

(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2018-42181
(P2018-42181A)

(43) 公開日 平成30年3月15日(2018.3.15)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード(参考)
HO 3 L 7/26 (2006.01)	HO 3 L 7/26	5 J 1 0 6
HO 1 S 1/06 (2006.01)	HO 1 S 1/06	

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2016-176485 (P2016-176485)
(22) 出願日 平成28年9月9日(2016.9.9)

(出願人による申告)平成28年度、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト/インフラ状態モニタリング用センサシステム開発/道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 305027401
公立大学法人首都大学東京
東京都新宿区西新宿二丁目3番1号
(74) 代理人 110000420
特許業務法人エム・アイ・ピー
(72) 発明者 五箇 繁善
東京都八王子市南大沢1-1 首都大学東京南大沢キャンパス内
Fターム(参考) 5J106 CC07 GG02 KK05 LL10

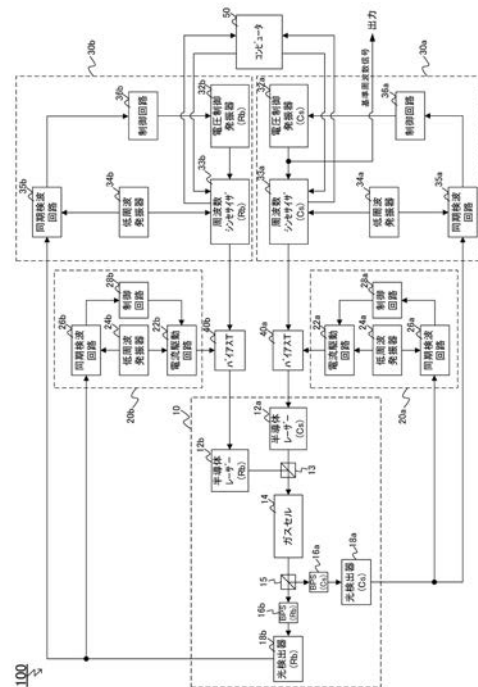
(54) 【発明の名称】 原子発振器

(57) 【要約】

【課題】長期に渡って高い周波数安定度を維持するガセル型の原子発振器を提供する。

【解決手段】本発明によれば、第1の電圧制御発振器が発振する基準周波数信号を第1の通倍率で通倍して第1の高周波信号を合成する第1の周波数シンセサイザと、前記第1の高周波信号によって変調された第1のレーザー光を出射する第1の半導体レーザーと、第2の電圧制御発振器が発振する出力信号を第2の通倍率で通倍して第2の高周波信号を合成する第2の周波数シンセサイザと、前記第2の高周波信号によって変調された第2のレーザー光を出射する第2の半導体レーザーと、前記第1のレーザー光と前記第2のレーザー光が同時に入射するガセルであって、第1のアルカリ金属原子のガスと第2のアルカリ金属原子のガスとバッファガスを封入するガセルと、前記第1の通倍率を前記第1の周波数シンセサイザに設定するコンピュータを含む原子発振器が提供される。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

CPT共鳴を利用したガスセル型の原子発振器であって、

第1の電圧制御発振器が発振する基準周波数信号を第1の逡倍率で逡倍して第1の高周波信号を合成する第1の周波数シンセサイザと、

前記第1の高周波信号によって逡調された第1のレーザー光を出射する第1の半導体レーザーと、

第2の電圧制御発振器が発振する出力信号を第2の逡倍率で逡倍して第2の高周波信号を合成する第2の周波数シンセサイザと、

前記第2の高周波信号によって逡調された第2のレーザー光を出射する第2の半導体レーザーと、

前記第1のレーザー光と前記第2のレーザー光が同時に入射するガスセルであって、第1のアルカリ金属原子のガスと第2のアルカリ金属原子のガスとバッファガスを封入するガスセルと、

前記第1の逡倍率を前記第1の周波数シンセサイザに設定するコンピュータと、
を含み、

前記コンピュータは、

前記第1の高周波信号と前記第2の高周波信号の周波数比を算出する周波数比算出手段と、

算出した前記周波数比に基づいて前記バッファガスのガス圧を逡定するバッファガス圧逡定手段と、

逡定した前記ガス圧に基づいて前記第1のアルカリ金属原子の共鳴周波数を逡定する共鳴周波数逡定手段と、

逡定した前記第1のアルカリ金属原子の共鳴周波数に基づいて前記第1の逡倍率を算出する逡倍率算出手段と、

を含む、

原子発振器。

【請求項 2】

前記バッファガス圧逡定手段は、

下記式に基づいて前記ガス圧を逡定する、請求項 1 に記載の原子発振器。

$$P = \frac{V_1 - rV_2}{r\alpha_2 - \alpha_1}$$

(上記式において、Pは前記ガス圧を示し、rは前記周波数比を示し、 α_1 は前記第1のアルカリ金属原子の公称周波数を示し、 α_2 は前記第2のアルカリ金属原子の公称周波数を示し、 α_1 は前記第1のアルカリ金属原子の圧力係数を示し、 α_2 は前記第2のアルカリ金属原子の圧力係数を示す。)

【請求項 3】

前記逡倍率算出手段は、

逡定した前記第1のアルカリ金属原子の共鳴周波数の1/2の値を前記基準周波数信号の目標周波数で除した値を前記第1の逡倍率として算出する、請求項 1 または 2 に記載の原子発振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子発振器に関し、より詳細には、CPT共鳴を利用した原子発振器に関する。

10

20

30

40

50

【背景技術】

【0002】

CPT共鳴を利用した原子発振器は、量子部を光学素子だけで構成することができるため、小型化・省電力化が容易であることから、幅広い用途への適用が期待されている（例えば、特許文献1）。

【0003】

しかしながら、アルカリガスとバッファガスを封入したガスセルを用いる原子発振器では、バッファガスのリークなどが原因でバッファガス圧が長期的に変動することによって共鳴周波数がシフトするため（バッファガスシフト）、長期的な周波数安定度に限界があった。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2007-336136号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本発明は、上記従来技術における課題に鑑みてなされたものであり、長期に渡って高い周波数安定度を維持するガスセル型の原子発振器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】

20

【0006】

ガスセル型の原子発振器では、ガスセルに封入されるバッファガスのガス圧の変動によって原子の共鳴周波数がシフトすると、その共鳴周波数に同期して制御される原子発振器の発振周波数の信頼性が失われる。

【0007】

この点につき、本発明者は、バッファガス圧の変動が共鳴周波数に与える影響が原子の種類によって異なる点に着目して、ガスセルに2種類の異なるアルカリ金属原子を封入するという着想を得た。この着想のもと、さらに検討を進める中で、本発明者は、ガスセルに封入したそれぞれの原子の共鳴周波数を測定することによって、変動するバッファガス圧を推定できることを見出し、本発明に至ったのである。

30

【0008】

すなわち、本発明によれば、CPT共鳴を利用したガスセル型の原子発振器であって、第1の電圧制御発振器が発振する基準周波数信号を第1の逡倍率で逡倍して第1の高周波信号を合成する第1の周波数シンセサイザと、前記第1の高周波信号によって変調された第1のレーザー光を出射する第1の半導体レーザーと、第2の電圧制御発振器が発振する出力信号を第2の逡倍率で逡倍して第2の高周波信号を合成する第2の周波数シンセサイザと、前記第2の高周波信号によって変調された第2のレーザー光を出射する第2の半導体レーザーと、前記第1のレーザー光と前記第2のレーザー光が同時に入射するガスセルであって、第1のアルカリ金属原子のガスと第2のアルカリ金属原子のガスとバッファガスを封入するガスセルと、前記第1の逡倍率を前記第1の周波数シンセサイザに設定するコンピュータと、を含み、前記コンピュータは、前記第1の高周波信号と前記第2の高周波信号の周波数比を算出する周波数比算出手段と、算出した前記周波数比に基づいて前記バッファガスのガス圧を推定するバッファガス圧推定手段と、推定した前記ガス圧に基づいて前記第1のアルカリ金属原子の共鳴周波数を推定する共鳴周波数推定手段と、推定した前記第1のアルカリ金属原子の共鳴周波数に基づいて前記第1の逡倍率を算出する逡倍率算出手段とを含む原子発振器が提供される。

40

【発明の効果】

【0009】

上述したように、本発明によれば、長期に渡って高い周波数安定度を維持するガスセル型の原子発振器が提供される。

50

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】本実施形態の原子発振器のハードウェア構成図。

【図2】本実施形態の原子発振器に搭載されるコンピュータの構成図。

【図3】本実施形態の原子発振器に搭載されるコンピュータが実行する処理のフローチャート。

【図4】実験装置を示す図。

【図5】Csと⁸⁷RbのCPT共鳴線を示す図。【図6】Csと⁸⁷RbのCPT共鳴周波数の経時変化と周波数変動量の経時変化を示す図。

10

【発明を実施するための形態】

【0011】

以下、本発明を図面に示した実施の形態をもって説明するが、本発明は、図面に示した実施の形態に限定されるものではない。なお、以下に参照する各図においては、共通する要素について同じ符号を用い、適宜、その説明を省略するものとする。

【0012】

本発明の実施形態である原子発振器は、ガスセルに封入されたアルカリ金属原子のCPT (Coherent Population Trapping) 共鳴に伴って生じる透明化現象を利用して、極めて安定した周波数信号を生成するように構成された発振器である。

【0013】

図1は、本発明の実施形態である原子発振器100のハードウェア構成を示す。図1に示すように、本実施形態の原子発振器100は、量子部10と、2つの波長制御部20a, 20bと、2つの周波数制御部30a, 30bと、2つのバイアスT40a, 40bと、原子発振器100を制御するコンピュータ50を含んで構成されている。以下、各構成要素について説明する。

20

【0014】

最初に、量子部10について説明する。

【0015】

量子部10は、2つの半導体レーザー12a, 12bと、ガスセル14と、2つの光検出器18a, 18bと、量子部10の温度を一定に維持するための温度制御手段(図示せず)を含んで構成されている。

30

【0016】

ここで、本実施形態では、ガスセル14に、2種類のアルカリ金属原子のガスとバッファガスが封入されている。ここでいう2種類のアルカリ金属原子とは、それぞれが異なる原子番号と異なるCPT共鳴周波数を有する原子を意味し、その種類を限定するものではないが、同位体の組み合わせ(例えば、⁸⁵Rbと⁸⁷Rbを72:28の割合で含むナチュラルRb)は2種類のアルカリ金属原子として考えない。以下では、便宜上、セシウム(Cs)とルビジウム(Rb)をガスセル14に封入した場合を例にとって説明を行う。

【0017】

一方、本実施形態では、バッファガスとして、He、Ne、Ar、N₂といった不活性のガスの中から1種類以上のガスを選択して用いることができる。なお、温度依存の周波数シフトを低減するために、温度に対する周波数シフト方向が異なる2種類のガスをガスセル14に封入しても良い。

40

【0018】

第1の半導体レーザー12a(以下、半導体レーザー[Cs]という場合がある)は、セシウム(Cs)用の励起光源であり、バイアスT40aから入力される駆動電流によって駆動され、セシウム(Cs)の吸収波長帯(894nm)のレーザー光を出射する。一方、第2の半導体レーザー12b(以下、半導体レーザー[Rb]という場合がある)は、ルビジウム(Rb)用の励起光源であり、バイアスT40bから入力される駆動電流によって駆

50

動され、ルビジウム (R b) の吸収波長帯 (795nm) のレーザー光を出射する。なお、本実施形態では、半導体レーザー 1 2 a , 1 2 b として、垂直共振器面発光レーザー (V C S E L : Vertical Cavity Surface Emitting LASER) を用いることが好ましい。

【 0 0 1 9 】

本実施形態では、2つの半導体レーザー 1 2 a , 1 2 b から出射した2つのレーザー光が、ビームスプリッタ 1 3 (分割比 5 0 : 5 0) で重ね合された後、ガスセル 1 4 に同時に入射する。その後、ガスセル 1 4 を透過したレーザー光は、ビームスプリッタ 1 5 (分割比 5 0 : 5 0) で2つの光に分割された後、一方の光がセシウム (C s) の励起光 (89 4nm) を選択的に透過するバンドパスフィルタ 1 6 a を経てセシウム用の光検出器 1 8 a に入射し、他方の光がルビジウム (R b) の励起光 (795nm) を選択的に透過するバンドパスフィルタ 1 6 b を経てルビジウム用の光検出器 1 8 b に入射する。その後、2つの光検出器 1 8 a , 1 8 b は、受光した透過光を光電変換して光検出信号 (直流電圧) を出力する。

10

【 0 0 2 0 】

ここで、本実施形態では、セシウム用の光検出器 1 8 a (以下、光検出器 [C s] という場合がある) から出力される光検出信号が波長制御部 2 0 a および周波数制御部 3 0 a に入力されるとともに、ルビジウム用の光検出器 1 8 b (以下、光検出器 [R b] という場合がある) から出力される光検出信号が波長制御部 2 0 b および周波数制御部 3 0 b に入力されるように構成されている。

【 0 0 2 1 】

以上、量子部 1 0 について説明したので、続いて、波長制御部 2 0 a , 2 0 b について説明する。

20

【 0 0 2 2 】

まず、波長制御部 2 0 a について説明する。波長制御部 2 0 a は、電流駆動回路 2 2 a と、低周波発振器 2 4 a と、同期検波回路 2 6 a と、制御回路 2 8 a を含んで構成されている。

【 0 0 2 3 】

電流駆動回路 2 2 a は、半導体レーザー [C s] を駆動するための駆動電流をバイアス T 4 0 a に入力する。ここで、電流駆動回路 2 2 a から出力される駆動電流は、低周波発振器 2 4 a の発振周波数で変調されるようになっている。一方、同期検波回路 2 6 a は、光検出器 [C s] から入力される光検出信号を低周波発振器 2 4 a が発振する低周波信号で同期検波し、電圧信号を制御回路 2 8 a に入力する。これを受けて、制御回路 2 8 a は、同期検波回路 2 6 a から入力される電圧がゼロになるように、電流駆動回路 2 2 a の出力電流を制御する。その結果、ガスセル 1 4 に封入されたセシウム (C s) が励起準位を維持するように、半導体レーザー [C s] のレーザー光の波長がロックされる。

30

【 0 0 2 4 】

次に、波長制御部 2 0 b について説明する。波長制御部 2 0 b は、電流駆動回路 2 2 b と、低周波発振器 2 4 b と、同期検波回路 2 6 b と、制御回路 2 8 b を含んで構成されており、上述した波長制御部 2 0 a と同様の機能を果たす。

【 0 0 2 5 】

すなわち、電流駆動回路 2 2 b は、半導体レーザー [R b] を駆動するために、低周波発振器 2 4 b の発振周波数で変調された駆動電流をバイアス T 4 0 b に入力する。一方、同期検波回路 2 6 b は、光検出器 [R b] から入力される光検出信号を低周波発振器 2 4 b が発振する低周波信号で同期検波し、電圧信号を制御回路 2 8 b に入力する。これを受けて、制御回路 2 8 b は、同期検波回路 2 6 b から入力される電圧がゼロになるように、電流駆動回路 2 2 b の出力電流を制御する。その結果、ガスセル 1 4 に封入されたルビジウム (R b) が励起準位を維持するように、半導体レーザー [R b] のレーザー光の波長がロックされる。

40

【 0 0 2 6 】

以上、波長制御部 2 0 a , 2 0 b について説明したので、続いて、周波数制御部 3 0 a

50

、30bについて説明する。

【0027】

まず、周波数制御部30aについて説明する。周波数制御部30aは、電圧制御発振器32aと、周波数シンセサイザ33a（以下、周波数シンセサイザ[Cs]という場合がある）と、低周波発振器34aと、同期検波回路35aと、制御回路36aを含んで構成されている。

【0028】

電圧制御発振器32aは、制御回路36aから印加される制御電圧に応じて出力周波数が可変制御される電圧制御型の発振器であり、本実施形態では、電圧制御発振器32aの発振信号が、原子発振器100の基準周波数信号（例えば、10MHz）として外部に出力されるとともに、周波数シンセサイザ33aに基準信号として入力されるようになっている。なお、本実施形態は、電圧制御発振器32aの源振となる振動子を限定するものではなく、電圧制御発振器32aは、水晶発振器であっても良いし、MEMS発振器（シリコン発振器）であっても良い。

【0029】

一方、周波数シンセサイザ33aは、セシウム（Cs）のCPT共鳴に必要な±1次のサイドバンド光を生じさせるために、半導体レーザー[Cs]の駆動電流にFM変調を施すための高周波信号（RF信号）を合成するPLLシンセサイザであり、より具体的には、出力周波数を1Hz以下の分解能で制御することが可能なフラクショナルNPLLシンセサイザである。周波数シンセサイザ33aは、電圧制御発振器32aから入力される基準信号を設定された逡倍率で逡倍して、セシウム（Cs）の共鳴周波数の1/2に相当する周波数を持つRF信号を合成する。そして、周波数シンセサイザ33aは、合成したRF信号をバイアスT40aとコンピュータ50の双方に同時に出力する。

【0030】

ここで、周波数シンセサイザ33aの逡倍率を決定するフラクショナルNPLLのパラメータ（具体的には、分周比）のデフォルト値は、ガスセル14に封入されたセシウム（Cs）の共鳴周波数のデフォルト値を F_{cs} とすると、 $1/2 F_{cs}$ を原子発振器100が出力する基準周波数信号の目標周波数で除してなる逡倍率が実現されるように設定される。例えば、 F_{cs} が9.192651718GHzであり、原子発振器100の目標周波数が10MHzである場合、周波数シンセサイザ33aが実現すべき逡倍率は、 $(1/2 F_{cs}) / 10\text{MHz} = 459.6325859$ であるので、この逡倍率（=459.6325859）を実現する値が周波数シンセサイザ33aのパラメータのデフォルト値として設定される。

【0031】

周波数シンセサイザ33aが合成するRF信号（以下、RF信号[Cs]という場合がある）は、低周波発振器34aの発振周波数で変調され、バイアスT40aに入力される。これにより、電流駆動回路22aから入力される駆動電流に対して、周波数シンセサイザ33aが合成するRF信号の周波数に基づくFM変調と低周波発振器24aの発振周波数に基づくAM変調が同時に施されることになる。

【0032】

一方、同期検波回路35aは、光検出器[Cs]から入力される光検出信号を低周波発振器34aが発振する低周波信号で同期検波し、電圧信号を制御回路36aに出力する。これを受けて、制御回路36aは、同期検波回路35aから入力される電圧がゼロになるように、電圧制御発振器32aに対して制御電圧を印加する。その結果、ガスセル14に封入されたセシウム（Cs）のCPT共鳴が維持されるように、周波数シンセサイザ33aから出力されるRF信号[Cs]の周波数がロックされる。

【0033】

次に、周波数制御部30bについて説明する。周波数制御部30bは、電圧制御発振器32bと、周波数シンセサイザ33b（以下、周波数シンセサイザ[Rb]という場合がある）と、低周波発振器34bと、同期検波回路35bと、制御回路36bを含んで構成さ

10

20

30

40

50

れており、上述した周波数制御部 30 a と同様の機能を果たす。

【0034】

すなわち、電圧制御発振器 32 b が発振する基準信号が周波数シンセサイザ 33 b (フラクショナル N P L L シンセサイザ) に入力され、周波数シンセサイザ 33 b は、入力された基準信号に基づいて、ルビジウム (R b) の共鳴周波数の 1 / 2 に相当する周波数を持つ R F 信号を合成する。そして、周波数シンセサイザ 33 b は、合成した R F 信号をバイアス T 40 b とコンピュータ 50 の双方に同時に出力する。

【0035】

ここで、周波数シンセサイザ 33 b の通倍率を決定するフラクショナル N P L L のパラメータのデフォルト値は、ガスセル 14 に封入されるルビジウム (R b) の共鳴周波数のデフォルト値を F_{Rb} とすると、 $1 / 2 F_{Rb}$ を原子発振器 100 が出力する基準周波数信号の目標周波数で除してなる通倍率が実現されるように設定される。例えば、 F_{Rb} が 6 . 8 3 4 6 9 6 3 6 0 G H z であり、原子発振器 100 の目標周波数が 1 0 M H z である場合、周波数シンセサイザ 33 b が実現すべき通倍率は、 $(1 / 2 F_{Rb}) / 1 0 M H z = 3 4 1 . 7 3 4 8 1 8$ であるので、この通倍率 (= 3 4 1 . 7 3 4 8 1 8) を実現する値が周波数シンセサイザ 33 b のパラメータのデフォルト値として設定される。

10

【0036】

周波数シンセサイザ 33 b が合成する R F 信号 (以下、R F 信号 [R b] という場合がある) は、低周波発振器 24 b の発振周波数で変調され、バイアス T 40 b に入力される。これにより、電流駆動回路 22 b から入力される駆動電流に対して、周波数シンセサイザ 33 b が合成する R F 信号の周波数に基づく F M 変調と低周波発振器 24 b の発振周波数に基づく A M 変調が同時に施されることになる。

20

【0037】

一方、同期検波回路 35 b は、光検出器 [R b] から入力される光検出信号を低周波発振器 34 b が発振する低周波信号で同期検波し、電圧信号を制御回路 36 b に出力する。これを受けて、制御回路 36 b は、同期検波回路 35 b から入力される電圧がゼロになるように、電圧制御発振器 32 b に対して制御電圧を印加する。その結果、ガスセル 14 に封入されたルビジウム (R b) の C P T 共鳴が維持されるように、周波数シンセサイザ 33 b から出力される R F 信号 [R b] の周波数がロックされる。

【0038】

以上、周波数制御部 30 a , 30 b について説明したので、続いて、コンピュータ 50 について説明する。

30

【0039】

原子発振器 100 に搭載されるコンピュータ 50 は、例えば、マイクロコンピューターであり、量子部 10 の温度制御手段 (図示せず) を制御する役割の他、2つの周波数シンセサイザ 33 a、33 b に対して、バッファガスの圧力変動に適応した最適なパラメータを設定する役割を果たす。

【0040】

図 2 (a) は、コンピュータ 50 のハードウェア構成を示す。図 2 (a) に示すように、コンピュータ 50 は、プロセッサ 501 と、後述する所定のプログラムを保存する R O M 502 と、プログラムの実行空間を提供する R A M 503 と、後述する周波数の時系列データなどを記憶する補助記憶手段 504 と、入力信号の A / D 変換ならびに出力信号の D / A 変換を実行するアナログ入出力回路 505 を備えている。

40

【0041】

図 2 (b) は、コンピュータ 50 の機能構成を示す。図 2 (b) に示すように、コンピュータ 50 は、周波数測定部 52 と、周波数比算出部 53 と、バッファガス圧推定部 54 と、共鳴周波数推定部 55 と、通倍率算出部 56 と、通倍率制御部 58 とを含んで構成される。なお、上述した各機能部は、コンピュータ 50 が所定のプログラムを実行することにより実現される。

【0042】

50

周波数測定部 5 2 は、コンピュータ 5 0 に入力される R F 信号 [C s] の周波数（以下、周波数 [C s] という場合がある）と、コンピュータ 5 0 に入力される R F 信号 [R b] の周波数（以下、周波数 [R b] という場合がある）を測定し、測定した周波数 [C s] および周波数 [R b] の時系列データを既知の平滑化手法（例えば、移動平均法）を用いて平滑化して一時記憶に記録する機能部である。

【 0 0 4 3 】

ここで、周波数測定部 5 2 は、コンピュータ 5 0 に入力される 2 つの R F 信号の周波数を共通の時間基準を用いて測定する。例えば、周波数測定部 5 2 は、コンピュータ 5 0 に入力される 2 つの R F 信号のうち、いずれか一方の R F 信号を時間基準として用いて、周波数 [C s] と周波数 [R b] を測定する。例えば、R F 信号 [R b] を時間基準として用いる場合、周波数測定部 5 2 は、コンピュータ 5 0 に入力される R F 信号 [R b] と R F 信号 [C s] のパルス数のカウントを同時に開始した後、R F 信号 [R b] のカウント数がルビジウム (R b) の共鳴周波数に見合った数（例えば、 6.8×10^9 個）に達した時点で 2 つの R F 信号のカウントを同時に終了し、その際に得られた R F 信号 [R b] のカウント数を周波数 [R b] として取得し、R F 信号 [C s] のカウント数を周波数 [C s] として取得する。

10

【 0 0 4 4 】

なお、周波数測定部 5 2 は、別法として、コンピュータ 5 0 の内部クロック信号が定義する時間基準を用いて、既知の方法で周波数 [C s] と周波数 [R b] を測定しても良い。

【 0 0 4 5 】

周波数比算出部 5 3 は、R F 信号 [C s] と R F 信号 [C s] の周波数比を算出する機能部である。

20

【 0 0 4 6 】

バッファガス圧推定部 5 4 は、算出した周波数比に基づいて、ガスセル 1 4 に封入されるバッファガスのガス圧を推定する機能部である。

【 0 0 4 7 】

共鳴周波数推定部 5 5 は、推定したバッファガスのガス圧に基づいて、セシウム (C s) の共鳴周波数とルビジウム (R b) の共鳴周波数を推定する機能部である。

【 0 0 4 8 】

通倍率算出部 5 6 は、推定したセシウム (C s) の共鳴周波数に基づいて、周波数シンセサイザ [C s] に設定する通倍率を算出し、推定したルビジウム (R b) の共鳴周波数に基づいて、周波数シンセサイザ [R b] に設定する通倍率を算出する機能部である。

30

【 0 0 4 9 】

通倍率制御部 5 8 は、算出した通倍率を周波数シンセサイザ [C s] および周波数シンセサイザ [R b] に設定する機能部である。

【 0 0 5 0 】

以上、コンピュータ 5 0 の機能構成について説明してきたが、続いて、上述した各機能部が協働して実行する処理の内容を図 3 に示すフローチャートに基づいて説明する。なお、以下の説明においては、適宜、図 2 を参照するものとする。

【 0 0 5 1 】

まず、ステップ 1 0 1 では、周波数比算出部 5 3 が、一時記憶に記録されている周波数の時系列データから最新の周波数 [C s] と周波数 [R b] を読み出して、周波数比（周波数 [C s] / 周波数 [R b] ）を算出する。

40

【 0 0 5 2 】

続くステップ 1 0 2 では、バッファガス圧推定部 5 4 が、先のステップ 1 0 1 で算出した周波数比（周波数 [C s] / 周波数 [R b] ）に基づいてガスセル 1 4 に封入されたバッファガス圧を推定する。具体的には、周波数比算出部 5 3 が算出した周波数比を所定の推定式に代入して、バッファガス圧の推定値を算出する。ここで、本実施形態が採用するバッファガス圧の推定式について説明する。

【 0 0 5 3 】

50

ガスセル型の原子発振器において、ガスセルに封入された原子の共鳴周波数は、バッファガス圧およびガスセルの温度に依存して変動（シフト）する。ここで、バッファガス圧を P 、ガスセルの温度の変動量を ΔT 、圧力係数を α 、温度係数を δ とすると、原子の共鳴周波数のシフト量は、下記式（1）で表わすことができる。

【0054】

【数1】

$$\Delta\nu = P[\alpha + \delta_1\Delta T + \delta_2(\Delta T)^2 + \dots] \quad (1)$$

【0055】

ここで、ガスセルの温度が常に一定温度に制御されることを前提とすれば、温度係数は、1次の項のみを考慮すれば足りる。したがって、本実施形態の場合、ガスセル14に封入されたセシウム（Cs）の共鳴周波数[ν_{m_Cs}]を下記式（2）で表わすことができ、ガスセル14に封入されたルビジウム（Rb）の共鳴周波数[ν_{m_Rb}]を下記式（3）で表わすことができる。

【0056】

【数2】

$$\nu_{m_Cs} = \nu_{Cs} + \Delta\nu_{Cs} = \nu_{Cs} + P[\alpha_{Cs} + \delta_{Cs1}\Delta T] \quad (2)$$

$$\nu_{m_Rb} = \nu_{Rb} + \Delta\nu_{Rb} = \nu_{Rb} + P[\alpha_{Rb} + \delta_{Rb1}\Delta T] \quad (3)$$

【0057】

なお、上記式（2）において、 ν_{Cs} 、 α_{Cs} および δ_{Cs1} は、それぞれ、セシウム（Cs）の公称周波数、圧力係数および1次の温度係数を示す。また、上記式（3）において、 ν_{Rb} 、 α_{Rb} および δ_{Rb1} は、それぞれ、ルビジウム（Rb）の公称周波数、圧力係数および1次の温度係数を示す。（以下の式において同様。）

【0058】

上記式（2）および（3）から、ガスセル14に封入された、セシウム（Cs）の共鳴周波数[ν_{m_Cs}]とルビジウム（Rb）の共鳴周波数[ν_{m_Rb}]の比（ ν_{m_Cs} / ν_{m_Rb} ）は、下記式（4）で表わすことができる。

【0059】

【数3】

$$\frac{\nu_{m_Cs}}{\nu_{m_Rb}} = \frac{\nu_{Cs} + P\alpha_{Cs} + P\Delta T\delta_{Cs1}}{\nu_{Rb} + P\alpha_{Rb} + P\Delta T\delta_{Rb1}} \approx \frac{\nu_{Cs} + P\alpha_{Cs}}{\nu_{Rb} + P\alpha_{Rb}} \quad (4)$$

【0060】

ここで、ガスセル14の温度が常に一定温度に制御されることを前提として、上記式（4）における ΔT をゼロとし、上記式（4）をバッファガス圧[P]について整理すると、下記式（5）が導出される。

【0061】

【数4】

$$P = \frac{\nu_{Cs} - \frac{\nu_{m_Cs}}{\nu_{m_Rb}}\nu_{Rb}}{\frac{\nu_{m_Cs}}{\nu_{m_Rb}}\alpha_{Rb} - \alpha_{Cs}} \quad (5)$$

【0062】

10

20

30

40

50

最後に、上記式(5)における周波数比($r_m = \omega_{Cs} / \omega_{Rb}$)を r_m に置き換えることによって、下記式(6)がバッファガス圧[P]の推定式として導出される。

【0063】

【数5】

$$P = \frac{V_{Cs} - r_m V_{Rb}}{r_m \alpha_{Rb} - \alpha_{Cs}} \quad (6)$$

【0064】

そして、ステップ102では、バッファガス圧推定部54が、先のステップ101で算出した周波数比 $r_m (= \omega_{Cs} / \omega_{Rb})$ を上記式(6)に代入してガスセル14のバッファガス圧[P]の推定値を算出する。

10

【0065】

続くステップ103では、共鳴周波数推定部55が、先のステップ102で推定したバッファガス圧[P]に基づいて、セシウム(Cs)の共鳴周波数 $[\omega_{Cs}]$ とルビジウム(Rb)の共鳴周波数 $[\omega_{Rb}]$ を推定する。具体的には、バッファガス圧[P]を先に挙げた式(1)および式(2)に代入することによって、共鳴周波数 $[\omega_{Cs}]$ および共鳴周波数 $[\omega_{Rb}]$ の推定値を算出する。

【0066】

続くステップ104では、逡倍率算出部56が、先のステップ103で算出した共鳴周波数 $[\omega_{Cs}]$ に基づいて周波数シンセサイザ[Cs]に設定すべき逡倍率 $[M_{Cs}]$ を算出するとともに、先のステップ103で算出した共鳴周波数 $[\omega_{Rb}]$ に基づいて周波数シンセサイザ[Rb]に設定すべき逡倍率 $[M_{Rb}]$ を算出する。具体的には、算出した共鳴周波数 $[\omega_{Cs}]$ の1/2を原子発振器100の目標周波数で除した値を逡倍率 $[M_{Cs}]$ として算出し、算出した共鳴周波数 $[\omega_{Rb}]$ の1/2を原子発振器100の目標周波数で除した値を逡倍率 $[M_{Rb}]$ として算出する。

20

【0067】

続くステップ105では、逡倍率制御部58が、周波数シンセサイザ[Cs]に先のステップ104で算出した逡倍率 $[M_{Cs}]$ を設定し、周波数シンセサイザ[Rb]に先のステップ104で算出した逡倍率 $[M_{Rb}]$ を設定する。具体的には、逡倍率制御部58は、逡倍率 $[M_{Cs}]$ を実現するパラメータ $[Pr_{Cs}]$ を算出した後、パラメータ $[Pr_{Cs}]$ を設定するための逡倍率制御信号を生成して周波数シンセサイザ[Cs]に送信する。そして、逡倍率制御信号を受信した周波数シンセサイザ[Cs]がパラメータを更新する。また、逡倍率制御部58は、逡倍率 $[M_{Rb}]$ を実現するパラメータ $[Pr_{Rb}]$ を算出した後、パラメータ $[Pr_{Rb}]$ を設定するための逡倍率制御信号を生成して周波数シンセサイザ[Rb]に送信する。そして、逡倍率制御信号を受信した周波数シンセサイザ[Rb]がパラメータを更新する。

30

【0068】

本実施形態では、コンピュータ50が、上述した一連の処理(ステップ101~105)を所定のタイミングで繰り返し実行する。これにより、バッファガス圧の変動の影響が最小化され、結果として、原子発振器100の発振周波数が長期に渡って安定化する。

40

【0069】

以上、本発明について実施形態をもって説明してきたが、本発明は上述した実施形態に限定されるものではなく、当業者が推考しうる実施態様の範囲内において、本発明の作用・効果を奏する限り、本発明の範囲に含まれるものである。

【0070】

上述した実施形態の各機能は、C、C++、C#、Java(登録商標)などで記述された装置実行可能なプログラムにより実現でき、本実施形態のプログラムは、ハードディスク装置、CD-ROM、MO、DVD、フレキシブルディスク、EEPROM、EPROMなどの装置可読な記録媒体に格納して頒布することができ、また他装置が可能な形式

50

でネットワークを介して伝送することができる。

【実施例】

【0071】

以下の手順で本発明の原子発振器の実証実験を行った。

【0072】

図4は、本実験で用いた実験装置を示す。本実験では、MEMS加工により作製した光路長2mmのセルをガスセルとし、2種類のアルカリ金属原子として、 ^{133}Cs およびナチュラルRbを封入し、バッファガスとしてNeを封入した。なお、実験期間中、ガスセル温度を90に維持するとともに、量子部の周辺温度をモニタした。

【0073】

本実験では、Cs用の励起光源として出力波長895nm (Cs-D₁線)のVCSELを用意し、Rb用の励起光源として出力波長795nm (Rb-D₁線)のVCSELを用意した。また、各VCSELの駆動電流にRFを重畳させてAM/FM変調を施すことにより、CPT共鳴の観測に必要な励起光である±1次のサイドバンドを生成した。実験装置の光学系は、各VCSELから出射する2つのレーザ光が、コリメートレンズを経て平行光とされ、NDフィルタおよび1/4波長板を経て+偏光となった後、2つのレーザ光がハーフミラーで重なってガスセルの同一部分を透過するように構成した。一方、ガスセルを透過する光は、Cs用のバンドパスフィルタ(890±5nm)とRb用バンドパスフィルタ(800±5nm)を用いて分離し、それぞれを専用のフォトダイオードで検出した。

【0074】

本実験では、レーザ波長の安定化とCPT共鳴の中心周波数の維持のためにロックインアンプを用いてフィードバックループを構成した。また、周波数の測定にあっては、VCSELにRFを重畳するRFジェネレータに対して、セシウム一次標準器をリファレンスとして接続した上で、PCを用いてRFジェネレータの出力信号の周波数の制御と記録を行った。

【0075】

図5は、同時に観測されたCsと ^{87}Rb のCPT共鳴線を示す。図5に示す結果から、1つのガスセルに2種類のアルカリ金属原子(Cs、 ^{87}Rb)を一緒に封入しても、各原子のCPT共鳴を問題なく観測できることが確認された。

【0076】

一方、図6(a)は、Csの共鳴周波数の経時変化を示し、図6(b)は、Csの共鳴周波数の周波数変動量の経時変化を示す。また、図6(c)は、 ^{87}Rb の共鳴周波数の経時変化を示し、図6(d)は、 ^{87}Rb の共鳴周波数の周波数変動量の経時変化を示す。なお、図6(b)および(d)は、量子部の周辺温度の測定結果に基づいて温度補正を施した結果である。図6に示す結果から、2種類のアルカリ金属原子(Cs、 ^{87}Rb)において、バッファガスシフトの挙動が異なることが確認された。

【符号の説明】

【0077】

10...量子部、12a, 12b...半導体レーザー、13...ビームスプリッタ、14...ガスセル、15...ビームスプリッタ、16a, 16b...バンドパスフィルタ、18a, 18b...光検出器、20a, 20b...波長制御部、22a, 22b...電流駆動回路、24a, 24b...低周波発振器、26a, 26b...同期検波回路、28a, 28b...制御回路、30a, 30b...周波数制御部、32a, 32b...電圧制御発振器、33a, 33b...周波数シンセサイザ、34a, 34b...低周波発振器、35a, 35b...同期検波回路、36a, 36b...制御回路、40a, 40b...バイアスT、50...コンピュータ、52...周波数測定部、53...周波数比算出部、54...バッファガス圧推定部、55...共鳴周波数推定部、56...逓倍率算出部、58...逓倍率制御部、100...原子発振器、501...プロセッサ、502...ROM、503...RAM、504...補助記憶手段、505...アナログ入出力回路

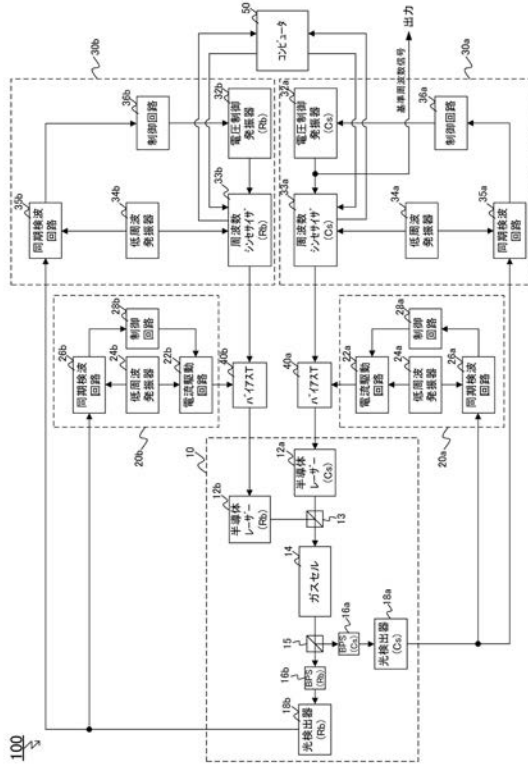
10

20

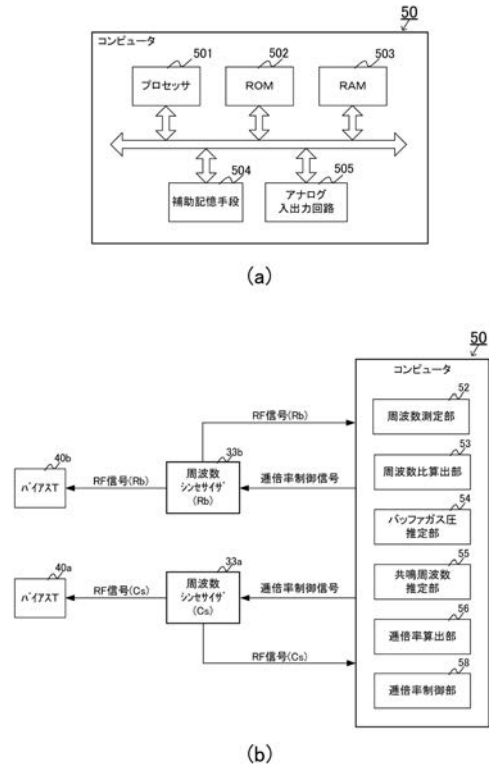
30

40

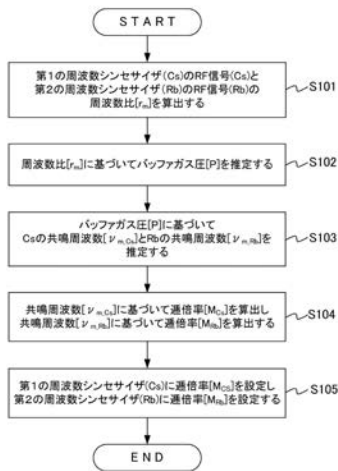
【図1】



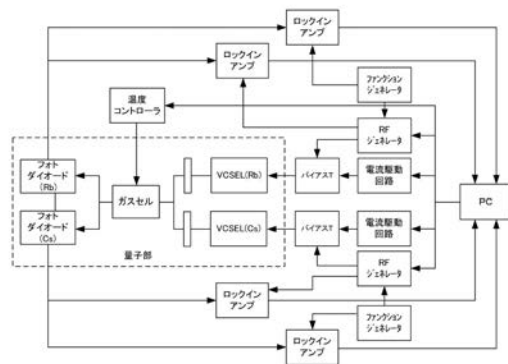
【図2】



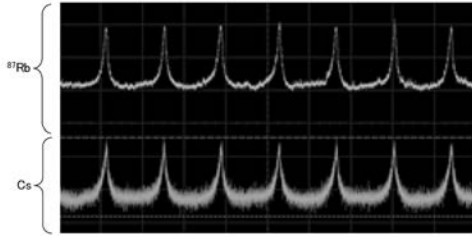
【図3】



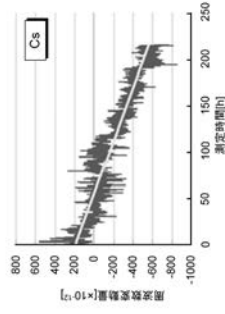
【図4】



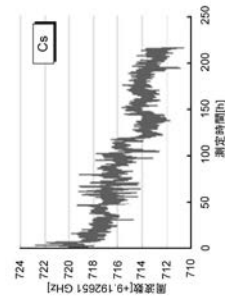
【 図 5 】



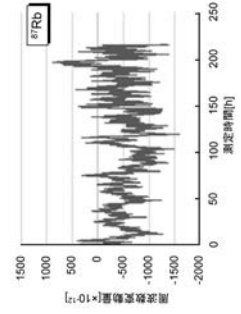
【 図 6 】



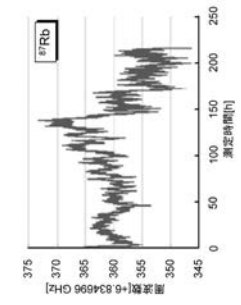
(a)



(b)



(c)



(d)