(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7208229号
(P7208229)

(45)発行日　令和5年1月18日(2023.1.18)

(24)登録日　令和5年1月10日(2023.1.10)

(51)国際特許分類		FI		
H01S	*3/136(2006.01)*	H01S	3/136	
H01S	*3/11 (2023.01)*	H01S	3/098	
H01S	*3/16 (2006.01)*	H01S	3/16	
G02F	*1/01 (2006.01)*	G02F	1/01	B
H01S	*1/06 (2006.01)*	H01S	1/06	

請求項の数　54　（全44頁）

(21)出願番号　特願2020-520551(P2020-520551)
(86)(22)出願日　平成30年10月2日(2018.10.2)
(65)公表番号　特表2020-537355(P2020-537355A)
(43)公表日　令和2年12月17日(2020.12.17)
(86)国際出願番号　PCT/GB2018/052811
(87)国際公開番号　WO2019/073202
(87)国際公開日　平成31年4月18日(2019.4.18)
審査請求日　令和3年10月1日(2021.10.1)
(31)優先権主張番号　1716780.0
(32)優先日　平成29年10月13日(2017.10.13)
(33)優先権主張国・地域又は機関
英国(GB)

(73)特許権者　514010047
エム スクエアード レーザーズ リミテッド
M SQUARED LASERS LIMITED
イギリス ストラスクライド州 ジー２００エスピー，グラスゴー，メアリーヒル ロード，ウエスト オブ スコットランド サイエンス パーク，ケルビン キャンパス １，ベンチャー ビルディング
(74)代理人　110001302
特許業務法人北青山インターナショナル
(72)発明者　マーカー，ガレス トーマス
イギリス ストラスクライド州 ジー２００エスピー，グラスゴー，ウエスト オブ
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　レーザシステム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

第１の動作周波数（f_m）で第１の光学場（６）を提供する固体レーザである第１の連続波レーザ源（２）と、前記第１の動作周波数から第１の所定のオフセット周波数（Δf_1）でオフセットされた第２の動作周波数（f_s）で第２の光学場（７）を提供する固体レーザである第２の連続波レーザ源（３）と、位相ロックフィードバックループ（３０）とを含むレーザシステム（１）であって、

前記第１の光学場（６）と第２の光学場（７）は、結合されて結合連続波光学場（２５、２６）を生成し、前記位相ロックフィードバックループ（３０）は、前記結合連続波光学場（２５、２６）の少なくとも第１の成分によって生成された第１の光ビート信号（２５）から、第２の動作周波数（f_s）を前記第１の動作周波数（f_m）に位相ロックする手段を提供し、

前記位相ロックフィードバックループ（３０）は、前記第１の光ビート信号（２５）を第１の電気ビート信号（４７）に変換する手段を提供する第１の光ビート検出器（２９）と、前記第１の動作周波数（f_m）からの第２の所定のオフセット周波数（Δf_2）で第１の基準信号（５２）を生成する手段を提供する第１の基準信号生成器（５４）と、前記第２の所定のオフセット周波数（Δf_2）より低い周波数で第２の基準信号（５３）を生成する手段を提供する第２の基準信号生成器（６０）と、前記第１の電気ビート信号（４７）、前記第１の基準信号（５２）および前記第２の基準信号（５３）から、第１のエラー信号（６５）を生成する手段を提供する位相ロックフィードバックループ電気回路（４

９）とを備え、前記第１のエラー信号（６５）が、前記第２の連続波レーザ源（３）のためのフィードバック信号（６６）を制御するために使用され、
前記位相ロックフィードバックループ（３０）がさらに、前記第１の光ビート検出器（２９）と前記位相ロックフィードバックループ電気回路（４９）との間に配置された第１のアナログ位相シフタ（５０）と、アナログ制御信号（９５）を前記アナログ位相シフタに提供して前記第１の電気ビート信号（４７）に所定の位相オフセットを導入するように構成されたアナログ出力源（９４）と、を備えることを特徴とするレーザシステム。
【請求項２】
請求項１に記載のレーザシステム（１）において、
前記第２の所定のオフセット周波数（Δf_2）が、前記第１の所定のオフセット周波数（Δf_1）と同じ桁の大きさであることを特徴とするレーザシステム。
【請求項３】
請求項１または２に記載のレーザシステム（１）において、
前記第２の基準信号の周波数（５３）が、前記第１の基準信号の周波数（５２）よりも１桁以上低いことを特徴とするレーザシステム。
【請求項４】
請求項１乃至３の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
前記第２の所定のオフセット周波数（Δf_2）が、前記第１の所定のオフセット周波数（Δf_1）に前記第２の基準信号の周波数（５３）を加算または減算したものに等しいことを特徴とするレーザシステム。
【請求項５】
請求項１乃至４の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
前記第１の基準信号生成器（５４）が、周波数シンセサイザ（５６）に接続された恒温槽付水晶発振器（ＯＣＸＯ）（５５）を含むことを特徴とするレーザシステム。
【請求項６】
請求項１乃至５の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
前記第２の基準信号生成器（６０）が、第１のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）を含むことを特徴とするレーザシステム。
【請求項７】
請求項１乃至６の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
前記位相ロックフィードバックループ電気回路（４９）が、第１の周波数ミキサ（６１）および第２の周波数ミキサ（６３）をさらに備えることを特徴とするレーザシステム。
【請求項８】
請求項７に記載のレーザシステム（１）において、
前記第１の周波数ミキサ（６１）が、前記第１の電気ビート信号（４７）および前記第１の基準信号（５２）から、第１のミックスダウン出力信号（６２）を生成することを特徴とするレーザシステム。
【請求項９】
請求項８に記載のレーザシステム（１）において、
前記第２の周波数ミキサ（６３）が、前記第１のミックスダウン出力信号（６２）と前記第２の基準信号（５３）とをミックスダウンすることによって前記第１のエラー信号（６５）を生成することを特徴とするレーザシステム。
【請求項１０】
請求項７乃至９の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
前記第１の電気ビート信号（４７）が、前記第１の周波数ミキサ（６１）によって前記第１の基準信号（５２）と混合される前に、第１の電気ディバイダ（５１）を通過することを特徴とするレーザシステム。
【請求項１１】
請求項７乃至１０の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
前記第１の基準信号（５２）が、前記第１の周波数ミキサ（６１）によって前記第１の

電気ビート信号（４７）と混合される前に、第２の電気ディバイダ（５７）を通過することを特徴とするレーザシステム。

【請求項１２】

請求項８乃至１１の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、

前記第１のミックスダウン出力信号（６２）が、前記第２の周波数ミキサ（６３）によって前記第２の基準信号（５３）と混合される前に、ローパスフィルタ（６４）を通過することを特徴とするレーザシステム。

【請求項１３】

請求項１乃至１２の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、

前記第１および第２の光学場（６、７）が共通の経路に沿って伝播しないことに起因して第１の光学場（６）と第２の光学場（７）との間に導入される任意の相対位相ノイズを補償する手段を提供する位相ノイズモニタ（１０８）をさらに含むことを特徴とするレーザシステム。

【請求項１４】

請求項１３に記載のレーザシステム（１）において、

前記位相ノイズモニタ（１０８）が、第２の結合連続波光学場（２６、１１７）によって生成された第２の光ビート信号を受信するように構成されていることを特徴とするレーザシステム。

【請求項１５】

請求項１４に記載のレーザシステム（１）において、

前記位相ノイズモニタ（１０８）が、前記第２の光ビート信号を第２の電気ビート信号（１１６）に変換する手段を提供する第２の光ビート検出器（１１５）を備えることを特徴とするレーザシステム。

【請求項１６】

請求項１３乃至１５の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、

前記位相ノイズモニタ（１０８）が、前記第１の動作周波数（f_m）からの第３の所定のオフセット周波数（Δf_3）で第３の基準信号（１１９）を生成する手段を提供する第３の基準信号生成器（１２１）をさらに備えることを特徴とするレーザシステム。

【請求項１７】

請求項１６に記載のレーザシステム（１）において、

前記位相ロックフィードバックループ電気回路（４９）が第３の周波数ミキサ（１２２）を含み、当該第３の周波数ミキサ（１２２）が、第２の電気ビート信号（１１６）および前記第３の基準信号（１１９）をミックスダウンすることによって第２のエラー信号（１２３）を生成する手段を提供することを特徴とするレーザシステム。

【請求項１８】

請求項１７に記載のレーザシステム（１）において、

前記第２のエラー信号（１２３）が、前記第１の基準信号生成器（５４）によって生成された前記第１の基準信号（５２）の位相を調整するためのフィードバック信号（１２４）を制御するために使用されることを特徴とするレーザシステム。

【請求項１９】

請求項１８に記載のレーザシステムにおいて、

前記第１の基準信号（５２）の位相の調整が、前記フィードバック信号（１２４）を使用して前記恒温槽付水晶発振器（ＯＣＸＯ）（５５）を制御することによって達成されることを特徴とするレーザシステム。

【請求項２０】

請求項１８に記載のレーザシステム（１）において、

前記第１の基準信号（５２）の位相の調整が、ＯＣＸＯ（５５）または周波数シンセサイザ（５６）の後に位置する第２のアナログ位相シフタを制御することによって達成されることを特徴とするレーザシステム。

【請求項２１】

請求項１６乃至２０の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
前記第３の所定のオフセット周波数（Δf_3）が、前記第１の所定のオフセット周波数に等しいことを特徴とするレーザシステム。
【請求項２２】
請求項１乃至２１の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
前記第１の光学場（６）の一成分（３８）を用いて前記第１の動作周波数（f_m）を維持する手段を提供する周波数ロックフィードバックループ（３６）をさらに備えることを特徴とするレーザシステム。
【請求項２３】
請求項２２に記載のレーザシステム（１）において、
前記周波数ロックフィードバックループ（３６）が、前記第１の光学場（６）の前記一成分（３８）を使用して、前記第１の動作周波数（f_m）を原子遷移（Ｅ）からの所定のオフセット周波数に維持する手段を提供することを特徴とするレーザシステム。
【請求項２４】
請求項１乃至２３の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
第１の出力場（６）から前記第１の連続波レーザ源（２）の励起光源（４）にフィードバックを提供するように配置された光検出器（１６）を含む第１のパワーフィードバックループ（１４）をさらに備えることを特徴とするレーザシステム。
【請求項２５】
請求項１乃至２４の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
第２の出力場（７）から前記第２の連続波レーザ源（３）の励起光源（５）にフィードバックを提供するように配置された光検出器（１９）を含む第２のパワーフィードバックループ（１７）をさらに含むことを特徴とするレーザシステム。
【請求項２６】
請求項１乃至２５の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
前記結合連続波光学場（２５、２６）における第２の成分（２６）を形成する一連の光パルス（３５）を生成するために使用されるパルス発生器をさらに備えることを特徴とするレーザシステム。
【請求項２７】
請求項１乃至２６の何れか一項に記載のレーザシステム（１）において、
第３のデジタル出力（９３）が、前記第２の基準信号生成器（６０）をトリガーして所定の周波数チャープを有する第２の基準信号（５３）を生成するように構成されることを特徴とするレーザシステム。
【請求項２８】
請求項２７に記載のレーザシステム（１）において、
前記第３のデジタル出力（９３）が、分散制御システム（ＤＣＳ）（７４）によって生成されることを特徴とするレーザシステム。
【請求項２９】
請求項１に記載のレーザシステム（１）において、
前記アナログ出力源（９４）が、分散制御システム（ＤＣＳ）（７４）に配置されることを特徴とするレーザシステム。
【請求項３０】
固体レーザである第１の連続波レーザ源（２）から提供される第１の動作周波数（f_m）を有する第１の連続波光学場（６）と、固体レーザである第２の連続波レーザ源（３）から提供される第２の動作周波数（f_s）を有する第２の連続波光学場（７）とを含むレーザシステム（１）を構成する方法であって、
－前記第２の動作周波数（f_s）を、前記第１の動作周波数（f_m）からの第１の所定のオフセット周波数（Δf_1）に設定するステップと、
－第１の光学場（６）と第２の光学場（７）を結合させて、結合連続波光学場（２５、２６）を生成するステップと、

－結合光学場（２５、２６）の少なくとも第１の成分から第１の光ビート信号（２５）を生成するステップと、
－前記第１の光ビート信号（２５）を第１の電気ビート信号（４７）に変換するステップと、
－前記第１の動作周波数（f_m）からの第２の所定のオフセット周波数（Δf_2）で第１の基準信号（５２）を生成するステップと、
－前記第２の所定のオフセット周波数（Δf_2）よりも低い周波数で第２の基準信号（５３）を生成するステップと、
－前記第１の電気ビート信号（４７）、第１の基準信号（５２）および第２の基準信号（５３）から第１のエラー信号（６５）を生成するステップと、
－前記第１のエラー信号（６５）を使用して、前記第２の連続波光学場（７）のためのフィードバック信号（６６）を制御し、前記第２の動作周波数（f_s）を前記第１の動作周波数（f_m）に位相ロックするステップと、
－アナログ制御信号（９５）を使用して、前記第１の電気ビート信号（４７）に所定の位相オフセットを導入するステップと、を含むことを特徴とする、レーザシステムを構成する方法。

【請求項３１】
請求項３０に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第２の所定のオフセット周波数（Δf_2）が、前記第１の所定のオフセット周波数（Δf_1）と同じ桁の大きさであることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。

【請求項３２】
請求項３０または３１に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第２の基準信号（５３）の周波数が、前記第１の基準信号（５２）の周波数よりも１桁以上低いことを特徴とするレーザシステムを構成する方法。

【請求項３３】
請求項３０乃至３２の何れか一項に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第２の所定のオフセット周波数（Δf_2）が、前記第１の所定のオフセット周波数（Δf_1）に前記第２の基準信号（５３）の周波数を加算または減算したものに等しいことを特徴とするレーザシステムを構成する方法。

【請求項３４】
請求項３０乃至３３の何れか一項に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１のエラー信号（６５）を生成することには、前記第１の電気ビート信号（４７）および前記第１の基準信号（５２）から第１のミックスダウン出力信号（６２）を生成することが含まれることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。

【請求項３５】
請求項３４に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１のエラー信号（６５）が、前記第１のミックスダウン出力信号（６２）および前記第２の基準信号（５３）から第２のミックスダウン出力信号を生成することをさらに含むことを特徴とするレーザシステムを構成する方法。

【請求項３６】
請求項３４または３５に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１の電気ビート信号（４７）が、前記第１の基準信号（５２）と混合される前に分割されることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。

【請求項３７】
請求項３４または３５に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１の基準信号（５２）が、前記第１の電気ビート信号（４７）と混合される前に分割されることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。

【請求項３８】

請求項３５乃至３７の何れか一項に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１のミックスダウン出力信号（６２）が、前記第２の基準信号（５３）と混合される前にローパスフィルタリングされることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項３９】
請求項３０乃至３８の何れか一項に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１の光学場（６）および第２の光学場（７）が共通の経路に沿って伝播しないことに起因して前記第１の光学場（６）と第２の光学場（７）との間に導入される相対位相ノイズを補償するステップをさらに含むことを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４０】
請求項３９に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
相対位相ノイズを補償することには、第２の結合連続波光学場（２６、１１７）から第２の光ビート信号を生成することが含まれることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４１】
請求項４０に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１の連続波光学場（６）および第２の連続波光学場（７）は、結合されて前記第２の結合連続波光学場（１１７）を形成する前に、周波数が２倍にされることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４２】
請求項４０または４１に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
相対位相ノイズを補償することには、第２の光ビート信号を第２の電気ビート信号（１１６）に変換することがさらに含まれることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４３】
請求項３９乃至４２の何れか一項に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
相対位相ノイズを補償することには、前記第１の動作周波数（f_m）からの第３の所定のオフセット周波数（Δf_2）で第３の基準信号（１１９）を生成することがさらに含まれることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４４】
請求項４３に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
相対位相ノイズを補償することには、前記第２の電気ビート信号（１１６）および前記第３の基準信号（１１９）から第２のエラー信号（１２３）を生成することがさらに含まれることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４５】
請求項４４に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第２のエラー信号（１２３）を生成することには、前記第２の電気ビート信号（１１６）および前記第３の基準信号（１１９）をミックスダウンすることが含まれることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４６】
請求項４４または４５に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
相対位相ノイズを補償することには、前記第２のエラー信号（１２３）を使用して前記第１の基準信号（５２）に対するフィードバック信号（１２４）を制御することがさらに含まれることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４７】
請求項３０乃至４６の何れか一項に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１の光学場（６）の一成分（３８）を使用して、前記第１の動作周波数（f_m）を原子遷移（Ｅ）からの所定のオフセット周波数に維持するステップをさらに含むことを

特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４８】
請求項４７に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１の動作周波数（f_m）を維持することには、前記第１の光学場（６）の一成分（３８）を前記原子遷移（Ｅ）からの所定のオフセット周波数で光学的に変調して、前記原子遷移と共鳴する、前記第１の光学場（６）の変調された成分（３８）の周波数側波帯を提供することが含まれることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項４９】
請求項３０乃至４８の何れか一項に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記第１の連続波光学場（６）および／または前記第２の連続波光学場（７）のパワーをモニタリングするステップをさらに含むことを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項５０】
請求項４９に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
モニタリングしたパワーが、前記第１の連続波光学場（６）の励起光源（４）にフィードバック信号を提供するために使用されることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項５１】
請求項５０に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記フィードバック信号が、前記第１の連続波光学場（６）および／または前記第２の連続波光学場（７）の励起光源（４、５）のパワーを調整するために使用されることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項５２】
請求項５０または５１に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記フィードバック信号が、前記第１の連続波光学場（６）の励起光源（４）のアライメント、および／または前記第２の連続波光学場（７）の励起光源（５）のアライメントを調整するために使用されることを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項５３】
請求項３０乃至５２何れか一項に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
前記結合連続波光学場（２５、２６）の第２の成分（２６）を音響光学変調器システム（３１）に通すことによって一連の光パルス（３５）を生成するステップをさらに含むことを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【請求項５４】
請求項３０乃至５３の何れか一項に記載のレーザシステム（１）を構成する方法において、
デジタル制御信号（９３）を使用して、前記第２の基準信号（５３）に対して所定の周波数チャープをトリガーするステップをさらに含むことを特徴とするレーザシステムを構成する方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、レーザの分野に関し、特に、２つの位相ロックされるレーザ源を含むレーザシステムに関する。
【背景技術】
【０００２】
二状態量子システムのコヒーレント制御は、近年、理論的および実験的研究の対象となっている。応用には、高感度の加速度計、ジャイロスコープ、精密重力計、重力勾配計を提供するために使用される原子干渉法が含まれる。
【０００３】

原子干渉法には、慣性（加速および／または回転）センシングが含まれる。これは、正確なタイミングと組み合わせて、「デッドレコニング」のナビゲーション方法に使用することができる。測定した加速度を時間で２回積分することにより、最初の出発点からの変位が導き出される。その後の位置精度は、加速度測定の精度とタイミングに依存する。原子干渉法に基づく慣性センシングは、従来の（機械的）方法と比較して、加速度測定の精度を１桁以上向上させる。さらに、原子サンプルを使用することで、絶対的な意味で加速度を測定でき、アーチファクト（機械的なオブジェクト、例えば、落下するコーナーキューブオプティックなど）に基づくデバイスに存在する固有のドリフトの影響を受けない。

【０００４】

重力測定は、重力加速度の小さな変動または重力加速度の勾配の検出に関連している。精密な機器は、重力場の非常に小さな変化を感知する。これは、隠れたオブジェクトやボイドのリモートセンシングに使用することができ、石油およびガスの探査、鉱業、考古学、原子力安全、土木工学およびユーティリティの分野における応用がある。

【０００５】

ラマン励起は、原子の内部励起と外部運動状態を操作するために使用される。通常は、３つのパルスのシーケンスが使用される。そのシーケンスは、原子サンプルの２つの部分が別々の軌道を辿るように、原子サンプルを分割および反射した後、再結合する。原子が内部遷移すると、光の位相が原子にインプリントされる。光／原子システムの位相は、測定のメトリックである。シーケンスの過程での光パルスとの短い相互作用が位相を設定し、原子サンプルの一部分の進行のマーカとして機能し、すなわち、それらは位相の「ストップウォッチ」または「物差し」として機能する。２つの異なる軌道をたどる原子サンプルのそれぞれの部分は、異なる加速度を受け、異なる量で変位する。さらに進む部分は、それよりも遠くまで進まない部分と相互作用する光よりも、多くの位相を蓄積した光とさらに相互作用する。再結合時に、この変位の違いに起因する位相差が測定量であり、この測定量から加速度が導き出される。

【０００６】

２状態量子システムのコヒーレント制御は、状態｜０＞、状態｜１＞で構成される２状態量子システムが一般に量子ビットまたはＱｕｂｉｔと呼ばれる量子情報処理の分野でも使用されている。誘導ラマン遷移を使用して２状態量子システムをコヒーレントに操作することができ、よって、量子ビットの値は、｜０＞、｜１＞、または両方の重ね合わせの何れかの２レベルシステムの状態によって決定される。重ね合わせと量子もつれの量子力学的現象は、適切に準備された量子ビットシステムに固有の並列性を利用するアルゴリズムを設計できるコンピューティングの新しいパラダイムを可能にする。これにより、入力パラメーターの線形スケーリングに必要なリソースの指数関数的スケーリング（例えば、数字の長さの関数として大きな数を素数に因数分解するのにかかる時間）により、従来のコンピューティングでは計算不可能と分類される問題を解決できる可能性が広がる。

【０００７】

上述した応用すべてにおいて、レーザ光は２状態量子システムをコヒーレントに制御する手段として機能する。更なる説明として、２つのコヒーレント光学場を含む単純な３レベルの誘導ラマン遷移が図１に示されている。誘導ラマン遷移の目的は、エネルギー的により高い中間仮想状態｜２＞を介して、基底状態｜０＞、｜１＞間の遷移をコヒーレントに引き起こすことである。これは、マスタ・スレーブ構成に配置された２つのレーザ光源を使用することで実現することができる。すなわち、スレーブレーザ（ＳＬ）は、３レベルシステムの基底状態｜０＞、｜１＞の周波数分離と等しく設定された周波数差Δ_{GS}を有するマスタレーザ（ＭＬ）に追従するように設定される。

【０００８】

図１から分かるように、マスタレーザ（ＭＬ）の周波数ω_Mは状態｜１＞を中間状態｜２＞に結合するように設定され、スレーブレーザ（ＳＬ）の周波数ω_Sは状態｜０＞を同じ中間状態｜２＞に同時に結合するように設定される。ｐｏｐｕｌａｔｉｏｎを中間状態｜２＞にしないようにするため、マスタレーザ（ＭＬ）の周波数ω_Mとスレーブレーザ（

ＳＬ）の周波数ωｓはともに、それぞれの共振周波数からΔだけ離調している。
【０００９】
レーザシステムが上述した原子コヒーレントシステム内の光源として機能するためには、レーザシステムが複数の異なる機能を実行できることが必要である。それは、
１）マスタレーザ（ＭＬ）の動作周波数を設定およびロックすることができ、かつ、
２）スレーブレーザ（ＳＬ）をマスタレーザ（ＭＬ）に位相ロックして、それらのレーザの動作周波数間の周波数差を安定させることができることを含む。
【００１０】
多くの応用では、
３）マスタレーザ（ＭＬ）とスレーブレーザ（ＳＬ）を結合させた連続波出力をパルス出力に変換することも望まれる。
【００１１】
Ｍｕｌｌｅｒ等による論文「Ｐｈａｓｅ－Ｌｏｃｋｅｄ，Ｌｏｗ－Ｎｏｉｓｅ、Ｆｒｅｑｕｅｎｃｙ Ａｇｉｌｅ Ｔｉｔａｎｉｕｍ：Ｓａｐｐｈｉｒｅ Ｌａｓｅｒｓ ｆｏｒ Ｓｉｍｕｌｔａｎｅｏｕｓ Ａｔｏｍ Ｉｎｔｅｒｆｅｒｏｍｅｔｅｒｓ」，Ｏｐｔｉｃｓ Ｌｅｔｔｅｒｓ，Ｖｏｌ．３１，Ｉｓｓｕｅ ２，２０２－２０４ページ（２００６）では、２つのＴｉ：サファイアレーザを含むＣＷ位相ロックシステムが、原子干渉法内での使用において実証されている。
【００１２】
位相ロックレーザシステムをもたらすために、最近の注目が、ダイオードレーザに集中している。例えば、Ｌｅ Ｇｏｕｅｔ等による論文「Ｗｉｄｅ ｂａｎｄｗｉｄｔｈ ｐｈａｓｅ－ｌｏｃｋｅｄ ｄｉｏｄｅ ｌａｓｅｒ ｗｉｔｈ ａｎ ｉｎｔｒａ－ｃａｖｉｔｙ ｅｌｅｃｔｒｏ－ｏｐｔｉｃ ｍｏｄｕｌａｔｏｒ」，Ｏｐｔｉｃｓ Ｃｏｍｍｕｎｉｃａｔｉｏｎｓ，Ｖｏｌ．２８２，Ｉｓｓｕｅ ５，９７７－９８０ページ（２００９）では、２つの独立した拡張キャビティダイオードレーザの低ノイズ位相ロックが、冷却原子重力計内で使用するものとして開示されている。位相ロックダイオードレーザの２つ目の例は、Ｓｃｈｍｉｄｔ等による論文「Ａ ｐｏｒｔａｂｌｅ ｌａｓｅｒ ｓｙｓｔｅｍ ｆｏｒ ｈｉｇｈ－ｐｒｅｃｉｓｉｏｎ ａｔｏｍ ｉｎｔｅｒｆｅｒｏｍｅｔｒｙ ｅｘｐｅｒｉｍｅｎｔｓ」，Ａｐｐｌｉｅｄ Ｐｈｙｓｉｃｓ Ｂ，Ｖｏｌ １０２，１１－１８ページ（２０１１）に記載されている。より最近では、Ｍｅｒｌｅｔ等による論文「Ａ ｓｉｍｐｌｅ ｌａｓｅｒ ｓｙｓｔｅｍ ｆｏｒ ａｔｏｍ ｉｎｔｅｒｆｅｒｏｍｅｔｒｙ」，Ａｐｐｌｉｅｄ Ｐｈｙｓｉｃｓ Ｂ，Ｖｏｌ １１７，７４９－７５４ページ（２０１４）が、２つの線形拡張キャビティレーザダイオード（ＥＣＤＬ）の位相ロックを原子重力計内で使用することを開示している。
【００１３】
しかしながら、ダイオードレーザは、固体レーザシステム、例えばＴｉ：サファイアレーザよりも、本質的に高い周波数ノイズレベルを示すことが知られている。また、ダイオードレーザは、固体レーザよりも遙かに低い出力パワーで動作し、よって、同様のパワーレベルに到達するには光増幅器を使用する必要がある。そのようなデバイス、例えばテーパ型増幅器システムは、ノイズが多く、ビームプロファイルに歪みをもたらし、２つの位相ロックダイオードレーザ間に不要な位相シフトを引き起こす。
【発明の概要】
【００１４】
本発明の一実施形態の目的は、当技術分野で知られている２つのレーザを位相ロックするための方法および装置の上記欠点を取り除くこと又は少なくとも軽減することである。
【００１５】
本発明の第１の態様によれば、第１の動作周波数で第１の光学場（first optical field）を提供する第１の連続波レーザ源（first continuous-wave laser source）と、第１の動作周波数からの第１の所定のオフセット周波数で第２の光学場（second optical field）を提供する第２の連続波レーザ源（second continuous-wave laser source）と、

位相ロックフィードバックループ（phase-lock feedback loop）とを含むレーザシステムが提供され、

第１と第２の光学場は、結合されて結合連続波光学場（combined continuous-wave optical field）をもたらし、位相ロックフィードバックループは、結合連続波光学場の少なくとも第１の成分（first component）によって生成された光ビート信号から、第２の動作周波数を第１の動作周波数に位相ロックする手段を提供し、

位相ロックフィードバックループは、光ビート信号を第１の電気ビート信号に変換する手段を提供する第１の光ビート検出器と、第１の動作周波数からの第２の所定のオフセット周波数で第１の基準信号を生成する手段を提供する第１の基準信号生成器と、第２の所定のオフセット周波数より低い周波数で第２の基準信号を生成する手段を提供する第２の基準信号生成器と、第１の電気ビート信号、第１の基準信号および第２の基準信号から、第１のエラー信号を生成する手段を提供する位相ロックフィードバックループ電気回路とを備え、第１のエラー信号が、第２の連続波レーザ源のためのフィードバック信号を制御するために使用される。

【００１６】

この構成により、当技術分野で知られているシステムと比較した場合、通常は数ＧＨｚのオーダである第１の予め設定されたオフセット周波数の周りで、低ノイズを示すとともに、アジャイルな位相ロックレーザシステムがもたらされる。第２の基準信号生成器の存在は、レーザシステムからの出力の機能性および周波数のアジリティを大幅に向上させる手段を提供する低周波数の第２の基準信号（通常はＭＨｚオーダ）を生成する手段を提供する。

【００１７】

最も好ましくは、第２の所定のオフセット周波数が、第１の所定のオフセット周波数と同じ桁、例えばＧＨｚである。第２の基準信号の周波数は、第１の基準信号の周波数よりも１桁以上低いこと、例えばＭＨｚであることが好ましい。

【００１８】

好ましくは、第２の所定のオフセット周波数は、第１の所定のオフセット周波数に第２の基準信号の周波数を加算または減算した値に等しい。

【００１９】

任意選択的には、第１の基準信号生成器は、周波数シンセサイザに接続された恒温槽付水晶発振器（ＯＣＸＯ）を含む。

【００２０】

最も好ましくは、第２の基準信号生成器は、第１のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）を含む。

【００２１】

最も好ましくは、位相ロックフィードバックループ電気回路は、第１および第２の周波数ミキサをさらに備える。最も好ましくは、第１の周波数ミキサは、第１の電気ビート信号および第１の基準信号からミックスダウン出力信号（first mixed down output signal）を生成する。同様に、第２の周波数ミキサは、第１のミックスダウン出力信号と第２の基準信号とをミックスダウンすることによって第１のエラー信号を生成する。

【００２２】

任意選択的には、第１の電気ビート信号は、第１の周波数ミキサによって第１の基準信号と混合される前に、第１の電気ディバイダを通過する。

【００２３】

任意選択的には、第１の基準信号は、第１の周波数ミキサによって第１の電気ビートと混合される前に、第２の電気ディバイダを通過する。

【００２４】

任意選択的には、第１のミックスダウン出力信号は、第２の周波数ミキサによって第２の基準信号と混合される前に、ローパスフィルタを通過する。

【００２５】

好ましくは、位相ロックフィードバックループは、第１の光ビート検出器と位相ロックフィードバックループ電気回路との間に配置された第１のアナログ位相シフタを備える。

【００２６】

任意選択的には、レーザシステムは、第１および第２の光学場が共通の経路に沿って伝播しないことに起因して第１の光学場および第２の光学場間に導入される任意の相対位相ノイズを補償する手段を提供する位相ノイズモニタをさらに備える。

【００２７】

好ましくは、位相ノイズモニタは、第２の結合連続波光学場によって生成された第２の光ビート信号を受信するように構成される。

【００２８】

最も好ましくは、位相ノイズモニタは、第２の光ビート信号を第２の電気ビート信号に変換する手段を提供する第２の光ビート検出器を備える。

【００２９】

最も好ましくは、位相ノイズモニタは、第１の動作周波数からの第３の所定のオフセット周波数で第３の基準信号を生成するための手段を提供する第３の基準信号生成器をさらに備える。

【００３０】

最も好ましくは、位相ロックフィードバックループ電気回路は、第３の周波数ミキサを含み、第３の周波数が、第２の電気ビート信号と第３の基準信号とをミックスダウンすることによって第２のエラー信号を生成する手段を提供する。

【００３１】

好ましくは、第２のエラー信号は、第１の基準信号生成器によって生成された第１の基準信号の位相を調整するためのフィードバック信号を制御するために使用される。第１の基準信号の位相の調整は、フィードバックを使用して恒温槽付水晶発振器（ＯＣＸＯ）を制御することによって達成され得る。代替的には、第１の基準信号の位相の調整は、第２のアナログ位相シフタを制御することによって達成されてもよい。第２のアナログ位相シフタは、ＯＣＸＯまたは周波数シンセサイザの後に配置することができる。

【００３２】

任意選択的には、第３の所定のオフセット周波数は、第１の所定のオフセット周波数に等しい。

【００３３】

任意選択的には、レーザシステムは、第１の光学場が伝播する第１の周波数二倍化結晶をさらに含む。この実施形態では、レーザシステムは、第２の光学場が伝播する第２の周波数二倍化結晶をさらに含む。その結果、第３の所定のオフセット周波数は、第１の所定のオフセット周波数の周波数の２倍となる。

【００３４】

最も好ましくは、レーザシステムは、第１の光学場の一成分を用いて、原子遷移からの所定のオフセット周波数で第１の動作周波数を維持する手段を提供する周波数ロックフィードバックループをさらに備える。このようにして、第１の出力場は、原子遷移と共鳴することなく、原子遷移を基準とすることができるため、原子遷移の上位状態にｐｏｐｕｌａｔｉｏｎが追い込まれるのを回避することができる。

【００３５】

好ましくは、周波数ロックフィードバックループが光変調器を含み、この光変調器の動作が、原子遷移からの所定のオフセット周波数で第１の光学場の成分を周波数変調する手段を提供し、それにより、原子遷移と共鳴する、第１の光学場の変調成分の周波数側波帯を提供する。

【００３６】

最も好ましくは、周波数ロックフィードバックループは、原子蒸気セルを通る第１の光学場の変調成分の透過をモニタリングするために使用される原子飽和吸収分光法モジュールをさらに含む。

【００３７】
好ましくは、周波数ロックフィードバックループは、原子飽和吸収分光法モジュールの出力から電気フィードバック信号を生成するための手段を提供するフィードバックループ電気回路をさらに含む。最も好ましくは、電気フィードバック信号は、第１の連続波レーザ源の１または複数の同調要素（tuning elements）を制御して第１の動作周波数を維持するために使用される。
【００３８】
好ましくは、原子飽和吸収分光法モジュールは、ルビジウム蒸気セルを含む。
【００３９】
代替的には、原子飽和吸収分光法モジュールは、カルシウム蒸気セルを含むことができる。別の代替例では、原子飽和吸収分光法モジュールが、セシウム蒸気セルを含むことができる。さらに別の代替形態では、原子飽和吸収分光法モジュールが、カリウム蒸気セルを含むことができる。
【００４０】
好ましくは、レーザシステムは、第１の出力場から第１の連続波レーザ源の励起光源にフィードバックを提供するように構成された光検出器を含む第１のパワーフィードバックループをさらに含む。好ましくは、レーザシステムは、第２の出力場から第２の連続波レーザ源の励起光源にフィードバックを提供するように配置された光検出器を含む第２のパワーフィードバックループをさらに含む。このようにして、第１および第２の出力場のパワーをモニタリングし、必要に応じて自動的に調整することができる。これは、励起レーザのパワーを変化させることによって、かつ／または第１および第２の連続波レーザ源への励起レーザのアライメントを調整することによって達成することができる。
【００４１】
最も好ましくは、レーザシステムは、結合連続波光学場の第２の成分から一連の光パルスを生成するために使用されるパルス発生器をさらに含む。
【００４２】
パルス発生器は、好ましくは、音響光学変調器（ＡＯＭ）システムを含み、この音響光学変調器システムが、第１の音響光学変調器（ＡＯＭ）と、第１のＡＯＭの入力駆動信号を生成するために使用される音響光学変調器（ＡＯＭ）電気回路とを含む。
【００４３】
好ましくは、ＡＯＭ電気回路は、第１の可変利得増幅器（ＶＧＡ）によって第１のＡＯＭに電気的に接続される分散制御システム（ＤＣＳ）を含む。好ましくは、第１のＶＧＡからの電気出力は、第１のデジタル制御スイッチによって制御される。
【００４４】
任意選択的には、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第１のデジタル制御スイッチを開閉する制御信号を提供するために使用される第１のデジタル出力源をさらに備える。最も好ましくは、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第１のＡＯＭの周波数源、例えば８０ＭＨｚの低周波源を生成するために使用される第２のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）をさらに含む。
【００４５】
最も好ましくは、第１のＶＧＡは、第１のＡＯＭの周波数源を１または複数のパルスを含む第１の電気信号に変換する手段を提供する。好ましくは、第１のＶＧＡは、１または複数のパルスのタイミング、形状および／または幅を決定するための手段を提供する。好ましくは、第１のデジタル制御スイッチは、パルスのオン／オフ消光（on/off extinction）を増加させる手段を提供する。また、第１の電気信号内のパルスのタイミングおよび幅の制御を向上させる手段を提供することもできる。第１のＡＯＭが入力駆動信号によって駆動されると、一連の電気パルスのプロファイルを結合連続波場の第２の成分の両方の成分に与えて、所望のパルス出力場を生成する。
【００４６】
任意選択的には、音響光学変調器（ＡＯＭ）システムは、第１の音響光学変調器（ＡＯ

Ｍ）と直列に配置された第２の音響光学変調器（ＡＯＭ）をさらに含む。好ましくは、音響光学変調器（ＡＯＭ）電気回路は、第２のＡＯＭの入力駆動信号を生成するために使用される。

【００４７】

好ましくは、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第２の可変利得増幅器（ＶＧＡ）によって第２のＡＯＭに電気的に接続される。好ましくは、第２のＶＧＡからの電気出力は、第２のデジタル制御スイッチによって制御される。

【００４８】

任意選択的には、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第２のデジタル制御スイッチを開閉する制御信号を提供するために使用される第２のデジタル出力源をさらに備える。最も好ましくは、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第２のＡＯＭの周波数源、例えば８０ＭＨｚの低周波源を生成するために使用される第３のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）をさらに含む。

【００４９】

最も好ましくは、第２のＶＧＡは、第２のＡＯＭの周波数源を１または複数のパルスを含む電気信号に変換する手段を提供する。好ましくは、第２のＶＧＡは、１または複数のパルスのパワーレベルを設定するための手段を提供する。第２のＶＧＡは、１または複数のパルスのタイミング、形状および／または幅を決定するための手段を提供することもできる。好ましくは、第２のデジタル制御スイッチは、パルスのオン／オフ消光を増加させる手段を提供する。また、電気信号内のパルスのタイミングと幅の制御を向上させる手段を提供することもできる。

【００５０】

この実施形態において、一連の電気パルスのプロファイルを結合連続波場の第２の成分の両方の成分に付与して所望のパルス出力場を生成するのは、駆動される第１および第２のＡＯＭの組み合わせ効果である。２つのＡＯＭを採用することには、ＡＯＭシステムが、生成されたパルス出力場のパルス間でより高いレベルの消光を示すという利点がある。さらに、そのような音響光学変調器システムは、動作の柔軟性が向上する。例えば、駆動される第１のＡＯＭは、主にパルスを整形するために使用され、駆動される第２のＡＯＭは、生成されたパルス出力場の各パルスのパワーを決定するために使用される。

【００５１】

好ましくは、第３のデジタル出力は、第２の基準信号生成器をトリガして、所定の周波数チャープを有する第２の基準信号を生成するように構成される。この構成により、第２の光学場のパルスシーケンス全体にわたって予め設定された周波数チャープを導入することが可能になる。

【００５２】

最も好ましくは、第３のデジタル出力は、分散制御システム（ＤＣＳ）によって生成される。分散制御システム（ＤＣＳ）でデジタル出力を生成すると、周波数チャープのタイミングを、生成されたパルス出力場の個々のパルスのタイミングと同期させる性能が向上する。

【００５３】

好ましくは、本レーザシステムは、アナログ制御信号をアナログ位相シフタに提供するように構成されたアナログ出力源をさらに含み、アナログ制御信号は、アナログ位相シフタが所定の位相オフセットを電気ビート信号に導入する手段を提供する。この構成により、生成されたパルス出力場の第１および第２の光学場の成分間に所定の位相シフトを導入することが可能になる。

【００５４】

最も好ましくは、アナログ出力源は、分散制御システム（ＤＣＳ）に配置される。分散制御システム（ＤＣＳ）にアナログ出力源を配置すると、生成されたパルス出力場の個々のパルスのタイミングで位相シフトのタイミングを制御する性能が向上する。

【００５５】

任意選択的には、音響光学変調器（ＡＯＭ）システムは、第１の音響光学変調器（ＡＯＭ）と直列に、かつ第２の音響光学変調器（ＡＯＭ）と並列に配置された第３の音響光学変調器（ＡＯＭ）をさらに含む。好ましくは、音響光学変調器（ＡＯＭ）電気回路は、第３のＡＯＭの入力駆動信号を生成するために使用される。

【００５６】

任意選択的には、音響光学変調器（ＡＯＭ）システムは、第１の音響光学変調器（ＡＯＭ）と直列に、かつ第２および第３の音響光学変調器（ＡＯＭ）と並列に配置された第４の音響光学変調器（ＡＯＭ）をさらに含む。好ましくは、音響光学変調器（ＡＯＭ）電気回路は、第４のＡＯＭの入力駆動信号を生成するために使用される。

【００５７】

音響光学変調器システムは、生成されたパルス出力場を３つの異なる出力に分割する手段を提供し、３つの出力の各々は、２つのＡＯＭの組み合わせによって制御される。その結果、３つの直交軸（Ｘ、Ｙ、Ｚ）に対応する３つの出力をレーザシステムから生成でき、これにより、原子干渉法内で特定のアプリケーションが見出される。

【００５８】

任意選択的には、レーザシステムは、生成された出力場が結合される光ファイバをさらに含む。光ファイバは、レーザシステムの出力場を必要な目的地に伝播する手段を提供する。

【００５９】

任意選択的には、レーザシステムは、レーザシステムからの出力場のパワーをモニタリングするように構成された第１の光検出器を有するパワー出力モニタをさらに備える。任意選択的には、パワー出力モニタは、光ファイバを介した伝播に続く出力場のパワーをモニタリングするように構成された第２の光検出器をさらに備える。任意選択的には、出力モニタは、必要な目的地からレーザシステムへの戻り場のパワーをモニタリングするように構成された第３の光検出器をさらに備える。その結果、第２および第３の光検出器は、出力場が配置されることが意図されている目的地、例えば光ファイバの遠位端で出力場のパワーをモニタリングするための手段を提供する。

【００６０】

任意選択的には、本レーザシステムは、当該レーザシステムの出力場から音響光学変調器システムにフィードバックを提供するように構成された第１の光検出器を含む第３のパワーフィードバックループをさらに含む。好ましくは、レーザシステムは、ファイバを通って音響光学変調器システムに伝播した後に、レーザシステムの出力場からフィードバックを提供するように配置された第２の光検出器を含む第４のパワーフィードバックループをさらに含む。好ましくは、レーザシステムは、レーザシステムの戻り場から音響光学変調器システムにフィードバックを提供するように配置された第３の光検出器を含む第５のパワーフィードバックループをさらに含む。第３、第４および第５のフィードバックループは、必要に応じてレーザシステムを自動的に調整する手段を提供する。これは、それらフィードバックループを使用して、第１の音響光学変調器および／または第２の音響光学変調器を駆動するために使用される電気パルス信号の振幅を変化させることによって達成することができる。これは、フィードバック信号が、ＤＣＳのアナログ入力によって受信され、その後デジタル化されるように構成することによって達成することができる。フィードバックループを使用して、第１の音響光学変調器および／または第２の音響光学変調器を駆動するのに使用される電気パルス信号の振幅を変化させる手段を提供するのは、それらのデジタル化信号である。代替的には、フィードバックループを使用して、レーザシステムの出力場と光ファイバとの間のアライメントを調整することができる。

【００６１】

最も好ましくは、第１および第２の連続波レーザ源はそれぞれ、固体レーザ源を含む。特に、第１および第２の連続波レーザ源はそれぞれ、Ｔｉ：サファイアレーザを含み得る。

【００６２】

本発明の第２の態様によれば、第１の動作周波数を有する第１の連続波光学場と、第２

の動作周波数を有する第２の連続波光学場とを含むレーザシステムを構成する方法が提供され、当該方法が、
－第２の動作周波数を、第１の動作周波数からの第１の所定のオフセット周波数に設定するステップと、
－第１の光学場と第２の光学場を結合させて、結合連続波光学場を生成するステップと、
－結合光学場の少なくとも第１の成分から第１の光ビート信号を生成するステップと、
－第１の光ビート信号を第１の電気ビート信号に変換するステップと、
－第１の動作周波数からの第２の所定のオフセット周波数で第１の基準信号を生成するステップと、
－第２の所定のオフセット周波数よりも低い周波数で第２の基準信号を生成するステップと、
－電気ビート信号、第１の基準信号および第２の基準信号から第１のエラー信号を生成するステップと、
－第１のエラー信号を使用して、第２の連続波レーザ源のためのフィードバック信号を制御し、第２の動作周波数を第１の動作周波数に位相ロックするステップとを含む。

【００６３】

最も好ましくは、第２の所定のオフセット周波数は、第１の所定のオフセット周波数と同じ桁、例えばＧＨｚである。第２の基準信号の周波数は、第１の基準信号の周波数よりも１桁以上低いこと、例えばＭＨｚであることが好ましい。

【００６４】

好ましくは、第２の所定のオフセット周波数は、第１の所定のオフセット周波数に第２の基準信号の周波数を加算または減算したものに等しい。

【００６５】

最も好ましくは、第１のエラー信号を生成することは、第１の電気ビート信号および第１の基準信号から第１のミックスダウン出力信号を生成することを含む。同様に、第１のエラー信号を生成することは、第１のミックスダウン出力信号および第２の基準信号から第２のミックスダウン出力信号を生成することをさらに含む。

【００６６】

任意選択的には、第１の電気ビート信号は、第１の基準信号と混合される前に分割される。

【００６７】

任意選択的には、第１の基準信号は、第１の電気ビート信号と混合される前に分割される。

【００６８】

必要に応じて、第１のミックスダウン出力信号は、第２の基準信号と混合される前に低域通過フィルタリングされる。

【００６９】

任意選択的には、この方法は、第１および第２の光学場が共通の経路に沿って伝播しないことに起因して、第１および第２の光学場の間に導入される任意の相対位相ノイズを補償するステップをさらに含む。

【００７０】

好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第２の結合連続波光学場から第２の光ビート信号を生成することを含む。最も好ましくは、第１および第２の連続波光学場は、結合されて第２の結合連続波光学場を形成する前に、周波数が２倍にされる。

【００７１】

好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第２の光ビート信号を第２の電気ビート信号に変換することをさらに含む。

【００７２】

好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第１の動作周波数からの第３の所定のオフセット周波数で第３の基準信号を生成することをさらに含む。

【００７３】
最も好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第２の電気ビート信号および第３の基準信号から第２のエラー信号を生成することをさらに含む。好ましくは、第２のエラー信号を生成することは、第２の電気ビート信号および第３の基準信号をミックスダウンすることを含む。
【００７４】
最も好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第２のエラー信号を使用して第１の基準信号へのフィードバック信号を制御することをさらに含む。
【００７５】
最も好ましくは、本方法は、第１の光学場の一成分を使用して、第１の動作周波数を原子遷移からの所定のオフセット周波数に維持するステップをさらに含む。
【００７６】
好ましくは、第１の動作周波数を維持することは、原子遷移からの所定のオフセット周波数で第１の光学場の一成分を光学的に変調して、原子遷移と共鳴する、第１の光学場の変調成分の周波数側波帯を提供することを含む。
【００７７】
好ましくは、第１の動作周波数を維持することは、原子蒸気セルを通る第１の光学場の変調成分の透過をモニタリングすることをさらに含む。
【００７８】
好ましくは、第１の動作周波数を維持することは、モニタリングした透過から電気フィードバック信号を生成することをさらに含む。
【００７９】
第１の動作周波数を維持することは、電気フィードバック信号を使用して第１の連続波レーザ源の１または複数の同調要素を制御することにより、第１の動作周波数を維持することをさらに含むことができる。
【００８０】
この方法は、第１の連続波光学場のパワーをモニタリングするステップをさらに含むことができる。任意選択的には、モニタリングしたパワーを使用して、第１の連続波光学場の励起光源にフィードバック信号を提供することができる。フィードバック信号を使用して、第１の連続波光学場の励起光源のパワーを調整することができる。代替的には、フィードバック信号を使用して、第１の連続波光学場の励起光源のアライメントを調整することができる。
【００８１】
この方法は、第２の連続波光学場のパワーをモニタリングするステップをさらに含むことができる。任意選択的には、モニタリングしたパワーを使用して、第２の連続波光学場の励起光源にフィードバック信号を提供することができる。フィードバック信号は、第２の連続波光学場の励起光源のパワーを調整するために使用されてもよい。代替的には、フィードバック信号は、第２の連続波光学場の励起光源のアライメントを調整するために使用されてもよい。
【００８２】
最も好ましくは、この方法は、結合連続波光学場の第２の成分を音響光学変調器システムに通すことによって一連の光パルスを生成するステップをさらに含む。
【００８３】
好ましくは、一連のパルスは、第１の周波数源によって駆動される第１の音響光学変調器から生成される。好ましくは、第１の可変利得増幅器は、第１の周波数源を１または複数のパルスを含む第１の電気信号に変換する手段として使用される。好ましくは、第１の可変利得増幅器は、１または複数のパルスのタイミング、形状および／または幅を決定するための手段として使用される。
【００８４】
任意選択的には、一連のパルスは、第１の音響光学変調器と直列に配置され、かつ第２

の周波数源によって駆動される第２の音響光学変調器から生成される。好ましくは、第２の可変利得増幅器は、第２の周波数源を１または複数のパルスを含む第２の電気信号に変換するための手段として使用される。好ましくは、第２の可変利得増幅器は、１または複数のパルスのパワーレベルを設定するための手段として使用される。また、第２の可変利得増幅器は、１または複数のパルスのタイミング、形状および／または幅を決定する手段も提供することができる。

【００８５】

任意選択的には、一連のパルスは、第３の音響光学変調器から生成され、この第３の音響光学変調器が、第１の音響光学変調器と直列に、かつ第２の音響光学変調器と並列に配置され、第３の周波数源によって駆動される。

【００８６】

任意選択的には、一連のパルスは、第４の音響光学変調器から生成され、この第４の音響光学変調器が、第１の音響光学変調器と直列に、かつ第２および第３の音響光学変調器と並列に配置され、第４の周波数源によって駆動される。

【００８７】

好ましくは、この方法は、デジタル制御信号を使用して、第２の基準信号に対して所定の周波数チャープをトリガーするステップをさらに含む。この構成により、第２の光学場のパルスシーケンス全体にわたって所定の周波数チャープを導入することが可能になる。

【００８８】

好ましくは、この方法は、アナログ制御信号を使用して所定の位相オフセットを電気ビート信号に導入するステップをさらに含む。この構成により、生成されたパルス出力場の第１および第２の光学場の成分間に所定の位相シフトを導入することが可能になる。

【００８９】

この方法は、レーザシステムの出力場を光ファイバに結合するステップをさらに含むことができる。

【００９０】

この方法はさらに、レーザシステムからの出力場のパワーをモニタリングするステップを含むことができる。必要に応じて、出力場のモニタリングしたパワーを使用して、レーザシステムにフィードバック信号を提供することができる。フィードバック信号は、第１の音響光学変調器に印加される電気信号の電力を変化させるために使用することができる。代替的には、フィードバック信号を使用して、レーザシステムおよび光ファイバからの出力場のアライメントを調整することができる。

【００９１】

任意選択的には、本方法は、出力場が展開されることが意図されている目的地で出力場のパワーをモニタリングするステップをさらに含むことができる。必要に応じて、出力場のモニタリングしたパワーを使用して、レーザシステムにフィードバック信号を提供することができる。フィードバック信号は、第１の音響光学変調器に印加される電気信号の電力を変化させるために使用することができる。代替的には、フィードバック信号を使用して、レーザシステムおよび光ファイバからの出力場のアライメントを調整することができる。あるいは、フィードバック信号は、第１の基準信号の位相を調整するために使用されるものであってもよい。

【００９２】

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

【００９３】

本発明の第３の態様によれば、第１の動作周波数で第１の光学場を提供する第１の連続波レーザ源と、第１の動作周波数からの第１の所定のオフセット周波数で第２の光学場を提供する第２の連続波レーザ源を位相ロックするための位相ロックフィードバックループが提供され、この位相ロックフィードバックループが、

第１および第２の光学場を結合して、第１の光ビート信号を有する第１の結合連続波光

学場を生成する手段を提供する第１の光ビーム結合器と、
　第１の光ビート信号を第１の電気ビート信号に変換する手段を提供する第１の光ビート検出器と、
　第１の動作周波数からの第２の所定のオフセット周波数で第１の基準信号を生成するための手段を提供する第１の基準信号生成器と、
　第２の所定のオフセット周波数より低い周波数で第２の基準信号を生成する手段を提供する第２の基準信号生成器と、
　第１の電気ビート信号、第１の基準信号および第２の基準信号から、第１のエラー信号を生成する手段を提供する位相ロックフィードバックループ電気回路とを備え、第１のエラー信号が、第２の連続波レーザ源のためのフィードバック信号を制御するために使用される。
【００９４】
　好ましくは、位相ロックフィードバックループは、第１の光ビート検出器と位相ロックフィードバックループ電気回路との間に配置された第１のアナログ位相シフタを備える。この構成により、第１の光学場と第２の光学場との間に所定の相対位相シフトを導入することが可能になる。
【００９５】
　好ましくは、位相ロックフィードバックループは、第２の基準信号生成器をトリガーして所定の周波数チャープを有する第２の基準信号を生成するように構成されたデジタル出力をさらに備える。この構成により、第２の光学場のパルスシーケンス全体にわたって所定の周波数チャープを導入することが可能になる。
【００９６】
　任意選択的には、位相ロックフィードバックループは、第１および第２の光学場が共通の経路に沿って伝播しないことに起因して第１および第２の光学場の間に導入される任意の相対位相ノイズを補償する手段を提供する位相ノイズモニタをさらに備える。
【００９７】
　好ましくは、位相ノイズモニタは、第２の結合連続波光学場によって生成された第２の光ビート信号を受信するように構成される。
【００９８】
　最も好ましくは、位相ノイズモニタは、第２の光ビート信号を第２の電気ビート信号に変換する手段を提供する第２の光ビート検出器を備える。
【００９９】
　最も好ましくは、位相ノイズモニタは、第１の動作周波数からの第３の所定のオフセット周波数で第３の基準信号を生成するための手段を提供する第３の基準信号生成器をさらに備える。
【０１００】
　最も好ましくは、位相ロックフィードバックループ電気回路は、第３の周波数ミキサを含み、第３の周波数は、第２の電気ビート信号と第３の基準信号をミックスダウンすることによって第２のエラー信号を生成する手段を提供する。
【０１０１】
　好ましくは、第２のエラー信号は、第１の基準信号生成器によって発生された第１の基準信号の位相を調整するためのフィードバック信号を制御するために使用される。
【０１０２】
　本発明の第３の態様の実施形態は、本発明の第１または第２の態様の好ましいまたは任意の特徴を実行するための特徴を含むことができ、その逆もまた同様である。
【０１０３】
　本発明の第４の態様によれば、第１の動作周波数を有する第１の連続波光学場と、第２の動作周波数を有する第２の連続波光学場とを位相ロックする方法が提供され、この方法が、
　－第２の動作周波数を、第１の動作周波数からの第１の所定のオフセット周波数に設定

するステップと、
－第１および第２の光学場を結合させて、第１の結合連続波光学場を生成するステップと、
－第１の結合光学場の第１の成分から第１の光ビート信号を生成するステップと、
－第１の光ビート信号を第１の電気ビート信号に変換するステップと、
－第１の動作周波数からの第２の所定のオフセット周波数で第１の基準信号を生成するステップと、
－第２の所定のオフセット周波数よりも低い周波数で第２の基準信号を生成するステップと、
－第１の電気ビート信号、第１の基準信号および第２の基準信号から第１のエラー信号を生成するステップと、
－第１のエラー信号を使用して、第２の連続波レーザ源のフィードバック信号を制御することにより、第２の動作周波数を第１の動作周波数に位相ロックするステップとを含む。
【０１０４】
好ましくは、この方法は、デジタル制御信号を使用して、第２の基準信号に対して所定の周波数チャープをトリガーするステップをさらに含む。この構成により、第２の光学場のパルスシーケンス全体にわたって所定の周波数チャープを導入することが可能になる。
【０１０５】
好ましくは、この方法は、アナログ制御信号を使用して所定の位相オフセットを電気ビート信号に導入するステップをさらに含む。この構成により、生成されたパルス出力場の個々のパルスに所定の位相シフトを導入することができる。
【０１０６】
任意選択的には、この方法は、第１および第２の光学場が共通の経路に沿って伝播しないことに起因して、第１および第２の光学場の間に導入される任意の相対位相ノイズを補償するステップをさらに含む。
【０１０７】
好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第２の結合連続波光学場から第２の光ビート信号を生成することを含む。
【０１０８】
好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第２の光ビート信号を第２の電気ビート信号に変換することをさらに含む。
【０１０９】
好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第１の動作周波数からの第３の所定のオフセット周波数で第３の基準信号を生成することをさらに含む。
【０１１０】
最も好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第２の電気ビート信号および第３の基準信号から第２のエラー信号を生成することをさらに含む。好ましくは、第２のエラー信号を生成することは、第２の電気ビート信号および第３の基準信号をミックスダウンすることを含む。
【０１１１】
最も好ましくは、任意の相対位相ノイズを補償することは、第２のエラー信号を使用して第１の基準信号へのフィードバック信号を制御することをさらに含む。
【０１１２】
本発明の第４の態様の実施形態は、本発明の第１～第３の態様の好ましいまたは任意の特徴を実行するための特徴を含むことができ、その逆もまた同様である。
【０１１３】
本発明の第５の態様によれば、本発明の第３の態様の位相ロックフィードバックループを展開する方法が提供され、この方法が、
－第１の連続波光学場の第１の動作周波数を第１の所定の周波数に設定するステップと、
－第２の連続波光学場の第２の動作周波数を第１の所定の周波数に設定するステップと、

－第１および第２の連続波光学場を結合させて光ビート信号を生成するステップと、
－第２の連続周波数レーザ光源の１または複数の周波数同調要素に印加される共振器電圧と、第２の動作周波数をスキャンしながら光ビート信号を受信するように配置された光ビート検出器からのパワー出力とをモニタリングするステップと、
－第１の動作周波数に等しい第２の動作周波数に対応する共振器電圧を決定するステップと、
－共振器電圧を決定した共振器電圧に設定するステップと、
－第１の動作周波数に対する第２の動作周波数の第１の所定の周波数オフセット値を選択するステップと、
－位相ロックフィードバックループを介して低利得フィードバック信号を適用するステップと、
－反復制御法を共振器電圧に適用して、第１の連続波光学場と第２の連続波光学場間の周波数オフセットが第１の所定のオフセット値に対応するときの推定値に向けて共振器電圧を収束させるステップと、
－共振器電圧の収束が望ましい許容レベル内になったら、共振器電圧を推定値に設定し、位相ロックフィードバックループを介して高利得フィードバック信号を適用するステップとを含む。

【０１１４】

好ましくは、波長計を使用して、第１の連続波光学場の第１の動作周波数を設定する。同様に、波長計を使用して、第２の連続波光学場の第２の動作周波数を設定することもできる。

【０１１５】

最も好ましくは、第１の動作周波数に等しい第２の動作周波数に対応する共振器電圧を決定することは、光ビート検出器のエラー増幅器からのパワー出力に対応する共振器電圧が最小値、例えばゼロに落ちるのを判定することを含む。

【０１１６】

代替的には、第１の動作周波数に等しい第２の動作周波数に対応する共振器電圧を決定することは、光ビート検出器のエラー増幅器からのパワー出力の微分係数の最大値に対応する共振器電圧を決定することを含む。

【０１１７】

最も好ましくは、反復制御法は、位相周波数検出器（ＰＦＤ）からの出力信号をモニタリングすることを含む。

【０１１８】

任意選択的には、位相周波数検出器（ＰＦＤ）への第１の入力は、光ビート信号から生成された電気ビート信号と、周波数シンセサイザによって生成された第１の基準信号とをミックスダウンすることによって生成された二次ビート信号を含む。この実施形態では、位相周波数検出器（ＰＦＤ）への第２の入力は、第１のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）によって生成された第２の基準信号を含む。

【０１１９】

代替的には、位相周波数検出器（ＰＦＤ）への第１の入力は、光ビート信号から生成された電気ビート信号を含む。この実施形態では、位相周波数検出器（ＰＦＤ）への第２の入力は、周波数シンセサイザによって生成された第１の基準信号を含む。位相周波数検出器（ＰＦＤ）への第１および第２の入力はともに、位相周波数検出器（ＰＦＤ）に到達する前に分割されるようにしてもよい。

【０１２０】

好ましくは、反復制御法は、第２の連続波光学場の第２の動作周波数を走査して、位相周波数検出器（ＰＦＤ）からの出力信号が状態を変えるときの第１の電圧（Ｖ１）および第２の電圧（Ｖ２）を求めるステップを含む。

【０１２１】

任意選択的には、反復制御法は、位相周波数検出器（ＰＦＤ）からの出力信号に適用さ

れて、第１の所定の周波数オフセット値にある第２の動作周波数に対応する共振器電圧を見付ける二分法を含む。

【０１２２】

代替的には、反復制御法は、ビート周波数を直接測定して、直接測定したビート周波数を第１の所定の周波数オフセット値と比較するステップを含む。

【０１２３】

好ましくは、位相ロックフィードバックループを介して低フィードバック信号を適用することは、低利得値で動作するように第１の増幅器を構成することを含む。低利得値の目的は、位相ロック捕捉を可能にすることである。

【０１２４】

好ましくは、位相ロックフィードバックループを介して高フィードバック信号を適用することは、高利得値で動作するように第１の増幅器を構成することを含む。ノイズ低減には高利得設定が必要である。

【０１２５】

本発明の第５の態様の実施形態は、本発明の第１～第４の態様の好ましいまたは任意の特徴を実行するための特徴を含むことができ、その逆もまた同様である。

【０１２６】

本発明の第６の態様によれば、原子遷移からの所定のオフセット周波数にある動作周波数で光学場を提供する連続波レーザ源用の周波数ロックフィードバックループが提供され、この周波数ロックフィードバックループは、

光変調器であって、その動作が、原子遷移からの所定のオフセット周波数で光学場を周波数変調し、それにより原子遷移と共鳴する光学場の変調成分の周波数側波帯を提供する手段を提供する光変調器と、

原子蒸気セルを通過する光学場の変調成分の透過をモニタリングするために使用される原子飽和吸収分光法モジュールと、

原子飽和吸収分光法モジュールの出力から電気フィードバック信号を生成する手段を提供するフィードバックループ電気回路とを備える。

【０１２７】

最も好ましくは、電気フィードバック信号を使用して、連続波レーザ源の１または複数の同調要素を制御して、動作周波数を維持する。

【０１２８】

本発明の第６の態様の実施形態は、本発明の第１～第５の態様の好ましいまたは任意の特徴を実行するための特徴を含むことができ、その逆もまた同様である。

【０１２９】

本発明の第７の態様によれば、原子遷移を基準にして連続波光学場を周波数ロックする方法が提供され、この方法は、

連続波光学場の動作周波数を、原子遷移からの所定のオフセット周波数になるように選択するステップと、

所定のオフセット周波数で連続波光学場を光学的に変調して、連続波光学場に周波数変調を導入し、それにより、原子遷移と共鳴する光学場の変調成分の周波数側波帯を提供するステップと、

原子遷移を含む原子蒸気を介した連続波光学場の周波数変調成分の透過をモニタリングするステップと、

モニタリングした透過から電気的フィードバック信号を生成するステップとを含む。

【０１３０】

最も好ましくは、上記方法は、電気フィードバック信号を使用して第１の連続波レーザ源の１または複数の同調要素を制御することにより連続波光学場の動作周波数を維持するステップをさらに含む。

【０１３１】

本発明の第７の態様の実施形態は、本発明の第１～第６の態様の好ましいまたは任意の

特徴を実行するための特徴を含むことができ、その逆もまた同様である。

【０１３２】

本発明の第８の態様によれば、連続波光学場から一連の光パルスを生成するためのパルス発生器が提供され、このパルス発生器は、

第１の音響光学変調器（ＡＯＭ）と、第１のＡＯＭを駆動するための第１の周波数源を生成するために使用される音響光学変調器（ＡＯＭ）電気回路とを含む音響光学変調器（ＡＯＭ）システムを備え、

音響光学変調器（ＡＯＭ）電気回路は、第１の可変利得増幅器（ＶＧＡ）によって第１のＡＯＭに電気的に接続される分散制御システム（ＤＣＳ）を備える。

【０１３３】

好ましくは、第１のＶＧＡからの電気出力は、第１のデジタル制御スイッチによって制御される。

【０１３４】

任意選択的には、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第１のデジタル制御スイッチを開閉する制御信号を提供するために使用される第１のデジタル出力源をさらに備える。最も好ましくは、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第１のＡＯＭの周波数源を生成するために使用される第１のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）をさらに備える。

【０１３５】

最も好ましくは、第１のＶＧＡは、第１のＡＯＭの周波数源を１または複数のパルスを含む第１の電気信号に変換する手段を提供する。好ましくは、第１のＶＧＡは、１または複数のパルスのタイミング、形状および／または幅を決定するための手段を提供する。好ましくは、第１のデジタル制御スイッチは、パルスのオン／オフ消光を増加させる手段を提供する。また、第１のデジタル制御スイッチは、第１の電気信号内のパルスのタイミングおよび幅の制御を向上させる手段を提供することもできる。

【０１３６】

任意選択的には、音響光学変調器（ＡＯＭ）システムは、第１の音響光学変調器（ＡＯＭ）と直列に配置された第２の音響光学変調器（ＡＯＭ）をさらに含む。好ましくは、音響光学変調器（ＡＯＭ）電気回路は、第２のＡＯＭの入力駆動信号を生成するために使用される。

【０１３７】

好ましくは、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第２の可変利得増幅器（ＶＧＡ）によって第２のＡＯＭに電気的に接続される。好ましくは、第２のＶＧＡからの電気出力は、第２のデジタル制御スイッチによって制御される。

【０１３８】

任意選択的には、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第２のデジタル制御スイッチを開閉する制御信号を提供するために使用される第２のデジタル出力源をさらに備える。最も好ましくは、分散制御システム（ＤＣＳ）は、第２のＡＯＭの周波数源を生成するために使用される第２のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）をさらに備える。

【０１３９】

最も好ましくは、第２のＶＧＡは、第２のＡＯＭの周波数源を１または複数のパルスを含む電気信号に変換する手段を提供する。好ましくは、第２のＶＧＡは、１または複数のパルスのパワーレベルを設定するための手段を提供する。また、第２のＶＧＡは、１または複数のパルスのタイミング、形状および／または幅を決定する手段を提供することができる。好ましくは、第２のデジタル制御スイッチは、パルスのオン／オフ消光を増加させる手段を提供する。また、第２のデジタル制御スイッチは、電気信号内のパルスのタイミングと幅の制御を向上させる手段を提供することもできる。

【０１４０】

任意選択的には、音響光学変調器（ＡＯＭ）システムは、第１の音響光学変調器（ＡＯＭ）と直列に、かつ第２の音響光学変調器（ＡＯＭ）と並列に配置された第３の音響光学変調器（ＡＯＭ）をさらに含む。好ましくは、音響光学変調器（ＡＯＭ）電気回路は、第

２のＡＯＭの入力駆動信号を生成するために使用される。

【０１４１】

任意選択的には、音響光学変調器（ＡＯＭ）システムは、第１の音響光学変調器（ＡＯＭ）と直列に、かつ第２および第３の音響光学変調器（ＡＯＭ）と並列に配置される第４の音響光学変調器（ＡＯＭ）をさらに含む。好ましくは、音響光学変調器（ＡＯＭ）電気回路は、第４のＡＯＭの入力駆動信号を生成するために使用される。

【０１４２】

本発明の第８の態様の実施形態は、本発明の第１～第７の態様の好ましいまたは任意の特徴を実行するための特徴を含むことができ、その逆もまた同様である。

【０１４３】

本発明の第９の態様によれば、連続波光学場から一連の光パルスを生成する方法が提供され、この方法は、

連続波光学場を、第１の周波数源によって駆動される第１の音響光学変調器（ＡＯＭ）に通過させるステップと、

第１の周波数源を１または複数のパルスを含む電気信号に変換する手段として、第１の可変利得増幅器を使用するステップとを含む。

【０１４４】

好ましくは、第１の可変利得増幅器は、１または複数のパルスのタイミング、形状および／または幅を決定するための手段として使用される。

【０１４５】

任意選択的には、上記方法は、第１のデジタルスイッチを使用して、パルスのオン／オフ消光を増加させるための手段を提供するステップをさらに含む。それは、１または複数のパルスのタイミングおよび／または幅をさらに決定するための手段を提供することもできる。

【０１４６】

任意選択的には、この方法は、生成された一連の光パルスを、第２の音響光学変調器に通すステップをさらに含み、第２の音響光学変調器が、第１の音響光学変調器と直列に配置され、第２の周波数源によって駆動される。好ましくは、第２の可変利得増幅器は、１または複数のパルスのパワーレベルを設定するための手段として使用される。また、第２の可変利得増幅器は、第２の周波数源を１または複数のパルスを含む第２の電気信号に変換する手段を提供することもできる。好ましくは、第２の可変利得増幅器は、１または複数のパルスのタイミング、形状および／または幅を決定するための手段として使用される。

【０１４７】

任意選択的には、上記方法は、生成された一連の光パルスを、第３の音響光学変調器に通すステップをさらに含み、第３の音響光学変調が、第１の音響光学変調器と直列に、かつ第２の音響光学変調器と並列に配置され、第３の周波数源によって駆動される。

【０１４８】

任意選択的には、上記方法は、生成された一連の光パルスを、第４の音響光学変調器に通すステップをさらに含み、第４の音響光学変調器が、第１の音響光学変調器と直列に、かつ第２および第３の音響光学変調器と並列に配置され、第４の周波数源によって駆動される。

【０１４９】

本発明の第９の態様の実施形態は、本発明の第１～第８の態様の好ましいまたは任意の特徴を実行するための特徴を含むことができ、その逆もまた同様である。

【図面の簡単な説明】

【０１５０】

以下に、ほんの一例として、図面を参照して本発明の様々な実施形態を説明する。

【図１】図１は、誘導ラマン遷移の概略図を示している。

【図２】図２は、本発明の一実施形態に係るレーザシステムの概略図を示している。

【図３】図３は、ルビジウム－８７（^{87}Ｒｂ）Ｄ２ライン上の誘導ラマン遷移の概略図

を示している。
【図４】図４は、図２のレーザシステムが、図３に示すルビジウム－８７（^{87}Ｒｂ）Ｄ２ライン上の誘導ラマン遷移を制御するように構成されている場合の、レーザ周波数およびオフセットの概略図を示している。
【図５】図５は、図２のレーザシステムの位相ロックフィードバックループの電気回路を示している。
【図６】図６は、図２のレーザシステムの第２のＴｉ：サファイアレーザからの出力場の周波数の関数として、位相ロックフィードバックループによって生成されたエラー信号を示すグラフを示している。
【図７】図７は、図２のレーザシステムの第２のＴｉ：サファイアレーザの１または複数の周波数同調要素に印加される電圧の関数として、位相ロックフィードバックループの光検出器と増幅器によって生成される、（ａ）出力パワー信号および（ｂ）出力信号の導関数を示すグラフを示している。
【図８】図８は、図２のレーザシステムの第２のＴｉ：サファイアレーザの１または複数の周波数同調要素に印加されるフィードバック電圧の関数として、位相ロックフィードバックループの位相周波数検出器（ＰＦＤ）によって生成された出力信号を示すグラフを示している。
【図９】図９は、図２のレーザシステムの音響光学変調器システムの代替的な実施形態を示している。
【図１０】図１０は、（ａ）図２のレーザシステムの音響光学変調器システムの代替的な実施形態と、（ｂ）図１０（ａ）のシステムの音響光学変調器に提供されるスイッチおよび可変利得増幅器信号の概略図を示している。
【図１１】図１１は、レーザシステムの代替的な実施形態とともに使用される位相ノイズモニタの概略図を示している。
【０１５１】
以下の説明において、明細書および図面を通して、同様の部品には同じ符号が付されている。図面は必ずしも一定の縮尺ではなく、本発明の実施形態の細部と特徴をよりよく示すために、特定の部品の大きさが誇張されている。
【発明を実施するための形態】
【０１５２】
以下、図２を参照して、本発明の一実施形態に係るレーザシステム１について説明する。以下の説明の理解を容易にするために、図２には軸が含まれている。
【０１５３】
レーザシステム１は、第１のＴｉ：サファイアレーザ２および第２のＴｉ：サファイアレーザ３を含むことがわかる。Ｔｉ：サファイアレーザ２、３はともに、専用の連続波ダイオード励起の固体（ＤＰＳＳ）レーザ源４、５によって５３２ｎｍで光学的に励起され、第１の連続波出力場６および第２の連続波出力場７を生成し、それらがｘ軸に平行に伝播し、ｙ軸に平行な直線偏光を示す。本出願人所有のＳｏｌｓＴｉＳ（登録商標）レーザは、そのようなＴｉ：サファイアレーザ２、３の適当な例であるが、励起レーザ４、５は、市販のダイオード励起の固体（ＤＰＳＳ）レーザで構成することができる。
【０１５４】
第１の励起光源４は、最大１５ワットの励起電力を第１のＴｉ：サファイアレーザ２に提供することができ、第２の励起光源５は、最大１０ワットの励起電力を第２のＴｉ：サファイアレーザ３に提供することができる。以下の説明のために、第１の励起光源４は、約８．５ワットの励起電力を第１のＴｉ：サファイアレーザ２に提供し、それにより７８０ｎｍで約１ワットの電力を有する調整可能な第１の出力場６（６７０ｎｍ～１０５０ｎｍで調整可能）を提供するように構成されている。同様に、第２の励起光源５は、約４．５ワットの励起電力を第２のＴｉ：サファイアレーザ３に提供し、それにより７８０ｎｍで約０．５ワットの電力を持つ調整可能な第２の出力場７（６７０ｎｍ～１０５０ｎｍで調整可能）を提供するように構成されている。

【０１５５】
第１の波長計８および第２の波長計９には、第１の出力場６および第２の出力場７の波長または周波数を正確に測定する手段を提供するために、第１の出力場６および第２の出力場７内にそれぞれ配置された第１のビームスプリッタ１２および第２のビームスプリッタ１３によって生成されるピックオフ場１０、１１が組み込まれている。
【０１５６】
当業者であれば分かるように、レーザシステム１の効率は時間とともに変化する場合があり、よって、上述した励起電力がＴｉ：サファイアレーザ２、３から正確に所望の出力パワーを生成することを保証することはできない。このため、正確な出力パワー設定での動作を改善するために、第３のビームスプリッタ１５と第１の光検出器１６を含む第１のパワーフィードバックループ１４を、第１の出力場６と第１の励起光源４との間に配置すると有用である。同様の理由で、第４のビームスプリッタ１８と第２の光検出器１９を含む第２のパワーフィードバックループ１７を、第２の出力場７と第２の励起光源５との間に配置することが好ましい。こうして、第１の出力場６および第２の出力場７のパワーは、それぞれ第３のピックオフ場２０および第４のピックオフ場２１を介してモニタリングすることができ、必要に応じて自動的に調整することができる。これは、第１の励起レーザ４または第２の励起レーザ５のパワーを変更するか、または第１のＴｉ：サファイアレーザ２または第２のＴｉ：サファイアレーザ３への第１の励起レーザ４または第２の励起レーザ５のアライメントをそれぞれ調整することによって実現することができる。
【０１５７】
第１のビームステアリングミラー２２は、第１の出力場６の方向を変え、それにより第１の出力場が第１の半波長板２４を介して第１の偏光ビーム分割板２３にｙ軸に沿って伝播する。第１の半波長板２４の機能は、第１の偏光ビーム分割板２３に到達したときにｚ軸に平行な直線偏光を示すように、第１の出力場６の偏光を回転させることである。
【０１５８】
第１の偏光ビーム分割板２３は、直交的に、直線的に、偏光された第１の出力場６と第２の出力場７を結合させて、レーザシステム１でさらに処理するための第１の結合連続波場２５および第２の結合連続波場２６を生成する手段を提供する。
【０１５９】
第１の結合連続波場２５は、ｙ軸に平行に伝播するように導かれる。図２に示すように、第１の結合連続波場２５は、後で詳述するように第２のＴｉ：サファイアレーザ３の位相ロックフィードバックループ３０の一部を形成する光ビート検出器２９に入射する前に、第２の半波長板２７と第２の偏光ビーム分割板２８を通って伝播するように配置されている。第２の半波長板２７の機能は、第２の偏光ビーム分割板２８を透過する第１の結合連続波場２５の２つの成分のパワーを等しくすることである。その後、第２の偏光ビーム分割板２８は、２つの偏光のそれぞれの一部を、水平な透過偏光成分および垂直な反射偏光成分に投影する。その後、水平な透過偏光成分は光ビート検出器２９に入射し、垂直な反射偏光成分は、ビームダンプ（図示省略）によって単に吸収される。
【０１６０】
対照的に、第２の結合連続波場２６は、ｘ軸と平行に伝播するように導かれ、直交的に、直線的に偏光された成分を含む。図２に示すように、第２の結合連続波場２６は、音響光学変調器（ＡＯＭ）システム３１に入射する。ＡＯＭシステム３１は、第１の音響光学変調器（ＡＯＭ）３２を含み、この第１の音響光学変調器の入力駆動信号３３が、ＡＯＭ電気回路３４によって生成されることが分かる。後述するように、音響光学変調器システム３１は、第２の結合連続波場２６をレーザシステム１のパルス出力場３５に変換するための手段を提供する。
【０１６１】
本明細書に記載のレーザシステム１内では、第１のＴｉ：サファイアレーザ２がマスタレーザ（ＭＬ）として機能するように選択され、第２のＴｉ：サファイアレーザ３がスレーブレーザ（ＳＬ）として機能するように構成されている。この構成を達成するための装

置および方法論を以下に詳細に説明する。

【０１６２】

マスタレーザの動作周波数の設定およびロック

第１のＴｉ：サファイアレーザ２の周波数ロックフィードバックループ３６は、第１の出力場６内に配置された第５のビームスプリッタ３７を含むことが分かる。第５のビームスプリッタ３７は、第１の出力場６から、ｙ軸に沿って伝播するように向けられた第５のピックオフ場３８を生成するための手段を提供する。第５のピックオフ場３８は、ルビジウム蒸気・飽和吸収分光モジュール４０（本出願人所有のＳｏｌｓＴｉＳ（登録商標）Ｖａｐｏｕｒ　Ｃｅｌｌ　Ｌｏｃｋ　Ｏｐｔｉｏｎが、そのようなモジュールの適当な例である）に入射する前に、電気光学変調器３９を通って伝播する。ルビジウム蒸気・飽和吸収分光法モジュール４０によって生成された電気出力信号４１は、フィードバックループ電気回路４３によって、第１のＴｉ：サファイアレーザ２の共振器の一部を形成する圧電マウントミラー４２に接続されている。

【０１６３】

ルビジウム－８７（^{87}Ｒｂ）は、ルビジウムの２つの天然に存在する同位体の１つで、もう１つがルビジウム－８５（^{85}Ｒｂ）である。その特有の特性とエネルギー準位構造により、ルビジウムは量子および原子光学実験の理想的な原子になっている。^{87}Ｒｂは、最外殻５Ｓに１つの電子を持つアルカリ原子である。５Ｐ励起状態への遷移は、２つのＤライン成分：Ｄ１ライン（$5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$）およびＤ２ライン（$5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$）に分割される。これらの２つの成分のうち、後者は、^{87}Ｒｂの冷却とトラッピングにその循環遷移を利用できるという事実により、実験原子物理学で使用するのに好ましい成分である。

【０１６４】

図３は、^{87}Ｒｂ　Ｄ２ラインの概略図を示し、このＤ２ラインにより誘導ラマン遷移をもたらすために本レーザシステム１が用いられている。一方、図４は、レーザ周波数の概略図と、レーザシステム１の様々な構成要素によって生成されたオフセットを示している。図４の参照文字を使用して、関連する周波数値を以下の表１に示す。

Table 1

周波数	ラベル	値 (MHz)
$5^2S_{1/2}$ (F= 2) to $5^2P_{3/2}$ (F=3)	R	384,228,115
$5^2S_{1/2}$ (F= 2) to $5^2P_{3/2}$ (F=3) からのシステムのオフセット	O	840
$5^2S_{1/2}$ (F= 1) to $5^2S_{1/2}$ (F= 2)	H	6,834.683
$5^2S_{1/2}$ (F= 2) to $5^2P_{3/2}$ (F=3) からの $5^2S_{1/2}$ (F= 2) to $5^2P_{3/2}$ (F=2, 3 クロスオーバーポイント) のオフセット	C	133
EOM	E	867
第１のAOM	A	80
第２の AOM	X	80
マスタレーザ	M	384,227,115
スレーブレーザ	S	384,233,950

【０１６５】
図３に示すように、$5^2S_{1/2}$状態のＦ＝１およびＦ＝２の超微細状態は６，８３４．６８３ＭＨｚだけ分離しており、$5^2P_{3/2}$状態のＦ＝０、１、２、３の超微細状態は、それぞれ７２ＭＨｚ、１５７ＭＨｚ、２６７ＭＨｚだけ分離している。$5^2S_{1/2}$（Ｆ＝２）の超微細状態と$5^2P_{3/2}$（Ｆ＝３）の超微細状態との間の周波数分離は、３８４，２２８，１１５ＭＨｚ、または波長で約７８０ｎｍである。
【０１６６】
第１のＴｉ：サファイアレーザ２は、次の方法で、^{87}Ｒｂ　Ｄ２ラインの$5^2S_{1/2}$の超微細状態（Ｆ＝２）と$5^2P_{3/2}$の超微細状態（Ｆ＝２～３）との間のクロスオーバー遷移に周波数ロックされる。第１の例では、第１の出力場６が、３８４，２２７，１１５ＭＨｚの周波数を有するように構成される。これは、第１の出力場６が^{87}Ｒｂ　Ｄ２ラインの$5^2S_{1/2}$（Ｆ＝２）から$5^2P_{3/2}$（Ｆ＝３）への遷移からΔ＝１，０００ＭＨｚだけ離調され、それにより、第１のＴｉ：サファイアレーザ２がｐｏｐｕｌａｔｉｏｎを$5^2P_{3/2}$状態の利用可能な超微細状態（Ｆ＝１、２または３）にするのを回避できることを意味している。
【０１６７】
その後、電気光学変調器３９は、８６７ＭＨｚの変調周波数で駆動され、対応する周波数変調を第１の出力場６に導入する。当業者であれば分かるように、電気光学変調器３９は、第１の出力場６の中心動作周波数３８４，２２７，１１５ＭＨｚに対して±８６７ＭＨｚで周波数側波帯を効率的に導入する。さらに、この変調レベルは、変調された第１の出力場６の最高周波数成分が^{87}Ｒｂ　Ｄ２ラインの$5^2S_{1/2}$（Ｆ＝２）超微細状態と$5^2P_{3/2}$（Ｆ＝２～３）超微細状態との間のクロスオーバーポイントに対応する周波数を持つように設定されている。その後、ルビジウム蒸気・飽和吸収分光法モジュール４０を、フィードバックループ電気回路４３と組み合わせて使用して、第１のＴｉ：サファイアレーザ２の共振器の一部を形成する圧電マウントミラー４２への電気フィードバック信号を生成し、第１の出力場６の動作周波数を３８４，２２７，１１５ＭＨｚに維持する。このようにして、第１の出力場６は、^{87}Ｒｂ　Ｄ２ラインの原子遷移と共鳴することなく、この原子遷移が基準とされるため、ｐｏｐｕｌａｔｉｏｎが上位の状態になるのを回避できる。
【０１６８】
当業者であれば分かるように、第１のＴｉ：サファイアレーザ２は、代替的には、電気光学変調器３９が駆動される変調周波数を適切な変調周波数に調整して、第１の出力場６に所望の周波数変調を導入することにより、$5^2S_{1/2}$（Ｆ＝２）超微細状態と$5^2P_{3/2}$（Ｆ＝１、２または３）超微細状態との間のクロスオーバー遷移の何れかに対応する周波数または実際には遷移自体の周波数にロックされる。代替的には、または組み合わせて、第１の出力場６の動作周波数も変化させることができる。
【０１６９】
動作周波数を原子遷移にロックする上記方法は、Ｔｉ：サファイアレーザ２光源の使用またはルビジウムの使用に限定されるものではない。例えば、カルシウム、セシウムまたはカリウムを、代替的な原子蒸気として使用することができる。
【０１７０】
上述したレーザシステム１は、第１のＴｉ：サファイアレーザ２の動作周波数を自動的に設定およびロックするように構成することができる。これは、周波数ロックフィードバックループ３６に組み込まれたグラフィックユーザーインターフェイス（ＧＵＩ）によって実現される。ＧＵＩから、第１のＴｉ：サファイアレーザ２の共振器電圧の反復スキャンが開始され、第１の出力場６の周波数または共振器スキャンの中心値が調整されて、Ｔｉ：サファイアレーザ２をオフセットロックする第１の出力の原子遷移に対応するスペクトル領域をカバーするように、スキャンが調整される。上記実施形態では、第１の出力場６の変調された成分の周波数側波帯は、所望のルビジウム原子遷移と共鳴しているか、または共鳴しているに近い。その後、ＧＵＩは、原子蒸気セル４０の透過率を共振器電圧の

関数として表示する。所望の原子遷移の領域では、ルビジウム原子遷移の様々な成分に対応する多数のピークが明らかになる。必要なピークにロックするには、第１のＴｉ：サファイアレーザ２をオフセットロックするピークに、ＧＵＩのカーソルを配置する。そのポイントでマウスをクリックすると、周波数ロックフィードバックループ３６の制御ソフトウェアが、第１のＴｉ：サファイアレーザ２を所望のピークに自動的にオフセットロックする。すなわち、ソフトウェアが、原子遷移の成分のピークに対応する電圧に共振器を調整し、フィードバックループまたはロックが係合される。

【０１７１】

さらに、当業者であれば分かるように、第１のＴｉ：サファイアレーザ２を原子遷移にロックする代わりに、第１のＴｉ：サファイアレーザ２を当技術分野で知られている別の基準にロックすることもできる。これは、基準キャビティであってもよく、その場合、第１のＴｉ：サファイアレーザ２は、キャビティの共振にロックされる。

【０１７２】

スレーブレーザ（ＳＬ）をマスタレーザ（ＭＬ）に位相ロック

以下、図２および図５を参照して、第２のＴｉ：サファイアレーザ３を第１のＴｉ：サファイアレーザ２に位相ロックするための位相ロックフィードバックループ３０を構成する構成要素の更なる詳細を説明する。具体的に、図５は、図２のレーザシステムの位相ロックフィードバックループ３０の電気回路を示している。

【０１７３】

位相同期プロセスの第１の段階は、例えば３８４，２３３，９５０ＭＨｚの周波数で第２の出力場７を生成するように第２のＴｉ：サファイアレーザ３を構成することである。この実施形態において、これは、^{87}ＲｂのＤ２ラインの$5^2S_{1/2}$（Ｆ＝１）超微細状態～$5^2P_{3/2}$（Ｆ＝２）超微細状態からΔ７３３ＭＨｚだけ離調する第２の出力場７を与える一方で、第２の出力場７が、^{87}Ｒｂの$5^2S_{1/2}$状態のＦ＝１の超微細状態とＦ＝２の超微細状態との間の周波数分離に対応する、第１のＴｉ：サファイアレーザ２によって生成される第１の出力場６よりも大きい６，８３５ＭＨｚの周波数を有することを意味する。その結果、第２のＴｉ：サファイアレーザ３は、ｐｏｐｕｌａｔｉｏｎを$5^2P_{3/2}$状態の利用可能な遷移超微細状態（Ｆ＝０、１または２）とするのを防ぐ。

【０１７４】

当業者であれば分かるように、上記構成により、第１の結合連続波場２５が、第１の出力場６と第２の出力場７との間の周波数差、すなわち６，８３５ＭＨｚで光ビート信号４４を生成する。位相ロックフィードバックループ３０は、この光ビート信号４４をモニタリングすることによって動作する。これは、第３の光検出器４５と第１の増幅器４６を含む光ビート検出器２９を使用して、光ビート信号４４を電気ビート信号４７に変換することによって実現される。

【０１７５】

第１の結合連続波場２５は、第２の偏光ビーム分割板２８を介した伝播に続いて単一モードファイバを介して伝播するように配置され得る。これにより、第１の結合連続波場２５の成分が空間的に完全に重なり、パワーの慎重なバランスにより、光ビート信号４４内の最大コントラスト、すなわち１００％に近い振幅変調も保証される。その後、第１の結合連続波場２５は、電子機器、具体的には第１の光ビート検出器２９の近位にあるリモートファイバ結合検出器に送信される。この構成により、高周波（マイクロ波）電気ビート信号４７の経路長が最小限に保たれ、不要な損失や、漂遊の空中無線／マイクロ波信号をピックアップする機会（「ピックアップ」）が回避される。反対に、光透過の経路長はペナルティを伴うことなく、長くなる可能性があるが、損失は非常に小さく、ピックアップに相当するものは存在しない。

【０１７６】

電気ビート信号４７は、第１の入力信号４８を位相ロックフィードバックループ電気回路４９に提供するために使用される。任意選択的には、電気ビート信号４７は、位相ロックフィードバックループ電気回路４９に到達する前に、アナログ位相シフタ５０を通過す

る。アナログ位相シフタ５０の機能の詳細は、後述する「位相シフト制御」のセクションに記載されている。さらに、電気ビート信号４７は、位相ロックフィードバックループ電気回路４９に到達する前にスケーリングすることもできる。この実施形態では、電気ビート信号４７が、第１の電気ディバイダ５１を通過し、この第１の電気ディバイダが、電気ビート信号４７の周波数を分ける（例えば、半分にする）手段を提供する。すなわち、位相ロックフィードバックループ電気回路４９への第１の入力信号４８が、約３，４１７ＭＨｚの周波数を有する。

【０１７７】

２つの基準信号５２、５３は、好ましくは、位相ロックフィードバックループ電気回路４９内で生成される。

【０１７８】

第１の基準信号５２は、好ましくは、第２の出力場７と第１の出力場６との間のスケーリングされたオフセット周波数に第２の基準信号５３の周波数を加算または減算した周波数である、すなわち約３，４００ＭＨｚが、第１の局部発振器５４によって生成される。第１の局部発振器５４は、１００ＭＨｚで動作する恒温槽付水晶発振器（ＯＣＸＯ）５５を備え、このＯＣＸＯ５５が、当該ＯＣＸＯの出力を３４倍にするように構成された周波数シンセサイザ５６に接続されている。この構成により、第１の基準信号５２が３，４００ＭＨｚの動作周波数で非常に低いノイズを示すものとなる。当業者であれば分かるように、周波数シンセサイザ５６を使用して、ＯＣＸＯ５５の１００ＭＨｚ出力信号を異なる量だけスケーリングすることができ、それにより、位相ロックフィードバックループ３０を高度に調整可能にすることができる。さらに、第２の電気ディバイダ５７を第１の局部発振器５４内に組み込んで、この構成要素に第１の基準信号５２の動作周波数に関する高い柔軟性を与えることもできる。

【０１７９】

代替的な実施形態では、第１の外部入力信号５８を第１の基準信号５２として使用することができる。

【０１８０】

代替的な実施形態では、周波数シンセサイザ５６への基準入力として、ＯＸＣＯ５５の代わりに、１００ＭＨｚでの第２の外部入力信号５９を使用することができる。

【０１８１】

第２の基準信号５３は、好ましくは、第１の基準信号５２よりも数桁低い周波数、すなわち、１０～１５０ＭＨｚの周波数で、第２の局部発振器６０によって生成される。第２の局部発振器６０は、第１のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）を含み、よって、生成された第２の基準信号５３が、動作周波数、すなわち１０～１５０ＭＨｚで非常にアジャイルなものとなる。第２の基準信号５３のノイズは付加的であるが、第１の基準信号５２よりも桁違いに小さいため、追加するノイズは周波数シンセサイザ５６の出力のノイズに比べて小さくなる。特定のアーキテクチャ（低周波数でアジャイルな第２の基準信号５３と組み合わされた高周波数で低ノイズの第１の基準信号５２）は、ノイズ性能を損なうことなくシステム１にアジリティをもたらす。

【０１８２】

その後、第１の入力信号４８と第１の基準信号５２は、位相ロックフィードバックループ電気回路４９にある第１の周波数ミキサ６１に供給される。第１の周波数ミキサ６１は、第１の入力信号４８と第１の基準信号５２をミックスダウンして二次ビート信号６２を提供するために用いられる。

【０１８３】

その後、二次ビート信号６２は、低域通過周波数フィルタ６４を介して、位相ロックフィードバックループ電気回路４９にある第２の周波数ミキサ６３に供給される。第２の基準信号５３も、第２の周波数ミキサ６３に供給される。第２の周波数ミキサ６３は、二次ビート信号６２と第２の基準信号５３とをミックスダウンして出力エラー信号６５を提供するために使用される。

【０１８４】
その後、エラー増幅器６７を介して第２のＴｉ：サファイアレーザ３へのフィードバック信号６６を制御するために、出力エラー信号６５が用いられる。実際には、第２の出力場７の周波数が３８４，２３３，９５０ＭＨｚの望ましい動作周波数からドリフトする場合、図６に示すように、出力エラー信号６５が０ボルトの位置から逸脱する。出力エラー信号６５を使用して、第２のＴｉ：サファイアレーザ３の１または複数の同調要素、すなわちレーザキャビティミラーの１つが取り付けられる低速圧電結晶６８および高速圧電結晶６９、およびキャビティ内電気光学変調器７０に対してフィードバック信号６６を制御することにより、出力エラー信号６５を最小化して、第２の出力場７を第１の出力場６と６．８３４ＧＨｚの周波数差で正確に位相ロックすることができる。この第１の出力場に対する第２の出力場７の位相ロックは、第１の出力場６の動作周波数がドリフトしても、すなわち第１の出力場６の周波数ロックが外れても、そのまま存続する。
【０１８５】
第２のＴｉ：サファイアレーザ３を特定のオフセット周波数、例えば６，８３４．６８３ＭＨｚに調整するには、粗い周波数調整が、第１の基準信号５２を設定することで処理され、微調整が、例えば第１のＤＤＳ６０により、第２の基準信号５３の周波数を設定することで処理される。第１のＤＤＳ６０は、正確に１００ＭＨｚで動作するのではなく、１０ＭＨｚ～１５０ＭＨｚの任意の周波数で動作するように設定することができる。このため、例えば、周波数６，８３４．６８３ＭＨｚを達成するには、以下の周波数が適用される。
第１の入力信号（ビート）４７：　６，８３４．６８３ＭＨｚ
第１の電気ディバイダ：５１　　２
第１の基準信号５２：　　３，４００ＭＨｚ
第２の電気ディバイダ５７：　　１
第２の基準信号５３：　　１７．３４１５ＭＨｚ
【０１８６】
上記周波数ロックフィードバックループ３６は、特定の動作周波数において、第１の出力場６と第２の出力場７との間に相対的な位相ノイズ（典型的には＜１５ｍｒａｄ）を導入することが見出されている。エラー増幅器６７における高レベルの低周波利得の状態は、これを大幅に抑制する。
【０１８７】
オフセット周波数が６．８３４ＧＨｚに設定された場合、２５ｍｓの平均化時間で、レーザシステム１のパルス出力場３５ｂにおける位相ノイズのアラン偏差は１５ｍｒａｄ未満であることが分かる。
【０１８８】
レーザシステム１は、当技術分野で知られているシステムと比較して、位相ロックレーザ源２、３の相対ノイズレベルを大幅に改善する。本出願人は、通常達成される位相ノイズレベルが２５ｍｓで、＜１５ｍｒａｄであることを見出している。しかしながら、この値は、レーザシステム１の終局限界ではないと考えられる。１５ｍｒａｄは、第１の局部発振器５４、特に、第１の基準信号５２を合成する元のＯＣＸＯ５５のノイズフロアに正確に対応することが知られている。第１の局部発振器５４内で異なるマイクロ波シンセサイザ（Ｓｐｅｃｔｒａ　Ｄｙｎａｍｉｃｓ　ＲＢ１など）、または内部シンセサイザの供給源として最高水準の１００ＭＨｚ基準を使用することにより、測定値は１ｍｒａｄレベルの相対位相ノイズを達成可能であることを示唆している。これは、ＯＣＸＯ５５を除くシステム固有のノイズフロアを反映している。そのようなパフォーマンスは、例示的なＲＦ電子設計である、機能／回路図設計、ボードレイアウト、コンポーネントの選択によるものである。それらは、最高水準の基準供給源との組み合わせにより、サブｍｒａｄレベルのパフォーマンスを実現できる。
【０１８９】
<u>自動位相ロック</u>

以下に、第２のＴｉ：サファイアレーザ３を第１のＴｉ：サファイアレーザ２に自動位相ロックする方法を説明する。

１）第２のＴｉ：サファイアレーザ３は、当初は第１のＴｉ：サファイアレーザ２にロックされていない状態にある。これは、第２のＴｉ：サファイアレーザ３の１または複数の同調要素６８、６９および／または７０へのフィードバック信号６６をオフにすることで実現される。

２）次に、第１の出力場６および第２の出力場７を、例えば３８４，２２７，１１５ＭＨｚなどの同じ周波数を有するように設定する。波長計８、９を使用して、それらの周波数の設定を支援することができる。代替的には、複数の入力を有する単一の波長計を使用するようにしてもよい。レーザシステム１内のデジタル制御ソフトウェアを使用して、それらの指定された目標波長で第１の出力場６および第２の出力場７を自動的に調整およびロックすることができる。

３）次に、第２の出力場７を周波数走査し、一方、第１の光ビート検出器２９の増幅器４６によって生成された出力パワー信号７１（すなわち、電気ビート信号４７）を、第２のＴｉ：サファイアレーザ３の周波数同調要素６８に印加される電圧の関数としてモニタリングする。図７は、第２のＴｉ：サファイアレーザ３の同調要素６８に印加される共振器電圧の関数として、（ａ）出力パワー信号７１、および（ｂ）出力パワー信号７１の導関数のグラフを示している。

４）次の段階では、（ａ）出力パワー信号７１の値がゼロ、「ゼロパワー電圧」に低下する（図７（ａ）を参照）か、または（ｂ）出力パワー信号７１の微分の係数が最大値、「最大係数パワー電圧」を有する（図７（ｂ）を参照）ときの共振器電圧を求める。これらの共振器電圧値は、第２のＴｉ：サファイアレーザ３の周波数が第１のＴｉ：サファイアレーザ２の周波数にあるか、またはそれに近い周波数にある位置に対応する。

６）次に、第２のＴｉ：サファイアレーザ３に供給される共振器電圧を、（ａ）ゼロパワー電圧、または（ｂ）最大係数パワー電圧に設定する。これは、第２のＴｉ：サファイアレーザ３の動作周波数の開始点になる。

７）次に、第１の出力場６と第２の出力場７との間の予め設定されたオフセット、例えば、＋６，８３５ＭＨｚを選択する。

８）次に、第２のＴｉ：サファイアレーザ３の同調要素６９、７０に低利得フィードバック信号６６を印加する。これは、エラー増幅器６７を低利得値で動作するように設定することによって達成される。低利得値の目的は、ロック捕捉を可能にすることである。

９）次に、第２のＴｉ：サファイアレーザ３に供給されるフィードバック信号６６の共振器電圧に反復制御法を適用して、第１の出力場６と第２の出力場７との間の周波数オフセットが予め設定されたオフセット値に対応するときの推定値に向かって共振器電圧を収束させる。

１０）共振器電圧の収束が所望の許容レベル内になったら、共振器電圧をこの推定値に設定し、第２のＴｉ：サファイアレーザ３の１または複数の同調要素６８および／または６９および／または７０に高利得フィードバック信号６６を印加する。これは、エラー増幅器６７を高利得値で動作するように設定することによって達成される。高利得設定は、ノイズを低減するために必要とされる。

【０１９０】

このようにして、自動位相ロックは、エラー増幅器の低利得設定から高利得設定への適時の段階的な遷移によって実現される。本出願人は、これがロック捕捉と低ノイズの両方を可能にするため、レーザシステム１の自動化プロセスの重要な側面であることを見出した。実際には、レーザシステム１は、これらの２つの利得設定の間で適時の段階的な遷移を実行するように構成されている。低利得設定から高利得設定に切り替える最初のコマンドに続いて、制御回路の要素（追加の抵抗器、コンデンサ、利得、増幅器）が時間に沿ったシーケンスでオンになり、パラメータ値が、予め設定されたレートで、予め設定された時間遅延に従って、初期値から最終値まで増加し得る。そのシーケンスはＧＵＩを介して設定される。設定が完了すると、プロセスは完全に自動化され、すなわち、コマンドに従

って低利得から高利得に切り替える処理が行われる。コマンドは、ＧＵＩから、またはイーサネット（ＴＣＰ／ＩＰ）命令を介して送信することができる。

【０１９１】

実際には、高利得設定は、３つの増幅器が直列に配置された３段増幅器によって提供される。これには、低周波数で三重積分利得を持つように構成できる、すなわち、各増幅器が積分器として構成されるという利点がある。利得が－１８ｄＢ／オクターブ（－６０ｄＢ／ディケード）上昇すると、低周波数で非常に高いレベルのループ内利得が発生する。これは、第１のＴｉ：サファイアレーザ２および第２のＴｉ：サファイアレーザ３が殆どのノイズを示す低フーリエ周波数での相対位相ノイズの成分を除去するのに有利である。

【０１９２】

第１の実施形態では、共振器電圧に適用される反復制御法は、位相ロックフィードバックループ電気回路４９内にある位相周波数検出器（ＰＦＤ）７２を使用することができる。この実施形態では、位相周波数検出器７２への入力信号が、（第１の周波数ミキサ６１によって生成された）二次ビート信号６２と、（第２の局部発振器６０、すなわち第１のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）によって生成された）第２の基準信号５３とによって提供される。

【０１９３】

代替的な実施形態では、単一の周波数ミキサを使用することができる。この実施形態では、第１の局部発振器５４によって提供される第１の基準信号５２および第１の入力信号４８は、位相周波数検出器７２への入力信号になるように構成されている。

【０１９４】

その後、位相周波数検出器（ＰＦＤ）７２の出力信号７３がモニタリングされる。図８は、スレーブの第２のＴｉ：サファイアレーザ３の周波数を駆動するために使用される共振器電圧の関数としての出力信号７３を示している。この出力信号７３は、ヒステリシスの性質を持ち、第２の出力場７の周波数が、第１の出力場６から所定のオフセット値だけオフセットされたときに、バイナリの高信号と低信号の間で反転する。その後、収束法を出力信号７３に適用して、バイナリの高信号と低信号の間の中点電圧を、第１の出力場６から第１の所定のオフセットにある第２の出力場７に対応する所望の許容レベル内に決定することができる。

【０１９５】

以下に詳述するように、出力信号７３に適用される反復制御法が二分法を含むことができることを当業者であれば分かるであろう。

１）高／低ロックポイントの場合、第２のＴｉ：サファイアレーザ３に印加される共振器電圧を、ゼロ出力電圧または最大係数パワー電圧から上下に調整する。

２）次に、ＰＦＤが状態を変化させるときの共振器電圧V_1を記録する。

３）次に、共振器電圧を反転し、ＰＦＤ状態が元の状態に戻るときの共振器電圧V_2を記録する。

４）第２の出力場７の周波数が第１の所定のオフセット値だけ第１の出力場６からオフセットされるときの共振器電圧の推定値、すなわち、V_1とV_2の記録値の中間値、すなわち$(V_1+V_2)/2$（図８を参照）を求める。

５）次に、１）と同じ方向に調整するように、共振器電圧を反転させる。

６）ＰＦＤの状態が変化するときの共振器電圧V_1を再び記録する。

７）共振器電圧の方向を再び反転し、ＰＦＤ状態が元の状態に戻るときの共振器電圧V_2を再び記録する。

８）第２の出力場７の周波数が第１の出力場６から第１の所定のオフセット値だけオフセットされるときの共振器電圧の第２の推定値は、V_1とV_2の最終値の中間値、$(V_1+V_2)/2$である。

９）その後、ステップ５～８を繰り返し、予め設定された回数、またはV_1とV_2の値が定数値に収束するまで、または導出値$(V_1+V_2)/2$が（許容範囲内の）定数値に収束するまで、前後にスキャンする。

【０１９６】
さらに、他の既知の収束法を、上記自動位相ロック方法論において代替的に使用することができるが理解されよう。
【０１９７】
代替的な、潜在的により正確な実施形態では、共振器電圧に適用される反復制御法は、ＲＦ周波数カウンタを用いたビート周波数の直接測定を含むことができる。そして、この測定した周波数を、第１の所定の周波数オフセット周波数と比較し、それらの値の差を最小限に抑えるように、共振器電圧を調整する。
【０１９８】
パルス出力の生成
上述したように、第２の結合連続波場２６は、第１の出力場６および第２の出力場７の直交的に、直線的に偏光された成分を含み、ｘ軸に沿って伝播して音響光学変調器システム３１に入射するように構成されている。その概略図が図２に提供されている。
【０１９９】
図２に示す実施形態では、ＡＯＭ電気回路３４は、第１の可変利得増幅器（ＶＧＡ）７５によって第１のＡＯＭ３２に電気的に接続された分散制御システム（ＤＣＳ）７４を備えることが分かる。第１のＶＧＡ７５は、好ましくは、分散制御システム（ＤＣＳ）７４の統合された構成要素である。
【０２００】
第１のＶＧＡ７５からの電気出力７６は、第１のデジタルスイッチ７７によって制御される。分散制御システム（ＤＣＳ）７４は、第１のデジタルスイッチ７７を開閉する制御信号７９を提供するために使用される第１のデジタル出力供給源７８をさらに備える。分散制御システム（ＤＣＳ）７４は、第１のＡＯＭ３２の低周波供給源８１を、例えば８０ＭＨｚで生成するために用いられる第２のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）８０をさらに備える。
【０２０１】
ＡＯＭ電気回路３４は、第１の可変利得増幅器（ＶＧＡ）７５および第１のデジタルスイッチ７７の複合効果を使用することにより、第１のＡＯＭ３２の入力駆動信号３３を生成する。特に、第１の可変利得増幅器（ＶＧＡ）７５は、第２のＤＤＳ８０からの８０ＭＨｚの出力８１を変換してパルス電気入力７６を生成する手段を提供する。第１のデジタルスイッチ７７の開閉は、パルスのオン／オフ消光を増加させる手段を提供する。また、それは、電気入力７６内のパルスのタイミングと幅の制御を向上させる手段も提供する。第１のＶＧＡ７５は、一連の電気パルス７６の形状を決定する手段も提供する。第１のＡＯＭ３２が入力駆動信号３３を受信すると、それは、電気入力７６の一連のパルスのプロファイルを結合連続波場２６の第２の成分の両方の成分に付与して、所望のパルス出力場３５を生成するように機能する。
【０２０２】
次に、代替的な音響光学変調器システム３１ｂを図９を参照して説明する。図９の音響光学変調器システム３１ｂは、図２の音響光学変調器システム３１と共通のいくつかの構成要素を共有しており、同様の部品には同じ符号が付けられている。しかしながら、この実施形態では、音響光学変調器システム３１ｂが、第２のＡＯＭ８２と、ＡＯＭ電気回路３４ｂとを含み、ＡＯＭ電気回路が、第２の可変利得増幅器（ＶＧＡ）８３によって第２のＡＯＭ８２に電気的に接続される分散制御システム（ＤＣＳ）７４ｂを含むように構成され、第２のＶＧＡからの電気出力８４が第２のデジタルスイッチ８５によって制御される。分散制御システム（ＤＣＳ）７４ｂは、第２のデジタルスイッチ８５を開閉する制御信号８７を提供するために使用される第２のデジタル出力源８６も備える。本実施形態では、第２のＡＯＭ８２の非常にアジャイルな低周波供給源８９を、例えば８０ＭＨｚで生成するために、第３のダイレクトデジタルシンセサイザ（ＤＤＳ）８８が使用されている。
【０２０３】
この実施形態では、第２の結合連続波場２６の両方の成分に電気出力７６、８４のパル

スプロファイルを付与して所望のパルス出力場３５ｂを生成するのは、駆動される第１のＡＯＭ３２および第２のＡＯＭ８２の組み合わせ効果である。図４内で「Ａ」および「Ｘ」と記された矢印で示すように、駆動された第１のＡＯＭ３２と第２のＡＯＭ８２はどちらも、第１の出力場６と第２出力場７の周波数に８０ＭＨｚを寄与するように機能する。

【０２０４】

音響光学変調器システム３１ｂには、図２の音響光学変調器システム３１の設計と比較した場合に、生成されたパルス出力場３５のプログラムされた光パルス間の暗時において、より高いレベルの消光を示すという利点がある。また、変調器システム３１ｂは、音響光学変調器システム３１と比較すると、動作のより大きな柔軟性を提供する。例えば、第１の駆動ＡＯＭ３２は、主にパルス整形をもたらすために使用され、第２の駆動ＡＯＭ８２は、生成されたパルス出力場３５ｂの各パルスのパワーを決定するために使用される。

【０２０５】

当業者であれば分かるように、可変利得増幅器（ＶＧＡ）７５、８３とそれらに関連するデジタルスイッチ７７、８５の組み合わされた効果により、音響光学変調器システム３１、３１ｂが、様々なパルス幅、間隔、形状、例えば方形パルス、ブラックマンパルスなどを有するパルス出力場３５、３５ｂを生成することが可能になる。選択した特定のパルス幅、間隔および形状は、レーザシステム１を展開するアプリケーションに応じて、ユーザが選択することができる。実際には、パルス間のタイミングジッタは１ｎｓ未満であるが、タイミング分解能は約５０ｎｓに減少している。

【０２０６】

パルス出力場３５、３５ｂは、第１の偏光ビーム分割板２３で組み合わされた第１のレーザ出力場６および第２のレーザ出力場７から生成され、レーザシステム１の残りの部分を通して共通の経路を共有する。これにより、音響光学変調器システム３１、３１ｂおよび／または高出力光ファイバ９７によってパルス出力場３５、３５ｂ内に導入されるノイズが、パルス出力場３５、３５ｂの両方の成分に共通であるという利点が得られる。

【０２０７】

次に、図１０を参照して、さらに別の音響光学変調器システム３１ｃについて説明する。図１０（ａ）の音響光学変調器システム３１ｃは、図２の音響光学変調器システム３１および図９の音響光学変調器システム３１ｂと共通のいくつかの構成要素を共有する。このため、同様の部品には同じ符号が付けられている。しかしながら、理解を容易にするために、ＡＯＭ電気回路３４は、図１０（ａ）内には提示されていない。本実施形態では、音響光学変調器システム３１ｃが、第３のＡＯＭ９０および第４のＡＯＭ９１を備える。ＡＯＭ３２、８２、９０、９１の各々に関連する可変利得増幅器およびデジタルスイッチの例示的な制御信号が、図１０（ｂ）に示されている。

【０２０８】

音響光学変調器システム３１ｃは、生成されたパルス出力場３５を３つの別個の出力３５ｃ、３５ｄ、３５ｅに分割するための手段を提供する。３つの出力３５ｃ、３５ｄ、３５ｅの各々は、ＡＯＭ３２、８２、９０、９１のうちの２つの組合せによって制御される。パルスシーケンスの生成に使用される第１のＡＯＭ３２は、すべての出力３５ｃ、３５ｄ、３５ｅに共通である。特定の各出力パスのＡＯＭ８２、９０、９１は、そのパスからの出力３５ｃ、３５ｄ、３５ｅの属性を設定するために使用される。例えば、それは（可変利得増幅器を使用して）出力のパワーレベルを設定したり、（可変利得増幅器およびデジタルスイッチを使用して）出力をオンまたはオフにしたりするために使用することができる。結果として、３つの直交軸（Ｘ、Ｙ、Ｚ）に対応する３つの出力３５ｃ、３５ｄ、３５ｅを、レーザシステム１から生成することができ、それにより、原子干渉法内で特定の用途が見出される。

【０２０９】

<u>周波数チャープ制御</u>

上記のコヒーレントに制御された量子実験のいくつかの中で、生成されたパルス出力場３５、３５ｂのパルスシーケンス中に任意の周波数掃引を実装できることが望ましい場合

が多い。次に、この機能を提供するためにレーザシステム１をどのように使用できるかについて説明する。

【０２１０】

図２および図９に示すように、分散制御システム（ＤＣＳ）７４、７４ｂは、位相ロックフィードバックループ電気回路４９内にある第１のダイレクトデジタルシンセサイザ６０にデジタル制御信号９３を提供する第３のデジタル出力源９２を備える。デジタル出力源９２がアクティブになると、デジタル制御信号９３は、第１のダイレクトデジタルシンセサイザ６０をアクティブにして、その出力周波数を制御された方法で変更させる。すなわち、予め設定された周波数チャープを第２の基準信号５３に与える。この第２の基準信号５３に誘導された周波数チャープは、第２の周波数ミキサ６３に入力される。位相ロックフィードバックループ３０が出力エラー信号６５を最小化するように構成されているため、フィードバック信号６６が、第２のＴｉ：サファイアレーザ３、すなわち第２のＴｉ：サファイアレーザ３の１または複数の同調要素、すなわちレーザキャビティミラーの１つが取り付けられた低速圧電結晶６８および高速圧電結晶６９によって生成される第２の出力場７の周波数を変えることとなり、キャビティ内電気光学変調器７０が、出力エラー信号６５を最小化するように、フィードバック信号６６に応答して調整される。これにより、周波数チャープが、第２の出力場７によって提供される第２の結合連続波場２６の成分に与えられる。分散制御システム（ＤＣＳ）７４、７４ｂを使用することにより、この周波数チャープのタイミングを正確に制御して、生成されたパルス出力場３５、３５ｂのパルスシーケンス全体にわたって予め設定された周波数チャープを導入することが可能になる。

【０２１１】

この制御された周波数チャープを導入する目的は、生成されたパルス出力場３５、３５ｂに、加速している原子と本システム内のレーザビームとの間のドップラーシフトを補償する手段を提供することである。

【０２１２】

位相シフト制御

上記のコヒーレントに制御された量子実験のいくつかの中で、生成されたパルス出力場３５、３５ｂのパルス間に任意の位相シフトを実行できることが望ましい場合が多い。次に、この機能を提供するためにレーザシステム１をどのように使用できるかについて説明する。

【０２１３】

図２および図９に示すように、分散制御システム（ＤＣＳ）７４、７４ｂは、アナログ出力源９４を備え、このアナログ出力源は、位相ロックフィードバックループ電気回路４９内あるアナログ位相シフタ５０に対して０～１０ボルトの電圧を有するアナログ制御信号９５を提供する。アナログ制御信号９５の値が０ボルトを超えると、アナログ位相シフタ５０が電気ビート信号４７に予め設定された位相シフトを導入し、それが出力エラー信号６５にオフセットを導入する。位相ロックフィードバックループ３０は出力エラー信号６５を最小限に抑えるように構成されているため、フィードバック信号６６により、第２のＴｉ：サファイアレーザ３、すなわち第２のＴｉ：サファイアレーザ３の１または複数の同調要素、すなわちレーザキャビティミラーの１つが取り付けられた低速圧電結晶６８および高速圧電結晶６９によって生成される第２の出力場７の周波数が変化し、キャビティ内電気光学変調器７０が、出力エラー信号６５を最小化するように、フィードバック信号６６に応答して調整される。これにより、第２の出力場７によって提供される第２の結合連続波場２６の成分に位相シフトが与えられる。分散制御システム（ＤＣＳ）７４、７４ｂを採用することにより、これらの位相シフトのタイミングを正確に制御して、生成されたパルス出力場３５、３５ｂの個々のパルス間に予め設定された相対位相シフトを導入することが可能になる。

【０２１４】

パワー出力モニタ

図２に示すように、レーザシステム１からのパルス出力場３５は、高出力光ファイバ９７内に結合される前に、パワー出力モニタ９６を通過する。高出力光ファイバ９７は、パルス出力場３５をレーザシステム１からその必要な目的地に伝播する手段を提供する。

【０２１５】

パワー出力モニタ９６は、第６のビームスプリッタ９８、第４の光検出器９９および第５の光検出器１００を含むことがわかる。第６のビームスプリッタ９８は、第６のピックオフ場１０１が第４の光検出器９９に入射するように配置され、それにより、パルス出力場３５が高出力光ファイバ９７内に結合される前に、レーザシステム１のパワー出力をモニタリングする手段を提供する。

【０２１６】

第６のビームスプリッタ９８は、パルス出力場３５の一部が、高出力光ファイバ９７を介して所望の目的地まで伝播し、反射して高出力光ファイバ９７を通って戻ると、それを第５の光検出器１００に入射させるように導くようにさらに構成されている。その結果、第５の光検出器１００は、パルス出力場３５が展開されることが意図されている目的地でのパワー出力をモニタリングするための手段を提供する。

【０２１７】

また、パワー出力モニタ９６は、第７のビームスプリッタ１０２も含み、この第７のビームスプリッタは、高出力光ファイバ９７のリモートエンドに展開される第６の光検出器１０４のための第７のピックオフ場１０３を生成するために使用される。このため、第６の光検出器は、パルス出力場３５が展開されることが意図されている目的地でのパワー出力をモニタリングするための第２の手段を提供する。

【０２１８】

当業者であれば分かるように、レーザシステム１の効率は時間とともに変化する可能性があり、そのため、パルス出力場３５のパワーが、オペレータによって行われる実験の期間中一定のままであることを保証することはできない。このため、正確な出力パワー設定での動作を改善するには、第４の光検出器９９から音響光学変調器システム３１に第３のパワーフィードバックループ１０５を確立することが有用である。同様に、第５の光検出器１００から音響光学変調器システム３１まで第４のパワーフィードバックループ１０６を確立し、第６の光検出器１０４から音響光学変調器システム３１まで第５のパワーフィードバックループ１０７を確立することが好ましい。このように、パルス出力場３５のパワーは、第４の光検出器９９および／または第５の光検出器１００および／または第６の光検出器１０４を介してモニタリングされ、その後、必要に応じてレーザシステム１に自動調整を提供することができる。これは、フィードバックループ１０５、１０６、１０７を使用して、ＤＣＳ７４のアナログ入力としてフィードバック信号を提供することによって達成することができ、ＤＣＳ７４は、アナログ入力をデジタル化するように機能する。その後、デジタル化された信号は、第１の音響光学変調器３２および／または第２の音響光学変調器８２を駆動するために使用される電気パルス信号７６、８４の振幅を変化させる手段を提供する。

【０２１９】

代替的には、フィードバックループ１０５、１０６を使用して、パルス出力場３５と高出力光ファイバ９７との間のアライメントを調整することができる。その結果、パワー出力モニタ９６を使用して、

１．高出力光ファイバ９７に入るパワー、
２．高出力光ファイバ９７の後のパワー、
３．高出力光ファイバ９７を２回通過した後の戻りビームのパワー、
４．高出力光ファイバ９７の近位端に入る出力のアライメント、および
５．高出力光ファイバ９７の遠位端に入る戻りビームのアライメント

を制御することができる。

【０２２０】

位相ノイズモニタ

次に、図５および図１１を参照して、レーザシステム１ｂの代替的な実施形態で使用される位相ノイズモニタ１０８について説明する。理解を容易にするために、レーザシステム１ｂから次の構成要素が省略されている。

１）第１のＴｉ：サファイアレーザ２のための周波数ロックフィードバックループ３６

２）パルス出力場３５を生成するために使用される音響光学変調器システム３１

３）パワー出力モニタ９６

【０２２１】

システムの柔軟性をさらに際立たせるために、カルシウム－４３（$^{43}Ca^{+}$）の$4S_{1/2}$から$4P_{1/2}$（３９７ｎｍ）への原子遷移、３．２ＧＨｚである$4S_{1/2}$グランド状態の分離を使用して、レーザシステム１ｂを説明する。

【０２２２】

上記と同様の方法で、位相ロックフィードバックループ３０を使用して、第２のＴｉ：サファイアレーザ３を第１のＴｉ：サファイアレーザ２に位相ロックする。これは、７９４ｎｍで第１の出力場６を生成するように第１のＴｉ：サファイアレーザ３を設定することで実現される。その後、７９４ｎｍに１．６ＧＨｚの予め設定されたオフセットを加えた周波数で第２の出力場７を生成するように第２のＴｉ：サファイアレーザ３が設定される。

【０２２３】

第８のビームスプリッタ１０９は、第２のビームステアリングミラー１１１および第９のビームスプリッタ１１２を介して第３の光検出器４５に向けられる第８のピックオフ場１１０を生成するように、第１の出力場６内に配置されている。同様に、第１０のビームスプリッタ１１３が第２の出力場７内に配置されて、ビームスプリッタ１１２により第３の光検出器４５に導かれる第９のピックオフ場１１４を生成する。当業者であれば分かるように、上記構成は、第１の出力場６と第２の出力場７との間の周波数差、すなわち１．６ＧＨｚで光ビート信号４４を生成する結合連続波場２５をもたらす。位相ロックフィードバックループ３０は、この光ビート信号４４を再びモニタリングすることによって動作する。これは、第３の光検出器４５および第１の増幅器４６を含む光ビート検出器２９を使用して、光ビート信号４４を電気ビート信号４７に変換することによって達成される。

【０２２４】

電気ビート信号４７は、位相ロックフィードバックループ電気回路４９に第１の入力信号４８を提供するために再び使用される。位相ロックフィードバックループ電気回路４９のために、第１の基準信号５２および第２の基準信号５３が再び生成される。

【０２２５】

本実施形態では、第１の基準信号５２が、第２の出力場７と第１の出力場６との間のオフセット周波数、すなわち約１．６ＧＨｚに第２の基準信号５３の周波数を加算または減算した周波数で、第１の局部発振器５４により生成される。すなわち、恒温槽付水晶発振器（ＯＣＸＯ）５５が１００ＭＨｚで動作し、周波数シンセサイザ５６が、ＯＣＸＯ５５の出力を予め設定された係数、例えば、１５または１７で乗算するように構成される。この構成により、約１．５ＧＨｚまたは１．７ＧＨｚの周波数を有する非常に低いノイズの第１の基準信号５２がもたらされる。

【０２２６】

第２の基準信号５３は、第２の局部発振器（第１のＤＤＳ）６０によって、第１の基準信号５２よりも数桁低い周波数、すなわち１０～１５０ＭＨｚの周波数で再び生成される。

【０２２７】

第１の入力信号４８と第１の基準信号５２は、位相ロックフィードバックループ電気回路４９にある第１の周波数ミキサ６１に供給される。第１の周波数ミキサ６１は、第１の入力信号４８および第１の基準信号５２をミックスダウンして二次ビート信号６２を提供するために再び用いられる。

【０２２８】

その後、二次ビート信号６２は、低域通過周波数フィルタ６４を介して、位相ロックフ

ィードバックループ電気回路４９にある第２の周波数ミキサ６３に供給される。第２の基準信号５３は、第２の周波数ミキサ６３にも供給される。このため、周波数ミキサ６３は、二次ビート信号６２および第２の基準信号５３をミックスダウンして出力エラー信号６５を提供するために使用され、その後、出力エラー信号は、エラー増幅器６７を介して第２のＴｉ：サファイアレーザ３へのフィードバック信号６６を制御するために使用され、その結果として、第２の出力場７が、第１の出力場６と正確に位相ロックされる。

【０２２９】

図１１に破線で示すように、位相ノイズモニタ１０８は、Ｔｉ：サファイアレーザ２、３からいくらか離れて配置されるものであってもよい。位相ノイズモニタ１０８は、第２の光ビート検出器１１５を備えることが分かる。この第２の光ビート検出器は、第１の出力場６と第２の出力場７の第２の結合場１１７から第２の電気ビート信号１１６を生成するために用いられる。その後、第２の電気ビート信号１１６は、位相ロックフィードバックループ電気回路４９に第２の入力信号１１８を提供するために使用される。

【０２３０】

第３の基準信号１１９は、好ましくは１００ＭＨｚの周波数を有する第３の外部入力信号１２０によって生成されて、位相ロックフィードバックループ電気回路４９の第２の周波数シンセサイザ１２１に接続されるようにしてもよく、第２の周波数シンセサイザは、第１の動作周波数からの第３の予め設定されたオフセット周波数と一致するように第３の外部入力信号１２０を乗算するように構成されるようにしてもよい。

【０２３１】

図５に示すように、第２の入力信号１１８と第３の基準信号１１９は、位相ロックフィードバックループ電気回路４９にある第３の周波数ミキサ１２２に供給される。第３の周波数ミキサ１２２は、第３の外部信号１１８および第３の基準信号１１９をミックスダウンして第２の出力エラー信号１２３を生成するために用いられ、第２の出力エラー信号は、補助増幅器１２５を介して第１の局部発振器５４への第２のフィードバック信号１２４を制御するために使用される。本実施形態では、制御フィードバック信号１２４は、ＯＣＸＯ５５に提供される。代替的には、制御フィードバック信号１２４は、ＯＣＸＯ５５または周波数シンセサイザ５６の後に位置するアナログ位相シフタに提供することができる。

【０２３２】

本実施形態では、第２の結合場１１７が、符号６ｂ、７ｂによって表される第１の出力場６および第２の出力場７の周波数二倍化要素から生成されることが分かる。周波数二倍化要素６ｂ、７ｂは、標準的な周波数二倍化技術によって、すなわち第１の出力場６および第２の出力場７が周波数二倍化結晶１２６を通って伝播して３９７ｎｍの波長を生成するように構成することによって、生成される。適切な周波数二倍化結晶１２６の例には、ニオブ酸リチウム（ＬｉＮｂＯ$_3$）、リン酸チタニルカリウム（ＫＴＰ＝ＫＴｉＯＰＯ$_4$）および三ホウ酸リチウム（ＬＢＯ＝ＬｉＢ$_3$Ｏ$_5$）が含まれる。当業者であれば分かるように、この実施形態では、第３の基準信号１１９を、第１の主力場６および第２の出力場７間の予め設定されたオフセットの２倍の周波数、例えば３．２ＧＨｚで生成する必要がある。

【０２３３】

当業者であれば分かるように、周波数二倍化結晶１２６を使用しない別の実施形態、例えば、ルビジウム－８７（^{87}Ｒｂ）Ｄ２ライン（５^{2}Ｓ$_{1/2}$→５^{2}Ｐ$_{3/2}$）で動作するように構成された上記レーザシステム１では、第３の基準信号１１９を、第１の出力場６および第２の出力場７間の予め設定されたオフセット、例えば６，８３５ＭＨｚに実質的に等しい周波数で生成する必要がある。

【０２３４】

位相ノイズモニタ１０８によって調整される制御フィードバック信号１２４は、実験動作中に第１の出力場６または６ａと第２の出力場７または７ｂとの間に導入される相対位相シフトをモニタリングおよび補償する手段を効果的に提供する。この機能は、第１の出力場６または６ｂおよび第２の出力場７または７ｂが共通の経路を共有しない場合に有利

である。位相ノイズモニタ１０８は、第２の電気ビート信号１１６によるリモート検出点までの非共通経路内に導入される低周波位相ノイズを効果的に除去する。当業者であれば分かるように、この検出点は、相対位相ノイズが影響する相互作用領域に可能な限り近くに、またはそれを超えて位置するものあってもよい。

【０２３５】

注目すべき点は、制御フィードバック信号１２４が、レーザシステム１ｂに導入される低周波位相ノイズを補償するために使用されているため、補助増幅器１２５の利得帯域幅は、位相ロックフィードバックループ３０内で使用されるエラー増幅器６７の利得帯域幅よりも大幅に低くなり（約５ｋＨｚ）、すなわち、エラー増幅器６７の＞５００ｋＨｚと比較して、補助増幅器１２５の約５ｋＨｚの利得帯域幅となる。

【０２３６】

上述したレーザシステムは、当技術分野で知られているシステムよりも優れた多くの利点を提供する。このシステムは、固体レーザをベースにしているため、ダイオードレーザをベースにしたものよりも高い周波数構成可能性と本質的に低い周波数ノイズレベルを示す。また、固体レーザは、ダイオードレーザよりも非常に高い出力パワーで動作し、そのため、ノイズを誘発したり、ビームプロファイルを歪ませたり、２つの位相ロックダイオードレーザ間に不要な位相シフトを誘発したりすることが知られている光増幅器を使用する必要がない。

【０２３７】

上記レーザシステムは、第１および第２の光学場の動作周波数の間のユーザ定義の予め設定されたオフセット周波数（通常は数ＧＨｚのオーダーである）で位相ロックすることができる。これは、予め設定されたオフセット周波数の周囲で低ノイズと高いアジリティの両方を発揮しながら、高い正確性で達成される。

【０２３８】

パルス発生器を含むことにより、レーザシステムから一連の光パルスを発生させる手段が提供され、その数、持続時間および形状はすべて、ユーザが選択することができる。さらに、パルス発生器は、複数のパルス出力がレーザシステムによって生成される手段を提供する。

【０２３９】

さらに、位相ロックフィードバックループ内に第２の基準信号生成器が存在することで、レーザシステムの出力場内に含まれる一連のパルス全体に予め設定された周波数チャープを導入できるようにする新規な手段が提供される。

【０２４０】

さらに、位相ロックフィードバックループ内にアナログ出力源を組み込むことにより、レーザシステムの出力場の個々のパルスに予め設定された位相シフトを導入できるようにする新規な手段が提供される。

【０２４１】

位相ノイズモニタを含むことにより、非共通経路に沿って伝播する光学場に起因して位相ロックされた出力場に導入される低周波相対位相ノイズを効果的に補償する手段が提供される。

【０２４２】

レーザシステムは高度に自動化することができる。例えば、位相ロックフィードバックループ電気回路は、第１および第２の波長計とともに使用されて、第１の出力場および第２の出力場の周波数を自動的に調整およびロックすることができる。同様に、第１の出力場に対する第２の出力場の周波数の位相ロックは、位相ロックフィードバックループ電気回路の使用によって完全に自動化することができる。

【０２４３】

エラー増幅器の自動制御により、高利得設定に切り替えてノイズを低減する前に、低利得値を設定してロック捕捉を可能にすることができる。

【０２４４】

位相ロックフィードバックループ電気回路および／または分散制御システム（ＤＣＳ）の採用により、レーザシステム内の位相ロックおよび／またはパルス生成を制御するための手段が提供される。パルスシーケンスと位相ロックパラメータの設定は、リモートイーサネット（ＴＣＰ／ＩＰ）コマンドを使用して実行することができる。これは、シーケンスを初期化する前に行うことも、シーケンスの途中で「オンザフライ」で行うこともできる。シーケンスの開始は、ＤＣＳ（デジタルトリガー）へのデジタル入力によってトリガーすることもでき、これにより、レーザシステムを、それが展開されているアプリケーションの制御システムと同期させることが可能になる。

【０２４５】

分散制御システム（ＤＣＳ）は、レーザシステムからのパルス出力の高速制御も可能にする。これにより、ユーザは、レーザシステムを展開するアプリケーションに応じて、パルスパワー、幅、間隔および形状を容易に設定することができる。分散制御システム（ＤＣＳ）は、生成されたパルス出力場のパルスシーケンス全体に導入されるタイミング位相シフトおよび周波数チャーピングの自動で正確な制御も可能にする。

【０２４６】

上記特徴はすべて、開示のレーザシステムを、例えば原子干渉法、ジャイロスコープ、精密重力計および重力勾配計などのコヒーレント制御二状態量子システム内での使用に理想的に適合させる。レーザシステムは、量子情報処理、特にトラップされたイオンの超微細準位に基づく量子ビットまたはキュービットの生成と制御に理想的なレーザ源も提供する。

【０２４７】

２つの位相ロックされた固体レーザ源を含むレーザシステムが記載されている。レーザシステムは、レーザの動作周波数間の予め設定されたオフセットで位相ロックすることができる。これは、予め設定されたオフセット周波数の周囲で低ノイズと高いアジリティの両方を発揮しながら、高精度で達成される。パルス発生器を使用して、レーザシステムから一連の光パルスを生成することができ、その数、持続時間および形状は、すべてユーザが選択することができる。位相ロックフィードバックループは、生成された一連のパルス全体に予め設定された周波数チャープと位相シフトを導入する手段を提供する。レーザシステムは高度に自動化することができる。上記特徴は、レーザシステムを、例えば原子干渉法、ジャイロスコープ、精密重力計および重力勾配計などのコヒーレント制御二状態量子システム、および量子情報処理、特に量子ビットの生成と制御における使用に理想的に適合させる。

【０２４８】

明細書全体を通して、文脈が他を要求しなければ、「備える」若しくは「含む」という用語、または「備え」若しくは「備えている」、「含み」若しくは「含んでいる」のような活用形は、記載した数または数の群を包含するが、他の数または数の群の除外を意味するものではないと理解されるべきである。

【０２４９】

さらに、本明細書における任意の先行技術への言及は、先行技術が一般的な一般知識の一部を形成することを示すものとして解釈されるべきではない。

【０２５０】

本発明の上記詳細な説明は、例示および説明の目的のために示され、排他的なものではなく、または本発明を開示された正確な形態に限定することを意図していない。記載された実施形態は、本発明の原理およびこれらの実際の適用を最良に説明するために選択されて説明され、これらによって他の当業者が、考えられる特定の使用に適した様々な変更を伴う本発明の様々な実施形態を最適に利用することが可能になる。したがって、添付の特許請求の範囲により規定される本発明の範囲から逸脱することなく、さらなる変更または改良が包含される。

【図面】

【図１】

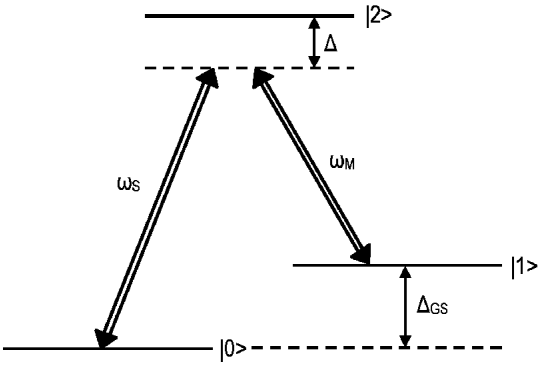


Fig. 1

【図２】

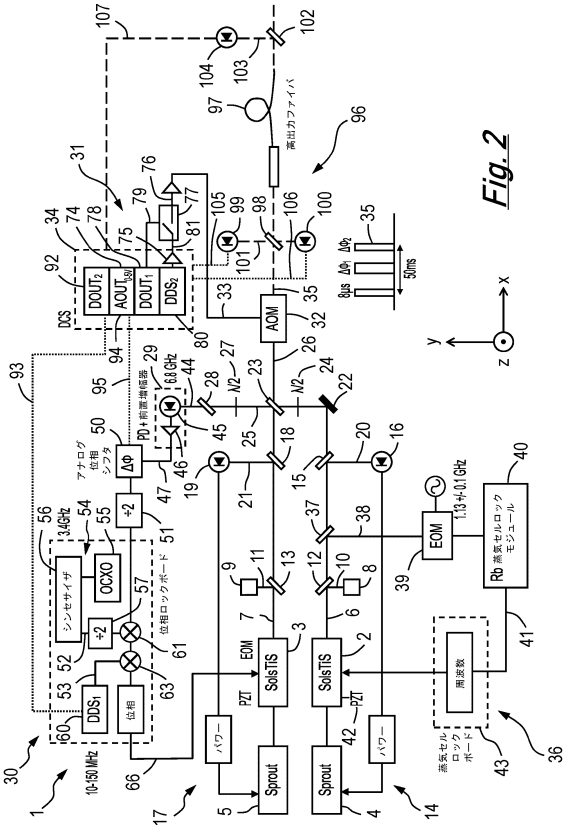


Fig. 2

【図３】

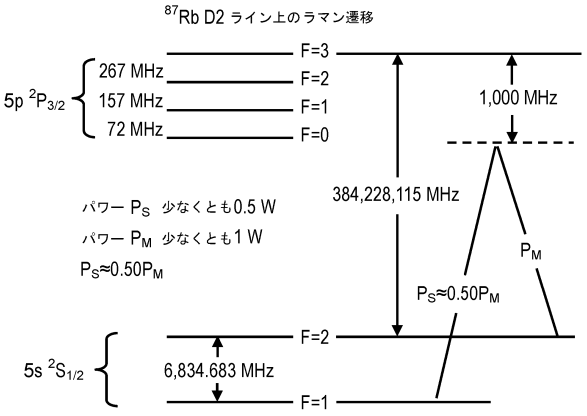


Fig. 3

【図４】

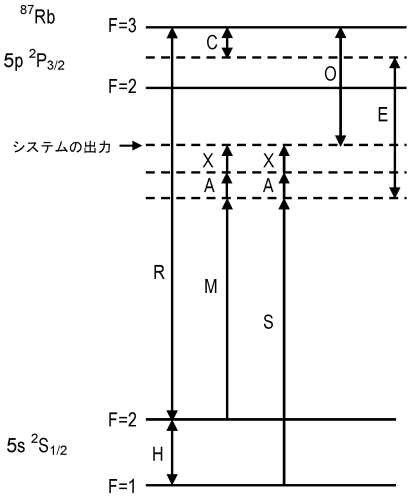


Fig. 4

【図５】

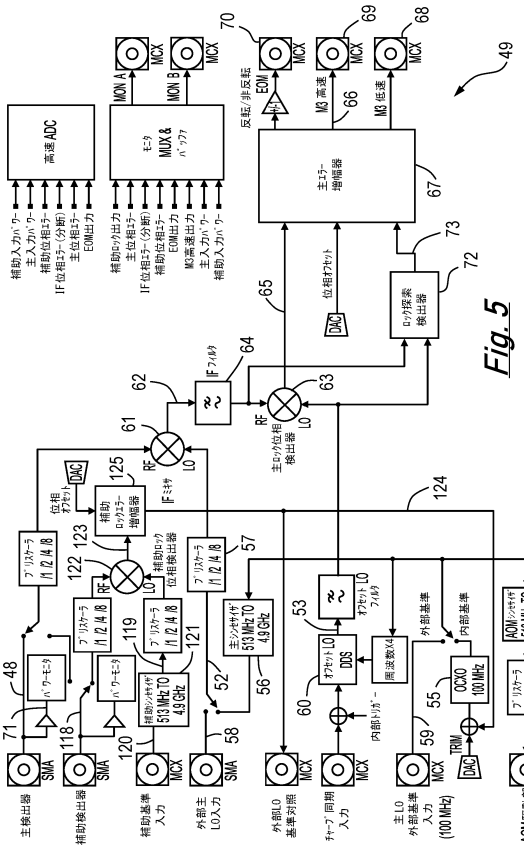


Fig. 5

【図６】

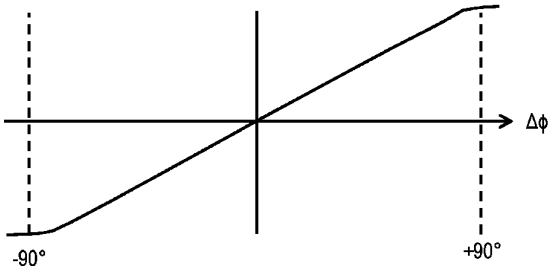


Fig. 6

【図７】

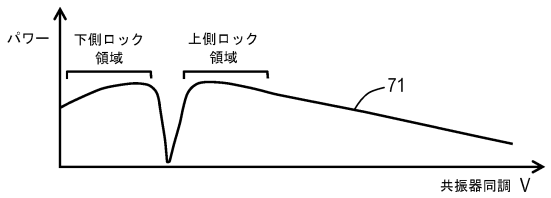


Fig. 7(a)

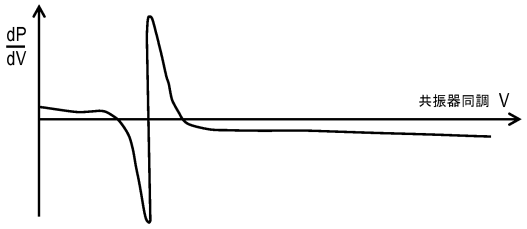


Fig. 7(b)

【図８】

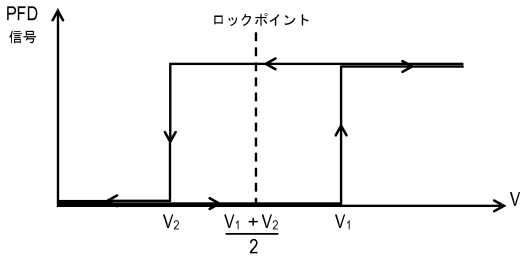


Fig. 8

【図９】

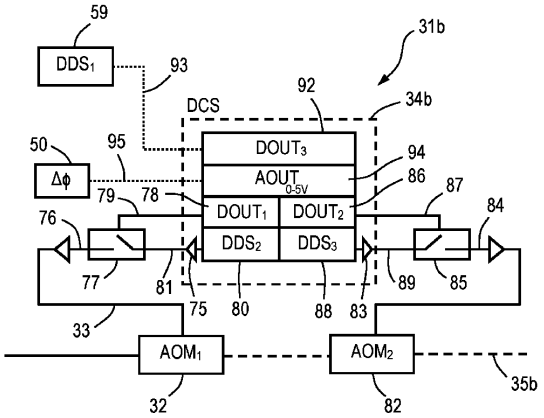


Fig. 9

【図１０（ａ）】

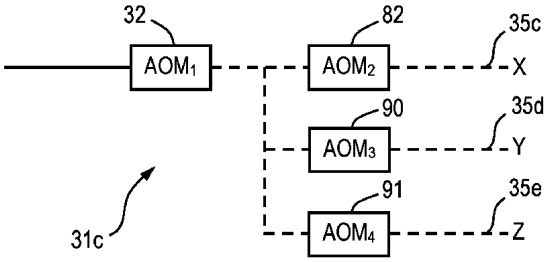


Fig. 10(a)

【図１０（ｂ）】

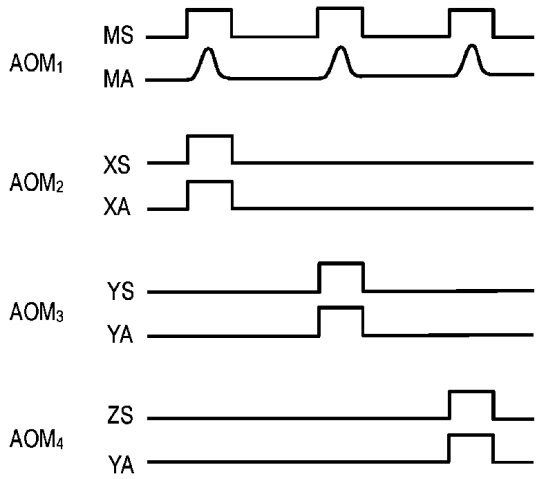


Fig. 10(b)

【図１１】

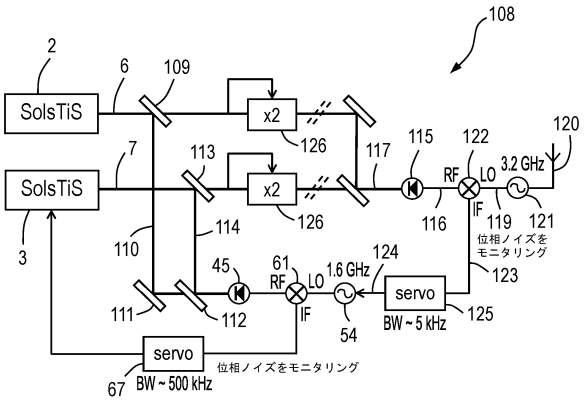


Fig. 11

フロントページの続き

スコットランド サイエンス パーク，ケルビン キャンパス １，ベンチャー ビルディング，シー／オー エム スクエアード レーザーズ リミテッド
(72)発明者 ウェブスター，スティーヴン
イギリス ストラスクライド州 ジー２０ ０エスピー，グラスゴー，ウエスト オブ スコットランド サイエンス パーク，ケルビン キャンパス １，ベンチャー ビルディング，シー／オー エム スクエアード レーザーズ リミテッド
審査官 右田 昌士

(56)参考文献
特開２０１１－１４６７８６（ＪＰ，Ａ）
特開平０３－１２０７７４（ＪＰ，Ａ）
特開平０２－１５１１２２（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－０５６１２０（ＪＰ，Ａ）
特開２００６－２４５１７９（ＪＰ，Ａ）
米国特許出願公開第２０１０／０３０３１１１（ＵＳ，Ａ１）
中国特許出願公開第１０７１０４３５４（ＣＮ，Ａ）
SCHMIDT Malte et al.，A portable laser system for high precision atom interferometry experiments， Applied Physics B，vol.102，2010年09月27日，p.1-8
KWON Taeg Yong et al.，Development of an intensity stabilized laser system with frequency offset of 9.2GHz，Japanese Journal of Applied Physics，vol.42, no.8A L924，2003年08月01日，L924-926
COURDE C et al.，Elimination of systematic errors in two-mode laser telemetry，Measurement science and technology，vol.20, no.12，2009年12月01日
TULCHINSKY David A et al.，Characteristics and performance of offset phase locked single frequency heterodyned laser systems，Review of scientific instruments，87 ，2016年05月04日，053107-1-053107-15

(58)調査した分野 (Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｓ １／００ － ３／３０
Ｈ０１Ｓ ５／００ － ５／５０
Ｇ０２Ｆ １／００ － １／１２５
Ｇ０２Ｆ １／２１ － ７／００
Ｇ０１Ｂ ９／００ － ９／１０