

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2018年10月4日(04.10.2018)



(10) 国際公開番号

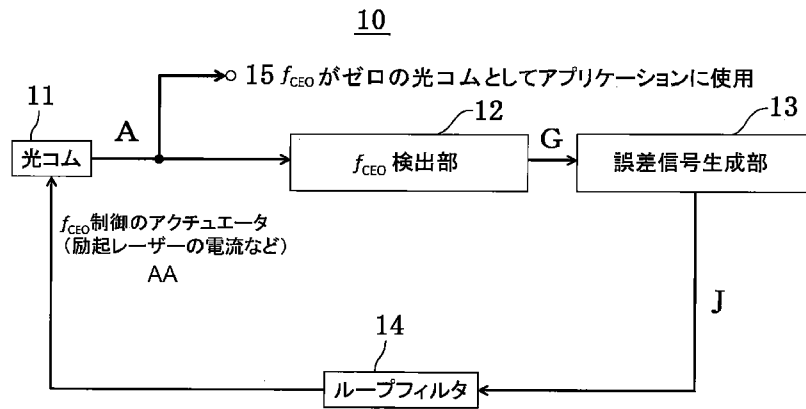
WO 2018/181213 A1

- (51) 国際特許分類:  
G02F 2/02 (2006.01) H01S 3/137 (2006.01)  
G02F 1/37 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2018/012205
- (22) 国際出願日: 2018年3月26日(26.03.2018)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2017-064316 2017年3月29日(29.03.2017) JP
- (71) 出願人: 国立研究開発法人産業技術総合研究所(NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY)
- [JP/JP]; 〒1008921 東京都千代田区霞が関 1-3-1 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 大久保 章(OKUBO, Sho); 〒3058563 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 稲場 肇(INABA, Hajime); 〒3058563 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 大苗 敦(ONAE, Atsushi); 〒3058563 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP).
- (74) 代理人: 青木 篤, 外(AOKI, Atsushi et al.); 〒1058423 東京都港区虎ノ門三丁目5

(54) Title: OPTICAL FREQUENCY COMB GENERATION DEVICE

(54) 発明の名称: 光周波数コム発生装置

図1



- 11 Optical comb
- 12  $f_{\text{CEO}}$  detection unit
- 13 Error signal generation unit
- 14 Loop filter
- 15 Used in application as optical comb having  $f_{\text{CEO}}=0$
- AA Actuator for  $f_{\text{CEO}}$  control (e.g. current of excitation laser)

(57) Abstract: An optical frequency comb generator 11 generates an optical frequency comb A which is a pulse laser beam represented by an aggregate of multiple line spectra having a given repetition frequency  $f_{\text{rep}}$ . An offset frequency  $f_{\text{ceo}}$  detection unit 12 outputs a detection signal which represents an offset frequency  $f_{\text{ceo}}$  detected by substantially attenuating, using a difference amplifier, the power of a component having a repetition frequency  $f_{\text{rep}}$  indicating a frequency spacing between adjacent line spectra of the supplied optical frequency comb A. An



WO 2018/181213 A1

番 1 号 虎ノ門 3 7 森ビル 青和特許  
法律事務所 Tokyo (JP).

- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): 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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, 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, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (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), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

---

error signal generation unit 13 generates, from the detection signal supplied from the offset frequency  $f_{\text{ceo}}$  detection unit 12, an error signal used for phase-synchronizing a component having a frequency difference ( $f_{\text{rep}} - f_{\text{ceo}}$ ) between the repetition frequency  $f_{\text{rep}}$  in the optical frequency comb generated from the optical frequency comb generator 11 and the offset frequency, with a component having a frequency sum ( $f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$ ), and supplies said error signal to the optical frequency comb generator 11 through a loop filter 14.

(57) 要約：光周波数コム発生器 11 は、一定の繰り返し周波数  $f_{\text{rep}}$  の複数の線スペクトルの集合体で表されるパルスレーザ光である光周波数コム A を発生する。オフセット周波数  $f_{\text{ceo}}$  検出部 12 は、供給された光周波数コム A の隣接する線スペクトラム間の周波数間隔を示す繰り返し周波数  $f_{\text{rep}}$  を持つ成分のパワーを差動アンプを用いて大幅に減衰させて検出したオフセット周波数  $f_{\text{ceo}}$  を表す検出信号を出力する。誤差信号生成部 13 は、オフセット周波数  $f_{\text{ceo}}$  検出部 12 から供給される検出信号から、光周波数コム発生器 11 から発する光周波数コム中の繰り返し周波数とオフセット周波数との差の周波数 ( $f_{\text{rep}} - f_{\text{ceo}}$ ) を持つ成分と、和の周波数 ( $f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$ ) を持つ成分とを位相同期するための誤差信号を生成し、ループフィルタ 14 を通して光周波数コム発生器 11 に供給する。

## 明 細 書

発明の名称：光周波数コム発生装置

技術分野

[0001] 本発明は、光周波数コム発生装置に関し、特にオフセット周波数  $f_{ceo}$  ゼロの光周波数コムを発生する光周波数コム発生装置に関する。

背景技術

[0002] 図13に示されるように、1本1本は細い周波数スペクトラムが一定の繰り返し周波数  $f_{rep}$  の周波数間隔で櫛歯状に並ぶ複数の線スペクトルの集合体で表されるパルスレーザ光である光周波数コムが、1オクターブ以上の帯域にわたって存在する場合、光周波数コムの周波数スペクトラム1300は、長波長(低周波数  $f(N)$ )を持つ成分と短波長(高周波数  $f(2N)$ )を持つ成分とを同時に含む。長波長(低周波数  $f(N)$ )を持つ成分及び短波長(高周波数  $f(2N)$ )を持つ成分は、オフセット周波数  $f_{ceo}$  だけオフセットされているため、それぞれの成分の周波数は、次式で表される。

$$f(N) = N \times f_{rep} + f_{ceo} \quad (1)$$

$$f(2N) = 2N \times f_{rep} + f_{ceo} \quad (2)$$

ただし、上式中  $N$  は0又は自然数であり、モード次数を示す。また、オフセット周波数  $f_{ceo}$  は正式にはキャリアエンベロープオフセット周波数と呼ばれる(ただし、本明細書では便宜上「オフセット周波数」と略す)。また、オフセット周波数  $f_{ceo}$  と繰り返し周波数  $f_{rep}$  との間には、次の不等式が成立する。

$$0 \leq f_{ceo} \leq f_{rep} \quad (3)$$

[0003] この光周波数コムのオフセット周波数  $f_{ceo}$  の制御は、精密周波数メトロロジ及び超高速物理だけでなく、化学及び天文においても重要な基盤技術である。特に、 $f_{ceo} = 0$  に制御された光周波数コムは、光周波数分周、または、キャリアエンベロープ位相を制御するアト秒光パルスの応用などをはじめ、多くの分野において有用である。光周波数コムのオフセット周波数  $f_{ceo}$  は、 $f - 2$

f 干渉計によって長波長成分の第2高調波(周波数  $2f(N)$ )を持つ光と短波長(高周波数  $f(2N)$ )を持つ光とを干渉させて得られる干渉信号において、第2高調波(周波数  $2f(N)$ )と短波長(高周波数  $f(2N)$ )を持つ成分とのビート信号として検出される。この  $f-2f$  干渉計では、周波数が安定なオフセット周波数  $f_{ceo}$  を得るため、光周波数コム(OC)のオフセット周波数  $f_{ceo}$  と基準マイクロ波信号との位相弁別が行われ、光周波数コム(OC)のオフセット周波数  $f_{ceo}$  と基準マイクロ波信号間の位相差が一定になるように位相同期することが一般的に行われる。しかし、ゼロ周波数(直流)には位相が存在せず位相弁別は不可能であるため、そのままではオフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロに安定化することができない。

[0004] そこで、従来より、オフセット周波数  $f_{ceo}$  がゼロとなる光周波数コムを発生する光周波数コム発生装置が提案されている(例えば、非特許文献1及び2、特許文献1参照)。非特許文献1には、オフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロとなる光周波数コムを発生する装置が開示されている。この装置は、音響光学変調器(AOM)により変調周波数  $f_{AOM}$  だけ周波数シフトした光周波数コムから  $f-2f$  干渉計を用いて周波数  $(f_{ceo} + f_{AOM})$  を検出し、このシフトした周波数を持つ信号を周波数  $f_{AOM}$  に位相同期することで、次式に従ってオフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロとする。

$$f_{ceo} + f_{AOM} = f_{AOM} \quad (4)$$

[0005] また、非特許文献2及び特許文献1には、広帯域化した光周波数コムに含まれる低周波数成分(周波数:  $f_{ceo} + n1 f_{rep}$ )と高周波数成分(周波数:  $f_{ceo} + n2 f_{rep}$ )とを、非線形光学結晶を用いた差周波発生器(DFG)に供給し、それらの差周波数成分(周波数:  $(n2-n1) f_{rep}$ )を生成することで、DFGからオフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロとした光周波数コムを出力させる装置が開示されている。

## 先行技術文献

### 非特許文献

[0006] 非特許文献1: Rausch et al., Opt. Express. 17, 20282, (2009)

非特許文献2：論文 Krauss et al., Opt.Lett. 36, 540 (2011)

## 特許文献

[0007] 特許文献1：米国特許出願公開第2012-0093181号明細書

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0008] しかしながら、AOMを用いる従来の光周波数コム発生装置では、高価なAOMが必要で装置全体として高価な構成となり、また、0次光の混入などによって制御に用いる信号のS/Nが低下するという課題がある。一方、DFGを用いる従来の光周波数コム発生装置では、DFGから得られるオフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロとした光周波数コムの帯域が狭いため、得られた光周波数コムに対してもう一度広帯域化処理（以下、単に「再広帯域化」と略す）を必要とするという課題がある。

[0009] 本発明は以上の点に鑑みなされたもので、簡単で、しかも再広帯域化が不要な構成によりオフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロとした光周波数コムを発生する光周波数コム発生装置を提供することを目的とする。

### 課題を解決するための手段

[0010] 上記の目的を達成するため、本発明の光周波数コム発生装置は、オフセット周波数  $f_{ceo}$  だけオフセットされ、かつ、一定の繰り返し周波数  $f_{rep}$  の周波数間隔で櫛歯状に並ぶ複数の線スペクトルの集合体で表されるパルスレーザ光である光周波数コムを発生する光周波数コム発生器と、光周波数コム発生器から出力された光周波数コムからオフセット周波数  $f_{ceo}$  を表す検出信号を生成して、その検出信号を出力する検出部と、その検出信号から周波数  $(f_{rep} - f_{ceo})$  を持つ成分と周波数  $(f_{rep} + f_{ceo})$  を持つ成分とを位相同期させるための誤差信号を生成し、その誤差信号を光周波数コム発生器にフィードバックして、光周波数コム発生器から出力される光周波数コム中のオフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロに可変制御する誤差信号検出部と、を有する。

## 発明の効果

[0011] 本発明による光周波数コム発生装置は、簡単で、しかも再広帯域化が不要な構成によりオフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロとした光周波数コムを発生することができる。

### 図面の簡単な説明

[0012] [図1]図 1 は、本発明に係る光周波数コム発生装置の一実施形態のブロック図である。

[図2]図 2 は、図 1 中の  $f_{ceo}$  検出部の一実施形態のブロック図である。

[図3]図 3 は、図 1 中の誤差信号生成部の一実施形態のブロック図である。

[図4A]図 4 A は、差動アンプから出力される信号の周波数スペクトラムを表す図である。

[図4B]図 4 B は、バンドパスフィルタから出力される信号の周波数スペクトラムを表す図である。

[図4C]図 4 C は、加算器により生成される誤差信号の波形を表す図である。

[図5]図 5 は、本実施形態の動作原理説明用周波数スペクトラム図である。

[図6]図 6 は、オフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部の第 1 変形例のブロック図である。

[図7]図 7 は、オフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部の第 2 変形例のブロック図である。

[図8A]図 8 A は、図 1 の光周波数コム発生装置における誤差信号検出部中の B P F の出力信号の周波数スペクトル図である。

[図8B]図 8 B は、 $f_{ceo}/f_{rep}$  の相対アラン偏差の測定結果を示す図である。

[図9]図 9 は、本発明に係る光周波数コム発生装置の一応用例のブロック図である。

[図10]図 1 0 は、図 9 中の  $f_{beat}$  検出部の一実施形態のブロック図である。

[図11]図 1 1 は、光コムから出力される光信号  $f(N)$  及びレーザ発振周波数  $f_w$  の周波数スペクトラム図である。

[図12]図 1 2 は、本発明に係る光周波数コム発生装置がオフセット周波数  $f_{ceo} = 0$  であることを確認するための装置構成、光コムからの光信号の周波数ス

ペクトラム、及び、測定したアウトオブブルーピート周波数と、光周波数200THzに対する相対アラン偏差を示す図である。

[図13]図13は、光コムから出力される周波数コムの一列の周波数スペクトラム図である。

### 発明を実施するための形態

[0013] 次に、本発明の実施形態について図面を参照して説明する。

図1は、本発明に係る光周波数コム発生装置の一実施形態のブロック図を示す。同図に示すように、本実施形態の光周波数コム発生装置10は、光周波数コム発生器（以下、単に「光コム」と略す）11、オフセット周波数 $f_{ceo}$ 検出部12、誤差信号生成部13、ループフィルタ14を含むフィードバックループ構成を有する。そして光周波数コム発生装置10は、光コム11からオフセット周波数 $f_{ceo}$ がゼロとなるように制御された制御後のパルスレーザ光である光周波数コムを出力する。

なお、以下では、光周波数コムに含まれる成分の周波数、及び、光周波数コムに対する何らかの処理を行って得られる信号に含まれる周波数を、光周波数と呼ぶことがある。

[0014] 光コム11は、前述した図13に示した線スペクトラムの集合体である周波数スペクトラムの長波長 $f(N)$ を持つ成分と短波長 $f(2N)$ を持つ成分とを含むパルスレーザ光の光周波数コムAを発生する。オフセット周波数 $f_{ceo}$ 検出部12は、供給された光周波数コムAのうちの互いに隣接する線スペクトラム間の周波数間隔を示す繰り返し周波数 $f_{rep}$ を持つ成分のパワーを差動アンプを用いて大幅に減衰させて検出したオフセット周波数 $f_{ceo}$ などを表す検出信号を出力する。誤差信号生成部13は、オフセット周波数 $f_{ceo}$ 検出部12から供給される検出信号から光コム11中の繰り返し周波数とオフセット周波数との差の周波数 $(f_{rep} - f_{ceo})$ を持つ成分と、和の周波数 $(f_{rep} + f_{ceo})$ を持つ成分とを位相同期するための誤差信号を生成し、生成した誤差信号をループフィルタ14を通して光コム11に供給する。

[0015] 次に、図1中の各ブロックの構成について更に詳細に説明する。図2は、

図1中のオフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部12の一実施形態のブロック図を示す。図2において、オフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部12は、非線形結晶121、ビームスプリッタ122、可変光アッテネータ123、光バンドパスフィルタ(OBPF)124、受光器125及び126、差動アンプ127を有する。非線形結晶121は、例えばPPLN(periodically poled lithium niobate)を有する。非線形結晶121には、図13に示した周波数スペクトラムの長波長  $f(N)$  の周波数成分と短波長  $f(2N)$  の周波数成分とを含む光周波数コムAが供給される。そして非線形結晶121は、長波長  $f(N)$  の周波数成分の第2高調波(周波数  $2f(N)$ )を発生し、 $f - 2f$  干渉処理されることで発生する周波数  $(2f(N) - f(2N) = f_{ceo})$  を持つ成分を含む干渉信号を出力する。

[0016] ビームスプリッタ122は、非線形結晶121から供給された光信号B(光周波数  $2f(N)$ 、 $f(N)$ 、 $f(2N)$  を持つ成分からなる)を光信号C及び光信号Eに2分割する。一方の光信号Cは、ビームスプリッタ122から可変光アッテネータ123に供給され、他方の光信号Eは、ビームスプリッタ122からOBPF124に供給される。OBPF124は、入力された光信号Eから、周波数  $2f(N)$  を持つ第2高調波と短波長(周波数  $f(2N)$ )の成分とが同時に存在する光周波数帯域の光信号Fを切り出して受光器126に供給する。受光器126は、例えば、フォトダイオードであり、入力光信号Fを光電変換して、入力信号F中の第2高調波(周波数  $2f(N)$ )を持つ成分と短波長(周波数  $f(2N)$ )を持つ成分との干渉信号により表されるオフセット周波数  $f_{ceo}$  に相当する成分と、繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍 ( $m$  は1以上の自然数)の周波数  $f_{rep}$ 、 $2f_{rep}$ 、 $3f_{rep}$ 、 $\dots$  を持つ成分と、それらの周波数とオフセット周波数  $f_{ceo}$  との差の周波数 ( $f_{rep} - f_{ceo}$ 、 $2f_{rep} - f_{ceo}$ 、 $3f_{rep} - f_{ceo}$ 、 $\dots$ ) を持つ成分と、それらの周波数とオフセット周波数  $f_{ceo}$  との和の周波数 ( $f_{rep} + f_{ceo}$ 、 $2f_{rep} + f_{ceo}$ 、 $3f_{rep} + f_{ceo}$ 、 $\dots$ ) を持つ成分とからなる第1の信号を差動アンプ127に供給する。

[0017] 一方、受光器125は、例えば、フォトダイオードであり、入力光信号Dを光電変換して、繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍 ( $m$  は1以上の自然数)の周波数

$f_{rep}$ 、 $2f_{rep}$ 、 $3f_{rep}$ 、 $\dots$ を持つ成分を含む第2の信号を差動アンプ127に供給する。ここで、光信号DはOBPFを通していないので、オフセット周波数 $f_{ceo}$ 関連の信号（周波数がオフセット周波数 $f_{ceo}$ を用いて表される信号、すなわち、周波数 $f_{ceo}$ 、 $(f_{rep}-f_{ceo})$ 、 $(2f_{rep}-f_{ceo})$ 、 $(3f_{rep}-f_{ceo})$ 、 $\dots$ 、 $(f_{rep}+f_{ceo})$ 、 $(2f_{rep}+f_{ceo})$ 、 $(3f_{rep}+f_{ceo})$ 、 $\dots$ などの信号）に対して繰り返し周波数 $f_{rep}$ を持つ信号のパワーが圧倒的に大きい。そこで、本実施形態によるオフセット周波数 $f_{ceo}$ 検出部12は、第2の信号のパワーを可変光アッテネータ123で調整し、差動アンプ127において、第1の信号中の $m$ 倍の繰り返し周波数 $f_{rep}$ 、 $2f_{rep}$ 、 $3f_{rep}$ 、 $\dots$ を持つ信号と第2の信号とがほぼ相殺除去されるようにしている。これにより、差動アンプ127は、図4Aに示す周波数スペクトラムの信号Gを出力する。ここで、信号Gは、検出信号の一例であり、図4Aの信号G中、信号成分aはオフセット周波数 $f_{ceo}$ を持つ信号であり、信号成分bは周波数 $(f_{rep}-f_{ceo})$ を持つ信号であり、信号成分cはほぼ相殺除去された繰り返し周波数 $f_{rep}$ を持つ信号であり、信号成分dは周波数 $(f_{rep}+f_{ceo})$ を持つ信号であり、信号成分eは周波数 $(2f_{rep}-f_{ceo})$ を持つ信号であり、信号成分fはほぼ相殺除去された周波数 $2f_{rep}$ を持つ信号であり、信号成分gは周波数 $(2f_{rep}+f_{ceo})$ を持つ信号であり、信号成分hは周波数 $(3f_{rep}-f_{ceo})$ を持つ信号であり、信号成分hはほぼ相殺除去された周波数 $3f_{rep}$ を持つ信号である。

[0018] 次に、図1中の誤差信号生成部13の構成及び動作について説明する。図3は、図1中の誤差信号生成部13の一実施形態のブロック図を示す。図3において、誤差信号生成部13は、バンドパスフィルタ(BPF)131、スプリッタ132、ミキサ133及び加算器134を有する。BPF131は、オフセット周波数 $f_{ceo}$ 検出部12内の差動アンプ127から出力された電気信号G中の $(f_{rep}-f_{ceo}) \sim (f_{rep}+f_{ceo})$ の周波数領域を含むそれより若干広い周波数帯域を選択し、選択した周波数帯域を含む信号を出力する。したがって、BPF131は図4Aに示した周波数スペクトラムの信号G中の信号成分b、c及びdを選択して出力し、それ以外の信号成分を大幅に抑圧

して、図4 Bに示す周波数スペクトラムの信号Hを出力する。

[0019] スプリッタ132は、入力信号Hを二分してミキサ133にそれぞれ供給する。ミキサ133は、供給された信号同士を乗じることで、入力信号Hの二乗信号を生成し、その二乗信号を出力する。ここで、入力信号Hは図4 Bに示したように、信号成分b及びd以外は十分低レベルであり無視できるので、ミキサ133は、周波数 $(f_{rep} - f_{ceo})$ の信号成分b及び周波数 $(f_{rep} + f_{ceo})$ の信号成分dからなる次式で示す二乗信号Iを出力する。

$$I = \{V\cos[2\pi(f_{rep} - f_{ceo})t] + V\cos[2\pi(f_{rep} + f_{ceo})t + \Delta\phi]\}^2 \quad (5)$$

ただし、上式中、 $\Delta\phi$ は上記信号成分b及びdの位相差を示す。

[0020] 加算器134はミキサ133から供給された二乗信号Iに、所定の直流電圧 $-V^2$ を加算して加算後の信号Jを生成し、その信号Jを誤差信号として図1のループフィルタ14を通して光コム11にフィードバック出力する。この誤差信号Jは、周波数 $(f_{rep} - f_{ceo})$ を持つ成分と周波数 $(f_{rep} + f_{ceo})$ を持つ成分間の位相の誤差信号の基となる。スプリッタ132とミキサ133間の2本の電気路長差により発生する位相差により、この誤差信号Jの振幅と正負の極性が変化するが、適切な電気路長（多くの場合同じ電気路長）を選ぶことで最大の振幅かつ所望の極性が得られる。光コム11内部の例えば励起レーザの電流が誤差信号Jにより制御されることで、出力される光周波数コムにおけるオフセット周波数 $f_{ceo}$ が、(5)式中の信号成分bの周波数 $(f_{rep} - f_{ceo})$ と信号成分dの周波数 $(f_{rep} + f_{ceo})$ とが近づくように可変制御される。そして、両信号成分b及びdを位相同期することにより、 $(f_{rep} - f_{ceo}) = (f_{rep} + f_{ceo})$ となる。この結果、(5)式の二乗信号Iは次式で示されるようになる。

$$I = V^2 + V^2\cos\Delta\phi + (\text{位相同期に関係ない高周波成分}) \quad (6)$$

[0021] 加算器134は、二乗信号Iから(6)式中の位相同期に関係ない高周波成分を図示しないローパスフィルタで除去した後、除去後の二乗信号Iに上記所定の直流電圧 $-V^2$ を加算することで、 $V^2\cos\Delta\phi$ で表される図4 Cに示す波形の誤差信号Jを生成する。このように、 $(f_{rep} - f_{ceo}) = (f_{rep} + f_{ceo})$

) に近づけるようにオフセット周波数  $f_{ceo}$  が制御されて信号成分  $b$  及び  $d$  を位相同期することにより、光コム 11 はオフセット周波数  $f_{ceo}$  がゼロに制御された光周波数コムを発生して図 1 の出力端子 15 へ出力する。

[0022] 本実施形態によれば、新たに必要となる機能は簡単な差動検出機能のみであり、光周波数コム発生装置は、複雑な機能を加えなくてよく、かつ、光周波数コムの波長帯域を制限することがない簡単な構成とすることができる。また、この手法ではもともとの光コム 11 の光源部の広帯域化処理されていない光のオフセット周波数  $f_{ceo}$  がゼロになるので、光周波数コム発生装置は、光コム 11 の光源部からの広帯域化処理されていない光を一度だけ広帯域化することで使用することも可能である。さらに、光周波数コム発生装置は、オフセット周波数  $f_{ceo}$  を検出するために発生させた、十分広帯域な光周波数コムをそのまま使用することも可能である。

[0023] 本実施形態の動作原理について、図 5 と共に更に説明する。本実施形態では、図 5 に示す周波数スペクトラムの光周波数コムのうち、まず、図 5 に (イ) で示すように、図 2 の可変アッテネータ 123 及び差動アンプ 127 は、周波数  $(f_{rep} - f_{ceo})$  の成分及び  $(f_{rep} + f_{ceo})$  の成分のパワーに比して、繰り返し周波数  $f_{rep}$  の成分のパワーを相対的に小さくする。その後、前述した図 1 のオフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部 12、誤差信号生成部 13、ループフィルタ 14 及び光コム 11 のフィードバックループは、図 5 に (ロ) で示すように、オフセット周波数  $f_{ceo}$  を可変制御して、周波数  $(f_{rep} - f_{ceo})$  と周波数  $(f_{rep} + f_{ceo})$  とを近づけてから信号成分  $b$  及び  $d$  を位相同期する。その結果、周波数  $(f_{rep} - f_{ceo})$  と周波数  $(f_{rep} + f_{ceo})$  とがロックされて下記の関係が成立する。

$$(f_{rep} - f_{ceo}) = (f_{rep} + f_{ceo}) \quad (7)$$

したがって、オフセット周波数  $f_{ceo}$  がゼロになる。

[0024] 次に、オフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部 12 の変形例について説明する。図 6 は、オフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部 12 の第 1 変形例のブロック図を示す。同図中、図 2 と同一構成部分には同一符号を付し、その説明を省略する。図 6 にお

いて、第1変形例のオフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部 12A は、ビームスプリッタ 122 の代わりに偏光ビームスプリッタ 128 を有し、可変光アッテネータ 123 の代わりに可変光アッテネータ又は偏光子 129 を有する。本変形例では、非線形結晶 121 により得られる光信号 B (光周波数  $2f(N)$ 、 $f(N)$ 、 $f(2N)$  を持つ成分からなる) のうち、第2高調波 (周波数  $2f(N)$ ) では偏光が揃っているため、偏光ビームスプリッタ 128 は光信号 B を 2 分岐する。そして、一方の光路には光周波数  $f(N)$ 、 $f(2N)$  を持つ成分を含む光周波数コム A (すなわち、基本波成分からなる光信号) が出力され、他方の光路には基本波成分と第2高調波とからなる光信号 E (すなわち、光信号 B と同じ) が出力される。

[0025] 偏光ビームスプリッタ 128 で分離した光の偏光は直線偏光になる。そのため、可変光アッテネータ又は偏光子 129 として偏光子が用いられる場合は、偏光子の透過軸を回転させることで、可変光アッテネータが用いられる場合と同様に、オフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部 12A は、検出される繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍 ( $m$  は 1 以上の自然数) の周波数  $f_{rep}$ 、 $2f_{rep}$ 、 $3f_{rep}$ 、 $\dots$  を持つ信号成分のパワーを調整することができる。受光器 125 は繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍の周波数  $f_{rep}$ 、 $2f_{rep}$ 、 $3f_{rep}$ 、 $\dots$  を持つ信号成分からなる第2の信号を差動アンプ 127 に供給する。

[0026] 図7は、オフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部 12 の第2変形例のブロック図を示す。同図中、図2と同一構成部分には同一符号を付し、その説明を省略する。図7において、第2変形例のオフセット周波数  $f_{ceo}$  検出部 12B は、光コム 11 からの光周波数コム A をビームスプリッタ 122 により 2 分岐して非線形結晶 121a 及び可変光アッテネータ 123 へ供給する。非線形結晶 121a は、ビームスプリッタ 122 から供給された光周波数コム A に基づき、長波長  $f(N)$  の周波数成分の第2高調波 (周波数  $2f(N)$ ) を発生し、その第2高調波 (周波数  $2f(N)$ ) を入力周波数  $f(N)$  及び  $f(2N)$  を持つ成分と共に出力する。すなわち、非線形結晶 121a から出力される光信号 B は、入力周波数  $f(N)$  及び  $f(2N)$  を持つ成分とともに、第2高調波 (周波数  $2f(N)$ ) を

含む。なお、非線形結晶 1 2 1 a は、例えば、非線形結晶 1 2 1 と同様に、P P L N を有する。O B P F 1 2 4 は、非線形結晶 1 2 1 a から供給される光信号 B 中の第 2 高調波（周波数  $2 f(N)$ ）と短波長  $f(2N)$  の周波数成分とがともに含まれる光周波数帯域の光信号 F を、光信号 B から切り出して受光器 1 2 6 に供給する。

[0027] 次に、本実施形態の実験結果について説明する。図 8 A は、本実施形態の光周波数コム発生装置 1 0 が、信号成分 b 及び d が位相同期するよう動作し、かつ、 $(f_{rep} - f_{ceo}) = (f_{rep} + f_{ceo})$  が成立しているときの、誤差信号検出部 1 3 中の B P F 1 3 1 の出力信号の周波数スペクトル図を示す。図 8 A に示すように、B P F 1 3 1 の出力信号（インループビート信号）は繰り返し周波数  $f_{rep}$  においてピークを示す。そのため、位相同期によりオフセット周波数  $f_{ceo}$  がゼロであることが強く示唆されている（明確な証拠については後述）。コヒーレントピークの S/N は約 8 4 d B · H z で、オフセット周波数  $f_{ceo}$  がシンセサイザの基準信号に位相同期される通常の場合と同様であった。

[0028] また、本実施形態の位相同期の影響と安定度を調べるため、位相同期されたオフセット周波数  $f_{ceo}$  のインループでのビート信号（周波数  $f_{in-loop}$ ）と別のポートで直接検出した繰り返し周波数  $f_{rep}$  をそれぞれカウンタで周波数計測し、 $f_{in-loop}/f_{rep}$  の相対アラン偏差を計算した。 $f_{ceo} = 0$  のとき、 $f_{in-loop}$  は  $f_{rep}$  と一致する。図 8 B は、 $f_{in-loop}/f_{rep}$  の相対アラン偏差の測定結果を示す。カウンタリミットの相対アラン偏差が得られており、インループビートスペクトルと合わせて本実施形態の位相同期の性能は高く、オフセット周波数  $f_{ceo}$  の通常の位相同期と同等であることが確認できた。

[0029] 次に、本実施形態の光周波数コム発生装置の応用例について説明する。以下説明する応用例は、本実施形態の光周波数コム発生装置を光周波数分周器に応用した例を示す。ただし、前述したように、光周波数コム発生装置は、光周波数分周だけでなく、キャリアエンベロープ位相を制御するアト秒光パルスの応用などをはじめ、多くの分野において有用であり、光周波数コム発

生装置の用途は、光周波数分周器に限定されるものではない。

[0030] 図9は、本発明に係る光周波数コム発生装置の一応用例のブロック図を示す。この応用例である光周波数分周器20は、図1に示した光周波数コム発生装置10にビート光周波数 $f_{beat}$ をゼロに制御するビート光周波数ゼロ制御回路を組み合わせて構成される。図9において、図1と同一構成部分には同一符号を付し、その説明を適宜省略する。

図9において、光コム11は発生する光周波数コムのオフセット周波数 $f_{ceo}$ が、 $f_{ceo}$ 検出部12、誤差信号生成部13及びループフィルタ14を含む第1のフィードバックループによりゼロに制御されると共に、連続波発振レーザ（CWレーザ）発振器22の発振周波数 $f_{cw}$ と光コム11から出力された光周波数コム中のうち発振周波数 $f_{cw}$ に最も近い光周波数との差を示すビート周波数 $f_{beat}$ が、 $f_{beat}$ 検出部23、誤差信号生成部24及びループフィルタ25を含む第2のフィードバックループによりゼロに制御される。これにより、光コム11は、CWレーザ発振器22の発振周波数 $f_{cw}$ を基準に、 $(N/N_{cw})f_{cw}$ で表される分周された光周波数コム $f(N)$ を発生する。ここで、 $N$ は任意の自然数、 $N_{cw}$ は所望の分周比に応じた一定値である。

[0031]  $f_{beat}$ 検出部23には、光コム11からの光周波数コム及びCWレーザ発振器22からのCWレーザ信号とが供給される。そして $f_{beat}$ 検出部23は、光周波数コムとCWレーザ信号との干渉信号を含む光信号を光電変換し、ビート周波数 $f_{beat}$ に相当する成分と、繰り返し周波数 $f_{rep}$ の $m$ 倍（ $m$ は1以上の整数）の周波数 $f_{rep}$ 、 $2f_{rep}$ 、 $3f_{rep}$ 、...を持つ成分と、それらの周波数とビート周波数 $f_{beat}$ との差の周波数 $(f_{rep} - f_{beat})$ 、 $(2f_{rep} - f_{beat})$ 、 $(3f_{rep} - f_{beat})$ 、...を持つ成分と、それらの周波数とビート周波数 $f_{beat}$ との和の周波数 $(f_{rep} + f_{beat})$ 、 $(2f_{rep} + f_{beat})$ 、 $(3f_{rep} + f_{beat})$ 、...を持つ成分とからなる信号を誤差信号検出部24に供給する。誤差信号検出部24は、 $f_{beat}$ 検出部23から供給される信号から、光コム11中の繰り返し周波数とビート周波数との差の周波数 $(f_{rep} - f_{beat})$ を持つ成分と、和の周波数 $(f_{rep} + f_{beat})$ を持つ成分とを位相同期するための誤差信号を生成し、生成した誤差信号をループフィルタ2

5を通して光コム11に供給する。

[0032] 次に、図9中の各ブロックの構成について更に詳細に説明する。図10は、図9中の $f_{\text{beat}}$ 検出部23の一実施形態のブロック図を示す。図10に示すように、 $f_{\text{beat}}$ 検出部23は、光バンドパスフィルタ(OBPF)231、1:1ビームスプリッタ(BS)232、受光器233及び234、差動アンプ235を有する。1:1ビームスプリッタ(BS)232はハーフミラーでもよい。OBPF231は、光コム11から出力された光周波数コムの光信号中、CWレーザ信号の発振周波数 $f_{\text{cw}}$ と最も近い周波数 $f(N_{\text{cw}})$ の光信号を中心とする狭い光周波数領域(例えば±数千 $f_{\text{rep}}$ )内の光信号を選択して出力する。

[0033] 図11は、 $f_{\text{beat}}$ 検出部23内の光信号の周波数スペクトラムを示す。図11に示すように光コム11から発生された光周波数コムの周波数 $f(N)$ の光信号中、CWレーザ発振周波数 $f_{\text{cw}}$ と最も近い周波数 $f(N_{\text{cw}})$ を持つ光信号とCWレーザ発振周波数 $f_{\text{cw}}$ との間のビート周波数 $f_{\text{beat}}$ は次式で表される。

$$f_{\text{beat}} = f_{\text{cw}} - f(N_{\text{cw}}) = f_{\text{cw}} - (f_{\text{ceo}} + N_{\text{cw}} f_{\text{rep}}) \quad (8)$$

(8)式を整理すると繰り返し周波数 $f_{\text{rep}}$ は次式で表される。

$$f_{\text{rep}} = (f_{\text{cw}} - f_{\text{ceo}} - f_{\text{beat}}) / N_{\text{cw}} \quad (9)$$

よって、光周波数コムにおける、周波数 $f(N)$ は(1)式に(9)式を代入することで、次式で表される。

$$f(N) = f_{\text{ceo}} + (N/N_{\text{cw}})(f_{\text{cw}} - f_{\text{ceo}} - f_{\text{beat}}) \quad (10)$$

[0034] 図10の1:1ビームスプリッタ(BS)232は、OBPF231からの光信号の周波数 $f(N_{\text{cw}})$ を中心とする狭い光周波数領域の光信号と、CWレーザ発振器22からのCWレーザ信号とを合成し、かつ2分岐して出力する。一方の光路にはビート信号S及びTを含む光信号が出力され、他方の光路にはビート信号−S及びTを含む光信号が出力される。ビート信号−Sはビート信号Sの位相反転信号である。

[0035] 受光器233は、ビート信号S及びTを含む光信号を光電変換して、ビート信号Sに相当する、 $f_{\text{beat}}$ 、 $(f_{\text{rep}} - f_{\text{beat}})$ 、 $(f_{\text{rep}} + f_{\text{beat}})$ 、 $(2f_{\text{rep}} - f_{\text{beat}})$

、・・・の周波数を持つ成分と、ビート信号Tに相当する、繰り返し周波数の自然数倍の  $f_{rep}$ 、 $2 f_{rep}$ 、 $3 f_{rep}$ 、・・・の周波数を持つ成分とからなる信号を出力する。この出力信号は差動アンプ235に第1の信号として入力される。一方、受光器234は、ビート信号-S及びTを含む光信号を光電変換して、ビート信号-Sに相当する、 $f_{beat}$ 、 $(f_{rep} - f_{beat})$ 、 $(f_{rep} + f_{beat})$ 、 $(2 f_{rep} - f_{beat})$ 、・・・の周波数を持つ成分と、ビート信号Tに相当する、繰り返し周波数の自然数倍の  $f_{rep}$ 、 $2 f_{rep}$ 、 $3 f_{rep}$ 、・・・の周波数を持つ成分とからなる信号を出力する。この出力信号は差動アンプ235に第2の信号として入力される。なお、受光器233及び受光器234は、それぞれ、例えば、フォトダイオードとすることができる。

[0036] 差動アンプ235は、上記の第1及び第2の信号を差動増幅して、m倍の繰り返し周波数  $f_{rep}$ 、 $2 f_{rep}$ 、 $3 f_{rep}$ 、・・・を大幅に抑圧すると共に、 $f_{beat}$ 、 $(f_{rep} - f_{beat})$ 、 $(f_{rep} + f_{beat})$ 、 $(2 f_{rep} - f_{beat})$ 、・・・からなる周波数を持つ成分の電気信号を誤差信号生成部24へ出力する。誤差信号生成部24は、バンドパスフィルタ、二乗回路及び加算器を有し、まず、バンドパスフィルタにより差動アンプ235から供給された電気信号中の  $(f_{rep} - f_{beat})$  ~  $(f_{rep} + f_{beat})$  の周波数領域を含むそれより若干広い周波数帯域の信号を選択する。なお、この周波数領域中の繰り返し周波数  $f_{rep}$  信号は大幅に抑圧されているため、バンドパスフィルタから出力される信号は、実質上、周波数  $(f_{rep} - f_{beat})$  の信号及び周波数  $(f_{rep} + f_{beat})$  の信号からなる。二乗回路はバンドパスフィルタから供給された周波数  $(f_{rep} - f_{beat})$  の信号及び周波数  $(f_{rep} + f_{beat})$  の信号から次式で表される二乗信号Uを出力する。

$$U = \{V \cos[2\pi(f_{rep} - f_{beat})t] + V \cos[2\pi(f_{rep} + f_{beat})t + \Delta\phi]\}^2 \quad (11)$$

ただし、上式中、 $\Delta\phi$ は上記周波数  $(f_{rep} - f_{beat})$  の信号と周波数  $(f_{rep} + f_{beat})$  の信号間の位相差を示す。

[0037] 誤差検出部24内の加算器は、二乗信号Uに所定の直流電圧  $-V^2$  を加算して誤差信号を生成し、この誤差信号を光コム11に供給する。この誤差信号に基づいて光コム11は、内部のレーザ共振器内の電気光学変調器あるいは

piezo素子などの  $f_{beat}$  制御用アクチュエータを、光コム 11 から出力される周波数コム中の光周波数  $(f_{rep} - f_{beat})$  及び  $(f_{rep} + f_{beat})$  を近づけるように制御して、周波数  $(f_{rep} - f_{beat})$  の信号及び周波数  $(f_{rep} + f_{beat})$  の信号を位相同期する。そして、両信号を位相同期することにより、 $(f_{rep} - f_{beat}) = (f_{rep} + f_{beat})$  が成立する。この結果、(11) 式の二乗信号  $U$  は次式で示されるようになる。

$$U = V^2 + V^2 \cos \Delta \phi + (\text{位相同期に関係ない高周波成分}) \quad (12)$$

[0038] 誤差検出部 24 内の加算器は、二乗信号  $U$  から (12) 式中の位相同期に関係ない高周波成分を図示しないローパスフィルタで除去した後、その除去後の二乗信号  $U$  に上記所定の直流電圧  $-V^2$  を加算することで、 $V^2 \cos \Delta \phi$  で表される図 4 C に示した波形と同様の波形の誤差信号を生成し、生成した誤差信号をループフィルタ 25 を通して光コム 11 へ出力する。これにより、光コム 11 はビート周波数  $f_{beat}$  がゼロに制御された光周波数コムを発生して、その光周波数コムを図 9 の出力端子 26 へ出力する。

[0039] このようにして、光周波数分周器 20 は光周波数コムのオフセット周波数  $f_{ceo}$  が、 $f_{ceo}$  検出部 12、誤差信号生成部 13 及びループフィルタ 14 を有する第 1 のフィードバックループによりゼロに制御されると共に、ビート周波数  $f_{beat}$  が、 $f_{beat}$  検出部 23、誤差信号生成部 24 及びループフィルタ 25 を有する第 2 のフィードバックループによりゼロに制御される。これにより、光周波数分周器 20 は、(10) 式に  $f_{ceo} = f_{beat} = 0$  を代入して得られる、 $(N/N_{cw}) f_{cw}$  に分周された光周波数コム  $f(N)$  を光コム 11 から発生させる。光周波数分周器 20 は分周された光周波数コムを発生するので、周波数コム発生装置の一応用例である。

[0040] 次に、本実施形態の光周波数コム発生装置 10 において信号成分  $b$  及び  $d$  が位相同期して動作し、 $(f_{rep} - f_{ceo}) = (f_{rep} + f_{ceo})$  が成立して、オフセット周波数  $f_{ceo} = 0$  であるか否かの確認方法について説明する。本実施形態の光周波数コム発生装置 10 において  $(f_{rep} - f_{ceo}) = (f_{rep} + f_{ceo})$  が成立していることは、図 8 A に示した、誤差信号検出部 13 中の BPF 131 の出

力信号の周波数スペクトル図から分かるが、念のためオフセット周波数  $f_{ceo} = 0$  であることを、図 12 の上側に示される構成を持つ装置により確認した。

[0041] 図 12 において、図 9 と同一構成部分には同一符号を付してある。図 12 において、光周波数分周器 20 は、前述した  $f_{ceo}$  検出部 12、誤差信号生成部 13 及びループフィルタ 14 を有する第 1 のフィードバックループ回路 27 により光コム 21 のオフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロに制御すると共に、前述した  $f_{beat}$  検出部 23、誤差信号生成部 24 及びループフィルタ 25 を有する第 2 のフィードバックループ回路 28 により、光コム 21 の基準レーザ発振器 41 からの基準レーザ周波数と光周波数コム中の基準レーザ周波数と最も近い周波数を持つ光信号間のビート周波数  $f_{beat}$  をゼロに制御する。一方、オフセット周波数を持つ光周波数分周器 30 は、公知の第 1 の位相同期ループ (PLL) 回路 32 により光コム 31 のオフセット周波数を 29.9 MHz にロックすると共に、公知の第 2 の PLL 回路 33 により光コム 31 の基準レーザ発振器 41 からの基準レーザ周波数と光周波数コム中の基準レーザ周波数と最も近い周波数を持つ光信号間のビート周波数を 29.9 MHz に制御する。

[0042] また、光コム 21 からの光信号のうち、光バンドパスフィルタ (OBPF) 42 により波長 1020 nm 及びその近傍波長領域の光信号が選択される。一方、光コム 31 からの光信号のうち、OBPF 43 により波長 1020 nm 及びその近傍波長領域の光信号が選択される。なお、光コム 21 及び 31 から発する各周波数コム中の繰り返し周波数  $f_{rep}$  は等しく設定されている。OBPF 42 及び 43 によりそれぞれ選択された 2 信号のアウトオブloop ビート (Out-of-loop beat) 信号は、カウンタ 44 によりその周波数が計数される。

[0043] 図 12 の上から 2 番目に示されるグラフは光コム 21 からの光信号の周波数スペクトラムを示し、図 12 の上から 3 番目に示されるグラフは光コム 31 からの光信号の周波数スペクトラムを示す。図 12 の一番下に示される波形は、測定したアウトオブloop ビート周波数と、光周波数 200 THz に対する相対アラン偏差を示す。アウトオブloop ビート周波数は 29.9 MHz

zで一定に保たれており、光コム21が確かにオフセット周波数 $f_{\text{ceo}}=0$ にロックされていることを示している。

### 符号の説明

- [0044] 10 光周波数コム発生装置
- 11、31 光周波数コム発生器（光コム）
- 12、12A、12B オフセット周波数 $f_{\text{ceo}}$ 検出部
- 13、24 誤差信号生成部
- 14、25 ループフィルタ
- 15、26 出力端子
- 20 光周波数分周器
- 30 オフセット周波数を持つ光周波数分周器
- 22 連続波発振レーザ（CWレーザ）発振器
- 23 ビート周波数 $f_{\text{beat}}$ 検出部
- 121、121a 非線形結晶
- 122、232 ビームスプリッタ
- 123 可変光アッテネータ
- 42、43、124、231 光バンドパスフィルタ（OBPF）
- 125、126、233、234 受光器
- 127、235 差動アンプ
- 128 偏光ビームスプリッタ
- 129 可変光アッテネータ又は偏光子
- 131 バンドパスフィルタ（BPF）
- 132 スプリッタ
- 133 ミキサ
- 134 加算器

## 請求の範囲

### [請求項1]

オフセット周波数  $f_{ce0}$  だけオフセットされ、かつ、一定の繰り返し周波数  $f_{rep}$  の周波数間隔で櫛歯状に並ぶ複数の線スペクトルの集合体で表されるパルスレーザ光である光周波数コムを発生する光周波数コム発生器と、

前記光周波数コム発生器から出力された前記光周波数コムから前記オフセット周波数  $f_{ce0}$  を表す検出信号を生成し、当該検出信号を出力する検出部と、

前記検出信号から周波数 ( $f_{rep} - f_{ce0}$ ) を持つ成分と周波数 ( $f_{rep} + f_{ce0}$ ) を持つ成分とを位相同期させるための誤差信号を生成し、前記誤差信号を前記光周波数コム発生器にフィードバックして、前記光周波数コム発生器から出力される前記光周波数コム中の前記オフセット周波数  $f_{ce0}$  をゼロに可変制御する誤差信号検出部と、  
を有する光周波数コム発生装置。

### [請求項2]

前記誤差信号検出部は、前記検出信号から前記周波数 ( $f_{rep} - f_{ce0}$ ) を持つ成分のパワー及び前記周波数 ( $f_{rep} + f_{ce0}$ ) を持つ成分のパワーに比して、前記繰り返し周波数  $f_{rep}$  のパワーを相対的に小さくした前記周波数 ( $f_{rep} - f_{ce0}$ ) を持つ成分の第1の誤差信号成分及び前記周波数 ( $f_{rep} + f_{ce0}$ ) を持つ成分の第2の誤差信号成分の位相差に応じた前記誤差信号を生成して前記光周波数コム発生器の前記オフセット周波数  $f_{ce0}$  を可変制御し、前記第1及び第2の誤差信号成分を位相同期する請求項1記載の光周波数コム発生装置。

### [請求項3]

前記検出部は、

供給された前記光周波数コムと前記光周波数コムの第2高調波とを干渉させることで干渉光信号を生成する干渉処理手段と、

前記干渉光信号を2分岐して2つの光路へ出力する光分岐手段と、

前記干渉光信号のうちの前記2つの光路のうちの一方の光路へ出力された光信号に対して、所定の光周波数領域の光信号を選択して光電

変換し、前記繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍 ( $m$  は 1 以上の自然数) の第 1 の周波数群の成分と、前記オフセット周波数  $f_{ceo}$  と前記繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍の周波数との和の周波数及び差の周波数、並びに前記オフセット周波数  $f_{ceo}$  からなる第 2 の周波数群の成分とからなる第 1 の信号を検出する第 1 の信号検出手段と、

前記干渉光信号のうちの前記 2 つの光路のうちの他方の光路へ出力された光信号に対して、前記所定の光周波数領域の光信号を選択することなくパワーを制御した前記第 1 の周波数群の成分からなる第 2 の信号を検出する第 2 の信号検出手段と、

前記第 1 及び第 2 信号を差動増幅して、前記第 1 の周波数群の成分が打消され、かつ、前記第 2 の周波数群の成分のみを含む信号を前記検出信号として出力する差動増幅手段と、

を有する請求項 1 又は 2 記載の光周波数コム発生装置。

[請求項 4]

前記検出部は、

供給された前記光周波数コムを 2 分岐して 2 つの光路へ出力する光分岐手段と、

前記 2 つの光路のうちの一方の光路へ出力された前記光周波数コムと前記光周波数コムの第 2 高調波とを干渉させることで干渉光信号を生成する干渉処理手段と、

前記干渉光信号から、所定の光周波数領域の光信号を選択して光電変換し、前記繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍 ( $m$  は 1 以上の自然数) の第 1 の周波数群の成分と、前記オフセット周波数  $f_{ceo}$  と前記繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍の周波数との和の周波数及び差の周波数、並びに前記オフセット周波数  $f_{ceo}$  からなる第 2 の周波数群の成分とからなる第 1 の信号を検出する第 1 の信号検出手段と、

前記 2 つの光路のうちの他方の光路へ出力された前記光周波数コムに対して、前記所定の光周波数領域の光信号を選択することなくパワーを制御した前記第 1 の周波数群の第 2 の信号を検出する第 2 の信号

検出手段と、

前記第1及び第2信号を差動増幅して、前記第1の周波数群の成分が打消され、かつ、前記第2の周波数群の成分のみを含む信号を前記検出信号として出力する差動増幅手段と、

を有する請求項1又は2記載の光周波数コム発生装置。

[請求項5]

前記誤差信号検出部は、

前記繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍 ( $m$  は1以上の自然数) の第1の周波数群の成分と、前記オフセット周波数  $f_{ceo}$  と前記繰り返し周波数  $f_{rep}$  の  $m$  倍の周波数との和の周波数及び差の周波数、並びに前記オフセット周波数  $f_{ceo}$  の成分とからなる前記検出信号が供給され、前記検出信号中の前記周波数 ( $f_{rep} - f_{ceo}$ ) を持つ成分及び前記周波数 ( $f_{rep} + f_{ceo}$ ) を持つ成分を選択する周波数選択手段と、

前記周波数選択手段により選択された前記周波数 ( $f_{rep} - f_{ceo}$ ) を持つ成分及び前記周波数 ( $f_{rep} + f_{ceo}$ ) を持つ成分からなる信号を二乗して、前記周波数 ( $f_{rep} - f_{ceo}$ ) を持つ成分と前記周波数 ( $f_{rep} + f_{ceo}$ ) を持つ成分間の位相差に応じた二乗信号を出力する二乗手段と、

前記二乗手段から出力された前記二乗信号に対し所定の直流電圧を加算して、加算後の信号を前記誤差信号として出力する加算手段と、を有する請求項1～4の何れか一項に記載の光周波数コム発生装置。

[請求項6]

オフセット周波数  $f_{ceo}$  だけオフセットされ、かつ、一定の繰り返し周波数  $f_{rep}$  の周波数間隔で櫛歯状に並ぶ複数の線スペクトルの集合体で表されるパルスレーザ光である光周波数コムを発生する光周波数コム発生器と、

前記光周波数コム発生器から出力された前記光周波数コムから前記オフセット周波数  $f_{ceo}$  を表す第1の検出信号を生成し、当該第1の検出信号を出力する第1の検出部と、

前記第1の検出信号から周波数 ( $f_{rep} - f_{ceo}$ ) を持つ成分と周波数(

$f_{rep} + f_{ceo}$ )を持つ成分とを位相同期させるための誤差信号を生成し、当該誤差信号を前記光周波数コム発生器にフィードバックして、前記光周波数コム発生器から出力される前記光周波数コム中の前記オフセット周波数  $f_{ceo}$  をゼロに可変制御する第1の誤差信号検出部と、  
連続波レーザを発振出力するレーザ発振手段と、

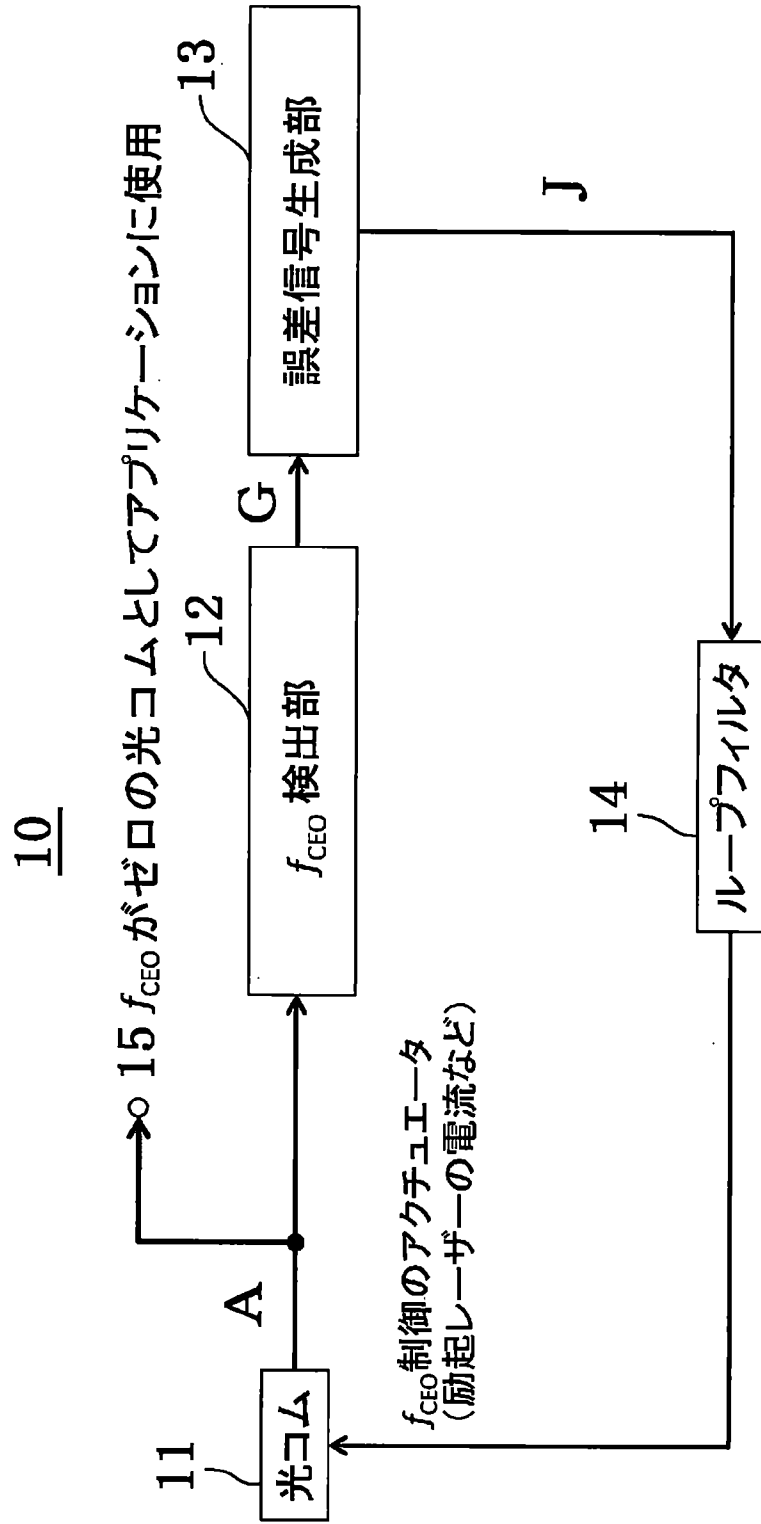
前記連続波レーザのレーザ周波数  $f_{cw}$  と前記光周波数コム発生器から出力された前記光周波数コム中のうち前記レーザ周波数に最も近い光周波数との差を示すビート周波数  $f_{beat}$  を表す第2の検出信号を生成し、当該第2の検出信号を出力する第2の検出部と、

前記第2の検出信号から周波数( $f_{rep} - f_{beat}$ )を持つ成分と周波数( $f_{rep} + f_{beat}$ )を持つ成分とを位相同期させるための誤差信号を生成し、当該誤差信号を前記光周波数コム発生器にフィードバックして、前記光周波数コム発生器から出力される前記光周波数コム中の前記ビート周波数  $f_{beat}$  をゼロに可変制御する第2の誤差信号検出部と、

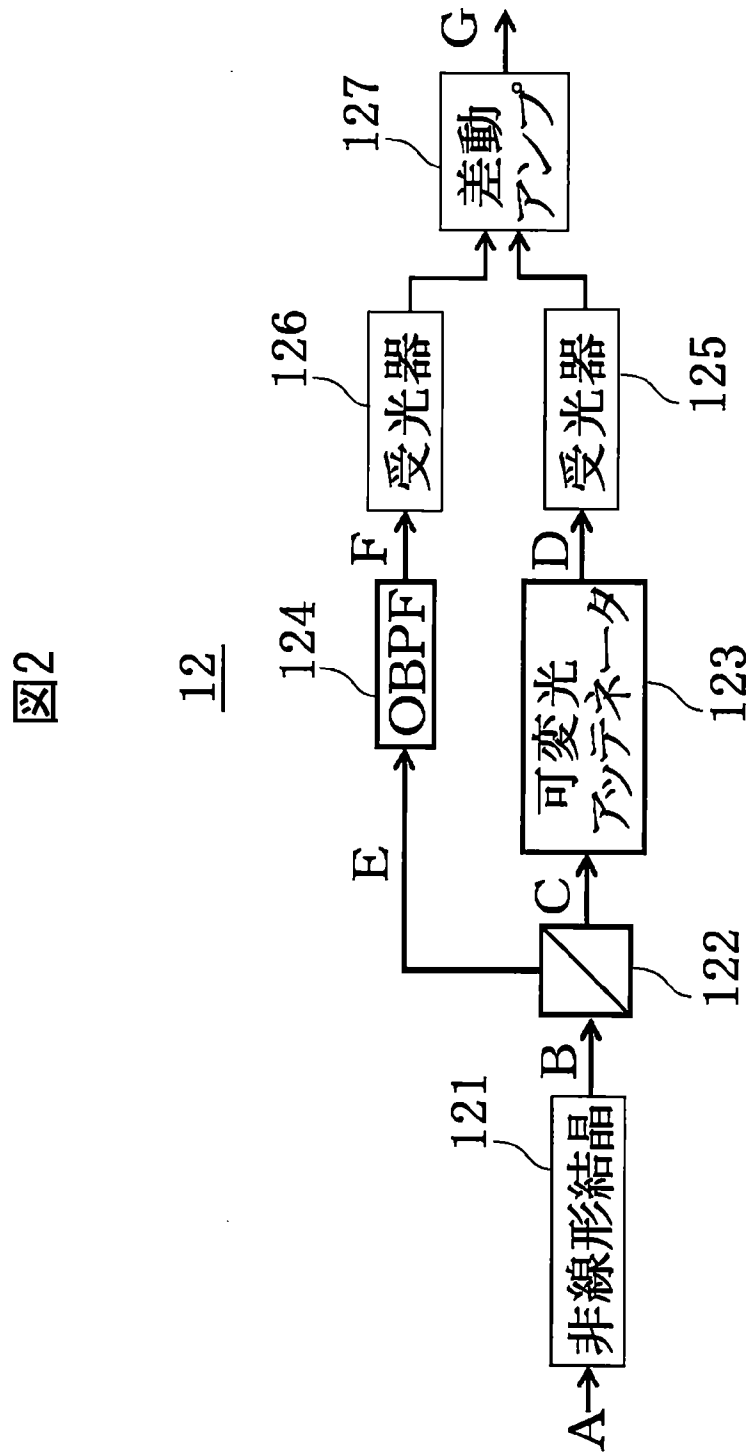
を有し、 $(N/N_{cw})f_{cw}$  (ただし、 $N$ は任意の自然数、 $N_{cw}$ は所望の一定値)に分周された光周波数コムを前記光周波数コム発生器から発生させる周波数コム発生装置。

[図1]

図1

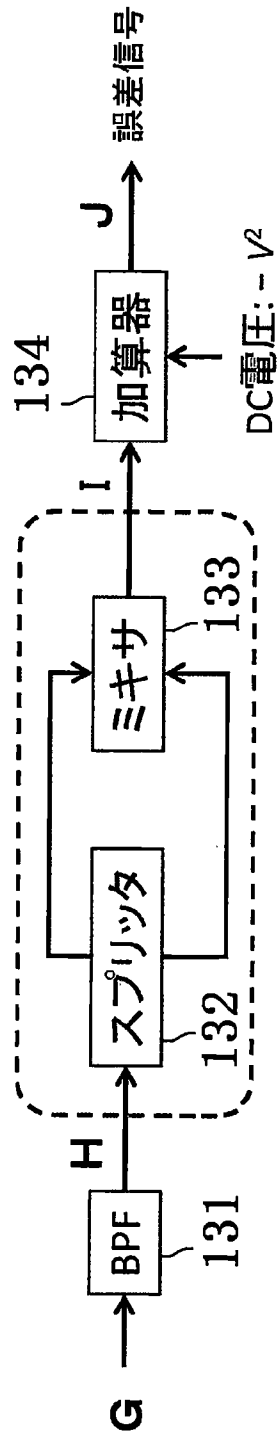


[図2]



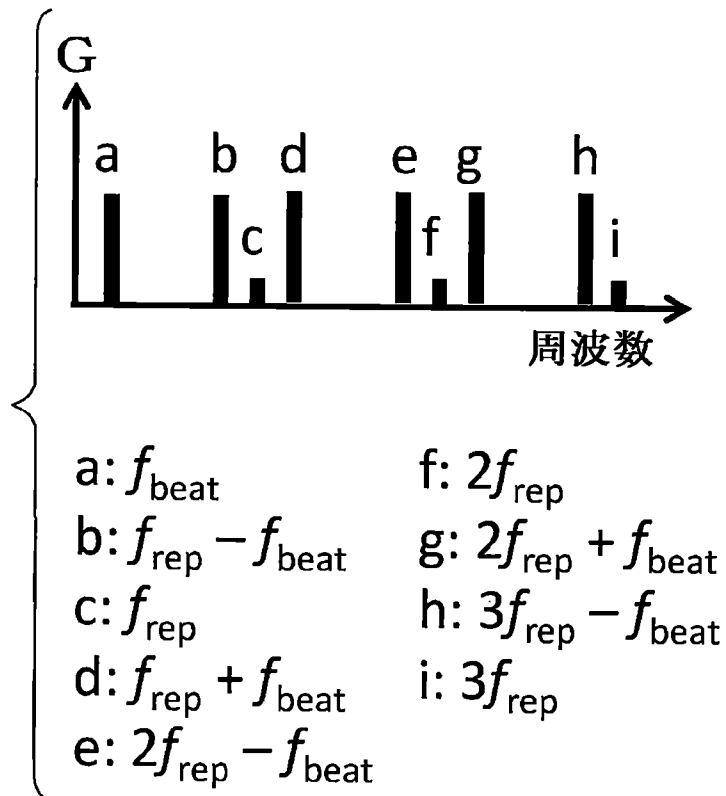
[図3]

図3

13

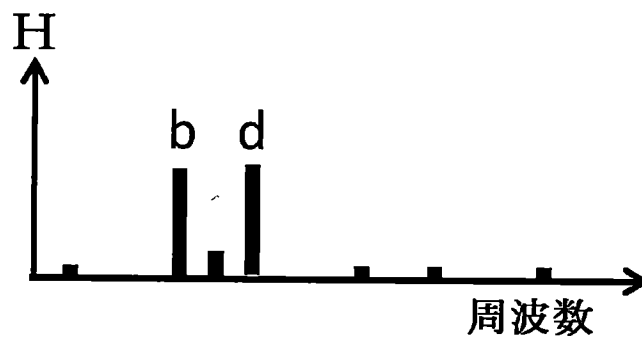
[図4A]

図4A



[図4B]

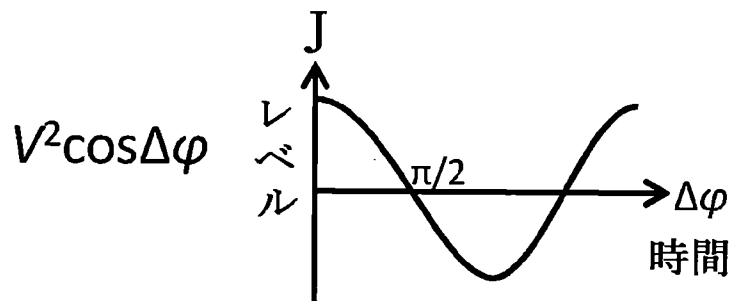
図4B



bとd以外は弱いので無視する

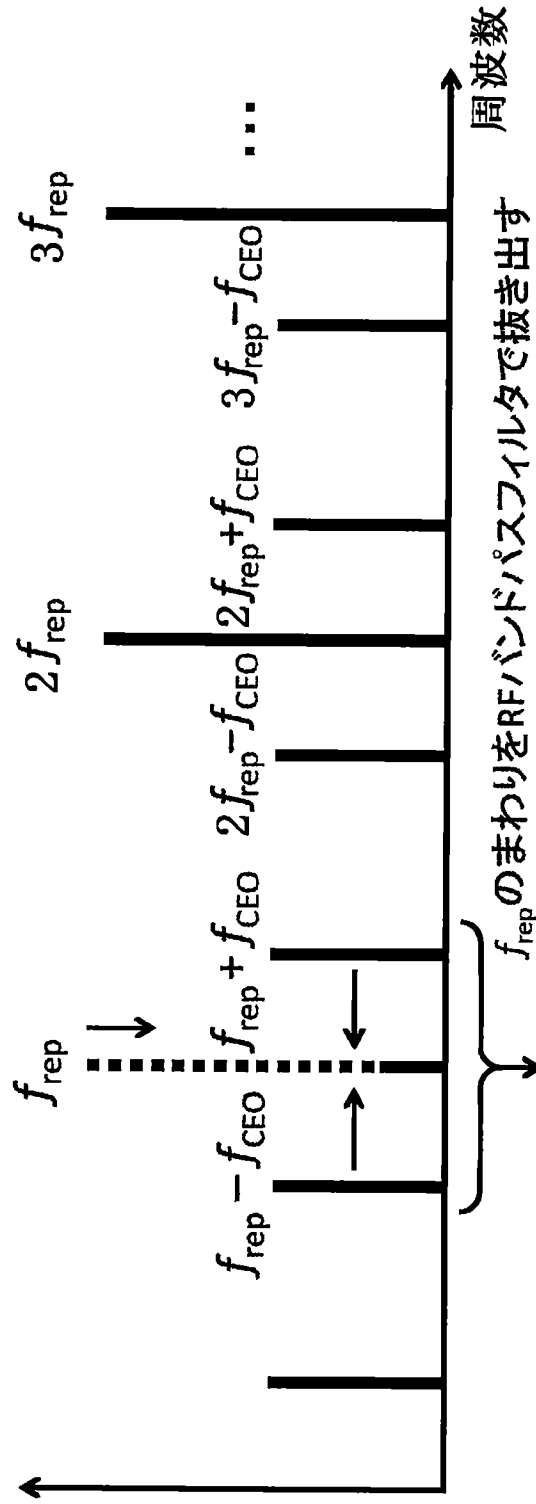
[図4C]

図4C



[図5]

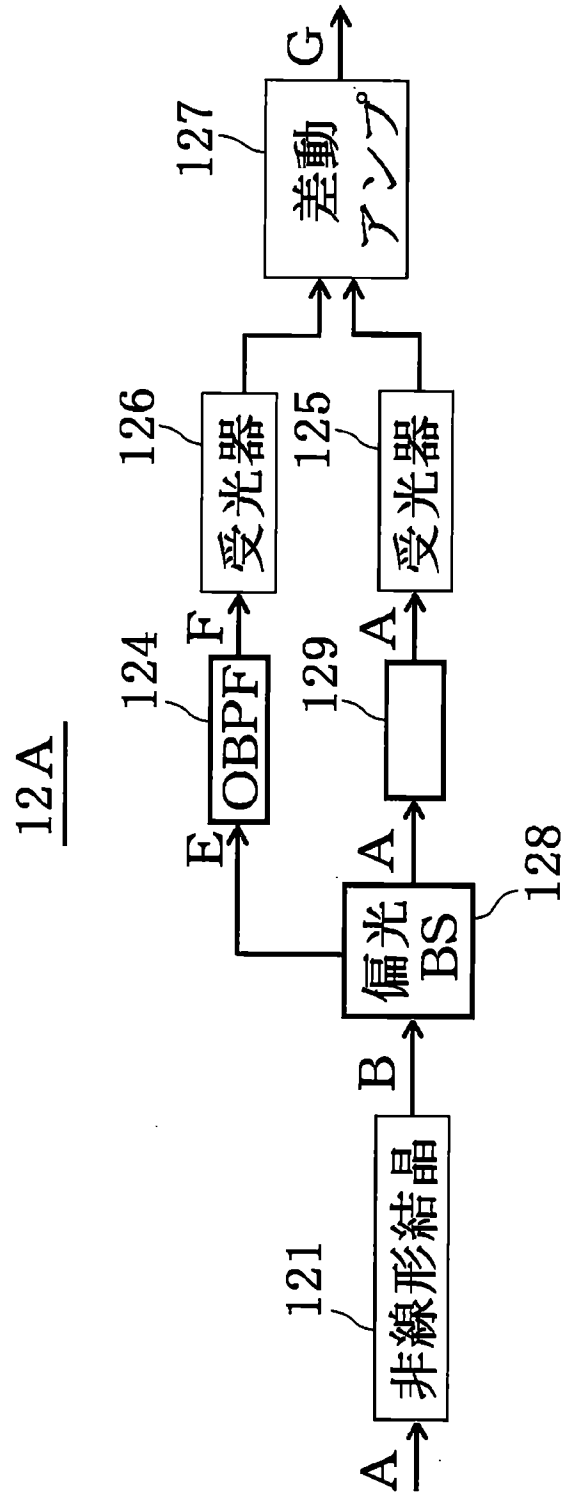
図5



- (イ) 差動検出を利用して $f_{\text{rep}}$ のパワーを小さくする。
- (ロ)  $f_{\text{CEO}}$ を小さくしていく、 $f_{\text{rep}} - f_{\text{CEO}}$ と $f_{\text{rep}} + f_{\text{CEO}}$ を近づけて位相同期する。  
 $(f_{\text{rep}} - f_{\text{CEO}} = f_{\text{rep}} + f_{\text{CEO}} \Rightarrow f_{\text{CEO}} = 0)$

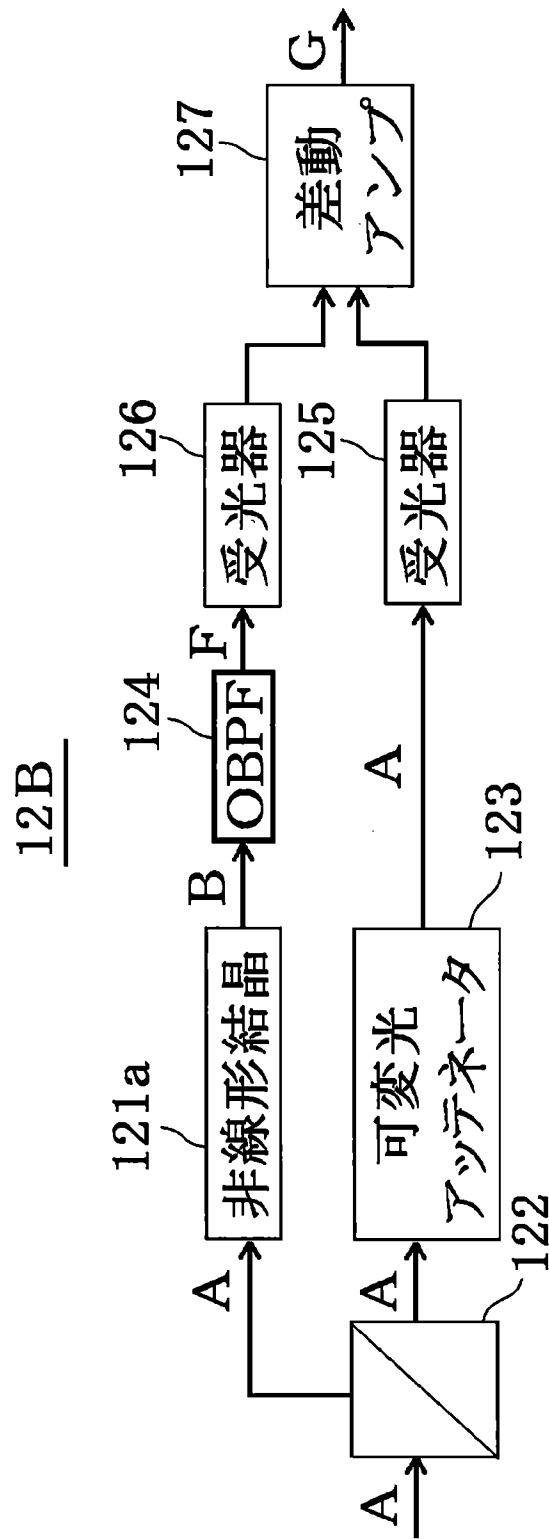
[図6]

図6

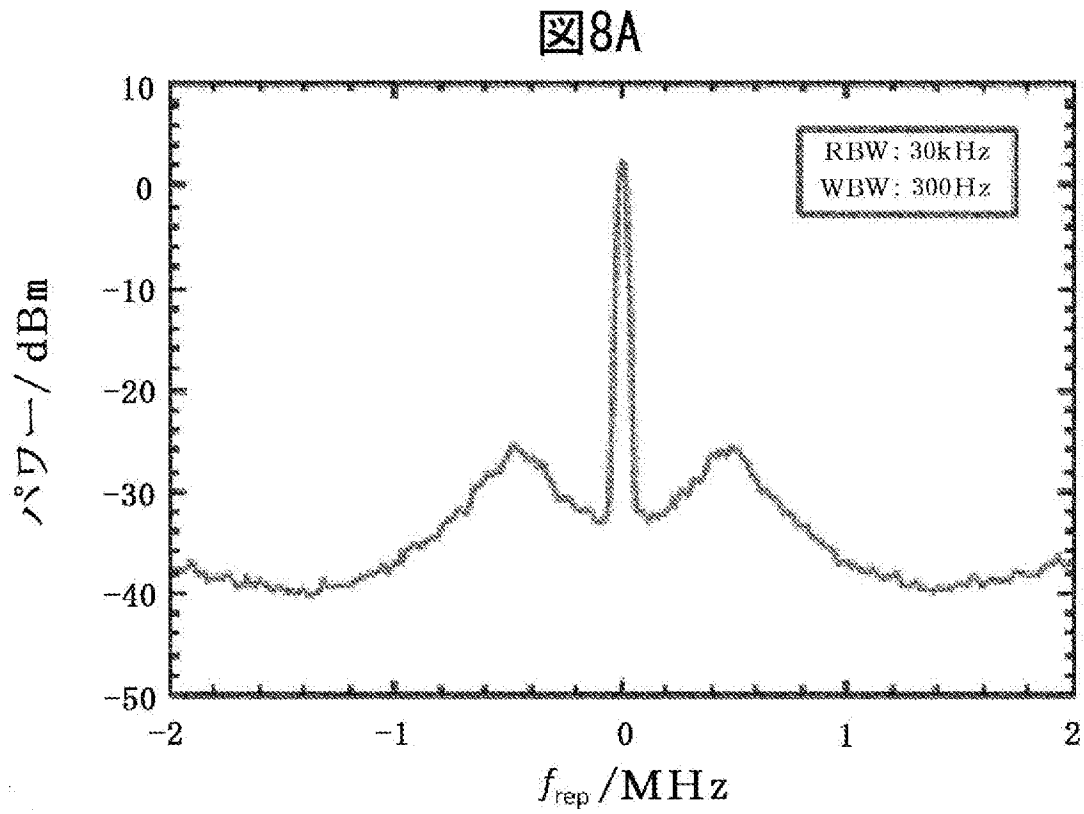


[図7]

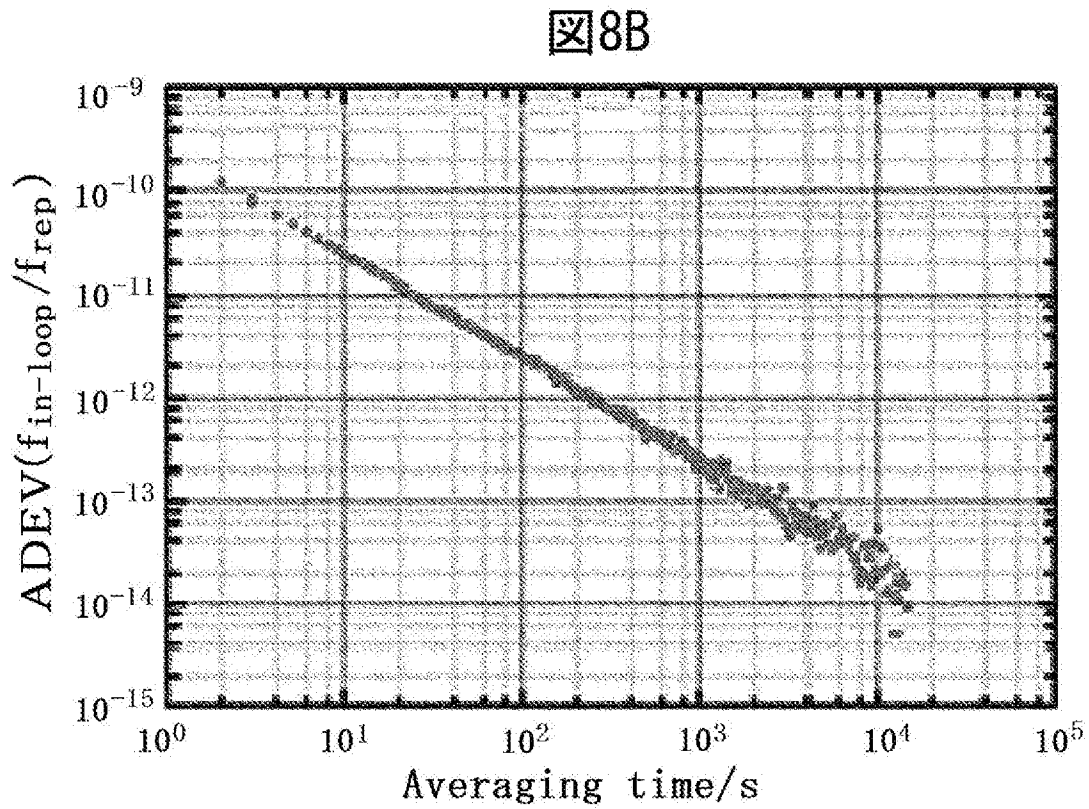
図7



[図8A]



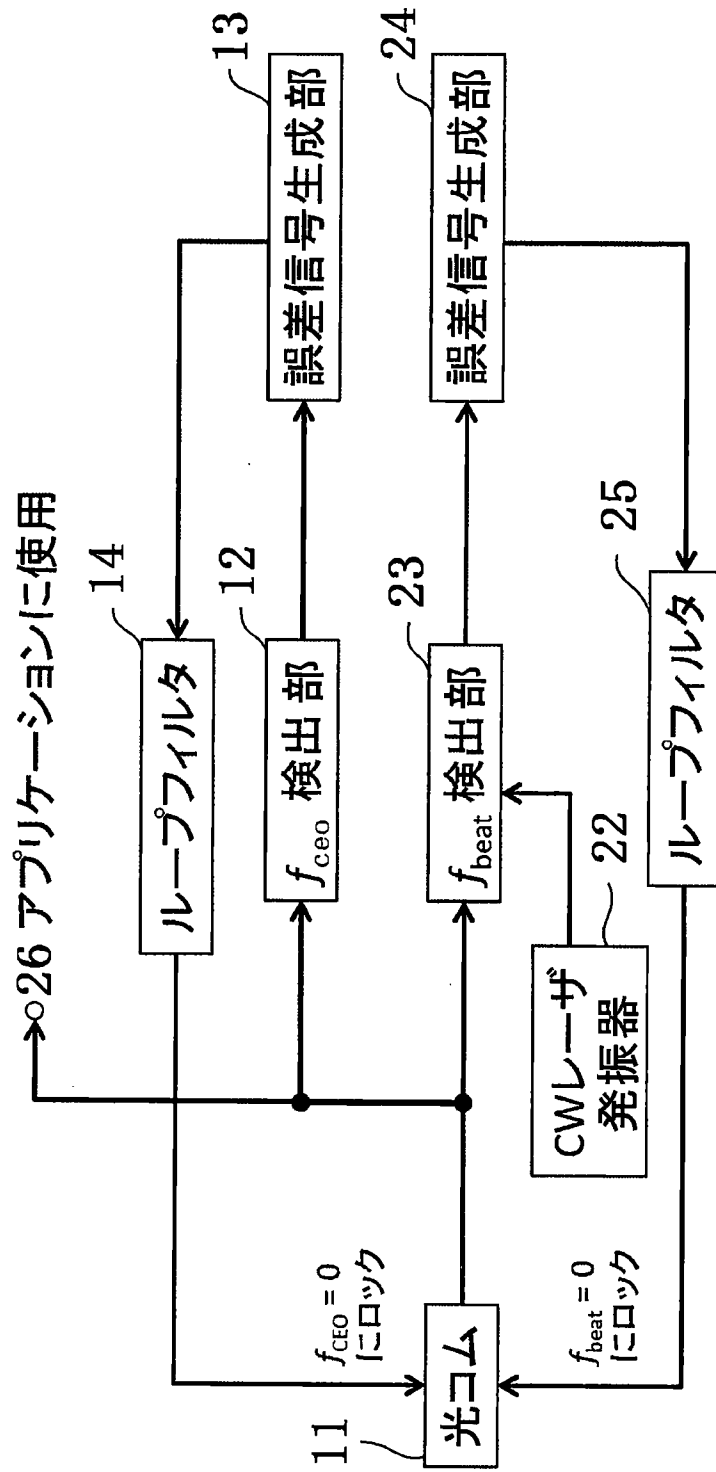
[図8B]



[図9]

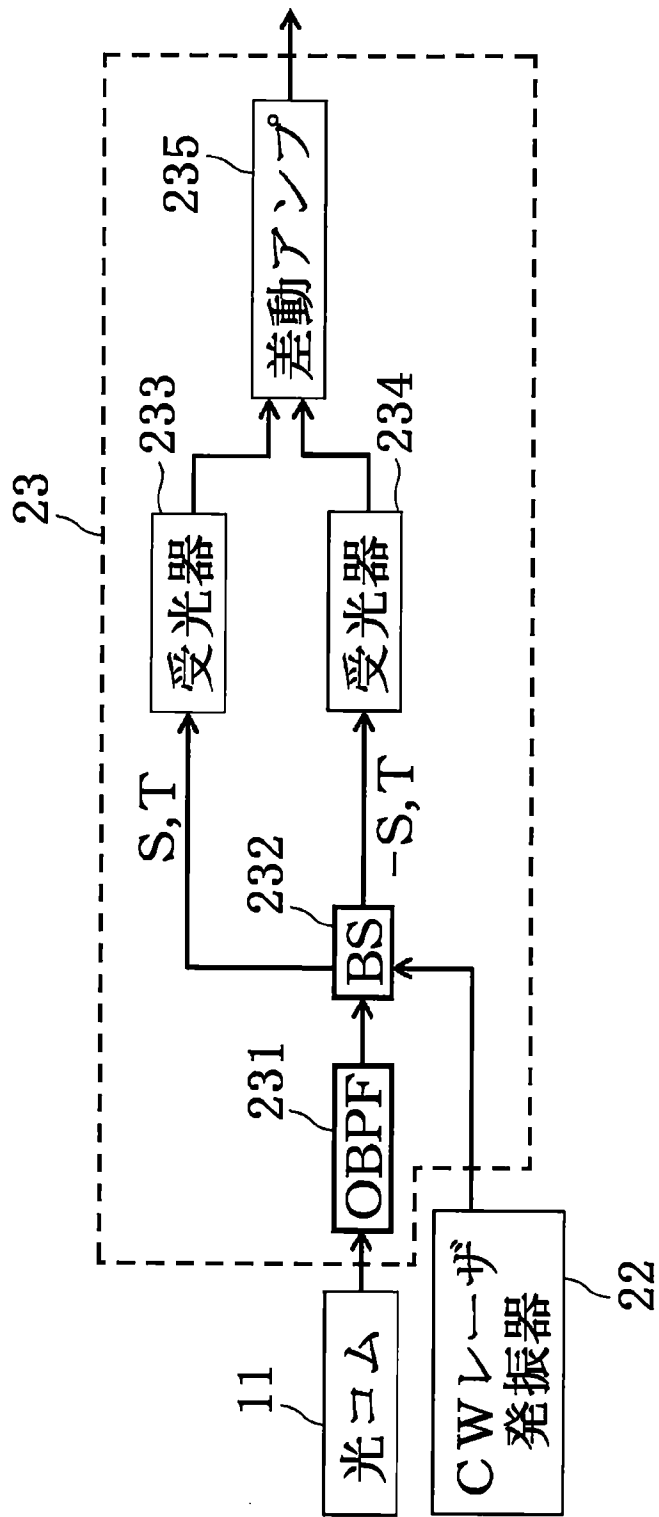
図9

20



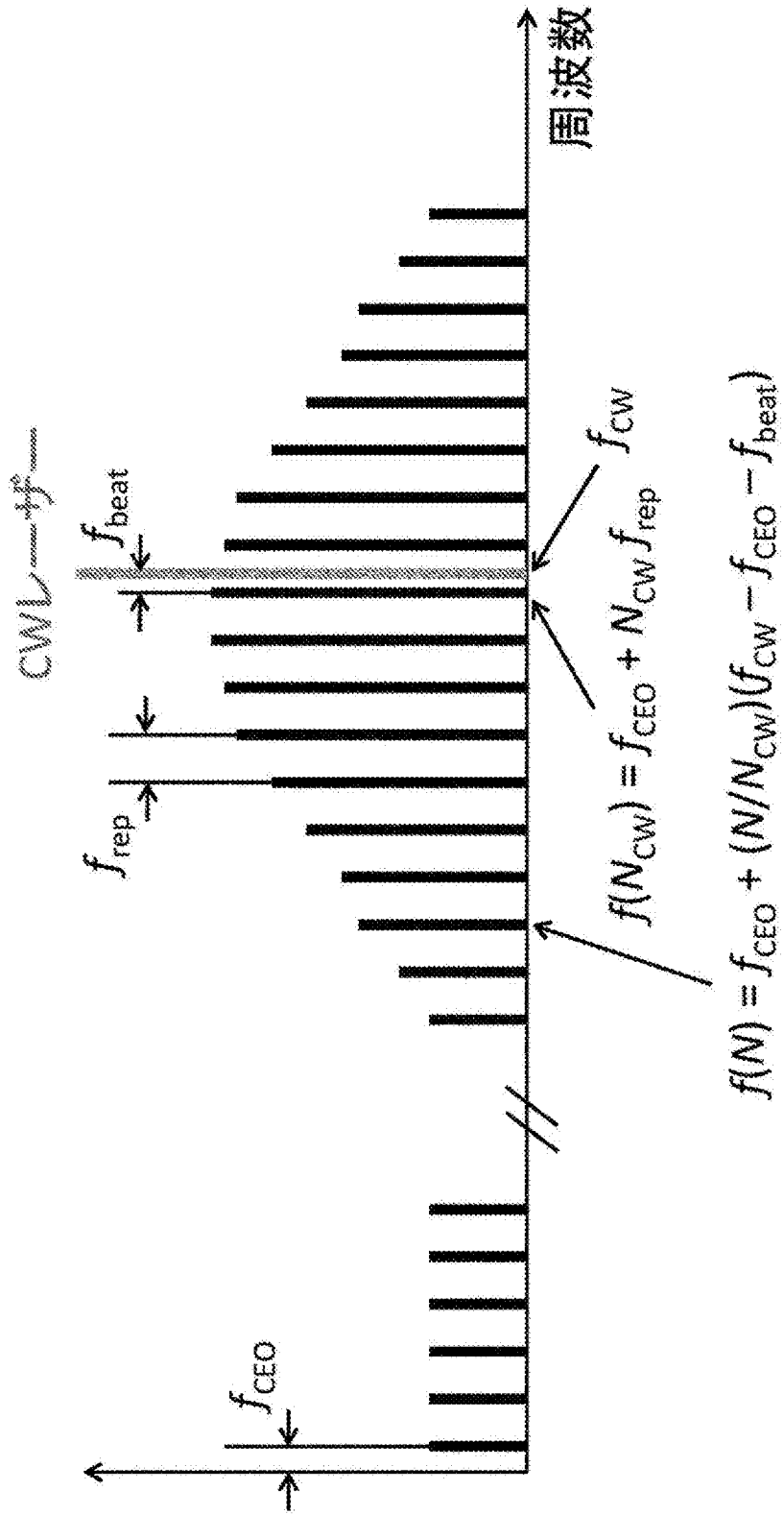
[図10]

図10



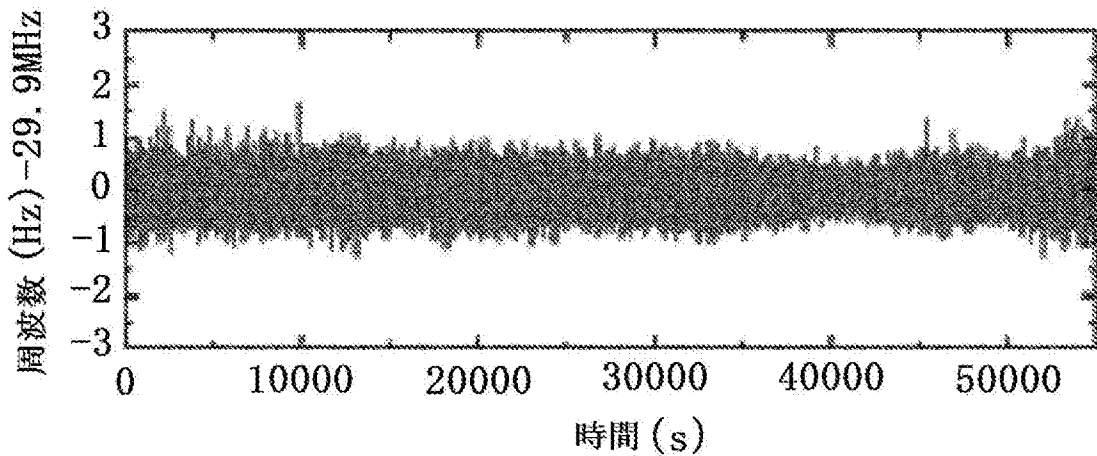
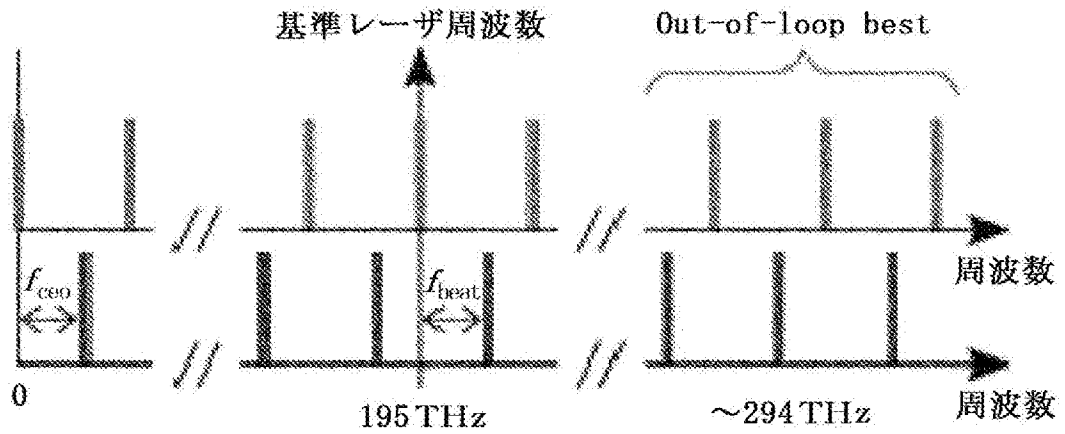
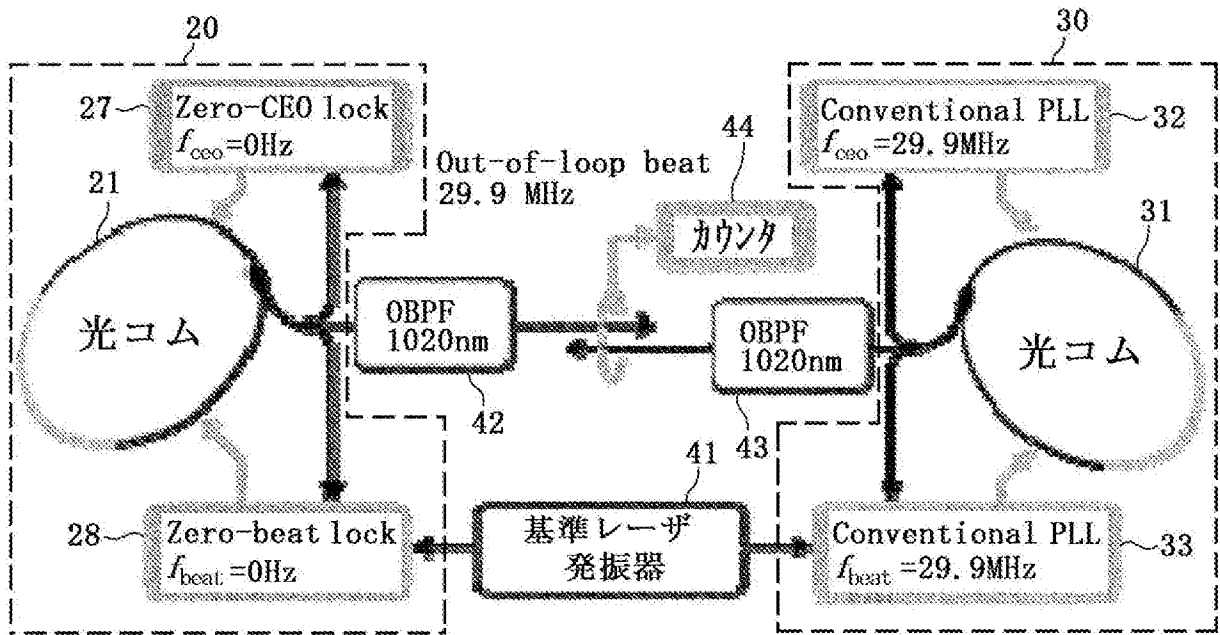
[図11]

図11



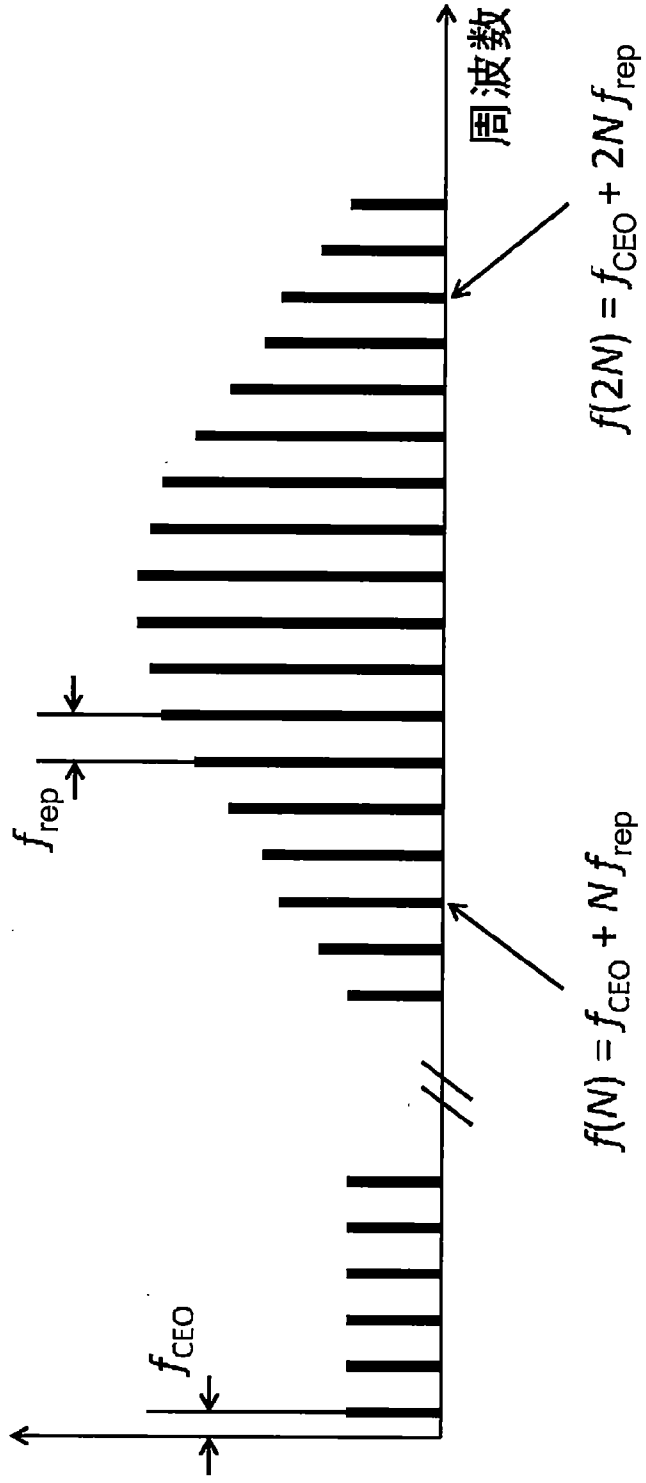
[図12]

図12



[図13]

図13



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2018/012205

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

Int. Cl. G02F2/02 (2006.01) i, G02F1/37 (2006.01) i, H01S3/137 (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)

Int. Cl. G02F2/02, G02F1/37, H01S3/137

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996  
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2018  
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2018  
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2018

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

Scopus, OSA Publishing

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	OKUBO, Sho et al., Novel phase-locking schemes for the carrier envelope offset frequency of an optical frequency comb, Applied Physics Express, 15 October 2015, vol. 8, p. 112402	1-6
A	JP 2014-013935 A (ADVANTEST CORP., NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) 23 January 2014, paragraphs [0003]-[0005], [0031]-[0036], fig. 1, 2 (Family: none)	1-6
A	JP 2014-135341 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORP., OITA UNIVERSITY) 24 July 2014, paragraphs [0002]-[0006], [0015], [0016], fig. 1, 4 (Family: none)	1-6

Further documents are listed in the continuation of Box C.  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 29.05.2018	Date of mailing of the international search report 12.06.2018
---	--

Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer  Telephone No.
--	---

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/JP2018/012205

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2007-256365 A (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD., NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) 04 October 2007, paragraphs [0008], [0027]-[0029], [0034]-[0040], fig. 1, 2 & WO 2007119449 A1, paragraphs [0008], [0029]-[0031], [0036]-[0042], fig. 1, 2	1-6
A	RAUSCH, Stefan et al., Few-cycle oscillator pulse train with constant carrier-envelope-phase and 65 as jitter, Optics Express, 26 October 2009, vol. 17, no. 22, pp. 20282-20290, p. 20282, abstract to p. 20286, line 13, fig. 1-2	1-6
A	US 2012/0093181 A1 (TOPTICA PHOTONICS AG) 19 April 2012, paragraphs [0003]-[0007] & DE 102010048576 A1	1-6
P, X	OKUBO Sho et al., Offset-free optical frequency comb self-referencing with an f-2f interferometer, Optica, 08 February 2018, vol. 5, no. 2, pp. 188-192	1-6

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））  
 Int.Cl. G02F2/02(2006.01)i, G02F1/37(2006.01)i, H01S3/137(2006.01)i

B. 調査を行った分野  
 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））  
 Int.Cl. G02F2/02, G02F1/37, H01S3/137

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの  
 日本国実用新案公報 1922-1996年  
 日本国公開実用新案公報 1971-2018年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2018年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2018年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）  
 Scopus, OSA Publishing

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	OKUBO, Sho et al., Novel phase-locking schemes for the carrier envelope offset frequency of an optical frequency comb, Applied Physics Express, 2015.10.15, Vol. 8, p. 112402	1-6

☑ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー	の日の後に公表された文献
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」同一パテントファミリー文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	

国際調査を完了した日  
 29.05.2018

国際調査報告の発送日  
 12.06.2018

国際調査機関の名称及びあて先  
 日本国特許庁（ISA/J P）  
 郵便番号100-8915  
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員） 佐藤 宙子	2L	1170
電話番号 03-3581-1101 内線 3295		

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2014-013935 A (株式会社アドバンテスト、独立行政法人産業技術総合研究所) 2014.01.23, 段落 [0003] - [0005]、 [0031] - [0036]、[図1] - [図2] (ファミリーなし)	1-6
A	JP 2014-135341 A (日本電信電話株式会社、国立大学法人大分大学) 2014.07.24, 段落 [0002] - [0006]、 [0015] - [0016]、[図1]、[図4] (ファミリーなし)	1-6
A	JP 2007-256365 A (住友電気工業株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所) 2007.10.04, 段落 [0008]、[0027] - [0029]、 [0034] - [0040]、[図1] - [図2] & WO 2007119449 A1, 段落 [0008]、[0029] - [0031]、 [0036] - [0042]、[図1] - [図2]	1-6
A	RAUSCH Stefan et al., Few-cycle oscillator pulse train with constant carrier-envelope-phase and 65 as jitter, Optics Express, 2009.10.26, Vol. 17, No. 22, p. 20282-20290 第20282頁 Abstract - 第20286頁第13行、 [図1] - [図2]	1-6
A	US 2012/0093181 A1 (TOPTICA PHOTONICS AG) 2012.04.19, 段落 [0003] - [0007] & DE 102010048576 A1	1-6
P, X	OKUBO Sho et al., Offset-free optical frequency comb self-referencing with an f-2f interferometer, Optica, 2018.02.08, Vol. 5, No. 2, p. 188-192	1-6