

(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2017-507344
(P2017-507344A)

(43) 公表日 平成29年3月16日(2017.3.16)

(51) Int.Cl.			F I			テーマコード(参考)		
GO2F	2/02	(2006.01)	GO2F	2/02				2K102
GO2F	1/01	(2006.01)	GO2F	1/01		B		5F172
GO2F	1/365	(2006.01)	GO2F	1/365				
HO1S	3/30	(2006.01)	HO1S	3/30				
HO1S	3/083	(2006.01)	HO1S	3/083				

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 39 頁)

(21) 出願番号 特願2016-536880 (P2016-536880)
 (86) (22) 出願日 平成27年1月26日 (2015.1.26)
 (85) 翻訳文提出日 平成28年8月1日 (2016.8.1)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2015/012964
 (87) 国際公開番号 W02015/160413
 (87) 国際公開日 平成27年10月22日 (2015.10.22)
 (31) 優先権主張番号 61/931,060
 (32) 優先日 平成26年1月24日 (2014.1.24)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)
 (31) 優先権主張番号 61/982,749
 (32) 優先日 平成26年4月22日 (2014.4.22)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 508032284
 カリフォルニア インスティテュート オブ テクノロジー
 アメリカ合衆国, カリフォルニア州 91125, パサデナ, イースト・カリフォルニア・ブールヴァード 1200, エムシー 6-32

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 安定化マイクロ波周波数源

(57) 【要約】

周波数 f_M を有するマイクロ波周波数源は、デュアル光周波数基準源と、電気光学側波帯発生器と、光帯域フィルタと、光学検出器と、基準発振器と、電気回路と、電圧制御発振器 (VCO) とを備える。側波帯発生器は、 ν_2 および ν_1 を有する各デュアル光基準信号を変調して、 $\nu_1 \pm n_1 f_M$ および $\nu_2 \pm n_2 f_M$ を有する各側波帯信号を発生させる。帯域フィルタは $\nu_1 + N_1 f_M$ および $\nu_2 - N_2 f_M$ を有する各側波帯信号を送信する。光学検出器は $(\nu_2 - N_2 f_M) - (\nu_1 + N_1 f_M)$ を有するうなり音を発生させる。うなり音および基準発振器信号は電気回路によって処理され、ループフィルタ処理された誤差信号が発生し VCO に入力される。 f_M を有する VCO の出力は側波帯発生器を駆動するとともにマイクロ波周波数出力信号となる。結果的に生じた分周により、マイクロ波周波数信号における位相ノイズの低減がもたらされる。

【選択図】 図 1

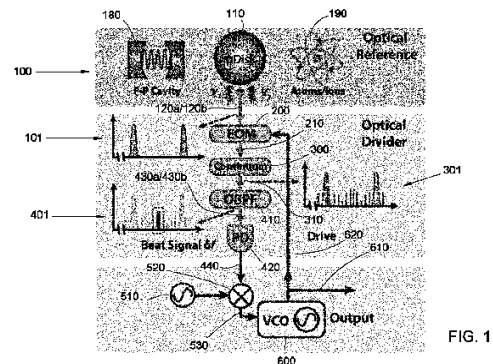


FIG. 1

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

出力周波数 f_M を有する出力電気信号を発生させるためのマイクロ波周波数源であって、該マイクロ波周波数源は、

(a) (i) 第 1 の光基準周波数 ν_1 を有する第 1 の光基準信号と、(ii) 第 2 の光基準周波数 $\nu_2 > \nu_1$ を有する第 2 の光基準信号とを発生するように構成されたデュアル光周波数基準源と、

(b) (i) 前記第 1 および第 2 の光基準信号と前記周波数 f_M を有する側波帯発生器入力電気信号とを受信し、(ii) それら信号から、 $\nu_1 \pm n_1 f_M$ および $\nu_2 \pm n_2 f_M$ (n_1 および n_2 は整数) で表わされる側波帯光周波数をそれぞれ有する多数の側波帯光信号を発生するように構成された電気光学側波帯発生器と、

(c) 周波数 $\nu_1 + N_1 f_M$ を有する側波帯光信号および周波数 $\nu_2 - N_2 f_M$ を有する側波帯光信号 (N_1 および N_2 は整数) を含む前記多数の側波帯光信号のサブセットを送信するように構成された光帯域フィルタと、

(d) (i) 前記送信された側波帯光信号を受信し、(ii) うなり周波数 $f_{BEAT} = (\nu_2 - N_2 f_M) - (\nu_1 + N_1 f_M)$ を有する光学検出器電気信号を発生するように構成された光学検出器と、

(e) 基準発振器周波数 f_R を有する基準発振器電気信号を発生するように構成された基準発振器と、

(f) 電気回路であって、(i) 前記光学検出器電気信号および前記基準発振器電気信号を受信し、(ii) それら信号から、前記電気回路の比較器部分を用いて、前記光学検出器電気信号と前記基準発振器電気信号の相対位相に依存する電気誤差信号を発生させ、(iii) 前記電気回路のループフィルタ部を用いて前記電気誤差信号を処理するように構成された前記電気回路と、

(g) (i) 前記ループフィルタ部で処理された電気誤差信号を VCO 入力電気信号として受信し、(ii) 前記周波数 f_M を有する VCO 出力電気信号を発生するように構成された電圧制御電気発振器であって、前記 VCO 出力電気信号の第 1 の部分は、前記側波帯発生器入力電気信号として前記電気光学側波帯発生器に受信され、前記 VCO 出力電気信号の第 2 の部分は、前記マイクロ波周波数源の前記出力電気信号となる、前記電圧制御電気発振器と、を備え、

(h) 前記電気光学側波帯発生器が前記 VCO 出力電気信号の前記第 1 の部分を前記側波帯発生器入力電気信号として受信した結果、前記電気回路と前記電圧制御発振器は、位相ロックループとして機能するように負フィードバック構成において接続する、マイクロ波周波数源。

【請求項 2】

前記マイクロ波周波数源の前記出力電気信号の位相ノイズは、前記デュアル光周波数基準源の、基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ を有する基準差周波数信号の位相ノイズと比べて、約 $(N_1 + N_2)^2$ 分の 1 である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 3】

前記出力周波数 f_M は約 0.3 GHz ~ 約 300 GHz である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 4】

前記出力周波数 f_M は約 1 GHz ~ 約 100 GHz である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 5】

前記基準発振器周波数および前記うなり周波数は、約 1 MHz ~ 約 500 MHz である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 6】

前記基準発振器周波数および前記うなり周波数は、約 5 MHz ~ 約 100 MHz である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

10

20

30

40

50

- 【請求項 7】
前記基準発振器周波数および前記うなり周波数は、約 10 MHz ~ 約 50 MHz である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 8】
前記基準発振器は水晶発振器を含む、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 9】
前記基準発振器は電気発振器を含む、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 10】
基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 100 GHz よりも大きい、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。 10
- 【請求項 11】
基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 1 THz よりも大きい、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 12】
基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 10 THz よりも大きい、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 13】
基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 100 THz よりも大きい、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 14】 20
N₁ + N₂ が 10 以上である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 15】
N₁ + N₂ が 50 以上である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 16】
N₁ + N₂ が 100 以上である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 17】
N₁ + N₂ が 1000 以上である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 18】
前記第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 は、それぞれ、約 75 THz ~ 約 750 THz である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。 30
- 【請求項 19】
前記第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 は、それぞれ、約 120 THz ~ 約 430 THz である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 20】
前記第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 は、それぞれ、約 150 THz ~ 約 300 THz である、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 21】 40
前記デュアル光周波数基準源は、(i) 基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ の変動を動作的に許容できる光基準帯域幅内に維持するか、または (ii) 基準差周波数信号の位相ノイズを動作的に許容できる基準位相ノイズレベル内に維持するように安定化される、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 22】
前記動作的に許容できる基準帯域幅は、約 1 秒の時間尺に対して約 100 Hz 未満である、請求項 21 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 23】
前記動作的に許容できる基準帯域幅は、約 1 秒の時間尺に対して約 1 Hz 未満である、請求項 21 に記載のマイクロ波周波数源。
- 【請求項 24】 50
前記動作的に許容できる基準位相ノイズレベルは、オフセット周波数 100 Hz では約 -40 dBc / Hz であり、オフセット周波数 10 kHz では約 -80 dBc / Hz であ

る、請求項 2 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 2 5】

前記動作的に許容できる基準位相ノイズレベルは、オフセット周波数 1 0 0 H z では約 - 8 0 d B c / H z であり、オフセット周波数 1 0 k H z では約 - 1 2 5 d B c / H z である、請求項 2 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 2 6】

(i) 前記デュアル光周波数基準源は第 1 および第 2 のポンプレーザ源と光共振器とを備え、(i i) 前記光共振器の自由スペクトル領域が、前記光共振器のブリルアンシフト周波数の整数分の 1 と実質的に等しく、(i i i) 前記第 1 および第 2 のポンプレーザ源のそれぞれは、前記光共振器の対応する共振光モードに周波数ロックされ、(i v) 前記第 1 および第 2 の光基準信号は、それぞれ、前記第 1 および第 2 のポンプレーザ源が前記光共振器を同時に光ポンピングすることによって発生した誘導ブリルアンレーザ出力を含む、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

10

【請求項 2 7】

前記光共振器の前記自由スペクトル領域は、前記光共振器の前記ブリルアンシフト周波数と実質的に等しい、請求項 2 6 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 2 8】

前記光共振器はシリカを含み、前記光共振器のブリルアンシフト周波数は約 1 0 . 9 G H z である、請求項 2 6 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 2 9】

前記光共振器はリング光共振器を含む、請求項 2 6 に記載のマイクロ波周波数源。

20

【請求項 3 0】

前記リング光共振器はディスク光共振器を含む、請求項 2 9 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 3 1】

前記光共振器は光ファイバ共振器を含む、請求項 2 6 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 3 2】

前記光共振器はファブリ・ペロー光ファイバ共振器を含む、請求項 3 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 3 3】

前記光ファイバ共振器はファイバループ光共振器を含む、請求項 3 1 に記載のマイクロ波周波数源。

30

【請求項 3 4】

前記第 1 および第 2 のポンプレーザ源のそれぞれは、P o u n d D r e v e r H a l l 法によって前記光共振器の前記対応する共振光モードに周波数ロックされる、請求項 2 6 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 3 5】

前記デュアル光周波数基準源はデュアルモード・レーザ源を備えている、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 3 6】

前記デュアル光周波数基準源は第 1 および第 2 の基準レーザ源を備え、該第 1 および第 2 のレーザ源は、それぞれ、共通光基準キャピティの対応する別個の共振光モードに周波数ロックされている、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

40

【請求項 3 7】

前記デュアル光周波数基準源は第 1 および第 2 の基準レーザ源を備え、該第 1 および第 2 のレーザ源は、それぞれ、対応する別個の原子遷移に周波数ロックされている、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 3 8】

(i) 前記電気光学側波帯発生器は、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によってそれぞれ駆動される 1 つまたは複数の電気光学位相変調器

50

を備え、(i i) 前記 1 つまたは複数の位相変調器は、前記多数の光側波帯信号を発生するように前記第 1 及び第 2 の光基準信号を送信するよう構成されている、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 39】

(i) 前記電気光学側波帯発生器は、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によってそれぞれ駆動される 2 つ以上の電気光学位相変調器を備え、(i i) 前記 2 つ以上の位相変調器は、前記多数の光幅波帯信号を発生するように前記第 1 および第 2 の光基準信号を連続的に送信するよう直列に配置されている、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 40】

複数対の側波帯光信号が、2 から少なくとも 30 までの範囲の $n_1 + n_2$ で発生する、請求項 39 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 41】

複数対の側波帯光信号が、2 から少なくとも 100 までの範囲の $n_1 + n_2$ で発生する、請求項 39 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 42】

(i) 前記電気光学側波帯発生器は、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によってそれぞれ駆動される 1 つまたは複数の電気光学位相変調器と、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によって駆動される強度変調器と、分散補償器と、光増幅器と、非線形光媒質とをさらに備え、(i i) 前記 1 つまたは複数の位相変調器、前記強度変調器、前記分散補償器、前記光増幅器、および前記非線形光媒質は、前記多数の光側波帯信号を発生するように前記第 1 及び第 2 の光基準信号を連続的に送信するよう順番に直列に配置されている、請求項 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 43】

複数対の側波帯光信号が、2 から少なくとも 100 までの範囲の $n_1 + n_2$ で発生する、請求項 42 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 44】

複数対の側波帯光信号が、2 から少なくとも 10000 までの範囲の $n_1 + n_2$ で発生する、請求項 42 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 45】

(i) 前記強度変調器は電気光学マッハ・ツェンダ変調器を含み、(i i) 前記分散補償器は適切な分散性を有する光ファイバを含み、(i i i) 前記光増幅器はドープ処理された光ファイバ増幅器を含み、(i v) 前記非線形光媒質は非線形光ファイバを含む、請求項 42 に記載のマイクロ波周波数源。

【請求項 46】

請求項 1 ~ 45 のいずれか一項に記載のマイクロ波周波数源を用いて、出力周波数 f_M を有するマイクロ波周波数出力電気信号を発生させる方法であって、該方法は、

(a) 前記デュアル光周波数基準源を用いて、(i) 前記第 1 の光基準周波数 ν_1 を有する前記第 1 の光基準信号と、(i i) 前記第 2 の光基準周波数 $\nu_2 > \nu_1$ を有する前記第 2 の光基準信号とを発生させることと、

(b) 前記電気光学側波帯発生器を用いて、(i) 前記第 1 および第 2 の光基準信号と、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号とを受信し、(i i) それら信号から、 $\nu_1 \pm n_1 f_M$ および $\nu_2 \pm n_2 f_M$ (n_1 および n_2 は整数) で表わされる側波帯光周波数をそれぞれ有する多数の側波帯光信号を発生させることと、

(c) 前記光帯域フィルタを用いて、前記周波数 $\nu_1 + N_1 f_M$ を有する側波帯光信号および前記周波数 $\nu_2 - N_2 f_M$ を有する側波帯光信号 (N_1 および N_2 は整数) を含む前記多数の側波帯光信号の前記サブセットを送信することと、

(d) 前記光学検出器を用いて、(i) 前記送信された側波帯光信号を受信し、(i i) 前記うなり周波数 $f_{\text{BEAT}} = (\nu_2 - N_2 f_M) - (\nu_1 + N_1 f_M)$ を有する前記

10

20

30

40

50

光学検出器電気信号を発生させることと、

(e) 前記基準発振器を用いて、前記基準発振器周波数 f_R を有する前記基準発振器電気信号を発生させることと、

(f) 前記電気回路を用いて、(i) 前記光学検出器電気信号および前記基準発振器電気信号を受信し、(i i) 前記電気回路の前記比較器部分を用いて、前記光学検出器電気信号および前記基準発振器電気信号から、前記光学検出器電気信号と前記基準発振器電気信号の相対位相に依存する前記電気誤差信号を発生させ、(i i i) 前記電気回路の前記ループフィルタ部を用いて、前記電気誤差信号を処理することと、

(g) 前記電圧制御電気発振器を用いて、(i) 前記ループフィルタ部で処理された電気誤差信号を前記 V C O 入力電気信号として受信し、(i i) 前記周波数 f_M を有する前記 V C O 出力電気信号を発生させることとであって、前記 V C O 出力電気信号の前記第 1 の部分は、前記側波帯発生器入力電気信号として前記電気光学側波帯発生器に受信され、前記 V C O 出力電気信号の前記第 2 の部分は、前記マイクロ波周波数出力電気信号となる、前記 V C O 出力電気信号を発生させることとを含み、

(h) 前記電気光学側波帯発生器が前記 V C O 出力電気信号の前記第 1 の部分を前記側波帯発生器入力電気信号として受信した結果、前記電気回路と前記電圧制御発振器は、位相ロックループとして機能するように負フィードバック構成において接続する、マイクロ波周波数出力電気信号を発生させる方法。

【発明の詳細な説明】

【関連出願の相互参照】

【0001】

本出願は、(i) Kerry Vahala 氏、Scott Diddams 氏、Jiang Li 氏、Xu Yi 氏、Hansuek Lee 氏らにより 2014 年 1 月 24 日に出願された「Cascaded Optical Divider and Microwave Synthesizer (カスケード接続光分周器およびマイクロ波合成器)」と題される米国仮特許出願番号第 61/931060 号と、(i i) Jiang Li 氏、Kerry Vahala 氏らにより 2014 年 4 月 22 日に出願された「Dual SBS Lasers as Frequency References for Stable Microwave Generation by Optical Frequency Division (光分周によって安定マイクロ波を発生させるための周波数基準としてのデュアル S B S レーザ)」と題される米国仮特許出願番号第 61/982749 号とに基づいて優先権を主張するものである。上記両仮特許出願の内容のすべてを参照により本明細書に援用する。本出願は 2015 年 1 月 26 日 (月曜日) に出願された。

(連邦政府後援下の研究についての陳述)

【0002】

米国空軍により認可された第 F A 9 5 5 0 1 0 1 0 2 8 4 号及び米国防高等研究計画局により認可された第 W 3 1 P 4 Q 1 4 1 0 0 0 1 号の下に米国政府援助を受けて本発明はなされた。米国政府は本発明に関して一定の権利を有する。

【技術分野】

【0003】

本発明の技術分野は、マイクロ波周波数電気信号を発生させることと、デュアル光周波数源および光分周を利用したマイクロ波周波数源とに関する。特に、デュアル光周波数基準源と比べて低位相ノイズを示すマイクロ波周波数電気信号を発生させるための装置および方法を本明細書に記載する。

【背景技術】

【0004】

本明細書において開示または特許請求される主題は、以下の非特許文献に開示された主題と関連しうる。以下に挙げる各非特許文献の内容のすべてを参照により本明細書に援用する。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

10

20

30

40

50

- 【非特許文献 1】L. Goldberg, H. F. Taylor, J. F. Weller, and D. M. Bloom, "Microwave signal generation with injection locked laser diodes," *Electron. Lett.* 19, 491-493 (1983)
- 【非特許文献 2】Pillet, G., Morvan, L., Brunel, M., Bretenaker, F., Dolfi, D., Vallet, M., Huignard, J.-P., and Le Floch, A., "Dual frequency laser at 1.5 mm for optical distribution and generation of high-purity microwave signals," *J. Lightwave Technol.* 26, 2764-2773 (2008)
- 【非特許文献 3】Schneider, G. J., Murakowski, J. A., Schuetz, C. A., Shi, S., and Prather, D. W., "Radio frequency signal-generation system with over seven octaves of continuous tuning," *Nat. Photon.* 7, 118-122 (2013) 10
- 【非特許文献 4】Li, J., Lee, H., and Vahala, K.J., "Microwave synthesizer using an on-chip Brillouin oscillator," *Nat. Commun.* 4, 2097 (2013)
- 【非特許文献 5】Fortier, T., et al., "Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division," *Nat. Photon.* 5, 425-429 (2011)
- 【非特許文献 6】H. Murata, A. Morimoto, T. Kobayashi, and S. Yamamoto, "Optical Pulse Generation by Electrooptic-Modulation Method and Its Application to Integrated Ultrashort Pulse Generators (「電気光学変調法による光パルス発生および集積超短パルス発生器への応用」)," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 6, 1325 (2000) 20
- 【非特許文献 7】M. Fujiwara, J. Kani, H. Suzuki, K. Araya, M. Teshima, "Flattened optical multicarrier generation of 12.5 GHz spaced 256 channels based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation (「正弦振幅および位相のハイブリッド変調に基づく12.5GHz間隔256チャンネルの平坦化光マルチキャリアの生成」)," *IEEE Electron. Lett.* 37, 967-968 (2001)
- 【非特許文献 8】A. J. Metcalf, V. Torres-Company, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, "High-power broadly tunable electro-optic frequency comb generator," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 19, 3500306 (2013)
- 【非特許文献 9】A. Rolland, G. Loas, M. Brunel, L. Frein, M. Vallet, and M. Alouini, "Non-linear optoelectronic phase-locked loop for stabilization of opto-millimeter waves: towards a narrow linewidth tunable THz source," *Opt. Express* 19, 17944-17950 (2011) 30
- 【非特許文献 10】William C. Swann, Esther Baumann, Fabrizio R. Giorgetta, and Nathan R. Newbury, "Microwave generation with low residual phase noise from a femtosecond fiber laser with an intracavity electro-optic modulator," *Opt. Express* 19, 24387-24395 (2011)
- 【非特許文献 11】Papp, S. B., Beha, K., DelHaye, P., Quinlan, F., Lee, H., Vahala, K. J., Diddams, S. A., "A microresonator frequency comb optical clock," *arXiv:1309.3525* (2013)
- 【非特許文献 12】C. B. Huang, S. G. Park, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, "Nonlinearly broadened phase-modulated continuous-wave laser frequency combs characterized using DPSK decoding," *Opt. Express* 16, 2520-2527 (2008) 40
- 【非特許文献 13】I. Morohashi, T. Sakamoto, H. Sotobayashi, T. Kawanishi, and I. Hosako, "Broadband wavelength-tunable ultrashort pulse source using a Mach-Zehnder modulator and dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber," *Opt. Lett.* 34, 2297-2299 (2009)
- 【非特許文献 14】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," *Opt. Express* 21, 29186-29194 (2013)
- 【非特許文献 15】S. Suzuki, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, Y. Okuyama, T. Kotani, J. 50

- Nishikawa, H. Suto, M. Tamura, and T. Kurokawa, "12.5 GHz Near-IR Frequency Comb Generation Using Optical Pulse Synthesizer for Extra-Solar Planet Finder," in Nonlinear Optics, OSA Technical Digest: Nonlinear Optics Conference (Optical Society of America, 2013), paper NM3A.3
- 【非特許文献 1 6】Young, B., Cruz, F., Itano, W., and Bergquist, J., "Visible Lasers with Subhertz Linewidths," *Phys. Rev. Lett.* 82, 3799-3802 (1999)
- 【非特許文献 1 7】T. Kessler, C. Hagemann, C. Grebing, T. Legero, U. Sterr, F. Riehle, M. J. Martin, L. Chen, and J. Ye., "A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity," *Nat. Photon.* 6, 687-692 (2012)
- 【非特許文献 1 8】Lee, H., Chen, T., Li, J., Yang, K. Y., Jeon, S., Painter, O., and Vahala, K. J., "Chemically etched ultrahigh-Q wedge resonator on a silicon chip," *Nat. Photon.* 6, 369-373 (2012)
- 【非特許文献 1 9】Li, J., Lee, H., Chen, T., and Vahala, K. J., "Characterization of a high coherence, Brillouin microcavity laser on silicon," *Opt. Express* 20, 20170-20180 (2012)
- 【非特許文献 2 0】J. Li, H. Lee, K. Y. Yang, and K. J. Vahala, "Sideband spectroscopy and dispersion measurement in microcavities," *Opt. Exp.* 20, 26337-26344 (2012)
- 【非特許文献 2 1】Drever, R., Hall, J. L., Kowalski, F., Hough, J., Ford, G., Munley, A., and Ward, H., "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," *Appl. Phys. B* 31, 97-105 (1983)
- 【非特許文献 2 2】Gross, M. C., Callahan, P. T., Clark, T. R., Novak, D., Waterhouse, R. B., and Dennis, M. L., "Tunable millimeter-wave frequency synthesis up to 100 GHz by dual-wavelength Brillouin fiber laser," *Opt. Express* 18, 13321-13330 (2010)
- 【非特許文献 2 3】Callahan, P. T., Gross, M. C., and Dennis, M. L., "Frequency-independent phase noise in a dual-wavelength Brillouin fiber laser," *IEEE J. Quantum Electron.* 47, 1142-1150 (2011)
- 【非特許文献 2 4】T. Sakamoto, T. Kawanishi, and M. Izutsu, "Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator," *Opt. Lett.* 32, 1515-1517 (2007)
- 【非特許文献 2 5】Dudley, J. M., Genty, G., Coen, Stephane, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," *Rev. Mod. Phys.* 78, 1135-1184 (2006)
- 【非特許文献 2 6】Li, J., Yi, X., Lee, H., Diddams, S., and Vahala, K., "Electro-optical frequency division and stable microwave synthesis," *Science* 345, 309-313
- 【非特許文献 2 7】Geng, J., Staines, S., and Jiang, S., "Dual-frequency Brillouin fiber laser for optical generation of tunable low-noise radio frequency/microwave frequency," *Opt. Lett.* 33, 16-18 (2008)
- 【非特許文献 2 8】Pan, S., and Yao, J., "A wavelength-switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for switchable microwave generation," *Opt. Express* 17, 5414-5419 (2009)
- 【非特許文献 2 9】Taylor, J., Datta, S., Hati, A., Nelson, C., Quinlan, F., Joshi, A., and Diddams, S., "Characterization of Power-to-Phase Conversion in High-Speed P-I-N Photodiodes," *IEEE Photonics Journal* 3, 140 (2011)
- 【非特許文献 3 0】A. J. Seeds, K. J. Williams, J., *Lightwave Technol.* 24, 4628-4641 (2006)
- 【非特許文献 3 1】J. Yao, *Lightwave Technol.* 27, 314-335 (2009)
- 【非特許文献 3 2】G. Carpintero et al., *Opt. Lett.* 37, 3657-3659 (2012)
- 【非特許文献 3 3】U. L. Rohde, *Microwave and Wireless Synthesizers: Theory and D*

esign (Wiley, New York, 1997)

【非特許文献 3 4】E. N. Ivanov, S. A. Diddams, L. Hollberg, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 52, 1068-1074 (2005)

【非特許文献 3 5】J. Li, H. Lee, K. J. Vahala, Opt. Lett. 39, 287-290 (2014)

【発明の概要】

【0006】

出力周波数 f_M を有する出力電気信号を発生させるためのマイクロ波周波数源は、デュアル光周波数基準源と、電気光学側波帯発生器と、光帯域フィルタと、光学検出器と、基準発振器と、電気回路と、電圧制御電気発振器とを備える。デュアル光周波数基準源は、(i) 第1の光基準周波数 ν_1 を有する第1の光基準信号と、(ii) 第2の光基準周波数 $\nu_2 > \nu_1$ を有する第2の光基準信号とを発生するように構成されている。電気光学側波帯発生器は、(i) 第1および第2の光基準信号と周波数 f_M を有する側波帯発生器入力電気信号とを受信し、(ii) それら信号から、 $\nu_1 \pm n_1 f_M$ および $\nu_2 \pm n_2 f_M$ (n_1 および n_2 は整数) で表される側波帯光周波数をそれぞれ有する多数の側波帯光信号を発生するように構成されている。光帯域フィルタは、周波数 $\nu_1 + N_1 f_M$ を有する側波帯光信号および周波数 $\nu_2 - N_2 f_M$ を有する側波帯光信号 (N_1 および N_2 は整数) を含む多数の側波帯光信号のサブセットを送信するように構成されている。光学検出器は、(i) 送信された側波帯光信号を受信し、(ii) うなり周波数 $f_{BEAT} = (\nu_2 - N_2 f_M) - (\nu_1 + N_1 f_M)$ を有する光学検出器電気信号を発生するように構成されている。基準発振器は、基準発振器周波数 f_R を有する基準発振器電気信号を発生するように構成されている。電気回路は、(i) 光学検出器電気信号および基準発振器電気信号を受信し、(ii) それら信号から、電気回路の比較器部分を用いて、光学検出器電気信号と基準発振器電気信号の相対位相に依存する電気誤差信号を発生させ、(iii) 電気回路のループフィルタ部を用いて電気誤差信号を処理するように構成されている。電圧制御電気発振器は、(i) ループフィルタ部で処理された電気誤差信号をVCO入力電気信号として受信し、(ii) 周波数 f_M を有するVCO出力電気信号を発生するように構成されている。VCO出力電気信号の第1の部分は、側波帯発生器入力電気信号として電気光学側波帯発生器に受信され、VCO出力電気信号の第2の部分は、マイクロ波周波数源の出力電気信号となる。電気光学側波帯発生器がVCO出力電気信号の第1の部分を側波帯発生器入力電気信号として受信した結果、電気回路と電圧制御発振器は、位相ロックループとして機能するように負フィードバック構成において接続する。

【0007】

マイクロ波周波数源を用いて、出力周波数 f_M を有するマイクロ波周波数出力電気信号を発生させる方法は、(a) 第1および第2の光基準信号発生させることと、(b) 多数の側波帯光信号を発生させることと、(c) 周波数 $\nu_1 + N_1 f_M$ を有する側波帯光信号および周波数 $\nu_2 - N_2 f_M$ を有する側波帯光信号を含む多数の側波帯光信号のサブセットを送信することと、(d) うなり周波数 $f_{BEAT} = (\nu_2 - N_2 f_M) - (\nu_1 + N_1 f_M)$ を有する光学検出器電気信号を発生させることと、(e) 基準発振器電気信号を発生させることと、(f) ループフィルタ部で処理された電気誤差信号を発生させることと、(g) 周波数 f_M を有するVCO出力電気信号を発生させることとを含む。

【0008】

マイクロ波周波数源ならびにデュアル周波数光源、およびそれらの使用方法に関する目的および効果は、図面に示され、かつ以下の明細書または添付の特許請求の範囲に開示される実施形態の例を参照することにより明らかとなりうる。

【0009】

この「発明の概要」では、以下の「発明を実施するための形態」で詳細に説明する各概念から選択したものを単純化して記載した。上記「発明の概要」は、特許請求する主題の鍵となる特徴または必須の特徴を特定することを意図していないだけでなく、特許請求する主題の範囲を画定するための手がかりとして用いられることも意図していない。

【図面の簡単な説明】

10

20

30

40

50

【 0 0 1 0 】

【図 1】本発明に係るマイクロ波周波数源の模式図である。

【図 2】位相ロック・ループ構成において電圧制御発振器に接続された、本発明に係る電気光学分周器の模式図である。

【図 3】多数の側波帯光信号を含む模擬光スペクトルを示す図である。

【図 4】本発明に係る光分周器と従来の電気分周器とを比較した図である。

【図 5】本発明に係るマイクロ波周波数源の測定スペクトルとノイズのグラフである。

【図 6】本発明に係るマイクロ波周波数源の測定スペクトルのグラフである。

【図 7】本発明に係るデュアル周波数光源の模式図である。

【図 8】本発明に係る別のデュアル周波数光源の模式図である。

10

【図 9】本発明に係るデュアル周波数光源の測定スペクトルのグラフである。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 1 】

添付図面の実施形態は模式的にのみ示したものである。すなわち、すべての特徴を完全に詳細に示し、かつ適正な割合で示しているとは限らない。理解しやすいように他の要素と比べて誇張して描いた特徴や構造も存在しうる。よって添付図面は原寸に比例していると思なされるべきではない。図示した実施形態は例示に過ぎない。すなわち、それらは本開示の範囲または添付の特許請求の範囲を限定すると解釈されるべきではない。

【 0 0 1 2 】

マイクロ波周波数発振器および無線周波数発振器は、通信、遠隔探査、航行、レーダ、科学的測定、コンピュータ、時計、時間標準などさまざまな分野で広く用いられている。それら発振器は、しばしば制御可能に同調させることができる単一の電気周波数を供給する。それらの性能は、パワー出力、周波数同調範囲、周波数安定性を含むさまざまな測定基準を用いて特徴付けられる。最後に挙げた測定基準である周波数安定性はほとんどの用途において極めて重要であり、発振器の価格はその発振器により得られる周波数安定性レベルと直接関連している。性能が非常によい発振器は、典型的には、高安定周波数を生成するために高Q誘導体共振器を用いる電気発振器に基づくものであった。安定した無線周波数信号またはマイクロ波周波数信号を発生させるためのもう1つの周知手法として、2つの高コヒーレントなレーザ信号を光検出することが挙げられる。光学検出器（すなわち光検出器）に共入射するとともにその光学検出器の検出周波数帯域幅範囲に収まる周波数差を有する2つの光信号は、それら光信号の光差周波数を有する電気出力信号を光学検出器から生成する。これは「うなり音」または「うなり周波数」とも称される。ここ数年間で開発された新たな手法では、周波数コム光分周器（単に「光分周器」とも称される）として知られるデバイスを用いてマイクロ波を合成する革新的な全光学的手法が用いられている。光分周器は、数百テラヘルツで発振する高コヒーレントな光信号を入力として受信する。通常、これは光基準キャビティによって安定化されたレーザ信号である。この非常に高い入力周波数は、光分周器を用いて無線周波数範囲またはマイクロ波周波数範囲（数百メガヘルツまたは数百ギガヘルツ）の速度まで分周される。この分周工程により、最終信号における位相ノイズは当初の光信号と比べて大幅に低減することになり、顕著（かつ記録的）な安定性を示す無線/マイクロ波信号がこのようにして得られる。この低減を達成するため、周波数コム光分周器では特別モードにロックされたレーザを使用する。

20

30

40

【 0 0 1 3 】

本明細書では、周波数制御入力可能な電気発振器（電圧制御発振器またはVCO (voltage-controlled oscillator) とたびたび称される）により供給されるマイクロ波周波数信号の光分周および安定動作を達成するための新規かつ進歩性のある装置および方法を開示する。この新規手法は、本方法の実現可能性を証明する予備的測定値とともに本明細書に記載される。本発明に係る手法では、レーザが供給する2つの基準光信号の周波数は安定化し、したがって、このレーザ同士の相対周波数（すなわちレーザ同士の差周波数）は可能な限り安定している（または所与の使用または用途に必要な性能を達成するのに実施可能な限り安定している、すなわち動作的に許容できる基準帯域幅において比較的安定

50

している)。次いで、これらレーザ信号は、VCOにより駆動されるカスケード接続された複数の位相変調器により位相変調される。光スペクトルでは、これによって、当初の各レーザ周波数に基づいて、変調周波数により離間される側波帯スペクトルが作り出される。強度変調器、分散補償器、(必要に応じてまたは所望する場合)光増幅器、および非線形光媒質を用いると、位相変調された光信号のスペクトルを広げることのできるため、側波帯周波数スペクトルにおける側波数をさらに増加させることができる。実施可能な最大限の安定性をVCOに与えるには、レーザ同士の周波数分離を(所与の使用または用途に対して)実施可能な限り大きくすることが望ましい。しかしながら、周波数分離はカスケード接続された位相変調器(および行った場合は非線形光幅広化)によって生成される側波帯の範囲を超えることはできない。最も内側にある2つの側波帯(図3参照)の周波数は、それら側波帯間のうなり周波数がフォトダイオードを用いて検出できるくらい十分接近していなくてはならない。以下でさらに説明するが、フォトダイオード信号はVCOから生じる位相情報を含み、VCOを安定化させるために用いられる。本発明に係る方法により、オフセット周波数10kHzおよび100kHzを有する高性能電気発振器よりも遥かに低い位相ノイズレベルを示す高安定マイクロ波周波数信号を発生させることが既に可能となっている。本発明に係る方法の成果は、2つの基準光信号の周波数分離をさらに大きくすることで実質的に向上させることができる。本明細書に開示する例では、これら基準光信号は、単一の高Qディスク共振器をデュアルポンピングして、2つの別個の波長を有する誘導ブリルアン振動が生成することにより供給される。以下でさらに検討するが、周波数分離は、別々のレーザ線と同じキャビティ内で効率的にポンプさせる能力によって制限される。その他のデュアル光周波数基準源を用いることもできる。例として、単一の基準共振器キャビティの別々のモードに周波数ロックされた2つのレーザを含む基準源が挙げられる。

10

20

30

40

50

【0014】

本明細書に開示する本発明に係る方法は、従来の周波数コム光分周器と同程度の記録的な周波数安定性を未だ達成してはいない。しかしながら、上記したパルス幅広化方法における進歩により、既に確認されているものを越える性能向上がもたらされるはずである。位相ノイズは分周比の2乗分だけ低減し、差周波数が大きいほど分周比も大きくなるからである。また現在の性能制限を埋め合わせることができれば、本発明に係る手法では高性能かつ高価なデバイスであるモードロック周波数コム発生器を用いる必要がなくなる。代わりに、本発明に係る方法では、そのほとんどが市販されている比較的単純かつ安価な光学素子が用いられる。また多くの例において、基準周波数(すなわち2つの光源の差周波数)は、単一共振器内の2つの共振の相対安定性に依存する。これは原則的にはより強固な基準となる。システムにおける技術的ノイズ(すなわち、システムの物理的性質に固有の量子ノイズではなく、装置における不安定性から生じるノイズ)は両共振に共通しており、したがって差周波数ではその大半は打ち消されるからである。一方、従来の分周器を用いた手法は絶対基準周波数に依存し、これは技術的ノイズからの影響をより強く受けるものである。本明細書に開示する本発明に係る光分周器の動作原則は、繰り返し周波数(すなわち側波帯間隔)が、光キャビティとは違い、電気VCOにより設定されることにおいても異なる。結果的には出力信号のマイクロ波周波数を同調させることが可能になる。これは従来の周波数コム光分周器では容易に達成できないことである。また従来の周波数コム分周器を用いた手法は、高帯域幅を有する一連の高ピーク電力パルスの光検出に依存するものである。この手法を用いた場合、光検出工程の線形性が周波数安定性を達成するのにきわめて重要であることが確認されており、よって、用いる光学検出器の種類は大幅に制限される。一方、本発明では、より低帯域幅の光学検出器、または線形性要求がより緩和された検出器を用いることができる。

【0015】

高性能マイクロ波周波数信号を発生させるための光分周を達成する本明細書で開示する本発明に係る装置および方法では、直接位相変調とさらには(直接位相変調のみを用いて達成できる分周比よりも大きい分周比を達成することが必要な場合または望まれる場合)

自己位相変調も含むカスケード式の位相変調が用いられる。モードロック・レーザにより生成されるスペクトル線のコムとは対照的に、光キャビティがないため、カスケード接続された位相変調器には固有の繰り返し周波数がない。これによりカスケード発生させた側波帯コムには任意で選ばれる線間隔周波数を与えることができるが、これは、従来の周波数コムで行われるやり方とは異なるやり方で光分周が達成されなければならないことも意味している。

【0016】

図1～図3に本発明に係る手法を示す。この手法では、十分に良好な（すなわち動作的に許容できる）相対周波数安定性を有する2つのレーザ線により、マイクロ波周波数源用の2つの光基準信号120a/120b（スペクトル101により特徴付けられる）が供給される。図1はシステムの高レベルブロック図、図2は該システムの所定要素のさらなる詳細図、図3は本発明に係る手法に関連する光信号の周波数スペクトルの模式図である。いくつかの例では（以下に記載）、2つのレーザ線120a/120bは、2つの対応する独立ポンプレーザ130a/130b（後に説明する図7、8を参照）によりポンプされる単一の高Qマイクロキャビティ110またはファイバループ・キャビティ110'（FLC：fiber-loop cavity）での同時ブリルアン振動により生成される。あるいは、2つのレーザを単一かつ共通の基準キャビティ180の別個の各光モードに周波数ロックするか、または別個の各原子遷移190に周波数ロックすることによるデュアルモード・レーザにより2つのレーザ線120a/120bを生成することもできる。2つの基準レーザ線は電気光学分周器（すなわち電気光学側波帯発生器）に入り、そこでそれらレーザ線は一对の変調器220により、電圧制御電気発振器600（VCO）により設定された周波数 f_M に位相変調される。位相変調器220によって作り出された側波帯スペクトル301は、パルス形成および光ファイバ350での自己位相変調によってさらに幅広化することができる。このようにして作り出された多数の側波帯光信号は各レーザ線120a/120bから展開し、一对の側波帯光信号430a/430bが（典型的には差周波数スパンの中央地点付近に）もたらされる（スペクトル401参照）。側波帯光信号430a/430bはフォトダイオード420を用いて光学的にフィルタ処理され検出される。以下で検討するように、2つの検出された側波帯信号430a/430bによって発生するうなり音信号には、側波帯信号430a/430bに到達するために必要な側波帯の数である光分周係数 $(N_1 + N_2)$ 分だけ強められたVCO600の位相ノイズが含まれる。したがって、うなり音によりVCO600の位相ロックループ制御に適した誤差信号が供給される。

【0017】

本発明に係るマイクロ波周波数源と、周波数基準10およびVCO30を用いた従来のマイクロ波周波数源とを比較することは興味深い。従来手法では（図4参照）、VCO30によりシステムの最高周波数が供給される。この周波数は、電気分周器20、および石英発振器などの低周波数基準発振器10との位相比較により安定化される。一方、本明細書に開示する本発明に係る電気光学分周器は、周波数領域において基準とVCOとの位置を逆にすることにより動作する。具体的には、光基準100はレーザ線同士の相対周波数分離により供給されるが、この周波数分離は、VCO600の周波数よりも何倍も大きくなるよう行われる（本実施では、これは典型的には光学検出器を用いても検出できない速度である）。さらに、（従来の基準源で行われるように）VCO周波数が基準周波数速度まで分周されるのではなく、（本発明に係る基準源では）基準周波数がVCO周波数まで分周される。この逆転を行うことにより、本発明に係るデバイスは（i）光発振器の安定性（これは今や典型的にはマイクロ波発振器の安定性を越える）および（ii）その安定性をマイクロ波領域に移動させる光分周パワーを得る。また、本発明に係る分周器の速度は電気VCO600に由来するため、これは継続的に同調可能である。特に、周波数出力は、電気VCOの同調範囲および基準レーザ線同士の周波数分離により設定され、キャビティの繰り返し速度によって固定されない。

【0018】

10

20

30

40

50

周波数分離の使用は、マイクロ波発生用の基準を得るための絶対周波数とは違い、従来のモードロック・レーザ周波数コムを用いて実践されてきた。このような種類のデバイスでは、周波数コム光分周器は、コムを基準キャビティの2つの周波数にロックすることによって用いられる。その他の従来の光分周器で得られるように、コムを検出により分周信号が供給され、それはこの場合では基準キャビティモードの周波数分離にあたる。この2点でロックする手法は、以前から、2本の原子線および周波数マイクロコムを用いる際に実行されてきた。

【0019】

図3に、本発明に係る分周器により得られる位相ノイズ低減の原点を示す。発生した側波帯光信号の蓄積された位相ノイズ寄与は、2つのレーザ源から、検出可能なうなり音を発生する検出側波帯の位相差まで辿ることができる。検出可能なうなり音は基準発振器信号と比較される。VCO600の位相を調整して位相差をなくすことにより、生じるVCO変動は、 $\sigma_M^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 / (N_1 + N_2)^2$ の値まで低減し、2つのレーザ源の位相ノイズ（例えば共通モードの技術的ノイズから生じる）における相関関係はこの手法では打ち消される。VCO600の相対位相ノイズの最下限は、分周係数の2乗分だけ低減された（すなわち $(N_1 + N_2)^2$ 分の1に低減された）レーザ線の光位相ノイズによって決まる。電気VCO600の位相ノイズを低減するには、レーザ周波数分離（すなわち差周波数）は可能な限り（または所与の使用または用途で実行可能な限り、すなわち動作的に許容できる限り）大きくすべきことは明らかである。本発明に係るシステムの好適な実施形態では、差周波数のこの大きさはデュアルポンプされるブリルアンレーザのスパンにより決定する。

【0020】

図7にデュアル光周波数基準源の例をより詳細に示す。光基準レーザ信号120a/120bは、シリカ・オン・シリコンによる単一の高Qディスク共振器110内で共レーザ発振する各ブリルアンレーザ線により供給される。個々のブリルアンレーザ線のコヒーレンス性は優れており、ブリルアンレーザ線同士の相対周波数安定性は共通共振器内での共レーザ発振により高められる。本発明に係るマイクロ波周波数源では、ブリルアンレーザ線同士は、デュアルポンプ構成で必要とされる十分な大きさの差周波数により分離される。この例では、シリカディスク共振器110は、ポンプ波長1550nmにおけるシリカ内のブリルアン・シフト周波数と実質的に一致する約10.890GHzの自由スペクトル領域（FSR：free-spectral range）を有するように設計および作製される。別のブリルアン・シフト周波数を示すその他の必要な、所望の、または適切な材料を用いることもできる。各ポンプレーザ130a/130b（それぞれ対応波長 λ_1 、 λ_2 で発振する）は、Pound-Drever-Hall（PDH）法を用いてディスク共振器110の対応する別個の共振光モードに周波数ロックされ、サーキュレータ114を介してディスク共振器110に接続され、それぞれの光基準周波数 ν_1 および ν_2 において各々の対応するブリルアンレーザを逆伝播方向に励起する。PDH法は、光帯域フィルタ132a/132b、光検出器134a/134b、およびフィードバック/サーボ機構136a/136bをそれぞれ用いることにより各ポンプレーザ130a/130bに対して実行される。各ポンプ波長の制御は、直接レーザ制御（ポンプレーザ130aの場合）またはレーザ出力の周波数シフト（ポンプレーザ130bの出力における音響光学的シフトの場合）により行われる。2つのSBSレーザ間の周波数分離（すなわち差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ ）は、ポンプレーザ130a/130bが、異なる方位角モード次を有する各共振モードにおいてそれぞれポンプするよう同調させることにより容易に同調させることができる。図8に類似の例を示す。図8では、ディスク共振器110に代えてファイバループ光共振器110'（すなわちファイバループ・キャビティまたはFLC：fiber-loop cavity）が用いられる。

【0021】

単一かつ共通のFLCでのファイバに基づくSBSレーザのデュアルポンピングは、以前は、光信号の従来の光検出によって安定マイクロ波周波数信号を発生させるために適用

10

20

30

40

50

されており、この際、2つのポンプレーザー波長は、所望のマイクロ波周波数における電気光学位相変調によって発生した単一連続波（CW：continuous-wave）レーザーの側波帯であった。この以前の構成では、必然的に、2つのSBSレーザー周波数はそれらの差周波数（すなわちうなり音）が光学検出器を用いて直接検出可能であるくらい十分接近している。一方、本発明に係る構成のSBSレーザー周波数 ν_2 および ν_1 の周波数分離は遥かに大きい（例えば、さまざまな実験において109、198、327、および1612GHzであった。これらは、独立して同調可能な各CWレーザーを用いる10、18、30、および148キャピティFSRによって分離されるディスク共振器光モードのデュアルポンピングにより得たものである）。これらの大きい周波数分離を用いて分周係数を増加させることによって、光分周により位相ノイズの低減を向上させることができる。したがって、周波数分離（すなわち差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ ）は、可能な限りまたは実行できる限り大きくすることが望ましい。このような大きい周波数分離は光学検出器の検出帯域幅を大幅に超えるため、典型的には大きすぎて差周波数（すなわちうなり音）を光学的に検出することはできない。これまでに構築された実施形態における最大分離である1612GHzは、用いられるエルビウム添加ファイバ増幅器の利得帯域幅の端付近である1537nmにあるSBSポンプレーザーのうち的一方により制限されるが、その他のポンプ源を用いて光基準信号120a/120bのより大きいスペクトル分離を実現することもできる。図5Aに、これらスペクトル分離のいくつかにおける各デュアルSBS線の測定光スペクトルを示す。これは注目すべきことだが、2つのSBSレーザー信号120a/120bは、単一かつ共通のチップに基づくディスク共振器110を共有するだけでなく、後続の光/電気変換の間中、光ファイバ路も共有しており、それにより路長変動による影響も抑制できる。

10

20

30

40

50

【0022】

図7および図8の例では、光基準信号120a/120bはサーキュレータ114を用いて光分周器部分に接続されている。多数の側波帯光信号310を発生させるために、（12GHzにおいて）比較的低い V （約3.9V）を有する2つの位相変調器220/230を備えた側波帯発生器200が用いられる。2つの位相変調器220/230はカスケード接続され、対応するRF位相シフト器224/234（図1および図2参照）と位相同期する。位相変調器220/230は32.5dBmと30.7dBmで駆動され、約6（およそ V_{drive}/V ）までの合計位相変調振幅に対応する。これは、変調器220/230により生成される側波帯の数の半分ともおよそ等しい。位相変調器220/230への駆動信号（すなわち側波帯発生器入力電気信号）は、周波数 f_M を有するVCO600の出力電気信号の一部620である（側波帯発生器入力光信号として作用する）。一例では、側波帯発生器の第1の部分200のみを用いて（すなわち側波帯信号310を発生させるために位相変調器220/230のみを用いる（図2の経路I参照））、最高で約30（すなわち $N_1 + N_2$ が最高で約30）の電気光学変調された（EOM：electro-optic-modulated）側波帯を発生させることができる。これにより、最高差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ は約327GHzとすることができ、最高で約30の係数による光分周も可能になる。図5Bには、元の各SBSレーザー線（18FSR周波数分離）と得られる位相変調側波帯の両方を示す測定光スペクトルを示す。30分周の場合、マイクロ波周波数信号610の位相ノイズは、周波数 f_M のフィードバック安定化により（以下でさらに説明する）、光基準信号120a/120bの差周波数の位相ノイズと比べて、約900分の1に減少することになる。図2に示す例では位相変調器を2つ用いたが、十分多くの側波帯を生成するのに十分大きい変調を得られるのであれば、用いる位相変調器は1つでもよい。

【0023】

側波帯スペクトル幅をさらに拡大するには、追加で位相変調器を用いるか、またはより大きい位相変調振幅を可能にする位相変調器を用いることもできる。あるいは、またはそれに加えて、側波帯発生器の第2の部分300を用いることにより、いわゆる連続発生（例えば、先に援用したHuang et al (2008)、Morohashi et al (2009)、Ishizawa et al (

2013)、およびSuzuki et al (2013)の刊行物を参照)を行うこともできる(図2の経路I参照)。この部分は、強度変調器320(VCO信号620の一部により周波数 f_M で駆動されるとともに位相シフト器324を用いて同期する)と、分散補償器330と、光増幅器340と、非線形光媒質350とを備えている。典型例では、強度変調器320は電気光学マッハ・ツェンダ干渉計を、分散補償器330は適切な長さの適切な分散性を有する光ファイバ(例えば、分散シフト光ファイバまたは分散シフトグレーティングを含む光ファイバ)を、光増幅器340はエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA: erbium-doped optical fiber amplifier)を、そして非線形光媒質350は適切な長さの高度に非線形な光ファイバ(HNLF: highly nonlinear optical fiber)を含むことができる。その他の機能的に同様な部品、例えば電界吸収型変調器を用いることもできる。この例では、位相変調器220/230にカスケード接続される連続発生を用いることで、位相変調器のみを用いた場合と比べて、2つの基準光信号120a/120bをスペクトル的により遠くに離間させるのに十分な数の側波帯を発生させることができる。この例では、差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ はディスク共振器110の148FSRまで発生させることができる(すなわち、先に述べたように、EDFAの利得帯域幅による制限によって、この例では最高で約1.6THzまで離間し、 $N_1 + N_2$ の値は最高で148となる)。148分周の場合、マイクロ波周波数信号610の位相ノイズは、周波数 f_M のフィードバック安定化により(以下でさらに説明する)、光基準信号120a/120bの位相ノイズと比べて、約20000分の1以上、低減することになる。さらに大きい差周波数を用いることにより、位相ノイズのさらなる低減も達成することができる。

10

20

【0024】

送信された2つの光側波帯430a/430b(周波数はそれぞれ $\nu_1 + N_1 f_M$ および $\nu_2 - N_2 f_M$ であり、典型的には $\ll f_M$ である f により分離されている)は光帯域フィルタ410によって送信され、増幅光学検出器420(この例では帯域幅125MHz)を用いて検出される。これらの送信された側波帯信号を線形重畳することにより光学検出器420に入る信号が得られ、光学検出器420は、うなり音周波数 $f_{BEAT} = (\nu_2 - N_2 f_M) - (\nu_1 + N_1 f_M)$ を有する光学検出器電気信号を生成する。基準発振器510は周波数 f_R の基準発振器電気信号を発生する(この例では10MHzで動作する石英発振器を用いたが任意の適切な基準発振器を用いることができる。周波数 f_R としては約1MHz~約500MHzを用いた)。基準発振器510により寄与された位相ノイズも全体的な分周によって低減され、光分周工程によって達成可能な位相ノイズ低減にいかなる制限も与えることはない。電気回路520は、フォトダイオードの位相と基準電気信号の位相とを比較し、(任意の必要な、所望の、または適切なやり方で)誤差信号を発生させ、その誤差信号は次いで回路520により(任意の必要な、所望の、または適切なやり方で)ループフィルタ処理される。ループフィルタ処理された誤差信号は、VCO600を周波数 $\nu_2 - \nu_1 \pm f_R$ の分数調波(すなわち整数分の1)に位相ロックするのに用いられるVCO電気入力信号530として機能する。この例では、VCOは外部のFM変調入力モードを用いて動作するマイクロ波発生器を備えているが、任意の適切な種類のVCOまたは任意の適切なVCO動作を用いることもできる。

30

【0025】

ブリルアンレーザの位相ノイズレベル(位相ノイズ基準レベル)を確立するために、図7のデュアルSBSレーザの例からの出力を高速光学検出器(50GHz帯域幅)において光検出することにより生成されたうなり音の単一側波帯(SSB: single sideband)位相ノイズ(L)を、図5Cの一番上の曲線で表す。この測定を行うにあたり、デュアルSBSレーザ信号は3つの離間したFSRにおいてポンプされ、光学検出器を用いて検出可能であるとともに電気位相ノイズ分析器で分析することもできる32.7GHzのうなり音もたらされる。位相ノイズレベルは、SBSレーザ周波数の周波数同調によらずおよそ一定を維持することが確認されており、したがって、本発明の分周工程で用いられるような非常に大きい(すなわち検出不可能な)周波数分離にレーザを同調させた場合であってもレーザの基準位相ノイズの目安となる。オフセット周波数(例えば図5Cにお

40

50

る横軸)が100Hzよりも高い場合、ノイズスペクトルはシャウロウ・タウンズのノイズにより制限される。一方、オフセット周波数が100Hzより低い場合は、技術的ノイズ成分が存在する。現在の実験では、このスペクトルにより、光分周係数 $N_1 + N_2$ によって2乗的に低減する基準ノイズレベル(周波数差の不変量)が得られる。光分周器を試験するためには、図1~図3に示すように、ループフィルタ処理した誤差信号530をVCO制御/同調入力ポートに供給することによってVCO600を分周光基準にロックする。図5Cの下の方の2つの曲線は、デュアルSBS線120a/120bの当初周波数分離と比べて、30倍(下から2番目の曲線)および148倍(一番下の曲線)光分周した場合の10.89GHzにおけるVCO600の対応する測定位相ノイズスペクトルである。分周比が大きいほど位相ノイズが低減することがデータから明らかである。これらの測定では、同調可能なポンプレーザ源130a/130bを用いてブリルアンレーザ線同士の周波数分離を調整することにより、出力信号610の周波数を10.89GHzに保持している。ちなみに、900kHz付近(分周比30、図2の経路Iを用いて達成される)および300kHz付近(分周比148、図2の経路IIを用いて達成される)の位相ノイズスペクトルにおける特性は、位相ロックされたループ制御回路のサーボ隆起である。これら周波数はサーボ・ループ遅延により決定され、サーボ・ループ遅延は光路長・電気路長およびVCO600の同調応答を含む。

10

【0026】

位相ロック状態下でのVCO位相ノイズの性能向上を示すために、自走VCO600の位相ノイズスペクトルを図5Cの破曲線で表わす。327GHzのブリルアン光差周波数を係数30で分周する場合(図2の経路I、位相変調器220/230のみを使用)、元の自走VCO600と比べて1kHz~100kHzのオフセット周波数に対しておよそ20dBの位相ノイズ低減が確認される。また、10.89GHzのキャリアに対し、オフセット周波数10kHzにおいては-112dBc/Hz、オフセット周波数100kHzにおいては-127dBc/Hzの位相ノイズレベルが達成される。1.61THzのブリルアン光信号差周波数を係数148で分周する場合(図2の経路II、位相変調器に加えて連続発生を使用)、10.89GHzキャリアに対して達成される位相ノイズレベルは、オフセット周波数1kHzにおいては-104dBc/Hz、オフセット周波数10kHzにおいては-121dBc/Hz、オフセット周波数100kHzにおいては-119dBc/Hzである。分周比148の場合のオフセット周波数100kHzにおける位相ノイズが上昇する理由は、このオフセットはサーボピークである300kHz(サーボ帯域幅)に近いからである。図5Dに10.89GHzでのVCO出力610の測定スペクトルを示す(電気スペクトル分析器の設定は20kHzスパンと30Hz解像帯域幅)。一番上の曲線は自走VCOスペクトルである。一方、その他のスペクトルは、上から、対応SBS周波数分離196GHz、327GHz、1.61THzをそれぞれ18、30、148分周した場合の位相ロックされたVCO600のスペクトルである。図5Eでは、オフセット周波数1kHz、10kHz、100kHzにおける測定位相ノイズを、分周比1、3、4、10、18、30、148に対してプロットすることにより上記結果をまとめた。破線は $1/(N_1 + N_2)^2$ のフィッティングを表し、測定値と良好に一致する。比較として、上側の水平破線ではアジレント社のMXGマイクロ波合成器(キャリア:11GHz、オフセット:100kHz、アジレント・オンライン・データシート、文献番号5989 7572EN)の位相ノイズを示し、下側の水平破線ではアジレント社の高性能PSGマイクロ波合成器(キャリア:11GHz、オフセット:100kHz、アジレント・オンライン・データシート、文献番号5989 0698EN、オプションUNIX)の位相ノイズを示す。

20

30

40

【0027】

これまでに示した例では、マイクロ波周波数 f_M は固定されていたが、この周波数は分周比を変えることにより調整することができる。具体的には、デュアルSBS線の固定分離 $\nu_2 - \nu_1$ に対する分周比 $N_1 + N_2$ およびVCO周波数 f_M を変えることにより、異なるキャリア周波数の位相ロック周波数合成(例えば、 $f_M = (\nu_1 - \nu_2 \pm f_R) / ($

50

$N_1 + N_2$))が可能になる。例えば図6Aでは、側波帯周波数同士は2つの異なる分周比26と30にの場合、中間点においてほぼ重なり合う。唯一の要件は、差周波数 $v_2 - v_1$ を所望の出力/変調周波数 f_M の整数倍とほぼ等しくすることである。図6Bには位相ロックされた12.566GHzの出力信号610の測定ノイズスペクトルを示し、図6Cには9.075GHzの出力信号610の測定ノイズスペクトルを示す。さらに、当初の基準周波数分離 $v_2 - v_1$ も同調させることができる。可変FSRを有する複数の基準キャビティ110または180を用いることで、1つの分周器で幅広い範囲の出力周波数を発生させることが可能になる。

【0028】

図1および図2を参照すると、マイクロ波周波数源は、出力周波数 f_M を有する出力電気信号を発生するように構成されており、このマイクロ波周波数源は、(a)デュアル光周波数基準源100と、(b)電気光学側波帯発生器200/300と、(c)光帯域フィルタ410と、(d)光学検出器420と、(e)基準発振器510と、(f)電気回路520と、(g)電圧制御電気発振器600とを備えている。デュアル光周波数基準源100は、(i)第1の光基準周波数 v_1 を有する第1の光基準信号120aと、(ii)第2の光基準周波数 $v_2 > v_1$ を有する第2の光基準信号120bとを発生するように構成されている。第1および第2の光基準信号120a/120bのスペクトル101の例を図1の挿入図に模式的に示す。電気光学側波帯発生器200/300は、(i)第1および第2の光基準信号120a/120bと周波数 f_M を有する側波帯発生器入力電気信号とを受信し、(ii)それら信号から、 $v_1 \pm n_1 f_M$ および $v_2 \pm n_2 f_M$ (n_1 および n_2 は整数)で表わされる側波帯光周波数をそれぞれ有する多数の側波帯光信号210/310を発生するように構成されている。多数の側波帯光信号310のスペクトル301の例を図1の挿入図および図3に模式的に示す。光帯域フィルタ410は、周波数 $v_1 + N_1 f_M$ を有する側波帯光信号430aと周波数 $v_2 - N_2 f_M$ を有する側波帯光信号430b(典型的には $\ll f_M$ である f により分離される)を含む多数の側波帯光信号210/310のサブセットを送信するように構成されている。送信された側波帯光信号430a/430bのスペクトル401の例を図1の挿入図および図3に模式的に示す。光学検出器420は、(i)送信された側波帯光信号430a/430bを受信し、(ii)うなり周波数 $f_{\text{BEAT}} = (v_2 - N_2 f_M) - (v_1 + N_1 f_M)$ を有する光学検出器電気信号440を発生するように構成されている。

【0029】

基準発振器510は、基準発振器周波数 f_R を有する基準発振器電気信号を発生するように構成されている。電気回路520は、(i)光学検出器電気信号440および基準発振器電気信号を受信し、(ii)それら信号から、電気回路520の比較器部分を用いて、光学検出器電気信号と基準発振器電気信号の相対位相に依存する電気誤差信号を発生し、(iii)電気回路520のループフィルタ部分を用いて電気誤差信号を処理するように構成されている。電圧制御電気発振器600は、(i)ループフィルタ処理された電気誤差信号530をVCO入力電気信号として受信し、(ii)周波数 f_M を有するVCO出力電気信号を発生するように構成され、VCO出力電気信号の第1の部分620は、側波帯発生器入力電気信号として電気光学側波帯発生器200/300に受信され、VCO出力電気信号の第2の部分610はマイクロ波周波数源の出力電気信号となる。電気光学側波帯発生器200/300がVCO出力電気信号の第1の部分620を側波帯発生器入力電気信号として受信することにより、電気回路520と電圧制御発振器600は、位相ロックループ(PLL: phase-locked loop)として機能するように負のフィードバック構成において接続することになる。電気回路520の比較器部分とループフィルタ部分は、任意の必要な、所望の、または適切なやり方で用いることができる。

【0030】

出力周波数 f_M を有するマイクロ波周波数出力電気信号610を発生させる方法は、(a)デュアル光周波数基準源100を用いて第1および第2の光基準信号120a/120bを発生させることと、(b)電気光学側波帯発生器200/300を用いて多数の側

10

20

30

40

50

波帯光信号 210 / 310 を発生させることと、(c) 光帯域フィルタ 410 を用いて側波帯光信号 430 a / 430 b を送信することと、(d) 光学検出器 420 を用いて光学検出器電気信号 440 を発生させることと、(e) 基準発振器 510 を用いて基準発振器電気信号を発生させることと、(f) 電気回路 520 を用いてループフィルタ処理された電気誤差信号 530 を発生させることと、(g) 電圧制御電気発振器 600 を用いて VCO 出力電気信号 610 / 620 を発生させることとを含む。電気光学側波帯発生器 200 / 300 が VCO 出力電気信号の第 1 の部分 620 を側波帯発生器入力電気信号として受信することにより、電気回路 520 と電圧制御発振器 600 は、位相ロックループとして機能するように負のフィードバックにおいて接続することになる。

【0031】

出力周波数 f_M は、電磁スペクトルのいわゆるマイクロ波部分（例えば約 0.3 GHz ~ 約 300 GHz）のうち、任意の周波数をとることができる。いくつかの例では、出力周波数 f_M は約 1 GHz ~ 約 100 GHz である。

【0032】

図 3 に模式的に示されるように、電気光学側波帯発生器 200 / 300 は差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ を係数 $N_1 + N_2$ で分周するように作用し、光帯域フィルタ 410 の通過帯域範囲内にも含まれるくらいスペクトル的に十分近接した一对の側波帯光信号 430 a / 430 b（それぞれ周波数は $\nu_1 + N_1 f_M$ と $\nu_2 - N_2 f_M$ ）を発生させる。したがって、電気光学側波帯発生器 200 / 300 は電気光学分周器（E OF D : electro-optic frequency divider）とも称される。係数 $N_1 + N_2$ による差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ の分周を、電気光学側波帯発生器 200 / 300 と電圧制御発振器 600 の位相ロックと組み合わせると、マイクロ波周波数源の出力電気信号 610 の位相ノイズは、デュアル光周波数基準源 100 の位相ノイズと比べて約 $(N_1 + N_2)^2$ 分の 1 に低減する。

【0033】

したがって、発生するマイクロ波周波数電気信号の位相ノイズを低減するには、分周比を大きくすると有利である。分周比を大きくする方法の 1 つは、基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ を大きくすることである。いくつかの例では、基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ は約 100 GHz よりも大きい。それら例のいくつかでは、基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ は約 1 THz、10 THz、または 100 THz よりも大きい。必要に応じて、望まれるように、または適切に、あるいは適切な光源が開発されるかまたは入手可能になるにつれて、さらに大きい基準差周波数を用いることもできる。

【0034】

基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ および所望の出力周波数 f_M に応じて、任意の適切な分周比 $N_1 + N_2$ を用いることができる。いくつかの例では、分周比 $N_1 + N_2$ は 10 以上、50 以上、100 以上、または 1000 以上である。上記したように、分周比が大きいほど位相ノイズを低減することができる。

【0035】

基準光信号 120 a / 120 b は、任意の必要な、所望の、または適切な光周波数で供給することができる。いくつかの例では、第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 はそれぞれ約 75 THz ~ 約 750 THz（すなわち波長約 400 nm ~ 約 4 μ m）、約 120 THz ~ 約 430 THz（すなわち波長約 700 nm ~ 約 2.5 μ m）、または約 150 THz ~ 約 300 THz（すなわち約 1 μ m ~ 約 2 μ m）である。後者の 2 つの波長領域では光ファイバ源および / または固体源を容易に利用できるため、それら 2 つの範囲は便利に用いることができる。その他の波長を用いることもできる。

【0036】

いくつかの例では、基準発振器周波数およびうなり周波数は、約 1 MHz ~ 約 500 MHz、約 5 MHz ~ 約 100 MHz、または約 10 MHz ~ 約 50 MHz とすることができる。いくつかの例では、基準発振器 510 は水晶発振器（例えば石英発振器）を含む。他のいくつかの例では、基準発振器 510 は電気発振器（例えば周波数合成発振器）を含む。所与の使用または用途においてマイクロ波周波数源の十分に安定した（すなわち動作

10

20

30

40

50

的に許容できる)性能を可能にする限り、任意の適切な安定基準発振器を用いることができる。

【0037】

いくつかの例では、デュアル光周波数基準源100は、基準差周波数 $v_2 - v_1$ の変動(すなわちレーザ同士の相対周波数の安定性)を動作的に許容できる光基準帯域幅範囲内に維持できるように安定化される。いくつかの例では、動作的に許容できる基準帯域幅(所与の時間間隔に対して特徴付けられる帯域幅として表す)は、約1秒の時間尺に対して約100Hz未満または約1Hz未満である。いくつかの例では、動作的に許容できる基準帯域幅(光キャリア周波数に対する所与のオフセット周波数における光位相ノイズとして表す)は、オフセット周波数100Hzで約-40dBc/Hz、オフセット周波数10kHzで約-80dBc/Hzであるか、またはオフセット周波数100Hzで約-80dBc/Hz、オフセット周波数10kHzで約-125dBc/Hzである。一般に、レーザ源の相対安定性レベルの向上は、マイクロ波周波数出力信号の全体的な周波数安定の向上に直接的につながることになる。必要に応じて、望まれるように、または適切に、あるいは適切な光源が開発されるかまたは入手可能になるにつれて、さらに良好な安定化した基準を用いることもできる。

10

【0038】

上記したように、いくつかの例では、デュアル光周波数基準源100は、第1および第2のポンプレーザ源130a/130bと、光共振器110(図7のディスク共振器)または110'(図8のファイバリング共振器)とを備えている。光共振器110/110'の自由スペクトル領域(FSR: free spectral range)は、光共振器のブリルアンシフト周波数の整数分の1と実質的に等しい。いくつかの例では、光共振器はシリカを含んでおり、光共振器のブリルアンシフト周波数は約10.9GHzであるが、異なるブリルアンシフト周波数を示すその他の必要な、所望の、または適切な材料を用いることもできる。第1および第2のポンプレーザ源130a/130bのそれぞれは、光共振器110/110'の対応する共振光モードに周波数ロックされている。第1および第2の光基準信号120a/120bはそれぞれ第1および第2のポンプレーザ源130a/130bが同時に光共振器を光ポンピングすることによって発生する誘導ブリルアンレーザ(SBL: stimulated Brillouin laser)出力を含む。いくつかの例では、光共振器110/110'の自由スペクトル領域は、光共振器のブリルアンシフト周波数と実質的に等しい。いくつかの例では、光共振器は、ディスク光共振器110(図7参照)などのリング光共振器を含む。その他の例では、光共振器は、ファイバリング光共振器110'(図8参照)や線形ファブリ・ペロー型光ファイバ共振器(ポンプ周波数またはSBL周波数における例えばファイバ・ブラッグ・グレーティングを含む)などの光ファイバ共振器を含む。いくつかの例では、第1および第2のポンプレーザ源のそれぞれは、Pound-Drever-Hall法によって共振器110/110'の対応する共振光モードに周波数ロックされるが、例えばHansch-Couillaud法など任意の適切な方法を用いることもできる。

20

30

【0039】

デュアルポンプ誘導ブリルアンレーザ(SBL: stimulated Brillouin laser)として作用する光共振器に代えて、いくつかのその他の例では、デュアル光周波数基準源100はデュアルモード・レーザ源を備えている。さらにその他の例では、デュアル光周波数基準源100は、共通光基準キャピティ180(図1参照)の対応する別個の共振光モードにそれぞれが周波数ロックされた第1および第2の基準レーザ源を備えている。さらにその他の例では、デュアル光周波数基準源100は、対応する別個の原子遷移190(図1参照)にそれぞれが周波数ロックされた第1および第2の基準レーザ源を備えている。必要な、所望の、または適切な(すなわち動作的に許容できる)基準周波数および差周波数安定性を可能にする限り、その他の任意の適切な安定デュアル光周波数基準源を用いることもできる。

40

【0040】

50

上記したように、いくつかの例では、電気光学側波帯発生器は、周波数 f_M を有する側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によってそれぞれ駆動される2つ以上の電気光学位相変調器 220 / 230 (図2の経路 I) のみを備えている。2つ以上の位相変調器 220 / 230 (側波帯発生器の一部 200 を構成する) は、 $v_1 \pm n_1 f_M$ および $v_2 \pm n_2 f_M$ (n_1 および n_2 は整数) で表わされる対応する側波帯光周波数を有する多数の光側波帯信号 310 を発生するように、第1および第2の光基準信号 120 a / 120 b を連続的に送信するよう直列に配置されている。2つの位相変調器 220 / 230 を用いて、 $n_1 + n_2$ を2から少なくとも30までの範囲として複数対の側波帯光信号を発生させる。

【0041】

その他の例では、従来技術である連続発生が電気光学側波帯発生器 (図2の経路 II) の一部 300 に含まれる。これは、2つ以上の電気光学位相変調器 220 / 230 と、強度変調器 320 と、分散補償器 330 と、光増幅器 340 と、非線形光媒質 350 とを含む。2つ以上の電気光学位相変調器 220 / 230 は、それぞれ、VCO出力信号 620 に由来し位相調整器 224 / 234 と同期する周波数 f_M を有する側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によって駆動される。強度変調器は、VCO出力信号 620 に由来し位相調整器 324 と同期する周波数 f_M を有する側波帯発生器入力電気信号の別の部分によって駆動される。位相変調器 220 / 230、強度変調器 320、分散補償器 330、光増幅器 340、および非線形光媒質 350 は、多数の光側波帯信号 310 を発生するように第1および第2の光基準信号を連続的に送信するよう順番に直列に配置されている。これらの信号は $v_1 \pm n_1 f_M$ および $v_2 \pm n_2 f_M$ (n_1 および n_2 は整数であり、 $n_1 + n_2$ の範囲は2から少なくとも100以上) で表わされる対応周波数を有する。変調器、分散補償器、増幅器、および非線形媒質は、任意の必要な、所望の、または適切な組み合わせで用いることができる。いくつかの例では、強度変調器は電気光学マッハ・ツェンダ干渉計を、分散補償器 330 は適切な長さの適切な分散性を有する光ファイバ (例えば分散シフト光ファイバや分散シフトグレーティングを含む光ファイバ) を、光増幅器 340 はエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA: erbium-doped optical fiber amplifier) を、非線形光媒質 350 は適切な長さの高非線形光ファイバ (HNLf: highly nonlinear optical fiber) を含むことができる。電界吸収型変調器など、その他の機能的に同等の素子を用いることもできる。大規模な位相振幅変調を発生させるための適切な技術が開発されるかまたは入手可能になれば、上記各機能は、より少ない数の位相変調器または単一の位相変調器と取り替えることも可能となりうる。

【0042】

既に述べたように、光分周 (OFD: optical frequency division) によって、記録的に低い位相ノイズを有する超安定マイクロ波周波数信号を発生させることが今や可能となった。OFDの鍵となる要素は安定した光周波数基準 (OFR: optical frequency reference) である。光基準には、絶対周波数基準と差周波数基準の2種類がある。後者の基準は、本明細書に記載する光分周器での使用によく適している。以下で、図7および図8に模式的に示した本発明に係るデュアル周波数光源をより詳細に検討する。デュアル周波数光源 100 は、テラヘルツ帯域のデュアルモード誘導ブリルアンレーザ (SBL: stimulated Brillouin laser) に基づく。デュアルモードSBLの差周波数基準の測定位相ノイズは、光学検出器で直接検出可能な差周波数 (例えば数十GHz、おそらく100GHz) に周波数基準が設定されるとき、オフセット1kHzにおいて -105 dBc / Hz である。これは既に優れた位相ノイズレベルであり、以前のブリルアンレーザと比べて15 dB 向上している。周波数基準としては、この差周波数を約300 GHz よりも高く、約1 THz まで、約5 THz まで、約10 THz まで、約100 THz まで、または100 THz を越えるような非常に高い (すなわち直接検出不可能な) 値まで引き上げることが望ましい。このような差周波数の上昇は、基本となるブリルアンレーザにおけるノイズを支配する物理法則により、位相ノイズの劣化をほぼまたは全く伴わずに達成することができる。デュアルモードSBL差周波数の位相ノイズは、2つのレーザの基本的なシャウ

10

20

30

40

50

ロウ・タウンズ周波数ノイズにより決定され、2つのレーザ間の周波数分離に対してもほぼ不変である。光分周を用いると、そのような大きい（光学検出器で検出できない）差周波数値を従来から検出可能な周波数（例えば数十GHz）にまで分周することができる。周知のように、差周波数の位相ノイズは分周比の2乗により分周信号に減じられる。本発明に係るデュアル周波数源から発生する差周波数の位相ノイズは既に低いため、分周によって誘発される位相ノイズの低減は、マイクロ波周波数において記録的に低い位相ノイズを可能にすると予測される。本発明に係る差周波数基準は、標準的な光ファイバ素子を用いて発生させることができ、高価なハードウェアの使用をほぼまたは全く必要としない。したがって、多くの異なる使用および用途に容易に応用可能となるはずである。

【0043】

OFD手法を用いたマイクロ波周波数信号を発生するための鍵となる素子は、安定した光周波数基準および光分周器である。本発明に係る電気光学分周器については先に開示した。種々のOFD手法で用いられる従来の安定した光周波数基準としては、サブヘルツの安定性を有するキャビティ安定化レーザや、単一かつ共通の基準光キャビティ180（図1参照）に周波数ロックされることで例外的に安定した相対周波数を有する2つのレーザなどが挙げられる。これらの2つの方法では、上手く分離されているとともに高フィネスを有するファブリ・ペロー基準光キャビティが必要とされ、この光キャビティは非常に嵩高く壊れやすい場合が多い。一方、さまざまなタイプのデュアルモード・レーザを用いて、デュアルモード・レーザ（デュアル波長レーザとも称される）の高速光学検出器における光検出およびレーザ信号同士のうなり周波数の検出により、良質なマイクロ波信号が生成されてきた。例えば、単一のファイバリング・キャビティにある2つのレーザによってポンプされるデュアルモード誘導ブリルアンレーザを用いて、光検出により数十MHz～100GHzまでのマイクロ波が生成されてきた。しかしながらこれらの方法では、マイクロ波周波数信号は、光学検出器におけるレーザのデュアル光モードのうなりによって直接発生するため、発生するマイクロ波周波数信号は光学検出器の帯域幅に制限される（おそらく最高で100GHzまで）。さらに、マイクロ波周波数信号の位相ノイズは、2つのレーザモードの相対周波数安定性の位相ノイズと等しい。

【0044】

本発明に係るデュアル周波数光源100では、光学的に検出したデュアルモード・レーザ（帯域幅100GHzまで）の従来の役割を、約300GHz～約100THzまたはそれよりも高い周波数範囲に含まれる遥かに大きい周波数分離を示す安定した光基準に変換する。本発明に係るデュアルモード誘導ブリルアンレーザ（SBL: stimulated Brillouin lasers）によって生成される基準差周波数は、次いで、光分周器（上記した本発明に係る電気光学分周器または従来のモードロック・レーザ周波数コムなど）を用いてマイクロ波周波数まで分周される。発生したマイクロ波周波数信号の位相ノイズも、デュアルモードSBL間の相対安定性の位相ノイズから、 $20 \log_{10} N \text{ dB}$ （Nは分周係数）だけ分周される。光学的に分周されたマイクロ波周波数信号の位相ノイズは、上記したようにそれ自体の位相ノイズが低いデュアル周波数光周波数基準の位相ノイズと比べても大幅に低減することができる。光分周は、マイクロ波生成の分野では比較的新しい手法である。周波数基準は、絶対性に基づくものでも差に基づくものであっても、嵩高く壊れやすいデバイスである受動ファブリ・ペロー共振器を典型的には用いていた。

【0045】

既に上記するとともに図7および図8に示したように、本発明に係るデュアル周波数光源100は、第1および第2のポンプレーザ源130a/130bと、光共振器110（図7のディスク共振器）または110'（図8のファイバリング共振器）とを備えている。第1および第2のポンプレーザ源は、第1および第2のポンプ波長 $\nu_{\text{pump}1}$ および $\nu_{\text{pump}2}$ にそれぞれ対応する第1および第2のポンプレーザ周波数 $\nu_{\text{pump}1}$ および $\nu_{\text{pump}2}$ においてそれぞれ光ポンプパワーを発生するように構成されている。光ポンプパワーは、サーキュレータ114を用いて光共振器110/110'に送られるが、例えばビームスプリッタなどその他の適切な構成を用いることもできる。光共振器110

10

20

30

40

50

／ 1 1 0 ' は、ブリルアンシフト周波数 ν_B およびブリルアンシフト周波数の整数分の 1 と実質的に等しい自由スペクトル領域 (F S R : free spectral range) によって特徴付けられる。第 1 および第 2 のポンプレーザ源 1 3 0 a / 1 3 0 b のそれぞれは、光共振器 1 1 0 / 1 1 0 ' の対応する共振光モードに周波数ロックされるが、任意の必要な、所望の、または適切な周波数ロック技術または機構を用いることができる。デュアル周波数光基準源 1 0 0 の第 1 および第 2 の光出力信号 1 2 0 a / 1 2 0 b は、それぞれ第 1 および第 2 の出力周波数 $\nu_1 = \nu_{p u m p 1} - \nu_B$ および $\nu_2 = \nu_{p u m p 2} - \nu_B$ を有するとともに、それぞれ第 1 および第 2 のポンプレーザ源 1 3 0 a / 1 3 0 b による光共振器 1 1 0 / 1 1 0 ' の同時光ポンピングによって発生する誘導ブリルアンレーザ出力を含む。出力信号 1 2 0 a / 1 2 0 b は、サーキュレータ 1 1 4 を用いてデュアル周波数源 1 0 0 から外部へ送られるが、例えばビームスプリッタまたはファイバ結合器などその他の適切な構成を用いることもできる。デュアル周波数光源 1 0 0 は、出力差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 3 0 0 G H z よりも大きくなるように構成され動作する。いくつかの例では出力差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ は約 1 T H z よりも大きい。いくつかの例では出力差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ は約 5 T H z よりも大きい。いくつかの例では出力差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ は約 1 0 T H z よりも大きい。それら例のいくつかでは出力差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ は約 1 0 0 T H z よりも大きい。周波数 ν_1 および ν_2 は同じキャビティで発生するため、それら周波数の変動には高度な相関関係があり、したがって差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ は非常に安定している。また、その他の形状を有する共振器 (例えば線形共振器) を用いて各デュアル S B L 基準線を発生させることもできる。

10

20

【 0 0 4 6 】

第 1 および第 2 の光出力信号 1 2 0 a / 1 2 0 b を発生させる方法は、第 1 および第 2 のポンプレーザ源 1 3 0 a / 1 3 0 b からの光ポンプパワーを用いて、光共振器 1 1 0 / 1 1 0 ' を同時にポンピングすることを含む。

【 0 0 4 7 】

本発明に係るデュアル周波数光源のいくつかの例では、光共振器 1 1 0 / 1 1 0 ' の自由スペクトル領域 (F S R : free spectral range) は、光共振器のブリルアンシフト周波数と実質的に等しい。いくつかの例では、光共振器はシリカを含み、光共振器のブリルアンシフト周波数は約 1 0 . 9 G H z であるが、異なるブリルアンシフト周波数を示すその他の必要な、所望の、または適切な材料を用いることもできる。

30

【 0 0 4 8 】

基準光信号 1 2 0 a / 1 2 0 b は、任意の必要な、所望の、または適切な光周波数で供給することができる。いくつかの例では、第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 はそれぞれ約 7 5 T H z ~ 約 7 5 0 T H z (すなわち波長約 4 0 0 n m ~ 約 4 μ m) 、約 1 2 0 T H z ~ 約 4 3 0 T H z (すなわち波長約 7 0 0 n m ~ 約 2 . 5 μ m) 、または約 1 5 0 T H z ~ 約 3 0 0 T H z (すなわち約 1 μ m ~ 約 2 μ m) である。後者の 2 つの波長領域では光ファイバ源および / または固体源を容易に利用できるため、それら 2 つの範囲は便利に用いることができる。その他の波長を用いることもできる。

【 0 0 4 9 】

いくつかの例では、デュアル光周波数基準源 1 0 0 は、基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ の変動 (すなわちレーザ同士の相対周波数の安定性) を動作的に許容できる光基準帯域幅範囲内に維持できるように安定化される。いくつかの例では、動作的に許容できる基準帯域幅 (所与の時間間隔に対して特徴付けられる帯域幅として表す) は、約 1 秒の時間尺に対して約 1 0 0 H z 未満または約 1 H z 未満である。いくつかの例では、動作的に許容できる基準帯域幅 (光キャリア周波数に対する所与のオフセット周波数における光位相ノイズとして表す) は、オフセット周波数 1 0 0 H z で約 - 4 0 d B c / H z 、オフセット周波数 1 0 k H z で約 - 8 0 d B c / H z であるか、またはオフセット周波数 1 0 0 H z で約 - 8 0 d B c / H z 、オフセット周波数 1 0 k H z で約 - 1 2 5 d B c / H z である。一般に、レーザ源の相対安定性レベルの向上は、マイクロ波周波数出力信号の全体的な周波数安定の向上に直接的につながることになる。必要に応じて、望まれるように、または適切に

40

50

、あるいは適切な光源が開発されるかまたは入手可能になるにつれて、さらに良好な安定化した基準を用いることもできる。

【0050】

いくつかの例では、第1および第2のポンプレーザー源のそれぞれは、Pound Drevler Hall法により、共振器110/110'の対応する共振光モードに周波数ロックされるが、例えばHansch Couillaud法など、任意の適切な方法を用いることもできる。図7の例では、各ポンプレーザー130a/130b(それぞれ対応波長 λ_1 および λ_2 で発振する)は、Pound Drevler Hall(PDH)法を用いてディスク共振器110の対応する別個の共振光モードに周波数ロックされ、サーキュレータ114によってディスク共振器110に接続され、それぞれの光基準周波数 ν_1 および ν_2 において各々の対応するブリルアンレーザを逆伝播方向に励起する。PDH法は、光帯域フィルタ132a/132b、光検出器134a/134b、およびフィードバック/サーボ機構136a/136bをそれぞれ用いることにより各ポンプレーザー130a/130bに対して実行される。各ポンプ波長の制御は、直接レーザ制御(ポンプレーザー130aの場合)またはレーザ出力の周波数シフト(ポンプレーザー130bの出力における音響光学的シフトの場合)により行われる。2つのSBSレーザ間の周波数分離(すなわち差周波数 $\nu_2 - \nu_1$)は、ポンプレーザー130a/130bが異なる方位角モード次を有する共振モードにおいてそれぞれポンプするよう同調させることにより容易に同調させることができる。図8に類似の例を示す。図8では、ディスク共振器110に代えてファイバープ光共振器110'(すなわちファイバープ・キャビティまたはFLC: fiber-loop cavity)が用いられ、ポンプレーザー130a/130bはともにそれら各々の波長の直接制御下にある。

10

20

【0051】

ファイバープ光共振器110'の使用により、電気通信関係用途のための開発された容易に入手可能な光素子の使用が可能になるとともに、ディスク共振器110と比べて周波数基準それ自体における位相ノイズが非常に低い(40dB以下まで)という点において性能利益も得られる。この向上は以下の2つの理由から生じると考えられる。第1に、ファイバープ・キャビティの往復長(100m~500m程度)は、ディスク共振器と比べて(往復長10mm~100mm程度)はるかに長いことが挙げられる。結果として、ファイバープ・キャビティのランダムな温度変動によって生じる周波数変動はディスク共振器と比べて大幅に減少する。第2に、ファイバープ・キャビティのキャビティ長が長いと、それに呼応して、キャビティ内での光子保管時間もディスク共振器と比べて長くなることが挙げられる。光子保管時間が長いと、それに呼応して、レーザのシャウロウ・タウンズ周波数ノイズが基本的に低くなる。

30

【0052】

光ファイバを用いたデュアルポンプ・ブリルアンレーザは(上記したように)以前から用いられてはいるが、約300GHz、約1THz、約5THz、約10THz、約100THz、またはそれよりも大きい周波数分離を有する差周波数基準としてではなく、典型的には周波数分離が約100GHz未満のマイクロ波源として動作していた。発明者の知る限りでは、約300GHzよりも大きい差周波数におけるデュアルポンプ・デュアルブリルアンレーザ線動作が確認された事例はなく、現実にそのような大きい周波数分離が存在した場合、以前のデュアルブリルアンレーザは意図する目的に沿わないものになるはずである。先に開示した光分周技術が開発される以前は、そのような広い離間距離を有するデュアル基準周波数を発生させる必要はなかった。この用途を念頭においてデュアルブリルアンレーザを特徴付けたりその動作を理解したりする試みもなかった。

40

【0053】

図7(ディスク共振器110を使用)および図8(ファイバープ共振器を使用)に、安定したマイクロ波を発生させるための光分周を可能にする、デュアルモードSBLを光差周波数基準として用いた場合の詳細な配置を示す。図8では、2つのポンプレーザー130a/130b(独立して同調可能なCWレーザ)は、光帯域フィルタ132a/132

50

b、光検出器 134 a / 134 b、およびフィードバック/サーボ機構 136 a / 136 b を使用する標準的な Pound - Drever - Hall ロック法を用いて、ブリルアン動作するファイバーループ・キャビティ 110' (FLC: fiber loop cavity) に周波数ロックされている。ファイバーループ・キャビティ 110' の循環ポンプパワーが閾値に達すると、各ポンプレーザ 130 a / 130 b はその誘導ブリルアンレーザを励起する。2つの SBL 間の周波数分離は、2つのポンプレーザ 130 a / 130 b 間の周波数分離を同調させることによって、数十メガヘルツ ~ 100 THz 以上まで同調させることができる。光分周を行う場合、2つの SBL 間の周波数分離は数テラヘルツ程度とすることができる。例えば、一方のポンプレーザの波長が 1550 nm の場合、2つの SBL 間の周波数分離は、1 THz (他方のポンプレーザは 1542 nm に同調させる)、10 THz (他方のポンプレーザは 1473 nm に同調させる)、または 100 THz (他方のポンプレーザは 1022 nm に同調させる) に設定することができる。次いで、共発振デュアルモード SBL 出力間の差周波数は、(図 3 に示すような) 分周工程において安定光周波数基準として用いられる。任意の適切な光分周器を用いることができる。例えば、いくつかの例では上記した電気光学分周器を用いることができる。いくつかのその他の例では、OFD は従来のモードロック光周波数コム (OFC: optical frequency comb) に基づく。その場合、OFC の 2 つのコム線は、OFC の繰り返し率が安定した分周マイクロ波出力を可能にするように 2 つの SBL に周波数ロックされる。しかしながら、本発明に係る電気光学分周器はより単純に実行できるものであり、しかも、モードロックされた OFC に基づく光分周に重大な問題を提起してきた高帯域幅光検出の線形性制約を緩和することが確認されている。

10

20

30

40

50

【0054】

90 / 10 ヒューズカプラと、さまざまなキャビティ往復経路長 45 メートル (FSR: 4.4 MHz)、200 メートル (FSR: 1 MHz)、および 500 メートル (FSR: 400 kHz) とからなる一連の FLC が作製されているが、ファイバーループ・キャビティ長としては、任意のその他の必要な、所望の、または適切な長さを用いることもできる。例えば、約 40 メートル以上、約 100 メートル以上、約 200 メートル以上、または約 500 メートル以上であってもよい。その他すべての条件が等しい場合、ファイバーループ光共振器が長い方が短い場合と比べて、周波数が低くかつ位相ノイズが少ない場合が多い。これら FLC の光フィネスの測定値は大体 40 であり (カブラー損失により主に制限される)、SBS 発振のポンプ閾値は数百マイクロワット程度である。SBL 閾値を上回ると、各ポンプレーザ (波長領域 1550 nm) のポンプパワーは、共振器において一次ストークス周波数におけるレーザ発振が二次ストークス波を励起し始めるポイント (約 1 mW) に達するまで増加する。図 9 B に、FLC を 1537.2 nm および 1549.6 nm でデュアルポンピングすることで得た、周波数分離 1.61 THz (12.5 nm) を有するデュアルモード SBL 差周波数基準の測定光スペクトルを示す。二次ストークス線の発振開始により、一次ストークス線のキャビティ内パワーが固定されたように見えることが確認された。デュアルモード SBL の相対周波数安定性の基本的限界は、ブリルアンレーザのシャウロウ・タウンズ周波数ノイズ (S_v) によって決まり、それはパワー固定時、共振光モード体積に反比例して変化することが確認されている。ファイバーループ・キャビティが長いほど有効なモード体積が大きくなり、したがって、二次ストークス線発振の開始により生じるパワー固定時にシャウロウ・タウンズのノイズが減少する。

【0055】

デュアルモード SBL の相対周波数安定性 (すなわち差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ の安定性) の位相ノイズを特徴付けるために、デュアル SBL の周波数分離は、高速フォトダイオードを用いて直接検出できるくらい十分低い周波数に同調され、電子的に処理される (これは本質的には統一した分周の場合である)。検出されたうなり音は 20 GHz に設定され、その位相ノイズは位相ノイズ分析器 (ローデ・シュワルツ社製、モデル番号 FSUP 26) を用いて測定される。図 9 A には、さまざまな FLC における SBL うなり音の単一側波帯 (SSB: single-sideband) の測定位相ノイズスペクトルを示す (45 m の FLC

：一番上の実曲線、200mのFLC：真ん中の実曲線、500mのFLC：一番下の実曲線）。すべての測定位相ノイズスペクトルが、数Hzから始まって100kHzを上回るオフセット周波数の広範囲にわたって、シャウロウ・タウンズのノイズによって制限される位相ノイズ（ $1/f^2$ 依存）を示している。SBLの共通モード技術的ノイズは、光検出時にうなり音信号を実質的に相殺する。したがって、デュアルモードSBLにおける相対周波数安定性の位相ノイズは、基本的なシャウロウ・タウンズ・ノイズによって制限され、かつ2つの共発振SBL間の周波数分離に対しては不変である。したがって、より大きい差周波数に同調されたデュアルモードSBLを用いた場合、光分周工程によって位相ノイズの大幅な低減がもたらされる。光学的に分周されたマイクロ波周波数信号（ f_M ）は、分周比 $N = (v_2 - v_1) / f_M$ の2乗分だけ光位相ノイズの低減を得る。例えば、分周係数 $N = 100$ の場合、位相ノイズ低減係数は10000（または $20 \log 10 N = 40 \text{ dB}$ ）となる。

10

【0056】

さらに、デュアルモードSBLの差周波数の単一側波帯（SSB：single-side-band）の（光分周を一切行わない状態での）測定位相ノイズは、以前の結果と比較して既に改善されている。デュアルモードSBLのうなり音の測定位相ノイズ（キャリア：20GHz、オフセット周波数：1kHz）は、図9Aに示すように、 -95 dBc / Hz （45mのFLC）、 -101 dBc / Hz （200mのFLC）、 -105 dBc / Hz （500mのFLC）である。500mのFLCは、往復長約18mmのディスク共振器の場合の約 -83 dBc / Hz とは対照的に、オフセット周波数10kHzにおいて約 -125 dB / Hz を示した。FLC長が伸びるにつれて位相ノイズの略線形減少が確認される。これは、キャピティモデル体積におけるSBLの既知のシャウロウ・タウンズのノイズの逆依存とよく一致している。20GHzのうなり音のアラン偏差（ADEV：Allan Deviation）も測定した。ゲート時間が $0.2 \text{ s} \sim 1 \text{ s}$ の場合、測定した部分ADEVは 1×10^{-11} 程度である。これに対して以前の事例では、20メートルのFLCから発生しデュアルモードSBLの直接光検出に基づき、オフセット周波数1kHzにおけるうなり音 $5 \sim 20 \text{ GHz}$ での測定位相ノイズは -90 dBc / Hz であった。その他の事例では、うなり音 148 MHz でのアラン偏差が示され、ゲート時間 $0.2 \text{ s} \sim 1 \text{ s}$ の場合、 1×10^{-7} 程度の部分ADEVが確認されている。発明者の知る限り、本明細書で報告した結果は、直接うなり音を発生させることに基づくマイクロ波源と光分周に基づくマイクロ波源の両方を含め、マイクロ波フォトンクスにおいて低位相ノイズマイクロ波を発生させるにあたり、FLC長を増加させることによりSBLのシャウロウ・タウンズのノイズを低減できることを最初に示すものである。

20

30

【0057】

最後に、デュアルモードSBL差周波数基準（200mのFLCに基づく）からのOFDに基づいて光学的に分周されたマイクロ波信号の予測位相ノイズも図9Aに示す。一番上、真ん中、一番下の破曲線は分周比 $N = 33$ 、 100 、 330 にそれぞれ対応する。光分周されたマイクロ波信号のキャリア周波数は10GHzに固定されている。したがって、これらの分周比は、 330 GHz 、 1 THz 、 3.3 THz に設定されたデュアルモードSBLの周波数分離にそれぞれ対応する。

40

【0058】

図9Aに見られる予測位相ノイズレベルは記録的に低いレベルである。また、SBL差周波数基準に基づく発振器は高価なハードウェアを必要としないうえ、真空状態または極低温状態において動作させる必要もない。結果として、この技術はレーダ、通信、ナビゲーション・システムなど種々の用途に容易に採用することができる。

【0059】

先の説明に加えて、以下の例も本開示または添付の特許請求の範囲に含まれる。

【0060】

（例1）出力周波数 f_M を有する出力電気信号を発生させるためのマイクロ波周波数源であって、該マイクロ波周波数源は、

50

(a) (i) 第 1 の光基準周波数 ν_1 を有する第 1 の光基準信号と、(i i) 第 2 の光基準周波数 $\nu_2 > \nu_1$ を有する第 2 の光基準信号とを発生するように構成されたデュアル光周波数基準源と、

(b) (i) 前記第 1 および第 2 の光基準信号と前記周波数 f_M を有する側波帯発生器入力電気信号とを受信し、(i i) それら信号から、 $\nu_1 \pm n_1 f_M$ および $\nu_2 \pm n_2 f_M$ (n_1 および n_2 は整数) で表わされる側波帯光周波数をそれぞれ有する多数の側波帯光信号を発生するように構成された電気光学側波帯発生器と、

(c) 周波数 $\nu_1 + N_1 f_M$ を有する側波帯光信号および周波数 $\nu_2 - N_2 f_M$ を有する側波帯光信号 (N_1 および N_2 は整数) を含む前記多数の側波帯光信号のサブセットを送信するように構成された光帯域フィルタと、

(d) (i) 前記送信された側波帯光信号を受信し、(i i) うなり周波数 $f_{BEAT} = (\nu_2 - N_2 f_M) - (\nu_1 + N_1 f_M)$ を有する光学検出器電気信号を発生するように構成された光学検出器と、

(e) 基準発振器周波数 f_R を有する基準発振器電気信号を発生するように構成された基準発振器と、

(f) 電気回路であって、(i) 前記光学検出器電気信号および前記基準発振器電気信号を受信し、(i i) それら信号から、前記電気回路の比較器部分を用いて、前記光学検出器電気信号と前記基準発振器電気信号の相対位相に依存する電気誤差信号を発生させ、(i i i) 前記電気回路のループフィルタ部を用いて前記電気誤差信号を処理するように構成された前記電気回路と、

(g) (i) 前記ループフィルタ部で処理された電気誤差信号を VCO 入力電気信号として受信し、(i i) 前記周波数 f_M を有する VCO 出力電気信号を発生するように構成された電圧制御電気発振器であって、前記 VCO 出力電気信号の第 1 の部分は、前記側波帯発生器入力電気信号として前記電気光学側波帯発生器に受信され、前記 VCO 出力電気信号の第 2 の部分は、前記マイクロ波周波数源の前記出力電気信号となる、前記電圧制御電気発振器と、を備え、

(h) 前記電気光学側波帯発生器が前記 VCO 出力電気信号の前記第 1 の部分を前記側波帯発生器入力電気信号として受信した結果、前記電気回路と前記電圧制御発振器は、位相ロックループとして機能するように負フィードバック構成において接続する、マイクロ波周波数源。

【 0 0 6 1 】

(例 2) 前記マイクロ波周波数源の前記出力電気信号の位相ノイズは、前記デュアル光周波数基準源の、基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ を有する基準差周波数信号の位相ノイズと比べて、約 $(N_1 + N_2)^2$ 分の 1 である、例 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 6 2 】

(例 3) 前記出力周波数 f_M は約 0 . 3 G H z ~ 約 3 0 0 G H z である、例 1 または例 2 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 6 3 】

(例 4) 前記出力周波数 f_M は約 1 G H z ~ 約 1 0 0 G H z である、例 1 または例 2 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 6 4 】

(例 5) 前記基準発振器周波数および前記うなり周波数は、約 1 M H z ~ 約 5 0 0 M H z である、例 1 ~ 4 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 6 5 】

(例 6) 前記基準発振器周波数および前記うなり周波数は、約 5 M H z ~ 約 1 0 0 M H z である、例 1 ~ 4 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 6 6 】

(例 7) 前記基準発振器周波数および前記うなり周波数は、約 1 0 M H z ~ 約 5 0 M H z である、例 1 ~ 4 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 6 7 】

10

20

30

40

50

(例 8) 前記基準発振器は水晶発振器(例えば石英発振器)を含む、例 1 ~ 7 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0068】

(例 9) 前記基準発振器は電気発振器(例えば周波数合成発振器)を含む、例 1 ~ 7 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0069】

(例 10) 基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 100 GHz よりも大きい、例 1 ~ 9 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0070】

(例 11) 基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 1 THz よりも大きい、例 1 ~ 9 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

10

【0071】

(例 12) 基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 10 THz よりも大きい、例 1 ~ 9 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0072】

(例 13) 基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 100 THz よりも大きい、例 1 ~ 9 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0073】

(例 14) $N_1 + N_2$ が 10 以上である、例 1 ~ 13 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

20

【0074】

(例 15) $N_1 + N_2$ が 50 以上である、例 1 ~ 13 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0075】

(例 16) $N_1 + N_2$ が 100 以上である、例 1 ~ 13 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0076】

(例 17) $N_1 + N_2$ が 1000 以上である、例 1 ~ 13 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0077】

(例 18) 前記第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 は、それぞれ、約 75 THz ~ 約 750 THz である、例 1 ~ 17 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

30

【0078】

(例 19) 前記第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 は、それぞれ、約 120 THz ~ 約 430 THz である、例 1 ~ 17 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0079】

(例 20) 前記第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 は、それぞれ、約 150 THz ~ 約 300 THz である、例 1 ~ 17 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

40

【0080】

(例 21) 前記デュアル光周波数基準源は、(i) 基準差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ の変動を動作的に許容できる光基準帯域幅内に維持するか、または(ii) 基準差周波数信号の位相ノイズを動作的に許容できる基準位相ノイズレベル内に維持するように安定化される、例 1 ~ 20 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【0081】

(例 22) 前記動作的に許容できる基準帯域幅は、約 1 秒の時間尺に対して約 100 Hz 未満である、例 21 に記載のマイクロ波周波数源。

【0082】

(例 23) 前記動作的に許容できる基準帯域幅は、約 1 秒の時間尺に対して約 1 Hz 未

50

満である、例 2 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 8 3 】

(例 2 4) 前記動作的に許容できる基準位相ノイズレベルは、オフセット周波数 1 0 0 H z では約 - 4 0 d B c / H z であり、オフセット周波数 1 0 k H z では約 - 8 0 d B c / H z である、例 2 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 8 4 】

(例 2 5) 前記動作的に許容できる基準位相ノイズレベルは、オフセット周波数 1 0 0 H z では約 - 8 0 d B c / H z であり、オフセット周波数 1 0 k H z では約 - 1 2 5 d B c / H z である、例 2 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 8 5 】

(例 2 6) (i) 前記デュアル光周波数基準源は第 1 および第 2 のポンプレーザ源と光共振器とを備え、(i i) 前記光共振器の自由スペクトル領域が、前記光共振器のブリルアンシフト周波数の整数分の 1 と実質的に等しく、(i i i) 前記第 1 および第 2 のポンプレーザ源のそれぞれは、前記光共振器の対応する共振光モードに周波数ロックされ、(i v) 前記第 1 および第 2 の光基準信号は、それぞれ、前記第 1 および第 2 のポンプレーザ源が前記光共振器を同時に光ポンピングすることによって発生した誘導ブリルアンレーザ出力を含む、例 1 ~ 2 5 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 8 6 】

(例 2 7) 前記光共振器の前記自由スペクトル領域は、前記光共振器の前記ブリルアンシフト周波数と実質的に等しい、例 2 6 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 8 7 】

(例 2 8) 前記光共振器はシリカを含み、前記光共振器のブリルアンシフト周波数は約 1 0 . 9 G H z である、例 2 6 または 2 7 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 8 8 】

(例 2 9) 前記光共振器はリング光共振器を含む、例 2 6 ~ 2 8 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 8 9 】

(例 3 0) 前記リング光共振器はディスク光共振器を含む、例 2 9 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 9 0 】

(例 3 1) 前記光共振器は光ファイバ共振器を含む、例 2 6 ~ 2 8 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 9 1 】

(例 3 2) 前記光共振器はファブリ・ペロー光ファイバ共振器を含む、例 3 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 9 2 】

(例 3 3) 前記光ファイバ共振器はファイバループ光共振器を含む、例 3 1 に記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 9 3 】

(例 3 4) 前記第 1 および第 2 のポンプレーザ源のそれぞれは、P o u n d D r e v e r H a l l 法によって前記光共振器の前記対応する共振光モードに周波数ロックされる、例 2 6 ~ 3 3 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 9 4 】

(例 3 5) 前記デュアル光周波数基準源はデュアルモード・レーザ源を備えている、例 1 ~ 2 5 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

【 0 0 9 5 】

(例 3 6) 前記デュアル光周波数基準源は第 1 および第 2 の基準レーザ源を備え、該第 1 および第 2 のレーザ源は、それぞれ、共通光基準キャビティの対応する別個の共振光モードに周波数ロックされている、例 1 ~ 2 5 のいずれか 1 つに記載のマイクロ波周波数源。

。

10

20

30

40

50

【0096】

(例37) 前記デュアル光周波数基準源は第1および第2の基準レーザ源を備え、該第1および第2のレーザ源は、それぞれ、対応する別個の原子遷移に周波数ロックされている、例1~25のいずれか1つに記載のマイクロ波周波数源。

【0097】

(例38) (i) 前記電気光学側波帯発生器は、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によってそれぞれ駆動される1つまたは複数の電気光学位相変調器を備え、(ii) 前記1つまたは複数の位相変調器は、前記多数の光側波帯信号を発生するように前記第1及び第2の光基準信号を送信するよう構成されている、例1~37のいずれか1つに記載のマイクロ波周波数源。

10

【0098】

(例39) (i) 前記電気光学側波帯発生器は、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によってそれぞれ駆動される2つ以上の電気光学位相変調器を備え、(ii) 前記2つ以上の位相変調器は、前記多数の光幅波帯信号を発生するように前記第1および第2の光基準信号を連続的に送信するよう直列に配置されている、例1~37のいずれか1つに記載のマイクロ波周波数源。

【0099】

(例40) 複数対の側波帯光信号が、2から少なくとも30までの範囲の $n_1 + n_2$ で発生する、例38または39に記載のマイクロ波周波数源。

【0100】

(例41) 複数対の側波帯光信号が、2から少なくとも100までの範囲の $n_1 + n_2$ で発生する、例38または39に記載のマイクロ波周波数源。

20

【0101】

(例42) (i) 前記電気光学側波帯発生器は、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によってそれぞれ駆動される1つまたは複数の電気光学位相変調器と、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号の対応する部分によって駆動される強度変調器と、分散補償器と、光増幅器と、非線形光媒質とをさらに備え、(ii) 前記1つまたは複数の位相変調器、前記強度変調器、前記分散補償器、前記光増幅器、および前記非線形光媒質は、前記多数の光側波帯信号を発生するように前記第1及び第2の光基準信号を連続的に送信するよう順番に直列に配置されている、例1~41のいずれか1つに記載のマイクロ波周波数源。

30

【0102】

(例43) 複数対の側波帯光信号が、2から少なくとも100までの範囲の $n_1 + n_2$ で発生する、例38~42のいずれか1つに記載のマイクロ波周波数源。

【0103】

(例44) 複数対の側波帯光信号が、2から少なくとも10000までの範囲の $n_1 + n_2$ で発生する、例38~42のいずれか1つに記載のマイクロ波周波数源。

【0104】

(例45) (i) 前記強度変調器は電気光学マッハ・ツェンダ変調器を含み、(ii) 前記分散補償器は適切な分散性を有する光ファイバを含み、(iii) 前記光増幅器はドープ処理された光ファイバ増幅器を含み、(iv) 前記非線形光媒質は非線形光ファイバを含む、例42~44のいずれか1つに記載のマイクロ波周波数源。

40

【0105】

(例46) 例1~45のいずれか1つに記載のマイクロ波周波数源を用いて、出力周波数 f_M を有するマイクロ波周波数出力電気信号を発生させる方法であって、該方法は、

(a) 前記デュアル光周波数基準源を用いて、(i) 前記第1の光基準周波数 ν_1 を有する前記第1の光基準信号と、(ii) 前記第2の光基準周波数 $\nu_2 > \nu_1$ を有する前記第2の光基準信号とを発生させることと、

(b) 前記電気光学側波帯発生器を用いて、(i) 前記第1および第2の光基準信号と、前記周波数 f_M を有する前記側波帯発生器入力電気信号とを受信し、(ii) それら信

50

号から、 $v_1 \pm n_1 f_M$ および $v_2 \pm n_2 f_M$ (n_1 および n_2 は整数) で表わされる側波帯光周波数をそれぞれ有する多数の側波帯光信号を発生させることと、

(c) 前記光帯域フィルタを用いて、前記周波数 $v_1 + N_1 f_M$ を有する側波帯光信号および前記周波数 $v_2 - N_2 f_M$ を有する側波帯光信号 (N_1 および N_2 は整数) を含む前記多数の側波帯光信号の前記サブセットを送信することと、

(d) 前記光学検出器を用いて、(i) 前記送信された側波帯光信号を受信し、(ii) 前記うなり周波数 $f_{BEAT} = (v_2 - N_2 f_M) - (v_1 + N_1 f_M)$ を有する前記光学検出器電気信号を発生させることと、

(e) 前記基準発振器を用いて、前記基準発振器周波数 f_R を有する前記基準発振器電気信号を発生させることと、

(f) 前記電気回路を用いて、(i) 前記光学検出器電気信号および前記基準発振器電気信号を受信し、(ii) 前記電気回路の前記比較器部分を用いて、前記光学検出器電気信号および前記基準発振器電気信号から、前記光学検出器電気信号と前記基準発振器電気信号の相対位相に依存する前記電気誤差信号を発生させ、(iii) 前記電気回路の前記ループフィルタ部を用いて、前記電気誤差信号を処理することと、

(g) 前記電圧制御電気発振器を用いて、(i) 前記ループフィルタ部で処理された電気誤差信号を前記VCO入力電気信号として受信し、(ii) 前記周波数 f_M を有する前記VCO出力電気信号を発生させることとであって、前記VCO出力電気信号の前記第1の部分は、前記側波帯発生器入力電気信号として前記電気光学側波帯発生器に受信され、前記VCO出力電気信号の前記第2の部分は、前記マイクロ波周波数出力電気信号となる、前記VCO出力電気信号を発生させることとを含み、

(h) 前記電気光学側波帯発生器が前記側波帯発生器入力電気信号として前記VCO出力電気信号の前記第1の部分を受信した結果、前記電気回路と前記電圧制御発振器は、位相ロックループとして機能するように負フィードバック構成において接続する、マイクロ波周波数出力電気信号を発生させる方法。

【0106】

(例47) (a) 第1および第2のポンプレーザ周波数 v_{pump1} および v_{pump2} において光ポンプパワーをそれぞれ発生するように構成された第1および第2のポンプレーザ源と、(b) ブリルアンシフト周波数 v_B および該ブリルアンシフト周波数の整数分の1と実質的に等しい自由スペクトル領域によって特徴付けられる光共振器と、を備えたデュアル周波数光源であって、(c) 前記第1および第2のポンプレーザ源のそれぞれは、前記光共振器の対応する共振光モードに周波数ロックされており、(d) 前記デュアル周波数光基準源の第1および第2の光出力信号は、それぞれ第1および第2の出力周波数 $v_1 = v_{pump1} - v_B$ および $v_2 = v_{pump2} - v_B$ を有するとともに、それぞれ前記第1および第2のポンプレーザ源による前記光共振器の同時光ポンピングによって発生する誘導ブリルアンレーザ出力を含み、(e) 出力差周波数 $v_2 - v_1$ が約300GHzよりも大きい、デュアル周波数光源。

【0107】

(例48) 前記光共振器の前記自由スペクトル領域は、前記光共振器のブリルアンシフト周波数と実質的に等しい、例47に記載のデュアル周波数光源。

【0108】

(例49) 前記光共振器はリング光共振器を含む、例47または48に記載のデュアル周波数光源。

【0109】

(例50) 前記リング光共振器はディスク光共振器を含む、例49に記載のデュアル周波数光源。

【0110】

(例51) 前記光共振器は光ファイバ共振器を含む、例47または48に記載のデュアル周波数光源。

【0111】

10

20

30

40

50

(例 5 2) 前記光ファイバ共振器はファブリ・ペロー光ファイバ共振器を含む、例 5 1 に記載のデュアル周波数光源。

【0 1 1 2】

(例 5 3) 前記光ファイバ共振器はファイバループ光共振器を含む、例 5 1 に記載のデュアル周波数光源。

【0 1 1 3】

(例 5 4) 前記光ファイバ共振器は、長さ約 40メートル以上の光ファイバを含む、例 5 1 ~ 5 3 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

【0 1 1 4】

(例 5 5) 前記光ファイバ共振器は、長さ約 100メートル以上の光ファイバを含む、例 5 1 ~ 5 3 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

10

【0 1 1 5】

(例 5 6) 前記光ファイバ共振器は、長さ約 200メートル以上の光ファイバを含む、例 5 1 ~ 5 3 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

【0 1 1 6】

(例 5 7) 前記光ファイバ共振器は、長さ約 500メートル以上の光ファイバを含む、例 5 1 ~ 5 3 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

【0 1 1 7】

(例 5 8) 前記光共振器はシリカを含み、前記光共振器の前記ブリルアンシフト周波数は約 10.9 GHz である、例 4 7 ~ 5 7 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

20

【0 1 1 8】

(例 5 9) 前記出力差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 1 THz よりも大きい、例 4 7 ~ 5 8 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

【0 1 1 9】

(例 6 0) 前記出力差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 10 THz よりも大きい、例 4 7 ~ 5 8 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

【0 1 2 0】

(例 6 1) 前記出力差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ が約 100 THz よりも大きい、例 4 7 ~ 5 8 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

【0 1 2 1】

30

(例 6 2) 前記第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 はそれぞれ約 75 THz ~ 約 750 THz である、例 4 7 ~ 6 1 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

【0 1 2 2】

(例 6 3) 前記第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 はそれぞれ約 120 THz ~ 約 430 THz である、例 4 7 ~ 6 1 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

【0 1 2 3】

(例 6 4) 前記第 1 および第 2 の光基準周波数 ν_1 および ν_2 はそれぞれ約 150 THz ~ 約 300 THz である、例 4 7 ~ 6 1 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

【0 1 2 4】

(例 6 5) 前記デュアル周波数光源は、(i) 前記出力差周波数 $\nu_2 - \nu_1$ の変動を動作的に許容できる光帯域幅内に維持するか、または (ii) 前記出力差周波数を有する光信号の位相ノイズを動作的に許容できる基準位相ノイズレベル内に維持するように安定化される、例 4 7 ~ 6 4 のいずれか 1 つに記載のデュアル周波数光源。

40

【0 1 2 5】

(例 6 6) 前記動作的に許容できる帯域幅は、約 1 秒の時間尺に対して約 100 Hz 未満である、例 6 5 に記載のデュアル周波数光源。

【0 1 2 6】

(例 6 7) 前記動作的に許容できる帯域幅は、約 1 秒の時間尺に対して約 1 Hz 未満である、例 6 5 に記載のデュアル周波数光源。

【0 1 2 7】

50

(例68) 前記動作的に許容できる基準位相ノイズレベルは、オフセット周波数100 Hzでは約-40 dBc / Hzであり、オフセット周波数10 kHzでは約-80 dBc / Hzである、例65に記載のデュアル周波数光源。

【0128】

(例69) 前記動作的に許容できる基準位相ノイズレベルは、オフセット周波数100 Hzでは約-80 dBc / Hzであり、オフセット周波数10 kHzでは約-125 dBc / Hzである、例65に記載のデュアル周波数光源。

【0129】

(例70) 前記第1および第2のポンプレーザ源のそれぞれは、Pound Drev er Hall法によって前記共振器の前記対応する共振光モードに周波数ロックされる、例65~69のいずれか1つに記載のデュアル周波数光源。

10

【0130】

(例71) 例47~70のいずれか1つに記載のデュアル周波数光源を用いて、第1および第2の光出力信号を発生させる方法であって、該方法は、前記第1および第2のポンプレーザ源からの光ポンプパワーを用いて前記光共振器を同時にポンピングすることを含み、(a) 前記第1および第2のポンプレーザ源は、それぞれ、第1および第2のポンプレーザ周波数 v_{pump1} および v_{pump2} において光ポンプパワーを発生するように構成され、(b) 前記光共振器は、ブリルアンシフト周波数 v_B および該ブリルアンシフト周波数の整数分の1と実質的に等しい自由スペクトル領域によって特徴付けられ、(c) 前記第1および第2のポンプレーザ源のそれぞれは、前記光共振器の対応する共振光モードに周波数ロックされており、(d) 前記第1および第2の光出力信号は、それぞれ第1および第2の出力周波数 $v_1 = v_{pump1} - v_B$ および $v_2 = v_{pump2} - v_B$ を有するとともに、それぞれ前記第1および第2のポンプレーザ源による前記光共振器の同時光ポンピングによって発生する誘導ブリルアンレーザ出力を含み、(e) 出力差周波数 $v_2 - v_1$ が約300 GHzよりも大きい、第1および第2の光出力信号を発生させる方法。

20

【0131】

(例72) 光分周器を用いて、分周係数Nによって前記出力差周波数を分周することをさらに含む、例71に記載の方法。

【0132】

(例73) 前記分周係数が約10以上である、例72に記載の方法。

30

【0133】

(例74) 前記分周係数が約100以上である、例72に記載の方法。

【0134】

(例75) 前記分周係数が約1000以上である、例72に記載の方法。

【0135】

(例76) 前記デュアル光周波数基準源が、例47~70のいずれか1つに記載のデュアル周波数光源を備えている、例1~45のいずれか1つに記載のマイクロ波周波数源。

【0136】

(例77) 前記デュアル光周波数基準源が、例47~70のいずれか1つに記載のデュアル周波数光源を備えている、例46に記載の方法。

40

【0137】

(例78) 例71~75のいずれか1つに記載の方法を行うことをさらに含む、例77に記載の方法。

【0138】

本開示の範囲または添付の特許請求の範囲には開示した例示的な実施形態および方法の均等物も含むことを意図する。開示した例示的な実施形態および方法ならびにそれらの均等物には、本開示の範囲内または添付の特許請求の範囲内にある限り、修正を加えることも意図する。

【0139】

50

前述の「発明を実施するための形態」においては、開示を効率的に行うため、さまざまな特徴をまとめていくつかの例示的实施形態とした場合もあるが、この開示方法は、任意の特許請求する実施形態がその対応請求項に明白に記載されている特徴よりも多くの特徴を要するという意図を反映すると解釈されるべきではない。むしろ、添付の特許請求の範囲に反映されるように、本発明の主題は、一つの開示された例示的实施形態のすべての特徴より少ない特徴でも構成されうる。したがって、添付の特許請求の範囲は、その各請求項が別の開示された実施形態としてそれぞれ独立している状態で「発明の実施するための形態」に組み込むこととする。しかしながら、本開示は、本開示または添付の特許請求の範囲に記載した1つまたは複数の開示された特徴または特許請求された特徴からなる任意の適切なセット（すなわち、両立するとともに相互排他的でない特徴のセット）を有する任意の実施形態を暗示すると解釈されるものである。また上記セットには本明細書に明示的に開示されないセットも含まれる。加えて、本開示では、添付の各従属請求項は、多項従属形式かつ矛盾しない範囲ですべての先行請求項に従属する形式で記載されているかのように解釈されるものである。添付の特許請求の範囲は、必ずしも本明細書に開示する主題全体を包含するものではないことにもさらに留意されたい。

10

20

30

40

【0140】

本開示および添付の特許請求の範囲においては、接続詞「または」は、(i)別段に明示するか（例えば、「...のいずれか」、「いずれか一方」、または類似の文言を使用して）、または(ii)2つ以上のリストされた代替案が特定の文脈において相互排他的でない（この場合「または」は非相互排他的な代替案を含む組み合わせのみを包含することになる）限り、包括的なものとして解釈されるべきである（例えば、「イヌまたはネコ」は「イヌ、ネコ、または両方」と解釈され、「イヌ、ネコ、またはネズミ」は「イネ、ネコ、ネズミ、これらのうちの2つ、またはこれら3つとも」と解釈されることになる）。本開示および添付の特許請求の範囲においては、「備える (comprising)」、「含む (including)」、「有する (having)」という用語、およびそれらの活用形は、どの場面で使われていても非限定的 (open-ended) な専門用語として解釈されるものとし、別段に明示しない限りは、「少なくとも」という用語がそれら各例の後ろに付いていた場合と同じ意味となる。

【0141】

添付の特許請求の範囲では、米国特許法第112条(f)の規定を装置の請求項で発動させたい場合、「手段 (means)」という用語をその装置の請求項に記載することになる。同規定を方法の請求項で発動させたい場合は、「するためのステップ (a step for)」という用語をその方法の請求項に記載することになる。逆に、「手段 (means)」または「ためのステップ (a step for)」という用語が請求項に存在しない場合、当該請求項に対して米国特許法第112条(f)の規定を発動させることを意図してはいない。

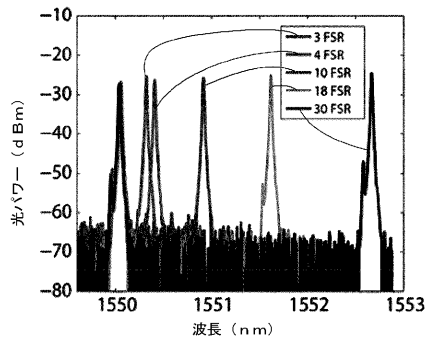
【0142】

1つまたは複数の開示が本明細書に参照により援用され、そのような援用開示が本開示と部分的または全体的に対立するかまたは本開示の範囲とは異なる場合、対立箇所、より広範な開示、またはより広範な用語の定義について本開示の方を優位とする。そのような援用開示同士が部分的また全体的に対立する場合は、対立箇所について、日付が後の方の開示を優位とする。

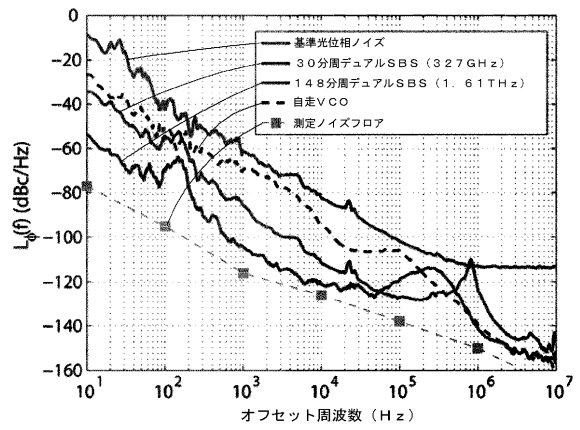
【0143】

要約書は、特許文献から特定の主題を調査しようとする人々の役に立つよう要件に従って提出した。しかしながら、要約書に記載した任意の要素、特徴、または限定を、任意の特定の請求項に必ず包含させるということは意図していない。各請求項に包含される主題の範囲は当該請求項の記載事項によってのみ画定されるものである。

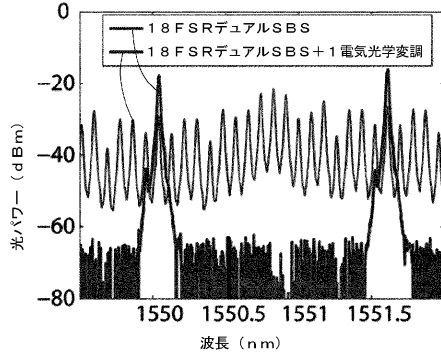
【図 5 A】



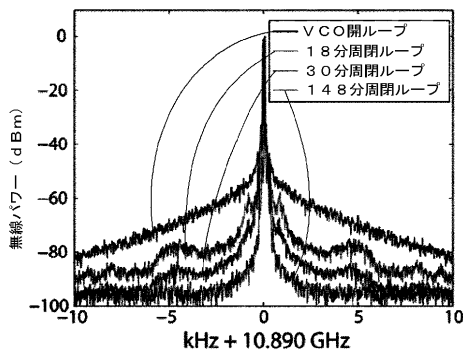
【図 5 C】



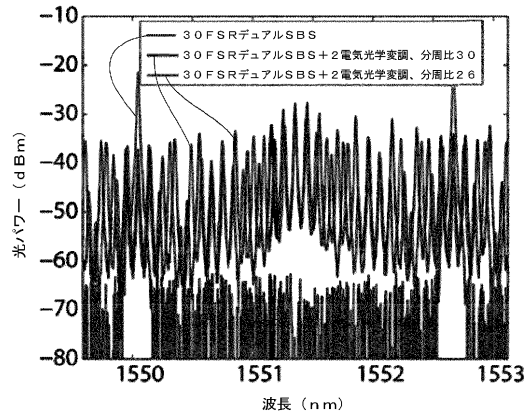
【図 5 B】



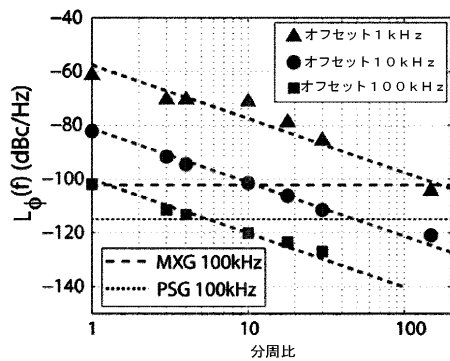
【図 5 D】



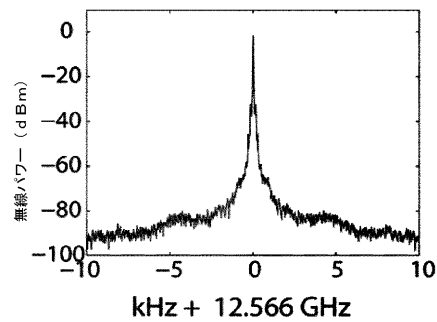
【図 6 A】



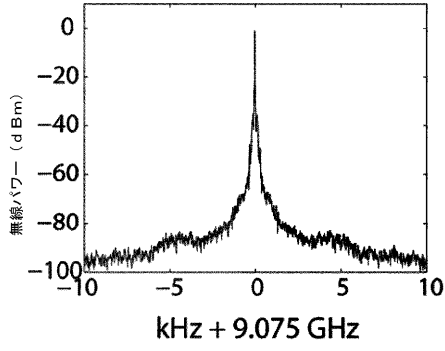
【図 5 E】



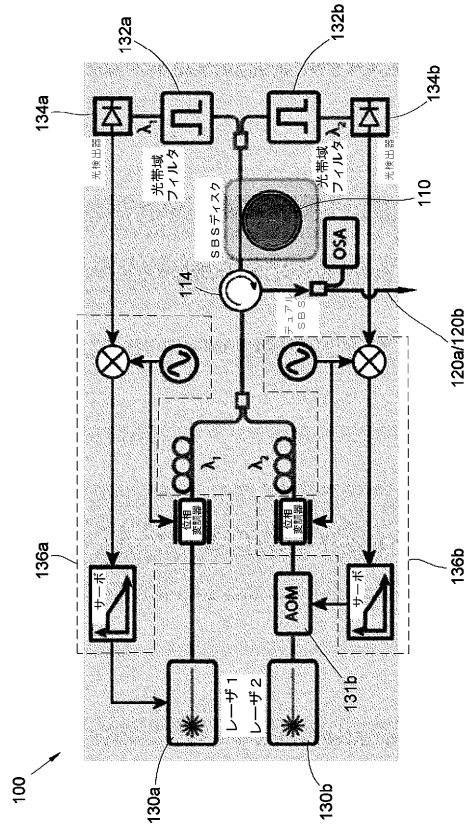
【図 6 B】



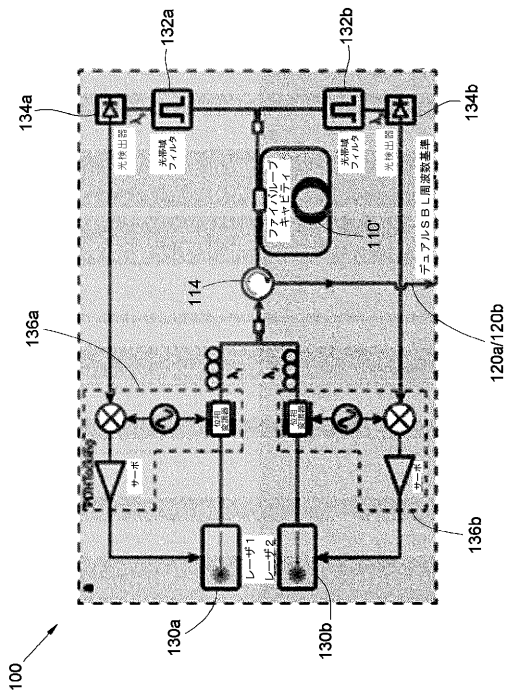
【図6C】



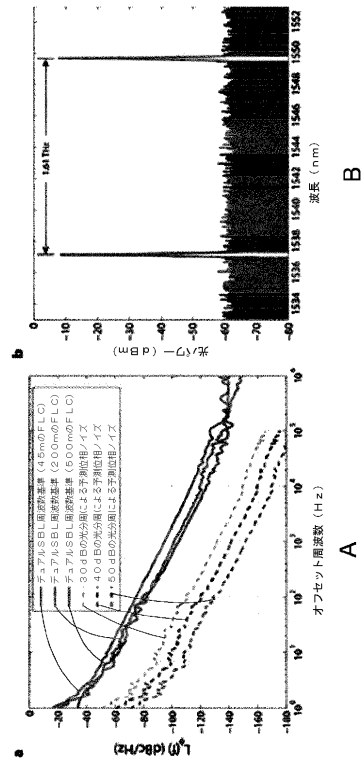
【図7】





【図8】



【図9】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US2015/012964
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01S 3/10(2006.01)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 3/10; H04J 4/00; H01S 3/30; H04J 14/02; H04B 10/00; H04J 14/00; H01S 3/00		
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: optical source, optical detector, reference oscillator, VCO, PLL		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2008-0075464 A1 (LUTFOLLAH MALEKI et al.) 27 March 2008 See paragraphs [0022]-[0028], claims 1-7 and figures 1-3.	1-46
A	US 2007-0127930 A1 (VLADIMIR PRODANOV et al.) 07 June 2007 See paragraph [0065] and figures 11-15.	1-46
A	US 2013-0163620 A1 (VINCENT LECOEUICHE) 27 June 2013 See paragraphs [0026]-[0038], [0066]-[0068] and figures 1-2, 7.	1-46
A	US 2002-0181041 A1 (DENNIS TONG) 05 December 2002 See paragraphs [0018]-[0025] and figures 1-2.	1-46
A	US 2001-0030796 A1 (X. STEVE YAO) 18 October 2001 See paragraphs [0075]-[0079] and figures 1A-3B.	1-46
<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 another 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 11 November 2015 (11.11.2015)		Date of mailing of the international search report 12 November 2015 (12.11.2015)
Name and mailing address of the ISA/KR  International Application Division Korean Intellectual Property Office 189 Cheongsu-ro, Seo-gu, Daejeon, 35208, Republic of Korea Facsimile No. +82-42-472-7140		Authorized officer LEE, Myung Jin Telephone No. +82-42-481-8474 

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/US2015/012964

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2008-0075464 A1	27/03/2008	US 7634201 B2 WO 2008-030782 A2 WO 2008-030782 A3	15/12/2009 13/03/2008 09/04/2009
US 2007-0127930 A1	07/06/2007	US 2007-0126489 A1 US 2007-0127613 A1 US 2007-0127615 A1 US 2007-0127921 A1 US 2007-0127922 A1 US 7500155 B2 US 7509516 B2 WO 2007-067606 A2 WO 2007-067606 A3 WO 2007-067609 A2 WO 2007-067609 A3 WO 2007-067631 A2 WO 2007-067631 A3 WO 2007-067634 A2 WO 2007-067634 A3 WO 2007-067635 A2 WO 2007-067635 A3 WO 2007-070329 A2 WO 2007-070329 A3	07/06/2007 07/06/2007 07/06/2007 07/06/2007 07/06/2007 03/03/2009 24/03/2009 14/06/2007 10/04/2008 14/06/2007 07/08/2008 14/06/2007 03/04/2008 14/06/2007 03/07/2008 14/06/2007 08/05/2008 21/06/2007 15/01/2009
US 2013-0163620 A1	27/06/2013	US 8693512 B2	08/04/2014
US 2002-0181041 A1	05/12/2002	US 7058312 B2	06/06/2006
US 2001-0030796 A1	18/10/2001	US 6178036 B1 US 6535328 B2	23/01/2001 18/03/2003

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, ST, 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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US

(71) 出願人 516163752

ガバメント オブ ザ ユナイテッド ステイツ オブ アメリカ アズ リプレゼンティッド
 バイ ザ セクレタリー オブ コマース
 アメリカ合衆国 メリーランド州 20899-2200 ゲサースブルグ ビューロー ドライ
 ブ 100 エムエス 2200 テクノロジー パートナーシップス オフィス

(74) 代理人 100147485

弁理士 杉村 憲司

(74) 代理人 100161148

弁理士 福尾 誠

(74) 代理人 100198568

弁理士 君塚 絵美

(72) 発明者

ケリー ヴァハラ

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 91125 パサデナ イースト カリフォルニア ブール
 バード 1200 エムシー 128-95 カリフォルニア インスティテュート オブ テク
 ノロジー

(72) 発明者

スコット ディダムス

アメリカ合衆国 コロラド州 80305 ボールダー ブロードウェイ 325 ナショナル
 インスティテュート オブ スタンダーズ アンド テクノロジー

(72) 発明者

リー チャン

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 91125 パサデナ イースト カリフォルニア ブール
 バード 1200 エムシー 128-95 カリフォルニア インスティテュート オブ テク
 ノロジー

(72) 発明者

イー シュウ

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 91125 パサデナ イースト カリフォルニア ブール
 バード 1200 エムシー 128-95 カリフォルニア インスティテュート オブ テク
 ノロジー

(72) 発明者

リー ハンスク

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 91125 パサデナ イースト カリフォルニア ブール
 バード 1200 エムシー 128-95 カリフォルニア インスティテュート オブ テク
 ノロジー

Fターム(参考) 2K102 AA10 BA01 BA19 BB04 BC04 DA06 EA25 EB06 EB20 EB22

5F172 AG03 CC04 EE12 EE20