

(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2015-225328

(P2015-225328A)

(43) 公開日 平成27年12月14日 (2015. 12. 14)

(51) Int. Cl.			F I			テーマコード (参考)		
G02F	1/01	(2006.01)	G02F	1/01	Z	2K102		
G02F	2/02	(2006.01)	G02F	2/02		5F172		
H01S	3/098	(2006.01)	H01S	3/098				
H01S	3/10	(2006.01)	H01S	3/10	A			
H01S	3/137	(2006.01)	H01S	3/137				

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2014-112075 (P2014-112075)
 (22) 出願日 平成26年5月30日 (2014. 5. 30)

(71) 出願人 00004226
 日本電信電話株式会社
 東京都千代田区大手町一丁目5番1号
 (74) 代理人 100064621
 弁理士 山川 政樹
 (74) 代理人 100098394
 弁理士 山川 茂樹
 (74) 代理人 100153006
 弁理士 小池 勇三
 (72) 発明者 石澤 淳
 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日
 本電信電話株式会社内
 (72) 発明者 西川 正
 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日
 本電信電話株式会社内

最終頁に続く

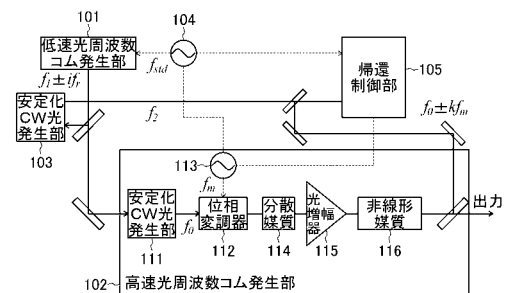
(54) 【発明の名称】 光周波数コム安定化光源および信号発生器

(57) 【要約】

【課題】 より高い繰り返し周波数の光周波数コムが、高い精度で得られるようにする。

【解決手段】 低速光周波数コム発生部101が生成した第1光周波数コムを用いて安定化された第2光源とは異なる周波数の連続波光を安定化CW光発生部103で発生させ、高速光周波数コム発生部102が生成した第2光周波数コムと、安定化CW光発生部103が発生した連続波光とを比較し、この比較の状態をもとに、帰還制御部105で信号発生器113を制御する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

受動モード同期レーザから構成された第 1 光源より第 1 周波数のパルス繰り返し周波数を有する光パルスを生成し、生成した光パルスの光スペクトル帯域を拡大し、拡大された光パルスより得られる長波長成分の第 n 高調波 (n は 2 以上の整数) 及び短波長成分の第 $n - 1$ 高調波の周波数差の光信号を光電変換して出力した電気信号と、第 1 参照信号発生器より出力される第 1 参照信号とを比較し、この比較の状態をもとに前記第 1 光源を制御してパルス繰り返し周波数およびオフセット周波数が安定化された第 1 光周波数コムを生成する低速光周波数コム発生部と、

前記低速光周波数コム発生部が生成した第 1 光周波数コムを用いて安定化された連続波光を発生する第 2 光源より発生した連続したレーザ光を、第 2 参照信号発生器より出力される前記第 1 参照信号より高周波の第 2 参照信号により位相変調することで前記第 1 光周波数コムより高周波の第 2 光周波数コムを生成する高速光周波数コム発生部と、

前記低速光周波数コム発生部が生成した第 1 光周波数コムを用いて安定化された前記第 2 光源とは異なる周波数の連続波光を発生する第 3 光源と、

前記高速光周波数コム発生部が生成した第 2 光周波数コムと前記第 3 光源が発生した連続波光との干渉信号と、前記第 1 参照信号ないしは前記第 1 参照信号を逡倍または分周した信号とを比較し、この比較の状態をもとに前記第 2 参照信号発生器を制御する参照信号帰還制御部と

を備えることを特徴とする光周波数コム安定化光源。

【請求項 2】

請求項 1 記載の光周波数コム安定化光源において、

前記参照信号帰還制御部は、前記高速光周波数コム発生部が生成した第 2 光周波数コムと、前記第 3 光源が発生した連続波光との干渉信号と、前記第 2 光周波数コムに含まれる複数のモードのうちの 1 モードを分波した光と前記第 2 光源が発生した連続波光との干渉信号とを比較し、この比較の状態をもとに前記第 2 参照信号発生器を制御する

ことを特徴とする光周波数コム安定化光源。

【請求項 3】

請求項 1 または 2 のいずれかに記載の光周波数コム安定化光源において、

前記第 3 光源が発生した連続波光は、前記低速光周波数コム発生部が生成した前記第 1 光周波数コムに含まれる複数のモードのうちの 1 のモードを分波した連続波光である

ことを特徴とする光周波数コム安定化光源。

【請求項 4】

受動モード同期レーザから構成された第 1 光源より第 1 周波数のパルス繰り返し周波数を有する光パルスを生成し、生成した光パルスの光スペクトル帯域を拡大し、拡大された光パルスより得られる長波長成分の第 n 高調波 (n は 2 以上の整数) 及び短波長成分の第 $n - 1$ 高調波の周波数差の光信号を光電変換して出力した電気信号と、第 1 参照信号発生器より出力される第 1 参照信号とを比較し、この比較の状態をもとに前記第 1 光源を制御してパルス繰り返し周波数およびオフセット周波数が安定化された第 1 光周波数コムを生成する低速光周波数コム発生部と、

前記低速光周波数コム発生部が生成した第 1 光周波数コムを用いて安定化された連続波光を発生する第 2 光源より発生した連続したレーザ光を、第 2 参照信号発生器より出力される前記第 1 参照信号より高周波の第 2 参照信号により位相変調することで前記第 1 光周波数コムより高周波の第 2 光周波数コムを生成する高速光周波数コム発生部と、

前記低速光周波数コム発生部が生成した第 1 光周波数コムを用いて安定化された前記第 2 光源とは異なる周波数の連続波光を発生する第 3 光源と、

前記高速光周波数コム発生部が生成した第 2 光周波数コムと前記第 3 光源が発生した連続波光との干渉信号と、前記第 1 参照信号ないしは前記第 1 参照信号を逡倍または分周した信号とを比較し、この比較の状態をもとに前記第 2 参照信号発生器を制御する参照信号帰還制御部と

10

20

30

40

50

を備えることを特徴とする信号発生器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光周波数コム安定化光源および信号発生器に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、電気的方法で測定可能なマイクロ波以下の基準周波数を元に、光の周波数を直接測定する新しい技術が開発されている（非特許文献1～7参照）。この技術では、光周波数コム（Comb）を、光周波数のものさしとして光周波数計測に利用している。この光周波数コムでは、周波数領域において安定した光パルス列の一定の周波数間隔で現れる周波数の複数の線スペクトルを櫛目と見立てている。この櫛目の間隔がマイクロ波帯の光パルスの繰り返し周波数であり、各櫛目の光周波数は、隣り合う櫛目の間隔の周波数（マイクロ波周波数）の整数倍にオフセット周波数を加えたものとなる。従って、光周波数コムでは、櫛目の間隔の周波数と整数値とにより各線スペクトルの光周波数が決定できる。

10

【0003】

このような光周波数コムを用いれば、電氣的に測定可能な間隔周波数をもとに、光周波数の計測が行える。例えば、測定対象の光と光周波数コムとを混ぜ合わせた（干渉させた）ときに観察される光ビートを用いれば、光周波数コムの各線スペクトルの光周波数は既知であるので、測定対象の光の光周波数を求めることができる。このように直接光周波数を測定可能とする光周波数コムは、マイクロ波周波数を光の周波数領域にまでつなぐ周波数基準となる。光周波数コムは、高精度な周波数基準および関連する基礎物理学だけではなく、通信、精密計測、量子情報通信などの分野への応用が展開されていくものと考えられる。

20

【0004】

近年、光周波数コムの周波数を安定化する手法が検討されている（特許文献1および非特許文献1～6参照）。この光源として、例えば、共振器を備えた受動モード同期レーザが用いられている（非特許文献1～3, 5～7参照）。受動モード同期レーザは、パルスレーザ光を発振することができる。

【0005】

レーザは、通常、光を増幅する利得媒質と、所定の共振器長（ L ）の共振器を備えている。この共振器の縦モードの共振周波数は、 $c/2L$ （ c は光速）の整数倍である。また、レーザが発振するレーザ光のスペクトル幅は非常に狭いが、このスペクトル幅よりも共振器の共振周波数の間が狭いと、共振器において複数のモード（周波数）が発振する。このように複数のモードが発振する状態において、各モードの位相を揃える（モード同期させる）ことにより、繰り返し周波数 $f_{rep} = c/(2L)$ で発振するレーザ光が強められる。このように、複数のモードをモード同期させることで、繰り返し周波数 f_{rep} のパルスレーザ光を発振させることができる。

30

【0006】

このような、受動モード同期レーザにより発振されるパルスレーザ光は、図7の（a）に示す「光搬送波包絡線」に示すようなパルスが、時間軸上に等しい時間間隔 T で並ぶ。一方、周波数軸上においては、図7の（b）に示すように、等しい周波数間隔 f_{rep} で櫛状に並ぶ多数のモード（線スペクトル）の集合体となる。このように周波数軸上に櫛歯状に並ぶレーザ光の集合体が、光周波数コムとなる。

40

【0007】

一般に、時間軸上に並ぶ光搬送波電界のピークと、包絡線で示されるパルスレーザのパルスのピークとは常に一致しているわけではなく、時間的にシフトしていき、この変化も一定ではない。なお、図7の（a）では、光搬送波電界のピークと、包絡線により示されるパルスのピークとが、ずれている状態を示している。また、光搬送波電界のピークとパルスピークのずれに対応し、図7の（b）に示すように、光周波数コムもオフセ

50

ット周波数 だけオフセットされている。

【0008】

ところで、上述した包絡線で示すパルスピーク間の時間幅 T と、図7の(b)に示す光周波数コムモードの間隔である周波数間隔 f_{rep} との間には、「 $f_{rep} = 1/T$ 」という関係があり、光周波数コム各モードのスペクトル周波数 f_n は、「 $f_n = n \times f_{rep} +$ (n は整数) 」と表すことができる。また、包絡線のピークから計った光搬送波電界の位相 (キャリアエンベロープ位相) を ϕ とし、この ϕ の隣り合うパルス (包絡線) の間のずれを $\Delta\phi$ とすると、「 $\Delta\phi = (\Delta f / 2) \times f_{rep}$ 」である。

【0009】

ここで、まず、受動モード同期レーザ発振器のスペクトルの周波数帯域を、例えばフォトリソニック結晶ファイバなどで生じる自己位相変調効果を用い、周波数帯域を2倍以上 (帯域1オクターブ以上) に広げて白色光を発生させる。このことにより、光周波数コムモードとなるモードの数を増大させることができる。このようにして得られた白色光の長波長成分 f_1 ($= n \times f_{rep} + \phi$) の第2高調波を発生させると、この周波数は、 $f_1' = 2 \times (n \times f_{rep} + \phi)$ となる。また、上記白色光の短波長成分 f_2 は、「 $f_2 = 2 \times n \times f_{rep} + \phi$ 」と表せるが、この短波長成分 f_2 の光と f_1' の光とを干渉させ、これにより発生するうなり信号 (光ビート) を例えばフォトダイオードを用いて検出することで、 f_1' と f_2 との周波数差 ($= f_1' - f_2$) の値を測定することができる。この干渉計を、 $f - 2f$ 干渉計と呼ぶ。

10

【0010】

上述したことにより検出される光周波数 Δf が、オフセット周波数と呼ばれ、キャリアエンベロープ位相差 $\Delta\phi$ に比例する。

20

【0011】

この周波数差 Δf を外部からの参照周波数と比較して得られるこれらのずれの大きさをもとに、電子回路などを用いて共振器内における光が感じる非線形分散量や非線形屈折率にフィードバックをかけることで、前述した光周波数コムオフセット周波数 (キャリアエンベロープ位相 ϕ の差) が安定した状態で、受動モード同期レーザより光周波数コムを得ることができる。

【0012】

また、受動モード同期レーザの繰り返し周波数 f_{rep} は、このレーザ光を受光しているフォトダイオードなどの光検出器からの繰り返し周波数信号をもとに、受動モード同期レーザの共振器長にフィードバックをかけることで、ある有限の範囲内に固定することができる。

30

【0013】

上述したことにより、オフセット周波数と繰り返し周波数とを一定にした光周波数コム安定化光源が、共振器を備えた受動モード同期レーザを基本に開発されている (非特許文献1~6参照) 。

【0014】

ところで、上述した受動モード同期レーザを用いた光周波数コム光源では、キャリアエンベロープ位相を制御する手段として、共振器内に設置されたガラスウエッジの挿入量を変えて共振器における波長分散量を変化させることや、ポンプ光の強度を変えて利得媒質 (例えばチタンサファイヤ結晶) の非線形屈折率を変化させている (非特許文献1~3, 5~7参照) 。従って、従来技術では、周波数が安定な光周波数コムを得るためには、共振器を備えた受動モード同期レーザを用いることが前提となる。

40

【0015】

受動モード同期レーザを用いる場合、得られるレーザの中心光周波数は共振器内に配置された利得媒質に依存し、例えば、利得媒質としてチタンサファイヤ結晶を用いた場合、発振可能なレーザの波長は650~1100nmの範囲となるが、最も効率よく発振できる波長は800nmである。このように、受動モード同期レーザでは、得られるレーザの中心光周波数が限定される。

50

【 0 0 1 6 】

また、キャリアエンベロープ位相差の検出には、前述したように、フォトニック結晶ファイバや高非線形ファイバなどを用いてスペクトルを広帯域化した光を得られるだけのレーザ出力が必要となる。このため、用いることができるレーザの種類が限定される。また、条件を満たすレーザでは、共振器内に配置する利得媒質と光学部品との空間的配置などの制約から、共振器長を短くすることができず、共振器長で決定される繰り返し周波数は、1 GHz程度が上限となる。

【 0 0 1 7 】

さらに、繰り返し周波数を変化させるための共振器の長さの調節(制御)は、通常、共振器エンドミラーに固定した piezo素子などのアクチュエータで行っている。このため、繰り返し周波数の可変範囲も小さいものとなっている。例えば、繰り返し周波数が80 MHzのレーザ光源の可変範囲は、77~83 MHzである。

10

【 0 0 1 8 】

一方、安定な光周波数コムを得る方法として、連続的にレーザを出す波長安定化CW光源を用い、この光源に対して電気光学変調器で深い周波数変調をかけ、FM側帯波を発生させる方法が提案されている(非特許文献7参照)。この方法では、繰り返し周波数における制約は解消されるが、光周波数コムのオフセット周波数は、もともになるCW光の中心波長によって決定されるため、得られる光周波数コムの安定化を実現するためには、例えば、アセチレンガスなどの吸収線にロックすることで得られる波長安定化光源などのCW光源が必要となり、外部からのマイクロ波参照周波数だけで光周波数コムの各モードの波長を固定することができず、得られる確度も劣るものとなる。

20

【 0 0 1 9 】

上述した問題を解消するために、CW光源をより発生したレーザ光を第1周波数で位相変調することで、パルスの繰り返し周波数が第1周波数の光パルスを生じ、この光パルスの光スペクトル帯域を拡大させ、帯域が拡大した光パルスより得られる長波長成分の第n高調波および短波長成分の第n-1高調波の周波数差の光信号に対応する電気信号と参照信号とを比較し、この比較の状態をもとに光源を制御する技術が提案されている(特許文献1参照)。

【 0 0 2 0 】

この技術について、図8を用いて説明する。図8は、光周波数コム安定化光源の構成を示す構成図である。この光周波数コム安定化光源は、連続波光源801、位相変調部802、基準周波数発生器803、波長分散付与部804、光カプラ805、光増幅器806、光フィルタ807、非線形光学媒質808、検出部809、帰還制御部810を備える。

30

【 0 0 2 1 】

連続波光源801より出力される連続波(CW)に対し、位相変調部802が位相変調を行い、波長分散付与部804によりパルス化する。位相変調部802には、基準周波数発生器803から、基準信号が供給されている。このように生成された光パルス列の光強度を光増幅器806により大きくした後に、非線形光学媒質808を伝搬させることにより1オクターブ以上の帯域の広帯域光を発生させる。この広帯域光を、検出部809を構成する $f - 2f$ 干渉計(または $2f - 3f$)からなる自己参照干渉計に入力し、自己参照型干渉計による干渉により発生する光ビートを、検出部809を構成する光検出器で検出することでオフセット周波数を検出する。

40

【 0 0 2 2 】

検出部809で検出された検出信号(オフセット周波数の信号)を、外部より得られる基準周波数(不図示)と比較して連続波光源801へフィードバックすることで、連続波光源801の中心周波数を制御・安定化する。安定化された高繰り返し光パルス列は、光増幅器806の前段に設置した光カプラ805で分岐して出力する。上述したことにより、オフセット周波数が安定した光周波数コムを得ることができる。

【 0 0 2 3 】

50

しかし、従来の光周波数コム安定化光源には、位相変調器に基準信号を供給する基準周波数発生器に課題があった。数GHz以上といった高い繰り返し周波数の光周波数コムを発生させようとする、基準周波数発生器も同じ周波数の基準信号を発生させる必要がある。このような高周波の基準信号を発生させるため、基準周波数発生器は、水晶発振器などが発振する信号を逡倍して、所望の信号を生成している。

【0024】

基準周波数発生器からの基準信号の位相雑音(時間ジッター)は、逡倍する前の信号が有する位相雑音が逡倍の次数に比例して増大する。基準周波数発生器が出力する基準信号の位相雑音が増大すると、光周波数コムの各モードの光スペクトルを拡大し、自己参照干渉計を用いてオフセット周波数を検出する際に位相雑音が大きくなるため、信号検出が困難になる。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0025】

【特許文献1】特開2009-116242号公報

【非特許文献】

【0026】

【非特許文献1】D.J.Jones, et al., "Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis", Science, Vol.288, pp.635-639, 2000.

20

【非特許文献2】R.Holzwarth, et al., "Optical Frequency Synthesizer for Precision Spectroscopy", Phys. Rev. Lett., Vol.85, No.11, pp.2264-2267, 2000.

【非特許文献3】K.Sugiyama, et al., "Frequency Control of a Chirped-Mirror-Dispersion-Controlled Mode-Locked Ti:Al₂O₃ Laser for Comparison between Microwave and Optical Frequencies", Proceedings of SPIE, Vol.4269, pp.95-104,2001

【非特許文献4】T.R.Schibli, et al., "Frequency metrology with a turnkey all-fiber system", Optics Letters, Vol.29, No.21, pp.2467-2469, 2004.

【非特許文献5】T.M.Foritier, et al., "Octave-spanning Ti:sapphire laser with a repetition rate >1 GHz for optical frequency measurements and comparisons", Optics Letters, Vol.31, No.7, pp.1011-1013, 2006.

30

【非特許文献6】I. Hartl, et al., "Integrated self-referenced frequency-comb laser based on a combination of fiber and waveguide technology", Optics Express, Vol.13, No.17, pp.6490-6496,2005.

【非特許文献7】M.Kouroggi, et al., "Limit of Optical-Frequency Comb Generation Due to Material Dispersion", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.31, No.12, pp.2120-2126, 1995.

【非特許文献8】A. Ishizawa, T.Nishikawa, A.Mizutori, H.Takara,A.Takada, T.Sogawa, and M.Koga, "Phase-noise characteristics of a 25-GHz-spaced optical frequency comb based on a phase- and intensity-modulated laser", Optics Express, Vol.21, No.24, pp.29186-29194, 2013.

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0027】

以上に説明したように、これまでの光周波数コム安定化光源については、高い繰り返し周波数の光周波数コムを発生させようとする、位相変調器に基準信号を供給する基準周波数発生器の位相雑音強度が影響し、連続波光源の中心周波数から離れた周波数における光周波数コムの線幅も広くなる。この結果、オフセット周波数の検出が困難になる、あるいは精度が低下し、高い繰り返し周波数の光周波数コムが、高い精度で得られないという問題があった。

【0028】

50

本発明は、以上のような問題点を解消するためになされたものであり、より高い繰り返し周波数の光周波数コムが、高い精度で得られるようにすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0029】

本発明に係る光周波数コム安定化光源は、受動モード同期レーザから構成された第1光源より第1周波数のパルス繰り返し周波数を有する光パルスを生成し、生成した光パルスの光スペクトル帯域を拡大し、拡大された光パルスより得られる長波長成分の第 n 高調波（ n は2以上の整数）及び短波長成分の第 $n-1$ 高調波の周波数差の光信号を光電変換して出力した電気信号と、第1参照信号発生器より出力される第1参照信号とを比較し、この比較の状態をもとに第1光源を制御してパルス繰り返し周波数およびオフセット周波数が安定化された第1光周波数コムを生成する低速光周波数コム発生部と、低速光周波数コム発生部が生成した第1光周波数コムを用いて安定化された連続波光を発生する第2光源より発生した連続したレーザ光を、第2参照信号発生器より出力される第1参照信号より高周波の第2参照信号により位相変調することで第1光周波数コムより高周波の第2光周波数コムを生成する高速光周波数コム発生部と、低速光周波数コム発生部が生成した第1光周波数コムを用いて安定化された第2光源とは異なる周波数の連続波光を発生する第3光源と、高速光周波数コム発生部が生成した第2光周波数コムと第3光源が発生した連続波光との干渉信号と、第1参照信号ないしは第1参照信号を逡倍または分周した信号とを比較し、この比較の状態をもとに第2参照信号発生器を制御する参照信号帰還制御部とを備える。高速光周波数コム発生部より、より高い繰り返し周波数の光周波数コムが、高い精度で得られる。

10

20

【0030】

上記光周波数コム安定化光源において、参照信号帰還制御部は、高速光周波数コム発生部が生成した第2光周波数コムと、第3光源が発生した連続波光との干渉信号と、第2光周波数コムに含まれる複数のモードのうちの1モードを分波した光と第2光源が発生した連続波光との干渉信号とを比較し、この比較の状態をもとに第2参照信号発生器を制御する。また、前記第3光源が発生した連続波光は、前記低速光周波数コム発生部が生成した前記第1光周波数コムに含まれる複数のモードのうちの1のモードを分波した連続波光であればよい。

【0031】

本発明に係る信号発生器は、受動モード同期レーザから構成された第1光源より第1周波数のパルス繰り返し周波数を有する光パルスを生成し、生成した光パルスの光スペクトル帯域を拡大し、拡大された光パルスより得られる長波長成分の第 n 高調波（ n は2以上の整数）及び短波長成分の第 $n-1$ 高調波の周波数差の光信号を光電変換して出力した電気信号と、第1参照信号発生器より出力される第1参照信号とを比較し、この比較の状態をもとに第1光源を制御してパルス繰り返し周波数およびオフセット周波数が安定化された第1光周波数コムを生成する低速光周波数コム発生部と、低速光周波数コム発生部が生成した第1光周波数コムを用いて安定化された連続波光を発生する第2光源より発生した連続したレーザ光を、第2参照信号発生器より出力される第1参照信号より高周波の第2参照信号により位相変調することで第1光周波数コムより高周波の第2光周波数コムを生成する高速光周波数コム発生部と、低速光周波数コム発生部が生成した第1光周波数コムを用いて安定化された第2光源とは異なる周波数の連続波光を発生する第3光源と、高速光周波数コム発生部が生成した第2光周波数コムと第3光源が発生した連続波光との干渉信号と、第1参照信号ないしは第1参照信号を逡倍または分周した信号とを比較し、この比較の状態をもとに第2参照信号発生器を制御する参照信号帰還制御部とを備える。参照信号帰還制御部により制御された第2参照信号発生器より、位相雑音が抑制された第2参照信号が得られる。

30

40

【発明の効果】

【0032】

以上説明したことにより、本発明によれば、より高い繰り返し周波数の光周波数コムが

50

、高い精度で得られるようになるという優れた効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0033】

【図1】図1は、本発明の実施の形態における光周波数コム安定化光源の基本的な構成を示す構成図である。

【図2】図2は、光周波数コム安定化光源で用いる光のスペクトルを説明する説明図である。

【図3】図3は、本発明の実施の形態1における光周波数コム安定化光源の構成を示す構成図である。

【図4】図4は、実施の形態1における光周波数コム安定化光源より得られたSC光と波長可変レーザとを用いて、SC光の各モードの位相雑音累積値の測定結果を示す特性図である。

【図5】図5は、本発明の実施の形態2における光周波数コム安定化光源の構成を示す構成図である。

【図6】図6は、本発明の実施の形態3における光周波数コム安定化光源の構成を示す構成図である。

【図7】図7は、光パルスにおける光搬送波のキャリアエンベロープ位相について示す説明図(a)、および光パルスの周波数軸上における線スペクトルの状態を示す説明図(b)である。

【図8】図8は、光周波数コム安定化光源の構成を示す構成図である。

【発明を実施するための形態】

【0034】

以下、本発明の実施の形態について図を参照して説明する。始めに、本発明の原理について、図1および図2を用いて説明する。図1は、本発明に係る光周波数コム安定化光源の基本的な構成を示す構成図である。図2は、光周波数コム安定化光源で用いる光のスペクトルを説明する説明図である。

【0035】

この光周波数コム安定化光源は、低速光周波数コム発生部101、高速光周波数コム発生部102、安定化CW光発生部(第3光源)103、基準周波数発生器(第1参照信号発生器)104、および帰還制御部(参照信号帰還制御部)105を備える。また、高速光周波数コム発生部102は、安定化CW光発生部(第2光源)111、位相変調器112、信号発生器(第2参照信号発生器)113、分散媒質114、光増幅器115、および非線形光学媒質116を備える。

【0036】

低速光周波数コム発生部101は、図示しない受動モード同期レーザから構成された第1光源より第1周波数のパルス繰り返し周波数を有する光パルスを生成し、生成した光パルスの光スペクトル帯域を拡大し、拡大された光パルスより得られる長波長成分の第n高調波(nは2以上の整数)および短波長成分の第n-1高調波の周波数差の光信号を光電変換して出力した電気信号と、基準周波数発生器104より出力される第1参照信号とを比較し、この比較の状態をもとに第1光源を制御して比較的低速の第1光周波数コムを生成する。第1参照信号は、例えば、RFであればよい。

【0037】

一方、高速光周波数コム発生部102は、低速光周波数コム発生部101が生成した第1光周波数コムを用いて安定化された連続波光を発生する安定化CW光発生部(第2光源)111より発生した連続したレーザ光を、信号発生器113より出力される第1参照信号より高周波の第2参照信号により位相変調することで第1光周波数コムより高周波の(高速な)第2光周波数コムを生成する。

【0038】

安定化CW光発生部111は、光周波数 f_0 の連続波(CW)光を発生する。安定化CW光発生部111は、例えば波長可変CW光源であり、中心波長が任意に選択可能とされ

10

20

30

40

50

ている。位相変調器 112 は、安定化 CW 光発生部 111 より出射された CW 光を、信号発生器 113 より出力される周波数 f_m の信号（第 2 参照信号）で位相変調する。信号発生器 113 が出力する信号の周波数 f_m は、最終的に出力される光周波数コム（第 2 光周波数コム）の繰り返し周波数と同じであり、数 GHz 以上とする。例えば $f_m = 25 \text{ GHz}$ とする。また、信号発生器 113 は、基準周波数発生器 104 より出力される周波数 f_{std} の基準周波数に同期して周波数 f_m の信号を出力する。

【0039】

分散媒質 114 は、位相変調器 112 により位相変調された CW 光に波長分散を与えて繰り返し周波数 f_m の光パルス列に変換する。分散媒質 114 は、例えば、光ファイバ、ファイバグレーティング、および平面型光波回路で構成することができる。光増幅器 115 は、繰り返し周波数 f_m の光パルス列に変換された光（光パルス列）の光強度を増幅する。

10

【0040】

非線形光学媒質 116 は、繰り返し周波数 f_m の光パルス列に変換された光パルス列のスペクトル帯域を拡大する。非線形光学媒質 116 としては、例えば、コアの周りに多数の空孔を設けてこの領域の屈折率を等価的に低下させたクラッドとしたフォトニック結晶ファイバなどの、非線形光学効果を発現する非線形光ファイバにより、非線形光学媒質 116 が構成できる。また、非線形光学媒質 116 は、導波方向（長手方向）に波長分散が異常分散から正常分散に減少する非線形光ファイバであるとよい（特許文献 2 参照）。フォトニック結晶ファイバの場合、等価的にクラッドとした領域の孔の孔径や配置の状態により、導波方向に波長分散が異常分散から正常分散に減少する状態とすることができる。

20

【0041】

低速光周波数コム発生部 101 は、高速光周波数コム発生部 102 が生成する光周波数コムの繰り返し周波数よりも、例えば 2 - 3 桁程度低い繰り返し周波数 f_r （第 1 周波数）の低速光周波数コム（第 1 光周波数コム）を生成する。低速光周波数コム発生部 101 は、第 1 光源より第 1 周波数のパルス繰り返し周波数を有する光パルスを生成し、生成した光パルスの光スペクトル帯域を拡大し、拡大された光パルスより得られる長波長成分の第 n 高調波（ n は 2 以上の整数）および短波長成分の第 $n - 1$ 高調波の周波数差の光信号を光電変換して出力した電気信号と、第 1 参照信号発生器より出力される RF の第 1 参照信号とを比較し、この比較の状態をもとに第 1 光源を制御して低速光周波数コムを生成する。第 1 周波数は、例えば $f_r = 250 \text{ MHz}$ とする。

30

【0042】

上記第 1 光源は、例えば、受動モード同期レーザである。このような光周波数コムを生成するため、低速光周波数コム発生部 101 には、基準周波数発生器 104 より出力される周波数 f_{std} の基準周波数が入力される。基準周波数 f_{std} は、前述のとおり信号発生器 113 を同期制御するために用いられるとともに、低速光周波数コム発生部 101 が生成する低速光周波数コム（第 1 光周波数コム）を安定化制御するために用いられる。例えば $f_{std} = 10 \text{ MHz}$ とする。この基準周波数は、例えば GPS 信号のように、位相雑音の低い信号である必要がある。

40

【0043】

低速光周波数コム発生部 101 は、広い帯域にわたって安定な低速の光周波数コム（周波数 = $f_1 \pm i f_r$ 、 f_1 は中心光周波数、 f_r は繰り返し周波数（第 1 周波数）、 i はモード次数で正数）を提供する。光周波数コムは、周波数空間上 n における光のものさしの役割を果たす。また、光のものさしである低速光周波数コム発生部 101 の出力光を用い、安定化 CW 光発生部 103 および安定化 CW 光発生部 111 の中心周波数を安定化する。

【0044】

安定化について説明すると、図 2 の (a) に示すように、安定化 CW 光発生部 111 から出力される周波数 f_0 の CW 光 201 は、低速光周波数コム発生部 101 より出力される低速光周波数コム 202 の直近のモードに同期させる。同じく、安定化 CW 光発生部 103 から出力される周波数 f_2 の CW 光 203 は、低速光周波数コム 202 のいずれかの

50

モードと同期するようにすればよい。ここで、周波数 f_0 と周波数 f_2 とは、周波数軸上で、高速光周波数コム発生部 102 で生成される光周波数コム（高速光周波数コム）204 の繰り返し周波数 f_m の整数倍 j ($j \times f_m$) だけ離れるようにする。ただし、後に説明するように、周波数 f_0 と周波数 f_2 とは、周波数軸上でなるべく離れていることが望ましい。

【0045】

高速光周波数コム発生部 102 は、安定化 CW 光発生部 111 からの CW 光を種光源として、図 2 の (b) に示すように広スペクトル帯域光 (SC 光) である高速光周波数コム 204 を発生し、各モードの周波数は $f_0 \pm k f_m$ となる (図 2 (b))。ここで、 k はモード次数であり、整数をとる。高速光周波数コム 204 の各モードには、信号発生器 113 における位相雑音が重畳されるため、スペクトルは位相雑音の量に応じて広がる。

10

【0046】

ここで、発明者らの研究により、モード次数の高い (k の大きい) モードには、信号発生器 113 の位相雑音がより多く重畳されることが判明した。このため、周波数 f_0 と周波数 f_2 との差を大きくし、多くの位相雑音が重畳された高速光周波数コム 204 のモードと、安定化 CW 光発生部 103 からの CW 光 203 (この光の位相雑音は、低速光周波数コムにより低く抑えられている) とを干渉させ、干渉の結果により発生するうなり信号 205 (オフセット周波数) を検出することで、位相雑音を検出するようにした。CW 光 203 の位相雑音は、低速光周波数コム 202 により低く抑えられている。

【0047】

加えて、検出した位相雑音が抑えられるように、帰還制御部 105 により信号発生器 113 の信号源の初期位相を制御することで、信号発生器 113 より極めて位相雑音の低い信号を出力するようにするとともに、信号発生器 113 を用いた極めて安定な光周波数コム (高速光周波数コム) が得られるようにした。

20

【0048】

以上に説明したように、本発明は、低速光周波数コム発生部 101 が生成した第 1 光周波数コムを用いて安定化された第 2 光源とは異なる周波数の連続波光と、上記第 1 光周波数コムを用いて安定化された連続波光を発生する安定化 CW 光発生部 111 によって高速光周波数コム発生部 102 が生成した第 2 光周波数コムとを比較し、この比較の状態をもとに信号発生器 113 を制御することで、信号発生器 113 より、位相雑音が抑制された第 2 参照信号が得られるようにし、高速光周波数コム発生部 102 より、より高い繰り返し周波数の光周波数コムが、高い精度で得られるようにしたところに特長がある。

30

【0049】

[実施の形態 1]

以下、図面を参照して本発明の実施の形態 1 について詳細に説明する。図 3 は、本発明の実施の形態 1 に係る光周波数コム安定化光源の構成例を示す構成図である。この光周波数コム安定化光源は、まず、光源 (第 1 光源) 301、非線形光学媒質 321、自己参照型の干渉計 303、光検出器 341、基準周波数発生器 (第 1 参照信号発生器) 305、帰還回路 361 を備え、これらで、低速光周波数コム発生部が構成されている。

【0050】

また、CW 光源 (安定化 CW 光発生部; 第 2 光源) 307、信号発生器 (第 2 参照信号発生器) 309、位相変調器 310、分散付与部 311、光増幅器 312、分散補償部 313、非線形光学媒質 322 を備え、これらで高速光周波数コム発生部を構成している。また、信号発生器 306、CW 光源 (第 3 光源) 314、波長フィルタ 315、帰還制御部 (参照信号帰還制御部) 316、光検出器 342, 343、帰還回路 362, 363, 光学素子 381, 382, 383, 384, 385, 386 を備える。また、図示していないが、逓倍もしくは分周器 (不図示) を備える。

40

【0051】

光源 301 は、受動モード同期レーザから構成されている。非線形光学媒質 321 は、光源 301 の光スペクトル帯域を拡大する。干渉計 303 および光検出器 341 により、

50

光周波数オフセットを計測する。帰還回路361, 362, 363は、計測された光周波数オフセットを、基準周波数発生器305より出力されるRF信号(例えば、GPS信号)に同期して制御する。

【0052】

CW光源307は、高速光周波数コム発生部における位相変調方式光源の種光源用となる。光学素子381, 382, 383, 384, 385, 386は、光を2分岐する。位相変調器310は、CW光源307より出射されたCW光を、信号発生器309より出力される信号で位相変調する。分散付与部311は、位相変調器310により位相変調されたCW光に波長分散を与えて所定の繰り返し周波数の光パルス列に変換する。光増幅器312は、分散付与部311により光パルス列に変換された光(光パルス列)の光強度を増幅する。

10

【0053】

次に、光源301、非線形光学媒質321、干渉計303、光検出器341、基準周波数発生器305、帰還回路361を備える低速光周波数コム発生部について説明する。光源301から出力された信号光は、非線形光学媒質321へ入力し、広スペクトル帯域光(SC光)となる。このSC光は、干渉計303に入力され、ここで発生するうなり信号が光検出器341で検出される。これらにより、光周波数コムのオフセット周波数の測定が可能となる。

【0054】

干渉計303は、SC光の帯域幅によって構成が異なる。例えば、SC光の帯域が1オクターブ以上のときは、長波長側の第2高調波と短波長側の基本波とを干渉させる $f-2f$ 干渉法、あるいは差周波発生法により、光周波数オフセット信号が検出可能である。これに対し、SC光の帯域が1オクターブ未満のときは、長波長側の第3高調波と短波長側の第2高調波を干渉させる $2f-3f$ 干渉法などが、光周波数オフセット信号の検出に有効である。干渉計303および光検出器341で検出されたオフセット周波数を、基準周波数発生器305の出力信号と比較参照し、帰還回路361を用いて光源301の波長をフィードバック制御することで、光周波数コムの周波数を安定化制御する。ここで、光源301として、受動モード同期レーザの代わりに、周波数軸上に高確度に安定化されたCW光源を用いてもよい。

20

【0055】

次に、CW光源307、光学素子385、信号発生器309、位相変調器310、分散付与部311、光増幅器312、分散補償部313、非線形光学媒質322を備える高速光周波数コム発生部について説明する。CW光源307より出力されるCW光の光周波数を f_0 とし、CW光源307が持っている位相雑音を $\phi(t)$ とする。このCW光は、光学素子385を用いて、波長安定化用と位相変調方式用のCW光に2分岐される。CW光源307より出力されるCW光の中心周波数は、任意に選択可能である。また、CW光源307として、波長可変CW光源を用いることもできる。

30

【0056】

光学素子385により2分岐された一方のCW光(周波数安定化用のCW光)と、繰り返し周波数およびオフセット周波数が制御された光源301の出力光とは、光学素子384を用いて合波されて光検出器342に入力し、干渉信号が検出される。検出された干渉信号とRF基準周波数発生器305を用いて、帰還回路362で比較参照し、CW光源307の波長をフィードバック制御することで、CW光源307の中心周波数を周波数軸上に高確度に安定化する。なお、図面では、RF基準周波数発生器305と帰還回路362との間の接続を示す線を省略している。CW光源307の周波数制御は、例えばCW光源307の共振周波数あるいは注入電流あるいは温度を変化させることにより可能である。

40

【0057】

光学素子385で2分岐された他方のCW光(位相変調方式用CW光)は、位相変調器310において、信号発生器309から送信される周波数 f_m で位相変調し、分散付与部311で適切な分散を与える。これらの結果、繰り返し周波数 f_m の光パルス列が、分散

50

付与部 3 1 1 より出力される。位相変調器 3 1 0 のみでパルス列を発生した場合、時間領域で DC フロア成分が残留するため、残留する DC 成分を抑圧するために、強度変調器を併用することが望ましい。さらに、波長フィルタを使用することで、光パルス列に残留するウィング成分を抑圧でき、クリーンパルス発生を可能にする。

【 0 0 5 8 】

分散付与部 3 1 1 により発生した光パルス列は、光増幅器 3 1 2 によって光増幅する。ここでは、光増幅器 3 1 2 内の進行型自己位相変調効果などの非線形効果を用いて段階的に光増幅する手法を用い、光分裂を起こさずにスペクトル帯域幅を拡大し、分散補償部 3 1 3 で短パルス発生を行う。CW 光源 3 0 7 と位相変調器 3 1 0 と分散付与部 3 1 1 とからなるパルス光源部分は、ファブリペロー共振器内に電気光学変調器を設置することで深い周波数変調を CW 光にかけ、FM 側帯波を発生させる構成であってもよい（非特許文献 7 参照）。これらの位相変調器を用いてパルス列を発生させる手法では、共振器長の制約を受けないために、数十 GHz の繰り返しパルス列の発生が実現可能となる。

10

【 0 0 5 9 】

上述したようにすることで発生させた光パルス列を非線形光学媒質 3 2 2 へ入力し、SC 光を発生させる。

【 0 0 6 0 】

図 4 は、上述したことにより得られた SC 光と波長可変レーザとを用いて、SC 光の各モードの位相雑音累積値の測定結果を示す特性図である。図 4 において、横軸には、SC 光のモード次数ととり、縦軸には位相雑音累積値をとってプロットした。図 4 に示すように、SC 光各モードの位相雑音累積値は、モード次数に対して線形に増加することが分かる。また同時に、傾きが、信号発生器 3 0 9 の位相雑音であることが実験から検証できた（非特許文献 8 参照）。

20

【 0 0 6 1 】

従って、SC 光のモード次数 k ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) の光周波数コムは、「 $E_1(t) = E_1 \exp[-i\{2\pi(f_0 + k \times f_m)t + \phi_0(t) + k \times \phi_1(t)\}] \dots (1)$ 」と、表せる。ここで、 E_1 は光電場振幅、 $\phi_1(t)$ は、信号発生器 3 0 9 がもつ位相雑音である。

【 0 0 6 2 】

非線形光学媒質 3 2 2 において、非線形感受率の大きい材料を使用すれば、高効率に所望の SC 光を発生でき、光周波数コム安定化に必要な CW 光源 3 0 7 からの供給エネルギーの最低閾値を低く抑制することが可能である。

30

【 0 0 6 3 】

位相雑音検出用に、さらに CW 光源 3 1 4 を設ける。光学素子 3 8 1 を用い、CW 光源 3 1 4 から出力される光を、位相雑音検出用と周波数安定化用とに 2 分岐する。CW 光源 3 1 4 から一方の出力光（周波数安定化用）は、光学素子 3 8 2 により安定化された光源 3 0 1 の出力光と合波され、光検出器 3 4 3 で干渉信号が検出され、検出された干渉信号が、基準周波数発生器 3 0 5 から出力される RF 信号により帰還回路 3 6 3 で比較参照される。この比較参照の結果を基にした帰還回路 3 6 3 のフィードバック制御により、CW 光源 3 1 4 の中心周波数を周波数軸上に高確度に安定化する。

40

【 0 0 6 4 】

CW 光源 3 1 4 から出力光の周波数 f_2 は、CW 光源 3 0 7 と同程度、もしくはそれ以下の位相雑音 $\phi_2(t)$ を持っているとする、 $E_2(t) = E_2 \exp[-i\{2\pi f_n t + \phi_2(t)\}] \dots (2)$ と記述できる。ここで、 f_n は、CW 光源 3 0 7 の中心周波数 f_0 と周波数差が大きい方がよい。周波数差が大きいほど後述の SC 光との干渉信号に位相雑音が重畳する（非特許文献 8 参照）。

【 0 0 6 5 】

周波数安定化された CW 光源 3 1 4 より出力されて光学素子 3 8 1 を透過した出力光は、光学素子 3 8 6 で、非線形光学媒質 3 2 2 を出力して波長フィルタ 3 1 5 を透過した SC 光と合波され、光検出器 3 4 3 で干渉信号が検出される。この干渉信号 I_{obs} は、「 I_0

50

$b_s = |E_1(t)|^2 + |E_2(t)|^2 + 2E_1E_2 \cos\{2(f_0 + k \times f_m - f_n)t + (\phi_0(t) + k \times \phi_1(t) - \phi_2(t))\} \cdots (3)$ と記述できる。

【0066】

ここで、 $V_{obs} = 2E_1E_2$ 、 $f = f_0 + k \times f_m - f_n$ 、 $\phi = \phi_0(t) + k \times \phi_1(t) - \phi_2(t)$ と置く。

【0067】

帰還制御部316は、RFバンドパスフィルタを備え、式(3)の干渉項「 $V_{obs} \cos\{2ft + \phi\} \cdots (4)$ 」が検出される。

【0068】

続いて、干渉信号 I_{obs} より十分に位相雑音が小さい参照信号源として、信号発生器306を用いる。例えば、信号発生器306は、基準周波数発生器305から出力される10MHzの信号を60MHzに逡倍して参照信号として出力する。信号発生器306より出力されるRFの参照信号の位相を90度シフトさせると、「 $V_{ref} \sin\{2f_n t + \phi_3(t)\} \cdots (5)$ 」となる。

10

【0069】

式(4)と式(5)とを比較参照すると、「 $V_{obs} \cos\{2ft + \phi\} \times V_{ref} \sin\{2f_n t + \phi_3(t)\} = (V_{obs} \times V_{ref} / 2) \{ \sin(2ft + \phi + \phi_3(t)) + \sin(2ft + \phi - \phi_3(t)) \} \cdots (6)$ 」となる。ここで、帰還制御部316の内部に用意された、ローパスフィルタを用いることで、式(6)の高周波項「 $\sin(2ft + \phi + \phi_3(t))$ 」は遮断され、式(6)の低周波項「 $\sin(2ft + \phi - \phi_3(t))$ 」が検出される。

20

【0070】

従って、検出される電圧 $V(t)$ は、「 $V(t) = V_0 \sin\{2ft + \phi - \phi_3(t)\} \cdots (7)$ 」と記述できる。ここで、 $V_0 = V_{obs} \times V_{ref} / 2$ とする。

【0071】

帰還制御部316は、式(7)の位相差「 $\phi - \phi_3(t)$ 」がゼロになるように信号発生器309の電圧を制御する。 $\phi_3(t)$ は $\phi_2(t)$ と比較して十分小さい。従って、 $\phi_1(t)$ は、「 $\{\phi_2(t) - \phi_3(t)\} / k$ 」に収束し、モード次数 k に反比例して位相雑音を低減できる。つまり、位相変調式光源の繰り返し周波数の高確度安定化と、超低位相雑音な信号発生器とが同時に実現できる。なお、本実施形態では、信号発生器306は、基準周波数発生器305から出力される信号を逡倍し、それを参照信号として帰還制御部へ出力するようにしていたが、基準周波数発生器305から出力される信号を分周し、それを参照信号とするようにしてもよい。あるいは、信号発生器306を用いず、基準周波数発生器305から出力される10MHzの信号を参照信号として帰還制御部316で用いるようにしてもよい。

30

【0072】

[実施の形態2]

以下、図面を参照して本発明の実施の形態2について詳細に説明する。図5は、本発明の実施の形態2に係る光周波数コム安定化光源の構成例を示す構成図である。実施の形態2では、新たに、光検出器343a、波長フィルタ315a、光学素子386a、387、388を加えている。光学素子387は、CW光源307より出力されて光学素子385で分岐された一方のCW光を、光学素子384の側と、光検出器343aの側とに分岐する。また、光学素子388は、非線形光学媒質322より出力されたSC光を、波長フィルタ315と波長フィルタ315aとに分岐する。また、波長フィルタ315aを射出したSC光は、光学素子386aにより、光学素子387で分岐された光と合波される。

40

【0073】

このように、実施の形態2では、新たに設けた光検出器343aの出力を、帰還制御部316へ参照信号として入力するようにしている。なお、他の構成は、前述した実施の形態1と同様である。

【0074】

50

実施の形態 1 では、位相雑音検出用の参照信号に、基準周波数発生器 305 における出力信号（あるいは信号を逡倍ないしは分周した信号）を用いていた。実施の形態 2 では、この参照信号として、CW 光源 307 から生成される信号も用いるようにした。位相変調方式光源を用いて発生させた SC 光を波長フィルタ 315a により単色化し、CW 光源 307 と合波させて光検出器 343a で干渉信号を検出する。この干渉信号は、最も位相雑音強度が小さいために、参照信号として用いることができる。

【0075】

[実施の形態 3]

以下、図面を参照して本発明の実施の形態 3 について詳細に説明する。図 6 は、本発明の実施の形態 3 に係る光周波数コム安定化光源の構成例を示す構成図である。この光周波数コム安定化光源は、まず、光源（第 1 光源）301、非線形光学媒質 321、自己参照型の干渉計 303、光検出器 341、基準周波数発生器（第 1 参照信号発生器）305、帰還回路 361 を備え、これらで、低速光周波数コム発生部が構成されている。

10

【0076】

また、CW 光源（安定化 CW 光発生部；第 2 光源）307、信号発生器（第 2 参照信号発生器）309、位相変調器 310、分散付与部 311、光増幅器 312、分散補償部 313、非線形光学媒質 322 を備え、これらで高速光周波数コム発生部を構成している。また、信号発生器 306、波長フィルタ 315、帰還制御部（参照信号帰還制御部）316、光検出器 342、光検出器 343、帰還回路 362 を備える。上述した構成は、前述した実施の形態 1 と同様である。

20

【0077】

実施の形態 3 では、波長フィルタ 415、光学素子 481、482、483、484 を備える。光学素子 481、482、483、484 は、光を 2 分岐する。波長フィルタ 415 は、繰り返し周波数およびオフセット周波数制御された光源 301 を出力されて光学素子 481 で分岐された出力光より、周波数 f_2 の CW 光を取り出す。実施の形態 3 では、この連続波光が、第 3 光源の光として用いられる。従って、実施の形態では、低速光周波数コム発生部、光学素子 481、および波長フィルタ 415 により、第 3 光源が構成されているものともいえる。なお、実施の形態 3 においても、図示していないが、逡倍もしくは分周器（不図示）を備える。

【0078】

実施の形態 3 では、繰り返し周波数およびオフセット周波数制御されて光源 301 より出射されて光学素子 481 で 2 分岐された一方の出力光と、光学素子 483 により 2 分岐された一方の CW 光（周波数安定化用の CW 光）とは、光学素子 482 を用いて合波されて光検出器 342 に入力し、干渉信号が検出される。検出された干渉信号と RF 基準周波数発生器 305 を用いて、帰還回路 362 で比較参照し、CW 光源 307 の波長をフィードバック制御することで、CW 光源 307 の中心周波数を周波数軸上に高確度に安定化する。CW 光源 307 の周波数制御は、例えば CW 光源 307 の共振周波数あるいは注入電流あるいは温度を変化させることにより可能である。

30

【0079】

光学素子 483 で 2 分岐された他方の CW 光（位相変調方式用 CW 光）は、位相変調器 310 において、信号発生器 309 から送信される周波数 f_m で位相変調し、分散付与部 311 で適切な分散を与える。これらの結果、繰り返し周波数 f_m の光パルス列が、分散付与部 311 より出力される。

40

【0080】

分散付与部 311 により発生した光パルス列は、光増幅器 312 によって光増幅し、分散補償部 313 で短パルス発生を行う。このようにして発生させた光パルス列を、非線形光学媒質 322 へ入力し、SC 光を発生させる。

【0081】

これらに加え、実施の形態 3 では、位相雑音検出用に、繰り返し周波数およびオフセット周波数が制御された光源 301 を出力されて光学素子 481 で分岐された出力光を用い

50

る。実施の形態 3 では、繰り返し周波数およびオフセット周波数制御された光源 301 を出力されて波長フィルタ 415 により取り出された周波数 f_2 の CW 光が、第 3 光源の連続波光として用いられ、光学素子 484 で、非線形光学媒質 322 を出力して波長フィルタ 315 を透過した SC 光と合波される。合波された光より光検出器 343 で干渉信号が検出され、帰還制御部 316 に入力される。他の構成については、実施の形態 1 と同様である。

【0082】

以上に説明したように本発明によれば、RF の第 1 参照信号を用いた低速光周波数コム発生部と、低速光周波数コム発生部が生成した第 1 光周波数コムを用いて安定化された第 2 光源より発生した連続したレーザ光を、第 1 参照信号より高周波の第 2 参照信号により位相変調して第 1 光周波数コムより高周波の第 2 光周波数コムを生成する高速光周波数コム発生部と、低速光周波数コム発生部が生成した第 1 光周波数コムを用いて安定化された第 2 光源とは異なる周波数の連続波光を発生する第 3 光源と、高速光周波数コム発生部が生成した第 2 光周波数コムと第 3 光源が発生した連続波光との干渉信号と、第 1 参照信号ないしは第 1 参照信号を逡倍または分周した信号を比較し、この比較の状態をもとに第 2 参照信号発生器を制御する参照信号帰還制御部とを備えるようにしたので、より高い繰り返し周波数の光周波数コムが、高い精度で得られるようになる。

10

【0083】

第 1 参照信号は、水晶発振器ベースの信号発生器の出力を用いることができ、この第 1 参照信号が持つ位相雑音を抑圧させて周波数間隔で安定な光周波数コム安定化光源が実現可能であるという極めて優れた効果が得られる。また、従来技術ではレーザ繰り返し周波数の上限が 1 GHz 程度であったが、本発明によれば、1 桁以上高い繰り返し周波数すなわち周波数間隔を持つ光周波数コム安定化光源も実現可能である。

20

【0084】

上述した本発明によれば、従来技術よりも 1 桁以上繰り返し周波数が高く周波数間隔が広く、かつ低位相雑音な光周波数コムを実現できることから、従来以上に光コム各モードを利用した通信分野や分光学分野の発展に寄与するものであり、本発明が従来技術よりも優れていることが分かる。また、信号発生器の位相雑音を従来法である水晶発振器で実現できる低位相雑音強度の限界値を更新することから、全く新しい信号発生器を提供でき、マイクロ波技術を利用している多分野の発展に大きく寄与できると考える。

30

【0085】

なお、本発明は以上に説明した実施の形態に限定されるものではなく、本発明の技術的思想内で、当分野において通常の知識を有する者により、多くの変形および組み合わせが実施可能であることは明白である。例えば、上述では主に、第 1 参照信号発生器より出力される第 1 参照信号が RF の場合を例に説明したが、これに限るものではない。第 1 参照信号発生器より出力される第 1 参照信号が、第 2 参照信号発生器より出力される第 2 参照信号より低い周波数であれば、第 1 参照信号は第 2 参照信号より位相雑音が少ない状態とすることができるので、本発明の効果が得られる。所望とする位相雑音の許容程度により、第 1 参照信号より出力される第 1 参照信号の周波数を決定すればよい。

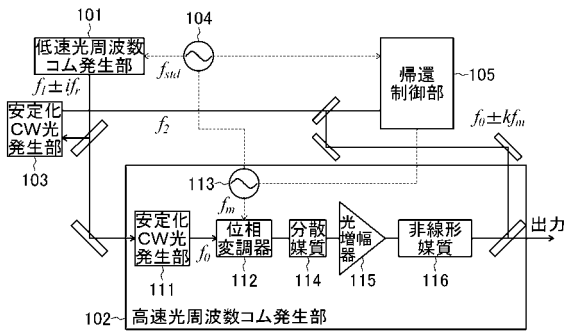
40

【符号の説明】

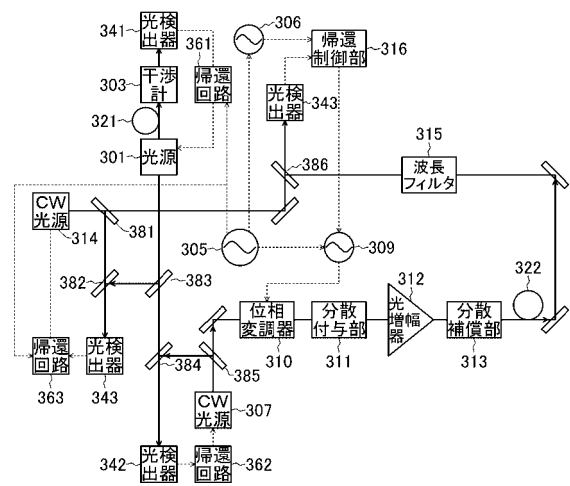
【0086】

101 ... 低速光周波数コム発生部、102 ... 高速光周波数コム発生部、103 ... 安定化 CW 光発生部 (第 3 光源)、104 ... 基準周波数発生器 (第 1 参照信号発生器)、105 ... 帰還制御部 (参照信号帰還制御部)、111 ... 安定化 CW 光発生部 (第 2 光源)、112 ... 位相変調器、113 ... 周波数発生器 (第 2 参照信号発生器)、114 ... 分散媒質、115 ... 光増幅器、116 ... 非線形光学媒質。

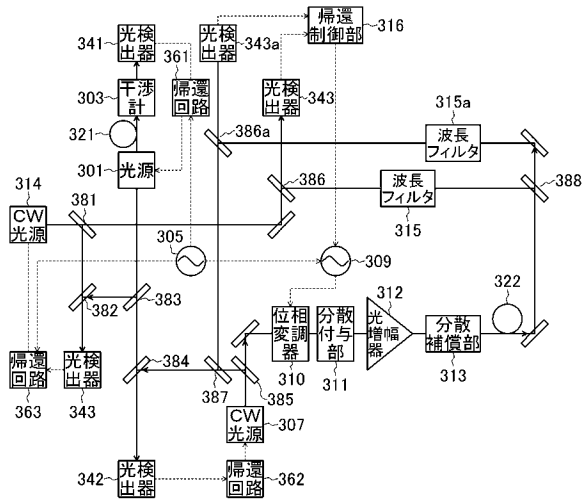
【図1】



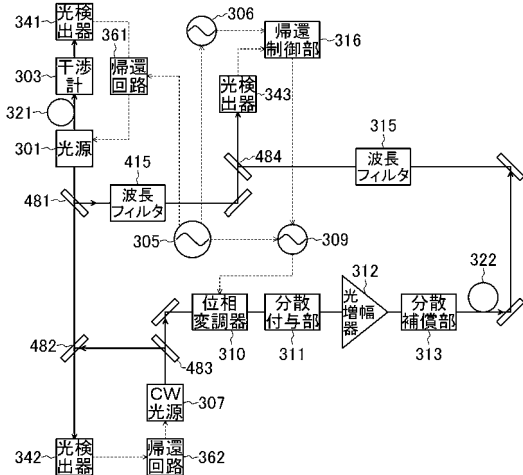
【図3】



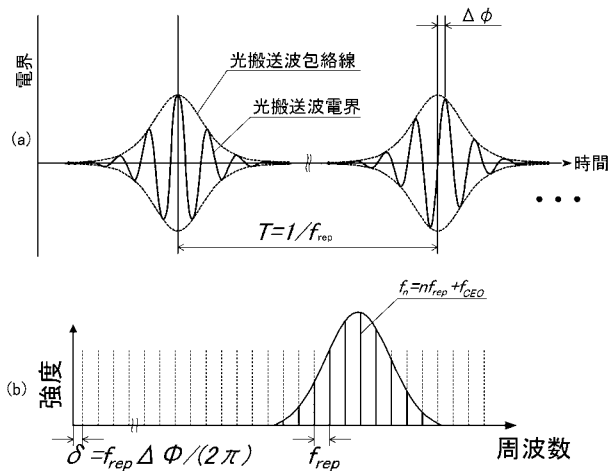
【図5】



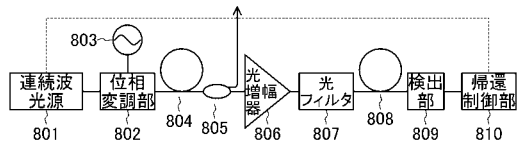
【図6】



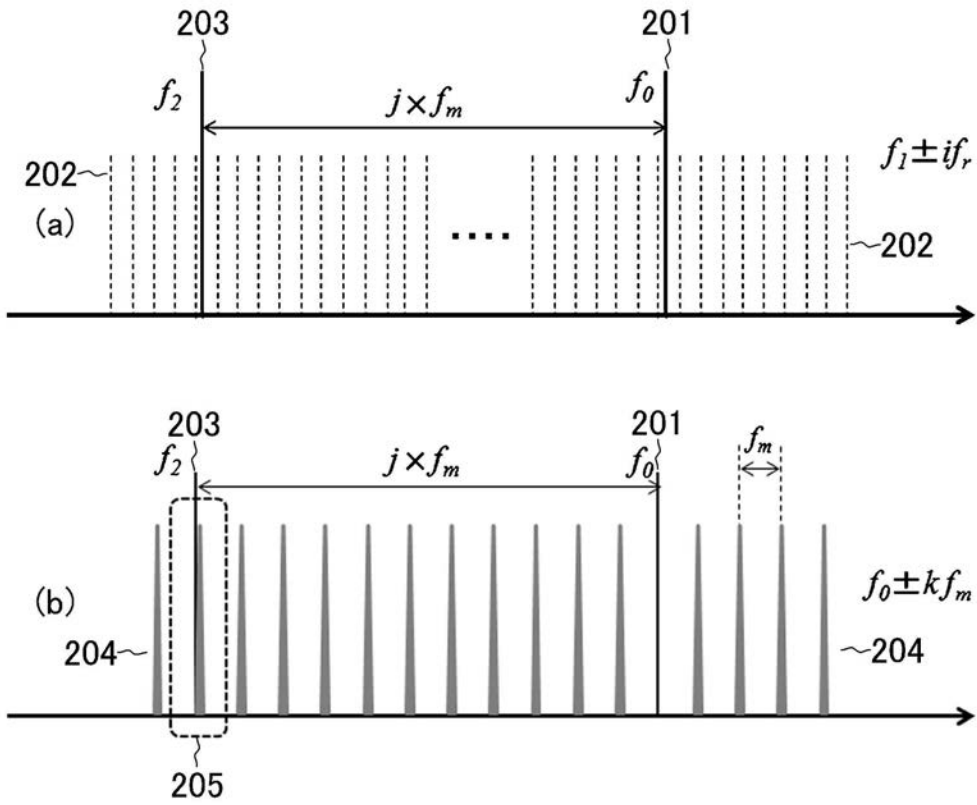
【 図 7 】



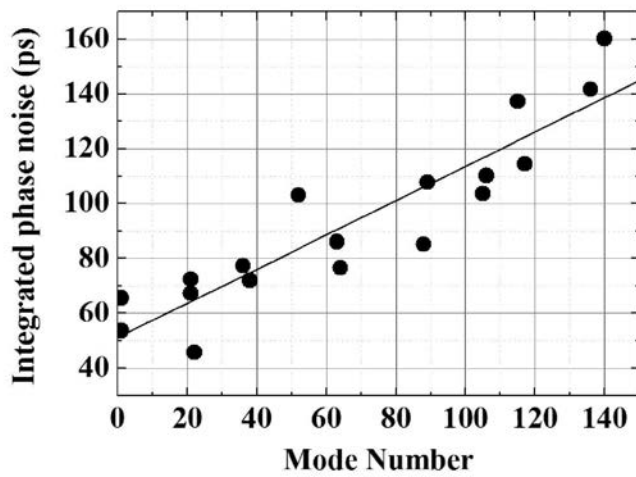
【 図 8 】



【 図 2 】



【 図 4 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2K102 AA05 AA21 BA01 BA19 BB03 BB04 BC02 BC04 BD01 BD04
BD09 CA11 CA18 DA04 DA06 DA09 DC07 EB20 EB22
5F172 NN14 NN27 NP02 NP18 NR02 NR22 NR24 NR28 ZZ04 ZZ11
ZZ12