

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5589166号  
(P5589166)

(45) 発行日 平成26年9月17日 (2014.9.17)

(24) 登録日 平成26年8月8日 (2014.8.8)

(51) Int.Cl.		F I
<b>H O 1 S</b>	<b>1/06</b>	<b>(2006.01)</b>
<b>H O 1 S</b>	<b>5/0687</b>	<b>(2006.01)</b>
<b>H O 3 L</b>	<b>7/26</b>	<b>(2006.01)</b>

H O 1 S	1/06
H O 1 S	5/0687
H O 3 L	7/26

請求項の数 7 (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2009-258872 (P2009-258872)	(73) 特許権者	000002369
(22) 出願日	平成21年11月12日 (2009.11.12)		セイコーエプソン株式会社
(65) 公開番号	特開2011-108678 (P2011-108678A)		東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
(43) 公開日	平成23年6月2日 (2011.6.2)	(74) 代理人	100090387
審査請求日	平成24年11月7日 (2012.11.7)		弁理士 布施 行夫
		(74) 代理人	100090398
			弁理士 大淵 美千栄
		(72) 発明者	弥道 幸治
			東京都日野市日野421-8 エプソント
			ヨコム株式会社内
		審査官	杉山 輝和

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子発振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数の周波数成分を含む第1の光と、複数の周波数成分を含む第2の光とを原子に入射し、前記第1の光に含まれる周波数成分のいずれかと、前記第2の光に含まれる周波数成分のいずれかととの周波数差が、前記原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と等しく、前記2つの周波数成分が3準位系のエネルギー準位に基づく電磁誘起透過現象を起こし、

前記第1の光の中心周波数と前記第2の光の中心周波数との周波数差は、前記2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と異なることを特徴としている原子発振器。

【請求項 2】

前記エネルギー準位は、型3準位系であることを特徴とする請求項1に記載の原子発振器。

【請求項 3】

前記第1の光に含まれる複数の周波数成分間の周波数差と、前記第2の光に含まれる複数の周波数成分間の周波数差とが一致することを特徴とする請求項1 または2に記載の原子発振器。

【請求項 4】

前記第1の光と前記第2の光とを発生する光源と、

前記原子を収容しているセルと、

前記第1の光と前記第2の光とがそれぞれ前記セルを通過した光の強度を検出する光検

出手段と、

前記光検出手段の検出結果に基づいて、前記第 1 の光の中心周波数および前記第 2 の光の中心周波数の少なくとも一方を制御する制御手段と、  
を備えていることを特徴とする請求項 1 乃至 3 の何れか一項に記載の原子発振器。

【請求項 5】

前記制御手段は、第 1 の変調周波数  $f_{m1}$  を有する第 1 の信号を発生させる第 1 の変調周波数発生手段と、第 2 の変調周波数  $f_{m2}$  を有する第 2 の信号を発生させる第 2 の変調周波数発生手段とを有し、

前記光源は、

前記第 1 の信号及び前記第 2 の信号に基づいて周波数  $f_0$  の信号を変調し、中心周波数が  $f_0 + f_{m1}$  であって周波数成分間の周波数差  $f_{m2}$  である前記第 1 の光及び中心周波数が  $f_0 - f_{m1}$  であって周波数成分間の周波数差  $f_{m2}$  である前記第 2 の光を発生させることを特徴とする請求項 4 に記載の原子発振器。

10

【請求項 6】

前記第 2 の変調周波数発生手段は、前記第 1 の信号を周波数変換して前記第 2 の信号を発生させることを特徴とする請求項 5 に記載の原子発振器。

【請求項 7】

前記原子はアルカリ金属原子であることを特徴とする請求項 1 乃至 6 の何れか一項に記載の原子発振器。

【発明の詳細な説明】

20

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子発振器に関する。

【背景技術】

【0002】

電磁誘起透過 (EIT: Electromagnetically Induced Transparency) 方式 (CPT (Coherent Population Trapping) 方式と呼ばれることもある) による原子発振器は、アルカリ金属原子に波長 (周波数) の異なる 2 つの共鳴光を同時に照射すると、2 つの共鳴光の吸収が停止する現象を利用した発振器である。

【0003】

30

アルカリ金属原子と 2 つの共鳴光との相互作用機構は、図 13 (A) に示すように、型 3 準位系モデルで説明できることが知られている。アルカリ金属原子は 2 つの基底準位を有し、基底準位 1 と励起準位とのエネルギー差に相当する波長 (周波数  $f_1$ ) を有する共鳴光 1、あるいは基底準位 2 と励起準位とのエネルギー差に相当する波長 (周波数  $f_2$ ) を有する共鳴光 2 を、それぞれ単独でアルカリ金属原子に照射すると、よく知られているように光吸収が起きる。ところが、図 13 (B) に示すように、このアルカリ金属原子に、周波数差  $f_1 - f_2$  が基底準位 1 と基底準位 2 のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数と正確に一致する共鳴光 1 と共鳴光 2 を同時に照射すると、2 つの基底準位の重ね合わせ状態、即ち量子干渉状態になり、励起準位への励起が停止して共鳴光 1 と共鳴光 2 がアルカリ金属原子を透過する透明化現象 (EIT 現象) が起きる。この EIT 現象を利用し、共鳴光 1 と共鳴光 2 との周波数差  $f_1 - f_2$  が基底準位 1 と基底準位 2 のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数からずれた時の光吸収挙動の急峻な変化を検出し制御することで、高精度な発振器をつくることができる。

40

【0004】

図 14 は、従来の CPT 方式による原子発振器の一般的な構成の概略図である。図 14 に示すように、従来の CPT 方式による原子発振器は、電流駆動回路により発生した周波数  $f_0$  ( $= v / \lambda_0$ :  $v$  は光の速度、 $\lambda_0$  はレーザー光の中心波長) の駆動電流を、基底準位 1 と基底準位 2 のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数の 1/2 の変調周波数  $f_{m1}$  で変調することにより、半導体レーザーに周波数  $f_1 = f_0 + f_{m1}$  の共鳴光 1 と周波数  $f_2 = f_0 - f_{m1}$  の共鳴光 2 を発生させ (図 13 (B))、原子セルに含まれる気体

50

状のアルカリ金属原子に E I T 現象を起こさせる。この原子発振器は、原子セルを透過した光の検出量が最大になるように電圧制御水晶発振器 (V C X O : Voltage Controlled Crystal Oscillator) の発振周波数を制御し、その発振周波数を P L L (Phase Locked Loop) により通倍率  $N / R$  ( $N$ 、 $R$  はともに正の整数) で通倍して  $E_{12}$  に相当する周波数の  $1 / 2$  の変調周波数  $f_{m1}$  の信号を生成する。このような構成によれば、電圧制御水晶発振器 (V C X O) は極めて安定に発振動作を継続するので、周波数安定度が極めて高い発振信号を発生させることができる。なお、ここで言う原子セルとは、気体状のアルカリ金属原子とこれを封入する容器とから構成されたものとして、以降説明をする。

【先行技術文献】

【特許文献】

10

【0005】

【特許文献1】米国特許第6320472号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、従来の原子発振器では、 $E_{12}$  に相当する周波数 (例えば、セシウム原子であれば  $9.19263 \cdots \text{GHz}$ ) の  $1 / 2$  の周波数と正確に一致する変調周波数  $f_{m1}$  を直接又は高調波によって発生させる P L L 等の発振器を特別に用意しなければならないため、設計の自由度が制限される。

【0007】

20

また、変調周波数  $f_{m1}$  が  $E_{12}$  に相当する周波数の  $1 / 2$  の周波数と正確に一致した状態で安定するので、従来の原子発振器では、P L L の通倍率  $N / R$  の精度によっては電圧制御水晶発振器 (V C X O) を正確に所望の周波数 (公称周波数) で発振させることができない場合がある。そのため、例えば、電圧制御水晶発振器 (V C X O) の発振周波数が  $9.999 \text{ MHz}$  であれば、公称周波数の  $10 \text{ MHz}$  を得るためだけに高精度の周波数変換回路が必要になり簡易な構成で実現できない場合もある (図14参照)。

【0008】

本発明は、以上のような問題点に鑑みてなされたものであり、本発明のいくつかの態様によれば、設計の自由度を向上させることにより比較的簡易な構成の原子発振器を提供することができる。

30

【課題を解決するための手段】

【0009】

(1) 本発明は、アルカリ金属原子に共鳴光対を照射することにより生じる電磁誘起透過現象を利用する原子発振器であって、中心周波数を  $f_1$  として周波数が  $f$  ずつ異なる複数の周波数成分を有する第1の光と、中心周波数を  $f_2$  として周波数が  $f$  ずつ異なる複数の周波数成分を有する第2の光と、を発生させる光源と、前記アルカリ金属原子を透過した前記第1の光及び前記第2の光を含む光の強度を検出する光検出手段と、前記光検出手段の検出結果に基づいて、前記第1の光の所定の周波数成分と前記第2の光の所定の周波数成分の周波数差が前記アルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数に等しくなるように制御する制御手段と、を含み、前記第1の光の中心周波数  $f_1$  と前記第2の光の中心周波数  $f_2$  の周波数差は、前記アルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と異なる。

40

【0010】

従来の C P T 方式の原子発振器では、2つの共鳴光の周波数差がアルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と一致するように制御がかかるのに対して、本発明の原子発振器では、第1の光の所定の周波数成分と第2の光の所定の周波数成分の周波数差がアルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数に等しくなるように制御がかかる。すなわち、第1の光の所定の周波数成分と第2の光の所定の周波数成分が2つの共鳴光になるように制御がかかる (但し、第1の光の中心周波数  $f_1$  と第2の光の中心周波数  $f_2$  がともに共鳴光になることはない)。

50

## 【 0 0 1 1 】

要するに、本発明の原子発振器では、第 1 の光の中心周波数  $f_1$  以外の所定の周波数成分と第 2 の光の中心周波数  $f_2$  以外の所定の周波数成分の対、又は、第 1 の光の中心周波数  $f_1$  と第 2 の光の中心周波数  $f_2$  以外の所定の周波数成分の対、又は、第 1 の光の中心周波数  $f_1$  以外の所定の周波数成分と第 2 の光の中心周波数  $f_2$  の対のいずれかが共鳴対になるように設計すればよい。

## 【 0 0 1 2 】

従って、本発明によれば、従来の原子発振器と比較して設計の自由度が向上し、そのため比較的簡易な構成の原子発振器を提供することができる。

## 【 0 0 1 3 】

( 2 ) この原子発振器において、前記制御手段は、前記光検出手段の検出結果に基づいて、第 1 の変調周波数  $f_{m1}$  を有する第 1 の信号を発生させる第 1 の変調周波数発生手段と、第 2 の変調周波数  $f_{m2}$  を有する第 2 の信号を発生させる第 2 の変調周波数発生手段と、を含み、前記光源は、前記第 1 の信号及び前記第 2 の信号に基づいて所定の周波数  $f_0$  の信号を変調し、 $f_1 = f_0 + f_{m1}$  及び  $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 、かつ、 $f = f_{m2}$  となる前記第 1 の光及び前記第 2 の光を発生させるようにしてもよい。

## 【 0 0 1 4 】

本発明の原子発振器では、第 1 の光の所定の周波数成分 ( $f_1 + j \times f$ ) と第 2 の光の所定の周波数成分 ( $f_2 + k \times f$ ) の周波数差、すなわち、 $(2 \times f_{m1} + (j - k) \times f_{m2})$  ( $j, k$  は整数、かつ、 $j - k$ ) がアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と一致すればよい。

## 【 0 0 1 5 】

従って、本発明によれば、直接又は簡単な分周器等を用いて所望の周波数が得られるように、上記の条件を満たす第 1 の変調周波数  $f_{m1}$  と第 2 の変調周波数  $f_{m2}$  を選択すれば、比較的簡易な構成の原子発振器を実現することができる。

## 【 0 0 1 6 】

( 3 ) この原子発振器において、前記第 2 の変調周波数発生手段は、前記第 1 の信号を周波数変換して前記第 2 の信号を発生させるようにしてもよい。

## 【 0 0 1 7 】

( 4 ) この原子発振器において、前記第 2 の変調周波数発生手段は、前記第 1 の信号から独立して前記第 2 の変調周波数  $f_{m2}$  で発振するようにしてもよい。

## 【 0 0 1 8 】

( 5 ) この原子発振器は、前記第 1 の信号を周波数変換して所定の周波数の信号を発生させる周波数変換手段を含むようにしてもよい。

## 【 0 0 1 9 】

( 6 ) この原子発振器において、前記制御手段は、前記光検出手段の検出結果に基づいて、第 2 の変調周波数  $f_{m2}$  を有する第 2 の信号を発生させる第 2 の変調周波数発生手段と、前記第 2 の信号を周波数変換して第 1 の変調周波数  $f_{m1}$  を有する第 1 の信号を発生させる第 1 の変調周波数発生手段と、を含み、前記光源は、前記第 1 の信号及び前記第 2 の信号に基づいて所定の周波数  $f_0$  の信号を変調し、 $f_1 = f_0 + f_{m1}$  及び  $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 、かつ、 $f = f_{m2}$  となる前記第 1 の光及び前記第 2 の光を発生させるようにしてもよい。

## 【 0 0 2 0 】

本発明の原子発振器では、第 1 の光の所定の周波数成分 ( $f_1 + j \times f$ ) と第 2 の光の所定の周波数成分 ( $f_2 + k \times f$ ) の周波数差、すなわち、 $(2 \times f_{m1} + (j - k) \times f_{m2})$  ( $j, k$  は整数、かつ、 $j - k$ ) がアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と一致すればよい。

## 【 0 0 2 1 】

従って、本発明によれば、直接又は簡単な分周器等を用いて所望の周波数が得られるように、上記の条件を満たす第 1 の変調周波数  $f_{m1}$  と第 2 の変調周波数  $f_{m2}$  を選択す

10

20

30

40

50

ば、比較的簡易な構成の原子発振器を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 2 】

【図 1】本実施形態の原子発振器の機能ブロック図。

【図 2】図 2 ( A ) はアルカリ金属原子の 型 3 準位モデルと照射光 1 及び照射光 2 の関係の第 1 の例を示す図であり、図 2 ( B ) は照射光 1 及び照射光 2 の周波数スペクトラムの第 1 の例を示す図。

【図 3】図 3 ( A ) はアルカリ金属原子の 型 3 準位モデルと照射光 1 及び照射光 2 の関係の第 2 の例を示す図であり、図 3 ( B ) は照射光 1 及び照射光 2 の周波数スペクトラムの第 2 の例を示す図。

10

【図 4】図 4 ( A ) はアルカリ金属原子の 型 3 準位モデルと照射光 1 及び照射光 2 の関係の第 3 の例を示す図であり、図 4 ( B ) は照射光 1 及び照射光 2 の周波数スペクトラムの第 3 の例を示す図。

【図 5】第 1 実施形態の原子発振器の構成を示す図。

【図 6】第 1 実施形態の原子発振器における照射光 1 及び照射光 2 の一例について説明するための図。

【図 7】第 1 実施形態の原子発振器における第 2 変調周波数発生回路構成例を示す図。

【図 8】第 1 実施形態の原子発振器の変形例の構成を示す図。

【図 9】第 2 実施形態の原子発振器の構成を示す図。

【図 1 0】第 2 実施形態の原子発振器における照射光 1 及び照射光 2 の一例について説明するための図。

20

【図 1 1】第 2 実施形態の原子発振器における第 1 変調周波数発生回路の構成例を示す図。

【図 1 2】第 3 実施形態の原子発振器の構成を示す図。

【図 1 3】図 1 3 ( A ) はアルカリ金属原子のエネルギー準位を模式的に示す図であり、図 1 3 ( B ) は 2 つの共鳴光の周波数スペクトラムを示す図。

【図 1 4】従来の C P T 方式による原子発振器の一般的な構成の概略図。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 3 】

以下、本発明の好適な実施形態について図面を用いて詳細に説明する。なお、以下に説明する実施の形態は、特許請求の範囲に記載された本発明の内容を不当に限定するものではない。また以下で説明される構成の全てが本発明の必須構成要件であるとは限らない。

30

【 0 0 2 4 】

図 1 は、本実施形態の原子発振器の機能ブロック図である。

【 0 0 2 5 】

本実施形態の原子発振器 1 は、光源 1 0、原子セル 2 0、光検出手段 3 0 及び制御手段 4 0 を含んで構成されている。

【 0 0 2 6 】

光源 1 0 は、中心周波数を  $f_1$  として周波数が  $f$  ずつ異なる複数の周波数成分を有する第 1 の光と、中心周波数を  $f_2$  として周波数が  $f$  ずつ異なる複数の周波数成分を有する第 2 の光と、を発生させる。

40

【 0 0 2 7 】

原子セル 2 0 には気体状のアルカリ金属原子が含まれており、光源 1 0 により、第 1 の光と第 2 の光が照射される。以下、第 1 の光及び第 2 の光をそれぞれ「照射光 1」及び「照射光 2」ということにする。

【 0 0 2 8 】

光検出手段 3 0 は、アルカリ金属原子を透過した照射光 1 及び照射光 2 を含む光の強度を検出する。

【 0 0 2 9 】

制御手段 4 0 は、光検出手段 3 0 の検出結果に基づいて、照射光 1 の所定の周波数成分

50

と照射光 2 の所定の周波数成分の周波数差がアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数に等しくなるように制御する。ただし、本実施形態では、照射光 1 の中心周波数  $f_1$  と照射光 2 の中心周波数  $f_2$  の周波数差は、アルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と一致しない。

#### 【0030】

すなわち、制御手段 40 は、照射光 1 の中心周波数  $f_1$  以外の所定の周波数成分と照射光 2 の中心周波数  $f_2$  以外の所定の周波数成分の対、又は、照射光 1 の中心周波数  $f_1$  と照射光 2 の中心周波数  $f_2$  以外の所定の周波数成分の対、又は、照射光 1 の中心周波数  $f_1$  以外の所定の周波数成分と照射光 2 の中心周波数  $f_2$  の対のいずれかを共鳴光対として、その周波数がアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と一致するように制御する。

10

#### 【0031】

このような制御手段 40 は、図 1 に示すように、第 1 の変調周波数発生手段 42 と、第 2 の変調周波数発生手段 44 と、を含んで構成することができる。

#### 【0032】

例えば、第 1 の変調周波数発生手段 42 が、光検出手段 30 の検出結果に基づいて、第 1 の変調周波数  $f_{m1}$  を有する第 1 の信号を発生させ、第 2 の変調周波数発生手段 44 が、第 2 の変調周波数  $f_{m2}$  を有する第 2 の信号を発生させるように構成してもよい。ここで、第 2 の変調周波数発生手段 44 は、第 1 の変調周波数発生手段 42 により発生する第 1 の信号を周波数変換して第 2 の信号を発生させるようにしてもよいし、第 1 の信号から独立して第 2 の変調周波数  $f_{m2}$  で発振するように構成してもよい。後者の場合、制御手段 40 は、さらに、第 1 の信号を周波数変換して所定の周波数の信号を発生させる周波数変換手段 46 を含むようにしてもよい。

20

#### 【0033】

また、例えば、第 2 の変調周波数発生手段 44 が、光検出手段 30 の検出結果に基づいて、第 2 の変調周波数  $f_{m2}$  を有する第 2 の信号を発生させ、第 1 の変調周波数発生手段 42 が、第 2 の変調周波数発生手段 44 により発生する第 2 の信号を周波数変換して第 1 の変調周波数  $f_{m1}$  を有する第 1 の信号を発生させるように構成してもよい。

#### 【0034】

そして、いずれの場合も、光源 10 は、第 1 の変調周波数発生手段 42 により発生する第 1 の信号及び第 2 の変調周波数発生手段 44 により発生する第 2 の信号に基づいて所定の周波数  $f_0$  の信号を変調し、 $f_1 = f_0 + f_{m1}$  及び  $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 、かつ、 $f = f_{m2}$  となる照射光 1 及び照射光 2 を発生させるようにすればよい。

30

#### 【0035】

図 2 (A) 及び図 2 (B)、図 3 (A) 及び図 3 (B)、図 4 (A) 及び図 4 (B) は、本実施形態の原子発振器において発生する照射光 1 及び照射光 2 の第 1、第 2、第 3 の例についてそれぞれ説明するための図である。図 2 (A)、図 3 (A) 及び図 4 (A) は、アルカリ金属原子の型 3 準位モデルと照射光 1 及び照射光 2 の関係を示す図であり、図 2 (B)、図 3 (B)、図 4 (B) は、照射光 1 及び照射光 2 の周波数スペクトラムを示す図である。

40

#### 【0036】

図 2 (B)、図 3 (B) 及び図 4 (B) に示すように、第 1、第 2、第 3 の例ともに、周波数  $f_0 (= \nu / \lambda_0)$  に対して、上側サイドバンドに周波数が  $f_{m2}$  ずつ異なる複数の周波数成分を有する照射光 1 と、下側サイドバンドに周波数が  $f_{m2}$  ずつ異なる複数の周波数成分を有する照射光 2 が存在する。照射光 1 の中心周波数  $f_1 = f_0 + f_{m1}$  であり、照射光 2 の中心周波数  $f_2 = f_0 - f_{m1}$  である。

#### 【0037】

図 2 (A) 及び図 2 (B) に示すように、第 1 の例では、照射光 1 の周波数成分  $f_1 - f_{m2}$  と照射光 2 の周波数成分  $f_2 + f_{m2}$  との周波数差が、アルカリ金属原子の基底準位 1 と基底準位 2 のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数と一致している。従って、ア

50

ルカリ金属原子は、照射光 1 の周波数成分  $f_1 - f_{m2}$  と照射光 2 の周波数成分  $f_2 + f_{m2}$  を共鳴光対として EIT 現象を起こす。

【0038】

図 3 (A) 及び図 3 (B) に示すように、第 2 の例では、照射光 1 の周波数成分  $f_1 + f_{m2}$  と照射光 2 の周波数成分  $f_2 - f_{m2}$  との周波数差が、アルカリ金属原子の基底準位 1 と基底準位 2 のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数と一致している。従って、アルカリ金属原子は、照射光 1 の周波数成分  $f_1 + f_{m2}$  と照射光 2 の周波数成分  $f_2 - f_{m2}$  を共鳴光対として EIT 現象を起こす。

【0039】

図 4 (A) 及び図 4 (B) に示すように、第 3 の例では、照射光 1 の中心周波数  $f_1$  と照射光 2 の周波数成分  $f_2 + f_{m2}$  との周波数差が、アルカリ金属原子の基底準位 1 と基底準位 2 のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数と一致している。従って、アルカリ金属原子は、照射光 1 の中心周波数  $f_1$  と照射光 2 の周波数成分  $f_2 + f_{m2}$  を共鳴光対として EIT 現象を起こす。

【0040】

以下、本実施形態の原子発振器のより具体的な構成について説明する。

【0041】

(1) 第 1 実施形態

図 5 は、第 1 実施形態の原子発振器の構成を示す図である。

【0042】

図 5 に示すように、第 1 実施形態の原子発振器 100A は、半導体レーザー 110、原子セル 120、光検出器 130、検波回路 140、低周波発振器 150、電流駆動回路 160、検波回路 170、低周波発振器 180、検波用変調回路 190、第 1 変調周波数発生回路 200、第 2 変調周波数発生回路 210 を含んで構成されている。

【0043】

原子セル 120 は、容器中に気体状のアルカリ金属原子（ナトリウム (Na) 原子、ルビジウム (Rb) 原子、セシウム (Cs) 原子等）が封入されたものである。

【0044】

この原子セル 120 に対して、アルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数を有する共鳴光対が同時に照射されると、アルカリ金属原子が EIT 現象を起こす。例えば、アルカリ金属原子がセシウム原子であれば、D1 線における基底準位 1 と基底準位 2 のエネルギー差に相当する周波数が  $9.19263 \cdots \text{GHz}$  なので、周波数差が  $9.19263 \cdots \text{GHz}$  の共鳴光対が同時に照射されると EIT 現象を起こす。

【0045】

半導体レーザー 110 は、原子セル 120 に含まれるアルカリ金属原子に照射光 1 と照射光 2 を含むレーザー光を照射する。具体的には、半導体レーザー 110 が出射するレーザー光は、電流駆動回路 160 が出力する駆動電流によって中心周波数  $f_0$  (中心波長  $\lambda_0$ ) が制御され、第 1 変調周波数発生回路 200 の出力信号 (以下、「第 1 変調信号」という) 及び第 2 変調周波数発生回路 210 の出力信号 (以下、「第 2 変調信号」という) によって変調がかけられる。すなわち、電流駆動回路 160 による駆動電流に、第 1 変調信号の周波数成分と第 2 変調信号の周波数成分を有する交流電流を重畳することにより、半導体レーザー 110 が出射するレーザー光に変調をかけることができる。

【0046】

なお、半導体レーザー 110 は、端面発光レーザー (Edge Emitting Laser) であってもよいし、垂直共振器面発光レーザー (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 等の面発光レーザーであってもよい。

【0047】

光検出器 130 は、原子セル 120 を透過した光を検出し、検出した光の量に応じた信号強度の信号を出力する。光検出器 130 の出力信号は検波回路 140 及び検波回路 17

10

20

30

40

50

0 に入力される。

【 0 0 4 8 】

検波回路 1 4 0 は、数 Hz ~ 数百 Hz 程度の低い周波数で発振する低周波発振器 1 5 0 の発振信号を用いて光検出器 1 3 0 の出力信号を同期検波する。

【 0 0 4 9 】

電流駆動回路 1 6 0 は、検波回路 1 4 0 の出力信号に応じた大きさの駆動電流を発生して半導体レーザー 1 1 0 に供給し、レーザー光の中心周波数  $f_0$  (中心波長  $\lambda_0$ ) を制御する。なお、検波回路 1 4 0 による同期検波を可能とするために、電流駆動回路 1 6 0 により発生する駆動電流には低周波発振器 1 5 0 の発振信号 (検波回路 1 4 0 に供給される発振信号と同じ) が重畳される。

10

【 0 0 5 0 】

半導体レーザー 1 1 0、原子セル 1 2 0、光検出器 1 3 0、検波回路 1 4 0、電流駆動回路 1 6 0 を通るフィードバックループによりレーザー光の中心周波数  $f_0$  (中心波長  $\lambda_0$ ) が微調整されて安定する。

【 0 0 5 1 】

検波回路 1 7 0 は、数 Hz ~ 数百 Hz 程度の低い周波数で発振する低周波発振器 1 8 0 の発振信号を用いて光検出器 1 3 0 の出力信号を同期検波する。

【 0 0 5 2 】

第 1 変調周波数発生回路 2 0 0 は、検波回路 1 7 0 の出力信号の電圧に応じた第 1 変調周波数  $f_{m1}$  を有する第 1 変調信号を発生させる。

20

【 0 0 5 3 】

この第 1 変調信号は低周波発振器 1 8 0 の発振信号 (検波回路 1 7 0 に供給される発振信号と同じ) で変調がかけられ、半導体レーザー 1 1 0 に供給される。これにより、第 1 変調周波数  $f_{m1}$  をわずかにスweepさせながら検波回路 1 7 0 による同期検波が行われ、光検出器 1 3 0 の出力信号が最大になるように第 1 変調周波数  $f_{m1}$  が微調整される。

【 0 0 5 4 】

第 1 変調信号は第 2 変調周波数発生回路 2 1 0 にも供給され、第 2 変調周波数発生回路 2 1 0 は、第 1 変調信号を第 2 変調周波数  $f_{m2}$  を有する第 2 変調信号に周波数変換する。

【 0 0 5 5 】

30

そして、半導体レーザー 1 1 0 が出射するレーザー光は、第 1 変調信号と第 2 変調信号により変調がかけられ、照射光 1 と照射光 2 を発生させる。

【 0 0 5 6 】

なお、半導体レーザー 1 1 0、原子セル 1 2 0、光検出器 1 3 0 は、それぞれ図 1 の光源 1 0、原子セル 2 0、光検出手段 3 0 に対応する。また、検波回路 1 4 0、低周波発振器 1 5 0、電流駆動回路 1 6 0、検波回路 1 7 0、低周波発振器 1 8 0、検波用変調回路 1 9 0、第 1 変調周波数発生回路 2 0 0、第 2 変調周波数発生回路 2 1 0 で構成される回路は、図 1 の制御手段 4 0 に対応する。また、第 1 変調周波数発生回路 2 0 0、第 2 変調周波数発生回路 2 1 0 は、それぞれ図 1 の第 1 の変調周波数発生手段 4 2、第 2 の変調周波数発生手段 4 4 に対応する。

40

【 0 0 5 7 】

このような構成の原子発振器 1 0 0 A において、半導体レーザー 1 1 0 が出射する照射光 1 の所定の周波数成分と照射光 2 の所定の周波数成分の周波数差が原子セル 1 2 0 に含まれるアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と正確に一致しなければ、アルカリ金属原子が EIT 現象を起こさないため、照射光 1 と照射光 2 の周波数に応じて光検出器 1 3 0 の検出量は極めて敏感に変化する。そのため、半導体レーザー 1 1 0、原子セル 1 2 0、光検出器 1 3 0、検波回路 1 7 0 及び第 1 変調周波数発生回路 2 0 0 と検波用変調回路 1 9 0 又は第 2 変調周波数発生回路 2 1 0 を通る 2 つのフィードバックループにより、照射光 1 の所定の周波数成分と照射光 2 の所定の周波数成分の周波数差がアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と極めて正

50



確に一致するようにフィードバック制御がかかる。その結果、第1変調周波数と第2変調周波数は極めて安定した周波数になるので、第1変調信号や第2変調信号を原子発振器100Aの出力信号(クロック出力)とすることができる。

【0058】

図6は、第1実施形態の原子発振器における照射光1及び照射光2の一例について説明するための図である。

【0059】

図6に示す照射光1と照射光2の関係は、図2(B)に示した照射光1と照射光2の関係と同じであるが、図3(B)や図4(B)に示した関係等、照射光1の所定の周波数成分と照射光2の所定の周波数成分の周波数差がアルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数と一致する(ただし、照射光1の中心周波数  $f_1$  と照射光2の中心周波数  $f_2$  の周波数差は  $E_{12}$  に相当する周波数と一致しない)ような関係であればよい。

【0060】

原子発振器100Aによれば、図6に示すように、レーザー光の中心周波数  $f_0$  ( $=\nu/\lambda_0$ ) に対して、中心周波数  $f_1 = f_0 + f_{m1}$  であり周波数が  $f_{m2}$  ずつ異なる照射光1の全体と、中心周波数  $f_2 = f_0 - f_{m1}$  であり周波数が  $f_{m2}$  ずつ異なる照射光2の全体を線対称にスイープさせながら同期検波が行われ、 $2 \times (f_{m1} - f_{m2})$  が  $E_{12}$  に相当する周波数と一致する状態で安定するようになる。

【0061】

アルカリ金属原子がセシウム原子であれば  $E_{12}$  に相当する周波数は  $9.19263 \dots \text{GHz}$  であるので、例えば、 $f_{m1} = 4.606315 \dots \text{GHz}$ 、 $f_{m2} = 10 \text{MHz}$  で安定するように設計することができる。

【0062】

この場合、第1変調周波数発生回路200は、例えば、検波回路170の出力信号の大きさに応じてインダクタンス(L)やキャパシタンス(C)を調整することにより  $4.6 \text{GHz}$  近傍で共振周波数を変更可能なLC共振器によって実現することができる。また、第2変調周波数発生回路210は、例えば、入力信号(第1変調信号)の周波数を  $(10 \text{MHz} / 4.606315 \dots \text{GHz})$  倍にダウンコンバートして出力するダイレクトデジタルシンセサイザー(DDS: Direct Digital Synthesizer)によって実現することができる。

【0063】

図7は、原子発振器100Aにおける第2変調周波数発生回路210の構成例を示す図である。

【0064】

図7に示すように、第2変調周波数発生回路210は、周波数設定部211、アドレス演算部212、波形メモリー213、D/A変換器214、ローパスフィルター215を含むダイレクトデジタルシンセサイザー(DDS)として構成されている。

【0065】

周波数設定部211は、あらかじめ設定された周波数データ(周波数変換率を決定するためのデータ)に基づいて加算値データを生成する。先の例の場合、周波数変換率は  $(10 \text{MHz} / 4.606315 \dots \text{GHz})$  である。

【0066】

アドレス演算部212は、周波数設定部211が生成する加算値データを第1変調信号に同期して順次加算することにより位相角データを計算する。具体的には、アドレス演算部212は、前回の位相角データに加算値データを加算して今回の位相角データを計算し、位相角データに相当するアドレスを生成する。アドレス演算部212は、加算値データの加算処理を繰り返すpビットのアキュムレーターにより実現することができ、アキュムレーターの出力がアドレスになる。

【0067】

10

20

30

40

50

波形メモリ 213 には、波形パターン（例えば正弦波）の位相角と振幅値の対応関係が記憶されている。具体的には、波形メモリ 213 には 1 周期分の波形パターンを一定の時間間隔（1 周期 /  $2^p$ ）でサンプリングした  $2^p$  個の点の振幅値データ（デジタルデータ）がアドレス順に記憶されており、アドレス演算部が生成するアドレスで指定される領域に記憶されている振幅値データが波形メモリ 213 から出力される。

【0068】

D/A 変換器 214 は、波形メモリ 213 が出力する振幅値データを D/A 変換する。D/A 変換器 214 の出力信号は第 1 変調信号の周期毎に階段状に変化する波形であるため、ローパスフィルタ 215 で平滑化されて第 2 変調信号が生成される。

【0069】

以上の構成により、第 2 変調周波数発生回路 210（DDS）は、周波数設定部 211 が生成する加算値データ M に対して、第 1 変調周波数の  $M / 2^p$  倍の周波数を有する第 2 変調信号を出力する。従って、p を十分大きくすれば、第 1 変調周波数をほぼ正確に（10 MHz / 4.606315・・・GHz）倍することができるので、極めて高い周波数精度の 10 MHz を有する第 2 変調信号を生成することができる。

【0070】

以上に説明したように、第 1 実施形態の原子発振器では、照射光 1 の所定の周波数成分（ $f_1 + j \times f_{m2}$ ）と照射光 2 の所定の周波数成分（ $f_2 + k \times f_{m2}$ ）の周波数差、すなわち、（ $2 \times f_{m1} + (j - k) \times f_{m2}$ ）（j, k は整数、かつ、 $j \neq k$ ）がアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と一致するように制御がかかる。

【0071】

従って、第 1 実施形態によれば、第 1 変調周波数  $f_{m1}$  又は第 2 変調周波数  $f_{m2}$  が所望の周波数となるように、上記の条件を満たす第 1 変調周波数  $f_{m1}$  と第 2 変調周波数  $f_{m2}$  を選択すればよいので、従来の原子発振器と比較して設計の自由度が向上し、そのため比較的簡易な構成の原子発振器を提供することができる。

【0072】

[変形例]

図 8 は、第 1 実施形態の原子発振器の変形例の構成を示す図である。図 8 に示すように、変形例の原子発振器 100B は、図 5 に示した原子発振器 100A に対して、電気光学変調器（EOM: Electro-Optic Modulator）220 が追加されている。

【0073】

図 8 に示すように、原子発振器 100B では、半導体レーザー 110 は、第 1 変調周波数  $f_{m1}$  を有する第 1 変調信号や第 2 変調周波数  $f_{m2}$  を有する第 2 変調信号による変調がかけられず、電気光学変調器（EOM）220 に対して周波数  $f_0$  のレーザー光を射出する。

【0074】

そして、検波用変調回路 190 により変調がかけられた第 1 変調信号は、第 2 変調信号とともに電気光学変調器（EOM）220 に入力される。

【0075】

電気光学変調器（EOM）220 は、周波数  $f_0$  のレーザー光に対して第 1 変調信号と第 2 変調信号で変調をかける。その結果、電気光学変調器（EOM）220 を透過して原子セル 120 に照射される光には、図 5 に示した原子発振器 100A と同様、 $f_0$  を中心とする上側サイドバンドと下側サイドバンドに、中心周波数  $f_1 = f_0 + f_{m1}$  であり周波数が  $f_{m2}$  ずつ異なる複数の周波数成分を有する照射光 1 と、中心周波数  $f_2 = f_0 - f_{m1}$  であり周波数が  $f_{m2}$  ずつ異なる複数の周波数成分を有する照射光 2 がそれぞれ発生する。

【0076】

図 8 に示す原子発振器 100B におけるその他の構成は、図 5 に示した原子発振器 100A と同じであるため同じ番号を付しており、その説明を省略する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 7 7 】

なお、半導体レーザー 1 1 0 と電気光学変調器 ( E O M ) 2 2 0 による構成が図 1 の光源 1 0 に対応する。その他の対応関係は、図 5 に示した原子発振器 1 0 0 A と同じである。

## 【 0 0 7 8 】

このような構成によっても、図 5 に示した原子発振器 A と同様の機能及び効果を有する原子発振器を実現することができる。

## 【 0 0 7 9 】

## ( 2 ) 第 2 実施形態

図 9 は、第 2 実施形態の原子発振器の構成を示す図である。図 9 に示すように、第 2 実施形態の原子発振器 1 0 0 C は、第 1 変調周波数発生回路 3 0 0 と第 2 変調周波数発生回路 3 1 0 の接続関係が、図 5 に示した第 1 実施形態の原子発振器 1 0 0 A における第 1 変調周波数発生回路 2 0 0 と第 2 変調周波数発生回路 2 1 0 の接続関係と逆になっている。

## 【 0 0 8 0 】

原子発振器 1 0 0 C において、第 2 変調周波数発生回路 3 1 0 は、検波回路 1 7 0 の出力信号の電圧に応じた第 2 変調周波数  $f_{m2}$  を有する第 2 変調信号を発生させる。

## 【 0 0 8 1 】

この第 2 変調信号は低周波発振器 1 8 0 の発振信号 ( 検波回路 1 7 0 に供給される発振信号と同じ ) で変調がかけられ、半導体レーザー 1 1 0 に供給される。これにより、第 2 変調周波数  $f_{m2}$  をわずかにスweepさせながら検波回路 1 7 0 による同期検波が行われ、光検出器 1 3 0 の出力信号が最大になるように第 2 変調周波数  $f_{m2}$  が微調整される。

## 【 0 0 8 2 】

第 2 変調信号は第 1 変調周波数発生回路 3 0 0 にも供給され、第 1 変調周波数発生回路 3 0 0 は、第 2 変調信号を第 1 変調周波数  $f_{m1}$  を有する第 1 変調信号に周波数変換する。

## 【 0 0 8 3 】

そして、半導体レーザー 1 1 0 が出射するレーザー光は、第 1 変調信号と第 2 変調信号により変調がかけられ、照射光 1 と照射光 2 を発生させる。

## 【 0 0 8 4 】

図 9 に示す原子発振器 1 0 0 C におけるその他の構成は、図 5 に示した原子発振器 1 0 0 A と同じであるため同じ番号を付しており、その説明を省略する。

## 【 0 0 8 5 】

なお、半導体レーザー 1 1 0、原子セル 1 2 0、光検出器 1 3 0 は、それぞれ図 1 の光源 1 0、原子セル 2 0、光検出手段 3 0 に対応する。また、検波回路 1 4 0、低周波発振器 1 5 0、電流駆動回路 1 6 0、検波回路 1 7 0、低周波発振器 1 8 0、検波用変調回路 1 9 0、第 1 変調周波数発生回路 3 0 0、第 2 変調周波数発生回路 3 1 0 で構成される回路は、図 1 の制御手段 4 0 に対応する。また、第 1 変調周波数発生回路 3 0 0、第 2 変調周波数発生回路 3 1 0 は、それぞれ図 1 の第 1 の変調周波数発生手段 4 2、第 2 の変調周波数発生手段 4 4 に対応する。

## 【 0 0 8 6 】

このような構成の原子発振器 1 0 0 C において、半導体レーザー 1 1 0 が出射する照射光 1 の所定の周波数成分と照射光 2 の所定の周波数成分の周波数差が原子セル 1 2 0 に含まれるアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と正確に一致しなければ、アルカリ金属原子が E I T 現象を起こさないため、照射光 1 と照射光 2 の周波数に応じて光検出器 1 3 0 の検出量は極めて敏感に変化する。そのため、半導体レーザー 1 1 0、原子セル 1 2 0、光検出器 1 3 0、検波回路 1 7 0 及び第 2 変調周波数発生回路 3 1 0 と検波用変調回路 1 9 0 又は第 1 変調周波数発生回路 3 0 0 を通る 2 つのフィードバックループにより、照射光 1 の所定の周波数成分と照射光 2 の所定の周波数成分の周波数差がアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と極めて正確に一致するようにフィードバック制御がかかる。その結果、第 1 変調周波数と第 2 変調

10

20

30

40

50

周波数は極めて安定した周波数になるので、第 1 変調信号や第 2 変調信号を原子発振器 100C の出力信号（クロック出力）とすることができる。

【0087】

図 10 は、第 2 実施形態の原子発振器における照射光 1 及び照射光 2 の一例について説明するための図である。

【0088】

図 10 に示す照射光 1 と照射光 2 の関係は、図 2 (B) に示した照射光 1 と照射光 2 の関係と同じであるが、図 3 (B) や図 4 (B) に示した関係等、照射光 1 の所定の周波数成分と照射光 2 の所定の周波数成分の周波数差がアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数と一致する（ただし、照射光 1 の中心周波数  $f_1$  と照射光 2 の中心周波数  $f_2$  の周波数差は  $E_{12}$  に相当する周波数と一致しない）ような関係であればよい。

10

【0089】

原子発振器 100C によれば、図 10 に示すように、周波数が  $f_{m2}$  ずつ異なる照射光 1 の各周波数成分を中心周波数  $f_1 = f_0 + f_{m1}$  に対して線対称にスイープさせるとともに、周波数が  $f_{m2}$  ずつ異なる照射光 2 の各周波数成分を中心周波数  $f_2 = f_0 - f_{m1}$  に対して線対称にスイープさせながら同期検波が行われ、 $2 \times (f_{m1} - f_{m2})$  が  $E_{12}$  に相当する周波数と一致する状態で安定するようになる。

【0090】

アルカリ金属原子がセシウム原子であれば  $E_{12}$  に相当する周波数は  $9.19263 \dots \text{GHz}$  であるので、例えば、 $f_{m1} = 4.606315 \dots \text{GHz}$ 、 $f_{m2} = 10 \text{MHz}$  で安定するように設計することができる。

20

【0091】

この場合、第 2 変調周波数発生回路 310 は、例えば、検波回路 170 の出力信号の大きさに応じて水晶振動子の負荷容量を調整することにより発振周波数を変更可能な電圧制御水晶発振器（VCO: Voltage Controlled Crystal Oscillator）によって実現することができる。また、第 1 変調周波数発生回路 300 は、例えば、入力信号（第 2 変調信号）の周波数を（ $4.606315 \dots \text{GHz} / 10 \text{MHz}$ ）倍に逡倍する PLL によって実現することができる。

【0092】

30

図 11 は、原子発振器 100C における第 1 変調周波数発生回路 300 の構成例を示す図である。

【0093】

図 11 に示すように、第 1 変調周波数発生回路 300 は、分周器 301、位相比較器 302、ループフィルタ 303、電圧制御発振器（VCO: Voltage Controlled Oscillator）304、分周器 305 を含む PLL として構成されている。

【0094】

分周器 301 は、第 2 変調信号の周波数（第 2 変調周波数  $f_{m2}$ ）を  $1/R$ （ $R$  はあらかじめ決められた整数値）にして出力する。

【0095】

40

位相比較器 302 は、分周器 301 の出力信号と分周器 305 の出力信号の位相差を電圧に変換して出力する。

【0096】

ループフィルタ 303 は、位相比較器 302 の出力電圧に含まれる高周波成分を除去（正確には一定レベル以下に減衰）する。

【0097】

電圧制御発振器（VCO）304 は、ループフィルタ 303 の出力電圧に応じた周波数の信号を出力する。

【0098】

分周器 305 は、電圧制御発振器（VCO）304 の出力周波数を  $1/N$ （ $N$  はあらか

50

じめ決められた整数値)にして出力する。

【0099】

そして、電圧制御発振器(VCO)304の出力信号が第1変調信号(第1変調周波数 $f_{m1}$ を有する)になる。

【0100】

このような構成によれば、位相比較器302に入力される2つの信号の周波数が一致するように、すなわち $f_{m2}/R = f_{m1}/N$ となるようにフィードバック制御がかかるので、 $f_{m1} = (N/R) \times f_{m2}$ となる第1変調信号が得られる。

【0101】

図2(A)及び図2(B)に示したような照射光1と照射光2を発生させる場合は、アルカリ金属原子がセシウム原子であれば、例えば、 $f_{m1} = 4.606315 \dots \text{GHz}$ 、 $f_{m2} = 10 \text{MHz}$ であればよいので、通倍率 $N/R$ が $(4.606315 \dots \text{GHz} / 10 \text{MHz})$ になるように $N$ 及び $R$ を決定すればよい。

【0102】

また、図3(A)及び図3(B)に示したような照射光1と照射光2を発生させる場合は、アルカリ金属原子がセシウム原子であれば、例えば、 $f_{m1} = 4.586315 \dots \text{GHz}$ 、 $f_{m2} = 10 \text{MHz}$ であればよいので、通倍率 $N/R$ が $(4.586315 \dots \text{GHz} / 10 \text{MHz})$ になるように $N$ 及び $R$ を決定すればよい。

【0103】

また、図4(A)及び図4(B)に示したような照射光1と照射光2を発生させる場合は、アルカリ金属原子がセシウム原子であれば、例えば、 $f_{m1} = 4.601315 \dots \text{GHz}$ 、 $f_{m2} = 10 \text{MHz}$ であればよいので、通倍率 $N/R$ が $(4.601315 \dots \text{GHz} / 10 \text{MHz})$ になるように $N$ 及び $R$ を決定すればよい。

【0104】

以上に説明したように、第2実施形態の原子発振器では、第1実施形態と同様に、照射光1の所定の周波数成分( $f_1 + j \times f_{m2}$ )と照射光2の所定の周波数成分( $f_2 + k \times f_{m2}$ )の周波数差、すなわち、 $(2 \times f_{m1} + (j - k) \times f_{m2})$ ( $j, k$ は整数、かつ、 $j \neq k$ )がアルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と一致するように制御がかかる。

【0105】

従って、第2実施形態によれば、第1変調周波数 $f_{m1}$ 又は第2変調周波数 $f_{m2}$ が所望の周波数となるように、上記の条件を満たす第1変調周波数 $f_{m1}$ と第2変調周波数 $f_{m2}$ を選択すればよいので、従来の原子発振器と比較して設計の自由度が向上し、そのため比較的簡易な構成の原子発振器を提供することができる。

【0106】

また、第2実施形態において、第2変調周波数 $f_{m2}$ をMHz帯の周波数に決定すれば、第2変調周波数発生回路310や検波用変調回路190をMHz帯の回路によって実現することができるので、高度な設計技術を要するマイクロ波回路の設計を大幅に省略することができる。

【0107】

(3)第3実施形態

図12は、第3実施形態の原子発振器の構成を示す図である。図3に示すように、第3実施形態の原子発振器100Dは、第2変調周波数発生回路410に第1変調周波数発生回路200による第1変調信号が入力されない点において図5に示した第1実施形態の原子発振器100Aと異なる。また、第3実施形態の原子発振器100Dには周波数変換回路230が追加されている。

【0108】

原子発振器100Dにおいて、第2変調周波数発生回路410は、第1変調周波数発生回路200により発生する第1変調信号から独立して第2変調周波数 $f_{m2}$ を有する第2変調信号を発生させる。第2変調周波数発生回路410は、例えば、水晶振動子が周波数

10

20

30

40

50

$f_{m2}$  で発振するように負荷容量が調整された水晶発振器 (XO : Crystal Oscillator) によって実現することができる。

【0109】

そして、半導体レーザー 110 が出射するレーザー光は、第 1 変調信号と第 2 変調信号により変調がかけられ、照射光 1 と照射光 2 を発生させる。

【0110】

周波数変換回路 230 は、第 1 変調信号を所望の周波数の信号に周波数変換する。周波数変換回路 230 は、例えば、ダイレクトデジタルシンセサイザー (DDS) によって実現することができる。

【0111】

図 12 に示す原子発振器 100D におけるその他の構成は、図 5 に示した原子発振器 100A と同じであるため同じ番号を付しており、その説明を省略する。

【0112】

なお、半導体レーザー 110、原子セル 120、光検出器 130 は、それぞれ図 1 の光源 10、原子セル 20、光検出手段 30 に対応する。また、検波回路 140、低周波発振器 150、電流駆動回路 160、検波回路 170、低周波発振器 180、検波用変調回路 190、第 1 変調周波数発生回路 200、第 2 変調周波数発生回路 410 で構成される回路は、図 1 の制御手段 40 に対応する。また、第 1 変調周波数発生回路 200、第 2 変調周波数発生回路 410、周波数変換回路 230 は、それぞれ図 1 の第 1 の変調周波数発生手段 42、第 2 の変調周波数発生手段 44、周波数変換手段 46 に対応する。

【0113】

このような構成の原子発振器 100D によれば、第 2 変調周波数  $f_{m2}$  が固定されているので、アルカリ金属原子が EIT 現象を起こすように第 1 変調周波数  $f_{m1}$  が微調整され、第 1 変調周波数  $f_{m1}$  が所望の周波数に変換されて出力される。従って、第 3 実施形態によれば、所望の周波数を得るために、第 1 変調周波数  $f_{m1}$ 、第 2 変調周波数  $f_{m2}$ 、周波数変換回路 230 の周波数変換率の組み合わせをある程度自由に選択できるので、設計の自由度を向上させることができる。

【0114】

また、例えば、照射光 1 と照射光 2 が図 2 (A) 及び図 2 (B) に示した関係にあり、アルカリ金属原子がセシウム原子である場合、第 2 変調信号の周波数 (第 2 変調周波数  $f_{m2}$ ) が 10 MHz に対して  $\pm 1$  kHz ( $\pm 100$  ppm) の範囲で変動するなら、第 1 変調信号の周波数 (第 1 変調周波数  $f_{m1}$ ) は 4.606315... GHz に対して  $\pm 1$  kHz ( $\pm 1$  ppm 未満) で変動する。従って、周波数変換回路 230 の周波数変換率を (10 MHz / 4.606315... GHz) に設定すれば、10 MHz に対して  $\pm 1$  ppm 未満の周波数精度の出力信号が得られる。すなわち、第 2 変調信号の周波数精度 ( $\pm 100$  ppm) に対して、その 100 倍以上の周波数精度の出力信号が得られることになる。

【0115】

このように、第 3 実施形態の原子発振器によれば、アルカリ金属原子の EIT 現象を利用することで出力信号の周波数精度を大幅に向上させることができる。

【0116】

また、第 3 実施形態の原子発振器において、第 2 変調周波数発生回路 410 を、例えば電圧制御水晶発振器 (VCXO) によって実現すれば、第 2 変調周波数が変更可能になり、周波数変換回路 230 の出力信号は第 2 変調周波数に応じた周波数になる。すなわち、出力周波数が可変な原子発振器を実現することができる。

【0117】

なお、本発明は本実施形態に限定されず、本発明の要旨の範囲内で種々の変形実施が可能である。

【0118】

例えば、第 1 実施形態やその変形例の原子発振器では、第 2 変調周波数発生回路 210

10

20

30

40

50

は、ダイレクトディジタルシンセサイザー（ＤＤＳ）によって実現しているが、ＰＬＬによって実現することもできる。

【０１１９】

また、例えば、第２実施形態の原子発振器では、第１変調周波数発生回路３００は、ＰＬＬによって実現しているが、逓倍機能付きのダイレクトディジタルシンセサイザー（ＤＤＳ）によって実現することもできる。

【０１２０】

本発明は、実施の形態で説明した構成と実質的に同一の構成（例えば、機能、方法及び結果が同一の構成、あるいは目的及び効果が同一の構成）を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成の本質的でない部分を置き換えた構成を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成と同一の作用効果を奏する構成又は同一の目的を達成することができる構成を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成に公知技術を付加した構成を含む。

10

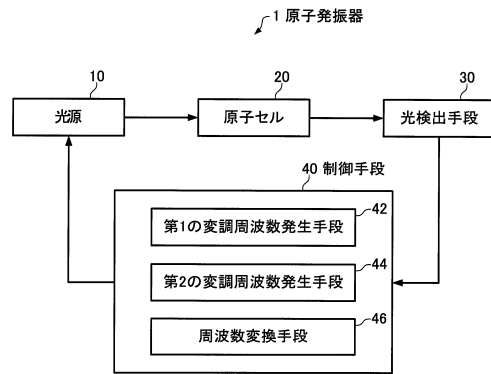
【符号の説明】

【０１２１】

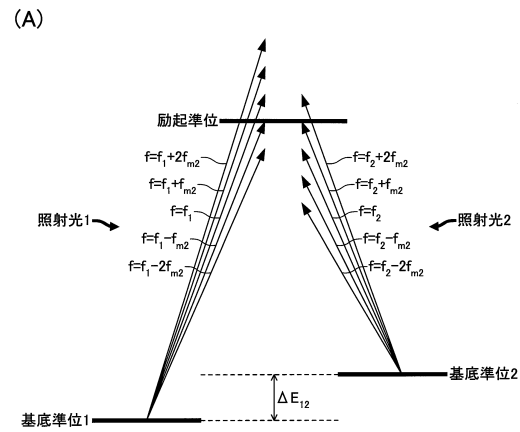
１ 原子発振器、１０ 光源、２０ 原子セル、３０ 光検出手段、４０ 制御手段、４２ 第１の変調周波数発生手段、４４ 第２の変調周波数発生手段、４６ 周波数変換手段、１００Ａ～１００Ｄ 原子発振器、１１０ 半導体レーザー、１２０ 原子セル、１３０ 光検出器、１４０ 検波回路、１５０ 低周波発振器、１６０ 電流駆動回路、１７０ 検波回路、１８０ 低周波発振器、１９０ 検波用変調回路、２００ 第１変調周波数発生回路、２１０ 第２変調周波数発生回路、２１１ 周波数設定部、２１２ アドレス演算部、２１３ 波形メモリー、２１４ Ｄ／Ａ変換器、２１５ ローパスフィルター、２２０ 電気光学変調器（ＥＯＭ）、２３０ 周波数変換回路、３００ 第１変調周波数発生回路、３０１ 分周器、３０２ 位相比較器、３０３ ループフィルター、３０４ 電圧制御発振器（ＶＣＯ）、３０５ 分周器、３１０ 第２変調周波数発生回路、４１０ 第２変調周波数発生回路

20

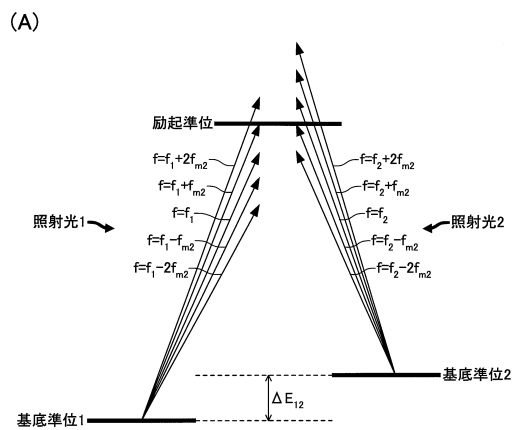
【図 1】



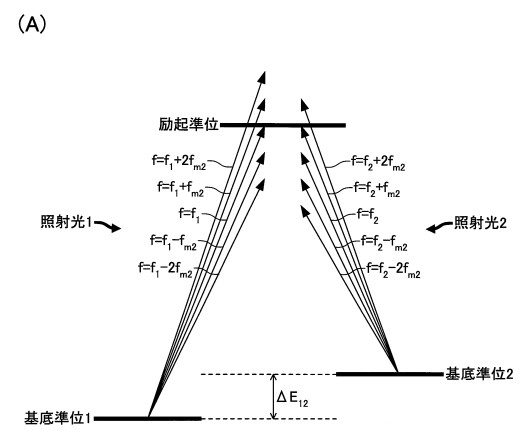
【図 2】



【図 3】

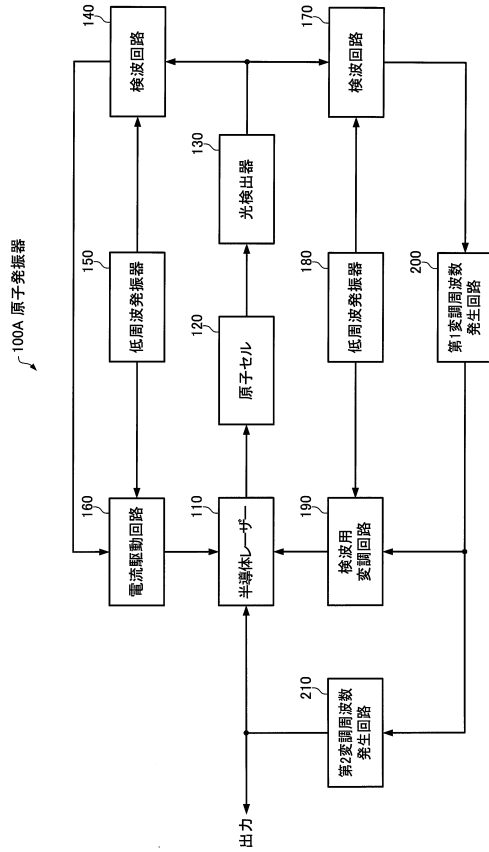


【図 4】

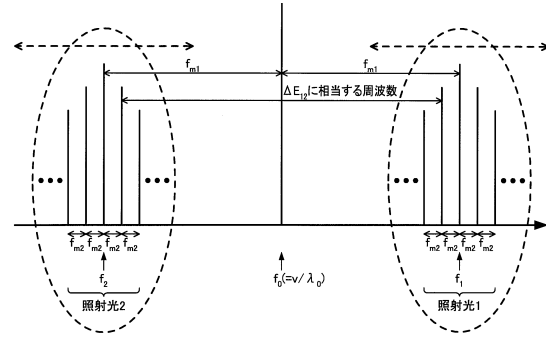




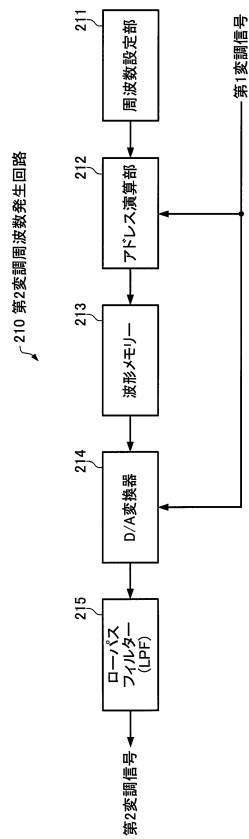
【図5】



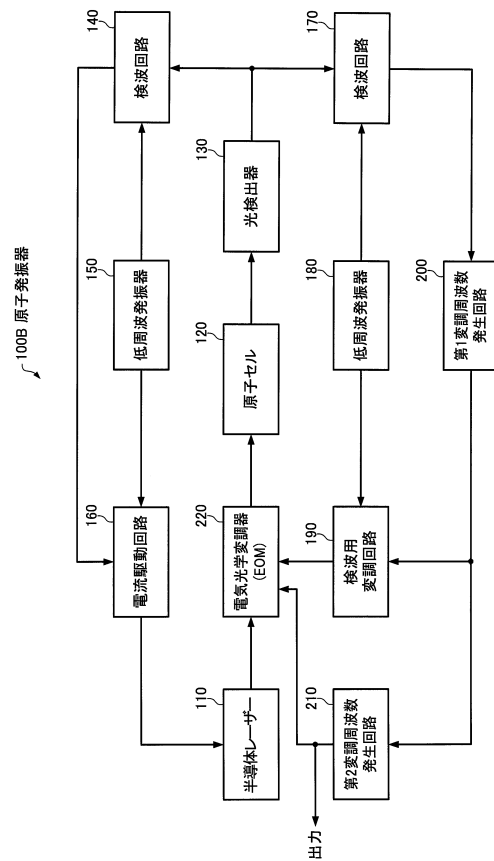
【図6】



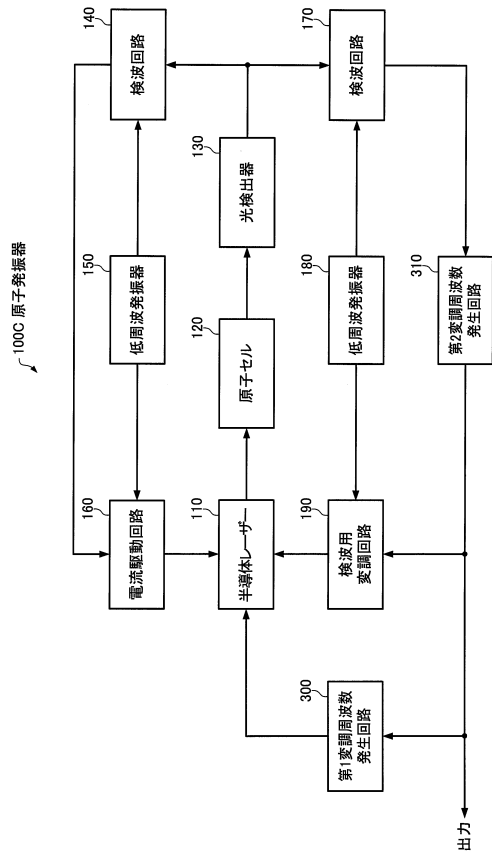
【図7】



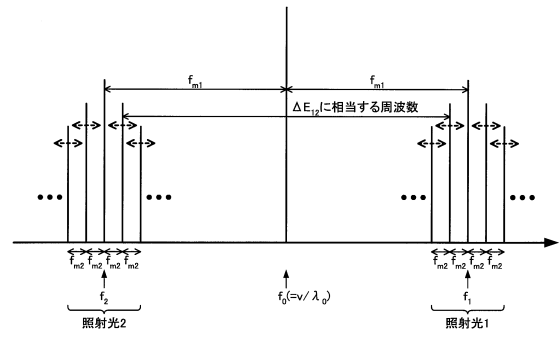
【図8】



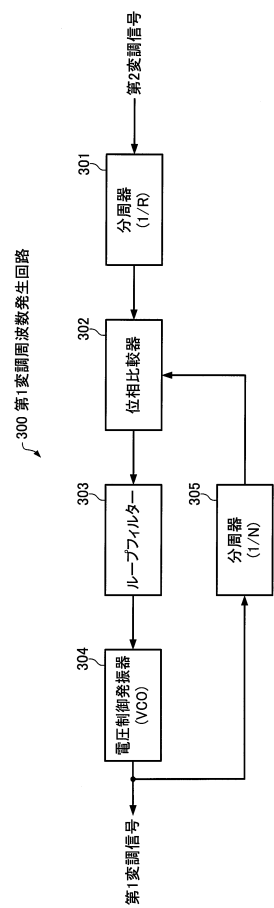
【 図 9 】



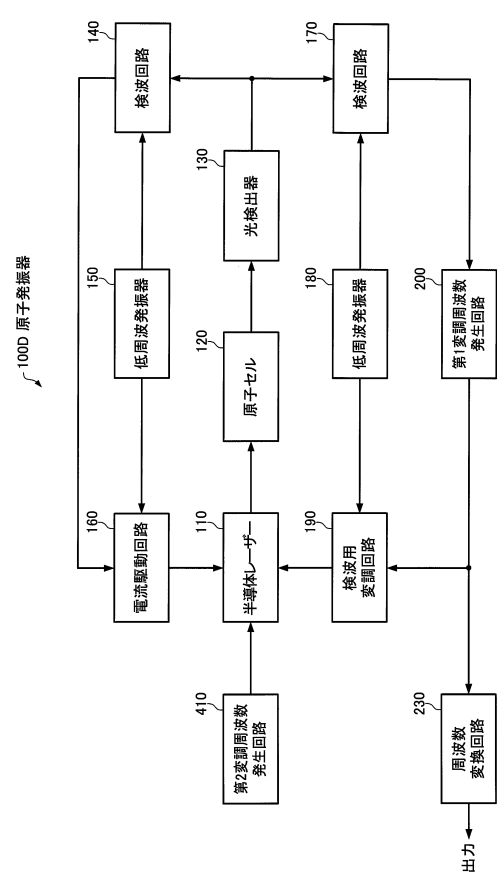
【 図 1 0 】



【 図 1 1 】

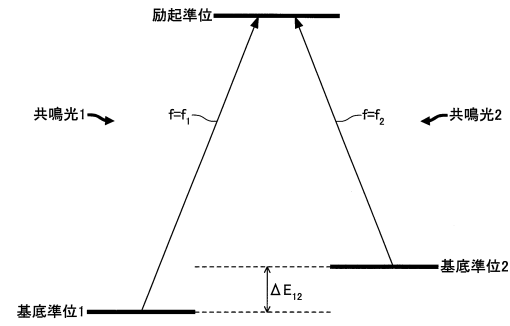


【 図 1 2 】

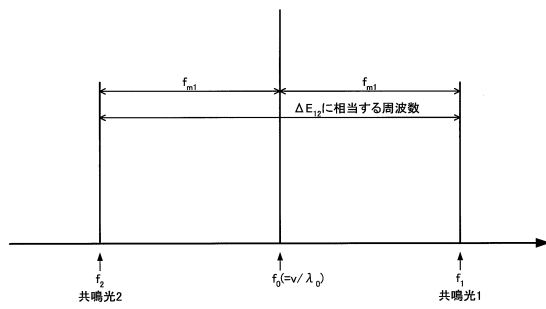


【図 13】

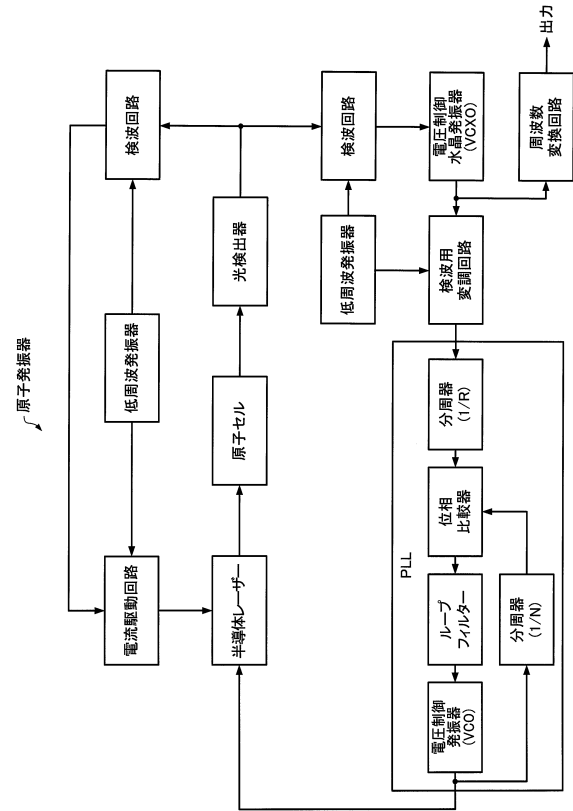
(A)



(B)



【図 14】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2009-036902(JP,A)  
特開2009-231688(JP,A)  
特表2007-530965(JP,A)  
特表2005-522887(JP,A)  
特開平09-079981(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S1/00-1/06  
H01S5/00-5/50  
H03L7/26