なくとも1つのプロセッサ1202、少なくとも1つの入力/出力インタフェース1204、ディスプレイ1206、およびコンピュータ可読記憶媒体1210を含み得る。コンピューティングデバイス1200は、例えば、ウェアラブルデバイス、デスクトップまたはラップトップパーソナルコンピュータ、PDA (personal digital assistant)、スマート携帯電話、タブレットコンピュータ、サーバ、または任意の他の適切なコンピューティングデバイスであり得る。1つまたは複数の入力/出力インタフェース1204は、コンピューティングデバイス1200が、移動ステージおよび/または光学検出システムの複数の構成要素と有線および/または無線で通信することを可能にする任意の適切なハードウェアおよび/またはソフトウェアであり得る。1つまたは複数の入出力インタフェース1204は、無線アクセスポイント、スイッチ、ルータ、ゲートウェイ、および/または他のネットワーク機器と通信するためのネットワークインタフェース、ならびにインターネットを含む複数のコンピュータ間でデータを交換するための任意の適切な有線および/または無線通信媒体または媒体を含み得る。コンピュータ可読記憶媒体1210は、処理されるデータおよび/またはプロセッサ1202によって実行される複数の命令を格納するように構成され得る。プロセッサ1202は、データの処理および命令の実行を可能にする。データおよび複数の命令は、コンピュータ可読記憶媒体1210に記憶され、例えば、コンピューティングデバイス1200の複数の構成要素間の通信を可能にし得る。

30

40

【0098】

デバイス1200は、いくつかの実施形態では、光学部品の表面の2次元マップをデバイス1200のユーザーに提示するためのディスプレイ1206を含み得る。

コンピュータ可読記憶媒体1210に記憶されたデータおよび複数の命令は、本明細書において説明される原理に従って動作する技術を実装する複数のコンピュータ実行可能命令を含み得る。図12の例では、コンピュータ可読記憶媒体1210は、コントローラ機

50

能 1 2 1 6 を実装し、光学検出システムからの測定データ 1 2 1 2 および測定データ 1 2 1 2 の分析から得られる分析データ 1 2 1 4 のような種々の情報を記憶する説明されたコンピュータ実行可能な複数の命令を記憶する。媒体 6 1 2 は、光学特徴付け装置 1 0 0 を制御するための上記の技術のいずれかを実施し得るコントローラ機能 1 2 1 6 の複数の命令をさらに記憶し得る。

【 0 0 9 9 】

図 1 2 には示されていないが、コンピューティングデバイス 1 2 0 0 は、ユーザーが制御デバイス 1 2 0 0 と対話し、デバイス 1 2 0 0 に入力を提供することを可能にするユーザーインタフェースを含む 1 つまたは複数の構成要素および周辺機器をさらに備え得る。このようなデバイスは、キーボード、マウス、タッチパッド、デジタル化タブレットなどのポインティングデバイス (pointing device) を含み得る。別の例として、コンピューティングデバイスは、音声認識または他の可聴形式で入力情報を受信し得る。

10

【 0 1 0 0 】

結果の例

図 1 3 A ~ 1 3 C は、1 0 0 マイクロメートルの走査ステップサイズを有する 2 x 2 (two by two) ミリメートルの SAM について、光学特徴付け装置 1 0 0 を用いて 5 3 2 nm での光パルスの出力パワーおよびパルス幅をマッピングすることによって得られた例示的な結果を示す。図 1 3 A は、SAM の面全体の 5 3 2 nm での出力パワーを示す。このように、複数の端部は、低いパワーを示している。さらに、(図 1 3 A の破線円によって示される) SAM の中心付近にも低いパワーを示す位置が存在する。これは SAM の欠陥を示している可能性がある。この場合、欠陥は、SAM がレーザーシステムで使用され得るほど十分に小さいように見えるが、SAM は、レーザービームの照射スポットが欠陥とは異なる位置にあるように配置されるべきである。図 1 3 B は、SAM 上の単一の位置の自己相関器の測定結果を示している。sec h² フィットの FWHM はパルス幅として用いられる。図 1 3 C は、SAM の面全体のすべての位置のパルス幅のマップである。図 1 3 A のパワーマップが可能性のある欠陥を示す同じ位置において、光学特徴付け装置のレーザーのパルス幅は、SAM の他の位置と比較して著しく増大される。図 1 3 A および 1 3 C の 2 つのマップを一緒に使用して、SAM をレーザーキャビティ内に最適に配置する方法、または SAM が不十分な品質である場合に SAM を使用するかどうかを判定し得る。

20

30

【 0 1 0 1 】

図 1 4 A ~ F は、光学特徴付け装置を使用した異なる SAM の結果の例を示している。図 1 4 A は、1 0 0 マイクロメートルのステップサイズを有する 5 3 2 nm レーザパルスのパワーのマップであり、図 1 4 B は、1 0 0 マイクロメートルのステップサイズを有するレーザー発振形態 (すなわち、CW (オフ)、Q スwitching (QS)、またはモードロック (ML)) のマップであり、図 1 4 C は、1 0 0 マイクロメートルのステップサイズを有するパルス幅のマップである。この場合も、SAM の複数の端部は、十分なパワー、モードロック、またはパルス幅を提供しない。さらに、SAM の中心付近には、その位置でのレーザー Q スwitching および SAM の面上の他の位置よりも著しく大きいパルス幅によって示されるように、欠陥が存在する。図 1 4 D ~ F は、2 5 マイクロメートルのより小さなステップサイズを使用して欠陥にズームインするマップである。図 1 4 D は、欠陥付近における 5 3 2 nm のレーザーのパルス幅のパワーのマップであり、図 1 4 E は、欠陥付近におけるレーザー発振形態のマップであり、図 1 4 F は、欠陥付近におけるパルス幅のマップである。

40

【 0 1 0 2 】

発明者らは、光学顕微鏡 (図 1 5 A 参照) を用いて SAM を目視検査することにより、レーザー発振形態が欠陥の存在を示す SAM の位置 (図 1 5 B 参照) を調査した。欠陥の位置において SAM 上に視認できる欠陥は存在しない。したがって、本発明者らは、いくつかの実施形態の特徴付け技術が、目視検査のような従来技術を用いては検出できない SAM 等の光学部品の欠陥を検出することができることを認識し、諒解した。いくつかの

50

実施形態では、光学特徴付け装置は、光学顕微鏡では不可能な光学素子の非線形特性を探查することができる。さらに、光学特徴付け装置は、光学顕微鏡などの従来の検査技術では不可能なキャビティ内レーザービームで光学素子を探查することができる。

【0103】

その他の考慮事項

このように、光学特徴付け装置のいくつかの実施形態のいくつかの態様を説明したが、様々な変更、修正、及び改善が当業者には容易に想到されることが諒解されるべきである。そのような変更、修正、及び改善はこの開示の一部であるように意図されており、本発明の精神及び範囲内にあることが意図されている。本教示を様々な実施形態及び例に関連して説明したが、本教示がこのような実施形態又は例に限定されることは意図されていない。逆に、本教示は、当業者には諒解されるであろう様々な代替形態、修正、及び均等物を包含する。

10

【0104】

例えば、実施形態は、上述したよりも多いまたは少ない光学部品をレーザーキャビティ内に含むように変更されてもよい。さらに、レーザーキャビティの構成は、いくつかのレーザーキャビティで示されたものとは異なり、光路においてより多いかまたはより少ない曲がり角または折り返しを有してもよい。さらに、エンドミラーおよび/またはSAMを移動ステージ上に取り付ける実施形態について説明したが、レーザーキャビティの端部には他の光学素子が、特徴付けられる移動ステージ上に取り付けられてもよい。このようにして、複数の光学素子は、光学素子を特徴付ける目的で、キャビティ内レーザービームを受け取るように配置されてもよい。

20

【0105】

様々な発明の実施形態が説明及び図示されてきたが、当業者は、その機能を実施し、かつ/又は、それらの結果及び/又は説明されている利点の1つもしくは複数を得るための様々な他の手段及び/又は構造を容易に想定し、そのような変形及び/又は修正の各々は、説明されている本発明の実施形態の範囲内にあると考えられる。より一般的には、当業者は、説明されているすべてのパラメータ、寸法、材料、及び構成が例であるように意図されていること、ならびに、実際のパラメータ、寸法、材料、及び/又は構成が、本発明の教示が使用される特定の1つ又は複数の用途に応じて決まることを容易に諒解するであろう。当業者は、日常の実験のみを使用して、説明されている特定の発明の実施形態に対する多くの均等物を認識することになり、又は、それを究明することが可能になる。それゆえ、上記の実施形態は例としてのみ提示されていること、ならびに、添付の特許請求項及びその均等物の範囲内で、発明の実施形態は、具体的に説明及び特許請求されているとは他の様態で実践されてもよいことが理解されるべきである。本開示の発明の実施形態は、説明されている各個々の特徴、システム、システム・アップグレード、及び/又は方法を対象とし得る。加えて、そのような特徴、システム、システム・アップグレード、及び/又は方法が相互に矛盾しない場合、2つ以上のそのような特徴、システム、及び/又は方法の任意の組み合わせが、本開示の発明の範囲内に含まれる。

30

【0106】

さらに、特定の実施形態のいくつかの利点が示され得るが、すべての実施形態がすべての説明されている利点を含むとは限らないことは諒解されるべきである。いくつかの実施形態は、有利であるとして説明されている任意の特徴を実装しなくてもよい。したがって、上記の説明及び図面は例示のみを目的としたものである。

40

【0107】

限定ではないが、特許、特許出願、論説、著書、論文、及びウェブ・ページを含む、この出願において引用されているすべての文献及び同様の資料は、そのような文献及び同様の資料の形式にかかわらず、参照によりそれらの全体が明示的に組み込まれる。組み込まれている文献及び同様の資料のうちの一つ又は複数が、限定ではないが、定義されている用語、用語の用法、説明されている技法などを含め、この出願と異なるか、又は、相反する場合、この出願が優先する。

50

【0108】

使用されている節の見出しは、構成のみを目的としており、決して説明されている主題を限定するものとして解釈されるべきではない。

また、説明されている技術は、そのうち少なくとも1つの例が設けられている方法として具現化され得る。方法の一部として実施される動作は、任意の適切な様式で順序付けられてもよい。したがって、動作が示されているものとは異なる順序で実施され、たとえ例示的な実施形態においては順次の動作として示されていたとしても、いくつかの動作を同時に実施することを含んでもよい実施形態が構築されてもよい。

【0109】

定義及び使用されているものとしてのすべての定義は、辞書の定義、参照によって組み込まれている文書における定義、及び/又は、定義されている用語の通常の意味に優先するものとして理解されるべきである。

【0110】

「光学的 (optical)」という用語は、紫外線、可視光、近赤外線及び短波長赤外線のスペクトル帯域を参照するように用いられ得る。

「特徴的な波長 (characteristic wavelength)」または「波長」は、放射の制限された帯域幅内の中心波長または主波長を指すように使用され得る。いくつかの場合では、放射の帯域幅内のピーク波長を指すこともある。

【0111】

「特徴的なエネルギー (characteristic energy)」または「エネルギー」という用語は、特徴的な波長に関連するエネルギーを指すように使用され得る。

「約 (about)」、「おおよそ (approximately)」、及び「実質的に (substantially)」という用語が、値を参照して使用されている場合があり、参照されている値に妥当な変動が加わった値及び差し引かれた値を包含するように意図されている。変動の量は、いくつかの実施形態においては値の5%未満であってもよく、いくつかの実施形態においては10%未満であってもよく、さらに、いくつかの実施形態においては20%未満であってもよい。装置が広い範囲の値、例えば1桁以上の大きさを含む範囲にわたって適切に機能し得る実施形態では、変動量は2倍 (factor of two) であり得る。例えば、装置が20~350の範囲の値に対して適切に機能する場合、「約80」は、40~160の間の値を含み得る。

【0112】

「隣接する」という用語は、2つの要素が互いに近接近して (例えば、2つの要素のうち大きい方の横方向寸法又は垂直方向寸法の約5分の1未満の距離内に) 配置されることを指すように用いられてもよい。いくつかの事例において、隣接する要素の間には、介在する構造又は層があってもよい。いくつかの事例において、隣接する要素は、介在する構造又は要素なしに互いに直に隣接してもよい。

【0113】

不定冠詞「a」及び「an」は、本明細書及び特許請求の範囲において使用されているものとしては、明確に逆に指示されていない限り、「少なくとも1つ」を意味するように理解されるべきである。

【0114】

「及び/又は」という語句は、本明細書及び特許請求の範囲において使用されているものとしては、そのように結合されている要素、すなわち、いくつかの事例では結合して存在し、他の事例では分離して存在する要素の「いずれか又は両方」を意味するものとして理解されるべきである。「及び/又は」を用いてリストされている複数の要素は、同じように、すなわち、そのように結合されている要素の「1つ又は複数」として解釈されるべきである。「及び/又は」条項によって具体的に識別されている要素以外の他の要素が、具体的に識別されているそれらの要素に関連するか、関連しないかにかかわらず、任意選択的に存在してもよい。したがって、非限定例として、「備える (comprising)」のような限定しない文言とともに使用されているとき、「A及び/又はB」に対する参照は、1

10

20

30

40

50

実施形態においてはAのみ（任意選択的にB以外の要素を含む）を指し、別の実施形態においてはBのみ（任意選択的にA以外の要素を含む）を指し、また別の実施形態においてはAとBの両方（任意選択的に他の要素を含む）を指し得る、などであり得る。

【0115】

本明細書及び特許請求の範囲において使用されるものとしては、「又は」は、上記で定義されているような「及び/又は」と同じ意味を有するものとして理解されるべきである。例えば、リスト内で項目を分離しているとき、「又は」又は「及び/又は」は、包含的である、すなわち、複数の要素又は要素のリストのうちの少なくとも1つを含むが、2つ以上をも含み、また任意選択的に追加のリストされていない項目も含むものとして解釈されるべきである。「～のうちの1つのみ」もしくは「～のうちの正確に1つ」、又は、特許請求の範囲において使用されるとき、「～からなる」のように、明確に逆に指示されている用語だけは、複数の要素又は要素のリストのうちの正確に1つの要素を含むことを指す。一般的に、使用されているような「又は」という用語は、「いずれか」、「～のうちの1つ」、「～のうちの1つのみ」又は「～のうちの正確に1つ」のような、排他性の用語が先行するときは、排他的な選択肢（すなわち「1方又は他方であり、両方ではない」）を示すものとしてのみ解釈されるべきである。「基本的に～からなる」は、特許請求の範囲において使用されるとき、特許法の分野において使用されるものとしての、その通常の意味を有するべきである。

10

【0116】

本明細書及び特許請求の範囲において使用されるものとしては、1つ又は複数の要素のリストを参照する「少なくとも1つ」という語句は、要素のリスト内の要素のうちのいずれか1つ又は複数から選択される少なくとも1つの要素を意味するものとして理解されるべきであるが、必ずしも、要素のリスト内に具体的にリストされているあらゆる要素のうちの少なくとも1つを含むとは限らず、要素のリスト内の要素の任意の組み合わせを排除するものではない。この定義はまた、「少なくとも1つ」という語句が参照する要素のリスト内で具体的に識別されている要素以外の要素が、具体的に識別されているそれらの要素に関連するか、関連しないかにかかわらず、任意選択的に存在し得ることも可能にする。したがって、非限定例として、「A及びBのうちの少なくとも1つ」（又は、同等に「A又はBのうちの少なくとも1つ」、もしくは、同等に「A及び/又はBのうちの少なくとも1つ」）は、1実施形態においては、Bが存在せず、2つ以上のAを任意選択的に含む少なくとも1つのAを指し（また、任意選択的にB以外の要素を含む）、別の実施形態では、Aが存在せず、2つ以上のBを任意選択的に含む少なくとも1つのBを指し（また、任意選択的にA以外の要素を含む）、また別の実施形態では、任意選択的に2つ以上のAを含む少なくとも1つのA、及び、任意選択的に2つ以上のBを含む少なくとも1つのBを指し得る（また、任意選択的に他の要素を含む）、などである。

20

30

【0117】

特許請求の範囲において、及び、上記の本明細書において、「備える」、「含む」、「担持する」、「有する」、「含有する」、「包含する」、「保持する」、「～から構成される」などのようなすべての移行句は、限定しないものである、すなわち、含むが、それに限定されないことを意味するものとして理解されるべきである。「～からなる」及び「基本的に～からなる」という移行句のみが、それぞれ限定的な又は半限定的な移行句であるべきである。

40

【0118】

特許請求の範囲は、その旨述べられていない限り、記載されている順序又は要素に限定されるものとして読み取られるべきではない。添付の特許請求項の精神及び範囲から逸脱することなく、当業者によって、形態及び詳細に様々な変更を行うことができることが理解されるべきである。以下の特許請求項の及びその均等物の精神及び範囲内に入るすべての実施形態が特許請求される。

【 図 1 】

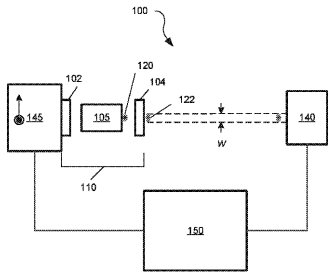
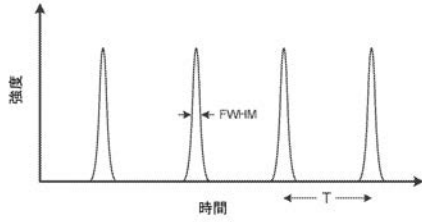
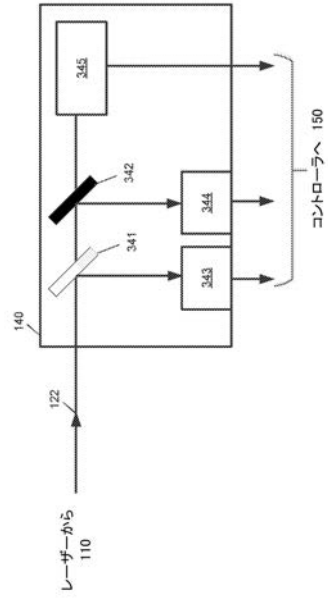


FIG. 1

【 図 2 】



【 図 3 】



【 図 4 】

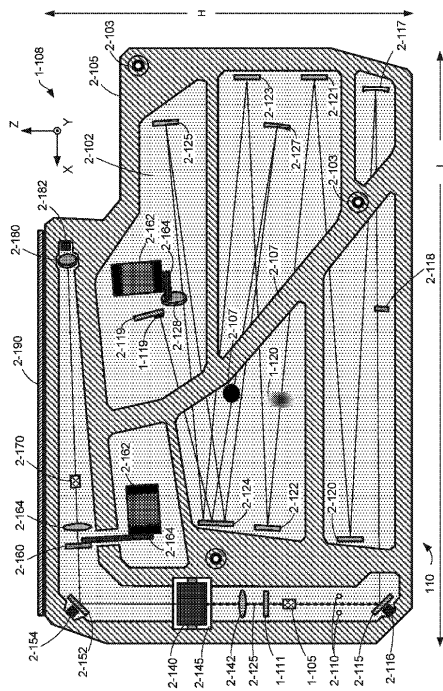


FIG. 4

【 図 5 】

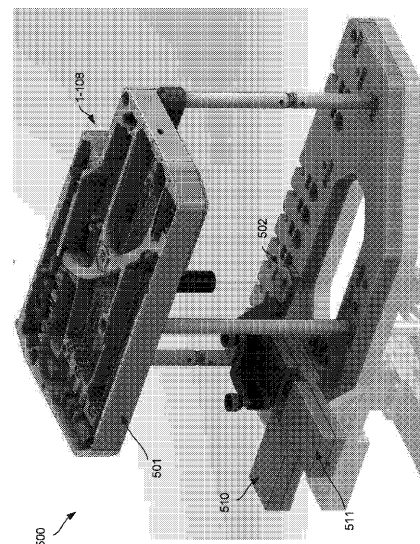


FIG. 5

【 図 6 】

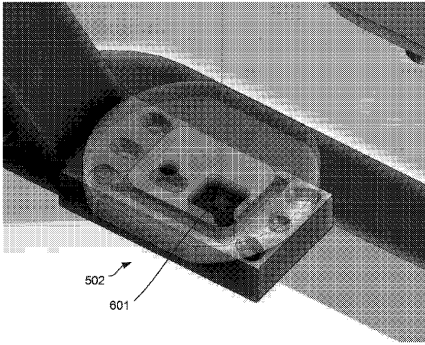


FIG. 6

【 図 7 】

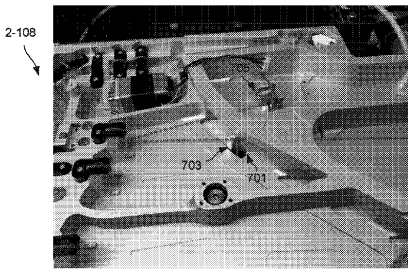


FIG. 7

【 図 8 】

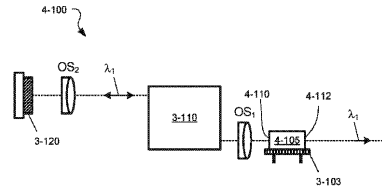


FIG. 8

【 図 9 】

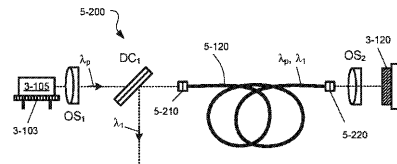
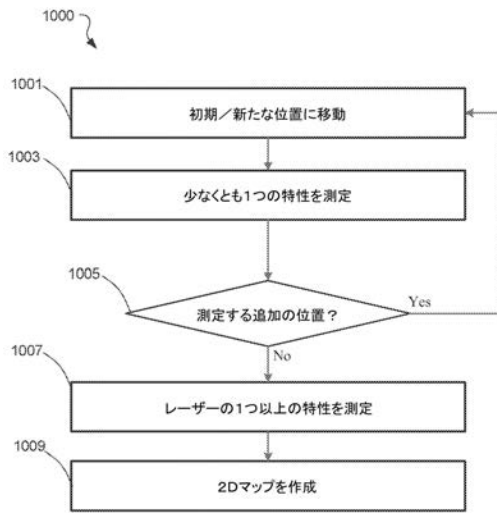
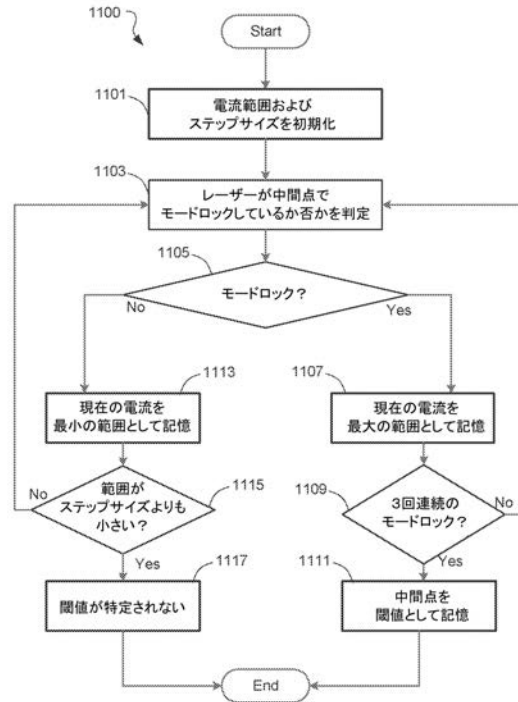


FIG. 9

【 図 10 】



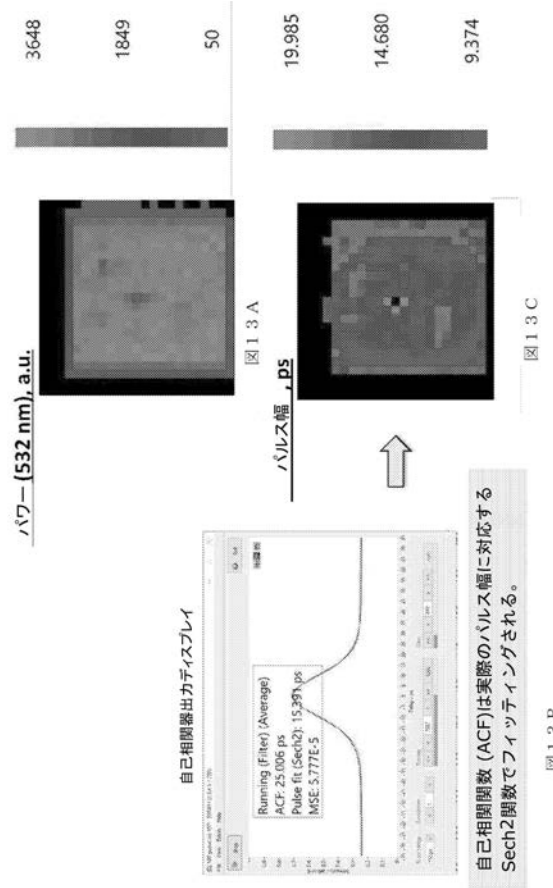
【 図 11 】



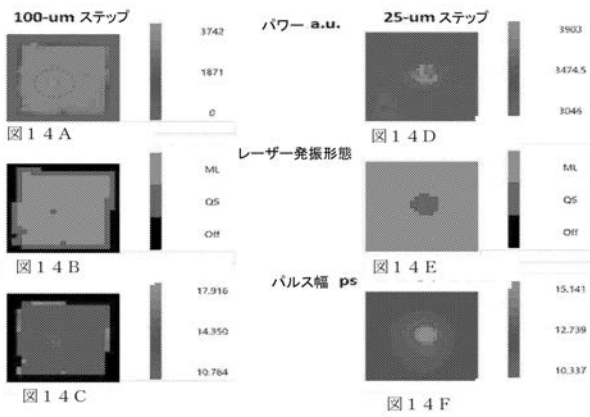
【 図 1 2 】



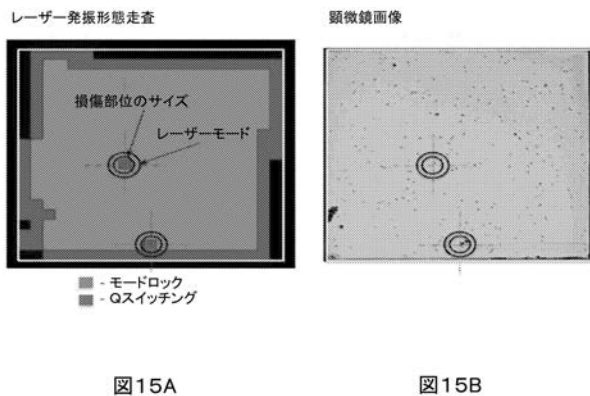
【 図 1 3 A - C 】



【 図 1 4 A - F 】



【 図 1 5 A - B 】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No PCT/US2019/027534

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
INV. H01S3/00	H01S3/11	H01S3/105
ADD. H01S3/08	H01S3/081	H01S3/086
	H01S3/042	H01S3/131
		H01S3/0941
		H01S3/16
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01S		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, COMPENDEX, INSPEC, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 02/45219 A1 (NAGAR RON [IL]; PESACH BENNY [IL]) 6 June 2002 (2002-06-06) page 6, line 8 - page 10, line 2; figures 1,2 -----	1-13, 20-22, 24-26, 29,30, 32,33, 36,37,39
X	EP 2 557 641 A1 (HAMAMATSU PHOTONICS KK [JP]) 13 February 2013 (2013-02-13)	1-5,11, 22-32, 34-38
Y	paragraphs [0016] - [0029], [0034] - [0038], [0049], [0050]; figures 1-3,6,9 ----- -/--	12, 14-20, 40-43
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents :		
A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance *E* earlier application or patent but published on or after the international filing date *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		*T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art *&* document member of the same patent family
Date of the actual completion of the international search 17 July 2019		Date of mailing of the international search report 25/07/2019
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Laenen, Robert

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/US2019/027534

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2011/170565 A1 (JIANG MIN [US] ET AL) 14 July 2011 (2011-07-14) paragraphs [0003] - [0018], [0031], [0043] - [0072]; figures 6,7,10 -----	12, 14-20, 40-43

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/US2019/027534

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 0245219	A1	06-06-2002	NONE

EP 2557641	A1	13-02-2013	EP 2557641 A1 13-02-2013
			JP 5368360 B2 18-12-2013
			JP 2011222764 A 04-11-2011
			US 2013038924 A1 14-02-2013
			WO 2011125358 A1 13-10-2011

US 2011170565	A1	14-07-2011	DE 19942954 A1 20-04-2000
			JP 4559562 B2 06-10-2010
			JP 2000228550 A 15-08-2000
			US 6252892 B1 26-06-2001
			US 2001001005 A1 10-05-2001
			US 2001001006 A1 10-05-2001
			US 2005286569 A1 29-12-2005
			US 2009122815 A1 14-05-2009
			US 2011170565 A1 14-07-2011

フロントページの続き

(81)指定国・地域 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT

(72)発明者 シュルツ、ジョナサン シー .

アメリカ合衆国 06437 コネチカット州 ギルフォード ランドンズ ウェイ 121

(72)発明者 オキシェフ、アンドレイ プイ .

アメリカ合衆国 06437 コネチカット州 ギルフォード オールド ウィットフィールド
ストリート 530

(72)発明者 ウェンガー、クレイグ

アメリカ合衆国 08008 ニュージャージー州 ロング ビーチ タウンシップ ハイランド
アベニュー 10001 ナンバービー

(72)発明者 ラスロップ、ブリタニー

アメリカ合衆国 06418 コネチカット州 ダービー ハロルド アベニュー 51

(72)発明者 アフマド、ファイサル アール .

アメリカ合衆国 06437 コネチカット州 ギルフォード オールド ウィットフィールド
ストリート 446 アpartment イー

Fターム(参考) 5F172 AE01 AE03 AE08 AE09 AF01 AF02 NN14 NN17 NP02 NP03
NP18 NQ09 NQ33 NQ53 NR22 NR24
5F173 MC15 MF02 MF10 MF23 MF29 MF39 MF40 SC10 SE01 SF03
SF43 SF74