

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2015-70415

(P2015-70415A)

(43) 公開日 平成27年4月13日(2015.4.13)

(51) Int.Cl.  
H03L 7/26 (2006.01)F I  
H03L 7/26テーマコード (参考)  
5 J 1 0 6

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2013-202238 (P2013-202238)  
(22) 出願日 平成25年9月27日 (2013.9.27)(71) 出願人 000002369  
セイコーエプソン株式会社  
東京都新宿区西新宿2丁目4番1号  
(74) 代理人 100090387  
弁理士 布施 行夫  
(74) 代理人 100090398  
弁理士 大淵 美千栄  
(72) 発明者 久保 聡  
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内  
(72) 発明者 ▲吉▼田 啓之  
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内

最終頁に続く

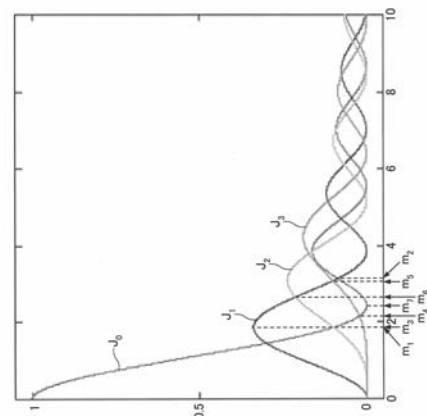
(54) 【発明の名称】 原子発振器、電子機器、移動体及び原子発振器の製造方法

## (57) 【要約】

【課題】従来よりも長期安定度を向上させることが可能な原子発振器等を提供すること。

【解決手段】原子発振器1は、ガスセル13と、半導体レーザー10と、金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる共鳴光対(1次サイドバンド光の対)を含む周波数変調された光を半導体レーザー10に発生させるための周波数変調信号を生成する周波数変調信号生成手段(周波数変換回路28等)と、を含む。周波数変調の変調度を小さい側から大きい側へ変化させたときに、1次サイドバンド光が最初に極大となる時の変調度を $m_1$ とし、中心周波数の光の強度が最初に1次サイドバンド光の強度よりも小さくなってから次に1次サイドバンド光の強度以上になる時の変調度を $m_2$ とし、変調度が $m_1$ よりも大きく $m_2$ よりも小さくなるように、周波数変調信号の強度が設定されている。

【選択図】図3



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

金属原子を封入しているセルと、

前記セルに照射する光を発生させる光源と、

前記金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる共鳴光対を含む周波数変調された光を前記光源に発生させるための周波数変調信号を生成する周波数変調信号生成手段と、を含み、

前記共鳴光対は、前記光源が発生する光に含まれる 1 次のサイドバンド光の対であり、変調度を小さい側から大きい側へ変化させたときに、前記 1 次のサイドバンド光が最初に極大となる時の変調度を第 1 の値とし、前記光源が発生する光に含まれる中心周波数の光の強度が、最初に前記 1 次のサイドバンド光の強度よりも小さくなってから次に前記 1 次のサイドバンド光の強度以上になる時の変調度を第 2 の値とし、

変調度が前記第 1 の値よりも大きく前記第 2 の値よりも小さくなるように、前記周波数変調信号の強度が設定されている、原子発振器。

**【請求項 2】**

変調度を小さい側から大きい側へ変化させたときに、前記中心周波数の光の強度が、前記光源が発生する光に含まれる 2 次のサイドバンド光の強度と最初に同じになる時の変調度を第 3 の値とし、

変調度が前記第 3 の値よりも大きくなるように、前記周波数変調信号の強度が設定されている、請求項 1 に記載の原子発振器。

**【請求項 3】**

変調度を小さい側から大きい側へ変化させたときに、前記中心周波数の光の強度が、前記光源が発生する光に含まれる 3 次のサイドバンド光の強度と最初に同じになる時の変調度を第 4 の値とし、

変調度が前記第 4 の値よりも大きくなるように、前記周波数変調信号の強度が設定されている、請求項 1 又は請求項 2 に記載の原子発振器。

**【請求項 4】**

変調度を小さい側から大きい側へ変化させたとき、前記 1 次のサイドバンド光の強度が、前記光源が発生する光に含まれる 3 次のサイドバンド光の強度よりも最初に大きくなってから次に前記 3 次のサイドバンド光の強度以上になる時の変調度を第 5 の値とし、

変調度が前記第 5 の値よりも小さくなるように、前記周波数変調信号の強度が設定されている、請求項 1 乃至 3 のいずれか一項に記載の原子発振器。

**【請求項 5】**

変調度を小さい側から大きい側へ変化させたとき、前記 1 次のサイドバンド光の強度が、前記光源が発生する光に含まれる 2 次のサイドバンド光の強度よりも最初に大きくなってから次に前記 2 次のサイドバンド光の強度と同じになる時の変調度を第 6 の値とし、

変調度が前記第 6 の値よりも小さくなるように、前記周波数変調信号の強度が設定されている、請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載の原子発振器。

**【請求項 6】**

変調度が前記第 1 の値と前記第 2 の値との間で前記中心周波数の光の強度が極小となるように、前記周波数変調信号の強度が設定されている、請求項 1 乃至 5 のいずれか一項に記載の原子発振器。

**【請求項 7】**

請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の原子発振器を含む電子機器。

**【請求項 8】**

請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の原子発振器を含む移動体。

**【請求項 9】**

金属原子を封入しているセルと、前記セルに照射する光を発生させる光源と、前記セルを透過した光を検出する光検出手段と、前記光検出手段が検出する光の強度に基づき、前記金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる共鳴光対を含む周波数変調された光を前記光

10

20

30

40

50

源に発生させるための周波数変調信号を生成する周波数変調信号生成手段と、を有し、前記共鳴光対は、前記光源が発生する光に含まれる１次のサイドバンド光の対である原子発振器の製造法であって、

前記光源に対して、強度を変えながら周波数変調信号を入力し、前記光検出手段の出力信号に基づいて前記周波数変調信号の強度と発振周波数との関係を求める工程と、

前記周波数変調信号の強度と発振周波数との関係に基づいて、前記光源が発生する光に含まれる中心周波数の光の強度が、前記１次のサイドバンド光の強度よりも小さくなるように、前記周波数変調信号の強度を調整する工程と、を含む、原子発振器の製造方法。

#### 【請求項１０】

前記周波数変調信号の強度を調整する工程において、

前記周波数変調信号の強度と発振周波数との関係に基づいて、前記周波数変調信号の強度に対する発振周波数の感度を求め、前記感度を最小に近づけるように前記周波数変調信号の強度を調整する、請求項９に記載の原子発振器の製造方法。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

#### 【０００１】

本発明は、原子発振器、電子機器、移動体及び原子発振器の製造方法に関する。

#### 【背景技術】

#### 【０００２】

アルカリ金属原子の一種であるセシウム原子は、図１２に示すように、 $6S_{1/2}$ の基底準位と、 $6P_{1/2}$ 、 $6P_{3/2}$ の２つの励起準位とを有し、さらに、 $6S_{1/2}$ 、 $6P_{1/2}$ 、 $6P_{3/2}$ の各準位は、複数のエネルギー準位に分裂した超微細構造を有している。具体的には、 $6S_{1/2}$ は $F = 3, 4$ の２つの基底準位を持ち、 $6P_{1/2}$ は $F' = 3, 4$ の２つの励起準位を持ち、 $6P_{3/2}$ は $F' = 2, 3, 4, 5$ の４つの励起準位を持っている。

#### 【０００３】

例えば、 $6S_{1/2}$ の $F = 3$ の基底準位にあるセシウム原子は、 $D_2$ 線を吸収することで、 $6P_{3/2}$ の $F' = 2, 3, 4$ のいずれかの励起準位に遷移することができるが、 $F' = 5$ の励起準位に遷移することはできない。 $6S_{1/2}$ の $F = 4$ の基底準位にあるセシウム原子は、 $D_2$ 線を吸収することで、 $6P_{3/2}$ の $F' = 3, 4, 5$ のいずれかの励起準位に遷移することができるが、 $F' = 2$ の励起準位に遷移することはできない。これらは、電気双極子遷移を仮定した場合の遷移選択則による。逆に、 $6P_{3/2}$ の $F' = 3, 4$ のいずれかの励起準位にあるセシウム原子は、 $D_2$ 線を放出して $6S_{1/2}$ の $F = 3$ 又は $F = 4$ の基底準位（元の基底準位又は他方の基底準位のいずれか）に遷移することができる。ここで、 $6S_{1/2}$ の $F = 3, 4$ の２つの基底準位と $6P_{3/2}$ の $F' = 3, 4$ のいずれかの励起準位からなる３準位（２つの基底準位と１つの励起準位からなる）は、 $D_2$ 線の吸収・発光による型３準位と呼ばれる。同様に、 $6S_{1/2}$ の $F = 3, 4$ の２つの基底準位と $6P_{1/2}$ の $F' = 3, 4$ のいずれかの励起準位からなる３準位は、 $D_1$ 線の吸収・発光による型３準位を形成する。

#### 【０００４】

これに対して、 $6P_{3/2}$ の $F' = 2$ の励起準位にあるセシウム原子は、 $D_2$ 線を放出して必ず $6S_{1/2}$ の $F = 3$ の基底準位（元の基底準位）に遷移し、同様に、 $6P_{3/2}$ の $F' = 5$ の励起準位にあるセシウム原子は、 $D_2$ 線を放出して必ず $6S_{1/2}$ の $F = 4$ の基底準位（元の基底準位）に遷移する。すなわち、 $6S_{1/2}$ の $F = 3, 4$ の２つの基底準位と $6P_{3/2}$ の $F' = 2$ 又は $F' = 5$ の励起準位からなる３準位は、 $D_2$ 線の吸収・放出による型３準位を形成しない。なお、セシウム原子以外のアルカリ金属原子も、同様に、型３準位を形成する２つの基底準位と励起準位を有することが知られている。

#### 【０００５】

10

20

30

40

50

ところで、気体状のアルカリ金属原子に、型3準位を形成する第1の基底準位（セシウム原子の場合、 $6S_{1/2}$ の $F=3$ の基底準位）と励起準位（セシウム原子の場合、例えば $6P_{3/2}$ の $F'=4$ の励起準位）とのエネルギー差に相当する周波数（振動数）を有する共鳴光（共鳴光1とする）と、第2の基底準位（セシウム原子の場合、 $6S_{1/2}$ の $F=4$ の基底準位）と励起準位とのエネルギー差に相当する周波数（振動数）を有する共鳴光（共鳴光2とする）とを同時に照射すると、2つの基底準位の重ね合わせ状態、即ち量子コヒーレンス状態（暗状態）になり、励起準位への励起が停止する電磁誘起透過（EIT: Electromagnetically Induced Transparency）現象（CPT (Coherent Population Trapping) と呼ばれることもある）が起こることが知られている。このEIT現象を起こす共鳴光対（共鳴光1と共鳴光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  $E_{12}$  に相当する周波数と正確に一致する。例えば、セシウム原子は、2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数は  $9.192631770\text{ GHz}$  であるので、セシウム原子に、周波数差が  $9.192631770\text{ GHz}$  の2種類のD1線又はD2線のレーザー光を同時に照射すると、EIT現象が起こる。

【0006】

従って、図13に示すように、周波数が  $\nu_1$  の光と周波数が  $\nu_2$  の光を気体状のアルカリ金属原子に同時に照射したとき、この2光波が共鳴光対となってアルカリ金属原子がEIT現象を起こすか否かでアルカリ金属原子を透過する光の強度が急峻に変化する。この急峻に変化する透過光の強度を示す信号はEIT信号（共鳴信号）と呼ばれ、共鳴光対の周波数差  $\nu_1 - \nu_2$  が  $E_{12}$  に相当する周波数  $\nu_{12}$  と正確に一致するときにEIT信号のレベルがピーク値を示す。そこで、気体状のアルカリ金属原子を封入した原子セル（ガスセル）に2光波を照射し、光検出器によりEIT信号のピークトップを検出するように、すなわち、2光波の周波数差  $\nu_1 - \nu_2$  が  $E_{12}$  に相当する周波数  $\nu_{12}$  と正確に一致するように制御することで、高精度な発振器を実現することができる。このような原子発振器に関する技術は、例えば、特許文献1に開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【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】

【0008】

従来のEIT方式による原子発振器は、半導体レーザーが発する光の中心周波数  $f_0$  ( $= \nu / \lambda_0$ :  $\nu$  は光の速度、 $\lambda_0$  は光の波長) (キャリア周波数) を決めるバイアス電流に周波数が  $f_m$  の変調信号を重畳して半導体レーザーに供給することにより、半導体レーザーは、中心周波数  $f_0$  を変調周波数  $f_m$  で変調した光を発生させる。半導体レーザーの出射光はアルカリ金属が封入されているガスセルに照射され、ガスセルを透過した光は光検出器により検出される。光検出器が検出した光の強度に応じて電圧制御水晶発振器 (VCO: Voltage Controlled Crystal Oscillator) の発振周波数が制御され、PLL (Phase Locked Loop) 回路を介して周波数が  $f_m$  の変調信号が生成される。そして、半導体レーザーが発する1次のサイドバンド光、すなわち、周波数が  $f_0 + f_m$  の光と周波数が  $f_0 - f_m$  の光が共鳴光対となるように制御がかかる。この制御により、電圧制御水晶発振器 (VCO) の出力信号の周波数偏差は極めて小さくなり、周波数精度の高い発振器を実現することができる。EIT信号のS/Nが高いほど周波数精度 (短期安定度) が向上するため、従来は、1次のサイドバンド光の強度が最大となるように変調信号の強度 (振幅) が決められていた。図14に、従来の半導体レーザーの出射光の周波数スペクトラムの一例を示す。図14において、横軸は光の周波数であり、縦軸は光の強度である。

【0009】

一方、レーザー光と原子の相互作用によって原子が本来持っているエネルギー準位が多少変動するシュタルクシフトと呼ばれる効果が知られている。シュタルクシフトによって

E I T 信号のピーク位置の周波数がシフトするため、原子発振器の周波数もシフトすることになる。半導体レーザーやガスセル等の部品の経時劣化に起因してアルカリ金属原子に入射する光の強度が変わると、シュタルクシフトによる E I T ピーク位置の周波数のシフト量も変動するが、従来の手法では E I T 信号の S / N を高くすることのみ考慮されているため、E I T ピーク位置の周波数のシフト量の変動が比較的大きく、原子発振器の長期安定度が劣化するという問題があった。

【 0 0 1 0 】

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、従来よりも長期安定度を向上させることが可能な原子発振器、この原子発振器を用いた電子機器及び移動体、並びにこの原子発振器の製造方法を提供することができる。

10

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 1 】

本発明は前述の課題の少なくとも一部を解決するためになされたものであり、以下の態様または適用例として実現することが可能である。

【 0 0 1 2 】

[ 適用例 1 ]

本適用例に係る原子発振器は、金属原子を封入しているセルと、前記セルに照射する光を発生させる光源と、前記金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる共鳴光対を含む周波数変調された光を前記光源に発生させるための周波数変調信号を生成する周波数変調信号生成手段と、を含み、前記共鳴光対は、前記光源が発生する光に含まれる 1 次のサイドバンド光の対であり、変調度を小さい側から大きい側へ変化させたときに、前記 1 次のサイドバンド光が最初に極大となる時の変調度を第 1 の値とし、前記光源が発生する光に含まれる中心周波数の光の強度が、最初に前記 1 次のサイドバンド光の強度よりも小さくなってから次に前記 1 次のサイドバンド光の強度以上になる時の変調度を第 2 の値とし、変調度が前記第 1 の値よりも大きく前記第 2 の値よりも小さくなるように、前記周波数変調信号の強度が設定されている。

20

【 0 0 1 3 】

本適用例に係る原子発振器によれば、中心周波数の光の強度の変動が共鳴光対の周波数差の変動（シュタルクシフト）に支配的であることを考慮し、周波数変調信号の強度（周波数変調の変調度）が変動した時の中心周波数の光の強度の変動量が従来よりも小さくなるように、周波数変調信号の強度が設定されている。従って、本適用例に係る原子発振器によれば、部品の経時変化により生じるシュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量を低減させることができるので、従来よりも長期安定度を向上させることができる。

30

【 0 0 1 4 】

また、周囲の環境温度が変動した時に、回路部分の温度特性に応じて周波数変調信号の強度が変動するが、本適用例の原子発振器によれば、周波数変調信号の強度が、その変動量が従来よりも小さくなる範囲に設定されているので、シュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量を低減させ、従来よりも周波数温度特性を向上させることができる。

40

【 0 0 1 5 】

[ 適用例 2 ]

上記適用例に係る原子発振器は、変調度を小さい側から大きい側へ変化させたときに、前記中心周波数の光の強度が、前記光源が発生する光に含まれる 2 次のサイドバンド光の強度と最初に同じになる時の変調度を第 3 の値とし、変調度が前記第 3 の値よりも大きくなるように、前記周波数変調信号の強度が設定されていてもよい。

【 0 0 1 6 】

[ 適用例 3 ]

上記適用例に係る原子発振器は、変調度を小さい側から大きい側へ変化させたときに、前記中心周波数の光の強度が、前記光源が発生する光に含まれる 3 次のサイドバンド光の強度と最初に同じになる時の変調度を第 4 の値とし、変調度が前記第 4 の値よりも大きく

50

なるように、前記周波数変調信号の強度が設定されていてもよい。

【 0 0 1 7 】

[ 適用例 4 ]

上記適用例に係る原子発振器は、変調度を小さい側から大きい側へ変化させたとき、前記 1 次のサイドバンド光の強度が、前記光源が発生する光に含まれる 3 次のサイドバンド光の強度よりも最初に大きくなってから次に前記 3 次のサイドバンド光の強度以上になる時の変調度を第 5 の値とし、変調度が前記第 5 の値よりも小さくなるように、前記周波数変調信号の強度が設定されていてもよい。

【 0 0 1 8 】

[ 適用例 5 ]

上記適用例に係る原子発振器は、変調度を小さい側から大きい側へ変化させたとき、前記 1 次のサイドバンド光の強度が、前記光源が発生する光に含まれる 2 次のサイドバンド光の強度よりも最初に大きくなってから次に前記 2 次のサイドバンド光の強度と同じになる時の変調度を第 6 の値とし、変調度が前記第 6 の値よりも小さくなるように、前記周波数変調信号の強度が設定されていてもよい。

【 0 0 1 9 】

これらの適用例に係る原子発振器によれば、周波数変調信号の強度（周波数変調の変調度）が変動した時の中心周波数の光の強度の変動量がさらに小さくなるように周波数変調信号の強度が設定されているので、長期安定度や周波数温度特性をより向上させることができる。

【 0 0 2 0 】

[ 適用例 6 ]

上記適用例に係る原子発振器は、変調度が前記第 1 の値と前記第 2 の値との間で前記中心周波数の光の強度が極小となるように、前記周波数変調信号の強度が設定されていてもよい。

【 0 0 2 1 】

本適用例に係る原子発振器によれば、周波数変調信号の強度（周波数変調の変調度）が変動した時の中心周波数の光の強度の変動量が最小となるように周波数変調信号の強度が設定されているので、長期安定度や周波数温度特性を大幅に向上させることができる。

【 0 0 2 2 】

[ 適用例 7 ]

本適用例に係る電子機器は、上記のいずれかの原子発振器を含む。

【 0 0 2 3 】

[ 適用例 8 ]

本適用例に係る移動体は、上記のいずれかの原子発振器を含む。

【 0 0 2 4 】

これらの適用例に係る電子機器及び移動体によれば、長期安定度や周波数温度特性の高い原子発振器を含むので、長期的に高い信頼性を維持することができる。

【 0 0 2 5 】

[ 適用例 9 ]

本適用例に係る原子発振器の製造方法は、金属原子を封入しているセルと、前記セルに照射する光を発生させる光源と、前記セルを透過した光を検出する光検出手段と、前記光検出手段が検出する光の強度に基づき、前記金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる共鳴光対を含む周波数変調された光を前記光源に発生させるための周波数変調信号を生成する周波数変調信号生成手段と、を有し、前記共鳴光対は、前記光源が発生する光に含まれる 1 次のサイドバンド光の対である原子発振器の製造法であって、前記光源に対して、強度を変えながら周波数変調信号を入力し、前記光検出手段の出力信号に基づいて前記周波数変調信号の強度と発振周波数との関係を求める工程と、前記周波数変調信号の強度と発振周波数との関係に基づいて、前記光源が発生する光に含まれる中心周波数の光の強度が、前記 1 次のサイドバンド光の強度よりも小さくなるように、前記周波数変調信号の強度

10

20

30

40

50

を調整する工程と、を含む。

#### 【 0 0 2 6 】

例えば、前記周波数変調信号の強度を調整する工程において、変調度を小さい側から大きい側へ変化させたときに、前記 1 次のサイドバンド光が最初に極大となる時の変調度を第 1 の値とし、前記光源が発生する光に含まれる中心周波数の光の強度が、最初に前記 1 次のサイドバンド光の強度よりも小さくなってから次に前記 1 次のサイドバンド光の強度以上になる時の変調度を第 2 の値とし、変調度が前記第 1 の値よりも大きく前記第 2 の値よりも小さくなるように、前記周波数変調信号の強度を調整してもよい。

#### 【 0 0 2 7 】

本適用例に係る原子発振器の製造方法によれば、周波数変調信号の強度と発振周波数との関係を求めることで、光源の出射光の周波数スペクトルを取得する手間を省き、周波数変調信号の強度を比較的簡単に調整することができる。

#### 【 0 0 2 8 】

##### [ 適用例 1 0 ]

上記適用例に係る原子発振器の製造方法は、前記周波数変調信号の強度を調整する工程において、前記周波数変調信号の強度と発振周波数との関係に基づいて、前記周波数変調信号の強度に対する発振周波数の感度を求め、前記感度を最小に近づけるように前記周波数変調信号の強度を調整してもよい。

#### 【 0 0 2 9 】

本適用例に係る原子発振器の製造方法によれば、周波数変調信号の強度に対する発振周波数の感度を求め、この感度が小さくなるように周波数変調信号の強度を調整するので、部品の経時変化により生じるシュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量を確実に低減させ、従来よりも長期安定度の高い原子発振器を製造することができる。

#### 【 図面の簡単な説明 】

#### 【 0 0 3 0 】

【 図 1 】 本実施形態の原子発振器の構成例を示す図。

【 図 2 】 周波数変換回路の構成例を示す図。

【 図 3 】 ベッセル関数を表す図。

【 図 4 】 本実施形態の半導体レーザーの出射光の周波数スペクトルを示す概略図。

【 図 5 】 本実施形態の原子発振器の製造方法の一例を示すフローチャート図。

【 図 6 】 シグナルジェネレーターと周波数カウンターの接続例を示す図。

【 図 7 】 マイクロ波の強度と発振周波数との関係の一例を示す図。

【 図 8 】 図 5 の工程 S 4 0 の実施例を示すフローチャート図。

【 図 9 】 マイクロ波強度とマイクロ波感度との関係の一例を示す図。

【 図 1 0 】 本実施形態の電子機器の機能ブロック図。

【 図 1 1 】 本実施形態の移動体の一例を示す図。

【 図 1 2 】 セシウム原子のエネルギー準位を模式的に示す図。

【 図 1 3 】 E I T 信号の一例を示す概略図。

【 図 1 4 】 従来の半導体レーザーの出射光の周波数スペクトルを示す概略図。

#### 【 発明を実施するための形態 】

#### 【 0 0 3 1 】

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。

#### 【 0 0 3 2 】

##### 1 . 原子発振器

##### [ 原子発振器の構成 ]

図 1 は、本実施形態の原子発振器の構成例を示す図である。図 1 に示すように、第 1 実施形態の原子発振器 1 は、半導体レーザー 1 0、減光フィルター（ND フィルター）1 1、1 / 4 波長板 1 2、ガスセル 1 3、光検出器 1 4、検波回路 1 6、電圧制御水晶発振器

10

20

30

40

50

( V C X O ) 1 7、変調回路 1 8、低周波発振器 1 9、周波数変換回路 2 0、検波回路 2 1、変調回路 2 2、低周波発振器 2 3、駆動回路 2 4、バイアス設定回路 2 6、メモリ 2 7 及び周波数変換回路 2 8 を含んで構成されている。なお、本実施形態の原子発振器 1 は、適宜、図 1 の構成要素 ( 各部 ) の一部を省略又は変更し、あるいは、他の構成要素を付加した構成としてもよい。

#### 【 0 0 3 3 】

半導体レーザー 1 0 は、例えば、垂直共振器面発光レーザー ( V C S E L : Vertical Cavity Surface Emitting Laser ) 等の面発光レーザーや端面発光レーザー ( Edge Emitting Laser ) などであり、半導体レーザー 1 0 が発生させた光は、減光フィルター 1 1 に入射する。

10

#### 【 0 0 3 4 】

減光フィルター 1 1 は、半導体レーザー 1 0 の出射光の一部のみを透過させ、減光フィルター 1 1 を透過した光は 1 / 4 波長板 1 2 に入射する。

#### 【 0 0 3 5 】

1 / 4 波長板 1 2 は、入射した光を + 円偏光にして透過させ、1 / 4 波長板 1 2 を透過した光はガスセル 1 3 に入射する。

#### 【 0 0 3 6 】

ガスセル 1 3 は、ガラス等の透明部材でできた容器中に気体状のアルカリ金属原子 ( ナトリウム ( N a ) 原子、ルビジウム ( R b ) 原子、セシウム ( C s ) 原子等 ) とともにネオン ( N e ) やアルゴン ( A r ) 等のバッファーガスが封入されたものである。ガスセル 1 3 に入射した光の一部はガスセル 1 3 を透過し、光検出器 1 4 に入射する。

20

#### 【 0 0 3 7 】

光検出器 1 4 は、ガスセル 1 3 を透過した光を検出し、検出した光の強度に応じた検出信号を出力する。光検出器 1 4 は、例えば、受光した光の強度に応じた検出信号を出力するフォトダイオード ( P D : Photo Diode ) を用いて実現することができる。光検出器 1 4 の出力信号は検波回路 1 6 と検波回路 2 1 に入力される。

#### 【 0 0 3 8 】

半導体レーザー 1 0、減光フィルター 1 1、1 / 4 波長板 1 2、ガスセル 1 3 及び光検出器 1 4 は、1 つの筐体に収容されており、物理パッケージ 1 0 0 を構成している。

#### 【 0 0 3 9 】

検波回路 1 6 は、数 H z ~ 数百 H z 程度の低い周波数で発振する低周波発振器 1 9 の発振信号を用いて光検出器 1 4 の出力信号を検波する。そして、検波回路 1 6 の出力信号の大きさに応じて、電圧制御水晶発振器 ( V C X O ) 1 7 の発振周波数が微調整される。電圧制御水晶発振器 ( V C X O ) 1 7 は、例えば、数 M H z ~ 数 1 0 M H z 程度で発振する。

30

#### 【 0 0 4 0 】

変調回路 1 8 は、検波回路 1 6 による検波を可能とするために、低周波発振器 1 9 の発振信号 ( 検波回路 1 6 に供給される発振信号と同じ信号 ) を変調信号として電圧制御水晶発振器 ( V C X O ) 1 7 の出力信号を変調する。変調回路 1 8 は、周波数混合器 ( ミキサー )、周波数変調 ( F M : Frequency Modulation ) 回路、振幅変調 ( A M : Amplitude Modulation ) 回路等により実現することができる。

40

#### 【 0 0 4 1 】

周波数変換回路 2 0 は、変調回路 1 8 の出力信号を、アルカリ金属原子の 2 つの基底準位間のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数  $\nu_{12}$  の 1 / 2 の周波数の信号に周波数変換し、周波数変換した信号の振幅を一定に制御して駆動回路 2 4 に出力する。周波数変換回路 2 0 は、例えば、図 2 に示すように、P L L ( Phase Locked Loop ) 回路 3 0 と、利得が可変の増幅回路 3 2 と、オートゲインコントロール ( A G C ) 回路 3 4 とを用いて実現することができる。

#### 【 0 0 4 2 】

検波回路 2 1 は、数 H z ~ 数百 H z 程度の低い周波数で発振する低周波発振器 2 3 の発

50



振信号を用いて光検出器 14 の出力信号を検波する。

【0043】

変調回路 22 は、検波回路 21 による検波を可能とするために、低周波発振器 23 の発振信号（検波回路 21 に供給される発振信号と同じ信号）を変調信号として検波回路 21 の出力信号を変調して駆動回路 24 に出力する。変調回路 22 は、周波数混合器（ミキサー）、周波数変調（FM）回路、振幅変調（AM）回路等により実現することができる。

【0044】

バイアス設定回路 26 は、駆動回路 24 を介して、メモリー 27 に記憶されている設定情報に応じて半導体レーザー 10 にバイアス電流を設定する処理（半導体レーザー 10 が発生させる光の中心波長（中心周波数（キャリア周波数））を設定する処理）を行う。

10

【0045】

メモリー 27 は、不揮発性のメモリーであり、半導体レーザー 10 のバイアス電流の設定情報等が記憶されている。メモリー 27 は、例えば、MONOS（Metal-Oxide-Nitride-Oxide-Silicon）メモリー等のフラッシュメモリーやEEPROM（Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory）等で実現することができる。

【0046】

駆動回路 24 は、半導体レーザー 10 のバイアス電流を設定するとともに、変調回路 22 の出力信号に応じて当該バイアス電流を微調整して半導体レーザー 10 に供給する。すなわち、半導体レーザー 10、減光フィルター 11、1/4 波長板 12、ガスセル 13、光検出器 14、検波回路 21、変調回路 22、駆動回路 24 を通るフィードバックループ（第 1 のフィードバックループ）により、半導体レーザー 10 が発生させる光の中心波長  $\lambda_0$ （中心周波数  $f_0$ ）が微調整される。

20

【0047】

駆動回路 24 は、さらに、バイアス電流に、周波数変換回路 20 の出力周波数成分（変調周波数  $f_m$ ）の電流（変調電流）を重畳して半導体レーザー 10 に供給する。この変調電流により周波数変調がかかり、半導体レーザー 10 は、中心周波数  $f_0$ （中心波長  $\lambda_0$ ）の光とともに、周波数  $f_0 \pm f_m$  の光（1 次サイドバンド光）、 $f_0 \pm 2f_m$ （2 次サイドバンド光）、 $f_0 \pm 3f_m$ （3 次サイドバンド光）等を含む光を発生させる。

【0048】

本実施形態では、半導体レーザー 10、減光フィルター 11、1/4 波長板 12、ガスセル 13、光検出器 14、検波回路 16、電圧制御水晶発振器（VCO）17、変調回路 18、周波数変換回路 20、駆動回路 24 を通るフィードバックループ（第 2 のフィードバックループ）により、周波数  $f_0 + f_m$  の光と周波数  $f_0 - f_m$  の光（1 次サイドバンド光の対）がガスセル 13 に封入されているアルカリ金属原子に EIT 現象を発生させる共鳴光対となるように微調整される。具体的には、第 2 のフィードバックループにより、周波数  $f_0 + f_m$  の光と周波数  $f_0 - f_m$  の光の周波数差（ $= 2f_m$ ）が、アルカリ金属原子の 2 つの基底準位間のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数  $\nu_{12}$  と正確に一致するようにフィードバック制御がかかる。

30

【0049】

このように、アルカリ金属原子の EIT 現象を利用することで、第 2 のフィードバックループに含まれる、周波数変換回路 20 の出力信号や電圧制御水晶発振器（VCO）17 の出力信号が一定の周波数で安定する。

40

【0050】

周波数変換回路 28 は、電圧制御水晶発振器（VCO）17 の出力信号を周波数変換し、所望の周波数（例えば、10.00...MHz）のクロック信号を生成する。このクロック信号が外部出力される。周波数変換回路 20 は、例えば、DDS（Direct Digital Synthesizer）により実現することができる。

【0051】

このような構成の原子発振器 1 は、発振周波数偏差が極めて小さく、高い短期安定度を実現することができる。

50

## 【 0 0 5 2 】

一方、半導体レーザー 10、減光フィルター 11、1/4波長板 12、ガスセル 13等の部品の経年劣化により、アルカリ金属原子に入射する光の強度が変動すると、 $\omega_{12}$ が変動する現象（シュタルクシフト）が生じるため、時間の経過とともに発振周波数が変動する。以下に説明するように、本実施形態では、この発振周波数の変動量を従来よりも小さくし、長期安定度を向上させる。

## 【 0 0 5 3 】

シュタルクシフトを考慮すると、 $\omega_{12}$ は次式（1）で近似される。

## 【 0 0 5 4 】

## 【 数 1 】

10

$$\omega_{12} = \omega_{120} + \frac{\Omega_0^2}{\omega_{120}} - \frac{\Omega_{+1} - \Omega_{-1}}{2} + \frac{\Omega_{+1}^2 + \Omega_{-1}^2}{4\omega_{120}} - \frac{\Omega_{+2}^2 + \Omega_{-2}^2}{4\omega_{120}} + \frac{\Omega_{+2}^2 + \Omega_{-2}^2}{6\omega_{120}} \dots (1)$$

## 【 0 0 5 5 】

ここで、 $\omega_{120}$ はアルカリ金属原子に光が入射しない時の $E_{12}$ に相当する周波数、 $\Omega_0$ は0次（中心周波数）の光の強度（入射量）、 $\Omega_{+1}$ 及び $\Omega_{-1}$ はそれぞれ上側と下側の1次サイドバンド光の強度（入射量）、 $\Omega_{+2}$ 及び $\Omega_{-2}$ はそれぞれ上側と下側の2次サイドバンド光の強度（入射量）である。

## 【 0 0 5 6 】

式（1）において、右辺第2項は中心周波数の光の強度による周波数変動分を表し、右辺第3項及び第4項は1次サイドバンド光の強度による周波数変動分を表し、右辺第5項及び第6項は2次サイドバンド光の強度による周波数変動分を表している。右辺第3項と第4項は符号が逆であるため、1次サイドバンド光の強度による周波数変動分は比較的小さい。同様に、右辺第5項と第6項は符号が逆であるため、2次サイドバンド光の強度による周波数変動分は比較的小さい。従って、 $\omega_{12}$ の変動は、中心周波数の光の強度 $\Omega_0$ による変動分が支配的である。そこで、長期安定度を向上させるには、 $\Omega_0$ の変動量が小さくなるように周波数変調をかけること、すなわち、周波数変調信号の強度を、その変動に対して $\Omega_0$ の変動量が小さくなる値に設定することが有効である。

20

## 【 0 0 5 7 】

半導体レーザー 10を理想的なレーザーとして、周波数が $f_m$ の周波数変調信号で周波数変調をかけたときの出射光は次式（2）で表される。

30

## 【 0 0 5 8 】

## 【 数 2 】

$$\begin{aligned} A_{FM} &= A_0 [J_0(m) \sin(2\pi f_0 t) \\ &\quad + J_1(m) \{ \sin 2\pi(f_0 + f_m)t - \sin 2\pi(f_0 - f_m)t \} \\ &\quad + J_2(m) \{ \sin 2\pi(f_0 + 2f_m)t + \sin 2\pi(f_0 - 2f_m)t \} \\ &\quad + J_3(m) \{ \sin 2\pi(f_0 + 3f_m)t - \sin 2\pi(f_0 - 3f_m)t \} \\ &\quad + \dots ] \\ &= A_0 \left[ J_0(m) \sin(2\pi f_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m) \sin 2\pi(f_0 + n f_m)t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(m) \sin 2\pi(f_0 - n f_m)t \right] \dots (2) \end{aligned}$$

40

## 【 0 0 5 9 】

ここで、 $A_0$ は周波数変調をかけないときの半導体レーザー 10の出射光（周波数 $f_0$ ）の強度であり、 $J_n(m)$ はベッセル関数（ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ）である。また、 $m$ は変調度であり、周波数変調信号の強度（振幅）に比例する。

## 【 0 0 6 0 】

式（2）において、 $A_0 \times J_0(m)$ が0次（中心周波数）の光の強度に相当し、 $A_0 \times J_1(m)$ が1次サイドバンド光の強度に相当し、 $A_0 \times J_2(m)$ が2次サイドバン

50

ド光の強度に相当し、 $A_0 \times J_3(m)$  が 3 次サイドバンド光の強度に相当する。

【0061】

図 3 は、 $J_0, J_1, J_2, J_3$  の各ベッセル関数を表す図であり、図 3 において、横軸は変調度  $m$ 、縦軸は各ベッセル関数の値である。

【0062】

図 3 において、 $m_1$  は、変調度  $m$  を小さい側から大きい側へ変化させたときに、1 次サイドバンド光の強度が最初に極大になる時（言い換えると、 $J_1$  が最初に極大になる時）の変調度  $m$  の値（第 1 の値）である。また、 $m_2$  は、変調度  $m$  を小さい側から大きい側へ変化させたときに、中心周波数の光の強度が最初に 1 次サイドバンド光の強度よりも小さくなってから次に 1 次サイドバンド光の強度以上になる時（言い換えると、最初に  $J_0 < J_1$  になってから次に  $J_0 = J_1$  になる時）の変調度  $m$  の値（第 2 の値）である。従来は、変調度  $m$  が  $m_1$  と一致するように設定しており、この設定では  $J_0$  の傾きが比較的大きいため、周波数変調信号の強度が変動した時のシュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量も大きい。

【0063】

本実施形態では、少なくとも、変調度  $m$  が  $m_1$  よりも大きく、 $m_2$  よりも小さくなる範囲で周波数変調信号の強度を設定する。この設定範囲では、従来の設定と比較して、過変調となっており、 $J_0$  の傾きが小さいため、シュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量を低減することができる。

【0064】

また、図 3 において、 $m_3$  は、変調度  $m$  を小さい側から大きい側へ変化させたときに、中心周波数の光の強度が、2 次サイドバンド光の強度と最初に同じになる時（言い換えると、最初に  $J_0 = J_2$  になる時）の変調度  $m$  の値（第 3 の値）である。また、 $m_4$  は、変調度  $m$  を小さい側から大きい側へ変化させたときに、中心周波数の光の強度が、3 次サイドバンド光の強度と最初に同じになる時（言い換えると、最初に  $J_0 = J_3$  になる時）の変調度  $m$  の値（第 4 の値）である。

【0065】

本実施形態において、変調度  $m$  が  $m_3$  よりも大きくなる範囲で周波数変調信号の強度を設定し、あるいは、変調度  $m$  が  $m_4$  よりも大きくなる範囲で周波数変調信号の強度を設定するのが好ましい。いずれの設定範囲でも、 $J_0$  の傾きがより小さいため、シュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量をより低減することができる。

【0066】

また、図 3 において、 $m_5$  は、変調度  $m$  を小さい側から大きい側へ変化させたとき、1 次サイドバンド光の強度が、3 次サイドバンド光の強度よりも最初に大きくなってから次に 3 次サイドバンド光の強度以上になる時（言い換えると、最初に  $J_1 > J_3$  になってから次に  $J_1 = J_3$  になる時）の変調度  $m$  の値（第 5 の値）である。また、 $m_6$  は、変調度  $m$  を小さい側から大きい側へ変化させたとき、1 次サイドバンド光の強度が、2 次サイドバンド光の強度よりも最初に大きくなってから次に 2 次サイドバンド光の強度と同じになる時（言い換えると、最初に  $J_1 > J_2$  になってから次に  $J_1 = J_2$  になる時）の変調度  $m$  の値（第 6 の値）である。

【0067】

本実施形態において、変調度  $m$  が  $m_5$  よりも小さくなる範囲で周波数変調信号の強度を設定し、あるいは、変調度  $m$  が  $m_6$  よりも小さくなる範囲で周波数変調信号の強度を設定するのがより好ましい。いずれの設定範囲でも、 $J_0$  の傾きがより小さいため、シュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量をより低減することができる。

【0068】

また、図 3 において、 $m_7$  は、変調度  $m$  が  $m_1$  と  $m_2$  との間で、中心周波数の光の強度が極小となる時（言い換えると、変調度  $m$  が  $m_1$  と  $m_2$  との間で  $J_0$  が極小になる時）の変調度  $m$  の値である。

本実施形態において、変調度  $m$  が  $m_7$  あるいは  $m_7$  の近傍になるように周波数変調信号

の強度を設定するのがさらに好ましい。このように設定すれば、 $J_0$ の傾きがほぼ0であり、シュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量を大きく低減することができる。

【0069】

図4に、半導体レーザー10の出射光の周波数スペクトラムの一例を示す。図4において、横軸は光の周波数であり、縦軸は光の強度である。図4の例は、変調度 $m$ が $m_7$ の近傍になるように周波数変調信号の強度が設定されている場合の周波数スペクトラムを示している。図4に示すように、中心周波数 $f_0$ の光の強度が低いレベルに抑制されている。

【0070】

以上に説明したように、本実施形態の原子発振器1では、中心周波数 $f_0$ の光の強度の変動が共鳴光対の周波数差 $\nu_1 - \nu_2$ の変動（シュタルクシフト）に支配的であることを考慮し、変調度 $m$ が変動した時の中心周波数 $f_0$ の光の強度の変動量が従来よりも小さくなるように、周波数変換回路20の出力信号（周波数変調信号）の強度が設定されている。従って、本実施形態の原子発振器1によれば、部品の経時変化により生じるシュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量を低減させることができるので、従来よりも長期安定度を向上させることができる。

【0071】

また、周囲の環境温度が変動した時に、回路部分の温度特性に応じて周波数変換回路20の出力信号（周波数変調信号）の強度が変動するが、本実施形態の原子発振器1によれば、周波数変調信号の強度が、その変動量が従来よりも小さくなる範囲に設定されているので、シュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量を低減させ、従来よりも周波数温度特性を向上させることができる。

【0072】

なお、図1において、物理パッケージ100を除く構成要素（回路）は、例えば、1チップの集積回路（IC）で実現してもよいし、複数のICチップで実現してもよい。

【0073】

また、図1では、半導体レーザー10、ガスセル13、光検出器14が、それぞれ本発明における「光源」、「セル」、「光検出手段」に相当する。また、検波回路16、電圧制御水晶発振器（VCXO）17、変調回路18、低周波発振器19及び周波数変換回路20により構成される回路が、本発明における「変調信号生成手段」に相当する。

【0074】

〔原子発振器の製造方法〕

図5は、本実施形態の原子発振器1の製造方法の一例を示すフローチャート図である。

【0075】

まず、図1に示した物理パッケージ100と回路部を用意し、シグナルジェネレーター（SG）40と周波数カウンタ50を接続する（S10）。

【0076】

図6は、シグナルジェネレーター（SG）40と周波数カウンタ50の接続例を示す図である。図6の例では、図1の変調回路18と周波数変換回路20がシグナルジェネレーター（SG）40に置き換えられており、シグナルジェネレーター（SG）40は、検波回路16による検波を可能とするために、低周波発振器19の発振信号を変調信号として電圧制御水晶発振器（VCXO）17の出力信号を変調し、さらに一定の周波数変換率で周波数変換してマイクロ波を生成し、駆動回路24に出力する。このマイクロ波は、半導体レーザー10に周波数変調をかける周波数変調信号として機能する。また、周波数カウンタ50は、周波数変換回路28が出力するクロック信号の周波数を測定する。なお、周波数カウンタ50は、VCXO17の出力信号やシグナルジェネレーター（SG）40の出力信号の周波数を測定してもよい。

【0077】

次に、半導体レーザー10に対して、強度を変えながらマイクロ波（周波数変調信号）を入力し、光検出器14の出力信号に基づいてマイクロ波の強度と発振周波数との関係を求める（S20）。具体的には、シグナルジェネレーター（SG）40がマイクロ波の電

10

20

30

40

50

圧を所定値ずつ大きく又は小さくしていき、周波数カウンター 50 がマイクロ波の各電圧での発振周波数を測定することで、マイクロ波の強度と発振周波数との関係を求める。

#### 【0078】

図 7 は、マイクロ波の強度と発振周波数との関係の一例を示す図である。図 7 において、横軸はマイクロ波の強度であり、縦軸は発振周波数の周波数偏差であり、ともに任意単位である。前述したように、シュタルクシフトを考慮した共鳴光対の周波数差  $\nu_1 - \nu_2$  の式 (1) によると、 $\nu_1 - \nu_2$  の変動は、中心周波数の光の強度による変動分が支配的であり、中心周波数の光の強度は、式 (2) の右辺第 1 項 (ベッセル関数  $J_0(m)$  を含む項) に相当するので、変調度  $m$  に応じて変動する。そして、変調度  $m$  はマイクロ波の強度と比例するので、図 7 に示すマイクロ波の強度による発振周波数の周波数偏差は、図 6 に示したベッセル関数  $J_0(m)$  と相関関係にある。具体的には、図 7 においてマイクロ波の強度が 0 から  $P_0$  まで増加するにつれて周波数偏差が単調減少するときは、図 6 において変調度が 0 から  $m_7$  まで増加するにつれて  $J_0(m)$  が単調減少するときに対応する。また、図 7 においてマイクロ波の強度が  $P_0$  であって周波数偏差の変化率が最小となるときは、図 6 において変調度が  $m_7$  であって  $J_0(m)$  が極小となるときに対応する。さらに、図 7 においてマイクロ波の強度が  $P_0$  から増加するにつれて周波数偏差が単調減少するときは、図 6 において変調度が  $m_7$  から増加するにつれて  $J_0(m)$  が単調増加するときに対応する。

#### 【0079】

次に、シグナルジェネレーター (SG) 40 の接続を外して、変調回路 18 と及び周波数変換回路 20 を組み込む (S30)。

#### 【0080】

次に、工程 S20 で求めたマイクロ波の強度と発振周波数との関係に基づいて、中心周波数の光の強度が、1 次のサイドバンド光の強度よりも小さくなるように、マイクロ波の強度を調整する (S40)。例えば、図 7 の  $P_0$  と図 6 の  $m_7$  が一致するとして、図 7 において、図 6 の  $J_0(m) < J_1(m)$  となる変調度  $m$  の範囲に対応するマイクロ波強度の範囲を計算により求め、マイクロ波の強度を当該範囲内のいずれかの値に調整してもよい。

#### 【0081】

最後に、物理パッケージ 100 と回路部を筐体に収容し、原子発振器 1 を組み立てる (S50)。

#### 【0082】

図 8 は、図 5 の工程 S40 の好ましい実施例を示すフローチャート図である。図 8 の例では、まず、図 5 の工程 S20 で求めたマイクロ波の強度と発振周波数との関係に基づいて、マイクロ波の強度に対する発振周波数の感度を求める。

#### 【0083】

次に、工程 S42 で求めたマイクロ波の強度に対する発振周波数感度を最小に近づけるようにマイクロ波の強度を調整する (S44)。

#### 【0084】

例えば、工程 S42 では、図 7 に示したマイクロ波強度と周波数偏差の関係を用いて、周波数偏差のマイクロ波強度による 1 次微分計算 (差分計算) を行い、マイクロ波強度とマイクロ波感度 (周波数偏差の 1 次微分) との関係を求める。このマイクロ波感度が、マイクロ波の強度に対する発振周波数の感度に相当する。

#### 【0085】

図 9 は、マイクロ波強度とマイクロ波感度との関係の一例を示す図である。図 9 において、横軸はマイクロ波強度であり、縦軸はマイクロ波感度であり、ともに任意単位である。図 9 において、マイクロ波強度 (横軸) の値の範囲は図 7 と同じであり、マイクロ波感度 (縦軸) の値は図 7 の周波数偏差 (縦軸) のマイクロ波強度による 1 次微分値である。図 9 の例では、マイクロ波強度が  $P_0$  のときにマイクロ波感度の絶対値が最小 (ほぼ 0) になっている。工程 S44 では、マイクロ波の強度が  $P_0$  あるいは  $P_0$  の近傍になるよう

10

20

30

40

50

に、周波数変換回路 20 の出力信号（周波数変調信号）の電圧を調整する。

【0086】

以上に説明したように、本実施形態の原子発振器の製造方法によれば、マイクロ波（周波数変調信号）の強度に対する発振周波数の感度を求め、この感度が小さくなるように周波数変換回路 20 の出力信号（周波数変調信号）の強度を調整するので、部品の経時変化により生じるシュタルクシフトに起因する発振周波数の変動量を確実に低減させ、従来よりも高い長期安定度の原子発振器を製造することができる。

【0087】

また、本実施形態の原子発振器の製造方法によれば、マイクロ波（周波数変調信号）の強度に対する発振周波数の感度を求めることで、半導体レーザー 10 の出射光の周波数スペクトルを取得する手間を省き、周波数変調信号の強度を比較的簡単に調整することができる。

【0088】

2. 電子機器

図 10 は、本実施形態の電子機器の機能ブロック図である。

【0089】

本実施形態の電子機器 300 は、原子発振器 310、CPU（Central Processing Unit）320、操作部 330、ROM（Read Only Memory）340、RAM（Random Access Memory）350、通信部 360、表示部 370 を含んで構成されている。なお、本実施形態の電子機器は、図 10 の構成要素（各部）の一部を省略又は変更し、あるいは他の構成要素を付加した構成としてもよい。

【0090】

原子発振器 310 は、例えば、前述した実施形態の原子発振器 1 であり、長期安定度の高いクロック信号を出力する。

【0091】

CPU 320 は、ROM 340 等に記憶されているプログラムに従い、各種の計算処理や制御処理を行う。具体的には、CPU 320 は、原子発振器 310 が出力するクロック信号に同期して、各種の演算処理、操作部 330 からの操作信号に応じた各種の処理、外部とデータ通信を行うために通信部 360 を制御する処理、表示部 370 に各種の情報を表示させるための表示信号を送信する処理等を行う。

【0092】

操作部 330 は、操作キーやボタンスイッチ等により構成される入力装置であり、ユーザーによる操作に応じた操作信号を CPU 320 に出力する。

【0093】

ROM 340 は、CPU 320 が各種の計算処理や制御処理を行うためのプログラムやデータ等を記憶している。

【0094】

RAM 350 は、CPU 320 の作業領域として用いられ、ROM 340 から読み出されたプログラムやデータ、操作部 330 から入力されたデータ、CPU 320 が各種プログラムに従って実行した演算結果等を一時的に記憶する。

【0095】

通信部 360 は、CPU 320 と外部装置との間のデータ通信を成立させるための各種制御を行う。

【0096】

表示部 370 は、LCD（Liquid Crystal Display）等により構成される表示装置であり、CPU 320 から入力される表示信号に基づいて各種の情報を表示する。表示部 370 には操作部 330 として機能するタッチパネルが設けられていてもよい。

【0097】

原子発振器 310 として本実施形態の原子発振器 1 を組み込むことにより、長期的に高い信頼性を維持することが可能な電子機器を実現することができる。

10

20

30

40

50

## 【0098】

このような電子機器300としては、例えば、標準時刻との同期を実現する時刻管理用のサーバー（タイムサーバー）、タイムスタンプの発行等を行う時刻管理装置（タイムスタンプサーバー）、基地局等の周波数基準装置等が挙げられる。電子機器300としてはこの他にも種々の電子機器が考えられ、例えば、パーソナルコンピュータ（例えば、モバイル型パーソナルコンピュータ、ラップトップ型パーソナルコンピュータ、タブレット型パーソナルコンピュータ）、スマートフォンや携帯電話機などの移動体端末、デジタルスチールカメラ、インクジェット式吐出装置（例えば、インクジェットプリンター）、ルーターやスイッチなどのストレージエリアネットワーク機器、ローカルエリアネットワーク機器、移動体端末基地局用機器、テレビ、ビデオカメラ、ビデオレコーダー、カーナビゲーション装置、リアルタイムクロック装置、ページャー、電子手帳（通信機能付も含む）、電子辞書、電卓、電子ゲーム機器、ゲーム用コントローラー、ワードプロセッサ、ワークステーション、テレビ電話、防犯用テレビモニター、電子双眼鏡、POS端末、医療機器（例えば電子体温計、血圧計、血糖計、心電図計測装置、超音波診断装置、電子内視鏡）、魚群探知機、各種測定機器、計器類（例えば、車両、航空機、船舶の計器類）、フライトシュミレーター、ヘッドマウントディスプレイ、モーショントレース、モーショントラッキング、モーションコントローラー、PDR（歩行者位置方位計測）等が挙げられる。

10

## 【0099】

## 3. 移動体

20

図11は、本実施形態の移動体の一例を示す図（上面図）である。図11に示す移動体400は、原子発振器410、カーナビゲーション装置420、コントローラー430、440、450、バッテリー460、バックアップ用バッテリー470を含んで構成されている。なお、本実施形態の移動体は、図11の構成要素（各部）の一部を省略又は変更してもよいし、他の構成要素を付加した構成としてもよい。

## 【0100】

原子発振器410は長期安定度の高いクロック信号を出力するものであり、この原子発振器410としては、上述の実施形態の原子発振器1を適用することができる。

## 【0101】

カーナビゲーション装置420は、原子発振器410が出力するクロック信号に同期して、位置や時刻その他の各種の情報をディスプレイに表示する。

30

## 【0102】

コントローラー430、440、450は、エンジンシステム、ブレーキシステム、キーレスエントリーシステム等の各種の制御を行う。コントローラー430、440、450は、原子発振器410が出力するクロック信号に同期して各種の制御を行うようにしてもよい。

## 【0103】

本実施形態の移動体400は、原子発振器410を備えていることで、長期的に高い信頼性を維持することができる。

## 【0104】

このような移動体400としては種々の移動体が考えられ、例えば、自動車（電気自動車も含む）、ジェット機やヘリコプター等の航空機、船舶、ロケット、人工衛星等が挙げられる。

40

## 【0105】

## 4. 応用例

上述した本実施形態の原子発振器では、ガスセル13に磁場がかかるとアルカリ金属原子のエネルギー準位がゼーマン分裂し、EIT現象を生じさせる共鳴光対の周波数差 $\nu_1$ は磁場の強度に応じて変動する（その結果、発振周波数が変動する）。この特性を利用し、本実施形態の原子発振器を磁気センサーに応用することができる。

## 【0106】

50

また、本実施形態の原子発振器は、極めて安定したアルカリ金属原子の量子干渉状態（量子コヒーレンス状態）を作り出すことができるので、ガスセル１３に入射する共鳴光対を取り出すことで、量子コンピュータ、量子メモリー、量子暗号システム等の量子情報機器に用いる光源を実現することもできる。

【０１０７】

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。

【０１０８】

上述した実施形態および変形例は一例であって、これらに限定されるわけではない。例えば、各実施形態および各変形例を適宜組み合わせることも可能である。

10

【０１０９】

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。

【符号の説明】

【０１１０】

１ 原子発振器、１０ 半導体レーザー、１１ 減光フィルター、１２ １／４波長板、１３ ガスセル、１４ 光検出器、１６ 検波回路、１７ 電圧制御水晶発振器（ＶＣＸＯ）、１８ 変調回路、１９ 低周波発振器、２０ 周波数変換回路、２１ 検波回路、２２ 変調回路、２３ 低周波発振器、２４ 駆動回路、２６ バイアス設定回路、２７ メモリー、２８ 周波数変換回路、３０ ＰＬＬ回路、３２ 増幅回路、３４ オートゲインコントロール（ＡＧＣ）回路、４０ シグナルジェネレーター、５０ 周波数カウンター、１００ 物理パッケージ、３００ 電子機器、３１０ 原子発振器、３２０ ＣＰＵ、３３０ 操作部、３４０ ＲＯＭ、３５０ ＲＡＭ、３６０ 通信部、３７０ 表示部、４００ 移動体、４１０ 原子発振器、４２０ カーナビゲーション装置、４３０、４４０、４５０ コントローラー、４６０ バッテリー、４７０ バックアップ用バッテリー

20

30



【 図 2 】

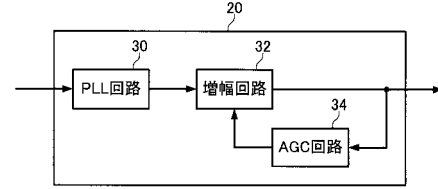
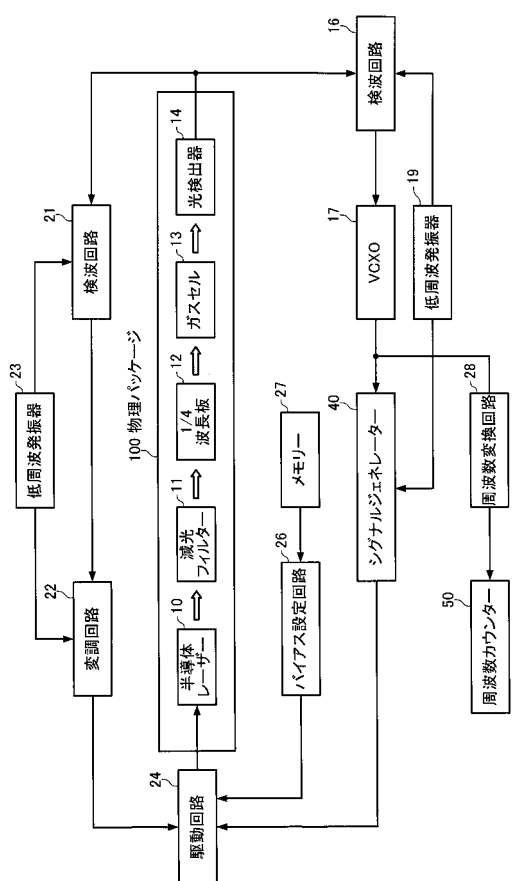
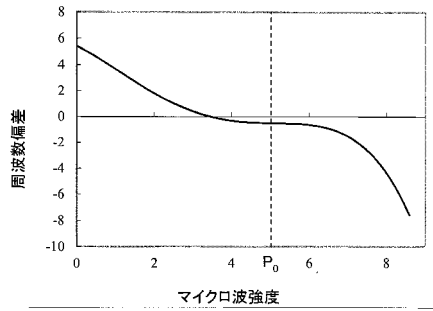


Figure 1: A frequency spectrum diagram showing a central bandpass filter response. The horizontal axis represents frequency, with a central frequency  $f_0$ . The spectrum is symmetric around  $f_0$ . The central passband is marked with a width of  $\omega_{12}$ . The passband is flanked by two sidebands, each containing three discrete frequency components. The sidebands are labeled with '3次' (3rd order) and '2次' (2nd order) components. The central passband is labeled with '1次' (1st order) and '0次' (0th order) components. The sidebands are labeled with  $f_m$  and  $f_{m1}$ .

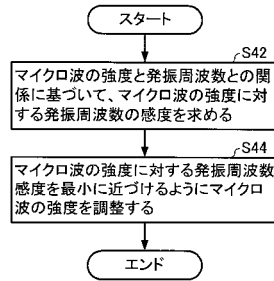
【 図 6 】



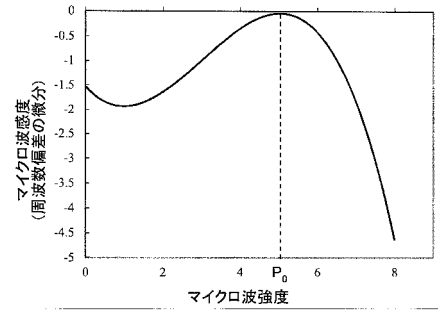
【図 7】



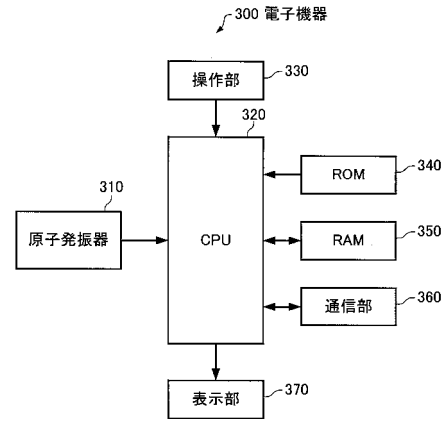
【図 8】



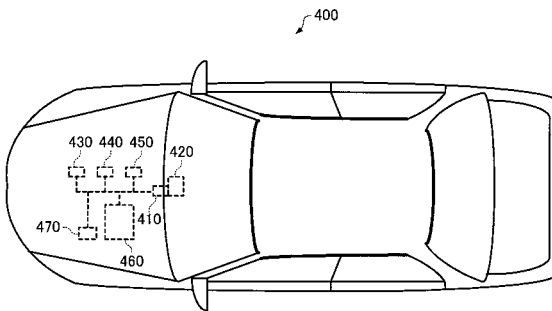
【図 9】



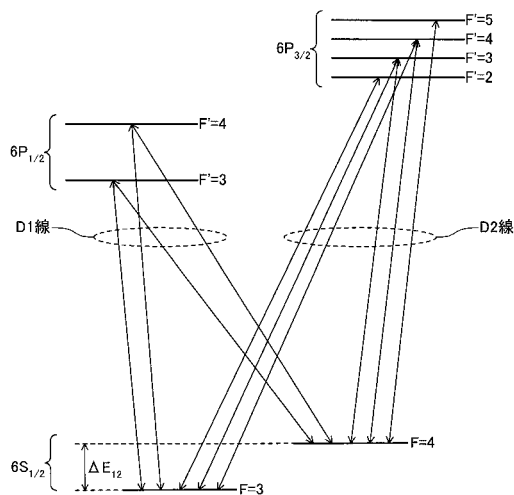
【図 10】



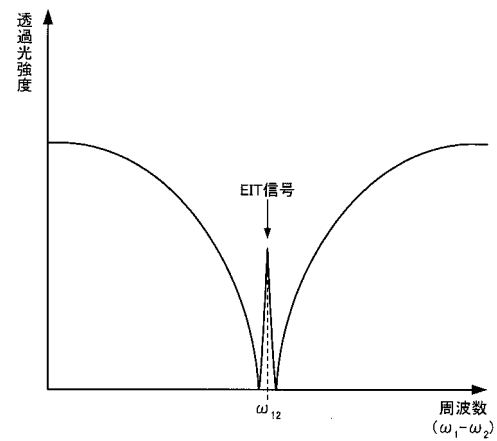
【図 11】



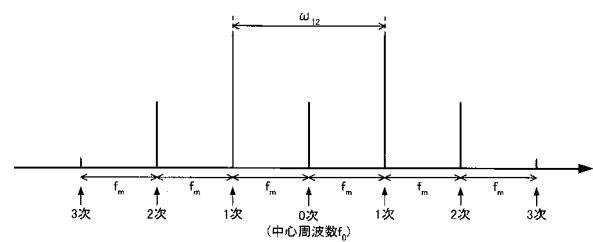
【図 12】



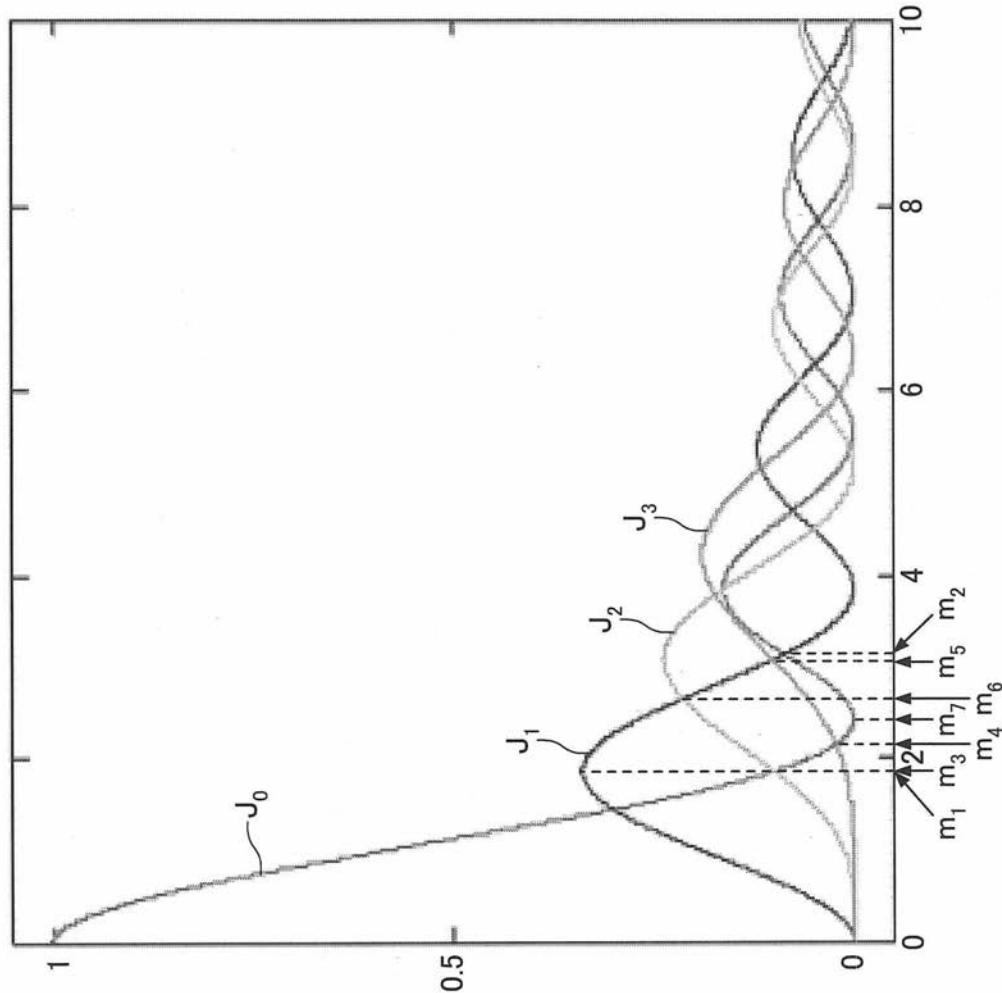
【図 13】



【図 14】



【図 3】



【手続補正書】

【提出日】平成26年9月18日(2014.9.18)

【手続補正 1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0078

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0078】

図7は、マイクロ波の強度と発振周波数との関係の一例を示す図である。図7において、横軸はマイクロ波の強度であり、縦軸は発振周波数の周波数偏差であり、ともに任意単位である。前述したように、シュタルクシフトを考慮した共鳴光対の周波数差  $\omega_1 - \omega_2$  の式(1)によると、 $\omega_1 - \omega_2$  の変動は、中心周波数の光の強度による変動分が支配的であり、中心周波数の光の強度は、式(2)の右辺第1項(ベッセル関数  $J_0(m)$  を含む項)に相当するので、変調度  $m$  に応じて変動する。そして、変調度  $m$  はマイクロ波の強度と比例するので、図7に示すマイクロ波の強度による発振周波数の周波数偏差は、図3に示したベッセル関数  $J_0(m)$  と相関関係にある。具体的には、図7においてマイクロ波の強度が0から  $P_0$  まで増加するにつれて周波数偏差が単調減少するときは、図3において変調度が0から  $m_7$  まで増加するにつれて  $J_0(m)$  が単調減少するときに対応する。また、図7においてマイクロ波の強度が  $P_0$  であって周波数偏差の変化率が最小となるときは、図3において変調度が  $m_7$  であって  $J_0(m)$  が極小となるときに対応する。さらに、図7においてマイクロ波の強度が  $P_0$  から増加するにつれて周波数偏差が単調減少するときは、図3において変調度が  $m_7$  から増加するにつれて  $J_0(m)$  が単調増加するときに対

応する。

【手続補正 2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0080

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0080】

次に、工程 S 2 0 で求めたマイクロ波の強度と発振周波数との関係に基づいて、中心周波数の光の強度が、1 次のサイドバンド光の強度よりも小さくなるように、マイクロ波の強度を調整する (S 4 0)。例えば、図 7 の  $P_0$  と図 3 の  $m_7$  が一致するとして、図 7 において、図 3 の  $J_0(m) < J_1(m)$  となる変調度  $m$  の範囲に対応するマイクロ波強度の範囲を計算により求め、マイクロ波の強度を当該範囲内のいずれかの値に調整してもよい。

---

フロントページの続き

- (72)発明者 林 暢仁  
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
- (72)発明者 石原 直樹  
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
- (72)発明者 田中 孝明  
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
- Fターム(参考) 5J106 AA01 CC08 CC09 CC10 DD05 GG02 JJ01 KK12 KK36