

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-103498
(P2017-103498A)

(43) 公開日 平成29年6月8日(2017.6.8)

(51) Int.Cl.		F I		テーマコード (参考)
HO 1 S 5/0687 (2006.01)		HO 1 S	5/0687	5 F 1 7 3
HO 1 S 5/183 (2006.01)		HO 1 S	5/183	
HO 1 S 5/125 (2006.01)		HO 1 S	5/125	
HO 1 S 5/14 (2006.01)		HO 1 S	5/14	

審査請求 有 請求項の数 14 O L (全 25 頁)

(21) 出願番号 特願2017-47297 (P2017-47297)
 (22) 出願日 平成29年3月13日 (2017.3.13)
 (62) 分割の表示 特願2014-521857 (P2014-521857) の分割
 原出願日 平成24年7月21日 (2012.7.21)
 (31) 優先権主張番号 61/510,765
 (32) 優先日 平成23年7月22日 (2011.7.22)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 514017622
 インサイト フォトニック ソリューショ
 ンズ, インコーポレイテッド
 アメリカ合衆国 80026 コロラド州
 、ラファイエット, S. パブリック ロー
 ド 300, スイート 201
 (74) 代理人 110001427
 特許業務法人前田特許事務所
 (72) 発明者 マイケル ミネマン
 アメリカ合衆国 80026 コロラド州
 、ラファイエット, S. パブリック ロー
 ド 300, スイート 201

最終頁に続く

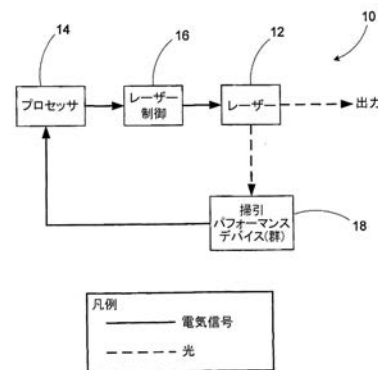
(54) 【発明の名称】 波長連続及び規定された時間に対する波長掃引をレーザーから動的及び適応的に生成するシステム及び方法

(57) 【要約】

【課題】 掃引レーザーシステムにおいて掃引範囲における不連続性を低減する。

【解決手段】 半導体レーザー源(12)、レーザー制御ユニット(16)、掃引パフォーマンスモニタリングデバイス(18, 26)、プロセッサ(14)、を備え、掃引における複数の点のうちのそれぞれの点における複数の制御電流は、掃引全体に適用される掃引後のフィードバックループを用いて、前記掃引パフォーマンスモニタリングデバイスからのデータに基づいて、所望の波長対時間プロファイルをつくるように調整される掃引レーザーシステム(10, 20)。

【選択図】 図4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

放射掃引における波長の範囲にわたって離散的に放射を出力するよう動作可能である半導体レーザー源（12）、

前記半導体レーザー源に動作可能に結合されたレーザー制御ユニット（16）であって、

前記半導体レーザー源は、レーザー制御ユニットから入力信号を受け取り、前記入力信号に基づいて前記波長の範囲にわたって前記放射を離散的に変化させるよう構成され、

前記入力信号は、前記出力された放射の特性を決定するよう前記半導体レーザー源を制御する複数の制御電流を含み、

温度、湿度、環境要因、及び要素のエージングは、前記出力される放射の波長にも影響する、

レーザー制御ユニット（16）、

前記掃引中に前記半導体レーザー源の出力に関連する少なくとも1つの物理的特性をモニタリングするよう構成され、前記少なくとも1つの物理的特性は、波長、光電力、サイドモード抑圧比、及び位相からなるグループから選択された少なくとも1つの物理的特性である、掃引パフォーマンスモニタリングデバイス（18, 26）、

前記レーザー制御ユニットが、規定された掃引パフォーマンス特性のセットへの適合を達成するよう前記半導体レーザー源を制御し、1スweepより長い周期の時間にわたってチューニングマップに影響する、前記出力される放射に対する前記要素の温度、湿度、環境要因、及び要素のエージングによる影響を補償するように構成するプロセッサ（14）

を備え、

前記掃引における複数の点のうちのそれぞれの点における複数の制御電流は、掃引全体に適用される掃引後のフィードバックループを用いて、前記掃引パフォーマンスモニタリングデバイスからのデータに基づいて、所望の波長対時間プロファイルをつくるように調整される

掃引レーザーシステム（10, 20）。

【請求項 2】

前記掃引パフォーマンスモニタリングデバイスは、波長モニタリングデバイス、光電力モニタリングデバイス、位相モニタリングデバイス、電圧モニタリングデバイス、及び電流モニタリングデバイス、及び波長に対する光電力又はサイドモード抑圧比を測定する光電力モニタからなるグループから選択された少なくとも1つのデバイスである

請求項 1 に記載の掃引レーザーシステム。

【請求項 3】

前記プロセッサは、

前記範囲にわたって放射出力における波長不連続性を最小にするよう構成され、又は

前記半導体レーザー源がある単一縦モードから他の単一縦モードに同調する時に、前記半導体レーザー源の波長変化の大きさを低減する

よう構成される

請求項 1 に記載の掃引レーザーシステム。

【請求項 4】

前記規定された掃引パフォーマンス特性は、

波長及び時間、又は光周波数及び時間の間の直線的な関係、

媒体における影響を補償するための波長及び時間の間の非直線的な関係、

波長に対して一定であるか、又は波長に対してガウス分布である、時間に対する掃引

高速フーリエ変換窓関数のエミュレーション、又は

周波数及び/又は波長についての光学システム損失の補償

のうちの少なくとも1つを含む

10

20

30

40

50

請求項 1 に記載の掃引レーザーシステム。

【請求項 5】

放射掃引における波長の範囲にわたって放射を出力する半導体レーザー源 (1 2) を制御する方法であって、

出力される放射の波長を決定するよう前記半導体レーザー源を制御する複数の制御電流を含む入力信号を受け取り、前記入力信号に基づいて前記波長の範囲にわたって前記放射を離散的に変化させるよう構成された半導体レーザー源から、波長の範囲にわたって放射を出力すること、

前記掃引の間に前記波長の範囲にわたった前記放射に関連する少なくとも 1 つの物理的特性に関連するデータを検出すること、

規定された掃引パフォーマンス特性のセットへの適合を達成するよう前記データを処理し、前記半導体レーザー源への入力信号を変化させ、1 スイープより長い周期の時間にわたってチューニングマップに影響する、温度、湿度、環境要因、及び要素のエイジングによる前記出力される放射に対する影響を補償することを含み、

前記掃引における複数の点のうちのそれぞれの点における複数の制御電流は、掃引全体に適用される掃引後のフィードバックループを用いて、前記掃引パフォーマンスモニタリングデバイスからのデータに基づいて、所望の波長対時間プロファイルをつくるように調整される

方法。

【請求項 6】

前記データは、

前記範囲においてレーザーの掃引中の波長不連続性の数を最小化するか、又は

半導体レーザー源がある単一縦モードから他の単一縦モードに同調する時に、前記半導体レーザー源の波長変化の大きさを低減する

よう処理される、

請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

一定 (constant) 単一縦モードにおいて前記レーザーをチューニングすること

をさらに含む請求項 6 に記載の方法。

【請求項 8】

前記波長の範囲にわたった前記放射に関連する少なくとも 1 つの物理的特性に関連するデータを検出することは、規定された掃引パフォーマンス特性のセットへの適合を達成するよう、前記データを処理すること、又は前記半導体レーザー源への入力信号を変化させることを含む請求項 5 に記載の方法。

【請求項 9】

掃引レーザーシステム (1 0 , 2 0) であって、

波長チューニングメカニズム及びレーザーパス長チューニングメカニズムであって、前記チューニングメカニズム群は、1 つ以上のパラメータをレーザー源に前記入力信号として与えることによって、レーザー共振器の 1 つのモードより大きく離れたある波長から他の波長への放射の掃引を出力するよう半導体レーザー源 (1 2) が動作するよう構成され、温度、湿度、環境要因、及び要素のエイジングは、前記半導体レーザー源によって出力される放射の波長に影響する、波長チューニングメカニズム及びレーザーパス長チューニングメカニズム、

前記出力された放射に関連する少なくとも 1 つの物理的特性に関連するデータを検出するよう構成された 1 つ以上の波長モニタリングデバイス (1 8)、及び

前記 1 つ以上の波長モニタリングデバイス及び前記チューニングメカニズム群に結合されたプロセッサ (1 4) であって、前記プロセッサは、前記波長モニタリングデバイスからのデータを分析し、波長掃引での波長不連続性における波長チューニング及び共振器長チューニングを調整することによって前記波長不連続性を低減し、1 スイープより長い周期の時間にわたってチューニングマップに影響する、前記出力される放射に対する温度、

10

20

30

40

50

湿度、環境要因、及び要素のエージングによる影響を補償する、プロセッサを備え、

前記掃引における複数の点のうちのそれぞれの点における複数の制御電流は、掃引全体に適用される掃引後のフィードバックループを用いて、前記掃引パフォーマンスモニタリングデバイスからのデータに基づいて、所望の波長対時間プロファイルをつくるように調整される

掃引レーザーシステム。

【請求項 10】

前記レーザー源は、前記レーザー源の波長範囲の全体にわたって共振器の単一縦モードで動作するよう構成される

請求項 9 に記載の掃引レーザーシステム。

10

【請求項 11】

前記レーザー源は、サンプルグレーティング分布ブラッグ反射器 (SGDBR) レーザー又は垂直共振器面発光レーザー (VCSEL) を備える

請求項 10 に記載の掃引レーザーシステム。

【請求項 12】

利得媒体、及び前記レーザー源に動作可能に結合された前記利得媒体の外部にある調整可能な共振器をさらに含む

請求項 10 に記載の掃引レーザーシステム。

【請求項 13】

前記波長モニタリングデバイスは、

干渉計、及び前記干渉計を通して伝搬された、又は前記干渉計によって反射された光の光強度検出器、

自由スペクトル領域が異なる 2 つの干渉計、

温度安定化エタロン、

温度安定化されたファイバブラッググレーティング、又は

ガスセル

のうちの少なくとも 1 つを含む

請求項 9 に記載の掃引レーザーシステム。

20

【請求項 14】

チューナブルレーザーの開始波長から停止波長への掃引における波長不連続性を低減する方法であって、

1 つ以上のパラメータを持つ半導体レーザー (12) をチューニングすることによって、初期波長から最終波長まで前記半導体レーザーを掃引することであって、前記半導体レーザーは、前記 1 つ以上のパラメータを入力信号として受け取るよう構成され、温度、湿度、環境要因、及び要素のエージングは、前記半導体レーザーによって出力される光の波長に影響する、チューニングすること、

少なくとも 1 つの波長測定デバイス (26) によって前記半導体レーザーからの光の少なくとも 1 つの物理的特性を測定すること、

前記少なくとも 1 つの波長測定デバイスからのデータをプロセッサ (14) に結合すること、及び

30

40

レーザー制御パラメータを調整し、前記掃引における前記波長不連続性を低減することによって、規定された掃引パフォーマンス特性のセットへの適合を達成し、1 スweep より長い周期の時間にわたってチューニングマップに影響する、前記出力される放射の波長に対する温度、湿度、環境要因、及び要素のエージングによる影響を補償するよう前記データを処理すること

を含み、

前記掃引における複数の点のうちのそれぞれの点における複数の制御電流は、掃引全体に適用される掃引後のフィードバックループを用いて、前記掃引パフォーマンスモニタリングデバイスからのデータに基づいて、所望の波長対時間プロファイルをつくるように調整される

50

方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本願は、2011年7月22日に出願された米国仮出願番号61/510,765の利益を主張する、2012年7月21日に出願され英語で公開された国際出願番号PCT/US2012/047770の国内段階であり、前記仮出願はここで参照によって援用される。

【0002】

本発明は、光コヒーレンストモグラフィー(OCT)、光周波数領域リフレクトメトリ(OFDR)、スペクトロスコーピー、光学要素のリモートセンシング及び試験のような、掃引チューナブルレーザーを用いるシステムのパフォーマンスを改善するための、チューナブルレーザーの時間掃引に対する波長を連続かつ単調で、かつ特定の時間的プロファイルに規定されるようにする装置及び方法に大まかには関する。

10

【背景技術】

【0003】

レーザーの波長又は周波数掃引を使用する応用例においては、その応用例についての正確な情報を受け取るために必要な特性が3種類ある。すなわち(1)時間に対する波長掃引の連続性及び単調性、(2)時間に対する掃引の直線性、及び(3)時間経過及び環境変化(温度、湿度のような)に対しての連続性、単調性、及び直線性を維持する能力である。例えば、分子ガス吸収フィーチャーの形状は、レーザーの波長掃引における不連続性(前方又は後方ジャンプ)によって歪まされ得る。他の例では、波長不連続性は、細胞のOCT画像の質を低下させ得る。よって掃引波長レーザーから波長の不連続性をなくすことが望ましい。

20

【0004】

図1Aは、時間が増加した時の理想的なレーザーの、連続で直線性の周波数掃引を示す。図1Bは、時間が増加した時の例示的なレーザーの、連続であるが、非直線性の周波数掃引を示す。図1Cは、時間が増加した時の例示的なレーザーの、不連続の周波数掃引を示す。

【0005】

単一モード、掃引波長レーザーにおける波長不連続は、レーザーのある単一縦モードから他の単一縦モードへの急激な遷移によってしばしば引き起こされ、ここでそれらのモードの波長は相当に異なる。これら遷移は、一般にはモードホップと呼ばれる。波長不連続性は、フーリエドメインモード同期(Fourier Domain Mode Locked, FDML)レーザーのようなマルチモード掃引波長レーザー等でも、レーザーのモードのあるグループから、レーザーのモードの他のグループへと急な遷移が起こる時であって、2つのグループの平均波長が相当に異なる時には発生し得る。

30

【0006】

掃引が連続的かつ単調な時でも、多くの応用例においては、レーザー波長が特定の時間的プロファイルに従うことが有利である。例えばOCTにおいては、時間に対する光学的周波数において直線的である時間に対する掃引は、掃引データのフーリエ後処理を可能にすることが好ましい。例えばOCT又は通信試験のような他の応用例においては、試験対象デバイス又は材料における他の効果を補償するために時間について非直線的に時間に対する光学周波数を掃引することが有利である。

40

【0007】

モードホップを低減又は除去し、掃引プロファイルを制御するための従来技術の試みは数多くあるが、一般には満足いくものではないか、又は一時的なものである。時間軸のある点において、全ての不連続性及び非直線性を注意深く除去することも可能かもしれないが、時間の経過又は例えば温度の変化と共に、さらなる不連続性及び非直線性が生じる。例えば外部共振器型レーザーは、利得媒体と併せて外部共振器メカニズムを用いて、ほぼ連続単一モードで動作する。モードホップは、正確で公差が小さい部品、及び共振器

50

の精密なアライメントによって、又は実時間で共振器長を調整する圧電トランスデューサのような実時間要素を用いて防止される。

【0008】

他のレーザー構成は、内部共振器要素を用いる。時間が経過すると、レーザーのアライメントが悪化したり、要素が劣化したりするので、モードホップ及び時間に対する掃引プロファイルの変化を起し得る。周囲温度又は気圧が変化するにつれて、アライメントも悪化し得て、これもモードホップ及び時間に対する掃引プロファイルの変化を起し得る。レーザーの外部の振動又はレーザーの内部の振動（高速の機械的動作による）も共振器をミスアラインさせ得て、これもモードホップ及び時間に対する掃引プロファイルの変化を起し得る。

10

【0009】

他の問題は、機械的チューニングメカニズムを持ったレーザーの波長掃引のどこにおいても、モードホップは起り得ることである。したがってレーザーの波長不連続性及び掃引プロファイルの変化の現れを探すために掃引の全体をモニタし、これら変化についてレーザー掃引を修正する必要がある。

【0010】

掃引波長を発生する他のクラスの単一モードレーザーは、モノリシックで構成された半導体レーザーである。モノリシック半導体レーザーは、半導体中のいくつかのセクション又は部分を含み、これらは、調整可能な共振器ミラー、レーザー利得、共振器位相、及び（オプションとして）外部増幅として働く。例としては、垂直共振器面発光レーザー（Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, VCSEL）、微小電子機械システムによるチューニング構造を持つVCSEL、サンプルグレーティング分布ブラッグ反射器（Sampled Grating Distributed Bragg Reflector, SGDBR）レーザー、超周期構造グレーティング分布ブラッグ反射器（Super-Structure Grating Distributed Bragg Reflector, SSGDBR）レーザー、及び同様のデバイスがある。これらレーザーは、可動部分がないモノリシックなものである。その共振器は非常に安定であり、狭線幅及び長いコヒーレンス長を持つ単一縦モードで動作し得る。このクラスのチューナブル半導体レーザーは、波長をチューニングするために複数のレーザー電流信号を必要とするが、これは波長不連続性のない波長掃引を行う上での問題となる。モノリシック半導体レーザーを制御し、それらの波長掃引内でモードホップを低減又は防止し、時間に対する波長の掃引プロファイルを制御する（例えば直線性を提供するために）装置及び方法に対するニーズがある。

20

30

【0011】

チューニングを可能にする内蔵のグレーティングを持つモノリシックチューナブルレーザーは、通信のアプリケーションでは今や一般的になっている。これらのチューナブルレーザーは、同じモノリシックチップ上に全てを有し、広い波長チューニング（例えば1520から1565ナノメートル）を提供する点、及び高速波長チューニング（マイクロ秒の掃引）の能力が独特である。このようなチューナブルレーザーは、ここでは半導体モノリシックチューナブルレーザーソース（Semiconductor Monolithic Tunable Laser Source, SMTLS）と呼ばれる。

【0012】

SMTLSは、バックミラードライブ及びフロントミラードライブの組み合わせと関連付けられた波長領域を有する。電流に対する波長のマップの複雑さが図2に示される。SMTLSデバイスは、標準（ITU）波長のうちの任意の一つを選択することができるようにするために、特定の波長のアレイのうちの一つが出力されるように規定され開発された。

40

【0013】

米国特許出願公開第2009/0059972号明細書で議論されているように、SMTLSレーザーを、レーザーのチューニング範囲内の任意の場所で、ある波長から他の波長に高速にスイッチングすることを可能にするための研究がこれまでなされてきている。従来技術は、初期及び最終波長、それぞれの波長に関連付けられた電流の知識を用いると共に、レーザーをその目標波長に迅速にロックさせるためにフィードバック制御システムも用

50

いる。この方法は、ある目標波長から別の目標波長へと離散的な変化を要求する通信分野のアプリケーションには有用である。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0014】

通信用要素の掃引波長テスト、リモートセンシング、及び光コヒーレンストモグラフィーのような他のアプリケーションにおいては、波長スイッチングデバイスとしてではなく、波長掃引デバイスとしてレーザーを動作させる多くの動機付けが存在する。本開示で用いられるように波長掃引とは、時間の経過と共に、好ましくは直線的に単調に、ある波長から他の波長へ連続的に（又はステップ状に連続的に）動くことを指す。

10

【0015】

SMTLSを掃引することの最初の問題は、マルチセクションレーザー構造を連続的にどのようにチューニングするかを決定することにある。レーザーのそれぞれのセクションは、電流又は電圧のようなパラメータによって制御されるので、複素多変数制御空間になる。複数のチューニング電流（レーザーのフロントミラー、バックミラー及び位相部のような）におけるレーザーの波長を測定することによって、低い波長から高い波長まで横断する連続的なパスが決定され得る。図3において(a)~(i)と示された別個の線によってチューニングパスが示される。(a)と示された線から始まり、フロントミラー及びバックミラーのセット（及び不図示だが位相電流）が選択され得て、高い波長から順次、低い波長へと線(b), (c)等から線(h)へと、又は低い光周波数から高い光周波数へと波長において連続的にレーザーをチューニングする。

20

【0016】

図3のそれぞれの囲まれた領域は、レーザーのモードを表す。それぞれの領域の境界において、モードホップが発生する。例としてSMTLSレーザーにおけるモードホップは、350 pm（ピコメートル）の長さであり得る。モードホップの大きさは、位相電流によって制御され得る。しかし、位相電流を変化させることは、図3の波長マップの詳細を変更することになる。SMTLSにおける波長の不連続性を避けるためには、SMTLSの波長掃引にわたって複数の制御パラメータをどのように調整するかを理解する必要がある。

【0017】

波長掃引を作り、維持するのに伴うさらなる不都合は、時間及び温度がチューニングマップに無視できない量の影響を与えることである。これは、精密なチューニングの直線性のためにはミラー掃引パス（Mirror Sweep Paths, MSP）が時間と共に変化することを意味する。ある掃引の時間スケール（例えばナノ秒又はマイクロ秒）にわたって、チューニング電流が選択され得て、レーザーは、その掃引の間、特定のパス上に留まるが、より長い期間（数分から数時間）にわたっては、同じ一貫性は保たれない。したがって、SMTLSであっても波長連続性は、時間と共に修正されなければならない。

30

【0018】

いかに連続的な掃引を達成するかの従来の考えは、「完全絶対波長マップ」によるアプローチである。連続的な掃引を作る一つのアプローチは、絶対波長に対するフロントミラー及びバックミラー及び位相励起の詳細なマップを作り、それからこの詳細なマップを用いて、時間に対する連続的かつ単調な波長の結果を得るためのミラー掃引パスを求めることである。しかしこのアプローチは、高い波長直線性の精密さを達成するために、非常に多くのデータ点を要求し、これには時間がかかる。一般に、絶対波長測定には、測定について数秒を必要とする比較的高価な機器（例えば波長計又は光スペクトラムアナライザ）が要求される。温度及びエージングによるレーザーにおける波長ドリフトのために、絶対波長測定プロセスは、定期的に行われなければならない。これは高価な絶対波長測定機器がシステム内において、又はそれに付随して利用可能であることが必要とされることを意味する。絶対波長測定機器の追加は、システムのコストを相当に上昇させる。さらに、多数の定期的な絶対波長の再較正は、多くのエンドユーザアプリケーションのためには長すぎる。

40

50

【0019】

上の問題に加えて、掃引全体は実際の所、動的な動作であって、静的な動作ではなく、静的な動作のシーケンスでもない。例えば、電気信号を発生するのに用いられるデジタルアナログ変換器から来る信号は、遅延及び整定時間の影響を受ける。それから信号は、電気信号調整器（例えば電圧電流変換器）に入り、ここでも信号遅延及び整定時間が付加される。信号のそれぞれをレーザーに送る伝送線路自体が、信号遅延及び整定時間を有する。レーザー自体も、これらと同じ遅延及び整定時間を有する。そしてレーザー内部において、電流（電圧）の変化を起こすことも、レーザーの当該セグメントの温度変化を起こし、遅延及び整定時間をもって、レーザーの他のセグメントの温度変化を起こす（それぞれの要素が他の要素に物理的に近いことによる）。よって、レーザーに送られる信号群のこのような動的システムを作ることの実際の結果は、任意のある時刻における信号群のセット（例えばバーニアチューニングされた分布ブラッグ反射器（VT-DBR）については5つの信号）だけでなく、これらの同時に起こる信号の組み合わせ、及びそれらに先行する信号の組み合わせも含む非常に複雑な組み合わせである。これらの信号、遅延、整定時間が組み合わせるやり方は、温度、湿度、及び他の環境要因、並びに要素のエイジングに相当に依存するので、ある時と他の時では一定ではない。

10

【課題を解決するための手段】

【0020】

本発明のある局面は、レーザー源、前記レーザー源に動作可能に結合されたレーザー制御ユニット、及び規定された掃引パフォーマンス特性のセットへの適合を達成するよう前記レーザー制御ユニットが前記レーザー源を制御するように構成するプロセッサを備える掃引レーザーシステムに関する。

20

【0021】

本発明の他の局面は、波長の範囲にわたって放射を出力する半導体レーザー源を制御する方法であって、前記波長の範囲にわたって前記放射を離散的に変化させる入力信号を受け取るよう構成された半導体レーザー源から、波長の範囲にわたって放射を出力すること、前記波長の範囲にわたって前記放射に関連する少なくとも1つの物理的特性に関連するデータを検出すること、規定された掃引パフォーマンス特性のセットへの適合を達成するよう前記データを処理し、前記半導体レーザー源への入力信号を変化させることを含む方法に関する。

30

【0022】

本発明の他の局面は、波長チューニングメカニズム、レーザー共振器の1つのモードより大きく離れたある波長から他の波長へとレーザー源が移って動作するよう構成された、レーザーパス長チューニングメカニズム、1つ以上の波長モニタリングデバイス、及び前記1つ以上の波長モニタリングデバイス及び前記チューニングメカニズムに結合されたプロセッサであって、前記プロセッサは、前記波長モニタリングデバイスからのデータを分析し、波長不連続性における波長チューニング及び共振器長を調整することによって前記不連続性を低減する掃引レーザーシステムに関する。

【0023】

本発明の他の局面は、チューナブルレーザーの開始波長から停止波長への掃引における波長不連続性を低減する方法であって、1つ以上のパラメータを持つレーザーをチューニングすることによって、初期波長から最終波長まで前記レーザーを掃引すること、少なくとも1つの波長測定デバイスによって前記レーザーからの光を測定すること、前記少なくとも1つの波長測定デバイスからのデータをプロセッサに結合すること、及びレーザー制御パラメータを調整し、前記掃引における前記波長不連続性を低減することによって、規定された掃引パフォーマンス特性のセットへの適合を達成するよう前記データを処理することを含む方法に関する。

40

【0024】

それぞれの点における多変数光振幅フィードバックデータに基づいて、相対及び絶対波長に関する推定が確認され得て、それら点における波長間の潜在的に複雑な関係、それぞ

50

れの間中点（又はステップ）において波長を発生する制御電流のセットは、掃引内のモードホップを低減又は除去し、掃引において望ましい時間に対する波長プロファイルを作るよう調整され得る。

【0025】

掃引は、時間と共に変化する制御信号又は信号群、例えばアナログ信号、代替としては制御電流及び波長のテーブル又はアレイとして含み得て、時間と共に順次読み出す。掃引の間、レーザー制御信号は、波長モニタリングセンサについて開ループとされる。

【0026】

多くの特徴が本発明の実施形態についてここでは説明される。与えられた実施形態について説明された特徴は、他の実施形態でも採用され得ることがわがらう。

10

【0027】

本発明は、具体的な例示的实施形態を詳細に記載する、詳細な説明、添付の図面、及び、もし添付されるなら特許請求の範囲を含む、本願に説明された特徴を含む。しかしこれら実施形態は、本発明の原理が利用され得る多くのやり方のうち2, 3を示すに過ぎない。

【図面の簡単な説明】

【0028】

【図1A】図1Aは、時間に対する周波数/波長を表すレーザー光源の掃引の例示的なグラフである。

【図1B】図1Bは、時間に対する周波数/波長を表すレーザー光源の掃引の例示的なグラフである。

20

【図1C】図1Cは、時間に対する周波数/波長を表すレーザー光源の掃引の例示的なグラフである。

【図2】図2は、フロントミラー電流(mA)及びバックミラー電流(mA)に対する波長及びミラー励起を表すチューニングマップの例示的なチャートである。

【図3】図3は、図2の例示的チャート上にプロットされたラフミラー掃引パスを表すチューニングマップである。

【図4】図4は、本発明の局面による例示的システムである。

【図5】図5は、本発明の局面による例示的システムである。

【図6】図6は、本発明の局面による例示的方法である。

30

【図7】図7は、本発明の局面による例示的方法である。

【図8】図8は、本発明の局面による例示的方法である。

【図9】図9は、本発明の局面による例示的システムである。

【図10】図10は、本発明の局面による例示的システムである。

【図11】図11は、本発明の局面による例示的システムである。

【図12】図12は、本発明の局面による例示的システムである。

【図13】図13は、本発明の局面による例示的方法である。

【図14】図14は、本発明の局面による例示的方法である。

【図15】図15は、パス遷移のために波長の不連続性を持つ例示的なSMZ信号である。

40

【図16】図16は、点への遷移(Transition-To Point, TTP)のファインチューニングを表す例示的な波長マップである。

【図17】図17は、図15の波長の不連続性が除去されたSMZ信号である。

【図18】図18は、本発明の局面による例示的方法である。

【発明を実施するための形態】

【0029】

図4を参照して、本発明の局面は、ある範囲の波長(例えば開始波長から停止波長まで)にわたって個別に掃引するレーザー12を含むレーザーシステム10に関する。レーザー12は、レーザーの出力を波長のある範囲の中にある複数の波長に設定するよう構成される。レーザーシステム10は、掃引の間、それぞれの間中波長において制御パラメータ

50

を波長レファレンスにロックしない。その代わりに本発明のレーザーシステム10は、掃引全体に適用される掃引後のフィードバックループを使用し、ここで干渉計及びその他のセンサのような光学的センサからの波長データが掃引中の中間波長において測定される。それぞれの点における多変量光学的振幅フィードバックデータに基づいて、相対的及び絶対的波長についての推測、点群における波長の間の潜在的に複雑な関係が特定されて、掃引中のモードホップを低減又は除去し、掃引で所望される時間に対する波長プロファイルを作るよう、それぞれの中間点（又はステップ）における波長を発生する制御電流のセットは調整され得る。例えば、それら点群の間の関係（それぞれの点の値だけでなく）は、モードホップを除去するための補正のためのフィードバックを提供するために用いられる。掃引は、例えば、アナログ信号のように、又は代替として、時間と共に順次読み出される制御電流又は波長のテーブル又はアレイのように、時間と共に変化する制御信号又は信号群を含み得る。掃引の間、レーザー制御信号は、波長モニタリングセンサに対して開ループに設定される。

10

20

30

40

50

【0030】

連続的で単調に変化する規定された波長掃引を作るためのレーザーシステム

本発明の局面による例示的システム10は、図4に示される。システム10は、レーザー制御ユニット16（ここではレーザーコントローラとも呼ばれる）に結合されているプロセッサ14を含む。レーザー制御ユニット16は、制御信号、例えば電気信号又はコマンド信号をレーザー光源12（ここではレーザーデバイスとも呼ばれる）に出力する。レーザー12は、レーザー制御に応答して光を発生する。レーザー光源12によって出射された光のうちの一部が出力されて使用される。レーザー光源12によって出射された光のうち他の部分は、1つ以上の掃引パフォーマンスモニタデバイス（群）18に出力される。掃引パフォーマンスモニタデバイス（群）18は、レーザー光源12からの光の出力に関連する光学特性を求めよう構成された1つ以上のデバイスであり得る。掃引パフォーマンスモニタデバイス（群）18への結合は、常に維持されていてもよく（例えば掃引毎に常に維持される）、及び/又は時々維持されてもよい（例えば周期的に）。掃引パフォーマンスモニタデバイス（群）18は、レーザーの波長又は他の特性に応答して信号又はデータを発生する。掃引パフォーマンスモニタデバイス（群）18のうち1つ以上のものは、プロセッサ14に結合され得て、このプロセッサ14は、データ又は信号を分析することによって、レーザー制御を調整して、レーザーデバイスの時間に対する波長の掃引（後続の掃引群について）における波長の不連続性を低減又は除去する目的で、レーザー光源12のパフォーマンスを調整し得る。この調整は、時間に対するレーザー波長掃引の時間依存性をも変更し得る。好ましい実施形態において、レーザー波長掃引は、時間に対する光周波数において直線的であり得る。

【0031】

本発明のある実施形態は、波長掃引の期間にレーザー共振器の単一縦モードにおいて動作するレーザーに適用し得る。そのようなレーザーの例は、リトロ又はリットマンメトカフ構成で構成される外部共振器ダイオードレーザーであり得る。他の実施形態は、チューニングファブリペローフィルタ又はそのような要素の組み合わせのような、内部共振器型チューニング要素を持つレーザーを用いてもよい。本発明の全ての実施形態においては、少なくとも2つの制御パラメータが共振器波長及び光学的共振器長を調整する。

【0032】

SMTLSの連続的で規定された波長掃引を作るレーザーシステム

本発明のレーザーシステム20の代替の実施形態が図5に示される。プロセッサ14は、例えばフィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）、又はASICのようなリアルタイムデジタルプロセッシングデバイス（DSP）22に結合される。DSP22は、デジタルアナログコンバータ（DAC）24に結合され、これがDSP22（例えばFPGA）からのデジタル情報をアナログ電気信号に変換する。DAC24の電気信号は、レーザー光源12に出力されるレーザー制御信号である。レーザー光源12は、SMTLSであり得る。レーザー光源12からの光の一部は、レーザーシステムから出力される。レーザ

ーデバイスからの光の他の部分は、波長モニタデバイス 26 に出力され得る（代替として、光の波長モニタへの出力は、一部の時間においてだけアクティブであり得る）。掃引パフォーマンスモニタデバイス（群）26 は、上述の掃引パフォーマンスモニタデバイス（群）18 と同一であり得る。掃引パフォーマンスモニタデバイス（群）26 からの信号は、検出電子機器 28 に出力され得て、この検出電子機器 28 は、信号を検出し、増幅し、又は光信号から電気信号に変換し得る。検出電子機器 28 は、データをデジタル信号プロセッサ（DSP）22 に出力し、この DSP は、高速でデータを取得することが可能である。レーザーデバイスの時間に対する波長の掃引における波長不連続性を低減又は除去するために、このプロセッサは、DSP 22 からの検出された信号データにアクセスすることによってデータを分析し、又はレーザー制御を調整するための信号にアクセスすることによってレーザーデバイス 10 のパフォーマンスを調整し得る。この調整は、時間に対するレーザー波長掃引の時間依存性も変更し得る。例示的实施形態においては、レーザー波長掃引は、時間に対する光周波数において直線的であり得る。

10

20

30

40

50

【0033】

本発明の例示的实施形態において、レーザーシステム 20 は、SMTLS のようなマルチセクションチューナブルレーザーを含む。掃引パフォーマンスモニタリングデバイス（群）26 は、掃引の期間中に、レーザー光源 12 の波長を測定するために、光干渉計及び絶対波長レファレンスを含み得る。フェーズセクション電流がチューニングされる間に、それぞれのミラージュセグメントの端部において、及びレーザーのある単一縦モードから他のモードへの遷移において、波長のジャンプシフトを検出するためのフィードバック信号を提供するために、掃引パフォーマンスモニタリングデバイス（群）26 は、レーザーの最大モードホップ又は波長ドリフトより大きい自由スペクトル領域（FSR）を持つ干渉計又はエタロンを含み得る。他の掃引パフォーマンスモニタリングデバイス（群）26 は、ガスセル又は温度安定化ファブリペローエタロン又はファイバブラッググレーティングのような絶対波長レファレンス（absolute wavelength reference）を通じた光の伝送であり得る。さらに他の掃引パフォーマンスモニタリングデバイス（群）26 は、精密な波長直線性を提供するために、エンドユーザに関心のある波長フィーチャーに対して短い FSR を持つ干渉計であり得る。

【0034】

上のアプローチは、掃引チューナブルレーザーに当てはまる。このアプローチは、選択された掃引パラメータ（例えば掃引レート、掃引速度、掃引開始）が複数の順次掃引に用いられる時に（又はこれらパラメータが少なくとも実質的に同様である時に）、最もよく適用される。光干渉計又はガスセルのような掃引パフォーマンスモニタリングデバイス（群）26 からのデータは、それぞれの掃引の後に分析され得る。ユーザが特定した時間に対する波長の掃引を行うために、掃引後の掃引データを分析することによって、プロセッサ 14 は、掃引のそれぞれの点をどのように調整すべきかを決定できる。このような掃引は、単一縦モードを好ましくは包含し得るが、代替として複数のモードを包含してもよい。

【0035】

本発明のある局面は、掃引中の全ての点の間の複雑な関係を分析し、次の掃引のためにチューニングパラメータを変更するための、事後掃引パラメトリックの使用にある。このようなアプローチは、モードホップを低減又は除去するのに用いられ得る。いくつかの実施形態においては、レーザーは、波長制御及びレーザー共振器長制御のために少なくとも 2 つの制御パラメータを有する。モードホップに起因する波長不連続性は、モードホップの前か、又はモードホップに続いてすぐにレーザー制御パラメータを変化させることによって低減又は除去され得る。この分析の重要な局面は、モードホップの前（又は後）の制御パラメータへの補正が、モードホップの後（又は前）のレーザー掃引パフォーマンスモニタリングデバイス（群）26 の値に依存することである。したがってこの分析及び補正は、レーザー制御パラメータの掃引内で、本質的に非直線的かつ非局所的（non-linear and non-local）であり、これは上述の米国特許出願公開第 2009/0059972 号明

細書におけるような実時間制御とは一致しない。

【 0 0 3 6 】

レーザー、任意のレーザーの波長掃引を較正する方法

本発明の他の局面は、レーザーシステム 10, 20 を用いて、時間に対するレーザーの制御パラメータの掃引を較正する方法 30 であり、これによって掃引中のモードホップを防止するようパラメータを調整でき、かつ、規定された時間に対する波長プロファイルを作るためにモードホップ間でパラメータを調整することができる。この方法の概観は図 6 に示される。

【 0 0 3 7 】

ブロック 32 において、低い波長解像度でレーザー制御パラメータ（群）を調整することによって、大まかに波長チューニングパスが測定される。このステップが一度実行されるうちに、典型的には、光スペクトルアナライザ又は波長計のような従来の波長測定機器が用いられ得る。レーザー制御パラメータは、グレーティング又はフィルタの角度、又は SMTLS のセクションへの制御電流であり得る。

10

【 0 0 3 8 】

ブロック 34 において、制御パラメータ（群）に対する波長の非常に粗いチューニングパスは、ブロック 32 の測定された波長チューニングマップを用いて求められ得る。チューニングパスの波長の正確性は、例えば $\pm 100 \text{ pm}$ （ピコメートル）でありさえすればよい。

【 0 0 3 9 】

ブロック 36 において、レーザー制御パラメータは、モードホップに起因する波長不連続性を低減又は除去するために調整される。このプロセスは、波長掃引におけるモードホップをスティッチングする（stitching）とここでは呼ばれる。例示的レーザー制御パラメータは、レーザー光源 12 への入力を含み得る。このような入力には、例えば、フロントミラー（FM）電流、バックミラー（BM）電流、位相（P）電流、ゲイン（G）電流、及び半導体光増幅器（SOA）含まれ得る。

20

【 0 0 4 0 】

ブロック 38 において、レーザー制御パラメータは、規定された時間に対する波長プロファイルを作り出すよう調整される。規定されたプロファイルは、任意の所望の形状を取り得る。例えば、時間に対する波長は、直線的であり得る。時間に対する光周波数は、直線的であり得る。規定された掃引パフォーマンス特性は、媒体中の分散及び/又は伝搬を補償するために、波長及び時間の間で非直線的であり得る。規定された掃引パフォーマンス特性は、波長に対して一定である、時間に対する電力の掃引を含み得る。規定された掃引パフォーマンス特性は、波長に対してガウス分布である、時間に対する電力の掃引を含む。規定された掃引パフォーマンス特性は、高速フーリエ変換の窓関数をエミュレートする。規定された掃引パフォーマンス特性は、周波数及び/又は波長における光システム損失を補償する。

30

【 0 0 4 1 】

ブロック 40 において、レーザー制御パラメータが集められ、レーザー波長の掃引を行う。例えば、制御パラメータは、規定された掃引パフォーマンスを作るために、所望のやり方で適用される。

40

【 0 0 4 2 】

この方法は、あるステップ群を個別に、又はまとめて繰り返す、つまり反復することで有利になり得る。図 6 でフローパスの矢印によって示されたように、ブロック 36, 38 及び 40 は、アルゴリズムのパフォーマンスを改善するために反復され得る。

【 0 0 4 3 】

レーザー、任意のレーザーの波長掃引を維持する方法

本発明の他の局面は、図 7 に示されるように、スティッチされた（stitched）波長不連続性を持つ時間に対するレーザー掃引、及び時間に対する規定された波長を維持するために、レーザーシステム 10, 20 を用いる方法 50 である。ブロック 52 において、レー

50

レーザー制御パラメータの最終波長掃引が実行される。ブロック54において、レーザー制御パラメータを調整することによって、モードホップに起因する波長不連続性を低減又は除去する。ブロック56において、レーザー制御パラメータを調整することによって、時間に対する規定された波長のプロファイルを作る。ブロック58において、レーザー制御パラメータは、レーザー波長の掃引を作るために集められる。方法50は、あるステップ群を個別に、又はまとめて繰り返す、つまり反復することで有利になり得る。図7で信号パスの矢印によって示されたように、ブロック54、56及び58は、アルゴリズムのパフォーマンスを改善するために反復され得る。

【0044】

詳細な実施形態、任意のレーザーの掃引を較正する方法

10

較正されたレーザー制御パラメータを用いて、時間に対する波長の掃引を十分に較正する方法60が図8に示される。

【0045】

ブロック62において、低い波長解像度でレーザー制御パラメータ(群)を調整することによって、大まかに波長のチューニングマップが測定される。このステップが一度実行されるうちに、典型的には、光スペクトルアナライザ又は波長計のような従来の波長測定機器が用いられ得る。レーザー制御パラメータは、グレーティング又はフィルタの角度、又はMEMS要素の間隔、又はSMTLSのセクションへの制御電流であり得る。

【0046】

ブロック64において、制御パラメータ(群)に対する波長の非常に粗いチューニングパスは、ブロック64の測定された波長チューニングマップを用いて求められ得る。チューニングパスの波長の正確性は、例えば ± 100 pm(ピコメートル)でありさえすればよい。

20

【0047】

ブロック66において、レーザーチューニングパラメータ(群)が時間的に掃引される(are swept in time)ことで、時間に対するレーザーの波長掃引が作られる。レーザーの波長は、干渉計(図9)、又は異なる自由スペクトル領域(Free Spectral Range、FSR)を持つ2つの干渉計(図10)、又は異なるFSRを持つ2つの干渉計及び温度安定化されたエタロン又は温度安定化されたファイバブラッググレーティングのような相対波長レファレンス(図11)、又は異なるFSRを持つ2つの干渉計及びガス吸収セルのような絶対波長レファレンス(図12)のような、波長モニタリングデバイスによってモニタされ得る。

30

【0048】

次に、この方法は、モードホップによる波長の不一致を低減又は除去する。ブロック68において、プロセッサは、波長モニタリングデバイスから生成される信号を分析することによって、波長掃引における波長不連続性が起こった点を検出する。波長不連続性の大きさ及び向き(波長において前方又は後方ジャンプのいずれであるか)がモニタされたデータから決定される。

【0049】

ブロック70においてプロセッサは、波長不連続性を低減又は除去するために1つ以上のレーザー制御パラメータに対する修正を決定する。例えば、レーザー波長制御パラメータ及びレーザー共振器長制御パラメータが調整され得る。波長不連続性は、モードホップの前か、又はモードホップに続いてレーザー制御パラメータを変化させることによって低減又は除去され得る。この分析の重要な局面は、モードホップの前(後)の制御パラメータに対する修正が、モードホップの後(前)のレーザー波長モニタリングデバイスの値に依存することである。したがってこの分析及び修正は、レーザー制御パラメータの掃引内において、本質的に非直線的及び非局所的である。

40

【0050】

ブロック72において、時間に対するレーザー波長の波長不連続性(モードホップ)が低減又は除去されるよう、時間に対するレーザー波長を掃引するために、レーザー制御パ

50

ラメータが時間に対して掃引される、新しい波長チューニングパスが構築される。

【0051】

ブロック72からブロック66に戻るよう導く信号パスの矢印によって示されるように、このプロセスは、新しい波長掃引を行い、時間に対する波長をモニタすることによって反復され得る。波長不連続性は、それぞれのループによって漸進的に低減又は除去されることによって認識及び修正され得る。この反復は、励起及び応答間の変動する非直線的な関係に起因して、必要であり得る。

【0052】

次に方法60は、時間に対する波長の規定された掃引に修正するよう、波長掃引を調整し得る。ブロック74において、レーザー掃引は、波長モニタリングデバイスによって測定されることによって、時間に対する波長プロファイル(wavelength versus time profile)を決定できる。

【0053】

ブロック76においてプロセッサは、時間に対する波長のデータを分析することによって、時間に対する波長のプロファイルの規定されたプロファイルからの偏差を決定することができる。ある実施形態においては、時間に対する波長を測定するデバイスは、波長掃引よりも小さいFSRを持つ単一の干渉計を含み得る。干渉計信号の位相は、信号のフーリエ変換を計算することによって測定され得る。位相は、レーザーの光周波数に比例する。したがって時間に対する位相によって、時間に対する光周波数を測定できる。測定された時間に対する光周波数の信号は、時間に対する規定された光周波数のプロファイルと比較され、偏差が求められる。

【0054】

他の実施形態においては、時間に対する波長を測定するデバイスは、対象となる波長範囲よりずっと小さい、つまり10~100倍小さいFSRを持つ単一の干渉計を含み得る。干渉計のフリンジのゼロクロスが波長掃引の間に計数され得ることによって、時間に対する光周波数の変化を記録できる。本質的には、小さいFSRを持つ干渉計は、フリンジの半分を単位として光信号の位相を測定しているが、それぞれのフリンジの光周波数は、掃引範囲に比較して小さい。測定された時間に対する周波数は、時間に対する規定された周波数と比較され、偏差が求められる。

【0055】

他の実施形態において、単一の干渉計及び波長レファレンスは、時間に対する波長を測定する波長デバイスを含み得る。干渉計は、小さいFSRを持ち、前述の実施形態のように時間に対する光周波数を測定し得る。波長レファレンスにおける絶対波長フィーチャーが決定され、それらの波長が測定され得る。2つ以上の既知の波長フィーチャー間の干渉計の1/2フリンジの数を求めることによって、FSRの光周波数が一つの掃引について測定され得る。それと共に、干渉計及び波長レファレンスは、時間に対する絶対光周波数を提供する。時間に対する測定された周波数は、時間に対する規定された周波数と比較され、偏差が求められる。

【0056】

ブロック78において、プロセッサは、掃引プロファイル中の偏差をレーザー制御パラメータに対する変化へ変換することによって、時間に対する波長のプロファイルを修正する。本発明の重要な局面は、前のステップでのモードホップにおいて達成される波長連続性を維持しつつ、規定されたプロファイルを達成するために波長掃引も調整することである。

【0057】

ブロック78からブロック74に戻るよう導くフローの矢印によって示されるように、このプロセスは、新しい波長掃引を行い、時間に対する波長をモニタすることによって反復され得る。時間に対する波長の、規定された掃引からの偏差は、それぞれの反復によって時間に対する波長の偏差を漸進的に低減又は除去するために、認識及び修正され得る。

【0058】

10

20

30

40

50

詳細な実施形態、任意のレーザーの掃引を維持する方法

本発明の他の局面においては、上述のように第1レーザーチューニングパスが作られた後に、レーザー12が動作され、周期的に又は不定期に(occasionally)チューニングパスがモニタされ、修正され得る。周期的又は不定期のチューニングパス修正アルゴリズム80の実施形態は、図13に示される。

【0059】

ブロック82において、プロセスは、最後の波長チューニング掃引によってレーザーを掃引することから始まる。

【0060】

ブロック84において、レーザーチューニングパラメータ(群)は、時間的に掃引され、時間に対するレーザーの波長掃引を作る。レーザーの波長は、上述のように波長モニタリングデバイスによってモニタされ得る。

【0061】

ブロック86において、波長モニタリングデバイスからの信号は、波長掃引における波長不連続性が起こった点を検出するよう分析される。波長不連続性の大きさ及び向き(波長において前方又は後方ジャンプのいずれであるか)がモニタされたデータから決定される。

【0062】

ブロック88において、プロセッサは、1つ以上のレーザー制御パラメータに対する修正を求めることによって、波長不連続性を低減又は除去する。モードホップの前に、又はモードホップに続いて、レーザー制御パラメータを変化させることによって、波長不連続性は低減又は除去され得る。

【0063】

ブロック90において、波長不連続性(モードホップ)が低減又は除去されるよう、時間に対するレーザー波長を掃引するために、レーザー制御パラメータが時間に対して掃引される、新しい波長チューニングパスが構築される。

【0064】

ブロック90からブロック84に戻るよう導く矢印によって示されるように、このプロセスは、新しい波長掃引を行い、時間に対する波長をモニタすることによって反復され得る。波長不連続性は、それぞれのループによって漸進的に低減又は除去されることによって認識及び修正され得る。

【0065】

ブロック92において、レーザー掃引は、波長モニタリングデバイスによって測定されることによって、時間に対する波長プロファイルを決定できる。

【0066】

ブロック94においてプロセッサは、時間に対する波長のデータを分析することによって、時間に対する波長のプロファイルの規定されたプロファイルからの偏差を決定することができる。

【0067】

ブロック96において、プロセッサは、掃引プロファイル中の偏差をレーザー制御パラメータに対する変化へ変換することによって、時間に対する波長のプロファイルを修正する。本発明の重要な局面は、前のステップでのモードホップにおいて達成される波長連続性を維持しつつ、規定されたプロファイルを達成するために波長掃引も調整することである。

【0068】

ブロック96からブロック92に戻るよう導く矢印によって示されるように、このプロセスは、新しい波長掃引を行い、時間に対する波長をモニタすることによって反復され得る。時間に対する波長の、規定された掃引からの偏差は、それぞれの反復によって時間に対する波長の偏差を漸進的に低減又は除去するために、認識及び修正され得る。

【0069】

10

20

30

40

50

SMTLSの波長掃引を較正する方法

本発明の好ましい実施形態において、レーザーはSGDBRレーザーのようなSMTLSであり得る。波長不連続性が低減又は除去されるよう、時間に対するSMTLSの第1波長掃引を作る方法100は、図14に示される。

【0070】

ブロック102において、完全絶対波長マップ(Complete Absolute Wavelength Map)のような任意の適切な方法を用いて、ただし非常に低い波長解像度を用いて、非常に粗い波長チューニングパス(制御電流の粗いグリッドを用いて)が測定される。完全絶対波長マップは、その低解像度のために比較的速く実行され得て、SMTLSデバイスの耐用期間の間で1度だけ行われる。マップを測定するのに用いられ得る機器には、光スペクトルアナライザ又は波長計がある。

【0071】

ブロック104において、ブロック102において測定された完全絶対波長マップを通じて非常に粗い電流チューニングパスが求められる。粗い電流チューニングパスは、手で、又は自動で求められ得る。チューニングパスの波長の正確性は、例えば ± 100 pm(ピコメートル)でありさえすればよい。

【0072】

次に、波長不連続性を決定し、それを低減又は除去するために波長掃引が測定される。

【0073】

ブロック106において、非常に粗い電流チューニングパスがその後、実行され、出力は、図12にあるような相対/絶対測定回路に与えられ、この相対/絶対測定回路は、(a)掃引波長の大部分をカバーする吸収線を持つガスセルのような絶対波長レファレンス、(b)所望の波長直線性の1/2より小さい期間(例えば ± 1 pmの直線性については 0.4 pm)を持つ高速マツハツェンダ(Fast Mach-Zehnder、FMZ)干渉計、及び(c)低速マツハツェンダ(Slow Mach-Zehnder、SMZ)干渉計からなる。SMZは、SMTLSの典型的なモードホップの2倍より大きいFSRを持つべきであり、例えば 350 pmのモードホップ距離を持つSMTLSなら 500 pmである。SMZのFSRもパスセグメント長(ナノメートルの単位)に対して小さくあるべきである。当業者に知られているように、マイケルソン干渉計のような他のタイプの干渉計もSMZ及びFMZとして使用できることに注意されたい。

【0074】

代替の波長測定デバイスは、図11に示されるように、相対的波長正確性が要求される本発明の実施形態において用いられ得る。相対波長レファレンスは、温度安定化されたエタロン又は温度安定化されたファイバブラッググレーティングであり得る。したがって相対レファレンスの正確性は、レファレンスの環境安定性に依存する。

【0075】

波長測定デバイスの他の実施形態においては、もし絶対波長情報(開始波長、停止波長、波長スロープ)が重要ではないなら、図10に示される異なるFSRの2つの干渉計からなるデバイスが用いられ得る。低速干渉計(slow interferometer)(レーザーのモードホップに比較して大きなFSRを持つ)は、波長不連続性を特定するのに用いられ得る。高速干渉計(掃引の光周波数の所望の直線性に比較して小さな自由スペクトル領域(FSR)を持つ)は、波長不連続性の大きさを測定するのに用いられ得る。高速干渉計は、直線的な光周波数スケールも提供し、これによってレーザー掃引は、時間に対する光周波数について直線化され得るか、又は時間に対する光周波数の所望のプロファイルを作るためのレファレンスとして用いられ得る。

【0076】

波長測定デバイスのさらに他の実施形態においては、波長不連続性を検出するために単一の干渉計が用いられ得る。単一の干渉計からの信号は、プロセッサで分析され得る。このプロセッサは、時間に対する干渉計信号の位相を測定するためにフーリエ変換を行う。例えば、Yasuno et al, Optics Express vol. 13 10652 (2005)を参照されたい。掃引内

10

20

30

40

50

のモードホップが起こる場所においては、位相の大きな不連続性が検出される。位相不連続性は、以下にブロック 108 及び 110 で記載されるように、電流を制御するために用いられ、フィードバックされ得る。干渉計信号の位相は、掃引の光周波数にも比例する。光周波数を掃引タイミング指数 (sweep timing indices) にマッピングすることによって、時間に対するレーザーの光周波数プロファイルは、干渉計信号の位相が掃引中のある時刻における所望の位相からどれだけ異なるかを計算することによって調整され得る。可能な調整の一つは、レーザー制御電流を調整することによって、時間に対して直線的であるレーザー光周波数の掃引を作ることである。掃引プロファイルの他に可能なものとしては、レーザー制御電流を調整することによって、掃引を使用するエンドユーザの干渉計の試料アーム又は参照アーム中の分散を補償する、レーザー光周波数の掃引を作ることである。

10

【0077】

ブロック 108 において、SMZ からの信号は、それぞれのパス遷移について適切な遷移点 (transition-from point、TFP) を求めるために用いられる。チューニングパスが最初に作られると、ブロック 104 からターゲットポイントが最も近くなるように、好ましくは TFP が SMZ 信号の 1 次導関数の頂点と並ぶように、TFP が選択される。SMZ レーザーを用いることの利点は、制御電流が、TFP が掃引内のどこで起こるかを示すことである。例えば、図 3 の波長マップ内のモード間の境界において、又はそれぞれのチューニングパスの末端において、制御電流は、不連続に変化し、これは、モードホップから波長不連続性が起こり得る、掃引内の時刻に対応する。

20

【0078】

TFP を SMZ の 1 次導関数の最大値に、又はその近傍に配置することは、波長不連続性の大きさ及び向きを求めるのが難しいかもしれない、SMZ 信号の平坦部に遷移点がないことを確実にする。TFP は、SMZ の最大傾きである必要はないが、これはより高い精度でアラインする性能を改善する。パス遷移に起因する波長不連続性を持つ例示的な SMZ 信号は、図 15 に示される。

【0079】

TFP の位置を特定する代替の方法は、SMZ 信号の位相を測定することである。SMZ 信号の位相は、時間に対する SMZ 信号のフーリエ変換を計算することによって求められ得る。TFP 点は、位相信号中の不連続性が起こる点として位置特定され得る。この方法の優位性は、TFP が SMZ 信号のどこで起こってもよいが、最大導関数領域では好まれないかもしれないことである。

30

【0080】

ブロック 110 において、電流チューニングパスについての点への遷移 (Transition-To Point、TTP) が、前回の粗い TTP の周辺を掃引することによって SMZ 信号の値が TFP におけるそれと同一になる点が求められる。この掃引は、予め決められていてもよく、励起及び測定の時間相関から求められた結果であってもよく、励起及び測定の時間相関から求められた理想的な点であってもよい。

【0081】

TFP と一致する TTP を見つけるための好ましい探索アルゴリズムは以下の通りである。図 16 に示されるように、細かく調整された TTP (細かい TTP) は、電流チューニング信号に対する波長の大まかな感度を計算すること、粗い TTP における大まかな波長誤差を計算すること、及び、ドーナツの中心が大まかな波長誤差に関連付けられた電流チューニング信号差であるように、粗い TTP の周辺で「ドーナツ状に」探索することによって求められ得る。レーザーチューニングパラメータは、ドーナツの外側端からドーナツの内側端へと (又はその逆に) レーザー波長がらせんを描き、このらせんの間隔が所望の波長正確性によって決定され、この高速掃引の結果得られるデータが、SMZ 信号が細かい TFP における SMZ 信号に最もよく一致する点を見つけるのに用いられるように選ばれ得る。

40

【0082】

50

好ましい探索方法においては、SMTLSのフロントミラー及びバックミラー電流は、上述のら旋探索パターンを作るよう調整され得る。いったんミラー電流探索が完了すると、位相セクションへの電流（位相電流）も最適化され得る。位相セクションは、共振器内での定格のモード数を維持するために、共振器長を変化させる。このセットを正しく持たないことの影響はモードホップであり、これは波長が約350 pmも（ほぼ）瞬間的にジャンプすることで現れる。これら遷移を決定するためには、フロント及びバックミラー電流がTFP及びTTP間の差を低減又は解消するよう調整されている最適化された掃引は、位相電流の調整に対して評価されなければならない。この掃引は、不適切に調整された位相セクションに起因するモードホップを識別するために、SMZ信号を用いて評価される。それから位相電流は、モードホップを補償し、TFP及びTTP間の差を低減又は除去するために、波長の不連続性箇所のそれぞれにおいて階段状にされる。

10

【0083】

探索方法の他の実施形態においては、フロントミラー、バックミラー、及び位相電流は、ら旋探索パターンを作るよう調整され得る。全ての3つの電流は同時に調整され得て、TFP及びTTP間の差を低減又は除去し、それによって掃引内の波長不連続性を低減又は除去する。

【0084】

ブロック108及び110でのプロセスは、波長不連続性を低減又は除去する。図17は、図15のTFP及びTTP間の差を除去するのに成功した結果を示す。ブロック108及び110は、波長チューニングパスのそれぞれのセグメントについて反復される。掃引は非常に速いので、このプロセスは、非常に速く進行し収束し得る。

20

【0085】

ブロック112において、レーザー制御電流が時間的に掃引されることによって、TFP及びTTP間の波長不連続性（モードホップ）を低減又は除去して時間的にレーザー波長を掃引する、新しい波長チューニングパスが構築される。

【0086】

ブロック112からブロック106に戻るよう導く信号パスの矢印によって示されるように、このプロセスは、新しい波長掃引を行い、時間に対する波長をモニタすることによって反復され得る。波長不連続性は、それぞれのループによって漸進的に低減又は除去されることによって認識及び修正され得る。

30

【0087】

次に、SMTLSの時間に対する波長のプロファイルが測定され、規定された波長掃引プロファイルに一致するよう調整され得る。

【0088】

ブロック114において、SMTLS掃引は、波長モニタリングデバイスによって測定されることによって、時間に対する波長プロファイルが求められる。時間に対する波長プロファイルは、本発明のいくつかの実施形態のうちの一つによって測定され得る。ある実施形態において、波長モニタリング信号は、波長範囲より小さいが、直線性の波長スケールよりは大きいFSRを持つ干渉計から生成され、フーリエ変換で分析され得る。時間に対する信号の位相は、上述のように求められ、時間に対する光周波数のプロファイルも求められる。

40

【0089】

他の実施形態においては、波長モニタリング信号は、規定された時間に対する波長掃引の最も小さい波長スケール以下のFSRを持つ干渉計から生成される。干渉計信号のフリンジ群又は1/2フリンジ群は、時間に対してカウントされ得る。それぞれの1/2フリンジは、精密な光周波数間隔に対応し、よって時間に対する光周波数が求められる。

【0090】

他の実施形態において、単一の干渉計及び波長レファレンスは、時間に対する波長を測定するための波長デバイスを含み得る。干渉計は、小さなFSRを持ち、前述の実施形態のように時間に対する光周波数を測定し得る。波長レファレンスにおける絶対波長フィー

50

チャーが決定され、それらの波長が測定され得る。2つ以上の既知の波長フィーチャー間の干渉計の1/2フリンジの数を求めることによって、FSRの光周波数が一つの掃引について測定され得る。それと共に、干渉計及び波長レファレンスは、時間に対する絶対光周波数を提供する。時間に対する測定された周波数は、時間に対する規定された周波数と比較され、偏差が求められる。

【0091】

ブロック116において、プロセッサは、時間に対する波長のデータを分析し、規定のプロファイルからの時間に対する波長プロファイルにおける偏差を求める。

【0092】

ブロック118において、プロセッサは、掃引プロファイル中の偏差をレーザー制御パラメータに対する変化へ変換することによって、時間に対する波長のプロファイルを修正する。本発明の重要な局面は、前のステップでのTFP及びTTPにおいて達成される波長連続性を維持しつつ、規定されたプロファイルを達成するために波長掃引も調整することである。

10

【0093】

ブロック118からブロック114に戻るよう導く矢印によって示されるように、このプロセスは、新しい波長掃引を行い、時間に対する波長をモニタすることによって反復され得る。時間に対する波長の、規定された掃引からの偏差は、それぞれの反復によって時間に対する波長の偏差を漸進的に低減又は除去するために、認識及び修正され得る。

【0094】

20

SMTLSの波長掃引を維持する方法

本発明の他の局面においては、先行するステップは、レーザーがエンドユーザによって必要とされない時にはいつでも、バックグラウンドで反復され得て、これらバックグラウンドでの実行は、新しいユーザが要求した掃引を実行するリクエストに迅速に応答することを可能にするよう、終了され得る。図18の方法120に示されるように、SMTLSは、周期的に又は不定期にチューニングパスがモニタされ、修正され得る。

【0095】

ブロック122において、SMTLSモニタ及び制御アルゴリズムは、最後のレーザー電流チューニングパス掃引を実行する。

【0096】

30

ブロック124において、SMTLS電流(群)は時間的に掃引され、時間に対するSMTLSレーザーの波長掃引を作る。SMTLSレーザーの波長は、上述のように波長モニタリングデバイスによってモニタされ得る。

【0097】

ブロック126において、波長モニタリングデバイスからの信号を分析することによって、波長掃引における波長不連続性が起こった点を検出する。波長不連続性の大きさ及び向き(波長において前方又は後方ジャンプのいずれであるか)がモニタされたデータから決定される。

【0098】

ブロック128においてプロセッサは、波長不連続性を低減又は除去するために1つ以上のレーザー制御パラメータに対する修正を決定する。波長不連続性は、モードホップの前か、又はモードホップに続いてレーザー制御パラメータを変化させることによって低減又は除去され得る。

40

【0099】

ブロック130において、時間に対するレーザー波長の波長不連続性(モードホップ)が低減又は除去されるよう、時間に対するSMTLS波長を掃引するために、SMTLS制御電流が時間に対して掃引される、新しい波長チューニングパスが構築される。

【0100】

時間に対する波長掃引における波長不連続性を低減又は除去するためにブロック124~139は反復され得る。

50

【0101】

次に、SMTLSの時間に対する波長のプロファイルが測定され、規定された波長掃引プロファイルに一致するよう調整され得る。

【0102】

ブロック132において、SMTLS掃引は、波長モニタリングデバイスによって測定されることによって、時間に対する波長プロファイルが求められる。

【0103】

ブロック134においてプロセッサは、時間に対する波長のデータを分析することによって、時間に対する波長のプロファイルの規定されたプロファイルからの偏差を決定することができる。

10

【0104】

ブロック136において、プロセッサは、掃引プロファイル中の偏差をレーザー制御パラメータに対する変化へ変換することによって、時間に対する波長のプロファイルを修正する。本発明の重要な局面は、前のステップでのTFP及びTTPにおいて達成される波長連続性を維持しつつ、規定されたプロファイルを達成するために波長掃引も調整することである。

【0105】

ブロック132～136は、測定された時間に対する波長のプロファイルの、規定されたプロファイルからの偏差を低減するために、規定のプロファイルが達成されるか、又は残りの偏差が指定された公差より小さくなるかのいずれかまで反復され得る。

20

【0106】

FMZは、パフォーマンスを改善するが、必要ではないことに注意されたい。任意の周期的光信号がSMZの代わりに用いられ得る。ガスセルの代替としては、例えば精密に較正されたエタロンがある。

【0107】

較正は、設定の2つ以上のセットによって、非常に速く一方から他方へと切替又はインターリーブされることで実現され得る。

【0108】

本発明の例示的实施形態がここに開示されている。当業者であれば、本発明は別の状況では他の応用例を有し得ることが容易にわかるだろう。実際、多くの実施形態及び実現例が可能である。以下のクレームは、本発明の範囲を上述された具体的な実施形態に制限するようにはまったく意図されていない。加えて、「～のための手段」という記載は、要素及びクレームのミーンズ・プラス・ファンクションの解釈を惹起するよう意図され、逆に、具体的に「～のための手段」という記載を使用していないいかなる要素もミーンズ・プラス・ファンクション要素として解釈されるようには意図されておらず、仮にクレームがそうでなければ「手段」という語を含んでいたとしてもそうである。本明細書は、特定の順序で発生する方法ステップを挙げているが、これらステップは、任意の順序で、又は同時に、実行され得る。

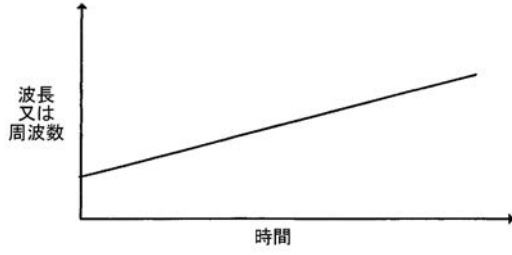
30

【0109】

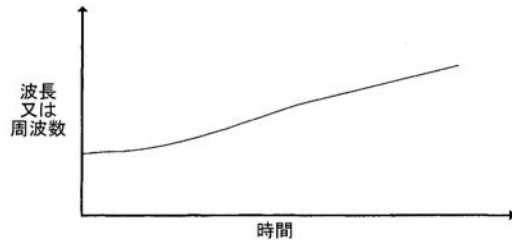
本発明は例示的实施形態について示され、記載されているが、明細書を読み、理解した当業者が均等物及び改変に想到するのは明らかである。本発明は、そのような全ての均等物及び改変をも含み、添付の特許請求の範囲によってのみ限定される。

40

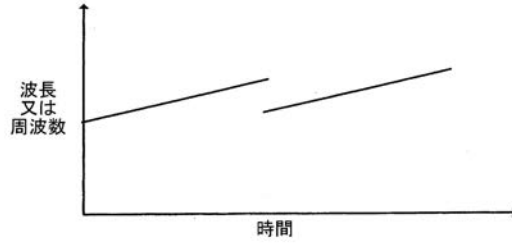
【図1A】



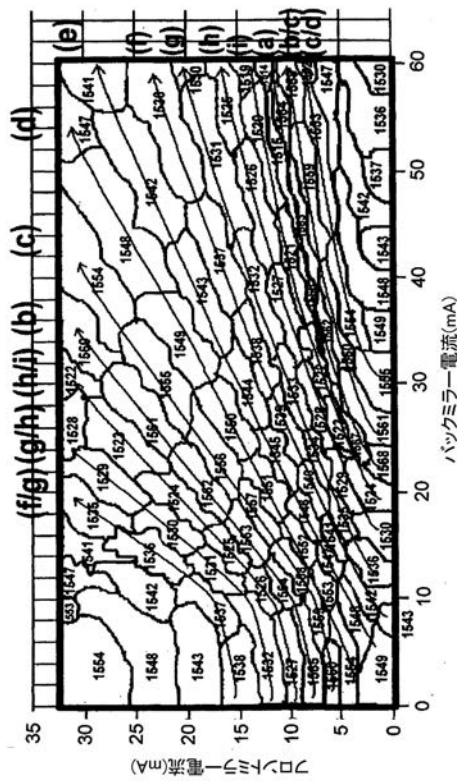
【図1B】



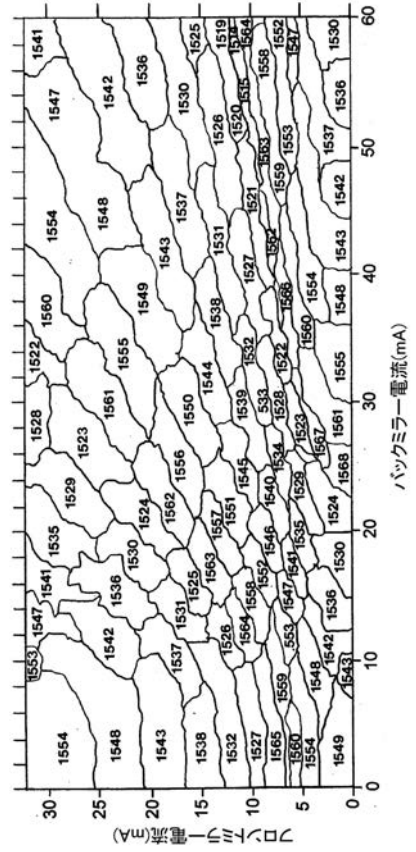
【図1C】



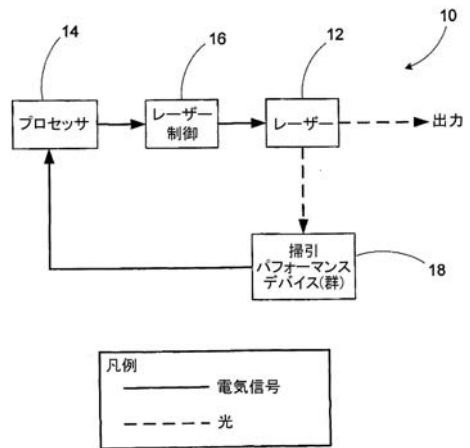
【図3】



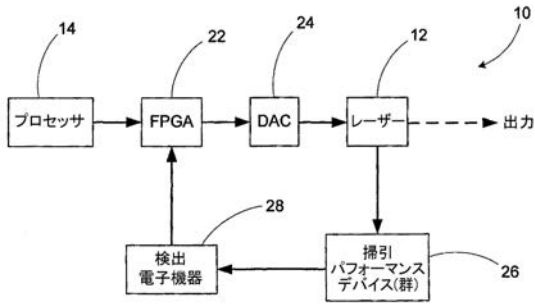
【図2】



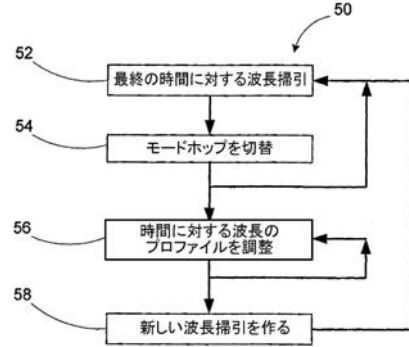
【図4】



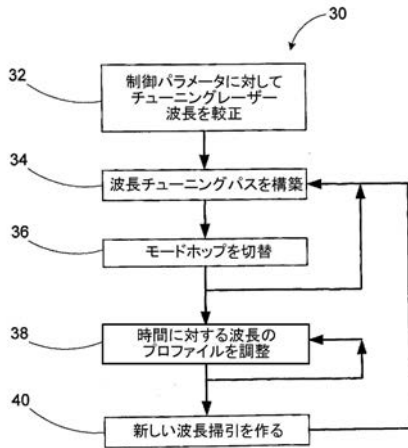
【 図 5 】



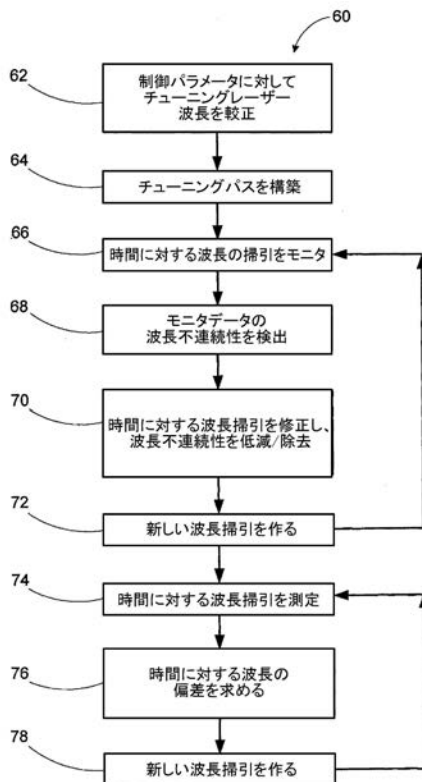
【 図 7 】



【 図 6 】



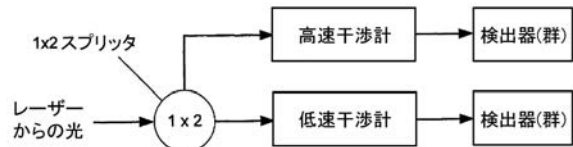
【 図 8 】



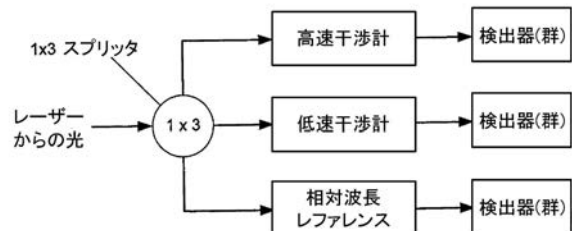
【 図 9 】



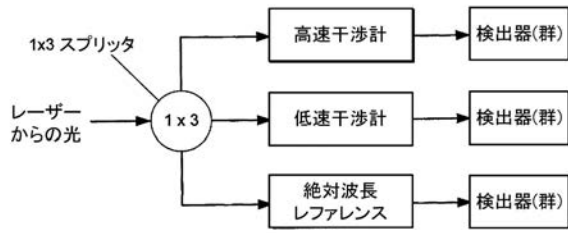
【 図 10 】



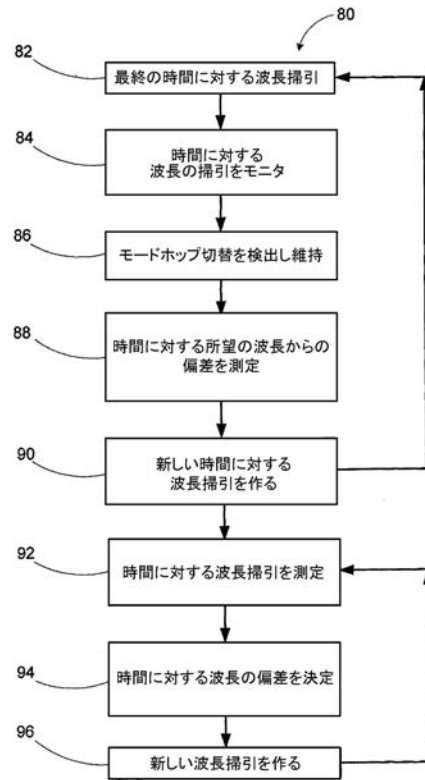
【 図 11 】



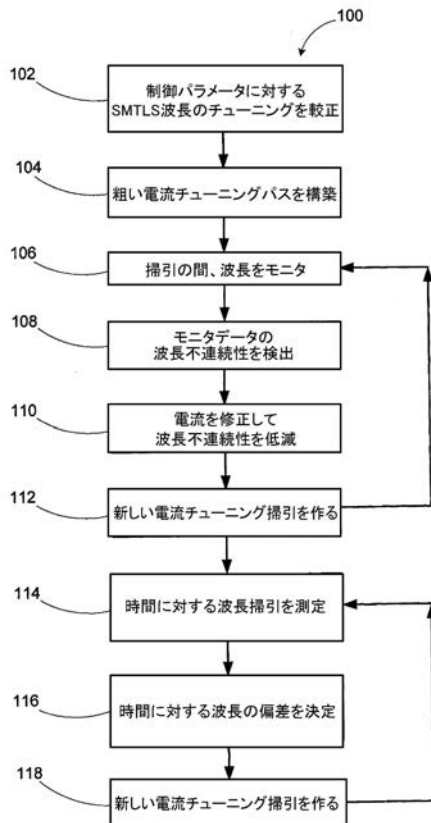
【 図 1 2 】



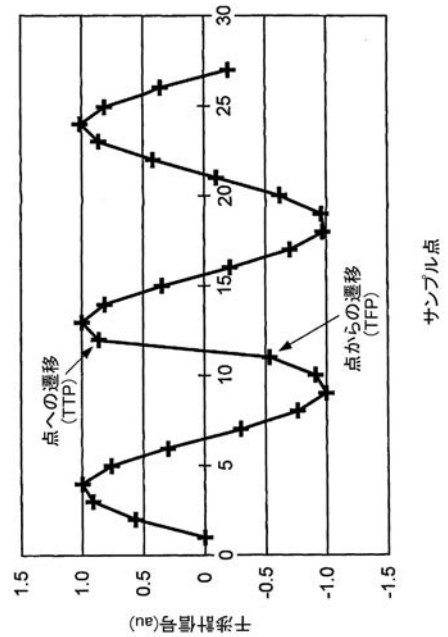
【 図 1 3 】



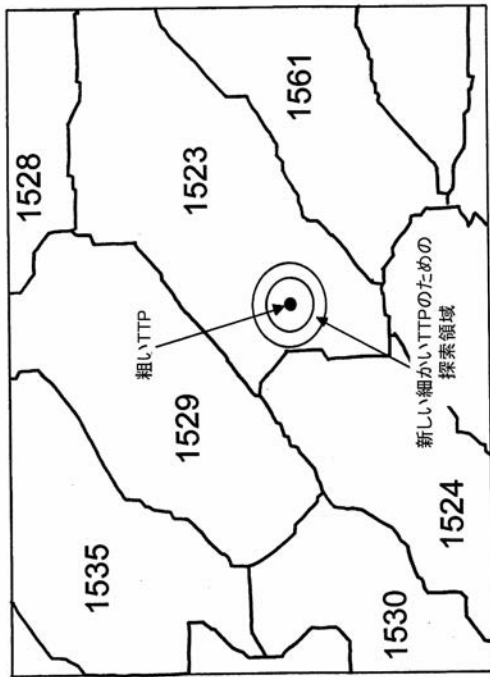
【 図 1 4 】



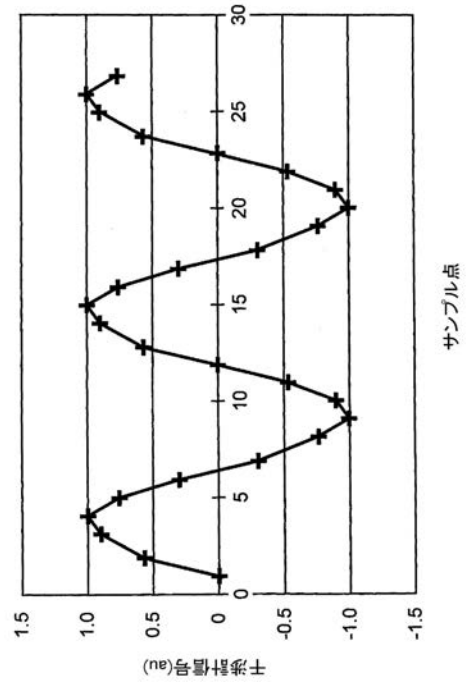
【 図 1 5 】



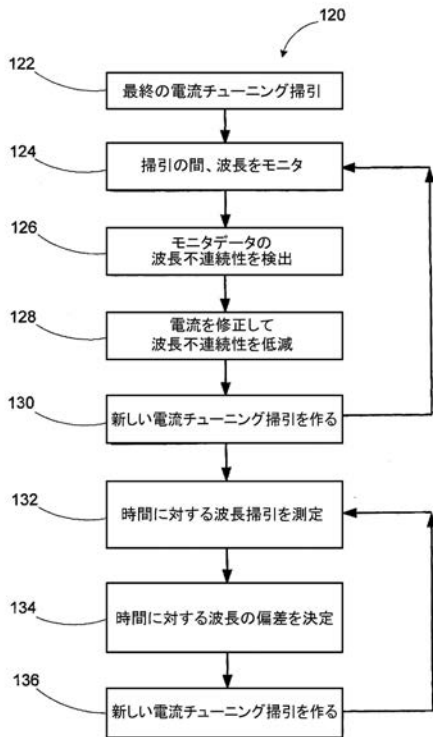
【図16】



【図17】



【図18】



フロントページの続き

(72)発明者 ジェイソン エンシャー

アメリカ合衆国 80026 コロラド州、ラファイエット、S.パブリック ロード 300、
スイート 201

(72)発明者 デニス デリクソン

アメリカ合衆国 80026 コロラド州、ラファイエット、S.パブリック ロード 300、
スイート 201

(72)発明者 マイケル クロフォード

アメリカ合衆国 80026 コロラド州、ラファイエット、S.パブリック ロード 300、
スイート 201

Fターム(参考) 5F173 AB03 AB23 AB33 AC01 AR04 AR06 SA06 SA08 SA22 SA26
SC10 SE01 SE02 SF09 SF33 SF43 SF50 SF64 SG21