

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2014-517344
(P2014-517344A)

(43) 公表日 平成26年7月17日(2014.7.17)

(51) Int.Cl. F 1 テーマコード (参考)
G 0 2 F 1/35 (2006.01) G 0 2 F 1/35 2 K 1 0 2

審査請求 有 予備審査請求 未請求 (全 43 頁)

(21) 出願番号 特願2014-511466 (P2014-511466)
(86) (22) 出願日 平成24年5月15日 (2012.5.15)
(85) 翻訳文提出日 平成26年1月15日 (2014.1.15)
(86) 国際出願番号 PCT/US2012/038015
(87) 国際公開番号 W02012/158727
(87) 国際公開日 平成24年11月22日 (2012.11.22)
(31) 優先権主張番号 61/486,695
(32) 優先日 平成23年5月16日 (2011.5.16)
(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 512074984
オーイーウェイブス、インコーポレーテッド
アメリカ合衆国 91107 カリフォルニア州、パサデナ、スイート 140、エヌ、ハルステッド ストリート 465
(74) 代理人 100109634
弁理士 舩谷 威志
(72) 発明者 マーレキー、リュート
アメリカ合衆国 91105 カリフォルニア州、パサデナ、グレン オークス ブルバード 1230

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 非線形光共振器に基づいた単一の光トーン、RF発振信号およびトリプル発振器デバイス内の光コムの生成

(57) 【要約】

非線形光学材料によって構成された光共振器に基づいた技術およびデバイスにより、単一の光トーン、無線周波数(RF)発振信号および異なる光周波数を有する光周波数コム信号を生成するためのトリプル発振器デバイスを形成する。

【選択図】 図1

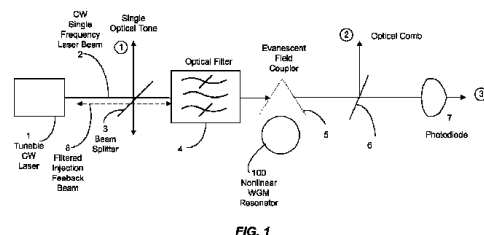


FIG. 1

【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

単一の光トーン、無線周波数 (R F) 発振信号および異なる光周波数を有する光周波数コム信号を生成するためのトリプル発振器デバイスであって、

三次光非線形性を示す非線形光学材料によって形成された光共振器と、

レーザ搬送波周波数におけるレーザビームであって、前記共振器の前記非線形光学材料と相互作用して、前記共振器内の前記レーザ搬送波周波数を含む異なる光周波数を含む光周波数コムを生成するレーザビームを生成する連続波 (C W) レーザと、

前記共振器内への前記レーザビームに、前記共振器内から前記共振器の外部へ出ていく光を、前記レーザへ向かう自己注入フィードバックビームとして結合させる光カップラと、

前記レーザおよび前記共振器間に配置され、前記光エバネッセントカップラから前記レーザへと方向付けられた前記自己注入フィードバックビームをフィルタリングし、前記レーザ搬送波周波数における光を前記レーザ中へと方向付けて、前記自己注入フィードバックビーム中の他のスペクトルコンポーネントが前記レーザ中へ進入することを遮断しつつ、前記レーザ搬送波周波数において前記レーザを前記共振器に対して注入同期させる光フィルタと、

前記レーザと前記光フィルタとの間に配置され、前記レーザと前記光フィルタとの間の前記ビームの一部を透過させ、前記ビームの別の部分を、前記レーザ搬送波周波数における単一の光トーンである第 1 のデバイス出力として方向付ける第 1 のビームスプリッタと

、前記発振器の外部において結合され、前記光周波数コムを搬送する出力光ビームを受信するよう配置され、 R F 発振信号を第 2 のデバイス出力として生成するフォトダイオードと、

前記フォトダイオードによって受信された前記出力光ビームの光経路内に配置され、前記 R F 発振信号を生成するために前記出力光ビームの一部を前記フォトダイオードへ送信し、前記ビームの別の部分を前記共振器内において発生した前記光周波数コムのレプリカである第 3 のデバイス出力として方向付ける第 2 のビームスプリッタと、を含むデバイス。

【請求項 2】

前記レーザは半導体レーザである、請求項 1 のデバイス。

【請求項 3】

前記共振器が載置される基板と、

前記基板上に形成され、前記レーザから前記共振器へと前記レーザビームを搬送し、前記共振器から前記光コムを有する前記出力光ビームを搬送する光導波路と、を含む、請求項 1 のデバイス。

【請求項 4】

前記レーザと前記共振器との間に配置され、前記レーザと前記共振器との間の前記光の位相を制御して前記デバイスを安定化させ、前記レーザ搬送波周波数と前記レーザの注入同期が行われる前記共振器の共振器モードとの間の周波数離調を制御するように構成される位相制御部を含む請求項 1 のデバイス。

【請求項 5】

前記位相制御部は、前記位相制御部の温度を変化させて、前記レーザと前記共振器との間の前記光の前記位相を制御する熱ヒータを含む請求項 4 のデバイス。

【請求項 6】

前記位相制御部は、前記レーザと前記共振器との間の前記光の前記位相を変化させる圧電素子を含む請求項 4 のデバイス。

【請求項 7】

前記位相制御部は、前記レーザと前記共振器との間の前記光の前記位相を変化させる半導体位相シフタを含む請求項 4 のデバイス。

【請求項 8】

前記位相制御部は、前記レーザと前記共振器との間の前記光の前記位相を変化させる調節可能な遅延を生成するように構成されている請求項 4 のデバイス。

【請求項 9】

前記光カプラは、前記レーザからの前記レーザビームを前記共振器中へ結合させ、前記共振器内の光を前記フォトダイオードへの前記出力光ビームとして結合させることの双方に用いられる請求項 1 のデバイス。

【請求項 10】

前記共振器に光学的に結合され、前記共振器内の光を前記フォトダイオードへの前記出力光ビームとして結合させる第 2 の光カプラを含む請求項 1 のデバイス。

【請求項 11】

前記共振器は、ウィスパリングギャラリーモードをサポートするウィスパリングギャラリーモード共振器であり、

前記光カプラは光エバネッセントカプラである請求項 1 のデバイス。

【請求項 12】

単一の光トーン、無線周波数 (RF) 発振信号および異なる光周波数を有する光周波数コム信号を生成するためのトリプル発振器デバイスであって、

三次光非線形性を示す非線形光学材料によって形成された光共振器と、

前記共振器からの光を反射および増幅して、反射光を前記共振器へと方向付けて、前記共振器の前記非線形光学材料と相互作用させ、異なる光周波数を有する光周波数コムを前記共振器内に発生させる反射増幅器であって、前記反射増幅器と前記共振器との間において、レーザ搬送波周波数におけるレーザ発振を維持するための光利得を提供する、反射増幅器と、

前記反射増幅器から前記共振器内への前記光に、前記共振器内から前記共振回路の外部へ出て行く光を前記反射増幅器へ向かうフィードバックビームとして結合し、さらに、前記反射増幅器からの光を前記共振器内へと結合させる光カプラと、

前記反射増幅器と前記共振器との間に配置され、前記光カプラから前記反射増幅器へと方向付けられた前記フィードバックビームをフィルタリングして、前記フィードバックビーム中の前記レーザ搬送波周波数における光を前記反射増幅器内へと方向付けて、前記レーザ搬送波周波数における前記光を増幅させる光フィルタと、

前記反射増幅器と前記光フィルタとの間に配置され、前記反射増幅器と前記光フィルタとの間の前記ビームの一部を透過させ、前記ビームの別の部分を前記レーザ搬送波周波数における単一の光トーンである第 1 のデバイス出力として方向付ける第 1 のビームスプリッタと、

前記共振器の外部において結合され、前記光周波数コムを搬送する出力光ビームを受信するよう配置され、RF 発振信号を第 2 のデバイス出力として生成するフォトダイオードと、

前記フォトダイオードによって受信された前記出力光ビームの光経路内に配置され、前記 RF 発振信号を生成するために前記出力光ビームの一部を前記フォトダイオードへ送信し、前記ビームの別の部分を前記共振器内において発生した前記光周波数コムのレプリカである第 3 のデバイス出力として方向付ける第 2 のビームスプリッタと、を含むデバイス

【請求項 13】

前記共振器が載置される基板と、

前記基板上に形成され、前記反射増幅器から前記共振器へと前記出力ビームを搬送し、前記共振器から前記光コムを有する前記出力光ビームを搬送する光導波路と、を含む請求項 12 のデバイス。

【請求項 14】

前記反射増幅器と前記共振器との間に配置され、前記反射増幅器と前記共振器との間の前記光の位相を制御するように構成される位相制御部を含む請求項 12 のデバイス。

【請求項 15】

10

20

30

40

50

前記位相制御部は、前記位相制御部の温度を変化させて、前記反射増幅器と前記共振器との間の前記光の前記位相を制御する熱ヒータを含む請求項14のデバイス。

【請求項16】

前記位相制御部は、前記反射増幅器と前記共振器との間の前記光の前記位相を変化させる圧電素子を含む請求項14のデバイス。

【請求項17】

前記位相制御部は、前記反射増幅器と前記共振器との間の前記光の前記位相を変化させる半導体位相シフトを含む請求項14のデバイス。

【請求項18】

前記位相制御部は、前記反射増幅器と前記共振器との間の前記光の前記位相を変化させる調節可能な遅延を生成するように構成されている請求項14のデバイス。

10

【請求項19】

前記光カプラは、前記反射増幅器からの前記光を前記共振器中へ結合させることと、前記共振器内の光を前記フォトダイオードへの前記出力光ビームとして結合させることの双方に用いられる請求項12のデバイス。

【請求項20】

前記共振器に光学的に結合され、前記共振器内の光を前記フォトダイオードへの前記出力光ビームとして結合させる第2の光カプラを含む請求項12のデバイス。

【請求項21】

前記共振器は、ウィスパリングギャラリーモードをサポートするウィスパリングギャラリーモード共振器であり、

20

前記光カプラは光エバネッセントカプラである請求項12のデバイス。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

関連出願への相互参照。本出願は、米国仮出願第61/486,695号(名称:「TRIPLE-OSCILLATOR: GENERATION OF A SPECTRALLY PURE RF SIGNAL, OPTICAL FREQUENCY COMB, AND NARROW-LINEWIDTH LIGHT FROM A SINGLE DEVICE」、出願日:2011年5月16日)の利益を主張する。該出願の開示内容は、参照されることにより、本出願の明細書の一部として組み込まれる。

30

【技術分野】

【0002】

本出願は、フォトニックデバイスに基づいた信号発振器に関する。

【0003】

RF周波数およびマイクロ波周波数の信号を生成するRF発振器およびマイクロ波発振器は、電子コンポーネントおよび光コンポーネント双方を用いて光電子発振器(「OEO」)を形成することにより、「ハイブリッド」デバイスとして構築され得る。例えば、米国特許第5,723,856号、第5,777,778号、第5,929,430号、および第6,567,436号を参照。このようなOEOは、電氣的に制御可能な光変調器と、少なくとも1つのアクティブ光電子フィードバックループとを含む。アクティブ光電子フィードバックループは、光検出器によって相互接続された光部分および電気部分を含む。光電子フィードバックループは、変調された光出力を変調器から受信し、この変調された光出力を電気信号へと変換する。この電気信号は、変調器を制御するために供給される。アクティブ光電子ループおよび他の任意のさらなるフィードバックループのループ利得合計が全損失を超えた場合、フィードバックループは、ループの光部分において所望の長さの遅延を発生させることにより、位相ノイズを抑制し、変換された電気信号を同相で変調器へと送って、光変調を生成し、RF周波数またはマイクロ波周波数における電氣的発振を生成および維持する。生成された発振信号は、周波数が調整可能であり、他のRF発振器およびマイクロ波発振器によって生成された信号と比較して、スペクトル線幅が狭

40

50

くかつ位相ノイズが小さい。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

本文書によって、単一周波数の光トーン、RF発振信号またはマイクロ波発振信号、および異なる光周波数を有する光コム信号を単一のデバイス内において生成する、非線形光学材料製の光共振器に基づく技術およびデバイスが提供される。

【0005】

一つの様態では、本文書により、単一の光トーン、無線周波数(RF)発振信号および異なる光周波数を有する光コム信号を生成するトリプル発振器デバイスが提供される。このデバイスは、三次光非線形性を示す非線形光学材料によって形成された光共振器と、レーザ搬送波周波数におけるレーザビームであって、共振器の非線形光学材料と相互作用して、共振器内のレーザ搬送波周波数を含む異なる光周波数を有する光周波数コムを生成するレーザビームを生成する連続波(CW)レーザと、共振器内へのレーザビームに、共振器内から共振器の外部へ出て行く光を自己注入フィードバックビームとして結合させる光カプラと、レーザおよび共振器間に配置され、光エバネッセントカプラからレーザへと方向付けられた自己注入フィードバックビームをフィルタリングし、レーザ搬送波周波数における光をレーザ中へと方向付けて、自己注入フィードバックビーム中の他のスペクトルコンポーネントがレーザ中に侵入するのを遮断しつつ、レーザ搬送波周波数においてレーザを共振器に対して注入同期させる光フィルタと、レーザと光フィルタとの間に配置され、レーザおよび光フィルタ間のビームの一部を透過させ、ビームの別の部分を、レーザ搬送波周波数における単一の光トーンである第1のデバイス出力として方向付ける第1のビームスプリッタと、共振器の外部において結合され、光周波数コムを搬送する出力光ビームを受信するように配置され、RF発振信号を第2のデバイス出力として生成するフォトダイオードと、フォトダイオードによって受信された出力光ビームの光経路内に配置され、RF発振信号を生成するために出力光ビームの一部をフォトダイオードへ送信し、ビームの別の部分を共振器内において発生した光周波数コムのレプリカである第3のデバイス出力として方向付ける第2のビームスプリッタと、を含む。

10

20

【0006】

別の様態では、トリプル発振器デバイスは、三次光非線形性を示す非線形光学材料によって形成された光共振器と、共振器からの光を反射および増幅して、反射光を共振器へと方向付けて、共振器の非線形光学材料と相互作用させ、異なる光周波数を有する光周波数コムを共振器内において発生させる反射増幅器と、を含むよう提供される。反射増幅器は、反射増幅器と共振器との間において、レーザ搬送波周波数におけるレーザ発振を維持するための光利得を提供する。このデバイスは、反射増幅器から共振器内への光に、共振器内から共振器の外部へ出ていく光を反射増幅器へと向かうフィードバックビームとして結合し、さらに、反射増幅器からの光を共振器内へ結合させる光カプラと、反射増幅器と共振器との間に配置され、光カプラから反射増幅器へと方向付けられたフィードバックビームをフィルタリングして、フィードバックビーム内のレーザ搬送波周波数における光を反射増幅器へと方向付け、レーザ搬送波周波数における光を増幅させる光フィルタと、反射増幅器と光フィルタとの間に配置され、反射増幅器と光フィルタとの間のビームの一部を透過させ、ビームの別の部分を、レーザ搬送波周波数における単一の光トーンである第1のデバイス出力として方向付ける第1のビームスプリッタと、共振器の外部で結合され、光周波数コムを搬送する出力光ビームを受信するように配置され、RF発振信号を第2のデバイス出力として生成するフォトダイオードと、フォトダイオードによって受信された出力光ビームの光経路内に配置され、RF発振信号を生成するために出力光ビームの一部をフォトダイオードへ送信し、ビームの別の部分を共振器内において生成された光周波数コムのレプリカである第3のデバイス出力として方向付ける第2のビームスプリッタと、をさらに含む。

30

40

【0007】

50

上記および他の様態ならびに実施様態について、図面、説明および特許請求の範囲中に詳細に記載する。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図1】は、トリプル発振器デバイスの一例を示す。このトリプル発振器デバイスは、単一の周波数光トーン、RFまたはマイクロ波発振信号、および異なる光周波数を有する光コム信号を単一のデバイス内において生成する。

【0009】

【図2A】、

【図2B】、

【図3】、

【図4A - 4B】、

【図5A - 5B】は、WGM共振器および光結合設計の例を示す。

【0010】

【図6A】、

【図6B】および

【図6C】は、非線形WGM共振器に基づいたRF発振器またはマイクロ波発振器の例を示す。

【0011】

【図7】および

【図8】は、光学ポンピング下の非線形WGM共振器の動作を示す。

【0012】

【図9】は、レーザを非線形WGM共振器に同期させるためのPound-Drever-Hall (PDH) レーザフィードバック同期方式を示す。

【0013】

【図10】、

【図11】、

【図12】、

【図13】、

【図14】及び

【図15】は、光コム信号を生成するサンプル非線形WGM共振器の測定を示す。

【0014】

【図16】は、外部反射器を用いることにより、レーザを共振器に同期させる一例を示す。

【0015】

【図17】、

【図18】、

【図19】および

【図20】は、トリプル発振器デバイスのさらなる設計例を示す。

【発明を実施するための形態】

【0016】

本出願は、小型パッケージとしてパッケージ可能な結晶ウイスパリングギャラリモード共振器（例えば、フッ化カルシウムまたは三次光非線形性を有する別の材料）内での四波混合（FWM）の非線形プロセスに基づいた高周波数フォトニックマイクロ波発振器（例えば、X~W帯）の実施様態について説明する。FWMにおいて、高フィネスWGM内の大きい場の強度により、2つのポンプ光子が2つのサイドバンド光子（すなわち、信号光子およびアイドラ光子）へと変換される。発生した光子の周波数の合計は、エネルギー保存則により、ポンピング光の周波数の2倍に等しい。共振器を過飽和させ、共振器（光コム）から放出される複数の光高調波を用いることにより、記載の発振器は、位相ノイズを低減させ、高速フォトダイオード上に発生したマイクロ波信号のスペクトル純度を増

10

20

30

40

50

加させることができる。

【0017】

本文書中に記載の例において、三次非線形性を有しかつ連続波光と共に外部へポンピングされるモノリシック光共振器は、以下の3つの周波数安定信号を生成するトリプル発振器デバイス内で用いることができる：(i)単一の周波数光トーン、(ii)位相同期/モード同期(光パルス)された複数の周波数光トーン、および(iii)スペクトル純度の高い無線周波数(RF)信号。これらの信号全てを生成する単一のデバイスを用いることは、多様な用途において有用であり、特定の例として、このようなトリプル発振器デバイスを単一のチップスケールのアーキテクチャ内にパッケージすることができる。

【0018】

本文書中に記載されるトリプル発振器デバイスはフォトリック発振器であり、レーザ搬送波周波数における線幅の狭いレーザビームと、光コム形式の複数のモード同期光トーンと、スペクトル純度の高いRFまたはマイクロ波信号と、を生成することができる。いくつかの実施形態において、トリプル発振器は、高Qモノリシック光共振器および自己注入または他の種類の同期を介して共振器と同期した連続波(CW)レーザ(例えば、半導体レーザ)に基づく。自己注入同期の場合、共振器からの共振フィードバックに起因してレーザ発振(lasing)を開始する光増幅器を用いることができる。共振器材料は、三次非線形性を有し、これにより、光信号の相互位相および自己位相変調の効果が共振器内において発生し得る。

【0019】

レーザを共振器に同期させることにより、レーザ線幅が大幅に低減し、よってサブkHz光信号の生成が可能になる。CWレーザビームによってポンピングされた非線形共振器は、光周波数コムを生成することができる。いくつかの条件において光周波数コムは、光周波数コムを高速フォトダイオード上において復調することにより、スペクトル純度が高くかつ周波数安定のRF信号を生成するために用いることができる。本文書中に記載の設計により、単色光、光周波数コムおよびRF信号の生成が単一のデバイスにおいて統合される。共振器に進入し共振器と相互作用する光の位相は、対応する光またはRF出力内の前述の3つの信号それぞれを得るために調整することができる。位相調節は、例えば、半導体位相部の提供、調節可能な遅延の挿入、またはレーザと共振器との間のセグメントの光路長の熱的な変更、または電圧および/または電流の付加によるインデックスの変更により、実行することができる。上記設定の実現可能な例を本文書中に記載する。いくつかのエバネッセント場光カプラおよび単一の共振器を、発生した信号のノイズを低減するために用いることができる。実施形態において、エバネッセント場カプラは、プリズム、テーパ状のファイバまたは平面誘電導波路を用いて実現することができる。この設計の顕著な特徴は、光学素子および電子素子を備えた単一の異種チップ内においてこれらの3つの信号を生成する点である。

【0020】

図1は、単一の光トーン、無線周波数(RF)発振信号および異なる光周波数を有する光コム信号を生成するトリプル発振器デバイスの一例を示す。このデバイスは、三次非線形性を示す非線形光学材料によって形成された光共振器100と、CWレーザビーム2を単一の周波数(レーザ搬送波周波数)において生成する連続波(CW)レーザ1を含む。このビーム2は、共振器100中に導入され、共振器100の非線形光学材料と相互作用して、共振器100内のレーザ搬送波周波数を含む異なる光周波数を有する光コムを生成する。共振器100と結合され、共振器100中へレーザビームを結合し、さらに共振器100内から出てきた光をレーザ1に向かう注入フィードバックビームとして結合させる光カプラ5が提供される。この光カプラは、多様な光結合構成において実装することができる(例を非限定的に挙げると、例えば、いくつかの実施形態の光インターフェースにおける光エバネッセント場ベースの光を結合させるエバネッセント光カプラ)。光フィルタ4は、レーザ1と共振器100との間に配置され、光エバネッセントカプラ5からレーザ1へと方向付けられた注入フィードバックビームをフィルタリングして、レーザ搬送

10

20

30

40

50

波周波数における注入フィードバックビーム中の光をレーザ 1 中へと方向付けて、レーザ搬送波周波数において、共振器 100 に対するレーザ 1 の注入同期を行う。光フィルタ 4 はバンドパスフィルタであり、自己注入フィードバックビーム中の他のスペクトルコンポーネントがレーザ 1 中に進入することを遮断する。この例において、第 1 のビームスプリッタ 3 は、レーザ 1 と光フィルタ 4 との間に配置され、レーザ 1 と光フィルタ 4 との間のビームの一部を透過させ、ビームの別の部分を第 1 のデバイス出力として方向付ける。第 1 のデバイス出力は、レーザ搬送波周波数における単一の光トーンである。光検出器 7 (例えば、高速フォトダイオード) は、共振器 100 の外部において結合され、光コムを搬送する出力光ビームを受信して、RF 発振信号を第 2 のデバイス出力として生成するように、配置される。第 2 のビームスプリッタ 6 は、フォトダイオード 7 によって受信された出力光ビームの光経路内に配置され、RF 発振信号を生成するために出力光ビームの一部をフォトダイオード 7 へと送り、また、ビームの別の部分を第 3 のデバイス出力として方向付ける。第 3 のデバイス出力は、共振器 100 内において生成された光コムのレプリカである。

10

20

30

40

50

【0021】

光フィルタ 4 は、光コム中の他の光トーンを拒絶しつつ、光コム中の単一の光トーンを選択するように設けられる。この選択された光トーンは、レーザ 1 が動作するレーザ搬送波周波数における光であり得る。いくつかの設計において、レーザ 1 は、非線形共振器 100 内の非線形光相互作用を介する光コム中の 2 つの異なる光トーンが同時に存在することができないように、線幅の狭い高キャピティ-Qファクターの光共振器を有する。この場合、光フィルタ 4 は省略してもよい。

【0022】

図 1 中の光共振器 100 および本文書中に記載の他のトリプル発振器デバイスは、多様な共振器構成において実装することができる。図 18 中の対応する光カプラ 5 またはさらなる光カプラは、光共振器 100 の特定の実施様態に適したカプラ構成において構成することができる。光ウィスパリングギャラリモード共振器は光共振器 100 の例であり、光ウィスパリングギャラリモード共振器は、ウィスパリングギャラリモード共振器の多様な技術的特徴を有効に活用し、特定の用途の多様な要求を満たすために用いることができる。他の実施様態において、ここに記載されるトリプル発振器デバイスは、ウィスパリングギャラリモード共振器と異なる他の光共振器を用いて実装することができる。

【0023】

以下において、非線形 WGM 共振器 100 の構造の具体的詳細と、所望の光コムを生成するための非線形性に基づいた動作とについて説明する。

【0024】

光共振器は、光ウィスパリングギャラリモード(「WGM」)共振器として構成することができ、特定の 1 組の共振器モード(ウィスパリングギャラリ(「WG」)モードとして知られる)をサポートする。これらの WG モードは、境界における全内部反射に起因して、共振器表面近傍の内側領域内に閉じ込められる光波場を示す。例えば、誘電体球を用いて WGM 共振器を形成することができ、WGM モードによって示される光波場は、球境界における全内部反射に起因して赤道周囲における球表面近傍の内側領域内に閉じ込められる。直径が $10 \sim 10^2$ ミクロンオーダーであるシリカ微小球は、Q 値が 10^9 を超える小型光共振器を形成するために用いられている。このような高 Q WGM 共振器は、高スペクトル純度および低ノイズの発振信号を生成するために用いることができる。結合によりウィスパリングギャラリモードになると、光エネルギーは、長い光子寿命にわたって球赤道またはその近傍において循環し得る。

【0025】

本出願中に記載の結晶によって構成される WGM 共振器は、熔融シリカ製の WGM 共振器よりも光学的に優れている。結晶質の CaF_2 製の WGM 共振器は、 10^{10} 以上の Q ファクターを生成することができる。このような高い Q 値により、多様な用途が可能になる(例えば、カー非線形効果に起因するキロヘルツ光共振および低閾値光ハイパーパラメ

トリック発振の発生)。以下、先ず結晶WGM共振器の例示的なジオメトリについて説明し、次に、異なる材料によって構成されるWGM共振器の特性について説明する。

【0026】

図2A、図2Bおよび図3は、3つの例示的なWGM共振器を示す。図2Aは、球状WGM共振器100を示す。球状WGM共振器100は、固体誘電体球である。球100は、z軸101に対して対称な平面102において赤道を有する。平面102の外周は円形であり、平面102は円形断面である。WGモードは、球状外面内における赤道周囲に存在し、共振器100内において循環する。赤道平面102の周囲の外面の球面曲率により、z方向およびその垂直方向双方に沿った空間的制限が得られ、これによりWGモードがサポートされる。球100の偏心率は一般的に低い。

10

【0027】

図2Bは、例示的な回転楕円体微小共振器200を示す。この共振器200は、(軸方向長さaおよびbを有する)楕円を短楕円軸101(z)に沿った対称軸周りに回転させることにより、形成することができる。よって、図2A中の球状共振器と同様に、図2B中の平面102も円形外周を有し、円形断面である。図2Aの設計と異なり、図2B中の平面102は、非球状回転楕円体の円形断面であり、回転楕円体の短楕円体軸周囲にある。共振器100の偏心率は $(1 - b^2 / a^2)^{1/2}$ であり、一般的には高い(例えば、1.0¹を超える)。よって、共振器200の外面は、球の一部ではなく、球状外部の場合よりも、z方向に沿ったモードにおいてより高い空間的制限を提供する。より詳細には、Zを含む平面(例えば、zyまたはzx平面)におけるキャビティのジオメトリは楕円である。共振器200の中心における赤道平面102は、軸101(z)に対して垂直であり、WGモードは、共振器200内の平面102の外周近傍において循環する。

20

【0028】

図3は、別の例示的なWGM共振器300を示す。このWGM共振器300は、非球状外部を有する。その外部プロファイルは概して円錐形状であり、デカルト座標の二次方程式によって数学的に表すことができる。図2Aおよび図2Bのジオメトリと同様に、外面は、平面102内における方向および平面102に対して垂直なz方向双方における曲率を提供し、これにより、WGモードが制限およびサポートされる。このような非球状の非楕円表面は、例えば放物線または双曲線であり得る。図3中の平面102は円形断面であり、WGモードは赤道中の円形周囲において循環することとなる。

30

【0029】

図2A、図2Bおよび図3の上記の3つの例示的なジオメトリの共通するジオメトリ特徴として、これらのジオメトリ全てが軸101(z)周りに対称にまたは円対称である点がある。軸101(z)周りに対称に、WGモードが平面102内において循環する。曲線状外面は、平面102の周囲において平滑であり、平面102の周囲において二次元制約を提供することにより、WGモードをサポートする。

【0030】

顕著なことに、z方向101に沿った各共振器内のWGモードの空間広がり、平面102の上側および下側において制限されるため、球100、回転楕円体200または円錐形状300の全体を設ける必要はない。その代わりに、平面102の周囲の形状全体のうち、ウィスパリングギャラリーモードをサポートできるだけの十分な大きさの一部のみを用いて、WGM共振器を形成することができる。例えば、球の適切な一部から形成されたリング、ディスクおよび他のジオメトリを球状WGM共振器として用いることができる。

40

【0031】

図4Aおよび図4Bは、ディスク形状のWGM共振器400と、リング形状のWGM共振器420とをそれぞれ示す。図4Aにおいて、固体ディスク400は、中央平面102の上方の上面401Aと、距離Hを隔てて平面102の下側の下面401Bとを有する。距離Hの値は、WGモードをサポートできるだけ十分に大きい。中央平面102の上方のこの十分な距離を超えると、共振器は、図3、図4Aおよび図4Bに示すような鋭い縁部を持ち得る。外部の曲線状表面402は、所望のWGモードおよびスペクトル特性を達成

50

するように、図 2 A、図 2 B および図 3 に示すような形状のうちいずれかから選択することができる。図 4 B 中のリング共振器 4 2 0 は、図 4 A 中の固体ディスク 4 0 0 から中央部分 4 1 0 を除去することにより、形成することができる。WGモードは外面 4 0 2 の近傍のリング 4 2 0 の外部近傍に存在するため、リングの厚さ h を、WGモードをサポートするように十分に大きな値に設定することができる。

【0032】

光カプラは、光エネルギーをエバネッセント結合によって、WGM共振器内または外部において結合させるために用いられることが多い。図 5 A および図 5 B は、2つの例示的な光カプラがWGM共振器と係合している様子を示す。光カプラは、共振器の外面と直接接触するかまたは共振器の外面から間隔を以て分離され、これにより、所望の重要結合を提供する。図 5 A は、WGM共振器のためのカプラとしての角度研磨されたファイバ先端を示す。角度付きの端面を有する導波路（例えば、平面導波路または他の導波路）も、カプラとして用いることができる。図 5 B は、WGM共振器のためのカプラとしての微小ブリズムを示す。他のエバネッセントカプラも利用可能である（例えば、フォトニックバンドギャップ材料から形成されたカプラ）。

10

【0033】

WGM共振器は、光子を小体積内に長期間効果的に閉じ込めるために用いることができる。そのため、WGM共振器は、基礎研究および実際のデバイス双方において、広範な用途を有する。例えば、WGM共振器は、原子光保存の代替策として、線形光学を用いた光保存のために用いることができ、また、原子ベースの低速光実験の代替策として、調整可能な光遅延線のために用いることもできる。WGM共振器は、他の用途の内、例えば光フィルタリングおよび光電子発振器にも用いることも可能である。

20

【0034】

WGM共振器を特徴付ける多数のパラメータ（例えば、内外結合効率、モード体積、自由スペクトル範囲）のうち、線質係数（ Q ）は基本的なものである、 Q ファクターは、共振器モード（ t ）中の光エネルギーの寿命に関連し、 $Q = 2\pi \nu t$ であり、ここで、 ν はモードの線形周波数である。 $Q = 2 \times 10^{10}$ および波長 $S = 1.3 \mu\text{m}$ のモードに対応するリングダウンタイムは 15 Ts であるため、光保存デバイスとして魅力的な極めて高 Q の共振器が得られる。さらに、いくつかの結晶は、WGM特性の連続的操作を可能にする十分な非線形特性を持ちつつ、極めて高 Q のウィスパリングギャラリモードが可能なくらいの十分な透明度を有するので、それら結晶の有用性が拡大する。

30

【0035】

誘電共振器において、最大線質係数は $Q_{\text{max}} = 2\pi n_0 / (Sl)$ を超えることはできない。ここで、 n_0 は材料の反射率であり、 S は真空中の光の波長であり、 l は誘電材料の吸収係数である。吸収が低いほど、 Q_{max} が大きくなる。よって、WGMの可能な最も狭い線幅 $K = t^{-1}$ を予測するためには、透明性窓内の透明誘電中の光減衰値を知る必要がある。この透明性窓内において、殆どの用途において損失はごく小さいものとみなされる。この残留基礎吸収についての問題は、適切な感度を有する測定方法の不在に起因して、殆どの材料について未解決のままである。幸運なことに、高 Q ウィスパリングギャラリモードそのものが、多様な透明材料中における極めて低い光減衰を測定するための独自のツールである。

40

【0036】

アモルファス材料へ適用することが可能なサーマルリフロー方法によって作製されたWGM共振器についての従来の試験の結果、 Q ファクターは 9×10^9 未満となった。これらの測定は、熔融シリカ微小キャビティを用いて行われ、表面張力によってほぼ完全な共振器表面が得られ、その結果、材料吸収によって決定される基本的限界に近い測定された Q ファクターを得た。光学結晶は、熔融シリカよりも損失が低いことが予測される。なぜならば、結晶は理論的には完全格子を有し、アモルファス材料中に常に存在する異物および不均等性を含まないからである。多数の結晶質材料用の透明性窓は、熔融シリカのよりもずっと広い。そのため、十分に高純度な材料を用いれば、透明性窓の中央におい

50

てずっと低い減衰を期待することができる。なぜならば、レイリー散乱縁部および多フォノン吸収縁部双方がさらに離間する方向に押圧され、紫外線領域および赤外線領域それぞれに向かうからである。さらに、結晶は、全てではないにしろ、OHイオンおよび水の化学吸着に起因する外因性の吸収効果、 $1.55\ \mu\text{m}$ での透明性窓の下部近傍における溶融シリカのQファクターの報告された制限に悪影響を受けることが少ない。

【0037】

最近まで、結晶性WGM共振器の実現に関する1つの未解決の問題として、表面散乱を無くすための回転楕円体表面のナノメートルスケールの平滑性が得られる作製プロセスが無い点があった。ごく最近になって、この問題が解消された。すなわち、機械的光学研磨技術が、Qが 10^9 に近い超高Q結晶性WGM共振器を作製するために用いられている。本文書において、透明結晶と共に作製されたWGM共振器中の高線質係数 ($Q = 2 \times 10^{10}$) についてさらに説明する。

10

【0038】

室温におけるキロヘルツ範囲の共振帯域幅および高共振コントラスト (50%以上) を有する結晶性WGM共振器は、高性能光ネットワークへの集積化に有望である。モード体積が小さくまた単一光子の共振が極めて狭いため、多様な低閾値非線形効果を、小型ブロードバンド非線形感受率に基づいて、WGM共振器において得ることができる。一例として、以下において、より小体積の高Qシリカ微小球として上述した、結晶性共振器中における熱光学不安定度の観測について説明する。

【0039】

20

光学結晶の透明性窓内における小さな光減衰についての一貫した実験データはほとんど無い。例えば、特別に調製された溶融シリカの最小吸収の高感度測定は、該材料から作製されたキロメートル単位の光ファイバによってのみ、可能となる ($S = 1.55\ \text{Tm}$, における $l = 0.2\ \text{dB/km}$ ($-1 \cdot 10^{-7}\ \text{cm}^{-1}$))。残念なことに、この方法は、結晶質材料には適用できない。ファイバはサファイアなどの結晶からも得られているが、これらファイバ中の減衰 (数 dB / メートル) は、表面の散乱によって決定される。透明誘電材料中の光吸収の測定のための熱量測定方法の場合、誤差が $-1 \cdot 10^{-7}\ \text{cm}^{-1}$ のオーダーで発生する。いくつかの透明材料について、残留吸収について熱量測定方法を用いて試験されており、他の材料について、直接散乱実験によって特徴付けが行われている。その結果、どちらにおいても線形減衰の数 ppm / cm レベルの値が得られ、これは、 10^{10} レベルのQ制限に対応する。これが基本的制限であるのか、または用いられる結晶の不完全性によって制限された測定結果であるのか、という疑問がある。

30

【0040】

最高QWGM共振器用の材料の選択は、基本的要素に基づいて行う必要がある (例えば、最も幅広の透明性窓、高純度グレード、および環境安定性)。ハロゲン化アルカリは、吸湿特性および大気湿度に対する感度があるため、不適切である。固体透明材料中のバルク損失は、現象学的な依存によって近似することができる。

$$\alpha \approx \alpha_{UV} e^{\lambda_{UV}/\lambda} + \alpha_R \lambda^{-4} + \alpha_{IR} e^{-\lambda_{IR}/\lambda}, \quad (1)$$

40

ここで、 l_{UV} , l_R , および l_{IR} は、光の青色ウイング (1次電子)、レイリー、および赤色ウイング (多フォノン) 損失をそれぞれ示す。 S_{UV} , および S_{IR} は、材料透明性窓の縁部を示す。この式は、存在し得る結晶不純物に起因する共振吸収を考慮していない。残念なことに、方程式 (1) 中の係数は必ずしも既知ではない。

【0041】

光非線形挙動を有する高QWGM共振器の作製のための非線形材料の一例として、フッ化カルシウム (CaF_2) がある。この材料は、 193 および $157\ \text{nm}$ における紫外線リソグラフィ用途において用いられるため、多様な用途において有用である。幅広アパ

50

チャ光学系に適したこの材料の超高純度結晶が生成され、市販されている。 CaF_2 中の散乱について最近報告された測定によれば、 193 nm において $l = 3 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ であり、 10^{13} レベルのQ制限に対応する近赤外線帯において極めて低い散乱を予測することができる。

【0042】

この波長における格子吸収を中赤外線多フォノン縁部の位置から予測することができ、さらに低いQ制限を得ることができる。残留ドーピングおよび不定比性に起因して、散乱および吸収双方が存在し、実際の共振器中のQが低下する。Q制限のさらなる原因として、研磨技術に起因する残留表面の不均等性に起因する散乱がある。従来の光学研磨品質の限界（平均粗さ $s = 2\text{ nm}$ ）において、WGM表面散乱についての導波路モデルに基づいた推定値は、 $Q \approx 10^{11}$ である。

10

【0043】

フッ化カルシウムおよび LiNbO_3 、 LiTaO_3 および Al_2O_3 によって構成されたいくつかの他の結晶質材料によって作製されたWGM共振器について調査し、その線質係数を測定した。円筒状母材のコアドリルおよびその後の母材リムの回転楕円体ジオメトリ状への研磨により、 CaF_2 共振器を作製した。作製された共振器の直径は4~7ミリメートルであり、厚さは0.5~1mmであった。作製されたフッ化カルシウム共振器のQファクターは、約 2×10^{10} であった。

【0044】

Qの測定をプリズム結合方法を用いて行った。下側に結合されたレジーム中で得られた共振の帯域幅から、固有のQを測定した。共振器中の異なる反射率のため、シリカ（ $n = 1.44$ ）およびフッ化カルシウム（ $n = 1.43$ ）用にBK7ガラスプリズム（ $n = 1.52$ ）を用い、ニオブ酸リチウム（ $n = 2.10$ 、 2.20 ）用にダイヤモンド（ $n = 2.36$ ）を用い、サファイア（ $n = 1.75$ ）用にニオブ酸リチウムプリズム（ $n = 2.10$ ）を用いた。光源として、 760 nm の拡張キャビティダイオードレーザと、 1550 nm の分散型フィードバック半導体レーザと、 1319 nm の固体YAGレーザを用いた。

20

【0045】

高Q非線形WGM共振器を用いて、低閾値光ハイパーパラメトリック発振を実現することができる。材料のカー非線形性によって発生する共振増強四波混合に起因して、発振が発生する。共振器モードの狭い帯域幅および高効率の共振周波数変換に起因して、発振により、ポンプ、信号、およびアイドラー波の安定した狭帯のビート（うなり）が発生する。このプロセスの理論的モデルについて説明する。

30

【0046】

高効率の非線形光相互作用を低光レベルにおいて実現することは、その発端からいって、非線形光学における主な目的の1つである。光共振器は、この目的達成に大きく寄与する。なぜならば、小体積中に光を長期間閉じ込めると、非線形光相互作用が増加するからである。光ウィスパーリングギャラリモード（WGM）共振器は、この目的に特に適している。高線質係数（Q）および小モード体積であるという特徴により、アモルファス材料製のWGM共振器における低閾値レーザ発振の観測と、高効率非線形波混合とが既に得られている。

40

【0047】

光ハイパーパラメトリック発振（ファイバ光学における変調不安定度）は、材料の小非線形性によって妨害されることが多いため、光ハイパーパラメトリック発振を観測するためには、高出力の光パルスが必要となる。 CaF_2 の非線形性は、溶融シリカよりも小さいとはいえ、低出力の連続波ポンプ光を用いて、共振器の高Q（ $Q > 5 \times 10^9$ ）から、共振器モード間の強い非線形相互作用を観測することができた。この相互作用により、新たな場が発生した。

【0048】

高速フォトダイオード上でのポンプと発生したサイドバンドとの混合によって発生した

50

マイクロ波信号の周波数は安定しており、周波数シフトも無い。このような周波数シフトは、自己位相変調効果および相互位相変調効果に起因して発生し得る。逆に、例えばコヒーレントな原子媒体の場合、相互位相変調効果 (a c S t a r kシフト) に起因する周波数の不整合を補償するよう、発振周波数がシフトする。本システムにおいては、発振周波数はモード構造によって与えられるため、共振器寸法の変更によって調整することができる。アモルファス材料および液体によって構成された共振器と異なり、高Q結晶性共振器により、三次非線形プロセスと、高純度のハイパーパラメトリック発振信号の観測との区別が容易になる。その結果、ハイパー発振器は、全ての光二次周波数リファレンスとしての用途において有望となる。

【0049】

ハイパーパラメトリック発振は、誘導ラマン散乱 (S R S) および他の非線形効果によってマスキングされ得る。例えば、W G Mシリカ微小共振器を用いた S R S 実験における光学ポンピング線近傍の二次線の観測を、(媒体の電子カー非線形性に基づいた4光子パラメトリックプロセスというよりは) ポンプと、共振器中に発生した2つのラマン波との間の四波混合として解釈された。多様な誘導非線形プロセス間の相互作用も観測されており、これを液滴球状微小キャビティーにおいて調査した。

【0050】

偏光選択則と、W G Mのジオメトリ選択則とを共に用いることにより、結晶性W G M共振器中の結晶の電子非線形性にのみ起因して発生する非線形プロセスの観測が可能になる。ここで、対称軸に対して円筒状に対称であるホタル石W G M共振器について検討する。立方晶系結晶中の線形反射率は均等かつ等方性であるため、モードについての一般的記述は共振器において有効である。W G Mの T E および T M ファミリーの偏光方向はそれぞれ、対称軸に対して平行および直角である。光学ポンピング光が T E モードへ送られると、ラマン信号を同一モードファミリーにおいて生成することはできない。なぜならば、立方晶系結晶 (例えば、C a F ₂) 中には、三重縮退したラマン活性振動が対称な F _{2g} で1つだけ存在しているからである。最終的に、超高Q結晶質共振器中において、材料およびジオメトリ分散に起因して、ラマン離調周波数における自由スペクトル範囲 (F S R) の値と、搬送波周波数における F S R とが、モードスペクトル幅を超える量だけ異なる。そのため、ラマン信号および搬送波の周波数混合が大きく抑制される。T E モードファミリー中に発生する場合は全て電子非線形性のみ起因し、ラマン散乱は T M モードにおいて発生する。

【0051】

以下の3つのキャビティーモードについて検討する：第1のキャビティーモードは、ポンプレーザによる共振に近く、その他2つのキャビティーモードは、発生した光サイドバンドによる共振に近い。キャビティー内の場の低速の振幅について以下の方程式を用いて、分析を開始した。

10

20

30

$$\dot{A} = -\Gamma_0 A + ig[|A|^2 + 2|B_+|^2 + 2|B_-|^2]A + 2igA^*B_+B_- + F_0,$$

$$\dot{B}_+ = -\Gamma_+ B_+ + ig[2|A|^2 + |B_+|^2 + 2|B_-|^2]B_+ + igB_-^*|A|^2,$$

10

$$\dot{B}_- = -\Gamma_- B_- + ig[2|A|^2 + 2|B_+|^2 + |B_-|^2]B_- + igB_+^*|A|^2,$$

ここで、 $\Gamma_0 = i(\omega_0 - \omega) + K_0$ および $\Gamma_{\pm} = i(\omega_{\pm} - \tilde{\omega}_{\pm}) + K_{\pm}$ 、 K_0 、 K_+ 、および γ_- および ω_0 、 ω_+ 、および ω_- はそれぞれ、光キャビティモードの減衰率および固有振動数である。 ω は、外部ポンプ (A) の搬送波周波数であり、 ω_{\pm} および $\tilde{\omega}_{\pm}$ は、発生した光 (それぞれ、 B_+ および B_-) の搬送波周波数である。これらの周波数は、発振プロセスによって決定され、外部から制御することはできない。しかし、これらの間には関係が成り立つ (エネルギー保存則) : $2\omega = \tilde{\omega}_+ + \tilde{\omega}_-$ 。 $|A|^2$ 、 $|B_+|^2$ 、および $|B_-|^2$ のように正規化された、無次元の低速変化する振幅 A、 B_+ 、および B_- 、により、対応するモードにおける光子数を記述する。結合定数は、以下の式から得られる。

20

30

$$g = h\omega_0^2 n_2 c / V n_0^2$$

ここで、 n_2 は光学定数であり、光非線形性の強さを特徴付ける。 n_0 は材料の線形反射率であり、 V はモード体積であり、 c は真空中の光速度である。この結合定数を導出して、これらのモードのジオメトリはほぼ重複していると仮定する。このような重複は、これらのモード間の周波数差が小さい場合に発生する。力 F_0 は、システムの外部ポンピング $F_0 = (2K_0 P_0 / \omega_0)^{1/2}$ を示し、ここで、 P_0 は、外部から付加されたモードのポンプ出力である。

40

【0052】

簡潔さのため、これらのモードは同一であると仮定する (すなわち、 $K_+ = K_- = K_0$)。これは、実際の共振器を用いた観測によって正当化される。次に、上記式 (1) ~ (3) の定常状態を解くことにより、発生した場の発振周波数が得られた。

$$\omega - \tilde{\omega}_- = \tilde{\omega}_+ - \omega = \frac{1}{2}(\omega_+ - \omega_-),$$

すなわち、ビート周波数は、共振器モード間の周波数差のみに依存し、ポンピングモードからの光出力またはレーザ離調には依存しない。その結果、電子周波数同期回路は、ポンプレーザの搬送波周波数を変化させるが、ポンピングレーザのビートの周波数および発生したサイドバンドを変化させない。

10

【0053】

閾値光出力は、キャビティ内の場の低速の振幅についての3つの方程式一式の定常状態解により、得ることができる。

$$P_{th} \simeq 1.54 \frac{\pi}{2} \frac{n_0^2 V}{n_2 \lambda Q^2},$$

20

ここで、数値ファクター1.54は、発振閾値に対する自己位相変調効果の影響によるものである。この実験における閾値の理論値は、 $P_{th} \simeq 0.3 \text{ mW}$ である。ここで、 $n_0 = 1.44$ は材料の反射率であり、 $n_2 = 3.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ は、フッ化カルシウムの非線形性係数であり、 $V = 10^{-4} \text{ cm}^3$ はモード体積であり、 $Q = 6 \times 10^9$ 、および $S = 1.32 \mu\text{m}$ である。

【0054】

上記方程式は、モード体積の低下と共に、パラメトリックプロセスの効率が増すことを示している。比較的大きなWGM共振器を用いたのは、作製上の便宜のためである。共振器のサイズを小型化した場合、発振の閾値が大幅に低下し得る。モード体積はおおよそ $V = 2 \text{ pSR}^2$ と見積もれるため、半径Rを1桁だけ低減した場合、パラメトリックプロセスの閾値は2桁低減することが明らかである。その結果、原子コヒーレンスに基づく発振器と同クラスのWGM共振器が得られる。しかし、原子発振器中のサイドバンド間の周波数差と対照的に、WGM発振器の周波数は、出力シフト(ac Stark)を含まない。

30

【0055】

システムの量子力学的振る舞いを記述するランジュバン方程式に基づいて分析を行ったところ、原子コヒーレント媒体におけるハイパーパラメトリックプロセスの低位相拡散と同様に、ビートの位相拡散は低いことがわかった。発振閾値に近く、位相拡散係数は以下のようになる。

40

$$D_{beat} \simeq \frac{\gamma_0^2}{4} \frac{\hbar \omega_0}{P_{Bout}},$$

ここで、 P_{Bout} はサイドバンド中の出力である。対応するアラン偏差は、 $S_{beat}/W_{beat} = (2 D_{beat} / t W_{beat}^2)^{1/2}$ である。アラン偏差を以下のように仮定する。

50

$$\sigma_{beat} / \omega_{beat} \simeq 10^{-13} / \sqrt{t}$$

$K_0 = 3 \times 10^5 \text{ rad/s}$ の場合、 $P_{\text{Beat}} = 1 \text{ mW}$ 、 $\omega_0 = 1.4 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ および $\omega_{\text{beat}} = 5 \times 10^{10} \text{ rad/s}$ である。発振の安定性についての一般的な後続調査については、他の場所で、後で公表する。

【0056】

10

我々の実験により判明したところによれば、上記3つの相互作用モードを超える数のモードが、プロセスに参与することができる。参与するモードの数は、共振器中のモード間隔の変化によって決定される。一般的に、材料の二次分散およびジオメトリ分散に起因して、共振器のモードは等距離ではない。ここで、 $D = (2\omega_0 - \omega_+ - \omega_-) / K_0$ を導入して、共振器の二次分散を考慮に入れた。 $|D| \ll 1$ である場合、これらのモードは等距離ではないため、複数の高調波発生は不可能となる。

【0057】

WGM共振器の主要モードシーケンスのジオメトリ分散は、半径 R の共振器については、 $D \approx 0.41c / (K_0 R n_0 m^{5/3})$ であり、 ω_+ 、 ω_0 、および ω_- は、共振器の $m+1$ 、 m 、および $m-1$ モードと仮定される ($\omega_m R n_{\omega_m} = mc$ 、 $m \gg 1$)。 $R = 0.4 \text{ cm}$ 、 $K_0 = 2 \times 10^5 \text{ rad/s}$ 、 $m = 3 \times 10^4$ の場合、 $D = 7 \times 10^{-4}$ が得られ、よって、ジオメトリ分散はこの場合比較的小さい。しかし、材料分散は十分に大きい。Sellmeier分散方程式を用いて、ポンプレーザ波長において $D \approx 0.1$ を得た。これは、ほぼ3つのサイドバンド対をシステム内において生成することができる(そのうち2つのみが実験において確認された)ことを意味する。

20

【0058】

さらに、実験においてラマン信号が無かったことから、媒体の有効ラマン非線形性が先行の測定値よりも低いことが分かる。数に基づいた理論的推定から、ラマンおよびハイパーパラメトリックプロセス双方において、ポンプ出力閾値はほぼ等しいことが予測される。SR S 閾値用に導出された式 $P_{R \approx p} \approx 2n_0^2 V / GS^2 Q^2$ (ここで、 $G \approx 2 \times 10^{-1} \text{ cm/W}$ は、 CaF_2 についてのラマン利得係数である)を用いて、 CaF_2 製の全ての共振器について、 $P_{\text{th}} / P_{R \approx p} \approx 1$ を推定する。しかし、上述したように、実験においてSR S 信号は全く見られなかった。

30

【0059】

よって、ポンピング光と材料とが長時間相互作用するため、 CaF_2 の三次非線形性が小さい場合であっても、狭帯光サイドバンドが有効に発生する。このプロセスは、新規の種類の全光周波数リファレンスの実証に用いることができる。さらに、発振は、スクイーズド光の発生源として有望である。なぜならば、ハイパーパラメトリックプロセスにおいて生成されたサイドバンド光子対は一般的には、量子相関があるからである。

【0060】

40

フォトニックマイクロ波発振器は、明確に規定されかつ安定したビート信号を生成するために、多色光の生成およびその後の復調に基づいて、構築することができる。非線形WGM光共振器に基づいたハイパーパラメトリック発振器を用いて、超安定マイクロ波信号を生成することができる。このようなマイクロ波発振器の利点として、サイズが小さい点および入力電力が小さい点があり、また、(共振器のサイズによって決定される)任意の所望の周波数におけるマイクロ波信号を生成することができる。

【0061】

ハイパーパラメトリック光発振は、ポンプビーム中の2つのポンプ光子を1つの信号光子および1つのアイドラー光子へ変換することによる、2つのポンプ、信号およびアイドラー光子間の四波混合に基づく。この混合によって、ポンピング波を費やした真空ゆらぎ

50

から、信号およびアイドラー光サイドバンドが成長することができる。高フィネスWGM中の高キャビティ内強度により、4光子プロセス（例えば、 $h + h \rightarrow h(+ M) + h(- M)$ ）に基づく（3）ベースが得られる。ここで、 ω は、外部ポンピングの搬送波周波数であり、 M は、共振器自由スペクトル範囲によって決定される $M \approx \text{FSR}$ である。プロセスのカスケードおよび複数の等距離信号およびアイドラー高調波（光コム）の生成も、この発振器において可能である。発振器の光出力の復調を高速フォトダイオードを用いて行うことにより、周波数 M における高周波数マイクロ波信号を生成することができる。信号のスペクトル純度は、WGMのQファクターおよび発生した信号およびアイドラーの光出力の増加と共に増加する。発振のポンピング閾値は、超高Qファクターの共振器の微小ワットレベルと同じくらい低くすることができる。

10

【0062】

ハイパーパラメトリック発振を直接適用するには、いくつかの問題がある。そのような問題の1つとして、WGM共振器から出ていく光信号がほとんど位相変調されている事実がある。そのため、高速フォトダイオード上で信号を直接検出しても、マイクロ波は発生しない。この相違を回避するために、非線形WGM共振器を、さらなる遅延線が干渉計の別のアームに配置されたマッハツェンダー干渉計のアームに配置することができる。2つのアームからの光の光学干渉により、位相変調信号を振幅変調信号へと変換することができる。この振幅変調信号は光検出器によって検出可能であり、これによりマイクロ波信号が発生する。

20

【0063】

図6Aは、光干渉計構成におけるハイパーパラメトリックマイクロ波フォトニック発振器の一例を示す。この光干渉計構成において、第1の光経路611は非線形WGM共振器630を有し、第2の光経路612は長い遅延線を有する。レーザ601からの光は、2つの経路611および612へと分割される。2つの結合プリズム631および632または他の光カプラを用いて、共振器630を第1の光経路611へと光学的に結合させることができる。結合プリズム632の後に共振器630の出力光をシングルモードファイバ中に収集し、これを光遅延線からの光と組み合わせる。この組み合わせられた光をフォトダイオードPD650へと送る。フォトダイオードPD650は、ビート信号を低ノイズの狭帯マイクロ波信号として生成する。フォトダイオード650の下流において、信号増幅器660およびスペクトルアナライザ660を用いることができる。

30

【0064】

図6Bは、ハイパーパラメトリックマイクロ波フォトニック発振器の一例を示す。このハイパーパラメトリックマイクロ波フォトニック発振器において、発振器は、上述の図6A中の干渉計構成における遅延を用いることなく、マイクロ波信号を生成することができる。その結果、デバイスのパッケージングの簡略化が可能になる。

【0065】

図6Cに示す発振器において、レーザダイオード601は、光結合要素CP1（631、例えば、結合プリズム）と、第2の光結合要素CP2（632、例えば、結合プリズム）へと直接接続される。光結合要素CP1は、WDM非線形共振器630へと光学的に結合される。第2の光結合要素CP2は、共振器630へと接続されて、光出力を生成する。フォトダイオードPD650は、CP2に接続されて、フォトダイオード650によって受信された光出力を低ノイズRF/マイクロ波信号へと変換する。

40

【0066】

光遅延線線を含まない上記設計は、共振器内に発生する単一のサイドバンド四波混合プロセスに基づく。単一のサイドバンド信号は、フォトダイオード上にマイクロ波信号を生成させるための干渉技術を全く必要としない。

【0067】

単一のサイドバンド信号の一例を図7に示す。図7は、ハイパーパラメトリック発振器の実験において観測されたスペクトルを示す。この発振器は、対称のサイドバンドを有する通常のハイパーパラメトリック発振器と対照的に、共振器FSR（12GHz）によっ

50

て搬送波と分離されたサイドバンドを1つだけ有する。光信号は、12 GHzのスペクトル純度の高いマイクロ波信号を高速フォトダイオード上に生成する。

【0068】

この単一のサイドバンド発振器は、デバイスを小型パッケージ内にパッケージングすることに適している。このプロセスは、WGM共振器内における複数の周波数縮退光モードの存在に起因して発生する。これらのモードは、共振器表面上において干渉する。この干渉は、共振器表面上に特定の空間パターンを発生させる。共振器内に発生した各サイドバンドは、固有のパターンを有する。共振器の表面上の出力カブラの適切なジオメトリ位置を選択することにより、搬送波と、ただ1つの発生したサイドバンドとを取り出すことができる。

10

【0069】

図8は、単色光がWGM共振器のいくつかの縮退またはほぼ縮退したモードに同時に相互作用した結果、共振器表面上に干渉パターンが発生することを示す。モードが完全に縮退している場合、このパターンは、時間的に一定である。出力カブラの位置を適切に選択することにより、出力光の検出を（例えば、点Aにおいて）行うことが可能になる。しかし、点Bにおいて、光波場における無効値（ヌル）が存在するため、カブラが点Bに配置されると、光は検出されない。

【0070】

従って、非線形WGM共振器を比較的高いスペクトル密度および出力エバネッセント場カブラと共に用いることにより、単一のサイドバンド発振器を作製することができる。この出力エバネッセント場カブラは、共振器表面の近隣に配置することができる。実験から、共振器表面上の適切な点を選択することにより、発生したただ1つのサイドバンドと共に、光ハイパーパラメトリック発振を観測することが可能であることが判明した。このような発振は、高速フォトダイオード上において直接復調することができる。

20

【0071】

ハイパーパラメトリック発振器は、フォトダイオードの出力において発生したマイクロ波信号についての高スペクトル純度を生成する。信号の位相ノイズを測定したところ、ショットノイズが限定されていることが判明し、位相ノイズフロアは少なくとも-126 dBc/Hzレベルに到達可能なことが分かった。スペクトル純度の向上のため、発振器を過飽和させ、光コムを生成することができる。光コムの復調によって生成されたマイクロ波信号は、単一のサイドバンド発振器よりもスペクトル純度が高い。光コムは、システムにおけるモードロックに対応し、短光パルスを発生させる。判明したことから、光パルスのトレインの復調を継続時間 t および反復率 T で行った結果生成されるマイクロ波信号の位相ノイズは、以下の出力スペクトル密度におけるショットノイズによって得られる。

30

$$S_{\phi}(\omega) \approx \frac{2\hbar\omega_0}{P_{ave}\omega^2} \frac{4\pi^2\alpha t^2}{T^4}$$

40

ここで、 ω_0 は光ポンプの周波数であり、 P_{ave} は、発生したパルストレインの平均光出力であり、 α は、往復光損失である。よって、反復率と比較してパルスが短くなるほど、位相ノイズも低くなる。一方、 T/t は、コム N 中のおよそのモード数となることが既知である。よって、サイドバンドを1つまたは2つ有する通常のハイパーパラメトリック発振器と比較して、コムの (N^2) 位相ノイズが大幅に少なくなることが予測される。

【0072】

三次非線形性を有する非線形WGM共振器（例えば、CaF₂ WGM共振器）を用いて、調整可能な光コム生成器を形成することができる。CaF₂ WGM共振器を用いて、2

50

5 m G H z の周波数間隔で光コムを生成した (m は整数である) 。選択された W G M 周波数に対してポンプレーザーの搬送波周波数の適切な離調を選択することにより、この間隔 (数 m) を制御可能に変更した。高速フォトダイオードを用いた光コムの復調を用いて、高周波マイクロ波信号をコム周波数またはコム間隔において生成することができる。生成された 2 5 G H z 信号の線幅は、4 0 H z 未満であった。

【 0 0 7 3 】

このようなコム生成器は、ポンプレーザービームを生成するレーザーと、非線形 W G M 共振器と、ポンプレーザービームを非線形 W G M 共振器内に結合し、さらに、非線形 W G M 共振器の外部への光を結合させる光結合モジュールとを含む。光コム中の周波数の調整は、ポンプレーザービームの周波数の調整によって達成することができ、コム間隔の調整は、ポンプレーザーを非線形 W G M 共振器へと同期させ、ポンプレーザーの同期状態を制御することにより、達成することができる。

10

【 0 0 7 4 】

図 9 は、このようなコム生成器の一例を示す。レーザー (例えば、ファイバへ結合された 1 5 5 0 n m の調整可能レーザー) からのポンプ光が、結合プリズムを持ちいて C a F ₂ W G M 共振器内へと送られ、別の結合プリズムを用いて共振器から取り出される。プリズムから出て行く光はコリメートされ、シングルモードファイバ内で結合される。結合効率は、例えば 3 5 % よりも高く設定することができる。共振器は、曲線状かつ研磨されたリムを有する円錐形状であってもよい。この試験において用いた C a F ₂ W G M 共振器は、直径 2 . 5 5 m m であり、長さ 0 . 5 m m であった。固有の Q ファクターは、2 . 5 × 1 0 ⁹ のオーダーであった。共振器を適切な形状にすることにより、モード断面積を数百平方ミクロン未満まで低減することができる。例えば熱電冷却器 (T E C) を用いることにより、共振器を熱的安定箱内にパッケージングすることができ、これにより、外部の熱変動を補償することができる。共振器の光出力を光スペクトルアナライザ (O S A) へと方向付けて、出力の光スペクトル特性を測定し、さらに光検出器および R F スペクトルアナライザ (R F S A) へと方向付けて、光検出器の出力の R F またはマイクロ波スペクトル特性を測定した。

20

【 0 0 7 5 】

図 9 において、レーザー周波数は、W G M 共振器のモードに同期される。図示のように、P o u n d - D r e v e r - H a l l レーザフィードバック同期システムでは、W G M 共振器の光出力の一部を、レーザー同期するための光フィードバックとして用いる。レーザー同期のレベルおよび位相を、発振共振器用と非発振共振器用に異なるように設定する。同期されたレーザーの出力を発振閾値を超えて増加させると、同期不安定度が増加する。これは、共振の対称性が発振閾値において変化することから予期できる。レーザー同期を保持するためにレーザー出力を増加しつつ、同期パラメータを変更または調節することができる。レーザーが W G M 共振器に同期されている間、同期パラメータを変更することによって、レーザー周波数の W G M 共振器の共振周波数からの離調を変更することで、コムを微調整することができる。

30

【 0 0 7 6 】

ポンピング出力がハイパーパラメトリック発振の閾値に近づいたときに、W G M 共振器が低入力レベルにおいて光学的にポンプされると、光コムは発生せず、誘導ラマン散乱 (S R S) および F W M プロセスの競合が観測された。この試験において用いられた W G M 共振器は、高 Q W G M の複数のモードファミリーを有していた。基本的モードシーケンスに属するモードの直接ポンピングを行った場合、F W M 発振プロセスの場合よりも S R S の閾値が低いことが判明した。これは、予測されなかった結果である。なぜならば、同一のパラメータを有するモードにおいて、S R S プロセスは、ハイパーパラメトリック発振と比較して、若干低い閾値を有するからである。このような相違は、モードファミリーが異なれば、モード中場分布によって得られる線質係数も異なり、カブラ位置も異なることに起因する。試験設定については、より高次の横モードと比較して W G M の基本的シーケンスがより低い Q ファクター (より高いローディング) を有するように、配置を行った。

40

50

モードがより高い体積 V を有する場合であっても、SRSPプロセスは、より高い Q モードから開始する。これは、SRSP閾値の出力が VQ^2 に反比例するためである。

【0077】

より高出力の光によって基本的モードシーケンスをポンピングした場合、ハイパーパラメトリック発振がSRSPと共に発生することが多い。図10は、基本的モードシーケンスに属するモードへポンピングされた CaF_2 共振器中において観測された光搬送波およびハイパーパラメトリック発振から、SRSPの測定周波数スペクトルが約 9.67 THz であることを示す。線の構造を、スペクトルの下側の挿入によって示す。ロードされた線質係数 Q は 10^9 であり、モードへ送られたポンプ出力は 8 mW であった。試験の結果、ハイパーパラメトリックおよびSRSPプロセスはより高い Q モードにおいて開始することが分かった。これらのプロセスに関与するモード間の周波数分離は、共振器のFSRよりもずっと低く、これらのモードは明らかに横特性である。これにより、SRSP光と搬送波との間のFWMの不在も説明できる。

10

【0078】

FWMによって生成された光子対は、図10に示すようにポンプ周波数から約 8 THz だけ離れている。その理由として、 CaF_2 のゼロ分散点が 1550 nm 近傍に存在する点がある。このようなポンプから遠く離れた光子対の生成により、WGM共振器ベースのハイパーパラメトリック発振器を、量子通信および量子暗号ネットワークに対して非常に適したものにするができる。この発振器は、(2) 下方変換プロセスに基づいた従来の二光子源と対照的に、光子対が通信ファイバ中に送り込まれた場合に発生する大きな結合損失を回避する。さらには、搬送波周波数と数テラヘルツのオーダーで離隔された狭帯光子の無損失分離も、容易に可能である。

20

【0079】

実行した試験において、ポンプ出力が発振閾値を大幅に超えて増加したとき、光コムが発生した。レーザの周波数が高 Q 横WGMへ同期されたとき、安定した光コムが発生した。このようにして、SRSPプロセスと比較して閾値がより低いハイパーパラメトリック発振が観測された。光ポンプ出力が大幅に増加した場合であっても、光コム線の高速成長により、SRSPプロセスは発生しなかった。

【0080】

図11は、共振器を 1550 nm 光の 10 mW によってポンピングした場合において観測された、ハイパーパラメトリック発振の例を示す。スペクトル(a)および(b)は、WGM共振周波数からのポンプの異なる離調に対応する。測定されたスペクトル(a)は、 25 GHz だけ分離された搬送波および第1のストークスサイドバンドから、光子が 12.5 GHz 周波数において生成された場合における、光子加重プロセスの結果を示す。このプロセスは、高密度WGMによって可能であり、単一モードファミリー共振器内において禁止されている。

30

【0081】

コム成長は、いくつかの特性を有する。いくつかの場合において、図11に示すように、信号およびアイドラーサイドバンドの成長において大きな非対称性が存在していた。この非対称性は、対称サイドバンドの発生を予測するハイパーパラメトリック発振の通常理論では説明されない。これについての1つの可能性のある説明として、共振器の高モード密度がある。実験において、レーザは、単一のモードをポンピングするのではなく、ほぼ縮退したモードクラスターをポンピングする。横モードファミリーは、若干異なるジオメトリ分散を有するため、クラスターの形状は周波数と共に変化し、各モードファミリーは、固有のハイパーパラメトリック発振をもたらす。これらの発振の信号およびアイドラーモードはほぼ縮退しているため、相互に干渉し合うことができ、その結果、搬送波のいずれかの側部において、サイドバンド抑制が行われる。これにより、「単一のサイドバンド」発振が試験において観測されることとなる。干渉したコムは、独立しているとみなすべきではない。なぜならば、発生したサイドバンドは、コム復調によるマイクロ波信号の生成に示されているように、明確に区別できる位相従属性を有するからである。

40

50

【 0 0 8 2 】

図 1 2 は、(a) 出力 5 0 m W のポンプレーザビームによってポンピングされた $C a F_2$ W G M 共振器によって生成された光コムと、(b) (a) における測定の中央部分の拡大とを示す。生成された光コムは、2 つの明確な繰り返し周波数を有する。これら 2 つの明確な繰り返し周波数は、共振器の 1 つおよび 4 つの F S R に等しい。図 1 3 は、レーザ同期のレベルおよび位相を変更した場合の図 1 2 に示すコムの変更を示す。図 1 3 (b) は、図 1 3 (a) 中の測定における中央部分の拡大を示す。

【 0 0 8 3 】

単一のサイドバンド発振が発生するポンプ閾値を超えてポンプ出力がさらに増加した場合、信号およびアィドラー高調波の相互作用がより顕著になる。図 1 2 および図 1 3 は、周波数スパンが 3 0 T H z を超えたときに観測されたコムを示す。コムエンベロープが変調されており、この変調の理由は図 1 3 (b) から推測することができる。このコムをモードクラスター上に発生させる。このモードクラスターは、周波数と共に形状を変化させる。

10

【 0 0 8 4 】

上記した非線形 W G M 共振器ベースの光コム生成器は、調整が可能であり、コム繰り返し周波数の制御可能な調整は、ポンプレーザの周波数を変更することによって達成される。他の実験条件（例えば、共振器の温度および光結合）を変更せず、レーザ同期のレベルおよび位相を変更することにより、コム周波数間隔を変化させることができる。図 1 1 ~ 図 1 3 に示す測定から、調整の例が得られる。非線形 W G M 共振器ベースのコム生成器のこの調整能力は、多様な用途において有用である。

20

【 0 0 8 5 】

非線形 W G M 共振器ベースのコム生成器の別の特徴として、異なるモードの光コムがコヒーレントであるという点がある。このようにして生成されたカー（ハイパーパラメトリック）周波数コムは、高速フォトダイオードによって直接検出することができ、これにより、高周波数 R F またはマイクロ波信号をコム繰り返し周波数において発生させる。これは必然的に導かれる結果であり、コム線がコヒーレントであることを示す。信号のスペクトル純度は、W G M の Q ファクター、生成されたサイドバンドの光出力、およびコムスペクトル幅の増加とともに増加する。高速フォトダイオードの出力は、コム中の異なるスペクトルコンポーネント間のコヒーレント干渉に起因して発生する R F またはマイクロ波ビート信号である。コムのコヒーレント特性を実証するために、主要周波数間隔が 2 5 G H z のコムを、光帯 1 4 8 0 ~ 1 6 4 0 n m で、高速 4 0 G H z フォトダイオードへと方向付けた。図 1 4 は、4 0 G H z フォトダイオードによる、記録されたマイクロ波ビート信号出力を示す。図 1 4 (a) は、信号を対数目盛り中に示し、図 1 4 (b) は、同じ信号を線形目盛り中に示す。図 1 4 (c) は、4 0 G H z フォトダイオードへ方向付けられた光コムスペクトルを示す。マイクロ波線の線形フィッティング結果は、発生したマイクロ波ビート信号の線幅が 4 0 H z 未満であることを示し、これは、ビート信号の高コヒーレンス性を示す。この実験において用いたマイクロ波スペクトルアナライザ（A g i l e n t 8 5 6 4 A）は 1 0 H z のビデオ帯域幅を有し、平均化は行わず、内部マイクロ波減衰は 1 0 d B（実際のマイクロ波ノイズフロアは、1 桁だけ低かった）である。光信号の後続光フィルタリングは行わなかった。

30

40

【 0 0 8 6 】

図 1 4 はまた、マイクロ波信号が不均一に 4 0 H z まで拡大したことを示す。ノイズフロアは、測定帯域幅（約 4 H z）に対応する。このような拡大は、ポンプレーザ搬送波周波数に対する W G M 共振周波数の熱反射ジッターに起因する。試験において用いられた 8 k H z 変調に基づいたレーザ同期回路は、このジッターを補償できるほど十分に高速ではない。より高速の同期（例えば、1 0 M H z）を用いれば、マイクロ波信号のより狭い帯域幅を測定することができるであろう。

【 0 0 8 7 】

図 1 4 (c) に示すマイクロ波生成において用いられるコムは、非対称性形状を有する

50

。図12および図13中のほぼ対称のコムと対照的に、このコムは、搬送波の青色側へシフトしている。図14(c)中のコムを生成するために、基本的モードシーケンスに属するモードのうちの一つへレーザを同期させた。ポンプ出力が低い場合の図10のような2つのモード発振プロセスが、ポンプ出力の増加と共に等距離コムへと変化することが観測された。SRSプロセスは抑制された。

【0088】

異なる試験において、外部変調光信号を光ポンプとして非線形WGM共振器へと送った。図15は、非線形WGM共振器の光出力中に測定されたカオス発振を示す。共振器を、(25786kHzにおいて変調されかつ出力が50mWである)レーザ光で1550nmにおいてポンピングした。発生したスペクトルは、cwポンプされた共振器によって生成されたスペクトルよりも大幅に広いことはなく、これらのモードは等距離ではない。

10

【0089】

従って、WGM結晶性共振器を光学的にポンピングすることによって、共振器のFSRに対応する調整可能なコム周波数間隔を得るための、光周波数コムを生成することができる。これらのコムは、大きなスペクトル幅を有する(例えば、30THzを超えるもの)、また、モードの良好な相対的コヒーレント性を有する。発生したコムの特性は、光ポンプされたモードの選択と、共振器へのレーザ同期のレベルおよび位相とに依存する。

【0090】

上記において記載したWGM共振器中の光三次非線形性を用いた光コムの生成において、発生した光コム信号の周波数を安定化させるために、レーザ同期を用いることができる。図9に示すように、Pound-Drever-Hall(PDH)レーザフィードバック同期方式を用いて、非線形WGM共振器へのポンプ光を生成するレーザを同期させることができる。PDH同期は、フィードバック同期回路に基づいたレーザ同期技術の一例である。フィードバック同期回路は、共振器の光結合を用いて、レーザを共振器へ同期させるための電氣的な制御信号を生成する。同期のレベルおよび位相は、発振共振器用および非発振共振器用で異なる。同期レーザの出力を発振閾値を超えて増加させると、同期不安定度が増加する。このレーザ同期により、スペクトル純度の高いマイクロ波信号の生成を促進することができる。試験によれば、同期されていないコム信号の場合、同期レーザ(例えば、図14に示すような40Hz未満のもの)によって生成されたコムの場合よりも、境界線幅が(例えば、約数MHz)広い。

20

30

【0091】

Pound-Drever-Hall(PDH)レーザフィードバック同期の代替例として、WGM共振器内部のレイリー散乱または固体リング共振器を用いて、このような自己注入同期の形式を用いる共振器へのレーザを同期させることができる。この注入同期により、適切な位相整合条件下において、レーザ光をレーザに再度注入することにより、レーザがハイパーパラメトリック周波数コムを生成する非線形共振器へ同期される。非線形共振器からレーザへのフィードバック光の光位相は、位相整合条件を満たすように、調節される。

【0092】

2つのフィードバック機構を用いて、非線形共振器からレーザへと光を方向付けて、レーザを同期することができる。第1のフィードバック機構においては、非線形共振器内のレイリー散乱を介して発生した信号を用いる。レイリー散乱によって発生した光は、記レーザからのオリジナルのポンプ光の光経路を追跡して、非線形共振器からレーザへと伝搬する。

40

【0093】

第2のフィードバック機構においては、非線形共振器の出力光経路に配置された反射器(例えば、追加的な部分的に透明な鏡)を用いて、非線形共振器に戻り、その後レーザへ向かう反射を提供する。図16は、レーザ1601を非線形共振器1610へ同期させるデバイス1600の一例を示す。非線形共振器1610は、リング共振器、ディスク共振器、球状共振器または非球状共振器であり得る(例えば、回転楕円体共振器)。光カブラ

50

1620は、図示のような結合プリズムであってもよい。この光カブラ1620を用いて、共振器1610へ光入力を提供し、共振器1610からの光出力を提供する。レーザ1601は、レーザビーム1661を生成し、レーザビーム1661を結合プリズム1620へと方向付ける。結合プリズム1620は、レーザビーム1661をビーム1662として共振器1610中へと結合させる。ビーム1662は、共振器1610内部において反時計回りに循環する。循環ビーム1662の光は、共振器出力ビーム1663として光カブラ1620によって光学的に結合される。共振器出力ビーム1663の光経路内の結合プリズム1620の後に、反射器1640を配置することにより、共振器出力ビーム1663のうち少なくとも一部を結合プリズム1620へ戻すよう反射させる。光コリメータ1602および1631を用いて、光をコリメートすることができる。反射器1640は、部分的反射器であってもよく、共振器出力ビーム1663の一部を出力ビーム1664として透過し、共振器出力ビームの一部を返送ビーム1665として反射する。反射器1640は全反射器であってもよく、その場合、ビーム1663の光全てを返送ビーム1665として反射する。フィードバックビーム1665は、逆伝搬ビーム1666として共振器1610中に結合される。逆伝搬ビーム1666は、レーザ1601へのフィードバックビーム1667として、結合プリズム1620によって結合される。フィードバックビーム1667は、レーザ1601に進入し、注入同期を介してレーザを共振器1610へと同期させる。

10

【0094】

共振器1610内のレイリー散乱または外部反射器1640のいずれかに基づいた、非線形共振器1610からの光フィードバックに基づいた上記レーザ同期を確立することができるのは、共振器1610からレーザ1601へのフィードバックビーム1667の光位相が注入同期の位相整合条件を満たす場合である。位相制御機構は、レイリー散乱方式中のフィードバックビーム1667の光経路において実装してもよいし、あるいは、フィードバックビーム1667の光位相の調節および制御のための外部反射器1640を用いたこの方式中の1つ以上のビーム1661、1662、1663、1665、1666および1667の光経路内において実装してもよい。図示のように、この位相制御機構の1つの実施様態において、反射器1540は可動式の鏡であってもよく、ビーム1663の光経路に沿って位置を変更するように制御され、フィードバックビーム1667の光位相を調節することができる。返送ビーム1667の位相も、レーザ1601とカブラ1620との間に配置された位相ロテータ1603、若しくはカブラ1620またはコリメータ1631と外部反射器または鏡1640と間に配置された位相ロテータ1663によって調節することができる。共振器1610内のレイリー散乱および外部反射器1640双方を用いた共同構成も可能である。構成の選択は、動作条件に依存する（例えば、カブラ1620による共振器1610のローディング、共振器1610中のレイリー散乱の強度）。このような同期技術を用いて、PDH同期および他の同期設計の利用に関連する技術的困難を回避することができる。

20

30

【0095】

図1中のトリプル発振器デバイスを再度参照することにより、光コム生成について上記した特徴を、多様な構成のトリプル発振器デバイス実装において用いることができる。

40

【0096】

図17は、単一の光トーン、無線周波数(RF)発振信号および異なる光周波数を有する光コム信号を生成するトリプル発振器デバイスの別の例を示す。この例において、図1中のレーザ1の代わりに反射増幅器1710を用いる。この反射増幅器1710は例えば半導体増幅器であり、電流によって励起されて、光増幅のための所望の光利得を生成する。増幅器1710は、光を反射し、共振器100からの光を増幅して、反射光を共振器100へと方向付けて共振器100の非線形光学材料と相互作用させて、異なる光周波数を有する光コムを共振器100中に発生させる。光カブラ5は、以下の2つの光結合機能を行う：(1)共振器100内から共振器100の外部への光を、反射増幅器1710へのフィードバックビーム8として結合させること、および(2)反射増幅器1710からの

50

光を共振器 100 内へと結合させること、である。レーザ搬送波周波数における光を（他の光スペクトルコンポーネントを遮断しつつ）透過させるバンドパスフィルタ 4 を反射増幅器 1710 と光カプラ 5 との間に配置することにより、図 17 中のデバイスが反射増幅器 1710 と共振器 100 との間の光部分中のレーザ搬送波周波数の光に対して動作することを保証する。反射増幅器 1710 によって得られる光利得は、反射増幅器 1710 の反射からの光フィードバックおよび光カプラ 5 によって生成されたフィードバックビームに基づき、レーザ搬送波周波数における反射増幅器 1710 と共振器 100 との間のレーザ発振を確立するのに充分である。

【0097】

図 18 は、図 1 および図 17 の単一のカプラ 5 に基づいた設計が、2 つの別個のカプラ 5 および 1810 に置き換えられることを示す。この例において、第 1 のカプラ 5 を用いて、以下を行う：（1）レーザ 1 または反射増幅器 1710 からの光を共振器 100 中へ結合させること、（2）共振器 100 内の光を結合させて、レーザ 1 または反射増幅器 1710 へ向かう注入フィードバックビームを生成すること、および（3）共振器 100 内の光を結合させて、出力光ビームを光コムと共に生成すること、である。第 2 のカプラ 1810 を用いて、共振器 100 内の光を結合させる。この光は、フォトダイオード 7 によって受信され、RF またはマイクロ波発振信号が生成される。第 2 のカプラ 1810 は、多様な構成において実装することができる（例を非限定的に挙げると、いくつかの実施形態におけるエバネッセント光カプラ）。

【0098】

図 19 は、チップパッケージ中の基板上的トリプル発振器デバイスの一例を示す。基板 1901 は、光導波路 1910 を含むかまたは光導波路 1910 をサポートするように作製される。基板 1901 は平面の誘電基板であってもよく、適切な材料によって構成される（例えば、半導体材料、ガラス材料）。共振器 1940（例えば、非線形 WGM 共振器）は、導波路 1910 に光学的に結合され、基板 1901 上に配置される。レーザまたは反射半導体増幅器 1920 は、導波路 1910 の一端上に形成されて、導波路 1910 内部へ光を方向付けかつ導波路 1910 からの光を受信する。光共振器 1940 と光導波路 1910 との間の光学的な結合により、レーザまたは増幅器 1920 からの導波路 1910 中の光を光共振器 1940 内へと結合させることができ、また、光共振器 1940 内に閉じ込められた光を光導波路 1910 内へと結合させて、レーザまたは増幅器 1920 へと方向付けることができる。導波路フィルタ 1930（例えば、Bragg グレーチングフィルタ）を導波路 1910 内に形成し、図 1 および図 17 に示す光フィルタ 4 のフィルタリング機能を用いて、共振器 1940 内に発生した光コム中の選択的光トーンの 1 つを（光コム中の他の光トーンを遮断しつつ）透過させる。光共振器 1940 内において発生した光周波数コムは、光周波数コム出力 1912 として光導波路 1910 中へ結合される。

【0099】

図 19 において、レーザまたは増幅器 1920 と導波路フィルタ 1930 との間の位置する第 1 の光導波路カプラ 1951 は、光導波路 1910（例えば、光エバネッセント結合または光グレーチング結合）へと結合されて、導波路 1910 内の一部の光を CW レーザ出力 1952（単一の光トーン出力）として結合させるよう設けられている。第 2 の光導波路カプラ 1953 は、光導波路 1910 の位置に設けられている。この位置において、波路 1910 中の光は、光共振器 1940 内部（例えば、図 19 に示すように共振器 1940 の他方の側部上の光導波路 1910 中の位置）において発生した光周波数コムを有する。この第 2 の導波路カプラ 1953 により、導波路 1910 の一部の内部の光が結合され、これにより、結合光周波数コム信号が基板 1901 上に形成されたフォトダイオード 1960 へと方向付けられる。フォトダイオード 1960 の出力は、RF 発振信号である。RF リンク 1970 を基板 1901 上に形成することにより、RF 発振信号を RF ポート 1972 へと誘導する。

【0100】

10

20

30

40

50

図20を参照して、図1中の設計に基づいたトリプル発振器デバイス中の位相制御機構が提供される。この例において、位相制御機構は、レーザ1と共振器100との間に配置された位相制御部として実装され、また、レーザ1と共振器100との間の光位相を制御して、デバイスを安定させるように構成される。この位相制御により、レーザ搬送波周波数と、(レーザ1の注入同期が行われる)共振器100の対応する共振器モードとの間の周波数離調も変化する。

【0101】

他の実施形態において、光共振器からの光フィードバックに基づいてレーザ発振を維持する反射増幅器がレーザ1の代わりに用いられ、位相制御部により安定したレーザ発振を生成し、出射レーザ光と、反射増幅器のための光フィードバックを生成する共振器モードとの間の周波数差を調整する。

10

【0102】

位相部のための多様な設計を実装することができる。例えば、位相制御部は、熱ヒータを含み得る。この熱ヒータは、位相部材料の温度を変化させて、例えば位相部材料の反射率または熱膨張を制御し、レーザ1と共振器100との間の光の位相を制御する。この熱位相制御は、位相制御部中の熱反射および熱膨張効果の組み合わせのうちの一つに基づくものであってもよい。別の例として、位相制御部は圧電素子を含み得る。この圧電素子は、付加された電気電圧信号に応答して、レーザ1および共振器100間の光の位相を変化させる。別の例として、位相制御部は、半導体位相シフトを含み得る。この半導体位相シフトは、レーザ1および共振器100間の光の位相を変化させる。さらに別の例において、位相制御部は、調節可能な遅延を生成するように構成される。この調節可能な遅延は、レーザ1および共振器100間の光の位相を変化させる。

20

【0103】

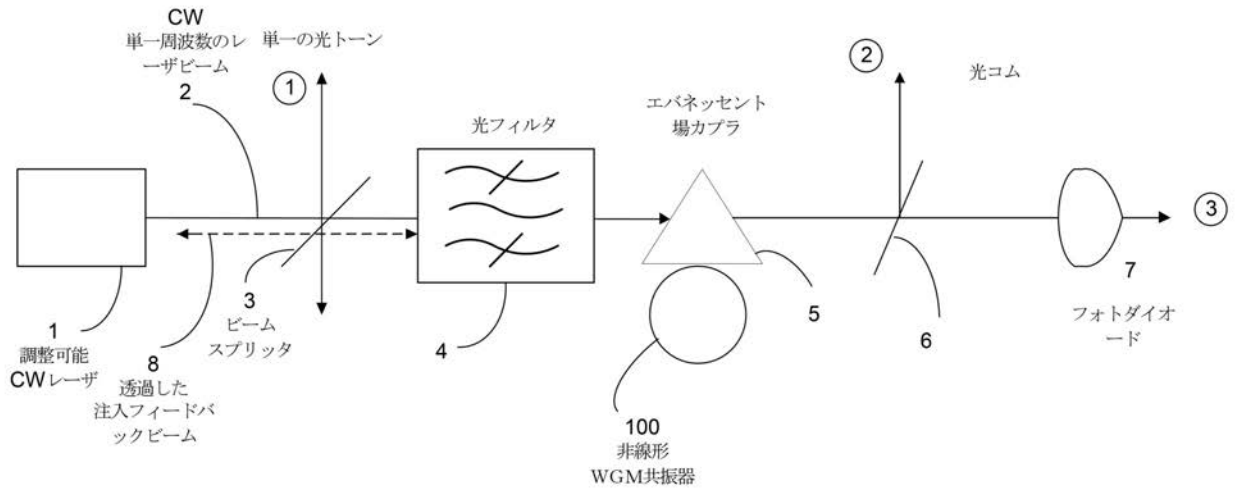
本文書中には多数の具体的記述が含まれるが、これらの記述は、発明の範囲の制限として解釈されるべきではなく、本発明の特定の実施形態の記載として解釈されるべきである。本文書中に別個の実施形態の文脈内において記載される特定の特徵は、単一の実施形態において組み合わせて実装することも可能である。逆に、単一の実施形態の文脈内において記載された多様な特徴を複数の実施形態において別個にまたは任意の適切な別の組み合わせで実装することも可能である。さらに、上記においては、特徴を特定の組み合わせで機能するものとして特許請求の範囲の冒頭にも記載しているが、特許請求に記載される組み合わせからの一つ以上の特徴を組み合わせから実装することもでき、特許請求の範囲に記載の組み合わせは、別の組み合わせまたは別の組み合わせの変更例へ用いることも可能である。

30

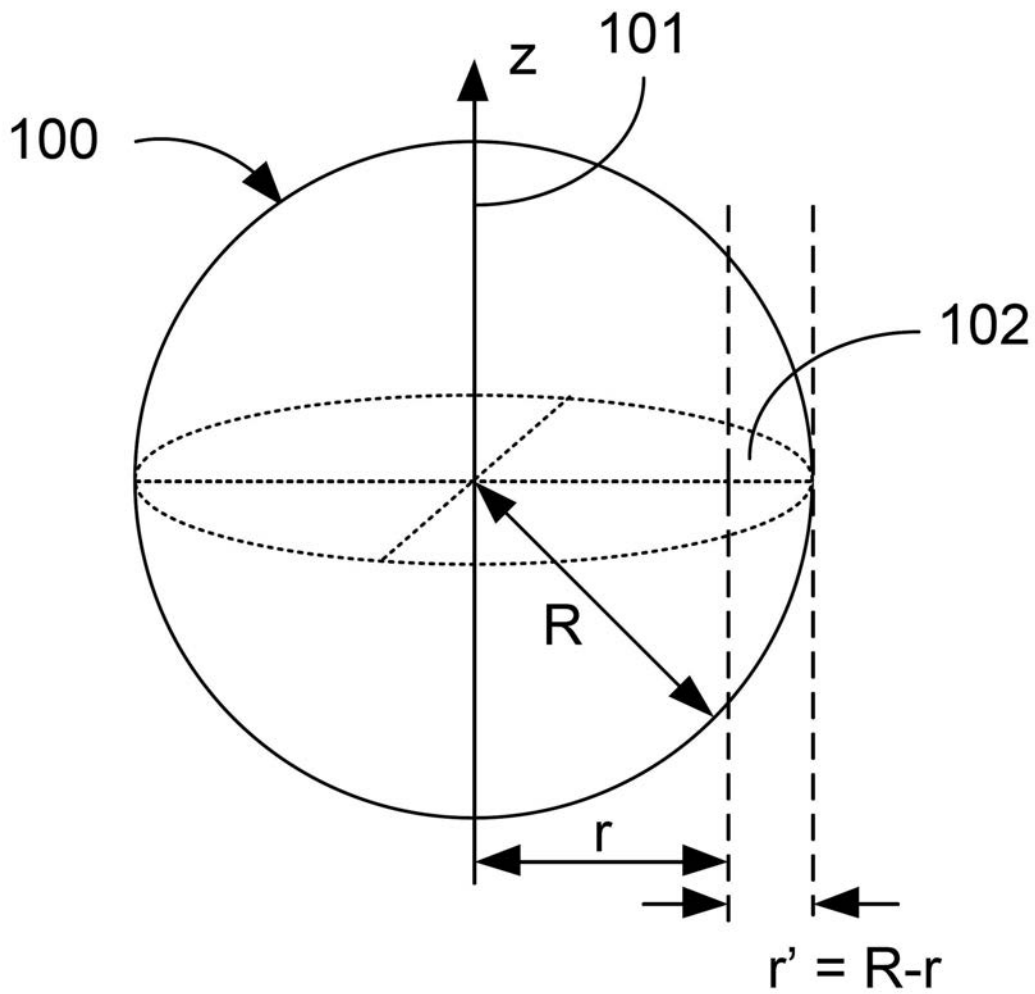
【0104】

数個の実施形態について開示した。本文書に記載および例示される内容に基づいて、記載の実施形態の変更例および改良例ならびに他の実施形態が可能である。

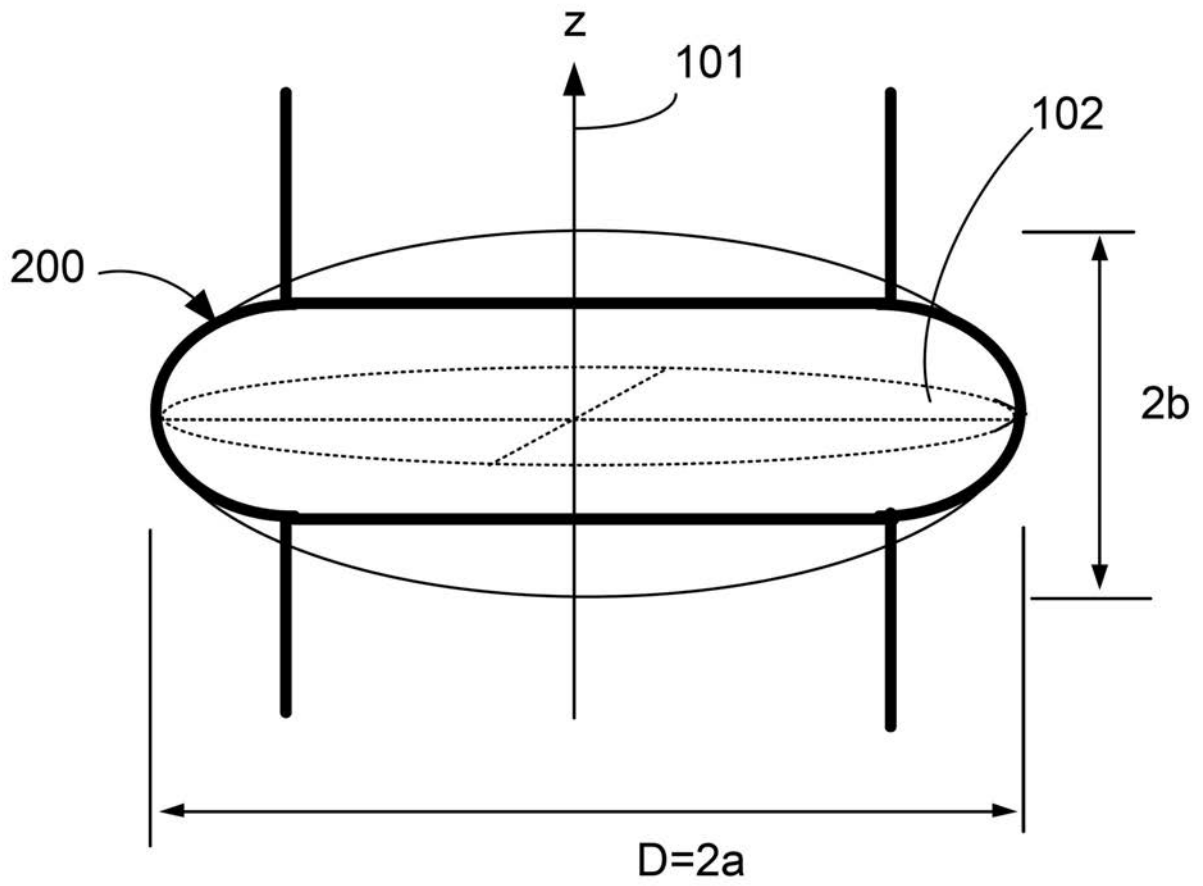
【 図 1 】



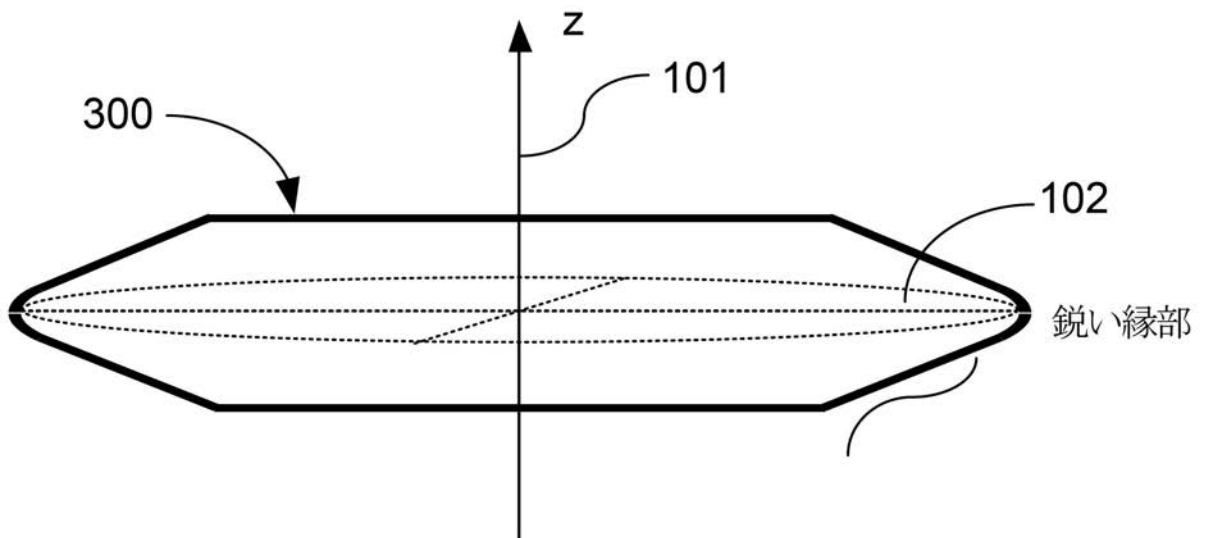
【 図 2 A 】



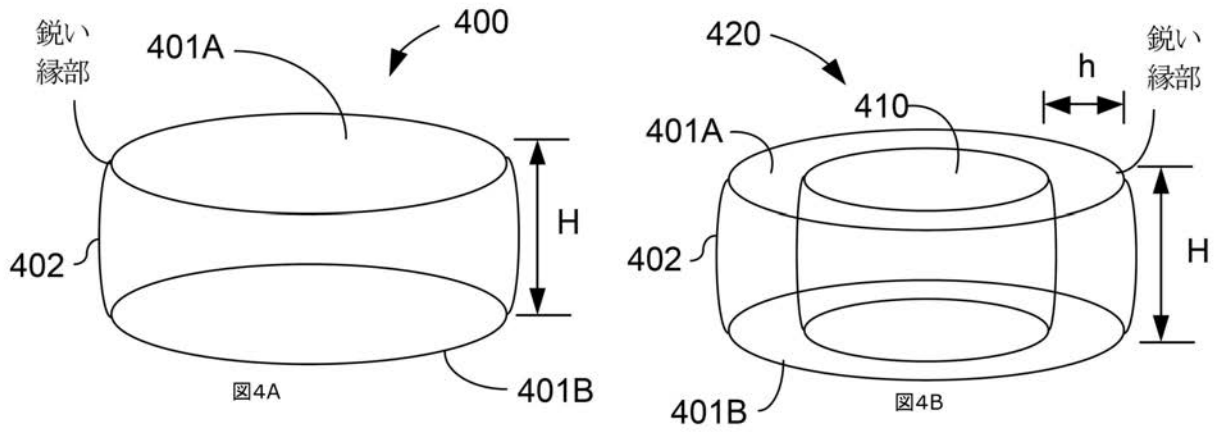
【図 2 B】



【図 3】



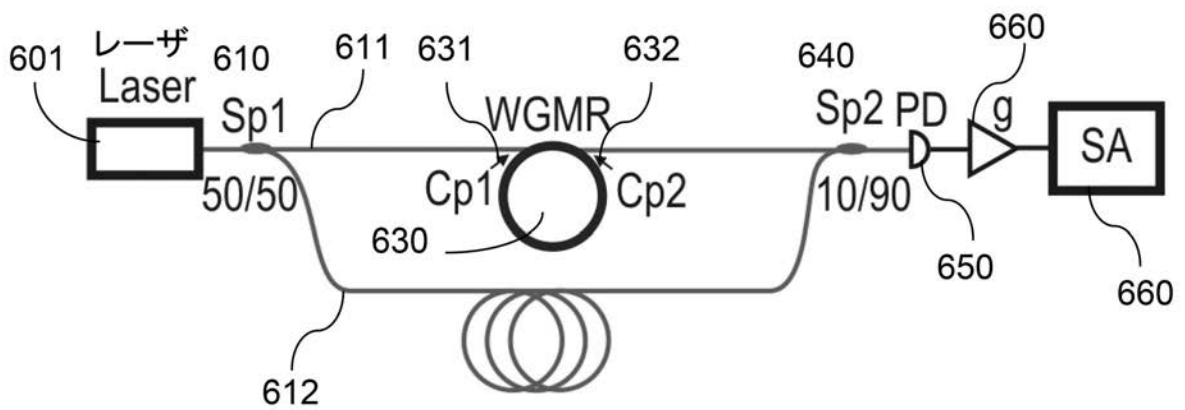
【図4A - 4B】



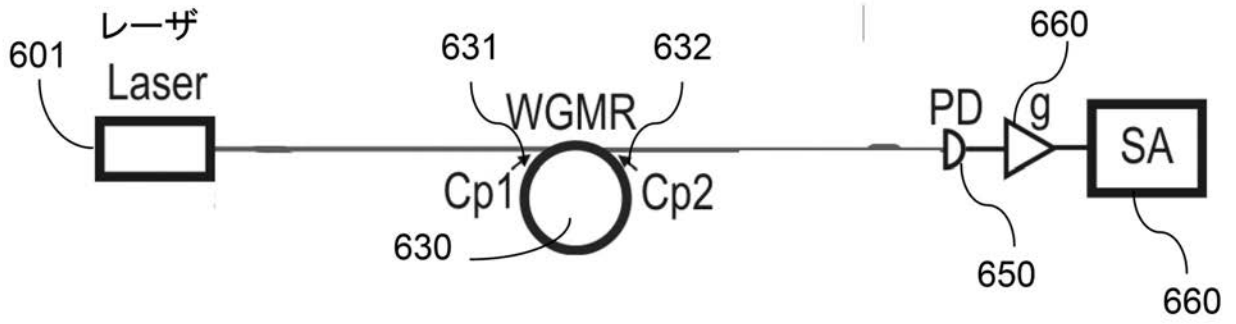
【図5A - 5B】



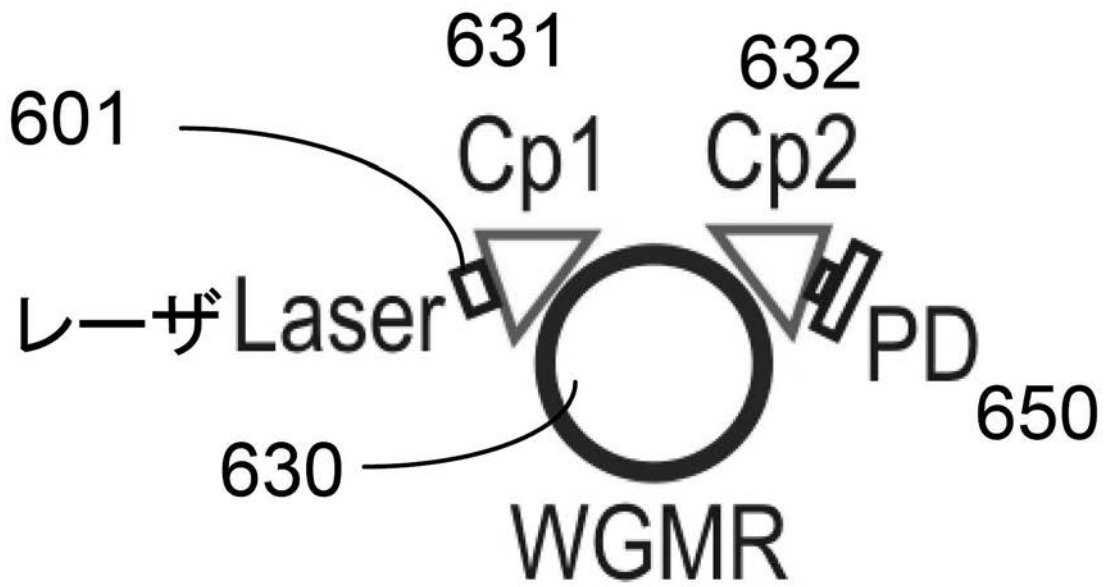
【図6A】



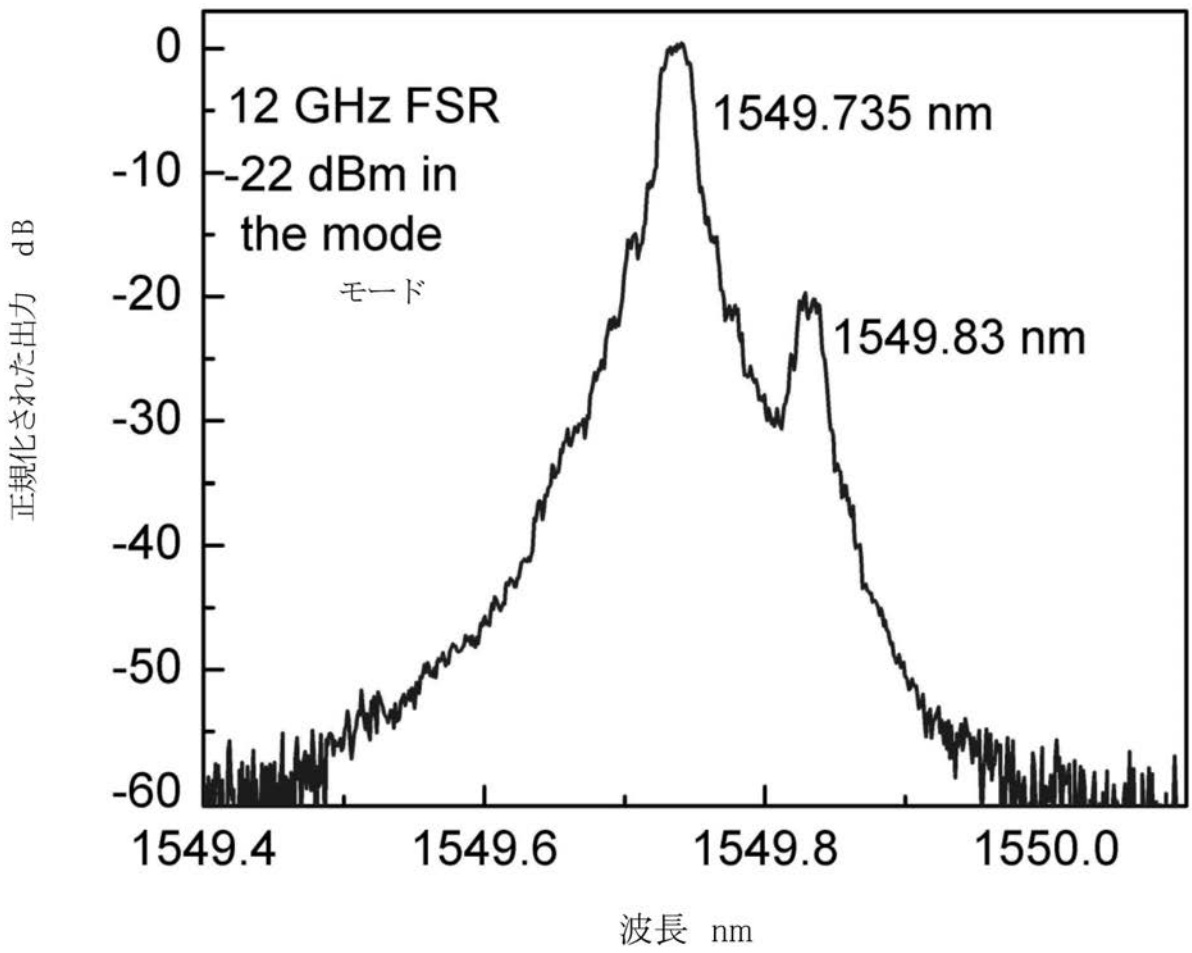
【図 6 B】



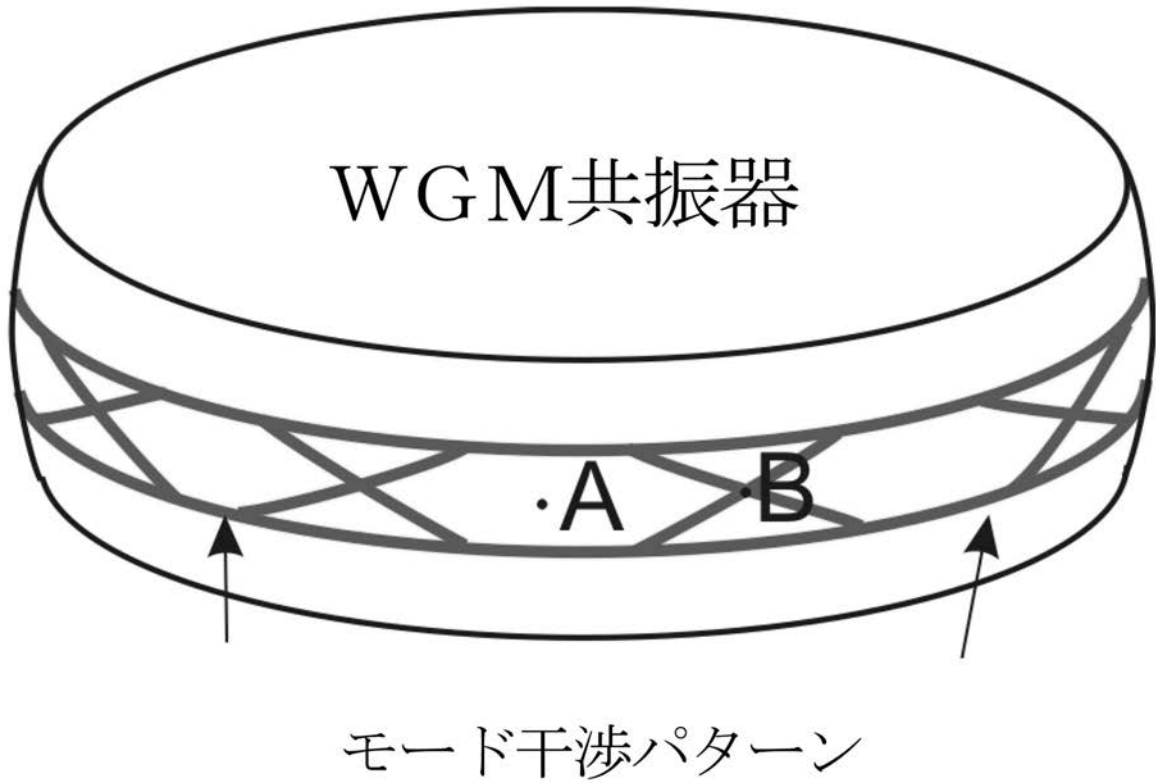
【図 6 C】



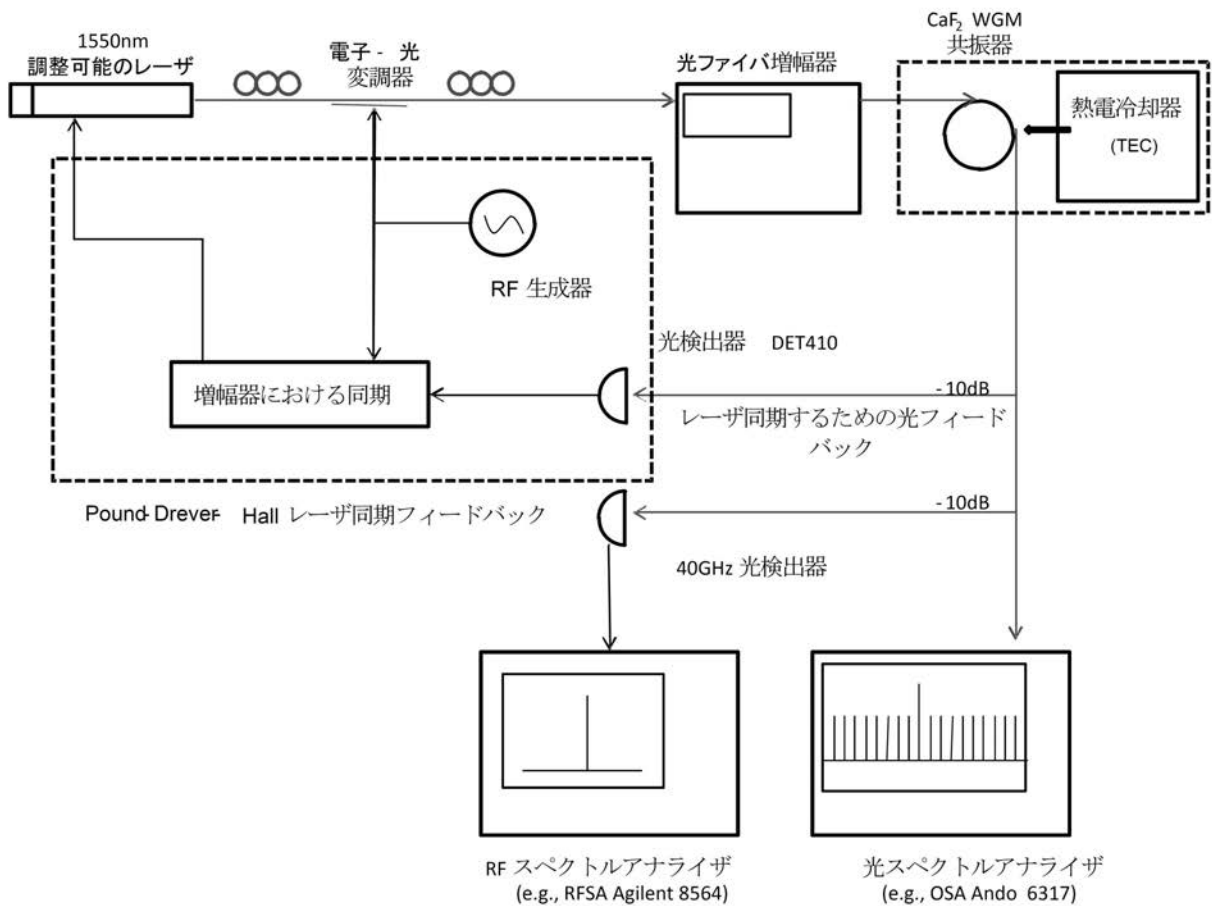
【 図 7 】



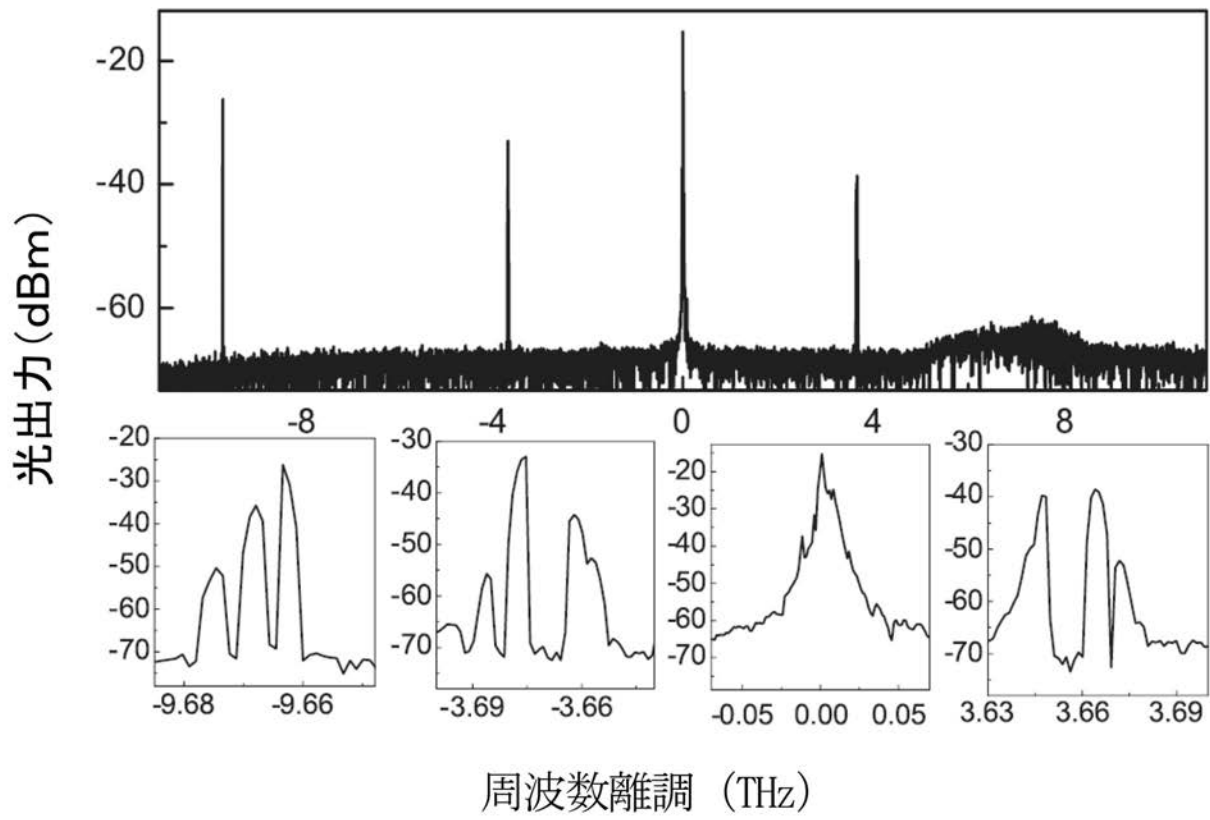
【 図 8 】



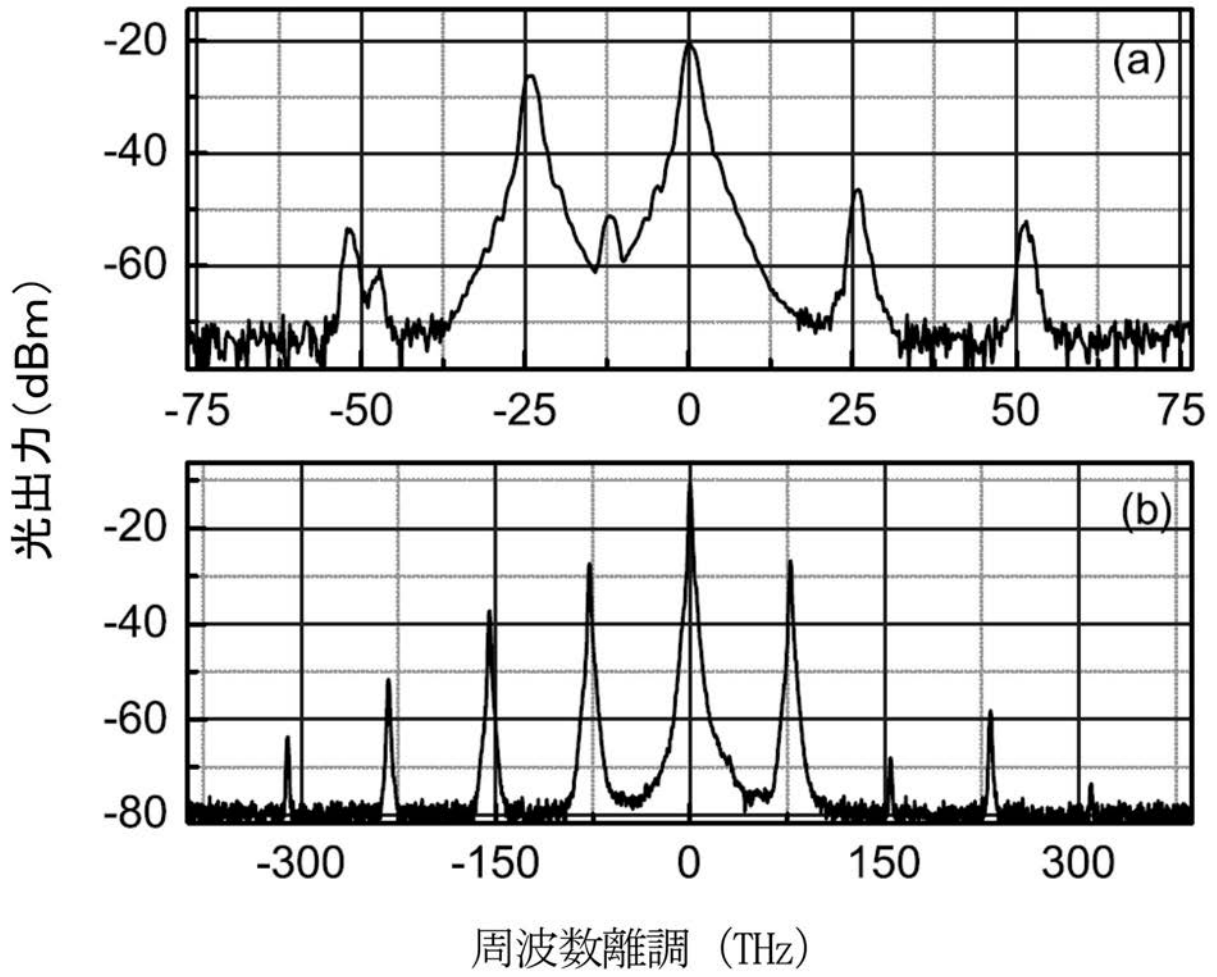
【 図 9 】



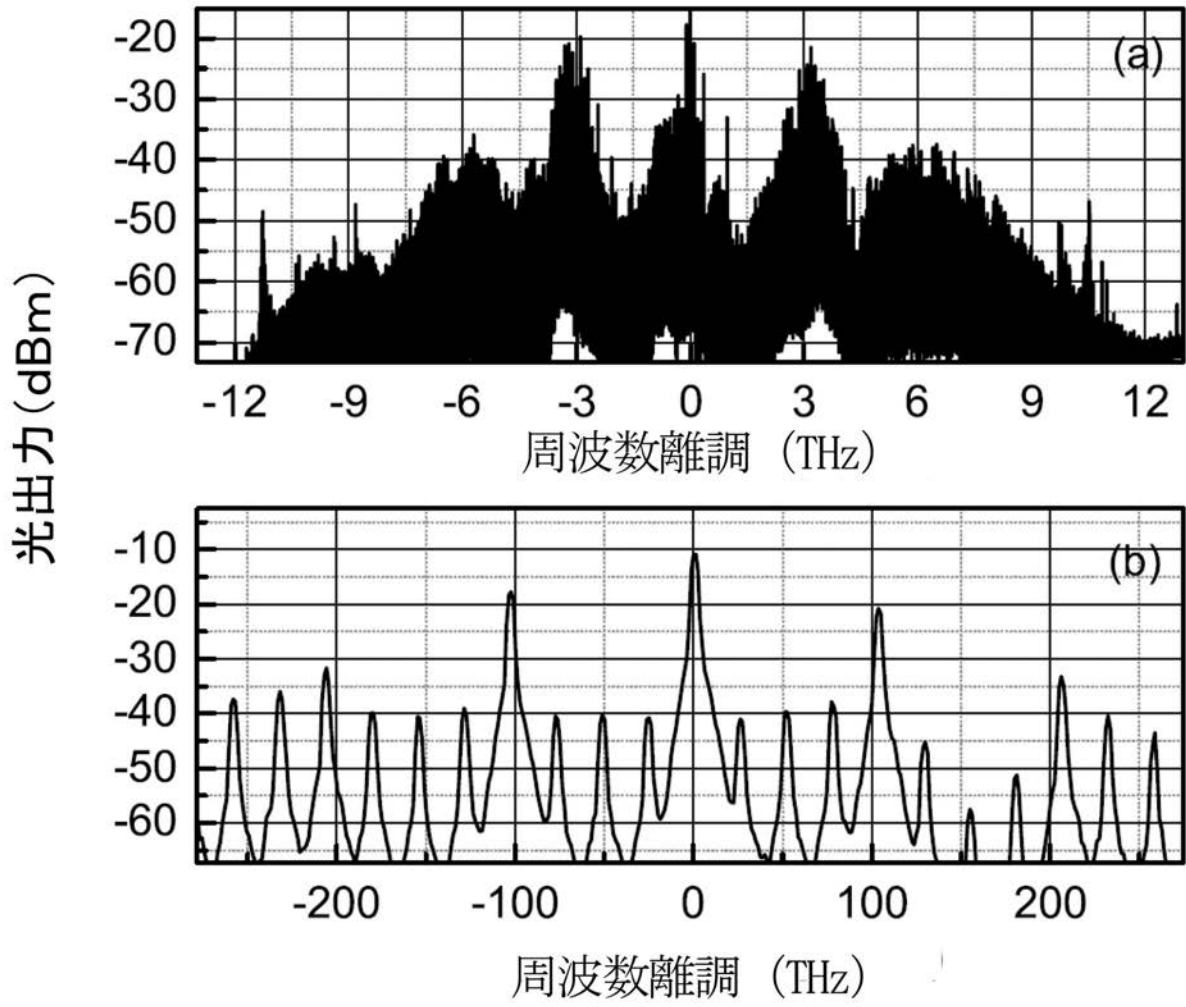
【図 10】



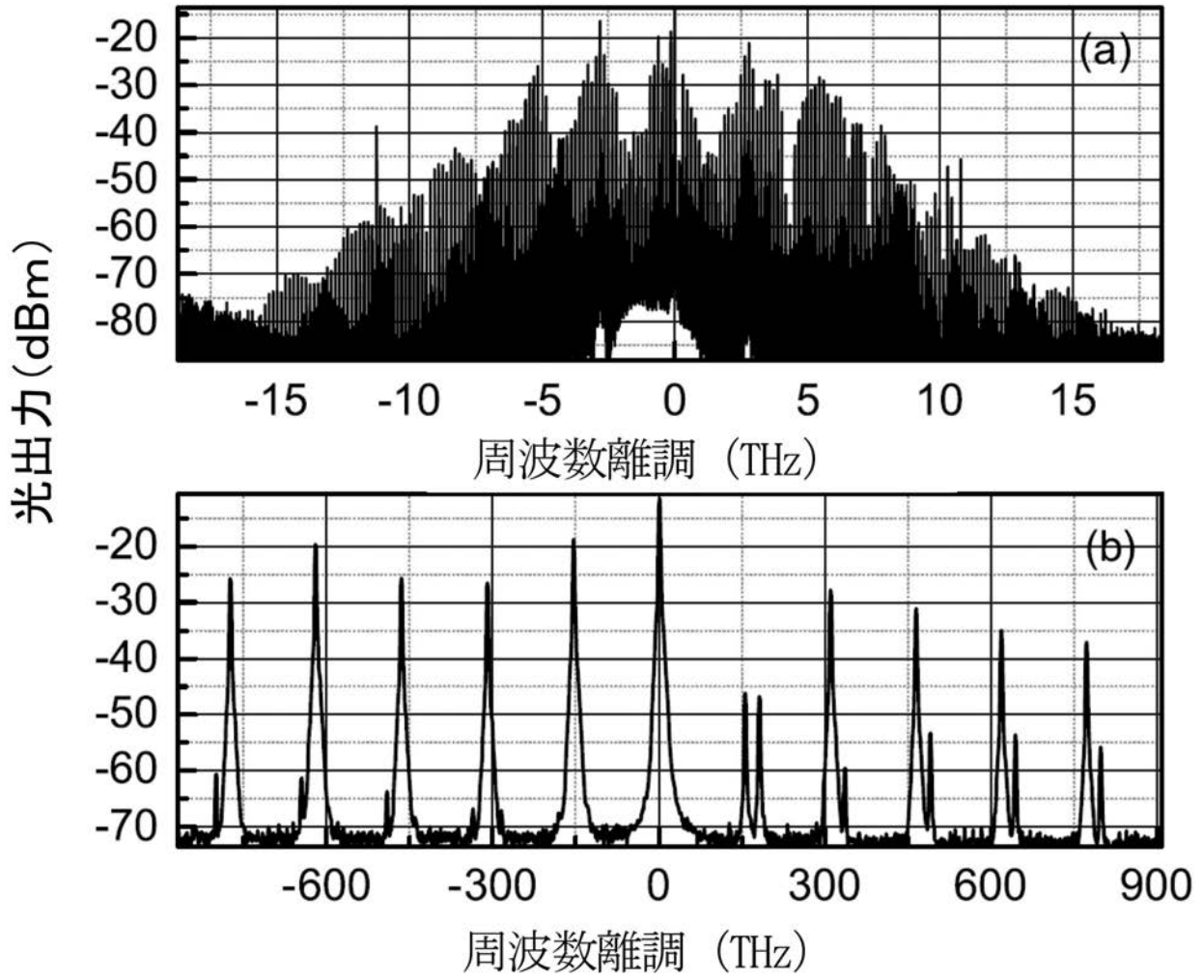
【図 1 1】



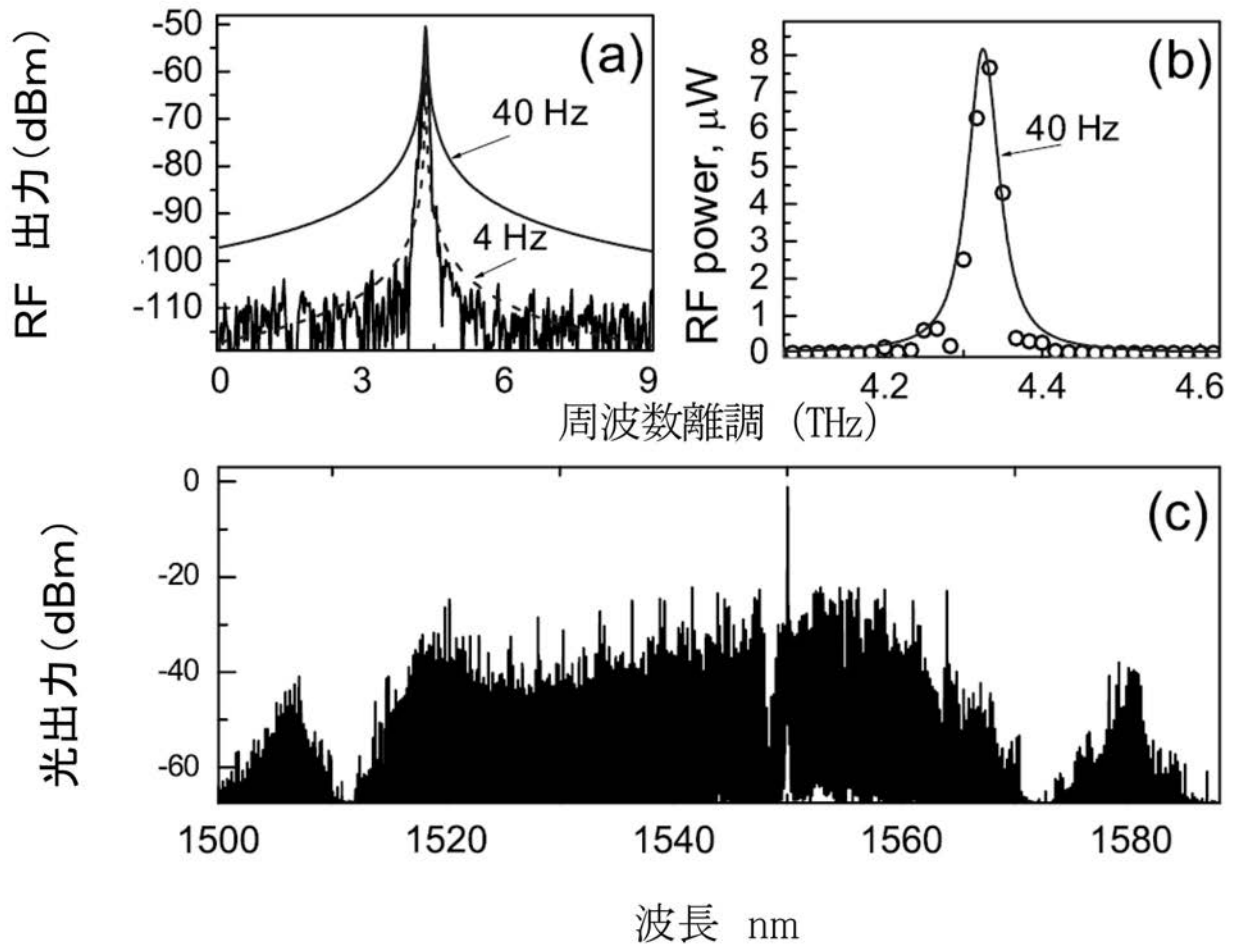
【 図 1 2 】



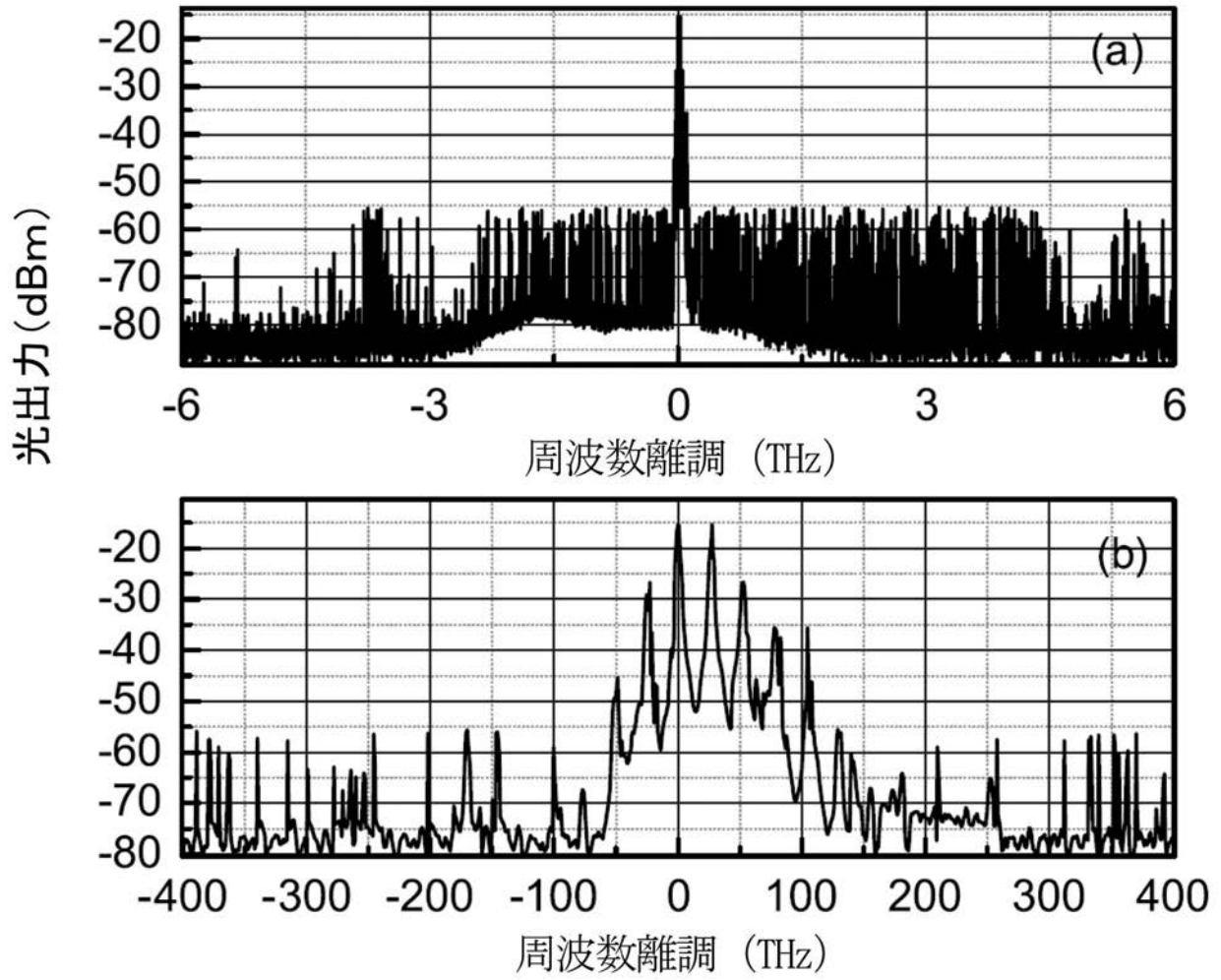
【図 1 3】



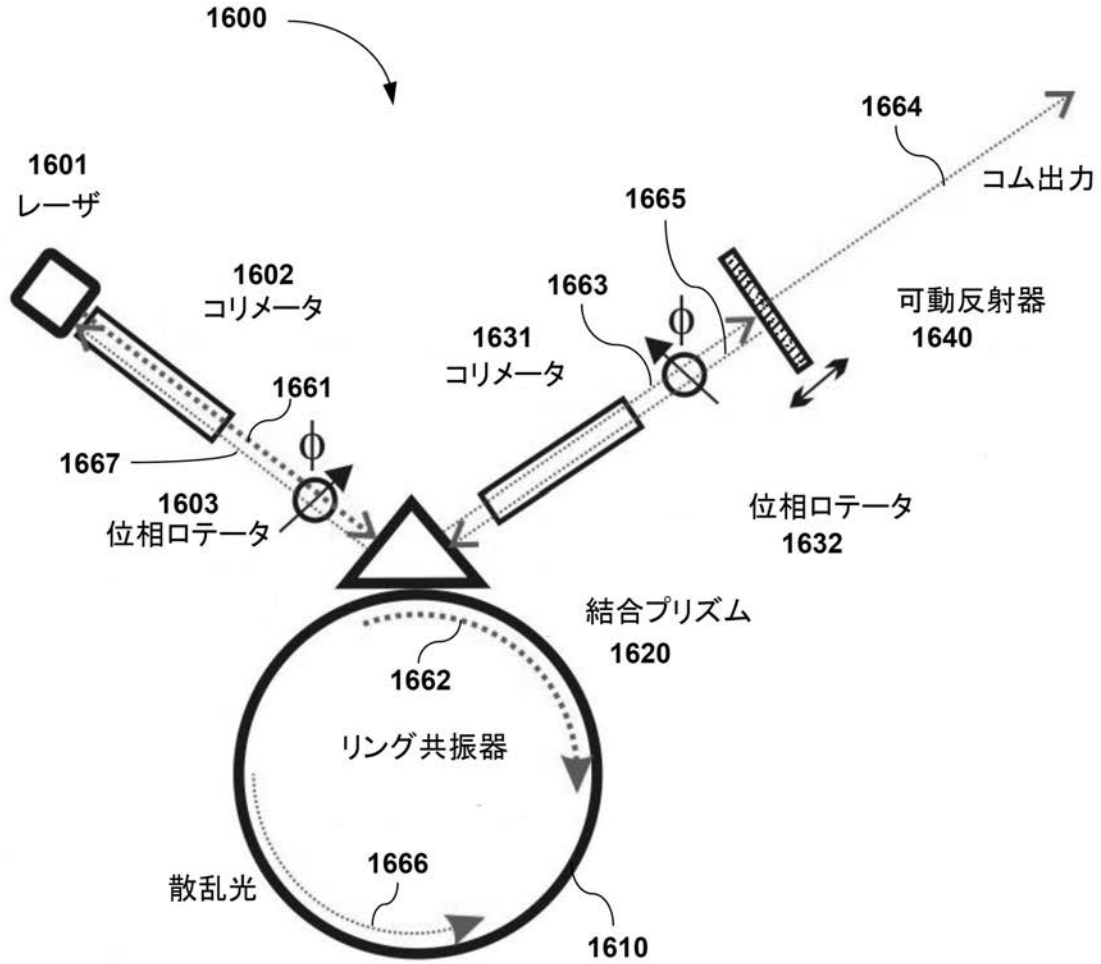
【 図 1 4 】



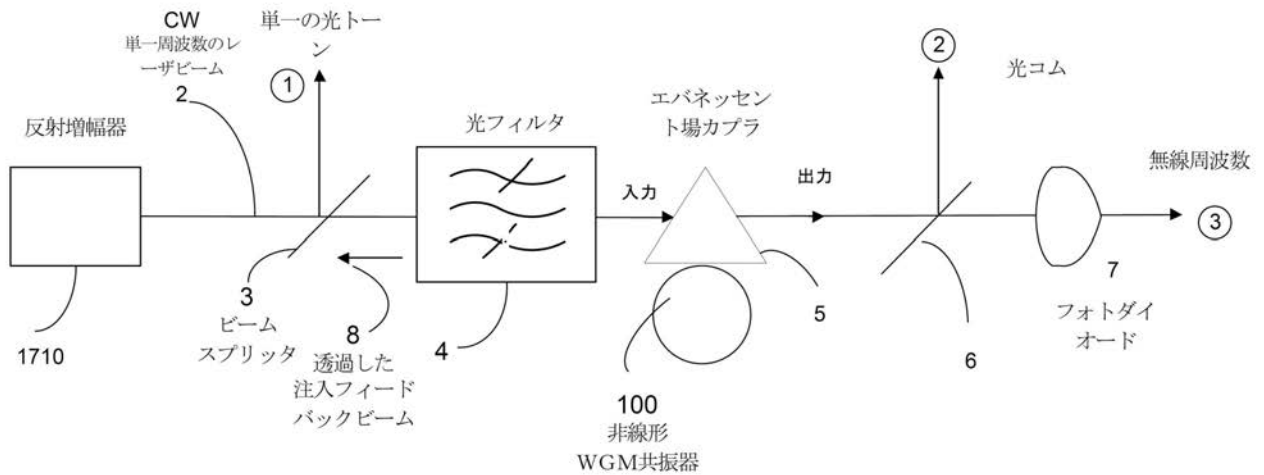
【図 15】



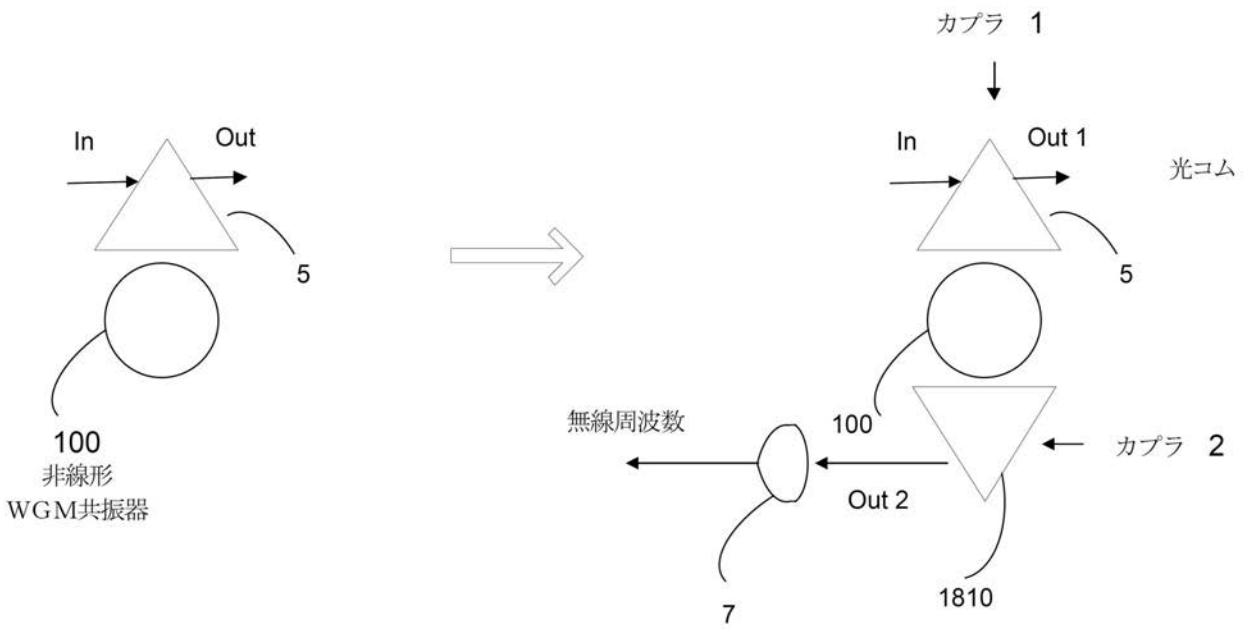
【 図 1 6 】



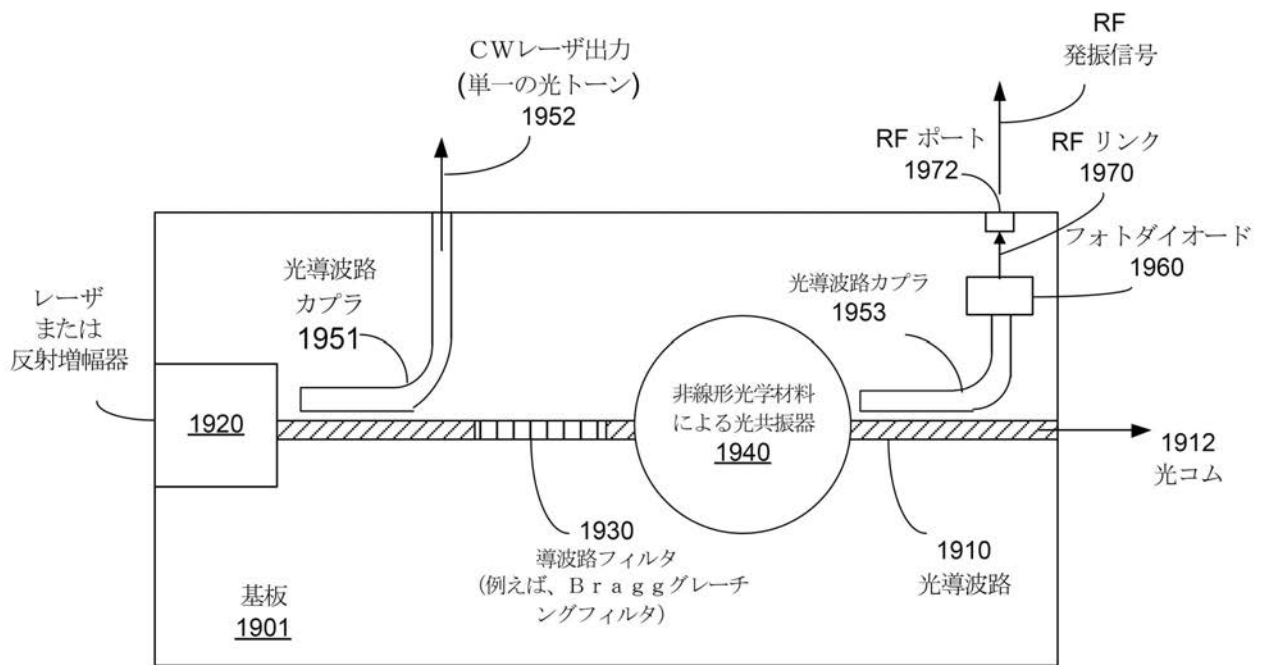
【 図 1 7 】



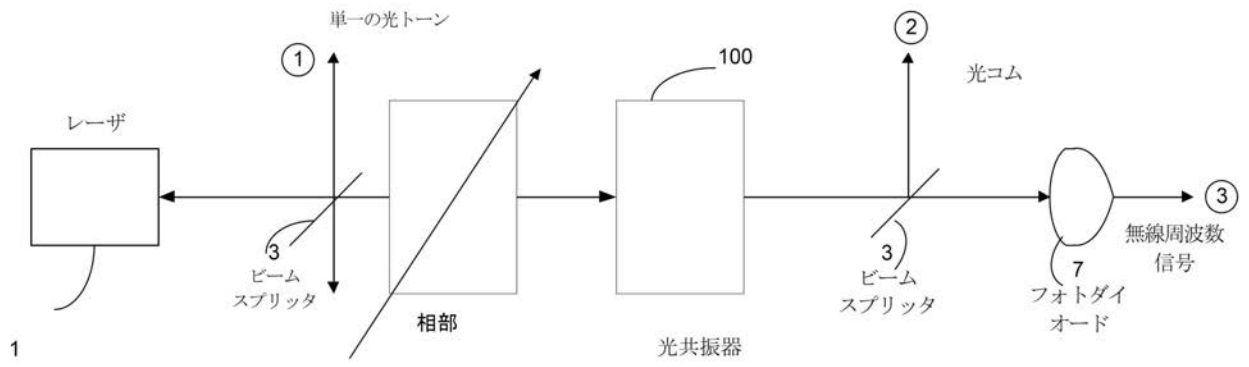
【 図 1 8 】





【 図 1 9 】



【図20】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US2012/038015
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>H01S 3/08(2006.01)i, H01S 3/10(2006.01)i</i>		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01S 3/08; H01S 3/10; H01S 3/30; G02B 6/26; G02F 1/03; H01S 3/083; H04B 10/00; H01S 5/00; H01S 3/17; H04B 10/04		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Korean utility models and applications for utility models Japanese utility models and applications for utility models		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) eKOMPASS(KIPO internal) & Keywords: "RESONATOR," "LASER," "COMB," "FILTER," "SPLITTER," "RIADIO," "FREQUENCY," "OSCILLATOR," "PHOTODIODE," AND "PHOTODETECTOR"		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2010-0118375 A1 (MALEKI LUTE et al.) 13 May 2010 See abstract; figures 1A, 3, 5, 9-14; paragraphs [20]-[31], [41]-[44], [64]-[93].	1-21
A	US 2005-0286602 A1 (DEANA GUNN et al.) 29 December 2005 See abstract; figures 1-6, 15A-18; paragraphs [23]-[55], [83]-[96].	1-21
A	US 2011-0069723 A1 (DONG LIANG et al.) 24 March 2011 See abstract; figures 14-23A; paragraphs [125]-[162].	1-21
A	US 2002-0021765 A1 (LUTE MALEKI et al.) 21 February 2002 See abstract; figures 1-7; paragraphs [17]-[27].	1-21
A	US 7630417 B1 (MALEKI LUTFOLLAH et al.) 08 December 2009 See abstract; figures 5A, 5B, 12; column 8 line 31 - column 9, line 18.	1-21
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 25 JANUARY 2013 (25.01.2013)		Date of mailing of the international search report 28 JANUARY 2013 (28.01.2013)
Name and mailing address of the ISA/KR  Korean Intellectual Property Office 189 Cheongsu-ro, Seo-gu, Daejeon Metropolitan City, 302-701, Republic of Korea Facsimile No. 82-42-472-7140		Authorized officer Cho Sung Chan Telephone No. 82-42-481-8462 

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/US2012/038015

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2010-0118375 A1	13.05.2010	US 8159736 B2	17.04.2012
US 2005-0286602 A1	29.12.2005	US 2008-0001062 A1 US 7260279 B2 US 7480425 B2 WO 2005-122346 A2 WO 2005-122346 A3	03.01.2008 21.08.2007 20.01.2009 22.12.2005 16.11.2006
US 2011-0069723 A1	24.03.2011	CN 102239434 A EP 2374034 A1 JP 2012-511260 A WO 2010-065788 A1	09.11.2011 12.10.2011 17.05.2012 10.06.2010
US 2002-0021765 A1	21.02.2002	US 6871025 B2	22.03.2005
US 7630417 B1	08.12.2009	None	

フロントページの続き

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

(72)発明者 マツコ, アンドレイ

アメリカ合衆国 9 1 1 0 1 カリフォルニア州, パサデナ, イーユークリド アベニュー 3 8
0 5, アパート# 2 1 0

Fターム(参考) 2K102 AA03 AA09 AA10 BA19 BB03 BC03 BC06 BC10 DA01 DB01
DB04 EA25 EB06 EB16 EB20 EB22 EB29