

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公表特許公報(A)

(11)公表番号

特表2023-519554
(P2023-519554A)

(43)公表日 令和5年5月11日(2023.5.11)

(51)国際特許分類	F I	テーマコード(参考)
H 0 1 S 3/10 (2006.01)	H 0 1 S 3/10	Z 2 G 0 4 3
H 0 1 S 3/00 (2006.01)	H 0 1 S 3/00	A 5 F 1 7 2
G 0 1 N 21/71 (2006.01)	G 0 1 N 21/71	

審査請求 有 予備審査請求 未請求 (全40頁)

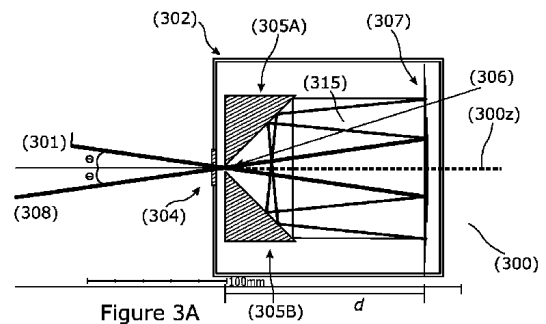
(21)出願番号	特願2022-556115(P2022-556115)	(71)出願人	511141744 サーモ フィッシャー サイエントフィ ック (エキュブラン) エスアーエール エル
(86)(22)出願日	令和3年3月18日(2021.3.18)	(74)代理人	100094569 弁理士 田中 伸一郎
(85)翻訳文提出日	令和4年9月16日(2022.9.16)	(74)代理人	100103610 弁理士 吉 田 和彦
(86)国際出願番号	PCT/EP2021/056946	(74)代理人	100109070 弁理士 須田 洋之
(87)国際公開番号	WO2021/185967	(74)代理人	100098475 弁理士 倉澤 伊知郎
(87)国際公開日	令和3年9月23日(2021.9.23)	(74)代理人	100130937
(31)優先権主張番号	2003948.3		
(32)優先日	令和2年3月18日(2020.3.18)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	英国(GB)		
(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,A T,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR ,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC, 最終頁に続く		最終頁に続く

(54)【発明の名称】 ダブルパルスレーザーシステム

(57)【要約】

第1および第2のレーザーパルスを生成するためのダブルパルスレーザーシステムであって、第1のレーザーパルスに対して第2のレーザーパルスを遅延させるように配置されたマルチパスセル(300)を備え、マルチパスセルは、光空洞(315)を画定する第1(305A、305B)および第2(307)の反射器装置を備え、光空洞(315)において、遅延された第2のレーザーパルスが、第1の反射器装置(305A、305B)と第2の反射器装置(307)との間で複数回反射されて往復し、1ns以上の、第1のパルスと第2のパルスとの間の時間的遅延を提供する、ダブルパルスレーザーシステム。

【選択図】図3A



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

第 1 および第 2 のレーザーパルスを生成するためのダブルパルスレーザーシステムであって、前記第 1 のレーザーパルスに対して前記第 2 のレーザーパルスを遅延させるように配置されたマルチパスセルを備え、前記マルチパスセルは、光空洞を画定する第 1 および第 2 の反射器装置を備え、前記光空洞において、前記遅延された第 2 のレーザーパルスが、前記第 1 の反射器装置と前記第 2 の反射器装置との間で複数回反射されて往復し、1 ns 以上の、前記第 1 のパルスと前記第 2 のパルスとの間の時間的遅延を提供する、ダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 2】

前記第 2 のレーザーパルスを前記マルチパスセル内に向けるように構成された光学装置をさらに備える、請求項 1 に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 3】

前記光学装置が、単一のレーザーパルスから前記第 1 および第 2 のレーザーパルスを生成するように構成されている、請求項 2 に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 4】

前記光学装置が、単一のレーザーパルスを分割することによって、前記第 1 および第 2 のレーザーパルスを生成するための光分割デバイスを備える、請求項 2 または請求項 3 に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 5】

前記光分割デバイスが、前記マルチパスセルに取り付けられているか、または前記マルチパスセルと一体である、請求項 4 に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 6】

前記光分割デバイスが、前記マルチパスセルの外面上にある、請求項 4 または請求項 5 に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 7】

前記光分割デバイスが、前記第 1 および第 2 の反射器装置のうち一方の外面上にある、請求項 4 ~ 6 のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 8】

前記光分割デバイスが、レーザーパルスの少なくとも一部分が通過し得るアパーチャを有する反射面を備える、請求項 4 ~ 7 のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 9】

前記光分割デバイスの前記アパーチャが、円形である、請求項 8 に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 10】

光が、前記マルチパスセルに入る、および / または前記マルチパスセルを出ることを可能にするために、前記光分割デバイスの前記アパーチャが、前記マルチパスセルのアパーチャと整列されている、8 または請求項 9 に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 11】

単一のレーザーパルスの一部分が、前記光分割デバイスの前記アパーチャを通過して前記マルチパスセル内に入り、それにより前記第 2 のレーザーパルスを生成し、かつ前記単一のレーザーパルスの一部分が、前記光分割デバイスの前記反射面によって反射され、それにより前記第 1 のレーザーパルスを生成するように、前記光学装置が、前記単一のレーザーパルスを、前記光分割デバイスの前記アパーチャに向けるように構成されている、請求項 8 ~ 10 のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 12】

前記光学装置が、前記第 1 および第 2 のレーザーパルスを生成するための 1 つもしくは複数の非偏光ビームスプリッタ、および / または前記第 1 および第 2 のレーザーパルスを生成するための 1 つもしくは複数の偏光ビームスプリッタを備える、請求項 2 ~ 11 のい

10

20

30

40

50

ずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 13】

前記第2のレーザーパルスが前記マルチパスセル内に向けられる角度が、調整可能であるように、前記光学装置が、構成されている、請求項2～12のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 14】

前記マルチパスセルが、長手方向軸を有し、前記光学装置が、前記第2のレーザーパルスを

0°～20°、

1°～15°、または

2°～10°の前記長手方向軸に対する角度で前記マルチパスセル内に向けるように構成されている、請求項2～13のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 15】

前記第1の反射器装置に入射する光が、前記第2の反射器装置に向かって少なくとも部分的に再帰反射されるように、前記第1の反射器装置が構成されている、先行請求項のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 16】

前記第1の反射器装置が、反射性である第1および第2の表面を備える、請求項15に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 17】

前記第1の反射器装置に入射する光が、前記第1の表面から前記第2の表面に、かつ前記第2の反射器装置に反射されるように、前記第1の反射器装置が構成されている、請求項16に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 18】

前記第1および第2の表面が、実質的に垂直である、請求項16または請求項17に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 19】

前記第1および第2の表面が、実質的に平面である、請求項16～18のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 20】

前記第1および第2の表面の前記平面が、共通軸を画定し、

前記第1の反射器装置が、前記共通軸に垂直に入射する光に対して再帰反射性である、請求項19に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 21】

前記第1の反射器装置が、第1および第2のプリズムを備え、前記第1および第2の表面が、それぞれ前記第1および第2のプリズムの面であり、好ましくは、前記プリズムの断面が、直角二等辺三角形である、請求項16～20のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 22】

前記第1の反射器装置が、前記第1および第2の表面が実質的に垂直であるように、前記第1および第2のプリズムを装着するように構成された装着構造を備える、請求項21に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 23】

前記第1の反射器装置が、反射性である第3の表面を備え、前記第1、第2、および第3の表面が、実質的に相互に垂直である、請求項16～22のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 24】

前記第2の反射器装置に入射する光が、前記第1の反射器装置に向かって反射されるように、前記第2の反射器装置が構成されている、先行請求項のいずれか一項に記載のダブル

10

20

30

40

50

ルパルスレーザーシステム。

【請求項 25】

前記第2の反射器装置に入射する光が、前記第1の反射器装置に向かって集束されるように、前記第2の反射器装置が構成されている、先行請求項のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 26】

前記第2の反射器装置が、反射性である凹面を備える、先行請求項のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 27】

前記凹面が、楕円面、回転楕円面、または球面である、請求項26に記載のダブルパルスレーザーシステム。 10

【請求項 28】

前記第1および第2の反射器装置のうちの少なくとも一方が、光が前記光空洞に入る、および/または前記光空洞を出ることを可能にするためのアパーチャを備える、先行請求項のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 29】

前記第1および/または第2の反射器装置の前記アパーチャのサイズが、調整可能である、請求項28に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 30】

前記第1の反射器装置が、第1および第2のプリズムを備え、前記第1および第2のプリズムの縁間のスリットが、前記第1の反射器装置のアパーチャを画定する、請求項28または請求項29に記載のダブルパルスレーザーシステム。 20

【請求項 31】

前記第1の反射器装置が、第1、第2、および第3の表面を備え、前記第1、第2、および第3の表面のコーナーの開口部が、前記第1の反射器装置のアパーチャを画定する、28または請求項29に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 32】

前記第2の反射器装置の中心にある開口部が、前記第2の反射器装置のアパーチャを画定する、請求項28～31のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 33】

前記第1の反射器装置と前記第2の反射器装置との間の前記分離が、調整可能である、先行請求項のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。 30

【請求項 34】

光によってトラバースされる前記光路長が調整可能であるように、前記マルチパスセルが構成されている、先行請求項のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステム。

【請求項 35】

第1および第2のレーザーパルスサンプルを衝突させることによって、前記サンプルを分析するためのダブルパルスレーザー誘起ブレイクダウン分光計であって、前記分光計が、前記第1および第2のレーザーパルスを生成するための先行請求項のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザーシステムを備える、ダブルパルスレーザー誘起ブレイクダウン分光計。 40

【請求項 36】

前記第1および第2のレーザーパルスを前記サンプルに導くための1つ以上の光学要素を備える、請求項35に記載のダブルパルスレーザー誘起ブレイクダウン分光計。

【請求項 37】

前記1つ以上の光学要素が、前記第1および第2のレーザーパルスを同一直線上の経路に沿って前記サンプルに導くように構成されている、請求項36に記載のダブルパルスレーザー誘起ブレイクダウン分光計。

【請求項 38】

前記サンプルによって放出された光を検出するための検出器をさらに備える、請求項3 50

5 ~ 37 のいずれか一項に記載のダブルパルスレーザー誘起ブレイクダウン分光計。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、概して、ダブルパルスレーザーシステム、および光学ならびに原子発光分光法を含む様々な分野でのそのようなシステムの使用に関する。

【背景技術】

【0002】

光パルスは、光学全体および科学的分析で使用される。光パルスは、信号の振幅が、ベースライン値からより高い値またはより低い値へ急速に一時的に変化し、その後ベースライン値へ急速に戻ることを特徴とする。光パルスは、例えば、可視光または不可視の電磁放射を含む、任意のタイプの電磁放射のパルスであり得る。

10

【0003】

複数（例えば、2つ以上）のレーザーパルスが、素早く連続して必要な場合、それらは、複雑で高価な電子機器を使用するか、または2つの異なるパルスレーザーを使用して生成されることが多い。

【0004】

Qスイッチを制御し、所定の時間的遅延で2つのパルスを放出するように変更された電子機器を伴う単一パルスレーザーを使用することによって、2つのパルスが、提供され得る。この場合、必要なレーザーは1つだけであり、2つのパルスが、同一直線上に放射され得る。しかしながら、電子機器の変更に関連付けられる高いコストが存在し、様々な時間的遅延を選択する柔軟性はほとんどない（遅延は、典型的には、約100 μsである）。特に、遅延の持続時間は、パルスのエネルギーに強く影響し、同等のエネルギーの2つのパルスを提供することは困難であり得る。

20

【0005】

代替的に、2つの異なるパルスレーザーのビームを共通の経路に沿って移動させることによって、2つのパルスが提供され得、外部トリガーが、各レーザーに、第1のパルスと第2のパルスとの間の時間的遅延を有するパルスを放出させる。これには、2つのレーザーが必要であり、システムのコストの倍増、およびシステムのサイズの増大につながる。さらに、2つのパルスの空間的重ね合わせの正確な調整に関する要件がある。

30

【0006】

レーザーパルスが利用される1つのシナリオが、レーザー誘起ブレイクダウン分光法（LIBS）である。LIBSは、1970年代から化学分析の目的で使用されてきた。しかしながら、他の発光分光分析（OES）法、例えば、スパークOESまたは誘導結合プラズマOESと比較して不十分な性能のために、定量分析用途への移行が、妨げられた。

【0007】

LIBSでは、サンプルを励起するために、レーザーパルスが使用される。LIBSの重要な要素は、レーザーのパラメータ、およびレーザーと分析される材料との相互作用である。定量分析の場合、線発光強度は、1)アブレーションされた材料の量と、2)プルーム内のプラズマの温度とに依存する。単一パルス、すなわちポンパルス当たり1つのレーザーパルスが、材料をアブレーションおよび気化させ、プラズマを誘導するための従来のアプローチである。それでもなお、単一パルスが使用される場合、アブレーションおよびプラズマ励起を別々に最適化することはできない。プラズマが表面から膨張すると、プラズマは、入射する放射線のテールを吸収し始め、プルーム温度を上昇させるが、サンプル表面に到達する光の量を制限するため、アブレーションされる材料の総量を制限する。より短いパルスを使用して、プルーム温度を犠牲にしてより多くの物質をアブレーションすることができ、反対に、より長いパルスを使用して、プルーム温度を上げることができるが、プラズマ吸収に起因する線発光飽和（line emission saturation）をもたらす。同様に、より高い単一パルスエネルギーは、他ならぬこの飽和効果のために、より強い輝線をもたらさない。

40

50

【 0 0 0 8 】

線発光強度を最適化するために、ダブルパルスLIBSシステムが、提案されている。これらは、数十ナノ秒～数マイクロ秒単位で時間的に分離される2つのレーザーパルスの列を利用する。同一線上のジオメトリ設定では、すなわち2つのパルスが同じ光路をたどって表面に向けられると、第1のパルスが、サンプルに到達し、対応する第1の膨張するプラズマブルームを生じる。これが膨張すると、ブルームの圧力が低下し、したがって、その温度が低下する。所定の時間的遅延の後、第2のパルスが、第1のパルスによって生成されたプラズマブルームを通過してサンプルに到達する。第1のパルスによって生成されたプラズマブルームの密度が、超音速膨張によって大幅に減少するため、この第2のパルスは、部分的に透過されてサンプル表面に衝突し、新しいプラズマブルームを生じる。さらに、第1のプラズマブルームによって吸収されたエネルギー成分が、その温度を上昇させる。全体的な効果として、材料のアブレーションおよび温度が増加し、それにより、より強い線発光がもたらされる。シングルパルスシステムとダブルパルスシステムとの比較研究では、特定の要素で、典型的には、10～50倍、および最大100倍の線発光強度の増加が示されている。

10

【 0 0 0 9 】

これまで、ダブルパルスLIBSシステムは、典型的には、複雑なQスイッチング回路または複数のレーザーの使用を採用してきており、そのため、そのようなダブルパルスLIBSシステムは、これらのアプローチの前述の欠点に悩まされている。どちらのアプローチも、コストおよび複雑さの点で、産業実装に困難をもたらすため、既存のダブルパルスLIBSシステムは、高価で複雑である。

20

【 0 0 1 0 】

本開示の目的は、従来技術のLIBSシステムおよび一般的に従来技術のダブルパルスレーザーシステムのこれらの問題および他の問題に対処することである。

【 発明の概要 】

【 0 0 1 1 】

こうした背景の下で、第1の態様によれば、請求項1に記載のダブルパルスレーザーシステムが、提供される。請求項35に記載のダブルパルスレーザー誘起ブレイクダウン分光計も、提供される。

【 0 0 1 2 】

本開示は、第1のレーザーパルスと第2のレーザーパルスとの間の遅延を提供するための、ダブルパルスレーザーシステム内でのマルチパスセルの使用に関する。あるパルスをマルチパスセル内に向けることにより、マルチパスセルが、セル内のパルスに対して、セルに入らないパルスよりも長い光路長を提供するため、そのパルスは、セルに入らない別のパルスに対して遅延され得る。この目的でのマルチパスセルの使用は、複雑な電子機器の使用を必要とすることなしに、レーザーパルスを遅延させる方法を提供する。

30

【 0 0 1 3 】

パルスは、例えば、単一パルスを分割することによって、単一パルスから生成され得る。これは、単一のレーザーを使用して、2つ（例えば、2つだけ、または場合によっては、少なくとも2つ）のコヒーレントパルスが提供され得、2つのレーザーを使用する必要がないことを意味する。さらに、本開示は、パルスを2つのパルスに分割するための手段を提供する。反射面内にアパーチャを提供し、パルスをアパーチャの縁に向けることによって、パルスの一部分が、アパーチャを通過させられ、かつパルスの一部分が反射させられ、それにより、パルスを分割することができる。これは、レーザーパルスを分割するための効率的で信頼性の高いメカニズムであり、マルチパスセルと容易に統合され得る（例えば、アパーチャを有する反射面をセルの外部に取り付けることによって）。従来のビームスプリッタの装置が、追加的および/または代替的に使用され得る。

40

【 0 0 1 4 】

単一パルスから2つのパルスが生成される好ましい実施形態では、単一パルスのエネルギーは、2つのパルスの間で実質的に等しく分割され得る。例えば、一般的に言えば、第

50

1 および第2のパルスの各々は、等しいエネルギー（例えば、元の単一パルスのエネルギーのエネルギーの50%）を有し得る。これは、本明細書に記載のように配置された従来のビームスプリッタを使用することを含む、本明細書に記載の装置を使用して、または本明細書に記載の（例えば、アパーチャを有する反射面を使用する）機械的ビーム分割技術を使用して達成され得る。

【0015】

本開示の第1および第2のレーザーパルスは、単一のレーザーパルスから生成され得るので、第1および第2のレーザーパルスは、好ましくは、同じ周波数を有する。したがって、実質的に等しいエネルギー、周波数、強度、および/またはサイズを有するパルスが、提供され得る。追加的に、本明細書に記載の分割技術を使用して、レーザーパルスの分割は、レーザーパルスの周波数とは無関係に行われ得る。さらに、本開示のいくつかのシステムでは、分割は、レーザーパルスの偏光とは無関係に行われ得る。

【0016】

本開示に記載のマルチパスセルのいくつかの具体例は、それらが高度に安定であり、製造するのに比較的安価であるため、ダブルパルスレーザーシステムで使用するための特定の利点を有する。例えば、そのようなセルは、最大50メートルまたは100メートル以上の光路長を提供し得る。本開示は、安価な市販の構成要素を使用して製造され得る光学構造であって、該光学構造を振動に耐え、産業実装における機械的整列を単純化するのに適したものにしている顕著な機械的公差を示す、光学構造、を提供する。

【0017】

本開示のマルチパスセルのいくつかは、それぞれマルチパスセルの2つの端部として機能する、2つのプリズムミラーと凹面（例えば球形）ミラーとの組み合わせに基づいている。プリズムは、第1の端部を画定し、凹面ミラーは、第2の反対側の端部を画定する。光は、セルの一方の端部（典型的には、プリズムの間）を通して入り、セルの第1の端部と第2の端部との間で繰り返し跳ね返ることができる。2つのプリズムの組み合わせの光学特性が、既存のマルチパスセルと比較して、向上した安定性をもたらす。例えば、プリズムは、垂直な表面を有するように配置されるため、凹面ミラーによってプリズムに向かって反射された光は、プリズムによって少なくとも部分的に再帰反射される。したがって、光がセルを繰り返しトラバースするときの光の拡散が、低減され得る。原則として、光の発散は、光学システムのわずかなミスアライメント、プリズムの表面の不完全性、および/またはセルに入る光の波形の不完全性に起因して起こり得るが、本明細書に記載のマルチパスセルでは、セルの部分的再帰反射性の端部は、これらの不完全性に対する感度が低いいため、それらの影響が低減される。

【0018】

低減された光の拡散に起因する向上した安定性の利点は、3つの相互に垂直な反射面（例えば、コーナー反射器）を使用して実現することもできる。セルの部分的（または完全）再帰反射性端部の使用は、セルの他端の凹面（例えば、集束）反射器との組み合わせで特に有利である。

【0019】

本開示のマルチパスセルは、追加の利点を提供する。例えば、垂直反射面は、例えば、2つのミラーを使用して提供され得るが、2つのプリズム（および特に、断面が直角二等辺三角形である2つのプリズム）の組み合わせは、特に有利である。2つの直角二等辺三角形のプリズムは、それらが対の垂直面を画定するように、並べて（プリズムの軸が平行になる状態で、断面の斜辺によって画定される面に依存して）位置付けられ得る。さらに、プリズムの縁（プリズムの軸に平行な縁）の間に小さなスリットを伴ってプリズムを位置付けることにより、光がプリズムの間を通過することを可能にするアパーチャが、容易に提供され得る。三角プリズムは、上記の利点を提供するために（例えば、装着構造を使用して）正確に配置することが容易で、かつ光学装置内に装着するための大きな表面積を提供し、反射面の安定性を向上させる、広く入手可能な光学構成要素である。したがって、プリズムは、対の垂直な反射面を製造するための効率的で信頼性の高い手段を提供す

10

20

30

40

50

る。

【 0 0 2 0 】

本開示の反射器装置によって提供される強化された安定性は、セルが、反射器の間の任意の所与の分離に対して、非常に長い光路長を（したがって、光がセル内にある長い持続時間も）提供することを可能にする。例えば、セルの両端の間隔が、調整され得、光がセルに入る角度が、調整され得る。セルの形状のこれらの特性を変更することにより、光によってセル内でトラバースされる総経路長が、1 m未満から数十メートル、またはさらには100 m超まで調整され得る。これにより、ダブルパルスレーザーシステムのパルス間に時間的遅延を提供するための比較的長い経路長が、提供され得る。一般的に言えば、セルの端部の間隔のより大きい間隔は、より長い光路長をもたらし、増大した経路長は、光がセルに入る角度を大きくすることによって（すなわち、セルの長手方向軸からより大きな角度で光を入れることによって）も、達成され得る。説明されたマルチパスセルは、（他の分野で使用される従来技術のマルチパスセルと比較して）ある角度での光の受光に対して特に耐性があり、したがって、ダブルパルスレーザーシステムに統合されるときに特に有益である。

10

【 0 0 2 1 】

本開示のダブルパルスシステムは、第1および第2のパルスがサンプルに衝突して、サンプルに光を放出させるダブルパルスレーザー誘起ブレイクダウン分光法の文脈で、特に有利である。プリズムおよびミラーなどの広く入手可能な光学構成要素の新しい組み合わせを使用することにより、複雑な電子機器または複数のレーザーを必要とすることなく、パルス間に比較的長い時間的遅延を提供することが、有利である。

20

【 0 0 2 2 】

次に、本発明の実施形態が、単なる実施例として、以下の添付の図面を参照して記載される。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 2 3 】

【 図 1 】ダブルパルスレーザーシステムを概略的に示す。

【 図 2 】光を分割するための光学装置を備えるダブルパルスレーザーシステムを概略的に示す。

【 図 3 A 】マルチパスセルを概略的に示す。

30

【 図 3 B 】マルチパスセルを概略的に示す。

【 図 3 C 】マルチパスセルを概略的に示す。

【 図 3 D 】マルチパスセルを概略的に示す。

【 図 4 A 】マルチパスセルの安定性解析を示す。

【 図 4 B 】マルチパスセルの安定性解析を示す。

【 図 4 C 】マルチパスセルの安定性解析を示す。

【 図 5 】整列状態のマルチパスセルの定在モードを示す。

【 図 6 】ミスアライメントを受けたときのマルチパスセルの定在モードを示す。

【 図 7 】マルチパスセルを概略的に示す。

【 図 8 】図 3 A ~ 3 D および図 7 のマルチパスセル用の代替の第1の反射器装置を概略的に示す。

40

【 図 9 A 】本明細書に記載のマルチパスセルの装着構造を概略的に示す。

【 図 9 B 】本明細書に記載のマルチパスセルの装着構造を概略的に示す。

【 図 1 0 】光を分割する原理を示す。

【 図 1 1 A 】本明細書に記載のマルチパスセルを利用するダブルパルスレーザーシステムを概略的に示す。

【 図 1 1 B 】本明細書に記載のマルチパスセルを利用するダブルパルスレーザーシステムを概略的に示す。

【 図 1 1 C 】本明細書に記載のマルチパスセルを利用するダブルパルスレーザーシステムを概略的に示す。

50

【図 1 1 D】本明細書に記載のマルチパスセルを利用するダブルパルスレーザーシステムを概略的に示す。

【図 1 2 A】異なるタイプの機械的ビーム分割の比較を示す。

【図 1 2 B】異なるタイプの機械的ビーム分割の比較を示す。

【図 1 3】本明細書に記載のマルチパスセルを利用するダブルパルスレーザー誘起ブレークダウン分光計を概略的に示す。

【発明を実施するための形態】

【0024】

図 1 に、第 1 および第 2 のレーザーパルスを生成するための一般化されたダブルパルスレーザーシステムが示されている。このシステムは、第 1 のレーザーパルスに対して第 2 のレーザーパルスを遅延させるように配置されたマルチパスセル 100 を備える。レーザーシステムは、方向 101 に沿ってマルチパスセル 100 に向けられる単一のレーザーパルスを提供するためのレーザー 110 をさらに備える。マルチパスセル 100 は、単一のレーザーパルスを受光し、2 つのパルスを、時間的分離を伴って方向 108 に進行させる。第 1 のレーザーパルスと第 2 のレーザーパルスとの間に遅延を導入するためのマルチパスセルの使用は、有利には、複数のレーザーパルスを生成するために複数のレーザーを使用するシステムよりも少ないスペースおよび少ないコストを必要とする。さらに、レーザーパルス間に遅延を導入するためのマルチパスセルの使用は、Q スイッチングを制御するための複雑な電子機器の必要性を排除する。図 1 では、マルチパスセル 100 自体が、単一のレーザーパルスを第 1 および第 2 のレーザーパルスに分割することができ得るか、または光分割要素（例えば、レーザー 110 とセル 100 との間に位置付けられる）が、この機能を実行することができる。

【0025】

図 2 は、レーザーパルスを分割するためのマルチパスセル 200 および光学装置 212 の例を示す。図 2 (i)、(ii)、および (iii) では、光をマルチパスセル 200 内に、およびサンプルに向けて誘導するために、ビームスプリッタ 212 a ~ e を備える光学装置 212 に入射する単一のレーザーパルス 201 が、示されている。図 2 (i) は、第 1 および第 2 のレーザーパルスを生成するが、両方のパルスを所望の目的地に向けることができない光学装置 212 を示す。図 2 (ii) および 2 (iii) は、相対的な時間的遅延を有する第 1 および第 2 のレーザーパルスを首尾よく生成する光学装置 212 を示す。図 2 (ii) では、単一のレーザーパルスの入射した全エネルギーの 75% が、最終的にサンプルに向けられる。図 2 (iii) では、単一のレーザーパルスの入射した全エネルギーの 100% が、最終的にサンプルに向けられる。

【0026】

図 2 の光学装置 212 は、ビームスプリッタを利用している。ビームスプリッタは、非偏光性（無偏光性と呼ばれることもある）または偏光性であり得る。偏光ビームスプリッタは、光を直交偏光状態の 2 つのビームに分割する。ビームスプリッタに加えて、光学装置 212 はまた、パルスを適切なビームスプリッタに向けるための反射要素（例えば、ミラー）を備える。ビームスプリッタのタイプとしては、半透鏡、互いに接着した三角プリズムの対、ウォラストンプリズム、および（ダイクロイック光学コーティングを使用する）ダイクロイックミラープリズムアセンブリが挙げられる。

【0027】

図 2 (i) には、単一の非偏光ビームスプリッタ 212 a が、示されている。図 2 (i) に示されるように、レーザーパルス 201 が、1 つの非偏光ビームスプリッタを通過する場合、50% が（サンプルに向かって）透過され、50% が反射される。図 2 (i) では、これは、入射パルスの伝搬軸に対して時計回りに 90° の角度で示されている。光の反射部分は、マルチパスセル 200 に入り、パルスが出射光 208 の方向に沿ってセル 200 を出ると、パルスは、再び同じビームスプリッタ 212 a に入射する。そこで、このパルスの 50%（すなわち、全初期パルスエネルギーの 25%）が、入射光 201 の方向に沿ってレーザー光源に向かって反射されて戻され（これは、光源を損傷する可能性があ

10

20

30

40

50

るため危険である)、50%が、ビームスプリッタ212aを真っ直ぐ通過し、サンプルに到達しないであろう。

【0028】

図2(ii)は、2つの非偏光ビームスプリッタ212bおよび212cを備える光学装置212を示す。図2(ii)は、第1のビームスプリッタ212bに対して180°回転した第2のビームスプリッタ212cを追加することにより、構成(i)を改善している。第1のビームスプリッタ212aは、単一のレーザーパルスを実験1および第2のレーザーパルスに分割する。第1のレーザーパルスは、第2のビームスプリッタ212cに向かって真っ直ぐ通過し、第1のレーザーパルスは、第2のビームスプリッタ212cも真っ直ぐ通過する。したがって、第1のレーザーパルスは、サンプルの方向に進む。第2のレーザーパルス(すなわち、遅延パルス)は、マルチパスセル200に入り、セルを1回以上トラバースし、出射光208の方向に沿って出てきた後、第2のビームスプリッタ212cに誘導される。第2のレーザーパルスの50%は、第2のビームスプリッタ212cを真っ直ぐ通過し、第2のレーザーパルスの50%は、サンプルに向かって、第1のレーザーパルスと同一直線方向に指向される。このようにして、レーザー光源への後方反射が回避され、元のレーザーエネルギーの75%が、サンプルに到達し、元のレーザーパルスエネルギーの25%が、第1のレーザーパルスに対して時間的遅延を有する第2のレーザーパルスである。レーザーエネルギーの25%が失われるため、これは、最適なシナリオではない。

10

【0029】

図2(iii)は、2つの偏光ビームスプリッタ212dおよび212eを備える光学装置212を示す。第1のビームスプリッタ212eは、その偏光に従ってパルスを分割する。したがって、円偏光光がビームスプリッタ212eに当たると、水平成分と垂直成分とが分離される。元のパルスが円偏光されるので、各成分は、パルスエネルギーの50%に対応する。したがって、パルスの50%が、サンプルに向かって透過され、50%が、マルチパスセル200へ反射される。図(i)と同じシナリオを避けるために、第2の偏光ビームスプリッタ212e(第1の偏光ビームスプリッタ212dに対して180°回転している)が、2つのパルスにサンプルを目標とさせる。このシナリオの利点は、入射レーザー光の100%が保存され、図2(ii)と比較して向上した効率をもたらすことである。

20

30

【0030】

したがって、一般的に言えば、本開示は、光学装置が、第2のレーザーパルスをマルチパスセルに向けるように(例えば、第1のパルスに対して第2のパルスを遅延させるように)構成されている実施形態を提供する。光学装置は、好ましくは、(例えば、単一パルスを2つに分割することによって)単一のレーザーパルスから第1および第2のレーザーパルスを生成するように構成される。光学装置は、1つのパルスを2つのパルスだけに分割するように構成され得る。そのようなパルスは、実質的に等しいエネルギー(すなわち、複数のパルスを生成するために使用される1つのパルスのエネルギーの50%)を有し得る。本開示は、時間的遅延を伴う第1および第2のレーザーパルスを生成するための装置を提供し、時間的遅延の程度は、使用されるマルチパスセルの特性(例えば、光路長)に依存し、それによって制御可能である。本開示の光学装置は、1つまたは複数の非偏光ビームスプリッタを備え得る。追加的または代替的に、光学装置は、1つまたは複数の偏光ビームスプリッタを備え得る。光は、使用されるビームスプリッタの組み合わせに応じて、偏光されるか、または偏光されなくてもよい。そのような装置は、レーザーと光空洞との間の特に厳密な整列を必要としない点で有利である。さらに、そのような装置は、効率的かつ効果的に製造され得る。

40

【0031】

マルチパスセル200は、ホワイトセルまたはヘリオットセルなど、任意のタイプの既存のマルチパスセルであり得る。ホワイトセルまたはヘリオットセルなどのマルチパスセルは、一般に、分光吸収セルとして使用される。しかしながら、本開示はまた、著しく機

50

械的に安定したセルを使用して、驚くほど長い光学遅延を達成することを可能にする新規のマルチパスセル形状を包含する。そのようなマルチパスセルの例が、図 3 A ~ 3 D および図 7 に示されており、それらについて、以下でより詳しく説明する。

【 0 0 3 2 】

既存のマルチパスセルとは対照的に、本開示のレーザーシステムで使用するための新規のマルチパスセルは、一般的に言えば、第 1 の反射器装置と、第 2 の反射器装置とを備え得、第 1 の反射器装置は、第 1 の反射器装置に入射する光が、第 2 の反射器装置に向かって少なくとも部分的に再帰反射されるように構成される。有利には、少なくとも部分的に再帰反射性である反射器装置の使用は、部分的に再帰反射性の表面が、その上に入射する光の散乱を抑制し、したがって、光が、低減されたまたは最小の散乱で、その光源に反射されて戻るので、改善された機械的安定性の効果を提供する。この場合、光は、第 1 の反射器装置から第 2 の反射器装置に向かって反射され、それにより、本開示のマルチパスセルが、大幅なミスアライメントを許容できない従来技術のデバイスよりも多くの機械的ミスアライメントを許容することが可能になる。

10

【 0 0 3 3 】

本開示の第 1 の反射器装置は、その部分的再帰反射性ではなく、その構造に基づいた代替の用語で定義され得る。例えば、第 1 の反射器装置は、2 つの垂直な（または部分的再帰反射性を提供するように実質的に垂直な）反射面、または 3 つの相互に垂直な（または再帰反射性を提供するように実質的に垂直な）反射面を有すると定義され得る。平面ミラーは、光が、ミラーに正確に垂直であり、ゼロの入射角を有する場合にのみ、平面ミラーに入射する光を反射して、光源に戻す。レーザー光は、低度のビーム（またはパルス）発散を示すが、完全にコリメートされたレーザービームはない。さらに、完全に平面のミラーはない。したがって、実際の光源の場合、典型的には、平面ミラーからのいくつかの散乱が発生する。したがって、本開示の文脈では、平面ミラーは、部分的再帰反射性であるとは見なされない。むしろ、本開示の文脈では、反射器装置は、反射器装置が、（単一の入射角で入射する光のみを再帰反射し得る完全に平面のミラーとは異なり）ある範囲（すなわち、複数）の入射角にわたる光に対して再帰反射作用を提供する場合、少なくとも部分的に再帰反射性である。

20

【 0 0 3 4 】

再帰反射性は、コーナー反射器を使用して得られ得、コーナー反射器は、コーナー反射器に入射する任意の光をその光源に再帰反射させる 3 つの垂直な平面反射器からなる。部分的再帰反射性もまた、2 つの垂直な平面ミラーのみを使用して達成され得、この場合、ある範囲の方向から入射する光が、再帰反射されるであろう。しかしながら、第 3 の反射面がないことは、2 つの平面の交線によって画定される方向の成分を有する光は、その光源に完全には再帰反射されないであろうことを意味する。むしろ、2 つの平面の垂直ミラーは、2 つの平面の交点によって画定される方向に垂直な光に対して再帰反射性である。

30

【 0 0 3 5 】

本開示のレーザーシステムで使用するためのマルチパスセル 3 0 0 が、図 3 A、3 B、3 C、および 3 D に示されており、これらは、4 つの異なる構成のマルチパスセル 3 0 0 を概略的に示す。

40

【 0 0 3 6 】

マルチパスセル 3 0 0 は、ハウジング 3 0 2 を備える。典型的にはコヒーレント光（例えば、レーザーによって生成される光）である光 3 0 1 は、光源の選択された波長に対して透明である光学窓 3 0 4 を通ってハウジング 3 0 2 に入る。光学窓 3 0 4 は、単にハウジング 3 0 2 内のアパーチャであり得る。光 3 0 1 は、図 2 に示されるように、ビームスプリッタ装置によって単一のレーザーパルスから分割された第 2 のレーザーパルスであり得る。光 3 0 1 は、窓 3 0 4 の法線に対して入射角 θ に向けられている。角度 θ はまた、光 3 0 1 の方向と、セルの長手方向軸 3 0 0 z との間の角度である。長手方向軸 3 0 0 z は、図 3 A に示されているが、単純化のために、図 3 B、3 C および 3 D から省略されている。角度 θ は、典型的には、 $2^\circ \sim 10^\circ$ である（ただし、他の範囲の角度が使用され

50

得る)。

【0037】

マルチパスセル300は、第1および第2の反射器装置305および307を備える。反射器装置305および307は、マルチパスセル300に入る光が、(2つの反射器装置の表面以外のどの表面からも反射されることなく)2つの装置間で繰り返し反射されるように配置され、反射器装置305および307は、光空洞315を画定する。

【0038】

第1の反射器装置305は、典型的には2~10mmの幅である小さなスリット306が、プリズム305Aとプリズム305Bとの間に画定されるように位置付けられている2つのプリズムミラー305A、305Bを備える。第1の反射器装置は、実質的に垂直である2つの表面(2つのプリズムの面)を備える。スリット306は、窓304と整列され、光のビームまたはパルスが、マルチパスセル300内に画定された光空洞315に入る、および光空洞315を出ることができるアパーチャとして機能する。

10

【0039】

このセル300の第2の反射器装置307は、プリズムミラー305Aおよび305Bから距離dに位置付けられている球形の円形ミラーである。このセル300では、第2の反射器装置307はアパーチャを有さず、したがって、光は、第2の反射器装置を通過することができない。第2の反射器装置307は、第1の反射器装置のプリズム305Aおよび305Bに対向している。

【0040】

使用時には、光301は、光学窓304およびプリズム305Aとプリズム305Bとの間のスリット306を通過してセルに入る。次に、光は、球面ミラー307から反射し、球面ミラー307は、光を第1の反射器装置305に向かって反射および集束させて戻す。光は、プリズム305Aおよび305Bのうち的一方からプリズム305Aおよび305Bのうちの他方に反射し、プリズム305Aおよび305Bは、それらの面が垂直であるように位置付けられているので、光は、2つのプリズムの組み合わせによって再帰反射されて、球面ミラー307に向かって戻される。反射器装置305および307の対称性が、光をセル300内の特定の経路をたどらせ、この経路は、ミスマイメントに関して著しく安定している。光空洞315内での多数の反射の後、光の経路は、最終的にプリズムの間のスリット306に入射し、したがって、光308は、セル300から出てくる。光空洞315を断面(プリズム305Aおよび305Bの軸に垂直な平面内、または等価的に、法線ベクトルがプリズム305Aおよび305Bの平面反射面の交線である平面内)で見た場合、光308がセル300から出てくる角度は、光301がセル300に入る角度に等しい(が、反対方向)。

20

30

【0041】

したがって、2つのプリズムミラー305Aおよび305Bと、球面ミラー307との組み合わせは、光308の出射方向に沿って空洞315を出る前に、多数の反射のために光をセル300内に捕捉し得る1つのセットの定在モードを画定する。マルチパスセル300内の反射の数、およびその結果として達成可能な総光路長は、プリズムミラー305Aおよび305Bの表面積、球面ミラー307の曲率半径、光301が空洞315に入る角度、およびプリズムミラー305A、305Bと球面ミラー307との間の距離dを含むいくつかの要因に依存する。したがって、光路長は、設定の幾何学的特性に依存する。しかしながら、光路長は、(波長、単位面積当たりのビームエネルギー、または光301がパルスであるか連続波であるかを含む)光の物理的特性によって影響されない。

40

【0042】

光路長に対する形状の影響が、様々な構成についてシミュレートされた光線トレースを示す図3A~3Dに示されている。図3Aでは、第1の反射器装置305と第2の反射器装置307との間の間隔は、 $d = 150\text{ mm}$ である。これは、2つのプリズムミラー305Aおよび305Bの間のアパーチャの中心と、球面ミラー307との間の距離である。この装置は、8回の反射および1.2mの総光路長をもたらす。図3Bでは、距離dが、

50

485 mmに増加し、66回の反射および31.9 mの総光路長をもたらす。図3Cでは、距離dが、さらに525 mmに増加し、88回の反射および46.3 mの総光路長をもたらす。図3Bおよび3Cの入射角は、図3Aと同じである。

【0043】

図3Dは、距離dが、第2の反射器装置307（この場合、円形ミラー）の焦点距離の正確に半分に等しいマルチパスセル300の特別なケースを示す。この装置では、入射光301は、第1の反射器装置305を通過して、第2の反射器装置307に当たった後、第1の反射器装置305に向かって反射されて戻ることが分かる。次に、第1の反射器装置305が、光を第2の反射器装置に向けて部分的に再帰反射して戻し、この構成の高度の対称性により、光は、第1の反射器装置の中心に戻り、そこで出射光308の方向に沿って光空洞315から出てくる。第1および第2の反射器装置305および307が、第2の反射器装置307の焦点距離の半分だけ離れていることを確実にすることにより、光は、セル300の長さを正確に4回トラバースする。

10

【0044】

図3Dは、簡略化されており、図3A、3B、および3Cのハウジングを省略している。しかしながら、図3Dは、セル300から出てくる光308を所望の目的地（例えば、LISシステムでの分析のためのサンプル）に導くための光学装置312をさらに示す。この場合、光学装置312は、ミラーとレンズとを備えるが、光学要素の様々な組み合わせが、光を所望の目的地に向けるために使用され得る。

【0045】

したがって、図3A～3Dのマルチパスセル300は、2つのプリズムミラー305Aおよび305Bと、凹球面ミラー307との組み合わせに基づく新規なアーキテクチャを提供する。これらの図から、広範囲の光路長が達成可能であることが分かる。このアーキテクチャは、LISのレーザーパルス間に比較的長い光遅延を提供するために使用され得、最大50メートル以上の光路長（約167 nsの時間的遅延に相当）を提供し得る。

20

【0046】

図4A、4B、および4Cは、わずかにミスアライメントされている場合の図3A～3Dのマルチパスセル300のシミュレーションを示す。前述のように、本開示の実施形態によって提供される利点は、反射器装置の間に最大4°のミスアライメントが存在する場合の安定性の向上である。これは、コヒーレント光ビームによってトレースされた光路に対する制御されたミスアライメントの影響を研究することによって実証され得る。

30

【0047】

図4A、4B、および4Cの各々は、異なるミスアライメントシナリオの概要を示す3つのサブフィギュアで構成される。図4Aは、 $d = 150$ mmの、反射器装置305と反射器装置307との間の分離を伴う、図3Aに提示された形状についてのマルチパスセルの安定性研究を示す。図4Bは、 $d = 485$ mmの、反射器装置305と反射器装置307との間の分離を伴う、図3Bに提示された形状についてのマルチパスセルの安定性研究である。図4Cは、 $d = 525$ mmの、反射器装置305と反射器装置307との間の分離を伴う、図3Cに提示された形状についてのマルチパスセルの安定性研究である。

【0048】

いずれの場合も、中央のサブフィギュアは、プリズムミラー305Aおよび305Bと、球面ミラー307との間に定在モードを生成することにより、単一平面上の光路をたどる、うまく整列されたレーザービームに対応する。図4A～4Cに示される安定性分析のために、出射ビームは、検出システム309上に集光される。

40

【0049】

ビームが、x次元において -2° （左のサブフィギュア）～ $+2^\circ$ （右のサブフィギュア）ミスアライメントされている場合、光路は、もはや単一の平面に閉じ込められず、プリズムミラー305Aおよび305Bと、球面ミラー307との間の全体積にわたり得る。マルチパスセル300で提案された形状は、ミスアライメント下で、定在モードの完全性が維持されることを可能にし、これは、深刻なミスアライメント条件下でさえ、ビ

50

ームがセル 300 を首尾よく出射し得ることを意味する。図 4 A、4 B、および 4 C の各々で、x 次元における最大 4° の入射ミスアライメント角度 ($-2^\circ \sim +2^\circ$) を有するビームが示されている。これは、すべての反射が単一の平面上にある整列されたケースに対して、光路が傾斜するという結果をもたらす。それにもかかわらず、これらの境界内で、ビームは、マルチパスセル内に定在モードを生成し、検出システム 309 での検出のために首尾よく出射することができる。

【0050】

図 5 および図 6 は、マルチパスセル 300 の形状の安定性のさらなる研究を示し、図 6 に示されるように、x 次元でミスアライメントが球面ミラー 307 に適用され、図 5 では、球面ミラーは、完全に整列されている。ミラー 307 は、その中心が、光源 301 を起

10

【0051】

図 5 は、ミスアライメントが発生しない場合に対応する。この場合、空洞 315 内の定在モードは、プリズムミラー 305 A 上の単一の線上に位置する。10 mm の負 (図 6 (a)) または正 (図 6 (b)) のミスアライメントが発生すると、定在モードは、単一の

20

【0052】

高度に安定したマルチパスセル 300 を提供することの利点は、セル 300 内で光によってトラバースされる光路長が、球面ミラー 307 と、2つのプリズムミラー 305 A および 305 B との間の距離 d を変えることによって、容易に調整可能であることである。光路長を長くすることの利点としては、レーザーパルス間に長い光遅延を提供する機能が挙げられる。したがって、図 4 A ~ 4 C、図 5、および図 6 から、図 3 A ~ 3 D のマルチ

30

【0053】

例えば、ハウジング 302 および光学窓 304 は完全に省略されてもよいことが理解されるであろう。さらに、向上した安定性の利点は、プリズム 305 A および 305 B ではなく、実質的に垂直である 2つの平面ミラーを使用して達成され得る。そのような装置は、それに入射する光に対して部分的再帰反射性である同じ効果を提供するであろう。さらに、光が空洞 315 に入るアパーチャ 306 は、第 1 の反射器装置ではなく、第 2 の反射器装置内に配置され得る。追加的に、球面ミラー 307 は、球面である必要はなく、部分的再帰反射性のプリズム 305 A および 305 B の恩恵を受けながら、他の様々な形態を

40

【0054】

したがって、以前に使用された一般化された用語に戻ると、本開示の第 1 の反射器装置は、好ましくは、反射性である第 1 および第 2 の表面を備える。第 1 の反射器装置は、それに入射する光が、第 1 の表面から第 2 の表面に、かつ第 2 の反射器装置に反射されるように構成され得る。第 2 の表面から反射された光は、第 1 の反射器装置の第 3 の表面に入射した後、第 2 の反射器装置に反射されるか、または第 2 の表面から反射された光は、任意のさらなる表面によって反射されることなく、第 2 の反射器装置に直接反射され得る。

【0055】

10

20

30

40

50

第1および第2の表面は、好ましくは、実質的に垂直である。第1および第2の表面は、好ましくは、実質的に平面である。この装置を使用して、光に対して再帰反射作用を提供し、マルチパスセルの機械的安定性を向上させることができる。完全に平面の垂直表面は、完全な再帰反射性を示すであろうが、完全に平面の垂直表面からの多少の逸脱は、許容され得る。例えば、(少なくとも)部分的再帰反射性の効果が依然として達成されるという条件で、表面は、完全に平面および/または完全に垂直であることから逸脱してもよい。光が、第2の反射器装置(例えば、球面ミラー)の表面に垂直でないいくつかの成分を有する場合、この光は、空洞に入り、図4A~4C、図5および図6に示されるように、定在波様のパターンのセットを形成し得る。

【0056】

さらに、第1または第2の表面全体が完全に平面である必要はない。例えば、表面のうち的一方または両方は、平面部分に加えて、湾曲部分(例えば、1つまたは複数の縁部において)を有してもよい。この場合、第1および第2の表面の実質的に平面の部分が互いに実質的に垂直であるならば、それらは依然として一緒に働いて、それらに入射する光を部分的または完全に再帰反射することができる。

【0057】

したがって、本開示は、第1の反射器装置と、第2の反射器装置とを備えるマルチパスセルであって、第1の反射器装置が、反射性である第1および第2の表面を備え、第1および第2の表面が、実質的に垂直および/または実質的に平面である、マルチパスセル、を提供する。

【0058】

第1および第2の表面の平面は、共通の軸を画定し得、第1の反射器装置は、共通の軸に垂直に入射する光に対して再帰反射性であり得る。平面表面の文脈において、共通の軸は、平面表面を含む平面によって画定される交線である。任意の2つの非平行平面が、交線を画定する。したがって、2つの平面表面が実際に交差していない場合でも、表面が存在する平面が、交差軸を画定する。交差軸は、もし平面が無限の空間範囲を有すると、平面表面が交差するであろう線と見なされ得る。

【0059】

好ましくは、第1の反射器装置は、第1および第2のプリズムを備え、第1および第2の表面は、それぞれ第1および第2のプリズムの面である。プリズムミラーは、前述の有利な実施形態が、正確かつ容易に製造されることを可能にする、広く入手可能な光学構成要素である。例えば、プリズムミラーは、直角二等辺三角形である(すなわち、90°、45°、および45°の内角を有する)断面を有し得る。この場合、2つのそのようなプリズムを、両方のプリズムがより短い(非斜辺の)面に載った状態で、互いに隣接して配置することにより、(この装置内で垂直になるプリズムの2つの表面によって画定される)部分的再帰反射性の表面が、簡単に製造され得る。したがって、本開示のマルチパスセルは、安価で市販の構成要素を有利に使用して、安定したマルチパスセルを製造するための費用効果が高く信頼性の高い方法を提供する。

【0060】

第2の反射器装置は、好ましくは、それに入射する光が、第1の反射器装置に向かって反射されるように構成される。例えば、第2の反射器装置は、第1の反射器装置から受光された光が第1の反射器装置に反射されるように構成され得、第1の反射器装置は少なくとも部分的に再帰反射性であるので、光は、第1の反射器装置と第2の反射器装置との間を繰り返し跳ね返るようになされ得る。これは、第1および第2の反射器装置が互いに対向することを確実にすることによって、達成され得る。例えば、第1の反射器装置は、少なくとも部分的に再帰反射性であり、したがって、ある範囲の方向から受光される光に対して再帰反射性である。したがって、第2の反射器装置は、第1の反射器装置が再帰反射性である方向の範囲内に位置付けられ得る。第2の反射器装置が凹面を有する場合、この面は、第1の反射器装置の少なくとも部分的再帰反射性の部分に対向し得る。このようにして、第1および第2の反射器装置は、安定した光空洞を画定し得る。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 1 】

第2の反射器装置は、好ましくは、それに入射する光が、第1の反射器装置に向かって集束されるように構成される。第2の反射器装置の集束作用は、第1の反射器装置の再帰反射作用と一緒に作用して、光の拡散を抑制し、安定性を向上する。反射器装置の間隔と、第2の反射器装置の焦点距離との間の関係は、セル内で光によってトラバースされるパスの数に影響を与えるであろう。

【 0 0 6 2 】

第2の反射器装置は、反射性である凹面を備え得る。凹面は、楕円面、回転楕円面、または球面であり得る。例えば、2つの反射平面表面によって画定される交線に平行な1つの細長い軸を有する楕円反射器が、使用され得る。そのような場合、ミスアライメントを補正するための有用な表面が一方方向に伸長され、他の方向に短縮されるため、細長い軸は、機械的公差に影響を及ぼすであろう。したがって、より高度な空間対称性を有する表面は、向上した安定性を提供し、その結果、球面（すなわち、光が入るのを可能にする開口部を有する球の表面の一部）が、最も好ましい。球形からのわずかな逸脱は、許容され得る。2つの平面プリズムミラーと球面（つまり中央対称）ミラーとの組み合わせは、球面ミラーのわずかなミスアライメントが、それ以上増幅されず、光路が、空洞のミラー内の体積の間に依然としてあることを意味するため、最も向上した安定性を提供する。

【 0 0 6 3 】

有利には、本開示では、第1の反射器装置と第2の反射器装置との間の分離は、調整可能である。したがって、マルチパスセルは、光によってトラバースされる光路長が調整可能であるように、構成される。簡単にするために図3A～3Dには示されていないが、第1および第2の反射器装置305および307は、相対的に移動可能である（例えば、一方または両方を移動することによって）。これにより、分離が制御されること、したがって、光路長が調整されることが可能にある。相対運動は、例えば、反射器装置の一方または両方を作動させることによって、提供され得る。光路長は、光がマルチパスセルをトラバースする回数を変更することによって、調整され得る。例えば、分離を増大させることは、単一のパス内で光によってトラバースされる距離の増加をもたらし得るが、分離を増大させることはまた、光をセル内で異なるパス数トラバースさせて、光路長をさらに増大させ得る。本開示の向上した安定性は、光路長の制御を提供しながら、比較的長い光路長が得られることを可能にする。

【 0 0 6 4 】

本開示のセルを使用して、光路長は、30cm以上（かつ好ましくは、1m、5m、15m、25m、40m、50m、または100m以下）、1m以上（かつ好ましくは、5m、15m、25m、40m、50m、または100m以下）、5m以上（かつ好ましくは、15m、25m、40m、50m、または100m以下）、15m以上（かつ好ましくは、25m、40m、50m、または100m以下）、25m以上（かつ好ましくは、40m、50m、または100m以下）、40m以上（かつ好ましくは、50m、または100m以下）、50m以上（かつ好ましくは、100m以下）、または100m以上（かつ好ましくは、150m以下）に調整可能である。これらは、光速が約 $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ であることに留意することにより、等価な時間値に変換され得る。

【 0 0 6 5 】

説明された実施形態は、振動に耐え、産業実装における機械的整列を簡単にするのに適したマルチパスセルを提供するために、予想外に高い機械的公差を示す。以前のマルチパスセルと比較したこの開示の利点は、多数あり、最大 4° （約70ミリラジアン）のミスアライメントの向上した安定性、容易に調整可能な長い光路長、および高い信頼性で効率的に製造するための簡単なアーキテクチャが含まれる。

【 0 0 6 6 】

図3A～3D、図4A～4C、図5、および図6のマルチパスセル300では、光が空洞315に入るアパーチャ306は、第1の反射器装置305の2つのプリズム305Aおよび305Bの間に位置付けられている。一方、図7は、プリズム705Aとプリズ

10

20

30

40

50

ム 705B との間ではなく、第 2 の反射器装置 707 内にアパーチャ 706 を提供することによって、前述の利点の多くが達成可能である代替のマルチパスセル 700 を示す。

【0067】

図 7 のマルチパスセル 700 は、2 つのプリズム反射器 705A および 705B を備える第 1 の反射器装置 705 を備え、2 つのプリズム反射器 705A および 705B は、プリズム 705A および 705B の 2 つの面が、垂直であり、部分的再帰反射性の表面を提供するように位置付けられている。球面ミラー 707 の形態の第 2 の反射器装置が、プリズム 705A および 705B に対向して提供されている。球面ミラー 707 は、光が、マルチパスセル 700 の光空洞 715 に入ること、および光空洞 715 から出ること、を可能にするための中央アパーチャ 706 を備える。図 2 に示されるように第 1 のビームスプリッタ装置によって単一のレーザーパルスから分割された第 2 のレーザーパルスなどの、セル 700 に入る光 701 は、第 1 の反射器装置 705 と第 2 の反射器装置 707 との間で繰り返し反射された後、出射光 708 の方向に沿ってアパーチャ 706 を介して空洞 715 を出る。高度な幾何学的類似性のために、第 1 の反射器装置 705 および第 2 の反射器装置 707 によって提供される定在モードは、図 3A ~ 3D のマルチパスセル 300 の装置 305 および 307 と同様である。次に、セルから出てくる光は、図 7 にミラーとレンズとを備えるものとして示されている光学装置 712 を介して、その光の目的地に向けられる。例えば、光（例えば、第 2 のレーザーパルス）は、第 2 のビームスプリッタに向けられ得、そこから、図 2 に示されるように、サンプル（例えば、第 1 のレーザーパルスへの同一直線方向）に向けられる。図 7 のマルチパスセル 700 は、図 3A ~ 3D のセル 300 のように、向上した安定性および調整可能性の利点を提供する。

10

20

【0068】

次に図 8 に目を向けると、相互に垂直である 3 つの平面反射面 805A、805B、および 805C を備える反射器装置 805 が、示されている。3 つの表面 805A、805B、および 805C は、再帰反射性であるコーナー反射器を画定する。光が、コーナー反射器を通過することを可能にするために、アパーチャ 806 が、コーナー反射器 805 のコーナーに提供されている。コーナー反射器 805 の裏側を通過する光 801 が、描かれている。

【0069】

図 8 の反射器装置 805 は、プリズム 305A および 305B の代わりに、またはプリズム 705A および 705B の代わりに、図 3A ~ 3D および図 7 のもののようなマルチパスセルで使用され得る。図 8 の反射器装置 805 が、図 7 のマルチパスセル 700 で使用される場合、アパーチャ 806 は、省略され得る。反射器装置 805 もまた、光空洞内の光の拡散を抑制するための再帰反射器の使用により、向上した機械的安定性を提供する。

30

【0070】

したがって、以前に使用された一般化された言語に戻ると、本開示のマルチパスセルでは、第 1 の反射器装置は、反射性である第 3 の表面をさらに備え得、第 1、第 2、および第 3 の表面は、実質的に相互に垂直である。したがって、コーナー反射器を提供して、機械的安定性を向上させることができる。

40

【0071】

第 1 および第 2 の反射器装置は、光空洞を画定し得、第 1 および第 2 の反射器装置のうちの少なくとも一方は、好ましくは、光が、光空洞に入ること、および / または光空洞を出ることを可能にするためのアパーチャを備える。アパーチャのサイズは、空洞に入る光ビームまたはパルスのサイズの制御を提供するように調整可能であり得る。アパーチャは、多くの形態を取り得る。

【0072】

第 1 の反射器装置が、第 1 および第 2 のプリズムを備える場合、第 1 および第 2 のプリズムの縁の間のスリットが、アパーチャを画定し得る。この装置の特定の利点は、（例えば、損傷またはミラーの不完全性を引き起こす可能性がある、球形反射器またはコーナー

50

反射器内にアパーチャを作成することによって) 反射器内にアパーチャを作成する必要なしに、プリズムの間にスリットが存在するようにプリズムを装着することによって、2つのプリズムの間にアパーチャを提供することが簡単であることである。したがって、この装置は、正確に、および精巧な光学構成要素に損傷を与えるリスクを冒すことなく、簡単に作製できる。アパーチャのサイズは、プリズムを作動させて互いに近づけたり、遠ざけたりすることによって、調整され得る。プリズムは、そのような調整を提供するように、相対的に移動可能であり得る。

【0073】

第1の反射器装置が、第1、第2、および第3の表面を備える場合、第1、第2、および第3の表面のコーナーの開口部が、アパーチャ(例えば、3つの表面の平面が交差する点)を画定し得る。同様に、第2の反射器装置の中心(例えば、セルの長手方向軸と実質的に整列している、第2の反射器表面上の点)の開口部が、アパーチャを画定し得る。これは、例えば、凹反射面の中心にある小さな穴であり得る。そのようなアパーチャは、光が、機械的に安定した装置の光空洞に入ること、および/または光空洞を出ることを可能にする。そのような場合、アパーチャのサイズは、アパーチャを不透明な材料(移動可能であり得る)で部分的に覆うことによって、調整され得る。

10

【0074】

次に図9Aおよび9Bに目を向けると、2つのプリズム905Aおよび905Bを備える反射器装置905のための2つの装着構造913aおよび913bが、示されている。プリズム905Aおよび905Bは、それぞれ、マルチパスセル300または700のプリズム305A、305Bまたは705A、705Bであり得る。したがって、装着構造913aおよび913bは、図3A~3Dおよび図7のマルチパスセル300および700で使用され得る。

20

【0075】

図9Aの装着構造913aは、プリズム905Aおよび905Bを保持するように構成されているフレームである。図9Aの装着構造913aは、一对のプリズム905Aおよび905Bの一端から示されている。装着構造は、プリズムの長辺に沿って(ページ内に、プリズム軸に沿って)延在し得、装着構造913aの反対側の端部は、プリズム905Aおよび905Bの反対側の端部を同じように保持する。装着構造913aは、プリズム905Aおよび905Bを所定の位置にしっかりと保持するように、プリズム905Aおよび905Bの非反射縁を保持し得るよう寸法決めされる。装着構造のごく一部分が、反射面(すなわち、プリズム905Aおよび905Bの斜辺)を覆っているが、プリズム905Aおよび905Bが、セル内で光を反射することが可能なように、反射面の大部分は、露出している。

30

【0076】

装着構造913aは、プリズム905Aおよび905Bが所定の位置にしっかりと保持されることを確実にするために、摩擦コーティング(例えば、ゴム)を有し得る。プリズム905Aおよび905Bは、締めりばめを使用して、装着構造913a内に適合し得る。代替的に、プリズム905Aおよび905Bは、接着剤で装着構造913aに保持され得る。いずれの場合でも、装着構造は、プリズム905Aおよび905Bの反射面が、合同して部分的に再帰反射性の面を提供するように、実質的に垂直であることを確実にする。

40

【0077】

図9Bは、図9Aの装着構造913aに加えて、またはその代わりに使用され得るさらなる装着構造913bを示す。図9Bの装着構造913bは、図9Aの装着構造913aのベースとして機能し得るか、または装着構造913bは、それ自体が独立した構成要素であり得る。図9Bの装着構造913bは、プリズム905Aおよび905Bが取り付けられ得る、材料の平坦な部分を備える。装着構造913bは、光が通過することを可能にするためのスリット906を備える。プリズム905Aおよび905Bは、プリズム905Aおよび905Bの面が実質的に垂直であるように、スリット906のいずれかの側に

50

取り付けられ得る。したがって、部分的に再帰反射性の反射器装置は、内部にスリットを有する単一の材料シートと、標準的な光学構成要素である2つのプリズム905Aおよび905Bとを使用して、容易に提供され得る。

【0078】

図9Aおよび9Bの装着構造913aおよび913bを使用して、2つのプリズムミラー905Aおよび905Bの間の相対角度がゼロまたは実質的にゼロ（例えば、少なくとも部分的再帰反射性が得られることを確実にするためにゼロに十分に近い）であることを確実にすることができる。そのような場合、2つのミラーは、約 $\pm 1^\circ$ まで一緒に回転し、かつ依然として、前述のマルチパスセルで使用され場合に、安定したマルチパスパターンを提供し得る。しかしながら、2つのプリズムミラーの間の相対角度が 0.1° より大きい場合、パターンは、悪影響を受ける可能性がある。そのような装着構造の使用は、プリズム905Aとプリズム905Bとの間の相対角度がゼロであるか、またはゼロに十分に近くて、良好な性能を提供することを確実にし得る。図9Aおよび9Bの装着構造913aおよび913bは、様々な材料（例えば、アルミニウムなどの金属）から、および様々な構築技術（例えば、溶接、成形、または3D印刷）を使用して形成され得る。

10

【0079】

したがって、以前に使用された一般化された言語では、第1の反射器装置は、好ましくは、第1および第2の表面が実質的に垂直であるように、第1および第2のプリズムを装着するように構成された装着構造を備える。装着構造の使用は、表面が、許容可能な程度のミスアライメント内で正しく位置付けられることを確実にするのに役立ち得る。

20

【0080】

図10に、機械的なビーム分割の原理が示されている。上のグラフは、ある瞬間におけるガウスレーザーパルスの次元空間セクションを表す。下のグラフは、上のパルスを分割することから形成された2つのパルスの時間プロファイルを示し、2つのパルスは、時間的遅延によって分離されている。本開示は、パルスレーザーによって生成された単一のパルスを2つのパルスの二重（好ましくは同一直線上）のセットに機械的に分割するため、およびマルチパスセルを使用して遅延を導入するために、反射面の使用を提案する。ビームの透過部分（すなわち、図10の上のグラフに示されているパルスの左側の部分）は遅延を受けず、したがって、図10の下のグラフの時間軸に沿って左側に位置付けられている。反射ビームまたはパルス（すなわち、上のグラフに示されているパルスの最も右側の部分）は遅延を受け、したがって、図10の下のグラフの時間軸上で右側に位置付けられている。このように、時間的遅延 t が、単一のレーザーパルスを機械的に分割することによって生成された2つのレーザーパルスの間に導入され得ることが分かる。したがって、ダブルパルスレーザーアーキテクチャが、提供され得る。

30

【0081】

図11A~11Dは、図2のビームスプリッタ装置を使用するビーム分割の代替として、図10の機械的ビーム分割原理が、本開示のマルチパスセルと組み合わせて、どのように適用され得るかを示す。例えば、図11A、11B、11C、および11Dには、第1および第2のレーザーパルスを生成するためのダブルパルスレーザーシステムの4つの構成が示されている。マルチパスセルは、既存のマルチパスセルと比較して、比較的長い光路長を提供するため、セルは、2つのレーザーパルスの中に比較的長い時間的遅延を導入する遅延線として効果的に機能する。さらに、セルの形状が、セルから出てくる光1108が、セルの外面1114から反射された光と同一直線上にあることを確実にする。

40

【0082】

図11A~11Dのダブルパルスレーザーシステムは、光空洞1115を画定する、2つのプリズム1105Aおよび1105Bと、球面反射器1107とを有するマルチパスセルを備える点で、前述のシステムと同様である。前述のように、光1101は、わずかな角度でセルに入る。ダブルパルスレーザーシステムはまた、セルから出てくる光1108を、サンプルであり得る標的目的地1116に向けて案内するための光学装置1112を備える。光学装置は、ミラー1112bを備える。ダブルパルスレーザーシステムと、

50

前述のマルチパスセルとの間の重要な違いは、プリズム 1 1 0 5 A および 1 1 0 5 B の外面が、反射性であり、光 1 1 0 1 がセルに入るのを可能にするための小さなアパーチャ（プリズム 1 1 0 5 A とプリズム 1 1 0 5 B との間のスリットと整列されている）を備えることである。アパーチャを有するこの反射面は、光を分割するための光分割デバイス 1 1 1 2 a として機能し、光学装置 1 1 1 2 の一部を形成する。

【 0 0 8 3 】

より具体的には、図 1 1 A ~ 1 1 D のダブルパルスシステムの概略構成では、コリメートおよびパルス化されたレーザービーム 1 1 0 1 は、プリズム 1 1 0 5 A および 1 1 0 5 B の外部（背面）上の平面ミラー 1 1 1 2 a に向けられる。パルスレーザービームの経路は、図 1 1 A ~ 1 1 D では実線で表されているが、これらの線を連続波レーザー放射と間違えてはならない。パルスビーム 1 1 0 1 の角度は、ミラー 1 1 1 2 a の法線に対してわずかに傾斜しており、典型的には 2 ~ 6 ° である。ミラー 1 1 1 2 a の法線は、セルの軸（すなわち、プリズム 1 1 0 5 A と 1 1 0 5 B との間のスリットと、球面ミラー 1 1 0 7 の中心との間に延びる長手方向軸）に平行である。

10

【 0 0 8 4 】

ミラー 1 1 1 2 a は、直径 1 mm の中央の円形アパーチャを備え、レーザーパルス 1 1 0 1 の一部が、ミラーを通してサンプリングされ、かつレーザーパルス 1 1 0 1 の一部が、経路 1 1 0 8 に沿ってミラーから反射されることを可能にする。前述の実施形態と同様に、セルから出てくる光 1 1 0 8 の角度（アパーチャの法線に対する）は、同じ大きさであるが、入射光 1 1 0 1 の角度とは反対の方向であり、これは、セルの形状に起因して起こる。

20

【 0 0 8 5 】

光分割デバイス 1 1 1 2 a のアパーチャは、入射光パルス 1 1 0 1 が分割される（例えば、2 つの別個のパルスに分割される）ように寸法決定され、光の約半分は、外面 1 1 1 4 から光学装置 1 1 1 2 b に向かって反射され、かつ光の半分は、セルに入り、そこで複数回反射された後、最終的にセルを出て光学装置 1 1 1 2 b に到達する。図 1 1 A ~ 1 1 D では、アパーチャは、直径 1 mm であるが、使用されるレーザービームの幅に応じて、他の幅（例えば、0 . 5 mm、1 . 5 mm、2 mm、2 . 5 mm などの直径）が、使用され得る。図 1 1 A ~ 1 1 D に示される特定のシステムでは、パルスレーザービーム 1 1 0 1 は、1 mm の半値全幅（FWHM）を有する。

30

【 0 0 8 6 】

システムは、パルス 1 1 0 1 が、ミラー 1 1 1 2 a のアパーチャの縁を中心とし、ミラー 1 1 1 2 a が、2 5 mm（すなわち、プリズム 1 1 0 5 A および 1 1 0 5 B と同様のサイズ）の半径を有するように構成される。このようにして、パルス 1 1 0 1 をミラー 1 1 1 2 a に向けるために、様々な光学要素が、使用され得る。パルスの半分が、ミラー 1 1 1 2 a の表面によって反射される一方、残りの半分は、アパーチャを通過する。反射パルスは、平面ミラー 1 1 1 2 b に、次いで、サンプル 1 1 1 6 の表面に向けられる。透過パルスは、曲率半径 $r = 1 0 0 0$ mm および 5 0 mm の直径を有するセルの球形凹ミラー 1 1 0 7 に向けられる。このミラー 1 1 0 7 は、図 1 1 A ~ 1 1 D に示されるように、2 つの直角プリズムミラー 1 1 0 5 A および 1 1 0 5 B に向かってパルスを反射および集束させて戻す。2 つの直角プリズムミラー 1 1 0 5 A および 1 1 0 5 B は、2 5 mm のセグメントサイズを有する。この文脈において、セグメントサイズは、直角に交わる直角三角形の 2 つの辺の長さ（すなわち、プリズム 1 1 0 5 A および 1 1 0 5 B の三角形断面の非斜辺長さの長さ）である。ミラー 1 1 0 5 A、1 1 0 5 B、および 1 1 0 7 の組み合わせが、空洞 1 1 1 5 システムを形成し、ミラー 1 1 1 2 a を通って入るパルスは、何度も反射されて往復した後、最終的にミラー 1 1 1 2 a のアパーチャから出る。

40

【 0 0 8 7 】

図 1 1 A ~ 1 1 D のシステムによって提供される総光路長差（OPD）は、a）ミラー 1 1 0 7 を通過し、空洞 1 1 1 5 内で反射された後、ミラー 1 1 1 2 a の中央アパーチャから出てサンプル 1 1 1 6 に到達するパルスによってカバーされる距離と、b）ミラー 1

50

1 1 2 aで反射された後、サンプル 1 1 1 6 に到達するパルスの一部によって移動された距離との間の差として定義される。有利には、OPDは、(直角)プリズムミラー 1 1 0 5 A および 1 1 0 5 B を備える第 1 の反射器装置 1 1 0 5 と、この場合はミラー 1 1 0 7 である第 2 の反射器装置との間の距離 d を調整することによって、容易に調整され得る。OPDは、他の構成要素の形状を変更せずに、間隔 d だけを調整することによって制御され得る。OPDを調整することにより、第 1 のパルス(ミラー 1 1 1 2 a によって反射される)と、第 2 のパルス(ミラー 1 1 1 2 a を透過する)との間の時間的遅延 t が、調整され得る。

【0088】

図 1 1 A のシステムは、図 1 1 B、1 1 C、および 1 1 D に示されるように、様々な構成に調整され得、シミュレーションして、達成可能な OPD および時間的遅延を調査することができる。シミュレーションでは、レーザーパルスは、ガウス形で、コリメートされ、非偏光であり、532 nm の波長を有し、統計的有意性を達成するために 10^4 に等しい数の光線で構成されると考えられる。図 1 1 A では、距離 $d = 150$ mm により、透過パルスが 4 回反射され、それにより、1.13 m の OPD および対応する $t = 3.8$ ns がもたらされる。図 1 1 B では、距離 $d = 300$ mm により、透過パルスが 21 回反射され、6.75 m の OPD および対応する $t = 22.5$ ns をもたらす。図 1 1 C では、距離 $d = 400$ mm により、透過パルスが 28 回反射され、12.46 m の OPD および $t = 41.5$ ns をもたらす。

【0089】

距離 d が増加し、反射の数が増加するにつれて、光学システムの機械的整列に必要な公差が、より厳しくなる。これは、およそ、図 1 1 A に示されるレイアウトの場合、約 1.5 mm および約 2° の回転角 (x 、 y)、図 1 1 B に示されるレイアウトの場合、約 1 mm および約 1° の角度、および図 1 1 C に示されるレイアウトの場合、約 0.5 mm および約 0.5° の角度である。必要な整列により、達成され得る OPD が制限される。それにも関わらず、そのような整列は、本開示のシステムを使用して容易に達成可能であり、したがって、約 50 ns の時間的遅延 t が、達成され得る。したがって、マルチパルスを使用して達成される時間的遅延は、1 ns 以上(例えば、最大 10 ns、最大 50 ns、最大 80 ns、最大 100 ns、最大 150 ns、または 150 ns 超)、もしくは 5 ns 以上(例えば、最大 10 ns、最大 50 ns、最大 80 ns、最大 100 ns、最大 150 ns、または 150 ns 超)、もしくは 10 ns 以上(例えば、最大最大 50 ns、最大 80 ns、最大 100 ns、最大 150 ns、または 150 ns 超)、もしくは 50 ns 以上(例えば、最大 80 ns、最大 100 ns、最大 150 ns、または 150 ns 超)、もしくは 80 ns 以上(例えば、最大 100 ns、最大 150 ns、または 150 ns 超)、もしくは 100 ns 以上(例えば、最大 150 ns、または 150 ns 超)であり得る。セルの設計パラメータによっては、より短い遅延、例えば、0.1 ns 以上が得られ得る。

【0090】

整列要件の厳しさを低減するために、直角ミラー 1 1 0 5 A および 1 1 0 5 B のサイズを、それらのセグメントサイズ(非斜辺の寸法)が 50 mm であるように増大させ、かつ球面ミラー 1 1 0 7 のサイズを 75 mm の直径に増大させることが可能である。これにより、機械的公差の要件が緩和され、同等の距離 d でより高い OPD を得ることが可能になる。そのようなレイアウトの例が、図 1 1 D に示されており、距離 $d = 400$ mm により、透過パルスは、31 回反射されて、25.30 m の OPD および対応する $t = 84.3$ ns をもたらす。このレイアウトの公差は、約 1 mm および 1° (x 、 y) である。したがって、約 100 ns (およびそれ以上) の時間的遅延が、容易に達成可能である。

【0091】

多くの用途(例えば、ダブルパルス LIBS 実験)で、2 つのパルスが同じ位置(例えば、サンプルの表面)に入射することが重要である。ダブルパルスシステムの有効性を検証するために、図 1 1 A ~ 1 1 D に示された例のビームプロファイル研究が実行され得、

10

20

30

40

50

その結果が、図 1 2 A に示されている。相対ビーム放射照度は、赤（高放射照度）から青（低放射照度）までに及ぶカラーパレットを使用して表示される。結果は、図 1 2 A に示されるように、x 次元および y 次元の両方で優れた円形ガウスプロファイルを示す。図 1 2 A のプロファイルは、円形アパーチャの場合である。図 1 2 B は、レーザーパルスの分割が、円形アパーチャではなく、平行ミラーを使用して実行されることを除いて、図 1 2 A で使用されたシステムと同じシステムに関する等価なビームプロファイル研究を示す。図 1 2 B から、非円形のアパーチャは、重ね合わされたパルスの品質の低下をもたらすことが分かる。したがって、単一のレーザーパルスを分割する場合、円形アパーチャが好ましい。図 1 2 A および 1 2 B の各々において、視覚化を支援するために、グラフは、互いに重ね合わされた 2 つのパルスを、それらの各々が標的に当たるのに要する時間と無関係に、表示している。

【 0 0 9 2 】

図 1 3 には、前述の原理に従って動作するダブルパルスレーザー誘起ブレイクダウン分光システムが示されている。図 1 3 の L I B S システムは、図 1 1 A ~ 1 1 D に示されているものなどのダブルパルスレーザーシステムを使用する。図 1 3 のシステムは、マルチパスセル 1 3 0 0 を備え、マルチパスセル 1 3 0 0 は、前述のいずれかのマルチパスセルであり得、空洞 1 3 1 5 を画定する、2 つのプリズム 1 3 0 5 A および 1 3 0 5 B を備える第 1 の反射器装置 1 3 0 5 と、球面ミラー 1 3 0 7 とを備える。

【 0 0 9 3 】

システムは、単一のレーザーパルス 1 3 1 4 を放出することができるレーザー源 1 3 1 0 を備える。システムはまた、光をセル 1 3 0 0 に、次いで、セル 1 3 0 0 からサンプル 1 3 1 6 に導くためのいくつかの光学要素 1 3 1 2 b ~ d を備える光学装置 1 3 1 2 を備える。光学装置はまた、セル 1 3 0 0 の第 1 の反射器装置 1 3 0 5 上にアパーチャを有する反射面である光分割デバイス 1 3 1 2 a によって、単一のレーザーパルス 1 3 1 4 から第 1 および第 2 のレーザーパルスを生成するように構成される。光分割デバイス 1 3 1 2 a は、セル 1 3 0 0 の第 1 の反射器装置 1 3 0 5 と一体的に形成されている。光学装置 1 3 1 2 はまた、セル 1 3 0 0 からサンプル 1 3 1 6 にレーザーパルスを誘導および集束するための回転可能なミラー 1 3 1 2 c およびレンズ 1 3 1 2 d を備える。

【 0 0 9 4 】

図 1 3 において、レーザーパルス 1 3 1 4 がレーザー源 1 3 1 0 によって放出されると、レーザーパルス 1 3 1 4 は、光学装置のミラー 1 3 1 2 b によって、セル 1 3 0 0 に導かれることが分かる。前述のように、単一パルス 1 3 1 4 の一部は、光分割デバイス 1 3 1 2 a によって反射されて第 1 のレーザーパルスを形成し、単一パルス 1 3 1 4 の一部は、セル 1 3 0 0 の空洞 1 3 1 5 に入り、第 1 のパルスに対して遅延され、それにより、第 2 のレーザーパルスを形成する。

【 0 0 9 5 】

第 1 および第 2 のパルスが、それぞれ、分割デバイス 1 3 1 2 a から反射される、およびセル 1 3 0 0 から出てくると、それらのパルスは、光学装置のさらなるミラー 1 3 1 2 b によって、回転可能なミラー 1 3 1 2 c に導かれ、回転可能なミラー 1 3 1 2 c は、パルスがレンズ 1 3 1 2 d に向けられるように、パルスの方向を微調整し得る。次に、パルスがサンプル 1 3 1 6 上の点に衝突するように、レンズ 1 3 1 2 d が、パルスを集束させる。

【 0 0 9 6 】

第 1 のレーザーパルスが、サンプル 1 3 1 6 に衝突して、サンプル 1 3 1 6 の表面からプラズマ 1 3 1 7 を生成し、次いで、第 2 のレーザーパルスが、プラズマ 1 3 1 7 に衝突してその温度を上昇させ、さらに表面に衝突して、さらなるプラズマを生成する。このようにして、第 1 および第 2 のパルスが、プラズマ 1 3 1 7 の生成、およびそれに続くプラズマ 1 3 1 7 からのプラズマ光 1 3 1 8 の放出を引き起こす。プラズマ光は、サンプルの近くに位置付けられているミラー 1 3 1 2 e によって反射される。ミラー 1 3 1 2 e は、発光の分析のために、プラズマ光を検出器（例えば、分光器）1 3 1 9 に導く。ミラー 1

317は、光学装置1312の一部であると見なされ得るか、または別個の光学装置であり得る。

【0097】

図13に示される具体例では、ミラー1312cは、(例えば、サンプルの表面マッピングを可能にするために、例えば、表面全体でレーザーパルスの位置を二次元でスキャンすることを可能にする電動二軸ガルボシステムの)ガルボミラーであり、レンズ1312dは、fシートレンズである。しかしながら、他のタイプの調整可能なミラーおよび集束要素が、使用されてもよい。さらに、任意の数のミラーおよび/またはレンズが、光学装置1312内で使用され得、追加のプラズマミラー1312eが、(例えば、プラズマから放出された光1318を、検出器1319とは異なるタイプであり得る1つ以上のさらなる検出器に向けるために)使用され得る。さらに、光学装置1312の光分割デバイス1312aは、図2に示される装置などのビームスプリッタ装置によって置き換えられてもよい。

10

【0098】

したがって、第1および第2のレーザーパルスは、ビームスプリッタを使用して、または機械的分割によって生成され得ることが分かる。したがって、一般的に言えば、本開示の光学装置は、単一のレーザーパルスを分割することによって第1および第2のレーザーパルスを生成するための光分割デバイス(例えば、従来のビームスプリッタではなく、機械的ビームスプリッタ)を備え得る。光分割デバイスは、マルチパスセルに取り付けられるか、またはそれと一体であり得る。例えば、光分割デバイスは、マルチパスセルの外面上にあり得る。マルチパスセルは、光空洞を画定する第1および第2の反射器装置を備え得、光分割デバイスは、第1および第2の反射器装置のうち一方の外面上にあり得る。

20

【0099】

光分割デバイスは、レーザーパルスの少なくとも一部分が通過し得るアパーチャを有する反射面を備え得る。光分割デバイスの反射面は、実質的に平面であり得る。プリズムが、第1の反射器装置に使用される場合、反射面を背面に取り付けることが簡単であり、本明細書に開示される有利なデバイスの容易な製造を促進する。光分割デバイスのアパーチャは、反射面の中心に、または実質的に中心に(例えば、縁よりも中心に近く)位置付けられ得る。反射面の中心は、アパーチャと一致し得る。したがって、プリズムが使用される場合、分割デバイスは、光の半分が、プリズムの間のスリットを通過してセルに入ることを可能にする一方で、光の残りの半部分をセルから離れる方向にそらす。光分割デバイスのアパーチャは、好ましくは円形である。円形のアパーチャは、後続のレーザーパルスが、高度な空間コヒーレンスを示すことを可能にする。光分割デバイスのアパーチャは、好ましくは、マルチパスセルのアパーチャ(例えば、光がセルに入ることを可能にするアパーチャ)と整列される。

30

【0100】

したがって、一般的に言えば、光学装置は、好ましくは、単一のレーザーパルスの一部分が、光分割デバイスのアパーチャを通過してマルチパスセルに入り、それにより、第2のレーザーパルスを生成し、かつ単一のレーザーパルスの一部分が、光分割デバイスの反射面によって反射され、それにより、第1のレーザーパルスを生成するように、単一のレーザーパルスを光分割デバイスのアパーチャに向けるように構成される。これにより、光が反射面から反射するとき、または光がアパーチャを通過するときに、最小限のエネルギーが失われるため、光のエネルギーの大部分が、保存され得る。したがって、そのような装置は、非常に効率的である。さらに、2つのパルスが生成され、パルス間の時間的遅延(調整可能であり得る)が、セルに入るパルスに容易に適用され得る。光学装置は、光の半分がアパーチャを通過するように、単一のレーザーパルスをアパーチャの縁に向けるように構成され得る。

40

【0101】

本開示の光学装置は、単一のレーザーパルスを分割することによって、第1および第2のレーザーパルスを生成するための光分割デバイス、および/または第1および第2のレ

50

ーザーパルスを生成するための1つまたは複数の非偏光ビームスプリッタ、および/または第1および第2のレーザーパルスを生成するための1つまたは複数の偏光ビームスプリッタを備え得る。

【0102】

前述のように、光が、本開示のマルチパスセルに入る角度を使用して、光が、セルの反射器装置をトラバースする回数、したがって光路長を制御することができる。したがって、説明された実施形態では、光源は、(例えば、回転可能であることによって、または回転可能に装着されることによって)光がセルに入る方向を変えることが可能であり得る。代替的に、セルに入る光の角度を変化させることが可能なように、さらなる光学要素(例えば、調整可能なミラー)が、提供されてもよい。光学装置は、第1および第2のレーザーパルスを同一直線上の経路に沿ってサンプルに導くように構成され得る。検出器は、分光器、フォトダイオード、電荷結合素子(CCD)、相補型金属酸化物半導体(CMOS)カメラ、強化電荷結合素子(ICCD)、電子増倍CCD、または1つ以上のマイクロチャンネルプレート検出器など、任意のタイプの検出器であり得る。検出器は、好ましくは、光の波長の関数としての光の検出を可能にする。

10

【0103】

したがって、一般的に言えば、本開示のシステムはまた、前述のマルチパスセルのいずれかを備え得、光学装置は、光がマルチパスセルに向けられる角度が、調整可能であるように構成される。この角度は、マルチパスセルによって画定される軸(例えば、第1および第2の反射器装置の中心/中点の間に延びる軸などの長手方向軸)に対して定義され得る。光がマルチパスセル内に向けられる方向と、マルチパスセルによって画定される長手方向軸との間の角度は、 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 、 $1^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、または $2^{\circ} \sim 10^{\circ}$ であり得る。セルのアーチャが、セルによって画定される軸に垂直である場合、光がセルに入る角度は、そのような場合にはアーチャの法線は、セルの長手方向軸に平行であろうため、代わりに、アーチャの法線に対して表現され得る。

20

【0104】

調整可能な角度を提供することにより、安定した構成およびそのような安定性に関連付けられる利点を維持しながら、光路長を制御することが可能になる。そのような光学装置は、検出器または光源とは独立して提供され得る。言い換えれば、本開示の光学装置およびマルチパスセルは、任意の検出器および/または光源と共に使用するために、一緒に提供され得る。光学要素は、マルチパスセルに取り付けられる(例えば、セルの外側に取り付けられる)か、またはセルハウジングと一体的に形成され得る。

30

【0105】

前述のように、本明細書に開示される光学システムでは、様々な光源が使用され得る。一般的に言えば、本開示は、空間的にコヒーレントな光から(例えば、コヒーレント光源からの光から)第1および第2の光成分を生成するための光学システムであって、第1の光成分に対して第2の光成分を遅延させるように配置されたマルチパスセルを備え、マルチパスセルは、光空洞を画定する第1および第2の反射器装置を備え、光空洞において、遅延した第2の光成分が、第1の反射器装置と第2の反射器装置との間で複数回反射されて往復し、 1 ns 以上の、第1の光成分と第2の光成分との間の時間的遅延を提供する、光学システム、を提供する。マルチパスセルは、本明細書に記載のセルのいずれかであり得る。第1および第2の光成分は、本明細書に記載のビーム分割技術のいずれかを使用して生成され得、第1および第2の光成分は、例えば、光のパルスであり得る。そのような光学システムでの使用に適したコヒーレント光源の例としては、レーザー、またはLED光または特定のX線ビームなどの部分的にコヒーレントな光源が挙げられる。場合によっては、光(例えば、水銀灯の輝線からの単色光など)を、ピンホール空間フィルタを通過させることによって、コヒーレント光を生成することも可能である。

40

【0106】

本開示は、本明細書に記載のシステム、デバイス、マルチパスセル、および光学装置を製造するための方法も提供する。例えば、マルチパスセルを製造するための方法は、第1

50

の反射器装置と、第2の反射器装置とを提供することを含み得、第1の反射器装置は、第1の反射器装置に入射する光が、少なくとも部分的に第2の反射器装置に向かって再帰反射されるように構成される。製造方法は、本明細書に記載のマルチパスセルの特徴（例えば、任意の構造的特徴）のいずれかを提供することをさらに含み得る。システムおよびデバイスを製造するための方法は、本明細書に記載の任意の構造的特徴を提供することを含み得る。

【0107】

アパーチャを使用して光のビームまたはパルスを分割する原理は、本明細書に記載のダブルパルスシステムでの使用とは無関係に、有利である。前述のように、そのようなシステムは、分割される光のエネルギーの有意な吸収をもたらさない。以下の番号付けされた条項は、そのような機械的ビームスプリッタを備える光学システムの例示的な例を提供する。番号付けされた条項の光は、連続光（例えば、ビーム）であり得るか、またはパルス光（例えば、レーザーパルス）であり得る。

10

【0108】

1. 光を第1および第2の光成分に分割するための光学システムであって、該光学システムが、光が通過し得るアパーチャを有する反射面を備える光分割デバイスと、光の一部がアパーチャを通過して、それにより第2の光成分を生成し、かつ光の一部が反射面によって反射されて、それにより第1の光成分を生成するように、光を光分割デバイスのアパーチャに向けるように構成された光学装置と、を備える、光学システム。

20

【0109】

2. 反射面が、実質的に平面である、条項1に記載の光学システム。

【0110】

3. アパーチャが、反射面の実質的に中心に位置付けられている、条項1または条項2に記載の光学システム。

【0111】

4. アパーチャが、円形である、先行条項のいずれか一項に記載の光学システム。

【0112】

5. 光学装置が、光を光分割デバイスに向けて導くための1つ以上の反射面を備える、先行条項のいずれか一項に記載の光学システム。

30

【0113】

6. 光学装置が、光分割デバイスに向けて光を集束させるための1つ以上の集束要素を備える、先行条項のいずれか一項に記載の光学システム。

【0114】

7. 光学装置が、光の半分がアパーチャを通過するように、光をアパーチャの縁に向けるように構成されている、先行条項のいずれか一項に記載の光学システム。

【0115】

8. 光がアパーチャに向けられる角度が調整可能であるように、光学装置が構成されている、先行条項のいずれか一項に記載の光学システム。

【0116】

9. アパーチャのサイズが、調整可能である、先行条項のいずれか一項に記載の光学システム。

40

【0117】

10. 光を光学装置に向けるように構成された光源をさらに備える、先行条項のいずれか一項に記載の光学システム。

【0118】

11. 光源が、レーザーである、条項10に記載の光学システム。

【0119】

12. レーザーが、パルスレーザーである、条項11に記載の光学システム。

【0120】

50

光を第1および第2の光成分に分割するための光学システムは、例えば、図11A～11D、図12Aおよび12B、ならびに図13に記載されている通りであり得る。

【0121】

前述の利点を保持しながら、多くの変形が、上記の装置および方法に対して行われ得ることが理解されよう。例えば、上記の実施形態は、再帰反射面または部分的再帰反射面を提供するという文脈で、主に平面反射面を参照して説明されてきたが、再帰反射性を示す任意の材料が使用され得ることが理解されよう。さらに、本開示における任意の反射面は、完全に反射性であるか、または部分的に反射性であり得る。

【0122】

本開示は、一般的なレーザーを参照して説明されており、任意のレーザーが、本明細書に記載のシステムおよびセルとともに使用されることが理解されよう。例えば、調整可能なダイオードレーザーが好ましいが、任意の固体、気体、液体、化学、金属蒸気、染料、または半導体レーザーが、使用されてもよい。他の好ましい例としては、Nd:YAGレーザー、CO₂レーザー、エキシマレーザー、およびルビーレーザーが挙げられる。

【0123】

本開示は、特定のタイプのデバイスおよび用途を参照して説明されてきたが、本明細書で論じられるように、本開示は、そのような場合に特定の利点を提供する一方で、本開示は、他のタイプのデバイスおよび用途に適用され得ることも理解されよう。例えば、本開示のマルチパスセルは、光の光路長の正確な制御が必要とされる任意のシナリオで使用され得る。

【0124】

本明細書に開示される各特徴は、別段の指定のない限り、同一、同等または類似の目的を果たす代替の特徴と置き換えられてもよい。したがって、別段の指定のない限り、開示される各特徴は、一般的な一連の同等または類似の特徴の単なる一例である。

【0125】

特許請求の範囲内を含む、本明細書において使用される場合、文脈が別様に示さない限り、本明細書における用語の単数形は、複数形を含むものとして解釈され、文脈により可能な場合、その逆も同様である。例えば、文脈が別様に示さない限り、(レーザーパルス (a laser pulse) または反射器 (a reflector) などの) 「a」または「an」などの、特許請求の範囲を含む本明細書における単数形の言及は、「1つ以上」を意味する(例えば、1つ以上のレーザーパルス、または1つ以上の反射器)。本開示の明細書および特許請求の範囲を通じて、「含む (comprise)」、「含む」(including)、「有する (having)」、および「含む (contain)」などの語、ならびに、語の変形、例えば、「含んでいる (comprising)」および「含む (comprises)」または同様のものは、「～を含むが、これに限定されない」ことを意味し、他の構成を排除することを意図したものではない。

【0126】

本明細書において提供されるありとあらゆる例、または例示的な文言(「例えば (for instance)」、「～など (such as)」、「例えば (for example)」、および同様の文言)の使用は、単に、発明をより良く例示することを意図され、特に特許請求されない限り、本開示の範囲への限定を示すものではない。本明細書におけるいずれの文言も、本開示の実施に不可欠なものとして主張されていないいかなる要素をも示すものとして解釈されるべきではない。

【0127】

本明細書に記載された任意のステップは、異なるように記載されていない限り、または文脈により別の意味が必要とされない限り、任意の順序で、または同時に実行され得る。さらに、あるステップがあるステップの後に実行されると説明されている場合、これは、介在ステップが実行されていることを排除するものではない。例えば、レーザーパルスが、第1の表面から第2の表面に反射されると記載される場合、これは、レーザーパルスが、第2の表面に到達する前に追加の表面によって反射されることを排除しない。

【 0 1 2 8 】

本明細書で開示される態様および/または特徴の全ては、そのような特徴および/またはステップの少なくともいくつかは相互に排他的である組み合わせを除いて、任意の組み合わせで組み合わせることができる。特に、本開示の好ましい特徴は、本開示の全ての態様および実施形態に適用可能であり、任意の組み合わせで使用され得る。同様に、必須ではない組み合わせで記述された特徴は、(組み合わせではなく)別々に使用されてもよい。

【 図 面 】

【 図 1 】

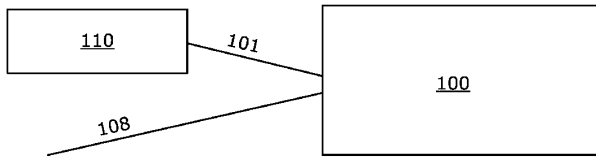
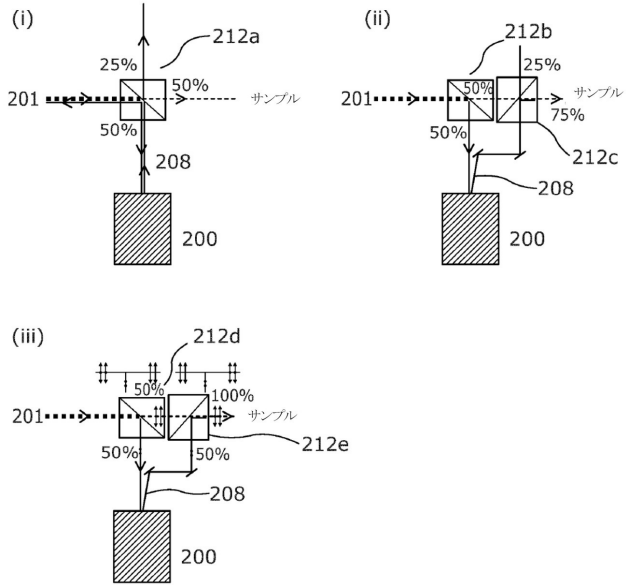


Figure 1

【 図 2 】



10

20

【 図 3 A 】

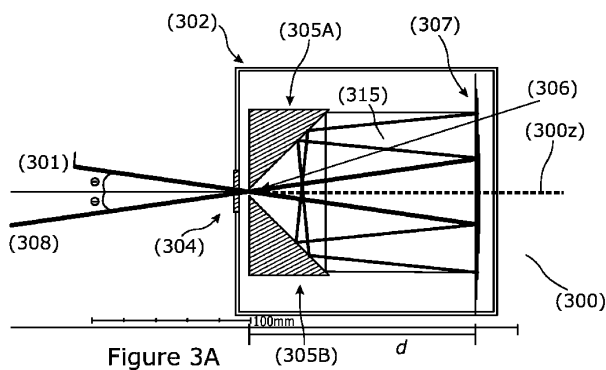


Figure 3A

【 図 3 B 】

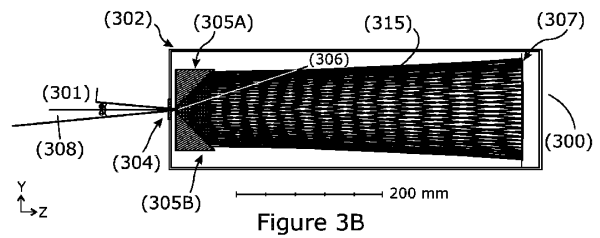


Figure 3B

30

40

50

【 図 3 C 】

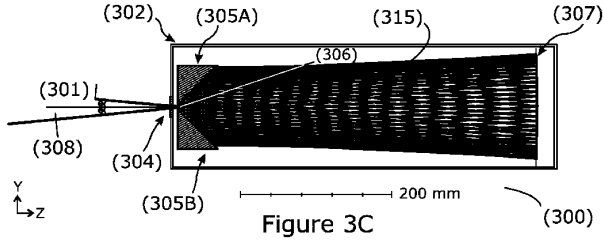


Figure 3C

【 図 3 D 】

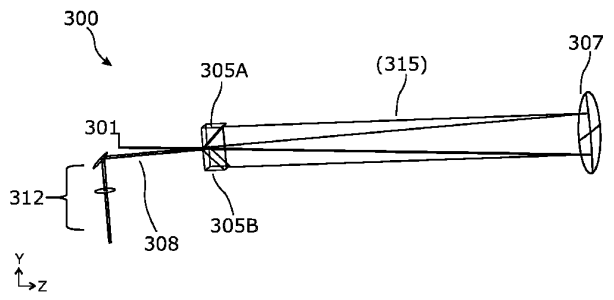
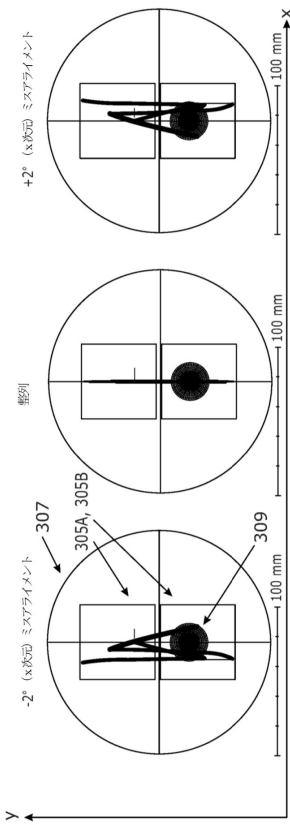


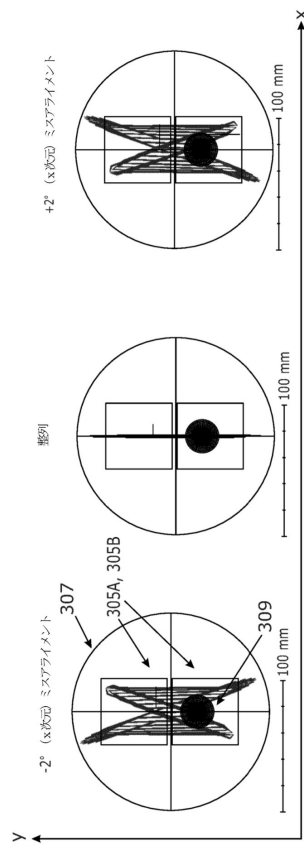
Figure 3D

10

【 図 4 A 】



【 図 4 B 】



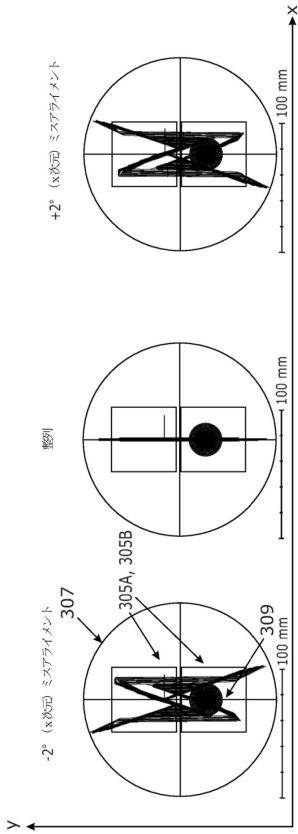
20

30

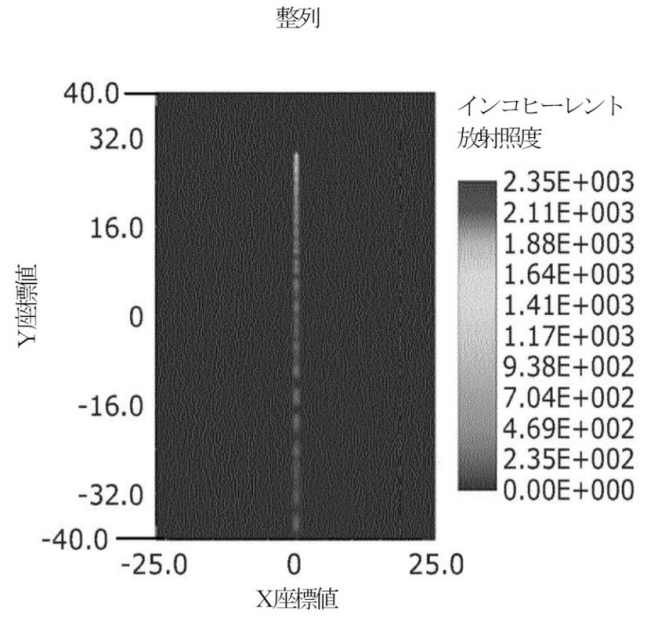
40

50

【 図 4 C 】



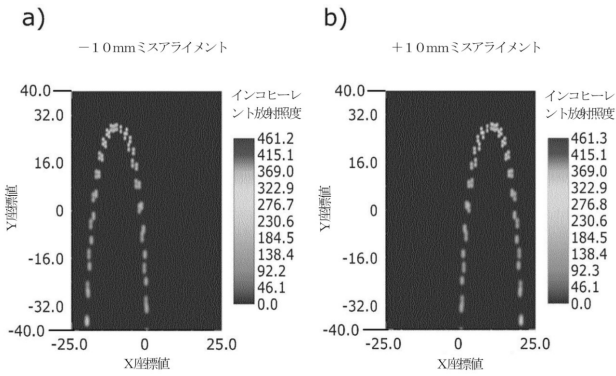
【 図 5 】



10

20

【 図 6 】



【 図 7 】

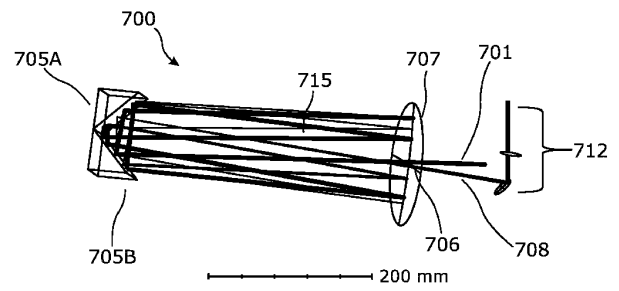


Figure 7

30

40

50

【 図 8 】

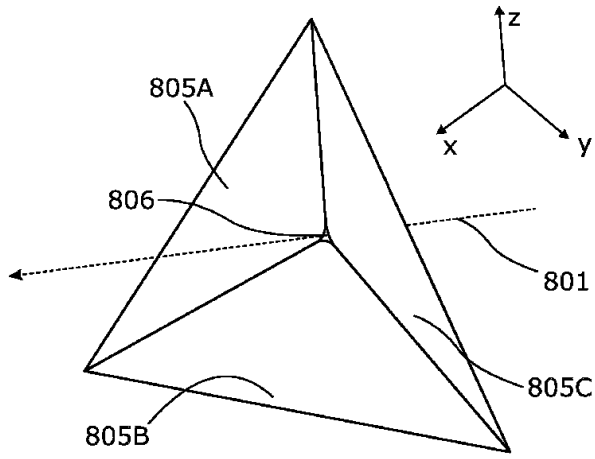


Figure 8

【 図 9 A 】

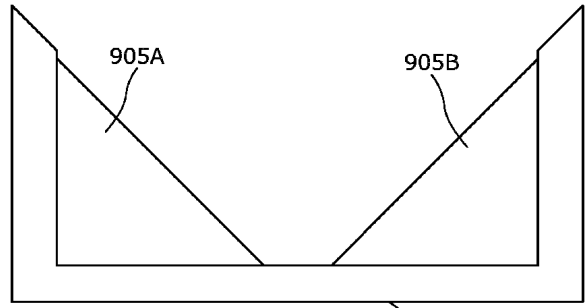


Figure 9A

10

【 図 9 B 】

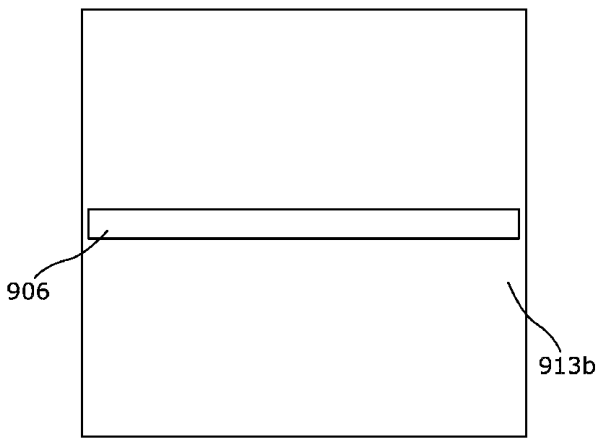
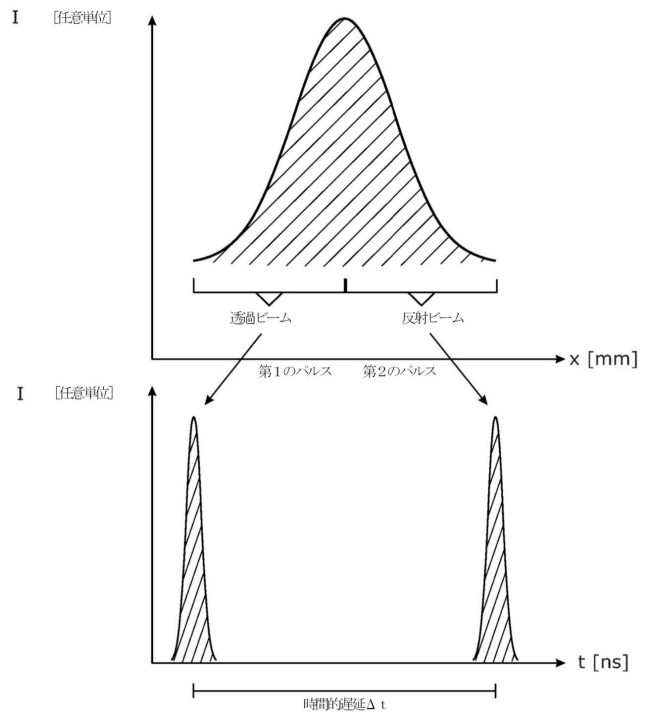


Figure 9B

【 図 10 】



20

30

40

50

【図 11 A】

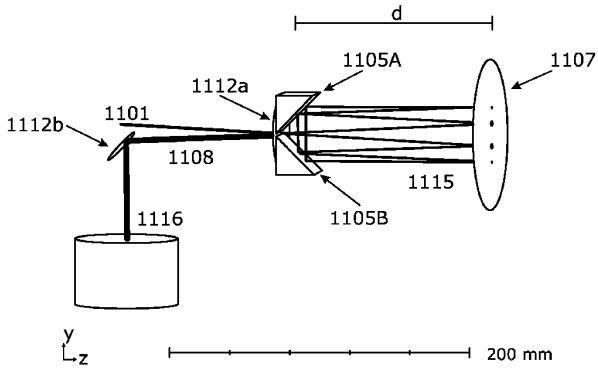


Figure 11A

【図 11 B】

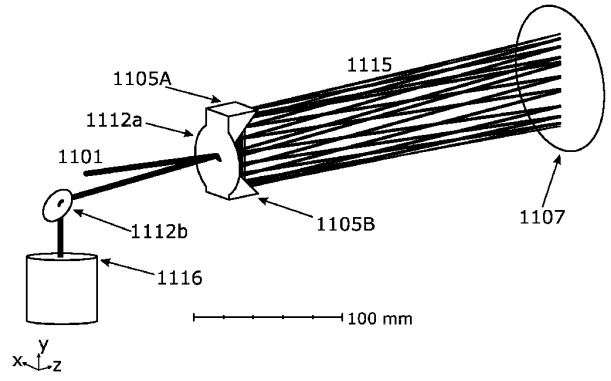


Figure 11B

10

【図 11 C】

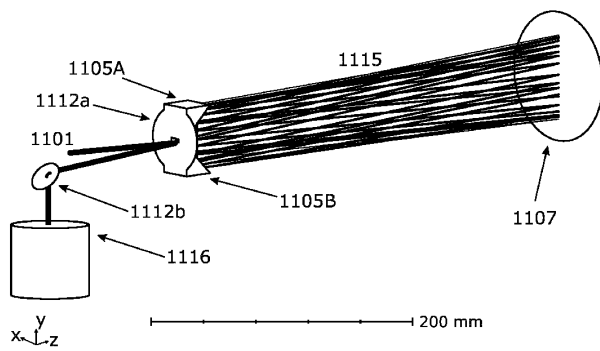


Figure 11C

【図 11 D】

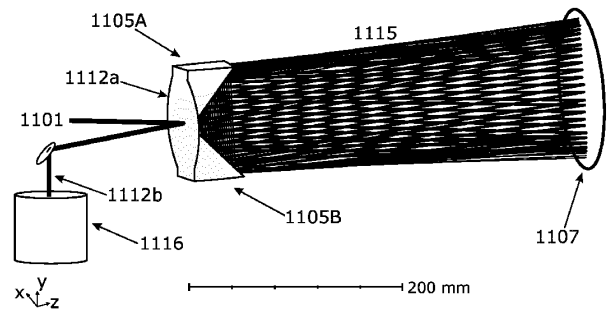


Figure 11D

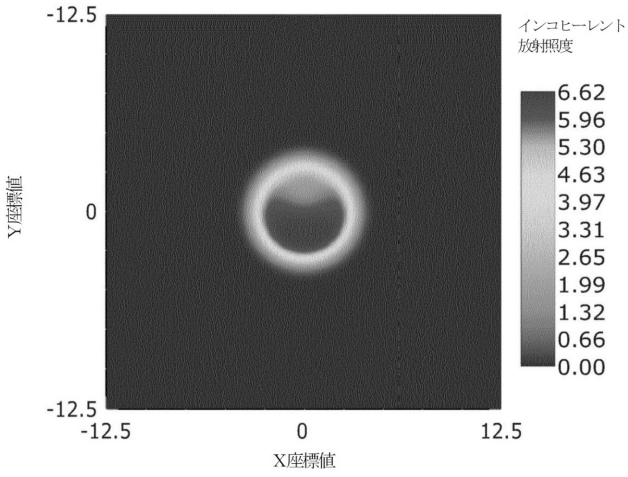
20

30

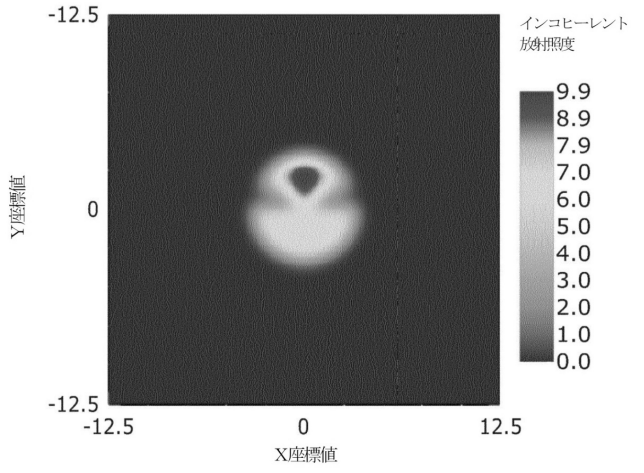
40

50

【図 1 2 A】



【図 1 2 B】



10

【図 1 3】

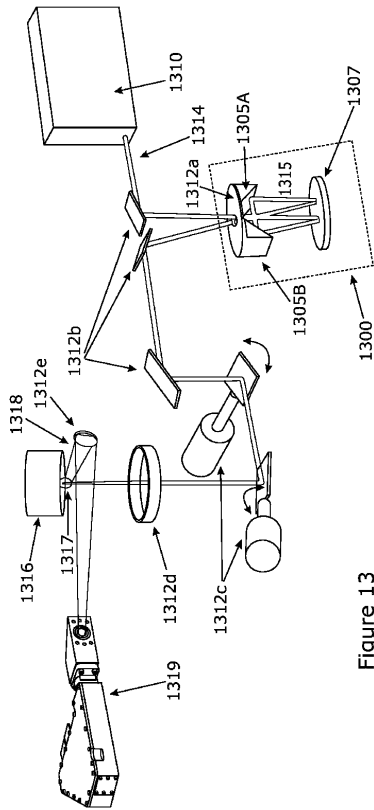


Figure 13

20

30

40

50

【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No PCT/EP2021/056946

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. H01S3/00 ADD.												
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 G02B G03F B23K												
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, 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	US 2017/365475 A1 (OHKUBO TOMOYUKI [JP] ET AL) 21 December 2017 (2017-12-21)	1-6, 15, 16, 24, 34-38										
A	figures figure 3A, 3B, 6C	7										
X	US 6 389 045 B1 (MANN KLAUS [DE] ET AL) 14 May 2002 (2002-05-14) line 39 - column 3, line 41; figures 5, 6	1, 12, 15-22, 25										
X	US 2009/052480 A1 (COBB JOSHUA MONROE [US] ET AL) 26 February 2009 (2009-02-26)	1, 24-27, 33										
Y	paragraph [0040]; figures 1E, 2, 3	13, 14										
X	EP 0 552 093 A1 (THOMSON CSF [FR]) 21 July 1993 (1993-07-21)	1										
Y	figures 1, 2	13, 14										
	----- -/--											
<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 : <table border="0"> <tr> <td>*A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</td> <td>*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</td> </tr> <tr> <td>*E* earlier application or patent but published on or after the international filing date</td> <td>*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</td> </tr> <tr> <td>*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)</td> <td>*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</td> </tr> <tr> <td>*O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</td> <td></td> </tr> <tr> <td>*P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</td> <td>*Z* document member of the same patent family</td> </tr> </table>			*A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	*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	*E* earlier application or patent but published on or after the international filing date	*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	*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)	*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	*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	*Z* document member of the same patent family
A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	*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											
E earlier application or patent but published on or after the international filing date	*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											
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)	*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											
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	*Z* document member of the same patent family											
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report										
6 October 2021		18/10/2021										
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 Lendroit, Stéphane										

5

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

page 1 of 3

10

20

30

40

50

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No PCT/EP2021/056946

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2004/136417 A1 (WEBB R KYLE [US] ET AL) 15 July 2004 (2004-07-15) figures 2,2B -----	1
X	US 2015/372446 A1 (CHUANG YUNG-HO ALEX [US] ET AL) 24 December 2015 (2015-12-24) figure 6 -----	1
X	US 2012/325784 A1 (MOFFATT STEPHEN [US] ET AL) 27 December 2012 (2012-12-27) figure 3A -----	1
X	HSIUNG P ET AL: "High-speed path length scanning using a herrlott cell delay line", CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS. (CLEO 2001). TECHNICAL DIGEST. POSTCONFERENCE EDITION. BALTIMORE, MD, MAY 6-11, 2001; [TRENDS IN OPTICS AND PHOTONICS. (TOPS)], US, WASHINGTON, WA : OSA, US, vol. VOL. 56, 6 May 2001 (2001-05-06), pages 308-309, XP010559874, DOI: 10.1109/CLEO.2001.947844 ISBN: 978-1-55752-662-5 -----	1
A	abstract; figure 1 -----	8-11
X	DE 10 2009 025314 A1 (LPKF LASER & ELECTRONICS AG [DE]) 16 December 2010 (2010-12-16) figure 1 -----	1
X	GB 2 517 187 A (DUVAS TECHNOLOGIES LTD [GB]) 18 February 2015 (2015-02-18) -----	1
A	abstract; figure 2 -----	8-11
A	FR 3 063 395 A1 (CENTRE NAT RECH SCIENT [FR] ET AL.) 31 August 2018 (2018-08-31) abstract; figure 2 -----	1
A	WO 2019/229823 A1 (GIGAPHOTON INC [JP]) 5 December 2019 (2019-12-05) abstract; figure 2A -----	8-11
A	US 2011/122483 A1 (LUNDQUIST PAUL B [US] ET AL) 26 May 2011 (2011-05-26) figure 23B -----	8-11
A	US 3 942 127 A (FLUHR FREDERICK R ET AL) 2 March 1976 (1976-03-02) figure 1 -----	8-11
	----- -/--	

5

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (April 2005)

page 2 of 3

50

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2021/056946

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2010 286289 A (GEN PACKER CO LTD; NISSHO ELECTRONICS) 24 December 2010 (2010-12-24) abstract; figure 3 -----	13,14
Y	CN 106 442 354 A (GENERAL DESIGNING INST HUBEI SPACE TECH ACAD) 22 February 2017 (2017-02-22) the incident angle of the incident light can be adjusted, and the total optical length can be adjusted.; figure 1a -----	13,14
Y	US 2012/092782 A1 (SO STEPHEN [US] ET AL) 19 April 2012 (2012-04-19) the angle of tilting of the mirrors can be varied to find a configuration which satisfies the necessary constraints.; figure 2 -----	13,14

10

20

30

40

5

50

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2021/056946

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of Item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

- 1. Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

- 2. Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

- 3. Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

10

20

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of Item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

see additional sheet

- 1. As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.

- 2. As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.

- 3. As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
1-22, 24-27, 33-38

- 4. No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

30

40

Remark on Protest

- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- No protest accompanied the payment of additional search fees.

50

International Application No. PCT/ EP2021/ 056946

FURTHER INFORMATION CONTINUED FROM PCT/ISA/ 210

This International Searching Authority found multiple (groups of) inventions in this international application, as follows:

1. claims: 1-7, 12, 15-22, 24-27, 33-38

positioning of an optical splitting device of a double-pulse laser system

2. claims: 8-11

design of an aperture in a reflective surface of an optical splitting device of a double-pulse laser system.

3. claims: 13, 14

angular orientation at which a second laser pulse is directed into a multipass cell of a double-pulse laser system.

4. claim: 23

design of a corner reflector of a multipass cell of a double-pulse laser system

5. claims: 28-32

design of an aperture in a reflector arrangement of a multipass cell of the double-pulse laser system

10

20

30

40

50

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2021/056946

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2017365475 A1	21-12-2017	JP W02016151723 A1 US 2017365475 A1 US 2019252190 A1 WO 2016151723 A1	11-01-2018 21-12-2017 15-08-2019 29-09-2016
US 6389045 B1	14-05-2002	NONE	
US 2009052480 A1	26-02-2009	US 2009052480 A1 WO 2009029189 A2	26-02-2009 05-03-2009
EP 0552093 A1	21-07-1993	EP 0552093 A1 FR 2686198 A1	21-07-1993 16-07-1993
US 2004136417 A1	15-07-2004	US 2004136417 A1 US 2005105579 A1 WO 2005050799 A1	15-07-2004 19-05-2005 02-06-2005
US 2015372446 A1	24-12-2015	CN 106415952 A CN 110797743 A EP 3117495 A1 IL 248648 A JP 6663865 B2 JP 2017525144 A JP 2020080420 A KR 20170018347 A US 2015372446 A1 US 2016359292 A1 WO 2015195877 A1	15-02-2017 14-02-2020 18-01-2017 31-05-2020 13-03-2020 31-08-2017 28-05-2020 17-02-2017 24-12-2015 08-12-2016 23-12-2015
US 2012325784 A1	27-12-2012	CN 103597587 A CN 106141424 A EP 2724364 A2 JP 6096184 B2 JP 6290997 B2 JP 6321237 B2 JP 2014525141 A JP 2017041637 A JP 2017135390 A KR 20140039300 A TW 201303977 A TW 201637079 A TW 201812868 A TW 201926423 A US 2012325784 A1 US 2012329178 A1 US 2014138362 A1 WO 2012177743 A2	19-02-2014 23-11-2016 30-04-2014 15-03-2017 07-03-2018 09-05-2018 25-09-2014 23-02-2017 03-08-2017 01-04-2014 16-01-2013 16-10-2016 01-04-2018 01-07-2019 27-12-2012 27-12-2012 22-05-2014 27-12-2012
DE 102009025314 A1	16-12-2010	NONE	
GB 2517187 A	18-02-2015	GB 2517187 A US 2016202175 A1 WO 2015022494 A1	18-02-2015 14-07-2016 19-02-2015
FR 3063395 A1	31-08-2018	EP 3590159 A1 FR 3063395 A1 JP 2020511634 A US 2020028316 A1	08-01-2020 31-08-2018 16-04-2020 23-01-2020

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (April 2005)

10

20

30

40

50

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2021/056946

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
		WO 2018158261 A1	07-09-2018

WO 2019229823 A1	05-12-2019	CN 112005454 A	27-11-2020
		JP WO2019229823 A1	10-06-2021
		US 2021016390 A1	21-01-2021
		WO 2019229823 A1	05-12-2019

US 2011122483 A1	26-05-2011	EP 2504892 A1	03-10-2012
		US 2011122483 A1	26-05-2011
		US 2011134511 A1	09-06-2011
		US 2011157689 A1	30-06-2011
		WO 2011066440 A1	03-06-2011

US 3942127 A	02-03-1976	NONE	

JP 2010286289 A	24-12-2010	JP 5320542 B2	23-10-2013
		JP 2010286289 A	24-12-2010

CN 106442354 A	22-02-2017	NONE	

US 2012092782 A1	19-04-2012	NONE	

10

20

30

40

フロントページの続き

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,IT,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,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW

弁理士 山本 泰史

(74)代理人 100144451

弁理士 鈴木 博子

(74)代理人 100123630

弁理士 渡邊 誠

(72)発明者 ランキューバ パトリック

スイス ツェーハー 1 0 2 4 エキュブラン シュマン ドゥヴェルネイ 2 アン ヴァレル ウエスト セ サーモ フィッシャー サイエントフィック (エキュブラン) エスアーエールエル内

Fターム(参考) 2G043 AA01 EA10 HA02 HA03 HA09 HA15 JA01 KA08 KA09 LA02

LA03

5F172 NR06 NR12 ZZ04