

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公表特許公報(A)

(11)公表番号
特表2024-542187
(P2024-542187A)

(43)公表日 令和6年11月13日(2024.11.13)

(51)国際特許分類
H 0 1 S 3/117(2006.01)

F I
H 0 1 S 3/117

テーマコード (参考)
5 F 1 7 2

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全24頁)

(21)出願番号	特願2024-529345(P2024-529345)	(71)出願人	512095392
(86)(22)出願日	令和4年10月27日(2022.10.27)		コヒレント, インコーポレイテッド
(85)翻訳文提出日	令和6年5月22日(2024.5.22)		アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 5 0
(86)国際出願番号	PCT/US2022/078772		5 4, サンタ クララ, パトリック ヘ
(87)国際公開番号	WO2023/091849		ンリー ドライブ 5 1 0 0
(87)国際公開日	令和5年5月25日(2023.5.25)	(74)代理人	100078282
(31)優先権主張番号	63/281,044		弁理士 山本 秀策
(32)優先日	令和3年11月18日(2021.11.18)	(74)代理人	100113413
(33)優先権主張国・地域又は機関			弁理士 森下 夏樹
	米国(US)	(74)代理人	100181674
(81)指定国・地域	AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA		弁理士 飯田 貴敏
	,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(	(74)代理人	100181641
	AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,A		弁理士 石川 大輔
	T,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR	(74)代理人	230113332
	,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,		弁護士 山本 健策
	最終頁に続く		最終頁に続く

(54)【発明の名称】 Qスイッチガスレーザーにおけるパルスイコライゼーション

(57)【要約】
二変量パルスイコライゼーションを持つQスイッチガスレーザー装置は、ガスレーザー、センサーおよび電子回路を含む。Qスイッチは、パルスレーザービームを生成するために、高損失状態と低損失状態との間でレーザー共振器を切り替える。センサーは、レーザーパルスエネルギーを示すパルスレーザービームの測定結果を得る。電子回路は、(a) パルスレーザービームのレーザーパルスの繰り返しレートを設定するために、高損失状態と低損失状態との間でレーザー共振器を繰り返し切り替えることと、(b) 目標レーザーパルスエネルギーを達成するために、パルスエネルギーの測定結果に基づいて、低損失状態の損失レベルを調整することと、(c) 目標レーザーパルス持続時間を達成するために低損失状態の持続時間を調整することを行うように、Qスイッチを動作させる。

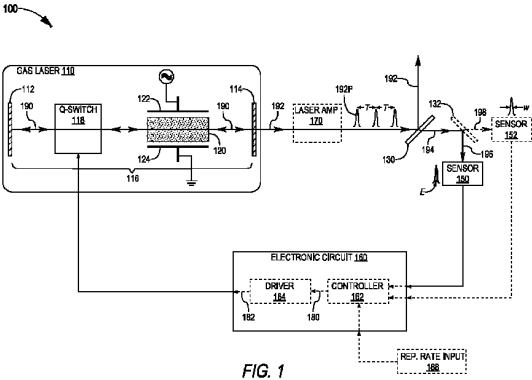


FIG. 1

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

パルスイコライゼーションを有する Q スイッチガスレーザー装置であって、前記 Q スイッチガスレーザー装置は、

Q スイッチを有するレーザー共振器を含むガスレーザーであって、前記 Q スイッチが、パルスレーザービームを生成するために高損失状態と低損失状態との間で前記レーザー共振器を切り替えるように動作可能である、ガスレーザーと、

レーザーパルスエネルギーを示す前記パルスレーザービームの第一の測定結果を得るための第一のセンサーと、

前記 Q スイッチと前記第一のセンサーとの間で通信可能に結合されている電子回路であって、前記電子回路は、(a) 前記パルスレーザービームのレーザーパルスの繰り返しレートを設定するために、前記高損失状態と前記低損失状態との間で前記レーザー共振器を繰り返し切り替えることと、(b) 目標パルスエネルギーを達成するために、前記第一の測定結果に基づいて、前記低損失状態の損失レベルを調整することと、(c) 目標レーザーパルス持続時間を達成するために、前記低損失状態の持続時間を調整することとを行うように、前記 Q スイッチを動作させるように構成されている、電子回路とを備えている、Q スイッチガスレーザー装置。

10

【請求項 2】

レーザーパルス持続時間を示す前記パルスレーザービームの第二の測定結果を得るための第二のセンサーをさらに備え、前記電子回路が、前記第二の測定結果に基づいて、前記目標レーザーパルス持続時間を達成するために、前記低損失状態の前記持続時間を調整するように構成されている、請求項 1 に記載の装置。

20

【請求項 3】

前記第一のセンサーおよび前記第二のセンサーが、前記レーザー共振器の外側で前記パルスレーザービームをサンプリングするように配置されている、請求項 2 に記載の装置。

【請求項 4】

前記電子回路が、前記第一のセンサーと前記 Q スイッチとの間でパルスエネルギーフィードバックループを完成させ、前記第二のセンサーと前記 Q スイッチとの間でパルス持続時間フィードバックループを完成させる、請求項 2 に記載の装置。

【請求項 5】

前記パルス持続時間フィードバックループが、前記パルスエネルギーフィードバックループよりも高速である、請求項 4 に記載の装置。

30

【請求項 6】

前記第一のセンサーが、複数の前記レーザーパルスにわたる平均として前記第一の測定結果を得るように構成される感光性検出器であり、前記第二のセンサーが、個々のレーザーパルスの波形として前記第二の測定結果を得るように構成される光学検出器である、請求項 4 に記載の装置。

【請求項 7】

前記 Q スイッチが、前記レーザー共振器中に設置される音響光学変調器を含む、請求項 1 に記載の装置。

40

【請求項 8】

前記電子回路が、

ラジオ周波数信号を生成し、前記音響光学変調器へ供給するための RF ドライバーであって、前記ラジオ周波数信号は、0 でない振幅のときに、前記音響光学変調器に、回折によって前記共振器中の損失を誘発させる、RF ドライバーと、

指令信号を生成し、前記 RF ドライバーへ送信するためのコントローラーであって、前記指令信号が、先行エッジ、後行エッジおよび信号値をそれぞれ有する一連の指令パルスを含み、それぞれの先行エッジは、前記 RF ドライバーに、前記レーザー共振器を前記低損失状態にするより低い振幅を有する前記ラジオ周波数信号を生成させ、それぞれの後行エッジは、前記 RF ドライバーに、前記レーザー共振器を前記高損失状態にするより高

50

い振幅を有する前記ラジオ周波数信号を生成させ、それぞれの信号値は、前記より低い振幅の値を設定する、コントローラーと

を含み、

前記コントローラーが、(a) 連続的な先行エッジ間の周期を目標繰り返しレートの逆数とマッチするように設定することによって、前記繰り返しレートを設定することと、(b) 前記目標レーザーパルスエネルギーを達成するために、前記第一の測定結果に基づいて、前記信号値を調整することと、(c) 前記目標レーザーパルス持続時間を達成するために、前記先行エッジから前記対応する後行エッジまでの持続時間を調整することとを行うように構成されている

請求項 7 に記載の装置。

10

【請求項 9】

前記パルスレーザービームを増幅させるためのレーザーパワー増幅器をさらに備え、前記第一のセンサーが、前記レーザーパワー増幅器による増幅の後に、前記第一の測定結果を前記パルスレーザービームから得るように配置される、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 10】

Q スイッチガスレーザーによって生成されるレーザーパルスをイコライズするための方法であって、前記方法は、

パルスレーザービームを生成するために高損失状態と低損失状態との間で前記 Q スイッチガスレーザーのレーザー共振器を繰り返し切り替えるように前記 Q スイッチガスレーザーの Q スイッチを動作させるステップと、

20

前記パルスレーザービームのレーザーパルスの、レーザーパルスエネルギーおよびレーザーパルス持続時間を、繰り返しステップを通してイコライズするステップであって、前記繰り返しステップが、

前記レーザーパルスエネルギーを示す第一の測定結果を得るために前記パルスレーザービームをサンプリングすることと、

目標レーザーパルスエネルギーに近づけるために、前記第一の測定結果に基づいて、前記低損失状態の損失レベルを調整することと、

目標レーザーパルス持続時間に近づけるために前記低損失状態の持続時間を調整することと

を行う、ステップと

30

を含む方法。

【請求項 11】

前記サンプリングするステップが、前記レーザーパルス持続時間を示す前記レーザービームの第二の測定結果を得ることをさらに含み、前記持続時間を調節するステップが、前記第二の測定結果に基づく、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

前記第一の測定結果のそれぞれのインスタンスが、複数の前記レーザーパルスにわたる平均として得られ、前記第二の測定結果のそれぞれのインスタンスが、個々のレーザーパルスから得られる、請求項 11 に記載の方法。

【請求項 13】

40

前記動作させるステップが、前記レーザーパルスの繰り返しレートを、第一の値から、前記第一の値と異なる第二の値へ変化させるステップを含み、

前記イコライズするステップが、前記変化させるステップによって引き起こされる前記レーザーパルスエネルギーおよびレーザーパルス持続時間への変化を最小限にするように、前記変化させるステップに応答して前記調節するステップを行うことを含む

請求項 10 に記載の方法。

【請求項 14】

前記イコライズするステップが、

前記繰り返しレートの前記第二の値において、前記繰り返しレートの前記第一の値と 10 % 以内で同じである個々の、または平均されたレーザーパルスエネルギーを、維持するこ

50

とと、

前記繰り返しレートの前記第二の値において、前記繰り返しレートの前記第一の値と10%以内で同じであるレーザーパルス持続時間を、維持することを含む、請求項13に記載の方法。

【請求項15】

前記動作させるステップが、

指令信号を生成することであって、前記指令信号は、先行エッジ、後行エッジおよび信号値をそれぞれ有する一連の指令パルスを含み、それぞれの先行エッジは、前記レーザー共振器の前記低損失状態への遷移を開始し、それぞれの後行エッジは、前記レーザー共振器の前記高損失状態への遷移を開始し、それぞれの信号値は、前記低損失状態の間における前記レーザー共振器の前記損失レベルを画定することと、

連続的な先行エッジ間の周期を目標繰り返しレートの逆数とマッチするように設定することによって、前記レーザーパルスの繰り返しレートを設定することを含む、

前記損失レベルを調整するステップが、前記第一の測定結果に基づいて前記信号値を調整することを含む、

前記持続時間を調整するステップが、前記第二の測定結果に基づいて前記先行エッジから前記対応する後行エッジまでの持続時間を調整することを含む、

請求項10に記載の方法。

【請求項16】

前記パルスレーザービームを増幅させるステップをさらに備え、

前記サンプリングするステップが、前記パルスレーザービームについてその増幅後に行われる、請求項10に記載の方法。

【請求項17】

前記Qスイッチが、音響光学変調器である、請求項10に記載の方法。

【請求項18】

前記動作させるステップが、前記損失レベルが結果として前記低損失状態において0でないように前記レーザー共振器の外へレーザー光を回折させるために前記音響光学変調器を駆動することを含む、請求項17に記載の方法。

【請求項19】

前記サンプリングするステップが、前記レーザー共振器の外側で行われる、請求項10に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

(優先権)

本出願は、2021年11月18日に提出された米国仮特許出願第63/281,044号の優先権を主張し、その開示は、全体において参照によって組み込まれている。

【0002】

(発明の技術分野)

本発明は、Qスイッチ二酸化炭素(CO₂)レーザーおよびQスイッチ酸化炭素(CO)レーザーのようなQスイッチガスレーザーに関連する。本発明は、パルス繰り返しレートの変更に対する、Qスイッチガスレーザーの出力のレーザーパルスエネルギーおよびレーザーパルス持続時間の変化に、特に関連する。

【背景技術】

【0003】

(背景技術の議論)

ガスレーザーのレーザー利得媒質は、ガス混合物である。レーザー作用を提供する光学活性体は、原子、イオンまたは分子である。これらの光学活性体は、普通、高電圧電場(ラジオ周波数(RF)か直流(DC)のどちらか)によってエネルギーを供給され、それ

10

20

30

40

50

は、ガス放電を生成し、それによって、光学活性体中に反転分布を提供する。多くのガスレーザーは、商業的利用において、固体レーザーによって、それらの概してより高効率、より小さいサイズ、より低コストおよびより単純な動作のために、取って代わられてきた。しかし、ある種のガスレーザーは、人気のままであり、いくつかのレーザー利用のための好ましい解法である。例えば、CO₂レーザーおよびCOレーザーは、レーザー加工のように、赤外線（IR）波長および高平均パワーが有利である産業プロセスにおいてかなりの使用が見られる。

【0004】

CO₂レーザーは、約9マイクロメートル（ μm ）から約11 μm の波長範囲内でIRレーザー放射を送達することができ、一方、COレーザーは、約4.5 μm から約6.0 μm の波長範囲内でIRレーザー放射を送達することができる。最大約8キロワットの平均パワーが、CO₂レーザーおよびCOレーザーで得られることができる。

【0005】

多くのレーザー加工利用は、レーザー放射がパルス状であることを必要とする。CO₂レーザーおよびCOレーザーの場合、パルスレーザービームは、利得媒質中でガス放電をオンオフすることによって生成され得る。しかし、この技術によって生成されるレーザーパルスの立ち上がり時間および立ち下がり時間は、ガス混合物中におけるエネルギー伝達プロセスの速度論によって決められ、通常10マイクロ秒（ μs ）から200 μs のオーダーである。これらの立ち上がり時間および立ち下がり時間は、結果として、レーザーパルス持続時間全体が何十から何百マイクロ秒もの範囲内になり、それは、ある利用にとっては長すぎる。特に、これらのレーザーパルス持続時間は、照射された物質中の熱影響部が小さいことが必要とされる多くのレーザー加工利用において長すぎる。レーザーパルス持続時間が数十マイクロ秒またはそれより長いとき、単一のレーザーパルスの間での照射された物質中の温度拡散は、熱影響部を照射された位置から離れる方向に大幅に拡大させる。たとえより短いレーザーパルスを必要としない利用のためであっても、ガス放電の変調は、関係する温度変動が光学不安定性を導くという追加の欠点を有する。

【0006】

Qスイッチングは、レーザー共振器の空洞内損失を変調することによりレーザーパルスを生成するための技術である。Qスイッチングは、レーザー利得媒質の安定したポンピングを維持しながら、レーザー共振器を高損失状態（低Q値）と低損失状態（高Q値）との間で切り替える。レーザーパルスは、第一に、レーザー発振作用を妨げるために高損失状態においてレーザー共振器を動作させることによって生成される。レーザー発振作用のない場合、利得媒質のポンピングは、結果として、レーザー利得媒質中に大量のエネルギーの蓄積となる。次に、共振器損失は、急に、レーザー作用を可能にする低い値へ降下する。ビルドアップ時間の後、循環レーザーパワーは、この低損失状態で急速に増加し、蓄えられたエネルギーは、即座に枯渇する。その結果が、通常ナノ秒範囲内の持続時間を持つレーザーパルスの生成である。最も一般的には、Qスイッチングは、パルス繰り返しレートによって特徴づけられる1列のレーザーパルスを生成するために、周期的に行われる。

【0007】

Qスイッチングは、アクティブまたはパッシブであり得る。アクティブQスイッチングにおいて、レーザー共振器は、アクティブ損失要素、例えば、音響光学変調器（AOM）または電気光学変調器（EOM）を含み、それは、レーザー共振器を高損失状態と低損失状態との間で切り替えるために、共振器からの放射を迂回させるか迂回させないように制御されている。アクティブQスイッチングは、通常、数百キロヘルツ（kHz）から1 kHzまたはそれより低くに至るまでの範囲内のパルス繰り返しレートを持つレーザーパルスを生成するために使用される。アクティブQスイッチングは、要求に応じて単一のレーザーパルスを生成するために使用され得る。

【0008】

パルスレーザービームを用いて行われるレーザープロセスは、通常、最適なパルス繰り返しレートを有する。最適なパルス繰り返しレートは、プロセスに依存する。それゆえ、

10

20

30

40

50

最も多用途なパルスレーザーシステムは、パルス繰り返しレートの範囲で、時々シングルショットから数百キロヘルツに跨って、動作可能である。レーザー加工プロセスが、それぞれの単一部分のプロセス中にパルス繰り返しレートを変動させることを伴い、パルス繰り返しレートのオンザフライ調整を必要とすることは、珍しいことではない。Qスイッチレーザーの場合、パルス繰り返しレートの調整は、結局、レーザー共振器の高損失状態の持続時間を変化させることと同じである。少なくとも比較的高いパルス繰り返しレートに対しては、このような変化は、低損失状態への切り替えの前に利得媒質中に蓄積されるエネルギーの量に影響することができる。その結果、パルス繰り返しレートの調整は、変化させられるレーザーパルスエネルギーに付随して起こり得る。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0009】

(発明の概要)

本明細書で開示されるのは、レーザーパルスエネルギーとレーザーパルス持続時間との両方の二変量パルスイコライゼーションを持つQスイッチガスレーザー装置および関係する方法である。本装置および方法は、アクティブQスイッチングを使い、パルス繰り返しレートの広い範囲にわたって、レーザーパルスエネルギーおよび持続時間をイコライズするように構成されている。1つのイコライゼーションのメカニズムは、レーザーパルスエネルギーに直接影響を与えるのに対し、他のイコライゼーションのメカニズムは、レーザーパルス持続時間に直接影響を与える。パルスエネルギーイコライゼーションのメカニズムは、レーザー共振器の低損失状態の損失を調整するのに対し、パルス持続時間イコライゼーションのメカニズムは、低損失状態の持続時間を調整する。例えば、QスイッチがAOMであるとき、パルス持続時間イコライゼーションのメカニズムは、低損失状態においてもある程度の回折を維持し、所望のパルスエネルギーを達成するためにこの程度の回折を調整することに基づいている。比較のために、従来のQスイッチは、レーザー共振器の損失を最小限にするために、低損失状態の間は、完全にオフになる。

【0010】

私たちは、パルスエネルギーと持続時間との両方のイコライゼーションが、一様なパルスエネルギーが達成され得るパルス繰り返しレートの範囲を延ばすことを実現した。パルスエネルギーイコライゼーションのメカニズムのみを使用することによって、比較的高いパルス繰り返しレートの制限された範囲にわたって、一様なパルスエネルギーを達成することは可能であり得るのに対して、パルス持続時間イコライゼーションのメカニズムは、より低いパルス繰り返しレートまでのこの範囲の延長を促進する。それ故、本二変量パルスイコライゼーションは、目的が単に、レーザーパルス持続時間に関わらず、パルス繰り返しレートの広い範囲にわたって一様なレーザーパルスエネルギーを維持することであるときでも有用である。パルス持続時間イコライゼーションのメカニズムは、パルス繰り返しレートの広い範囲にわたって所望のレーザーパルス持続時間を達成し、それにより最終的なレーザーパルス制御を提供することをさらに可能にする。

【0011】

1つの側面において、パルスイコライゼーションを持つQスイッチガスレーザー装置は、ガスレーザー、センサーおよび電子回路を含む。ガスレーザーは、パルスレーザービームを生成するために高損失状態と低損失状態との間でレーザー共振器を切り替えるように動作可能であるQスイッチを有するレーザー共振器を含む。センサーは、レーザーパルスエネルギーを示す、パルスレーザービームの測定結果を得るように構成されている。電子回路は、Qスイッチとセンサーとの間で通信可能に結合されており、(a)パルスレーザービームのレーザーパルスの繰り返しレートを設定するために高損失状態と低損失状態との間でレーザー共振器を繰り返し切り替えることと、(b)目標レーザーパルスエネルギーを達成するために、センサーによって得られる測定結果に基づいて、低損失状態の損失レベルを調整することと、(c)目標レーザーパルス持続時間を達成するために、低損失状態の持続時間を調整することとを行うようにQスイッチを動作させるように構成されて

10

20

30

40

50

いる。

【0012】

他の側面において、Qスイッチガスレーザーによって生成されるレーザーパルス进行をイコライズするための方法は、パルスレーザービームを生成するために高損失状態と低損失状態との間でQスイッチガスレーザーのレーザー共振器を繰り返し切り替えるようにQスイッチガスレーザーのQスイッチを動作させることを含む。その方法は、繰り返しステップ（（a）レーザーパルスエネルギーを示す測定結果を得るためにパルスレーザービームをサンプリングするステップ、（b）目標レーザーパルスエネルギーに近づけるために、レーザーパルスエネルギーを示す測定結果に基づいて、低損失状態の損失レベルを調節するステップ、および（c）目標レーザーパルス持続時間に近づけるために低損失状態の持続時間を調整するステップ）を通してパルスレーザービームのレーザーパルスのレーザーパルスエネルギーおよびレーザーパルス持続時間をイコライズすることをさらに含む。

10

【図面の簡単な説明】

【0013】

（図面の簡単な説明）

添付図面は、明細書の一部に組み込まれ、かつ明細書の一部を構成し、本発明の好ましい実施形態を概略的に図示し、上記で与えられる一般的な記載および下記で与えられる好ましい実施形態の詳細な記載と共に、本発明の原理を説明する役割を果たす。

【0014】

【図1】図1は、実施形態に従って、レーザーパルスエネルギーとレーザーパルス持続時間との両方のイコライゼーションを持つQスイッチガスレーザー装置を図示する。

20

【0015】

【図2】図2は、AOM Qスイッチを搭載するレーザー共振器をQスイッチングするための先行技術スキームのタイミング図である。

【0016】

【図3】図3は、AOM Qスイッチを実装し、図2の先行技術スキームに従って動作される図1の装置の実施形態によって生成される1組の例示的なレーザーパルスを示す。

【0017】

【図4】図4は、図3の実施形態と同じであるが、図2の先行技術スキームからずれたものにおいてパルストリミングを実装している図1の装置の実施形態によって生成される他の組の例示的なレーザーパルスを示す。

30

【0018】

【図5】図5は、固定されたパルス繰り返しレートにおけるレーザーパルスエネルギーおよび持続時間へのQスイッチを制御する指令パルス持続時間の効果をさらに呈するデータを表示する。

【0019】

【図6】図6は、実施形態に従って、Qスイッチガスレーザーによって生成されるレーザーパルスの二変量イコライゼーションのための方法のフローチャートである。

【0020】

【図7】図7は、実施形態に従って、二変量パルスイコライゼーションを持つガスレーザーをQスイッチするために図6の方法によって使われるスキームのタイミング図である。

40

【0021】

【図8】図8は、図7のスキームに従って、二変量パルスイコライゼーションを持つ図1の装置を動作させ、実施形態に従って、それぞれのセンサーからの測定結果に基づいてレーザーパルスエネルギーおよびレーザーパルス持続時間との両方の動的調整を実装するとき生成されるレーザーパルスの例を示す。比較のために、図8は、パルスイコライゼーションなしで生成されるレーザーパルスの例もまた図示する。

【0022】

【図9】図9Aおよび図9Bは、3つの異なるパルス繰り返しレートにおける、二変量パルスイコライゼーションがあるときおよびないときの、レーザーパルスエネルギーおよび

50

レーザーパルス持続時間の例をそれぞれ示す。

【0023】

【図10】図10Aは、実施形態に従って、QスイッチがAOMである図1の装置の実施形態において実装され得るRFドライバーを図示する。図10Bは、このRFドライバーを制御するための例示的な指令信号を図示する。

【0024】

【図11】図11Aは、実施形態に従って、QスイッチがAOMである図1の装置の実施形態において実装され得る他のRFドライバーを図示する。このRFドライバーは、個別のタイミング入力および電圧入力を受け取るように構成されている。図11Bは、図11AのRFドライバーのタイミング面を制御するための例示的なタイミング指令信号を図示する。

10

【0025】

【図12】図12は、実施形態に従って、レーザーパルスエネルギーとレーザーパルス持続時間との両方のサーボ制御を持つ二変量パルスサイクロライゼーションのためのコントローラーを図示する。

【発明を実施するための形態】

【0026】

(発明の詳細な説明)

ここで図を参照すると、同様の構成要素が同様の数字で指定されており、図1は、二変量パルスサイクロライゼーションを持つ1つのQスイッチガスレーザー装置100を図示する。装置100は、ガスレーザー110、センサー150および電子回路160を含む。ガスレーザー110は、Qスイッチ118を有するレーザー共振器116を含む。Qスイッチ118は、例えば、AOMまたはEOMである。

20

【0027】

ガスレーザー110は、本質的に、ガス利得媒質120もまた含む。1つの実施形態では、ガスレーザー110は、CO₂レーザーまたはCOレーザーであり、利得媒質120は、対応してCO₂またはCOを含む。少なくともガスレーザー110がCO₂レーザーまたはCOレーザーであるときは、ガスレーザー110は、その中でCO₂またはCO分子をポンプする（エネルギーを供給する）ために、利得媒質120を通して高電圧電場をかける1つまたはそれより多くの電極をさらに含む。他の実施形態では、ガスレーザー110は、長い上位状態の寿命を持つ異なる種のガスレーザーであり得る。ガスレーザー110は、ガス利得媒質120中で放電を生成するために、利得媒質120の両側に位置する電極122および電極124を含み得る。電極122は、高電圧RF供給源と接続され、電極124は接地されている。

30

【0028】

図1に描写される例では、共振器116は、2つのエンドミラー112およびエンドミラー114を有するリニア共振器であり、レーザー放射190が、その間を行ったり来たりして伝搬している。エンドミラー114は、部分反射率を持つ出力カプラであり、部分反射率は、例えば、10%から90%の間の範囲内にある。エンドミラー112は、少なくとも99%の反射率を持つ高反射体であり得る。装置100の他の例では、共振器116は、2より多いミラーによって画定されるリニア共振器であり、レーザー放射190の伝搬経路が折り曲げられている。さらに他の例では、共振器116は、リング共振器である。

40

【0029】

Qスイッチ118は、循環レーザー放射190の伝搬経路中に置かれる。電子回路160は、ガスレーザー110がパルスレーザービーム192を出力するように、レーザー放射190をパルス化するためにQスイッチ118の動作を制御する。より具体的には、電子回路160は、高損失状態と低損失状態との間で共振器116を繰り返し切り替えるためにQスイッチを動作させることにより、レーザービーム192のレーザーパルス192Pの繰り返しレートを定める。電子回路160は、Qスイッチ118が高損失状態と低損

50

失状態との間で共振器 116 を切り替えるレートを変動させることによって、レーザービーム 192 のパルス繰り返しレートを変動させることが可能である。言い換えると、電子回路 160 は、レーザーパルス 192 P 間の周期 T の値の範囲を達成するために、Q スイッチ 118 を制御することが可能である。電子回路 160 は、レーザーパルス 192 P の所望の繰り返しレートを示す繰り返しレート入力 188 を受け取り得る。電子回路 160 は、外部制御システムまたはユーザーから繰り返しレート入力 188 を受け取り得る。

【0030】

電子回路 160 は、レーザーパルス 192 P の目標エネルギーを達成するために、共振器 116 の低損失状態において、Q スイッチ 118 によって課される損失を制御し変動させるようにも構成されている。Q スイッチ 118、センサー 150 および電子回路 160 は、レーザーパルス 192 P のエネルギーのサーボ制御を発揮するために、アクティブフィードバックループ中に配置されている。装置 100 は、レーザービーム 192 のフラクシオン 196 を分離し、レーザービームフラクシオン 196 をセンサー 150 へ方向づける。センサー 150 は、レーザーパルス 192 P のエネルギーの測定値（またはそれを示す他のパラメータ）を得るために、レーザービームフラクシオン 196 のレーザーパルスのパルスエネルギー E（または関連するパラメータ）を測定する。センサー 150 は、このパルスエネルギーの測定結果を電子回路 160 に通信し、電子回路 160 は、それに応じて、少なくともある程度の許容値内に目標パルスエネルギーを達成するために、Q スイッチ 118 の動作を調整する。

【0031】

センサー 150 によって測定される特性は、レーザービームフラクシオン 196 の平均エネルギーであり得、いくつかまたは多くのレーザーパルス 192 P 全体の平均として得られ得る。1 つの実装において、センサー 150 は、サーモパイルセンサー、光伝導性もしくは光起電性半導体センサー、またはボロメータセンサーである。代替的に、センサー 150 は、レーザービームフラクシオン 196 中の個々のパルスのエネルギーを測定するのに十分な速度であり得る。装置 100 は、レーザービーム 192 からレーザービームフラクシオン 196 を得るために 1 またはそれより多くのビームスプリッターを含み得る。

【0032】

電子回路 160 は、レーザーパルス 192 P の持続時間を調整するために、必要に応じて、Q スイッチ 118 によって画定される、共振器 116 の低損失状態の持続時間を制御するようにさらに構成されている。電子回路 160 は、この調整を、(a) レーザーパルス 192 P の持続時間の測定結果に基づいて、または (b) パルス繰り返しレート、目標パルスエネルギー、センサー 150 から得られたパルスエネルギーの測定結果および目標パルス持続時間のうち 1 またはそれより多くの間の予め校正された関係に基づいて行い得る。

【0033】

図 1 には示していないが、電子回路 160 は、目標パルスエネルギーおよび目標パルス持続時間を外部システムまたはユーザーから受け取り得る。電子回路 160 は、ディスクリット電子部品、集積回路、マイクロプロセッサおよびソフトウェア搭載のコンピュータのうち 1 またはそれより多くを含み得る。

【0034】

装置 100 のある実施形態は、センサー 152 を含み、レーザービーム 192 のフラクシオン 198 をセンサー 152 に方向づける。センサー 152 は、レーザービームフラクシオン 198 からレーザーパルス 192 P の持続時間 w の測定結果を得、このパルス持続時間の測定結果を電子回路 160 に通信する。次いで、電子回路 160 は、パルス持続時間の測定結果に基づいて Q スイッチ 118 の動作を調整し得る。センサー 152 は、少なくともある程度の許容値内に目標パルス持続時間を達成するために、レーザーパルス 192 P の持続時間のサーボ制御を可能にするアクティブフィードバックループを完成させ得る。センサー 152 は、例えば、個々のレーザーパルス 192 P の波形を記録する高速光学検出器である。

【0035】

装置100は、センサー150に、および任意でセンサー152にもレーザービーム192のフラクシオンを分離する1またはそれより多くのビームスプリッターを含み得る。図1に描写される例では、装置100は、(a) センサー150およびセンサー152に向かってレーザービーム192のフラクシオン194を分離するビームスプリッター130および(b) フラクシオン194をレーザービームフラクシオン196および198に分けるビームスプリッター132を含む。ビームスプリッター132は、センサー152を含まない実施形態においては省略され得る。この範囲から逸脱することなく、装置100は、レーザービーム192からレーザービームフラクシオン196、および任意でレーザービームフラクシオン198を得るために、他のスキームを実装し得る。

10

【0036】

電子回路160は、コントローラー162およびドライバー164を含み得る。ドライバー164は、電気駆動信号182を生成し、共振器損失を変調させるためにQスイッチ118へ駆動信号182を供給する。例えば、Qスイッチ118がAOMであるとき、ドライバー164は、RFドライバーであり、駆動信号182は、高電圧RF信号である。ドライバー164による駆動信号182の生成は、コントローラー162から受け取る指令信号180によって決められる。指令信号180は、レーザーパルス192Pの繰り返しレート、低損失状態における共振器116の損失および低損失状態の持続時間を画定する。所与のパルス繰り返しレートに対して、コントローラー162は、センサー150から得られるパルスエネルギーの測定結果、および任意でセンサー152から得られるパルス持続時間の測定結果にも、少なくとも部分的に基づいて、指令信号180を生成する。コントローラー162による指令信号180の生成は、(例えば、繰り返しレート入力188によって画定されるように) 所望のパルス繰り返しレートにさらに基づく。

20

【0037】

1つの実施形態では、装置100は、主発振器出力増幅器(MOPA)として構成される。このMOPAの実施形態では、ガスレーザー110は、主発振器であり、装置100は、レーザービーム192を増幅させるレーザー増幅器170をさらに含む。MOPAの実施形態では、センサー150および(含まれる場合) センサー152は、増幅器170による増幅の前または後に、レーザービーム192をサンプリングするために配置され得る。図1に描写されるように、増幅後にレーザービーム192をサンプリングすることは、概して有利である。(単数または複数の) センサーに向かって分離されるレーザービーム192のフラクシオンは、分離が増幅後であるとき、有意でなくあり得る。分離が増幅より前になされるとき、より大きいレーザービーム192のフラクシオンが、分離されなければならない、利用(例えばレーザー加工)へ送達されるレーザービーム192の最後のパワーへの衝撃は、有意になり得る。加えて、増幅されたレーザービーム192は、MOPAの実際の出力であるので、増幅されたレーザービーム192のサンプリングは、実際の出力のより直接的な評価を提供し、電子回路160により発揮される制御は、増幅器170中で誘発される効果を相殺し得る。

30

【0038】

図2は、AOM Qスイッチを装備するレーザー共振器をQスイッチングするための先行技術スキーム200のタイミング図である。図2は、レーザーパルス232の生成域に関する3つのグラフ210、220、230を示す。グラフ210は、AOMを駆動するためのRFドライバーへ供給される指令信号212の時間的進化を描写する。グラフ220は、RFドライバーによってAOMに供給されるRF駆動信号222の時間的進化を描写する。RF駆動信号222は、指令信号212によって画定される。指令信号212の値 V_c は、 V_{high} と0との2つの値の間で切り替わる。 $V_c = V_{high}$ のとき、駆動振動222のRF電圧 V_{RF} は、振幅 ΔV_{high} を有し、関係するAOMによる回折は、レーザー共振器が高損失状態になるように、共振器損失を与える。 $V_c = 0$ のとき、AOMがオフになるように、 V_{RF} は0であり、それによってレーザー共振器を低損失状態に置く。

40

50

【0039】

グラフ230は、レーザー共振器中を循環するレーザーパワー P_L の時間的進化を描写する。スキーム200において、レーザーパルス232は、 $V_c = 0$ まで降下している指令信号212の指令パルス214によって生成される。指令パルス214は、時刻 t_1 における先行エッジと時刻 t_2 における後行エッジとの間の持続時間 Δt を有する。指令パルス214の持続時間 Δt は、レーザー共振器の低損失状態の持続時間を画定する。音響および光学遅延は、時刻 t_1 からレーザーパルス232までの遅延 T_{delay} を課す。聴覚遅延は、AOM光学系中の音響波形に対応し、その音響波形は、時刻 t_1 まで生成されていき、レーザー放射190の経路を完全に通って変換器から伝搬する。光学遅延は、エネルギーを供給された共振器を通る何往復もの間における誘導放出による自然放出の「ビルドアップ」によって開始されるレーザー放射に対応する。図2に描写されるシナリオにおいて、音響遅延は、光学遅延より長く、それゆえ、レーザーパルス232は、時刻 t_2 の後に生成される。

10

【0040】

電子回路160は、先行技術スキーム200に従ってQスイッチ118を動作させることが可能である。しかし、先行技術スキーム200は、パルスイコライゼーションを提供せず、レーザーパルス192Pのエネルギーおよび持続時間は、パルス繰り返しレートと共に変動する。

【0041】

図3は、AOMのようなQスイッチ118を実装し、先行技術スキーム200に従って動作するように制限されている装置100の実施形態によって生成される1組の例示的なレーザーパルスを示す。レーザーパルス波形は、瞬間レーザーパワーを時間関数として検出し記録する高速光学検出器として実装されているセンサー152によって記録される、図3の例において、指令パルス214の持続時間 Δt は、 $1.0 \mu s$ である。図3は、 $1 kHz$ 、 $5 kHz$ 、 $10 kHz$ 、 $25 kHz$ 、 $50 kHz$ 、 $75 kHz$ および $100 kHz$ のパルス繰り返しレートのそれぞれにおいて記録された結果のレーザーパルス波形を示す。レーザーパルス波形は、 $1 kHz$ から $25 kHz$ の範囲内のパルス繰り返しレートに対してほとんど変化しないのに対して、パルス繰り返しレートが $25 kHz$ を過ぎて増加すると、実質的な変化が起こる。特に、 $25 kHz$ を超えるパルス繰り返しレートに対して、パルスエネルギーは、パルス繰り返しレートと共に強い減少を呈する。加えて、パルス繰り返しレートが $25 kHz$ を超えて増加するとき、レーザーパルスの形状および持続時間は、変化する。 $1 \sim 25 kHz$ の範囲のパルス繰り返しレートで生成されるレーザーパルスは、有意な尾部310が後に続く主パルスからなる。パルス繰り返しレートが $25 kHz$ を超えて増加すると、尾部310は、徐々に消え、レーザーパルス持続時間は、対応して減少する。

20

30

【0042】

図4は、図3のものと同じである装置100の実施形態によるが、より短い指令パルス214という先行技術スキーム200からずれたものを使用して生成される他の組の例示的なレーザーパルスを示す。この技術は、以下では「パルストリミング」と呼ぶ。図4の例では、指令パルス214の持続時間 Δt は、 $0.8 \mu s$ である。図4は、 $1 kHz$ 、 $5 kHz$ 、 $10 kHz$ 、 $25 kHz$ 、 $50 kHz$ 、 $75 kHz$ および $100 kHz$ のパルス繰り返しレートのそれぞれで記録された結果のレーザーパルス波形を示す。 $1.0 \mu s$ から $0.8 \mu s$ までの指令パルス214の低下は、全ての測定されたパルス繰り返しレートにおいて尾部310を本質的に消去する。しかし、パルス繰り返しレートが $25 kHz$ を超えて増加するとき、レーザーパルスエネルギーは、やはり劇的に減少する。このように、パルストリミングは、パルス繰り返しレートの範囲全体にわたって、より一様なレーザーパルス持続時間および形状を達成するのを助けるのに対し、パルストリミングは、レーザーパルスエネルギーをイコライズしない。

40

【0043】

図5は、固定されたパルス繰り返しレートにおけるレーザーパルスエネルギーおよび持

50

続時間への指令パルス持続時間の効果をさらに調査する。図 5 は、固定されたパルス繰り返しレートにおける異なる指令パルス持続時間で得られるレーザーパルス波形を示す。図 5 中のそれぞれのレーザーパルス波形は、指令パルス 214 の対応する持続時間 Δt によってラベル付けされている。最も長い指令パルス持続時間である $1.1 \mu s$ から始めると、レーザーパルス波形は、実質的に台座のような尾部を呈する。主パルスは、約 $0.2 \mu s$ の幅を有し、台座のような尾部は、最大約 $0.5 \mu s$ まで合計レーザーパルス持続時間を延ばす。指令パルス持続時間が $1.1 \mu s$ から減少すると、この尾部は、切り捨てられ、指令パルス持続時間が $0.7 \mu s$ に達するとき、本質的に消去される。指令パルス持続時間が $0.7 \mu s$ を過ぎて低下するとき、レーザーパルス持続時間は、ここで主パルスの幅が減少する結果として、さらに減少する。加えて、レーザーパルスのピークパワーは、減少する。

10

【0044】

図 5 のデータは、少なくともあるパルス繰り返しレートのレジームにおいて、レーザーパルスエネルギーが、低損失状態の持続時間に敏感であることを実証する。図 5 のデータは、少なくともあるパルス繰り返しレートのレジームにおいて、指令パルス持続時間のかなり狭い範囲のみが、主パルスの全エネルギーを維持しつつ、台座のないクリーンなパルスを提供することもまた示す。言い換えると、「最適な」指令パルス持続時間があり、この最適な指令パルス持続時間からの比較的小さいずれでさえ、有意な効果を有する。私たちは、最適な指令パルス持続時間が、少なくとも、ある閾値レートを超えるパルス繰り返しレートに対して、パルス繰り返しレートと共に増加することを発見した。

20

【0045】

図 3、図 4 および図 5 のデータは、共に、ガスレーザー 110 のような Q スイッチガスレーザーによって生成されたレーザーパルスの繰り返しレート、エネルギーおよび持続時間の間の強く結合された関係を実証する。これらの関係の性質は、パルス繰り返しレート、エネルギーおよび持続時間に跨る三次元パラメータ空間における位置に依存する。加えて、その関係は、共振器 116、利得媒質 120 および利得媒質 120 のポンピングの特性を含む他のパラメータに敏感である。

【0046】

図 6 は、Q スイッチガスレーザーによって生成されたレーザーパルスの二変量イコライゼーションのための 1 つの方法 600 のフローチャートである。方法 600 は、装置 100 へ適用され得、パルス繰り返しレートの広い範囲にわたって一様なレーザーパルスエネルギーおよび持続時間を提供するために、図 3～図 5 のデータによって図示される課題を克服する。方法 600 は、先行技術スキーム 200 よりも進歩したスキームに従って Q スイッチを動作させることを伴う。以下において、方法 600 は、装置 100 のコンテキスト内において述べられる。方法 600 は、並行して行われるステップ 610 およびステップ 620 を含む。

30

【0047】

ステップ 610 において、電子回路 160 は、図 1 を参照して上記で述べられるように、パルスレーザービーム 192 を生成するために、共振器 116 を高損失状態と低損失状態との間で繰り返し切り替えるように Q スイッチ 118 を動作させる。ステップ 620 において、電子回路 160 は、パルス繰り返しレートの範囲全体にわたってレーザーパルス 192 P のエネルギーおよび持続時間をイコライズするために、センサー 150 と、および任意でセンサー 152 とも協働する。

40

【0048】

ステップ 620 は、ステップ 630 およびステップ 632 を含む。ステップ 630 において、センサー 150 は、図 1 を参照して上記で述べられるように、レーザーパルス 192 P のエネルギーを示す測定結果を得るために、レーザービーム 192 をサンプリングする。ステップ 630 は、複数のレーザーパルス 192 P にわたる平均としてのこのパルスエネルギーの測定結果を得るステップ 634 を実装し得る。ステップ 632 において、電子回路 160 は、目標パルスエネルギーを達成、または少なくとも近づけるために、ステ

50

ップ630において得られるパルスエネルギーの測定結果に基づいて、共振器116の低損失状態の損失レベルを調整する。ステップ630およびステップ632は、目標パルスエネルギーを達成するために、アクティブフィードバックループにおいて反復して行われ得る。例のシナリオにおいて、ステップ620は、目標パルスエネルギーの10%以内であるレーザーパルスエネルギーを達成し、そのレーザーパルスエネルギーは、単一のレーザーパルスのエネルギーまたは複数のレーザーパルスの平均エネルギーとして評価される。

【0049】

図7は、ガスレーザー110をQスイッチするための方法600によって使われる1つのスキーム700のタイミング図である。スキーム700は、パルスエネルギーのイコライゼーションとパルス持続時間のイコライゼーションとの両方を可能にするスキーム200の変更である。図7は、QスイッチングがAOMを用いて行われる実施形態のためのスキーム700を示す。スキーム700は、他のタイプのQスイッチ（例えばEOM）に容易に適応する。図7のグラフ720およびグラフ730は、ステップ632のより詳細な例を提供する。グラフ720は、電子回路160によってAOMへ提供されるRF駆動信号722の時間的進化を描写する。スキーム200のRF駆動信号222と比較すると、共振器116の低損失状態の間、RF駆動信号722は、必ずしも0ではない。その代わりに、RF駆動信号722は、低損失状態の間、0でない振幅 ΔV_{low} を概して有し、電子回路160は、ステップ630においてセンサー150によって得られるパルスエネルギーの測定結果に基づいて、 ΔV_{low} の値を調整する。

【0050】

グラフ730は、共振器116中を循環するレーザーパワー P_L の時間的進化を描写する。AOMがRF駆動信号722によって駆動されるとき、RF駆動信号722の振幅 ΔV_{high} から0でない振幅 ΔV_{low} への降下は、レーザーパルス732の生成を結果として生じる。RF駆動信号を0にまで降下させるときに生成されるレーザーパルス232（図2を参照）と比較すると、レーザーパルス732は、より低いピークパワー P_{peak} およびより低いパルスエネルギー E を有する。パルスエネルギー E （およびピークパワー P_{peak} ）の低下は、AOMが共振器116の低損失状態の間に0でない回折損失を課した結果である。ステップ632において、電子回路160は、目標パルスエネルギーを達成するために、必要に応じて ΔV_{low} を調整する。例えば、センサー150から得られたパルスエネルギーの測定結果が、レーザーパルス192Pのエネルギーが目標パルスエネルギーを上回ることを示すとき、電子回路160は、共振器116の低損失状態の損失を増加させるために、 ΔV_{low} を増加させ得る。対照的に、センサー150から得られたパルスエネルギーの測定結果が、レーザーパルス192Pのエネルギーが目標パルスエネルギーを下回ることを示すとき、電子回路160は、 ΔV_{low} を減少させ得る。

【0051】

方法600のステップ620は、ステップ642もまた含み、ステップ642では電子回路160は、目標パルス持続時間を達成、または少なくとも近づけるために、共振器116の低損失状態の持続時間を調整する。図7のグラフ720およびグラフ730は、ステップ642のより詳細な例を提供する。この例において、電子回路160は、振幅 ΔV_{low} を有するRF駆動信号722の持続時間 Δt を調整する。他の例においては、電子回路160は、レーザーパルス732が尾部を有することを妨げるために持続時間 Δt を低下させるか、またはレーザーパルス732の主パルスにおけるエネルギーを最大化するために持続時間 Δt を増加させる。さらに他の例においては、電子回路160は、ある半値幅（FWHM）のパルス持続時間のような目標パルス持続時間を達成するために、持続時間 Δt を調整する。

【0052】

ステップ620の1つの実施形態において、ステップ642は、ステップ640Aに先行し、ステップ640Aでは、センサー152は、図1を参照して上記で述べられるよう

に、レーザーパルス192の持続時間を示す測定結果を得るためにレーザービーム192 Pをサンプリングする。ステップ640 Aは、単一のレーザーパルス192 Pからの、またはいくつかの単一パルス持続時間の平均としてのこのパルス持続時間の測定結果を得るステップ644を実装し得る。ステップ620がステップ640 Aを含むとき、ステップ642は、ステップ640 Aにおいて得られるパルス持続時間の測定結果に基づいている。この実施形態は、アクティブフィードバックループにおいて、ステップ640 Aおよびステップ642を反復して行い得る。ステップ640 Aおよびステップ642によって実施されるパルス持続時間フィードバックループは、とりわけ、レーザーパルス持続時間が、単一またはごくわずかのレーザーパルス192 Pの測定結果から得られるときに、ステップ630およびステップ632によって実施されるパルスエネルギーフィードバックループよりも速い速度であり得る。例のシナリオにおいて、ステップ620は、目標パルス持続時間の10%以内であるレーザーパルス持続時間を達成する。

10

【0053】

ステップ620の他の実施形態において、ステップ642は、ステップ640 Bに先行し、ステップ640 Bでは、電子回路160は、共振器116の低損失状態の所望の持続時間 Δt を計算するか、ルックアップテーブルから所望の持続時間 Δt を取得するかのどちらかを行う。電子回路160は、(a) 目標パルス持続時間と、(b) ガスレーザー110の持続時間 Δt とパルス繰り返しレート、および任意でガスレーザー110の1またはそれより多くの他のパラメータも、ならびに／または目標パルスエネルギーとの間の予め校正された関数関係から、所望の持続時間 Δt を計算し得る。例えば、レーザーパルス192 P間の周期T (パルス繰り返しレートの逆数に等しい) に線形に依存するように持続時間 Δt を調整することによって、パルス繰り返しレートの範囲にわたって、一定なレーザーパルス持続時間を達成することが可能であり得る。代替的に、ガスレーザー110の目標パルス持続時間、パルス繰り返しレートおよび任意でガスレーザー110の1またはそれより多くの他のパラメータも、ならびに／または目標パルスエネルギーの関数としての予め校正された持続時間 Δt は、電子回路160中に含まれるルックアップテーブルにおいてリスト化され得る。

20

【0054】

1つのシナリオにおいて、ステップ610は、レーザーパルス192 Pの繰り返しレートを変化させるステップ612を含む。このシナリオにおいて、方法600は、繰り返しレートの変化によって引き起こされるレーザーパルスエネルギーおよびレーザーパルス持続時間への変化を最小限にするように、ステップ612においてもたらされる繰り返しレートの変化に応答して、ステップ632および任意でステップ642を行う。

30

【0055】

電子回路160がコントローラ162およびドライバ164を含む実施形態において、スキーム700の実行は、ドライバ164がRF駆動信号722 (駆動信号182の例) を生成することを伴う。ドライバ164は、コントローラ162によって生成された指令信号180に従ってRF駆動信号722を生成する。図7のグラフ710は、指令信号712の時間的進化を示す。指令信号712は、ドライバ164にRF駆動信号722を生成させることができる指令信号の1つの例である。指令信号712は、高い値 V_{high} と低い値 V_{low} との間を交替する電圧 V_c である。 $V_c = V_{high}$ のとき、 V_{RF} は、振幅 ΔV_{high} を有し、 $V_c = V_{low}$ のとき、 V_{RF} は、振幅 ΔV_{low} を有する。 V_{low} の値は、 ΔV_{low} の値を決める信号値である。それぞれのレーザーパルス192 Pは、信号値 V_{low} によって特徴づけられる指令パルス714の後に生成される。 V_{low} の値は、 ΔV_{low} の値を制御し、それゆえレーザーパルス192 Pのエネルギーを制御する。

40

【0056】

コントローラ162は、連続的な指令パルス714の先行エッジ714 L間の周期を所望のパルス繰り返しレートの逆数に設定することによって、レーザーパルス192 Pの繰り返しレートを設定し得る。この場合、コントローラ162は、指令パルス714の

50

後行エッジ 714 T の時間的位置づけを調整することによって、共振器 116 の低損失状態の持続時間 Δt を調整する。

【0057】

指令信号 712 は、タイミング情報（時刻 t_1 および時刻 t_2 ）と可変電圧 V_{low} との両方を含有する。代替的に、コントローラ 162 は、2つの個別の構成要素であるタイミング信号および可変 DC 電圧として指令信号を生成し得る。タイミング信号は、指令パルス 714 と同様であるが、一定の信号値 V_{low} を持つ TTL パルスを含有するトランジスタートランジスタロジック（TTL）信号であり得る。可変 DC 電圧は、アナログ信号であり得、例えば、振幅 ΔV_{low} を決める値 V_{low} の DC 電圧、または RF 駆動信号 722 である。しばしば、商業的な RF ドライバは、アナログ制御よりもデジタル制御のために構成されている。指令信号は、デジタル的に符号化された時刻 t_1 、遅延 Δt 、電圧値 ΔV_{high} および電圧値 ΔV_{low} を備えるデジタル信号であり得る。

【0058】

図 8 は、スキーム 700 に従って二変量パルスイコライゼーションを持つ装置 100 を動作させ、センサー 150 およびセンサー 152 からの測定結果に基づくレーザーパルスエネルギーとレーザーパルス持続時間との両方の動的調整を実装するとき生成されるレーザーパルス 192 P の例を示す。比較のために、図 8 は、パルスイコライゼーションなしで、先行技術スキーム 200 に従って装置 100 を動作させるとき生成されるレーザーパルスの例もまた示す。図 8 は、センサー 152 によって測定される 6 つのレーザーパルス波形のオシロスコープトレースを描写する。トレース 810、トレース 820 およびトレース 830 は、先行技術スキーム 200 で使用している 10 kHz、50 kHz および 100 kHz のそれぞれのパルス繰り返しレートにおいて得られる。それゆえ、トレース 810、トレース 820 およびトレース 830 に対して、 V_{low} は、0 で保たれ、持続時間 Δt は、一定に保たれる。トレース 812、トレース 822 およびトレース 832 もまた、10 kHz、50 kHz および 100 kHz のそれぞれのパルス繰り返しレートにおいて得られるが、信号値 V_{low} と持続時間 Δt との両方の動的調整を持つスキーム 700 に従うパルスイコライゼーションを使用する。

【0059】

トレース 810、トレース 820 およびトレース 830 に対する測定されたパルスエネルギーは、それぞれ 704 マイクロジュール (μJ)、542 μJ および 335 μJ であり、対応する FWHM パルス持続時間は、105 ナノ秒 (ns)、118 ns および 117 ns である。パルスイコライゼーションがないと、パルス繰り返しレートが 10 kHz から 100 kHz まで増加するとき、パルスエネルギーは劇的に変化することが明らかである。対照的に、スキーム 700 に従ってパルスイコライゼーションを実装するとき、トレース 812、トレース 822 およびトレース 832 から明白なように、本質的に同一のレーザーパルス波形が、3つの全てのパルス繰り返しレートに対して得られる。パルスイコライゼーションがあると、10 kHz、50 kHz および 100 kHz での測定されたパルスエネルギーは、それぞれ 250 μJ 、254 μJ および 262 μJ である。さらに、3つのパルスのそれぞれは、99 ns の FWHM パルス持続時間を有する。

【0060】

3つの異なるパルス繰り返しレート、10 kHz、50 kHz および 100 kHz に対する、二変量パルスイコライゼーションがあるときおよびないときの、図 9 A は、レーザーパルスエネルギーの例を、図 9 B は、レーザーパルス持続時間の例を、それぞれ示す。データセット 910 は、パルスイコライゼーションがないとき、つまり $\Delta V_{low} = 0$ かつ Δt が一定のときに、得られる。データセット 920 およびデータセット 930 は、スキーム 700 に従って二変量パルスイコライゼーションを使用し、 ΔV_{low} と Δt との両方がセンサー 150 およびセンサー 152 から得られた測定結果に基づいて動的に調整されるとき、得られる。データセット 920 の場合、目標パルスエネルギー E_{target} は、340 μJ であり、目標パルス持続時間 w_{target} は、99 ns であった。データセット 930 の場合、目標パルスエネルギー E_{target} は、250 μJ であり、

目標パルス持続時間 w_{target} は、 117 ns であった。

【0061】

データセット910は、パルスイコライゼーションがないとき、レーザーパルスエネルギーは、パルス繰り返しレートと共に、 10 kHz から 100 kHz まで2倍の低下を伴って、急速に減少することを示す。加えて、レーザーパルス持続時間は、非自明のように、パルス繰り返しレートにかなり敏感である。対照的に、データセット920およびデータセット930を参照すると、二変量パルスイコライゼーションは、非常に効果的である。目標パルス持続時間は、3つの全てのパルス繰り返しレートにおいて達成されており、パルスエネルギー変動は、小さい。2つの異なる目標パルスエネルギー、 $340\text{ }\mu\text{ J}$ および $250\text{ }\mu\text{ J}$ のそれぞれに対して、それぞれ測定されたレーザーパルスエネルギーは、目標パルスエネルギーの5%以内である。

10

【0062】

図10Aは、Qスイッチ118がAOMである、装置100の実施形態において、ドライバ164として実装され得る1つのRFドライバ1000を図示する。図10Bは、RFドライバ1000を制御する例示的な指令信号1080を図示する。RFドライバ1000は、RFオシレーター1010、ミキサー1020および増幅器1040を含む。RFオシレーター1010は、RF信号を生成する。ミキサー1020は、このRF信号を受け取り、ミキサー1020の「IF」ポートで指令信号1080をさらに受け取る。指令信号1080は、レーザーパルス192Pの繰り返しレート、 V_{low} および持続時間 Δt を画定するための指令信号712（図7参照）の連続的なインスタンスからなる可変アナログ電圧 V_{VA} である。指令信号1080は、コントローラ162の例によって生成される。ミキサー1020は、指令信号1080に従って、RFオシレーター1010からのRF信号を変調する。増幅器1040は、AOM Qスイッチを駆動するためのRF駆動信号1082を生成するために、この変調されたRF信号を増幅する。RF駆動信号1082は、RF駆動信号722の連続的なインスタンスに等しい。RFドライバ1000は、ミキサー1020によって生成された所望でない高調波を取り除くローパスフィルタ1030をさらに含み得る。

20

【0063】

図11Aは、個別のタイミング入力および電圧入力を受け取るように構成される他のRFドライバ1100を図示する。図11Bは、RFドライバ1100のタイミング面を制御する例示的なタイミング指令信号1180を図示する。RFドライバ1100は、ミキサー1020のIFポートに結合されるデジタル的に制御されるアナログスイッチ1150をさらに含むことを除けば、RFドライバ1000と同様である。アナログスイッチ1150は、2つのアナログ電圧入力ポートを有する。1つのポートは、電圧 V_{high} で保たれ、もう一方は、コントローラ62の例から V_{low} を受け取る。アナログスイッチ1150は、コントローラ162から個別のタイミング指令信号もまた受け取る。タイミング指令信号1180は、 V_{low} についての情報を運ばずに、低い値と高い値との2つの値のみを獲得するデジタル信号であることを除けば、指令信号1080と同様である。アナログスイッチ1150は、タイミング指令信号1180に従って、 V_{high} と V_{low} との間で切り替わり、それによって指令信号1080を生成する。

30

40

【0064】

図12は、二変量パルスイコライゼーションのための、レーザーパルスエネルギーとレーザーパルス持続時間との両方のサーボ制御を伴う1つのコントローラ1200を図示する。コントローラ1200は、コントローラ162の実施形態であり、電子回路160中にRFドライバ1100と共に実装され得る。コントローラ1200は、センサー150からレーザービーム192の平均パワーの測定結果 P_{AVE} を受け取り、センサー152からレーザーパルス192Pのレーザーパルス波形を受け取る。レーザーパルス波形は、時間関数 $P_{INST}(t)$ としての瞬間レーザーパワーである。コントローラ1200は、 P_{AVE} および $P_{INST}(t)$ を処理することで、 V_{low} およびタイミング指令信号1180をそれぞれ生成し、次いで V_{low} およびタイミング指令信号11

50

80をそれぞれRFドライバー1100へ通信する。PAVEの処理は、目標パルスエネルギー E_{target} を達成する働きをし、PINST(t)の処理は、目標パルス持続時間 w_{target} を達成する働きをする。(図3～図5に参照して上記で述べられるように、レーザーパルスエネルギーとレーザーパルス持続時間との間に、ある程度の結合があり得る。)

【0065】

パルスエネルギーイコライゼーションのために、コントローラ1200は、パルスエネルギー計算機1210、サミングノード1220および比例-積分-微分(PID)コントローラ1230を含む。パルスエネルギー計算機1210は、平均パワーの測定結果PAVEおよびパルス繰り返しレート f_{rep} からパルスエネルギーEを計算する。パルス繰り返しレート f_{rep} は、外部の、供給源/信号から受け取られ得るか、またはコントローラ1200において内部で画定され得る。サミングノード1220は、計算されたパルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_{target} との差 ΔE を評価し、 ΔE を示すエラー信号を生成する。PIDコントローラ1230は、次いで、 ΔE を低下させるために、新しいV_{low}を決定し、出力する。

【0066】

PID制御は、装置100および方法600によって用いられ得るフィードバックアルゴリズムのほんの1つの例である。代替的に、装置100および方法600は、技術的に公知である異なるフィードバックアルゴリズムを用い得る。従って、PIDコントローラ1230は、エラー信号を最小化するための異なる原理を用いる他の種類のサーボコントローラに置き換えられ得る。

【0067】

パルス持続時間イコライゼーションのために、コントローラ1200は、波形アナライザ1250およびタイミング信号生成器1260を含む。波形アナライザ1250は、レーザーパルス持続時間wを導き出すために、レーザーパルス波形PINST(t)を分析する。タイミング信号生成器1260は、次いで、この測定されたレーザーパルス持続時間wを目標パルス持続時間 w_{target} と比較し、それらの間の差を最小化するようにタイミング指令信号1180を調整する。具体的には、タイミング信号生成器1260は、図6および図7を参照して上記で述べられるように、持続時間 Δt を調整する。タイミング信号生成器1260は、次いで、タイミング指令信号1180をRFドライバー1100へ通信する。

【0068】

V_{low}の調整のそれぞれの反復は、一連のレーザーパルス192Pのサンプリングに基づいて一方、タイミング指令信号1180の調整のそれぞれの反復は、単一のレーザーパルス192Pに基づき得、ゆえに、さらに短いタイムスケール上で行われ得る。

【0069】

図7、図10A、図10B、図11A、図11Bおよび図12に基づく上記の記述は、AOMに基づくQスイッチングに関する。これらの実施形態は、Qスイッチに応じて駆動信号を変化させることによって、他の種類のQスイッチングへ変更され得る。例えば、Qスイッチ118がEOMであるとき、上記で述べられるRF駆動信号は、DC駆動信号によって置き換えられる。

【0070】

本発明は、好ましい実施形態および他の実施形態について、上記で記載されている。しかし、本発明は、本明細書において記載され、描写されている実施形態に制限されない。それよりも、本発明は、本明細書に添付される請求項によってのみ制限される。

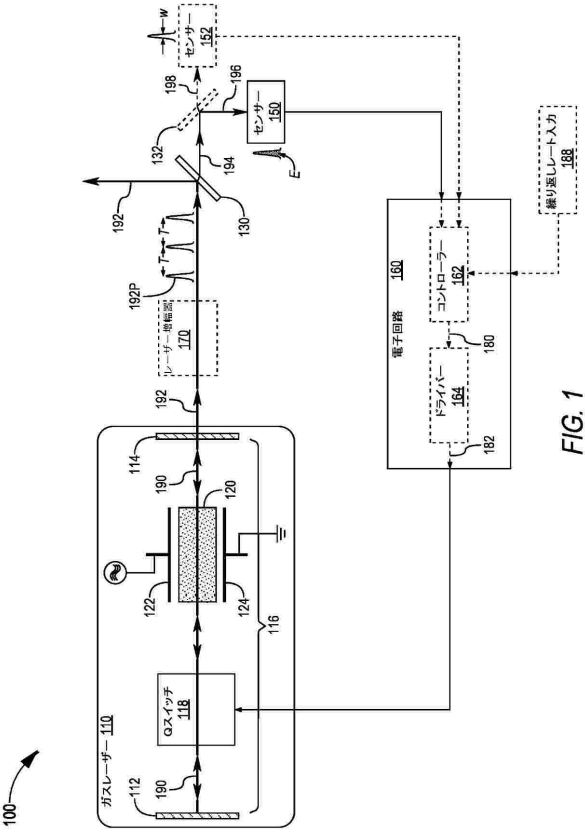
10

20

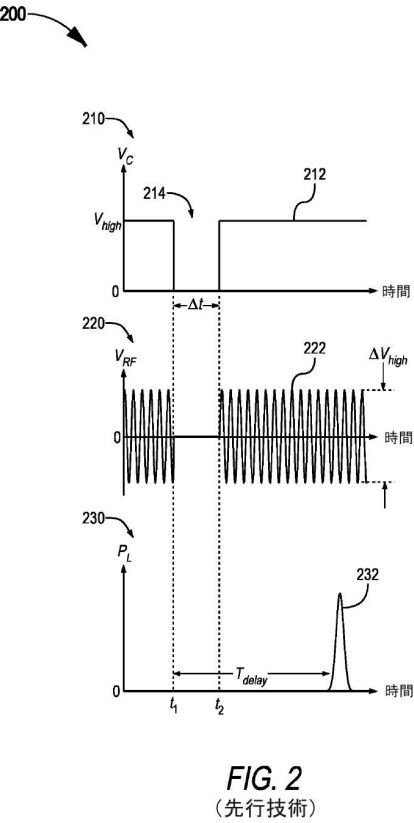
30

40

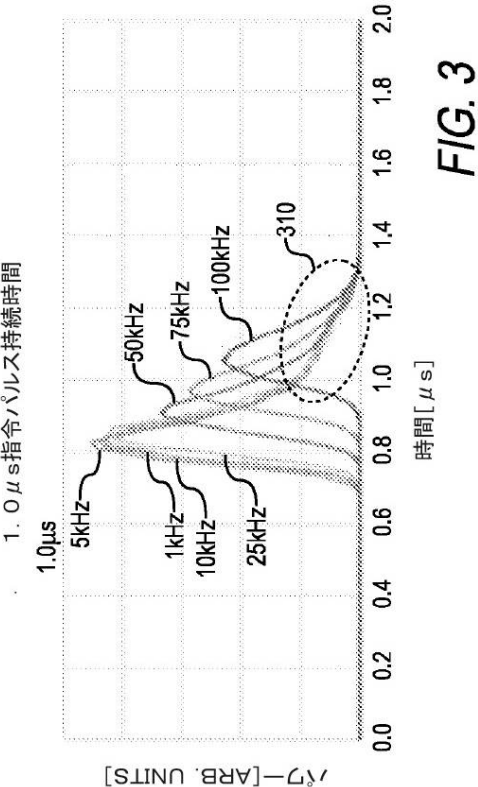
【図面】
【図 1】



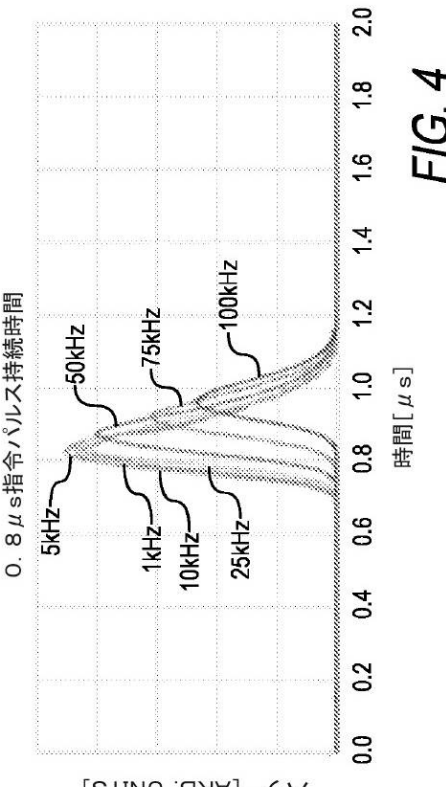
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

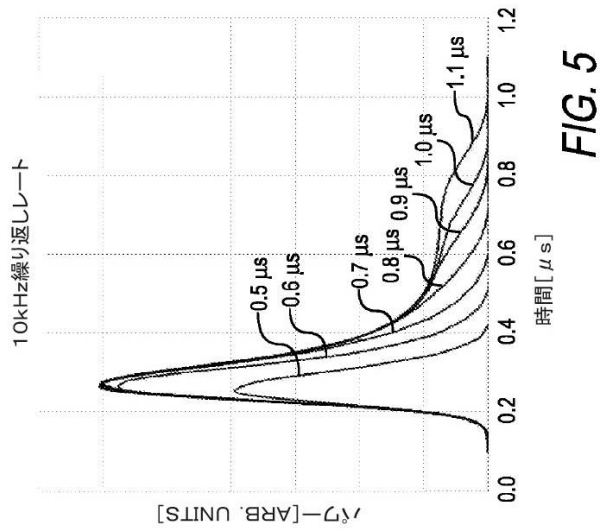
20

30

40

50

【 図 5 】



【図 6】

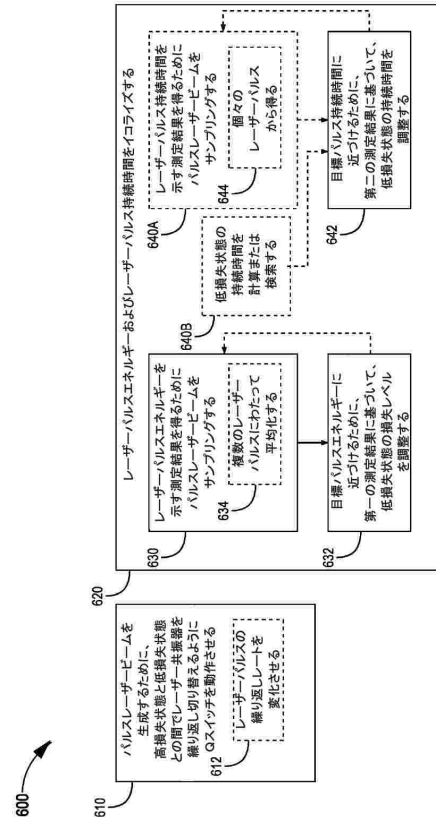


FIG. 6

10

20

【圖 7】

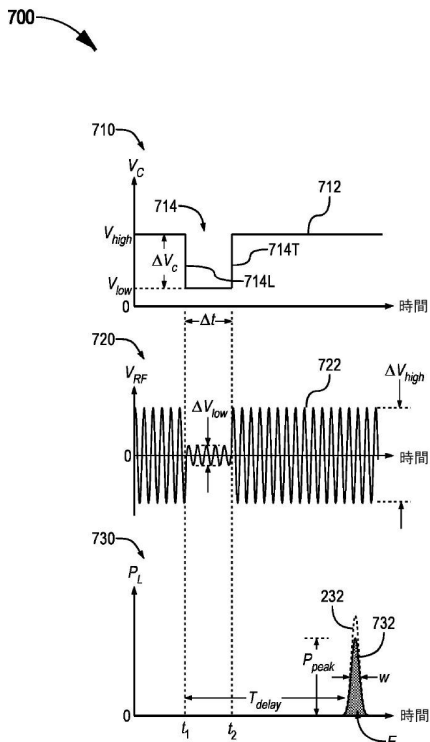


FIG. 7

【図 8】

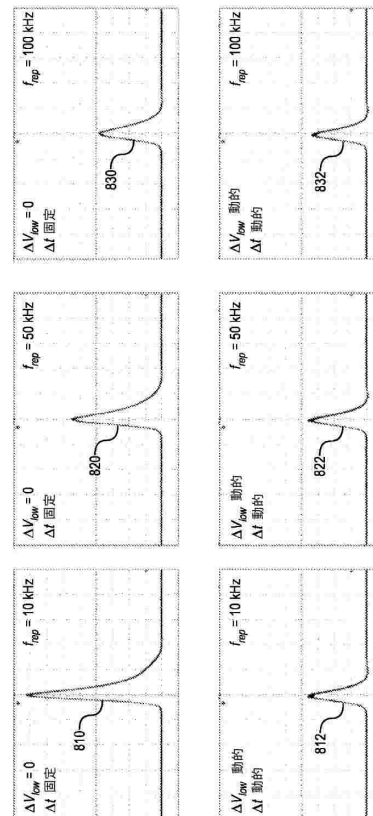


FIG. 8

30

40

50

【圖 9】

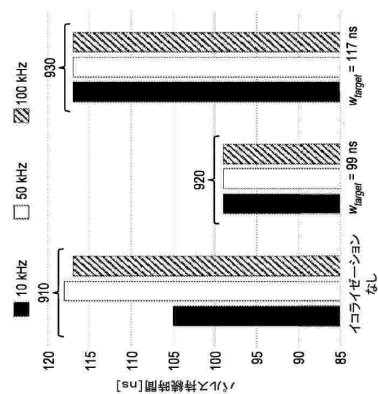


FIG. 9B

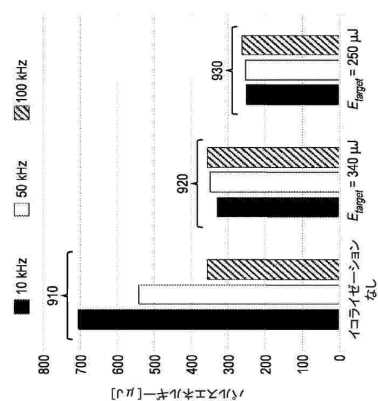


FIG. 9A

【図 1 1】

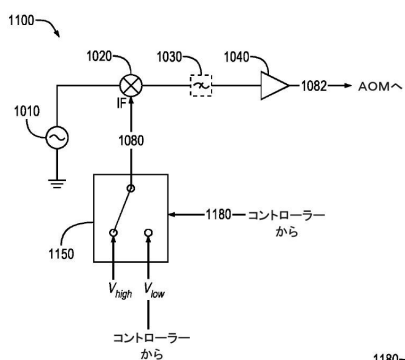


FIG. 11A

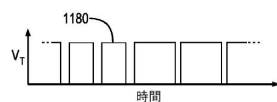


FIG. 11B

【圖 12】

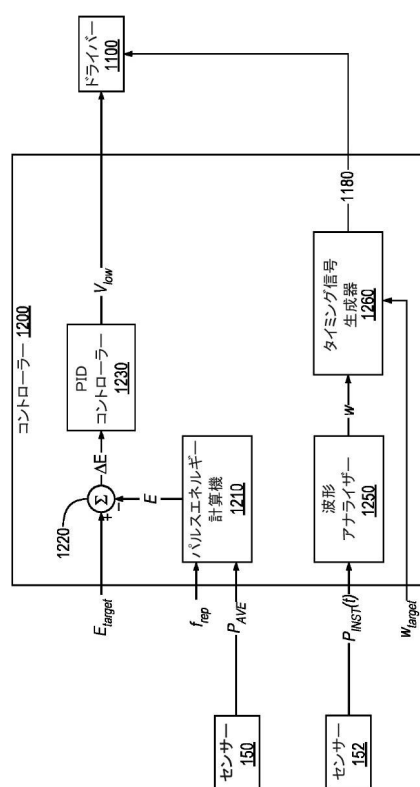


FIG. 12

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/US2022/078772

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
INV.	H01S3/223 H01S3/117 H01S3/13 H01S3/136 H01S3/10	
	H01S3/106 H01S3/23	
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		
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	US 2005/069007 A1 (KENNEDY JOHN T [US] ET AL) 31 March 2005 (2005-03-31)	1, 7, 10, 17, 19
Y	paragraph [0081] - paragraph [0091]; figure 5	9, 18
Y	paragraph [0110] - paragraph [0140]; figures fig. 17-21	
Y	----- US 2015/246848 A1 (IKENOUE HIROSHI [JP] ET AL) 3 September 2015 (2015-09-03)	9
A	paragraph [0140] - paragraph [0155]; figure 16	1-8, 10-19
Y	----- US 5 982 790 A (GROSSMAN WILLIAM MARK [US] ET AL) 9 November 1999 (1999-11-09)	18
A	column 5, line 20 - column 7, line 5; figures 1, 2	1-17, 19
	----- -/-	
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ 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		"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		"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search 17 February 2023		Date of mailing of the international search report 02/03/2023
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 Hervé, Denis

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

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/US2022/078772

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2002/185474 A1 (DUNSKY COREY M [US] ET AL) 12 December 2002 (2002-12-12) paragraph [0037] - paragraph [0049]; figure 1 -----	1-19

1

10

20

30

40

50

INTERNATIONAL SEARCH REPORT				International application No	
Information on patent family members				PCT/US2022/078772	
Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)		Publication date
US 2005069007	A1	31-03-2005	AT	453232 T	15-01-2010
			EP	1384293 A2	28-01-2004
			JP	2004535663 A	25-11-2004
			US	2003156615 A1	21-08-2003
			US	2005069007 A1	31-03-2005
			WO	02082596 A2	17-10-2002

US 2015246848	A1	03-09-2015	EP	2924820 A1	30-09-2015
			JP	WO2014080822 A1	05-01-2017
			TW	201433393 A	01-09-2014
			US	2015246848 A1	03-09-2015
			WO	2014080822 A1	30-05-2014

US 5982790	A	09-11-1999	NONE		

US 2002185474	A1	12-12-2002	TW	528636 B	21-04-2003
			US	2002185474 A1	12-12-2002
			WO	02090037 A1	14-11-2002

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,N
E,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,
CV,CV,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,IR,IS,I
T,JM,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

(72)発明者 シギーン, バーノン エー.

アメリカ合衆国 カリフォルニア 95054, サンタ クララ, パトリック ヘンリー ドライブ
5100, コヒレント, インコーポレイテッド, パテント デパートメント 気付

(72)発明者 シュメルザー, デイビッド ピー.

アメリカ合衆国 コネチカット 06117, ウェスト ハートフォード, パイオニア ドライブ 74

(72)発明者 フォンタネラ, ジョエル

アメリカ合衆国 コネチカット 06084, トーランド, アンソニー ロード 14

(72)発明者 ローセンタール, ピーター

アメリカ合衆国 コネチカット 06092, ウェスト シムズベリー, ファームステッド レーン
10

Fターム (参考) 5F172 AD05 DD03 NN13 NP03 NQ24 NQ25 ZA04