

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4720635号
(P4720635)

(45) 発行日 平成23年7月13日 (2011.7.13)

(24) 登録日 平成23年4月15日 (2011.4.15)

(51) Int.Cl.

H03L 7/26 (2006.01)

F I

H03L 7/26

請求項の数 9 (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2006-164360 (P2006-164360)
 (22) 出願日 平成18年6月14日 (2006.6.14)
 (65) 公開番号 特開2007-336136 (P2007-336136A)
 (43) 公開日 平成19年12月27日 (2007.12.27)
 審査請求日 平成21年5月8日 (2009.5.8)

(73) 特許権者 000003104
 エプソントヨコム株式会社
 東京都日野市日野4 2 1-8
 (74) 代理人 100095728
 弁理士 上柳 雅誉
 (74) 代理人 100127661
 弁理士 宮坂 一彦
 (72) 発明者 内山 敏一
 神奈川県川崎市幸区塚越三丁目4 8 4 番地
 エプソントヨコム株
 式会社内
 審査官 上田 智志

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子発振器、受動形原子発振器、原子発振器の温度制御方法及び受動形原子発振器の温度制御方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

コヒーレント光としての波長が異なる2種類の励起光を入射したときの原子干渉効果による光吸収特性を利用して発振周波数を制御する原子発振器であって、

ガス状の金属原子を封入したガスセルと、該ガスセルを保持するガスセル保持部材と、該ガスセル保持部材を加熱する加熱手段と、前記ガスセル中の金属原子を励起するコヒーレント光源と、前記ガスセルを透過した励起光を検出する光検出手段と、該光検出手段により検出された励起光の強度に基づいて前記加熱手段を制御する温度制御手段と、を備えたことを特徴とする原子発振器。

【請求項 2】

前記温度制御手段は、前記原子発振器の原子干渉共振が停止したときの前記ガスセルを透過した光の強度を記憶する光強度記憶手段を備え、

前記光強度記憶手段に記憶された光の強度と、原子干渉共振が停止したときのガスセルを透過した光の強度とを比較し、該原子干渉共振が停止したときのガスセルを透過した光の強度が、前記光強度記憶手段に記憶された光の強度と一致するように前記加熱手段を制御す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】

前記コヒーレント光源、ガスセル保持部材及び光検出手段を収納する熱筒を備え、該熱筒に前記加熱手段を配設したことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の原子発振器。

【請求項 4】

10

20

前記コヒーレント光は、レーザ光であ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】

前記ガス状の金属原子は、ルビジウム、セシウムであることを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れか一項に記載の原子発振器。

【請求項 6】

ルビジウム光源からの入射光の波長に応じたガスセルの光吸収特性を利用して発振周波数を制御するルビジウム原子発振器であって、

ルビジウム原子を封入したガスセルと、該ガスセルを保持するガスセル保持部材と、前記ガスセル中のルビジウム原子を励起するルビジウムランプと、前記ガスセル保持部材を加熱する加熱手段と、前記ガスセルを透過した光を検出する光検出手段と、該光検出手段により検出された光の強度に基づいて前記加熱手段を制御する温度制御手段と、を備えたことを特徴とする受動形原子発振器。

10

【請求項 7】

前記温度制御手段は、前記ガスセルの光吸収が最大になったときの前記ガスセルを透過した光の強度を記憶する光強度記憶手段を備え、

前記光強度記憶手段に記憶された光の強度と、前記ガスセルを透過した光の強度とを比較し、該ガスセルを透過した光の強度が前記光強度記憶手段に記憶された光の強度と一致するように前記加熱手段を制御することを特徴とする請求項 6 に記載の受動形原子発振器。

20

【請求項 8】

コヒーレント光としての 2 種類の波長を有する励起光を入射したときの量子干渉効果によるガスセルの光吸収特性を利用して発振周波数を制御する原子発振器の温度制御方法であって、

前記原子発振器が量子干渉共振を停止したときの前記励起光の共鳴周波数における光の強度を記憶する光強度記憶ステップと、

前記光強度記憶ステップにより記憶された光の強度と、原子干渉共振が停止したときの前記励起光の共鳴周波数における光の強度とを比較し、該光の強度が前記光強度記憶ステップにより記憶された光の強度と一致するように前記ガスセルを加熱する温度制御ステップと、を備えたことを特徴とする原子発振器の温度制御方法。

30

【請求項 9】

ルビジウム光源からの入射光の波長に応じたガスセルの光吸収特性を利用して発振周波数を制御するルビジウム原子発振器の温度制御方法であって、

前記ガスセルの光吸収が最大になったときの前記ガスセルから出力された光の強度を記憶する光強度記憶ステップと、

前記光強度記憶ステップにより記憶された光の強度と、前記ガスセルから出力された光の強度とを比較し、該ガスセルから出力された光の強度が前記光強度記憶ステップにより記憶された光の強度と一致するように前記ガスセルを加熱する温度制御ステップと、を備えたことを特徴とする受動形原子発振器の温度制御方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子発振器及び原子発振器の温度制御方法に関し、さらに詳しくは、ガスセルの温度制御を量子レベルで制御する原子発振器の温度制御方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

ルビジウム、セシウム等アルカリ金属を用いた原子発振器は、原子のエネルギー遷移を利用する際に、干渉ガスと共に原子を蒸気状態に保っている。そのため、原子を気密封入したガスセルを高温に保って動作させている。原子発振器の動作原理は、古典的な二重共鳴法と、レーザ光を利用した原子干渉（以下 C P T (Coherent Population Trapping)）と記

50

す)を利用する方法に大別されるが、両者共に物理パッケージに入射した光が、原子蒸気にどれだけ吸収されたかを反対側に設けられた検出器で検出することにより、原子共鳴を検知して制御系にて水晶発振器などの基準信号をこの原子共鳴に同期させて出力を得ている。

【 0 0 0 3 】

その際、ガスセル中の原子密度が変化すると、吸収の度合いが変化して原子共鳴の検知に誤差を生じたり、検知できなくなるといった問題がある。そのため、実用化されている原子発振器のガスセルは、蒸気を一定の温度に保つような温度制御系を備えている。図 8 は従来の一般的な原子発振器のガスセル周辺部の構成を示す図である。この温度制御系 1 5 0 はガスセル 8 3 の側壁等にサーミスタや白金抵抗などの温度センサ 8 9 を設け、その検出温度が一定となる様にヒータ 8 7 を制御する制御系 8 8 により構成されている。この手法は温度センサ 8 9 の位置の温度を一定に保つ手法であり、通常、温度センサ 8 9 とガスセル 8 3 内の原子には微小ながら物理的な距離があるため、原子蒸気と温度センサ 8 9 の位置の温度差が残留するといった問題がある。

10

【 0 0 0 4 】

またガスセルは金属のほか、ガラスやシリコン等の材質で構成されているが、光路にあたる部分は透明な材質等で光が透過する必要があるが、光路でない部分はその制約はない。また、この手法ではガスセルの熱伝導が良くないとパッケージの温度分布がばらつき、やはり共鳴精度を劣化させる一因となっている。例えば、熱伝導を優先した金属を主材とするガスセルでも、光路にあたる部分にはガラス等の透明窓を設けなければならず、ガスセル自体の温度分布を劣化させる一因となる。また、ガスセル全体を透明なガラスで構成した場合でも、センサや加熱のためのヒータは光路を妨げない位置に配置する必要があり、光路用の窓部分とは多少の温度差を生じることになる。尚、N I S T (米国)の C P T 方式の原子発振器では、この問題を解消するために I T O (酸化インジウム)を窓部に微細加工するヒータが研究されている。

20

【 0 0 0 5 】

以上の手法は、何れもガスセルの筐体温度を一定に保つ手法であるが、本来の目的である原子蒸気の温度を一定に保つこととは微妙な差がある。従来技術ではセル筐体の温度を高精度に安定化することが可能であるが、その前提として筐体と内部蒸気の温度を同一と見なしている。しかし、現実には微小な温度差や蒸気中の温度分布が存在し得るし、量子レベルで考えると蒸気自体、数万以上の原子の集合であるため、それぞれの原子も温度差を持っていると考えるべきである。この微小な温度差はもはや計測も不可能であると考えられるが、原子共鳴や転換遷移の理論から、微小なりとも相応の検出結果をもたらすことは明白である。また、原子共鳴の精度は誤差を持たない理論であるにも拘わらず、原子発振器が高精度とは言え有限の安定度に留まっている一因と考えられる。

30

【 0 0 0 6 】

また、蒸気温度とは別に光源や検出器の性能にも温度特性があるが、それらの特性は原子共鳴よりは温度依存性が弱く、また温度制御されているガスセルの直近に配置されるため、周囲の環境温度変化よりは比較的溫度変化が緩和されることもあり、光源用や検出器用の温度制御は行わないのが一般的となっている。しかしながら、これもまた精度劣化の要因となることは明らかである。

40

【 0 0 0 7 】

特許文献 1 には、制御温度が異なるランプハウス、ガスセルおよび発振回路の温度制御を最小限の部品点数で制御するために、ヒータを最も温度が高いランプハウスに取り付け、そこから発する温度を各接続点に備えた伝熱材を介して各部に伝えるようにしたルビジウム原子発振器について開示されている。

【特許文献 1】特公平 5 - 8 2 0 9 0 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 8 】

50

しかし、特許文献 1 に開示されている従来技術は、伝熱材によりランプハウスの熱を各部に伝えているが、常に一定の温度差に保たれる保証はなく、ガスセルの温度制御が安定的に行えるとはいえないといった問題がある。また、発振回路をキャビティ内に備えているため、信号線が長くなりノイズの影響を受けやすくなるといった問題もある。

【 0 0 0 9 】

本発明は、かかる課題に鑑み、ガスセルの温度を一定に制御するために、CPT共振がないときの共鳴周波数における光検出力値を記憶しておき、温度補正時に記憶した光検出力値になるように温度制御することにより、簡単に且つ正確に量子レベルでの温度制御を可能とした原子発振器を提供することを目的とする。

また他の目的は、温度制御を行う対象物の温度を検知するセンサを不要として、部品点数を削減し、原子発振器の小型化に寄与することである。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 0 】

本発明はかかる課題を解決するために、コヒーレント光としての波長が異なる 2 種類の励起光を入射したときの原子干渉効果による光吸収特性を利用して発振周波数を制御する原子発振器であって、ガス状の金属原子を封入したガスセルと、該ガスセルを保持するガスセル保持部材と、該ガスセル保持部材を加熱する加熱手段と、前記ガスセル中の金属原子を励起するコヒーレント光源と、前記ガスセルを透過した励起光を検出する光検出手段と、該光検出手段により検出された励起光の強度に基づいて前記加熱手段を制御する温度制御手段と、を備えたことを特徴とする。

本発明の原子発振器は、レーザ光などのコヒーレント光の原子干渉を利用したものである。この方式は、2つの基底準位が励起光を受けて、共通の励起準位と励起結合している型準位において、同時に照射される2つの励起光の周波数が正確に基底準位1と基底準位2のエネルギー差に一致すると、型準位系は2つの基底準位の重ね合わせの状態になり、励起準位3への励起が停止する。CPTはこの原理を利用して、2つの励起光の一方或いは両方の波長を変化させたときに、ガスセルでの光吸収が停止する状態を検出して利用するものである。そして、本発明の温度制御は、この原理を利用して、光検出手段により検出された励起光の強度に基づいて加熱手段を制御するものである。これにより、励起光の強度を検出するだけで、ガスセル保持部材の温度を正確に制御することができ、且つ温度検知手段を省略して装置の小型化及びコストダウンを実現することができる。尚、コヒーレント光とは、レーザ光などのような、干渉性を持った光をいう。

【 0 0 1 1 】

また、前記温度制御手段は、前記原子発振器が原子干渉共振を停止したときの前記ガスセルを透過した光の強度を記憶する光強度記憶手段を備え、前記光強度記憶手段に記憶された光の強度と、原子干渉共振が停止したときのガスセルを透過した光の強度とを比較し、該原子干渉共振が停止したときのガスセルを透過した光の強度が、前記光強度記憶手段に記憶された光の強度と一致するように前記加熱手段を制御することを特徴とする。

本発明の温度制御手段は、2種類の励起光の一方を停止して、原子発振器の原子干渉共振を停止すると、光検出手段により検出された励起光の強度と波長の関係が共振時と異なる特性となる。このときのガスセルを透過した光の強度を光強度記憶手段に記憶しておく。そして、ガスセル保持部材の温度補正を行う場合、同じ条件で且つ同じ温度に保たれていれば、記憶した光の強度と同じ値を示すが、異なっていれば異なった値を示す。温度制御手段は、この値が同じになるように加熱手段を制御することにより、量子レベルでガスセル保持部材の温度を補正することができる。

【 0 0 1 2 】

また、前記コヒーレント光源、ガスセル保持部材及び光検出手段を収納する熱筒を備え、該熱筒に前記加熱手段を配設したことを特徴とする。

ガスセル保持部材に加熱手段を備えた場合は、ガスセル保持部材の温度は正確に制御することができるが、高精度の温度維持を原子発振器の性能に寄与させるためには、コヒーレント光源、ガスセル保持部材及び光検出手段を熱筒に収納することが効果的である。

【 0 0 1 3 】

また、前記コヒーレント光は、レーザ光であることを特徴とする。

普通の光は、いろいろな波長が混ざり位相がランダムな光である。これに対して、レーザ光は波長が純粋で（単一で混じり気がなく）位相の揃った光である。このような光の波長や位相の整い具合をコヒーレンスと呼んでいる。時間コヒーレンスは、場所が同じで時間が異なるところの光の波形の整い具合であり、これが良いということは、光が干渉をしやすく干渉色を出しやすいことに対応する。その点ではレーザ光は最適である。

【 0 0 1 4 】

また、前記ガス状の金属原子は、ルビジウム、セシウムであることを特徴とする。

光で励起したルビジウムは原子時計に用いられている。尚、セシウム原子時計に比べ正確さは劣るが、小型で低価格であるため、ルビジウム原子時計は広く利用されている。

【 0 0 1 5 】

また、ルビジウム光源からの入射光の波長に応じたガスセルの光吸収特性を利用して発振周波数を制御するルビジウム原子発振器であって、ルビジウム原子を封入したガスセルと、該ガスセルを保持するガスセル保持部材と、前記ガスセル中のルビジウム原子を励起するルビジウムランプと、前記ガスセル保持部材を加熱する加熱手段と、前記ガスセルを透過した光を検出する光検出手段と、該光検出手段により検出された光の強度に基づいて前記加熱手段を制御する温度制御手段と、を備えたことを特徴とする。

ルビジウム原子発振器は、単一の光源により片方の基底準位の原子を励起させ、他方の基底準位の原子をマイクロ波による誘導放出で励起対象の基底準位に至らしめる共振法であり、マイクロ波の周波数を共振周波数付近で掃引しながら検出器で吸収の程度を監視し、吸収が最大となったときの波長に水晶発振器等を同期させる方式である。例えばこの方法でも、ある程度温度が一致した状態から最大吸収の絶対値が一致する様な温度制御を施せば、原子数や原子状態が再現したことになり、つまりはガスセル内の原子が同一温度に至ったと判断できる。

【 0 0 1 6 】

また、前記温度制御手段は、前記ルビジウム光源からの入射光の波長に応じたガスセルの光吸収が最大になったときの前記ガスセルを透過した光の強度を記憶する光強度記憶手段を備え、前記光強度記憶手段に記憶された光の強度と、前記ガスセルを透過した光の強度とを比較し、該ガスセルを透過した光の強度が前記光強度記憶手段に記憶された光の強度と一致するように前記加熱手段を制御することを特徴とする。

本発明の温度制御手段は、ルビジウム光源からの入射光の波長に応じたガスセルの光吸収が最大になったときの前記ガスセルを透過した光の強度を光強度記憶手段に記憶しておく。そして、ガスセル保持部材の温度補正を行う場合、同じ温度に保たれていれば、記憶した光の強度と同じ値を示すが、異なっていれば異なった値を示す。温度制御手段は、この値が同じになるように加熱手段を制御することにより、量子レベルでガスセル保持部材の温度を補正することができる。

【 0 0 1 7 】

また、コヒーレント光としての2種類の波長を有する励起光を入射したときの量子干渉効果によるガスセルの光吸収特性を利用して発振周波数を制御する原子発振器の温度制御方法であって、前記原子発振器が量子干渉共振を停止したときの前記励起光の共鳴周波数における光の強度を記憶する光強度記憶ステップと、該光強度記憶ステップにより記憶された光の強度と、原子干渉共振が停止したときの前記励起光の共鳴周波数における光の強度とを比較し、該光の強度が前記光強度記憶ステップにより記憶された光の強度と一致するように前記ガスセルを加熱する温度制御ステップと、を備えたことを特徴とする。

本発明は上記発明と同様の作用効果を奏する。

【 0 0 1 8 】

また、ルビジウム光源からの入射光の波長に応じたガスセルの光吸収特性を利用して発振周波数を制御するルビジウム原子発振器の温度制御方法であって、前記ガスセルの光吸収が最大になったときの前記ガスセルから出力された光の強度を記憶する光強度記憶ステ

10

20

30

40

50

ップと、前記光強度記憶ステップにより記憶された光の強度と、前記ガスセルから出力された光の強度とを比較し、該ガスセルから出力された光の強度が前記光強度記憶ステップにより記憶された光の強度と一致するように前記ガスセルを加熱する温度制御ステップと、を備えたことを特徴とする。

本発明は上記発明と同様の作用効果を奏する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0019】

以下、本発明を図に示した実施形態を用いて詳細に説明する。但し、この実施形態に記載される構成要素、種類、組み合わせ、形状、その相対配置などは特定の記載がない限り、この発明の範囲をそのみに限定する主旨ではなく単なる説明例に過ぎない。

図1は本発明の第1の実施形態に係る原子発振器の光学系の要部構成図である。この光学系110は、ガス状の金属原子を封入したガスセル3aと、ガスセル3aを保持するガスセル保持部材3と、ガスセル保持部材3を加熱するヒータ（加熱手段）7と、ガスセル3a中の金属原子を励起するコヒーレント光源1と、ガスセル3aを透過した光4を検出する光検出器（光検出手段）5と、光検出器5により検出された光4の強度に基づいてヒータ7を制御する温度制御部（温度制御手段）8と、を備えて構成されている。尚、ガス状の金属原子としては、ルビジウム、セシウム等が挙げられる。

【0020】

この光学系110は、レーザ光などのコヒーレント光の原子干渉を利用したものである。この方式は、2つの基底準位が励起光を受けて、共通の励起準位と励起結合している型準位において、同時に照射される2つの励起光の周波数が正確に基底準位1と基底準位2のエネルギー差に一致すると、型準位系は2つの基底準位の重ね合わせの状態になり、励起準位3への励起が停止する（詳細は図3を参照して説明する）。

CPTはこの原理を利用して、2つの励起光の一方或いは両方の波長を変化させたときに、ガスセル3aでの光吸収が停止する状態を検出して利用するものである。そして、本実施形態の温度制御は、この原理を利用して、光検出器5により検出された光4の強度に基づいてヒータ7を制御するものである。これにより、光4の強度を検出するだけで、ガスセル保持部材3の温度を正確に制御することができ、且つ温度検知手段を省略して装置の小型化及びコストダウンを実現することができる。尚、コヒーレント光とは、レーザ光などのような干渉性を持った光をいう。

【0021】

また、本実施形態の温度制御部8は、2種類の励起光の一方を停止して、原子発振器の原子干渉共振を停止すると、光検出器5により検出された光4の強度と波長の関係が共振時と異なる特性となる（詳細は図4を参照して説明する）。このときの光4の共鳴周波数における光の強度を図示しない光強度記憶手段に記憶しておく。そして、ガスセル保持部材3の温度補正を行う場合、同じ温度に保たれていれば、記憶した光の強度と同じ値を示すが、異なっていれば異なった値を示す。温度制御部8は、この値が同じになるようにヒータ7を制御することにより、量子レベルでガスセル保持部材3の温度を補正することができる。更に、CPT共鳴が生じたままの状態でも同一条件で光強度が等しくなると言うことは温度が一致していることに変わりはなく、求める精度や検出精度によっては励起光1、2は必ずしも停止させなくても良い。

【0022】

図2は本発明の第2の実施形態に係る原子発振器の光学系の要部構成図である。同じ構成要素には図1と同じ参照番号を付して説明する。この光学系120が図1の光学系110と異なる点は、コヒーレント光源1、ガスセル保持部材3及び光検出器5を熱筒10内に収納し、この熱筒10の適所にヒータ7を配設した点である。

即ち、ガスセル保持部材3にヒータ7を備えた場合は、ガスセル保持部材3の温度は正確に制御することができるが、高精度の温度維持を原子発振器の性能に寄与させるためには、コヒーレント光源1、ガスセル保持部材3及び光検出器5を熱筒10に収納することが効果的である。これにより、コヒーレント光源1と光検出器5の温度特性はガスセル保

10

20

30

40

50

持部材 3 と共に安定化される。また熱筒 10 は、熱伝導の良い金属材料で熱容量を大きくする事によりコヒーレント光源 1、ガスセル保持部材 3 及び光検出器 5 の温度差も抑えられる。尚、図 8 の手法に比べて、図 2 の手法はヒータ 7 に要する消費電流が大きくなる欠点があるが、コヒーレント光源 1 が従来のランプから半導体レーザ光源になったり、光検出器 5 が太陽電池からフォトダイオードに変わりつつあり、関連部品の小型化により全体の熱容量が下がることにより、その差は狭まりつつあると言える。

【0023】

図 3 は C P T 方式による原子の型準位系を説明する図である。原子発振器に用いられるルビジウムやセシウムの基底準位は、電子スピンの方向により 2 種類の基底準位に分かれている。これらの基底準位の原子は光を吸収して電子の軌道が変化し、より高い準位へ励起する。また、図 3 の様に 2 つの基底準位が光を受けて、共通の励起準位と励起結合している状態を型準位と言う。図 3 において、基底準位 1 (23) と基底準位 2 (24) は準位のエネルギーが若干異なるため、励起光もそれぞれ励起光 1 (20) と励起光 2 (22) と波長が若干異なる。同時に照射される励起光 1 (20) と励起光 2 (22) の周波数差 (波長の差) が正確に基底準位 1 (23) と基底準位 2 (24) のエネルギー差に一致すると、図 3 の型準位系は 2 つの基底準位の重ね合わせ状態になり、励起準位 21 への励起が停止する。

C P T はこの原理を利用して、励起光 1 (20) と励起光 2 (22) のどちらかまたは両方の波長を変化させたときに、ガスセル保持部材 3 での光吸収 (つまり励起準位 21 への転換) が停止する状態を検出、利用する方式である。

【0024】

さて、図 1、図 2 の実施形態は量子応答を温度情報として利用している。即ち、上記 C P T 現象は、型準位系に 2 波長の光が入射したときに生じる量子干渉である。例えば、ある瞬間において、2 波長のうちどちらかが停止した場合、型準位系の C P T 共振は消失するが、片方の光による励起が発生する。例えば、図 3 の励起光 2 (22) が停止した場合、基底準位 2 (24) にある原子は励起せずそのまま基底状態に留まるか、或いは励起光 1 (20) のスペクトルが鋭利でなく、基底準位 2 (24) と励起準位間のラビ周波数 (共鳴周波数) 相当の成分を含んでいた場合は、多少の励起をする程度に留まる。一方、基底準位 1 (23) と励起準位 21 のラビ周波数に相当する励起光 1 (20) の照射があれば、基底準位 1 (23) の原子は励起準位 21 に励起する。これは、励起光 1 (20) と励起光 2 (22) の停止が逆でも同じことが言える。尚、ラビ周波数とは、原子核と電子間の磁気相互作用の強さに応じてわずかに異なるエネルギー準位が生じるが、この間の遷移に対応する周波数をいう。

【0025】

図 4 は C P T が成立しているときと、励起光 2 が停止した時の検出器出力例を示す図である。縦軸は光検出器 5 の出力、横軸は励起光 1 (20) の波長を表す。C P T 共振時 (破線 30) が上述の様に基底準位 1 (23) と基底準位 2 (24) の原子が重ね合わせの状態にトラップされるため、ガスセル 3 a 中の原子は、励起光 1 (20)、励起光 2 (22) の吸収が行われず、あたかもガスセル 3 a 内が透明に近づいたようになり、励起光 1 (20) の波長が、基底準位 1 (23) と励起準位 21 のラビ周波数 31 になる波長をピークとして、光検出器 5 の検出光量は最高となる。尚、C P T 共振の幅が鋭利であるのに対して、一般に半導体レーザ等による励起光のスペクトルがブロードであるため、吸収の傾斜は C P T 共振に比べて遙かにブロードになる。

またガスセル 3 a 内の原子数は通常数万或いはそれ以上の大量の原子数であり、励起光のビーム径はガスセル 3 a の一部 (通常中心部) のみ通過することと、ルビジウムやセシウムでは励起準位の原子寿命が短く、自然放出により再び基底準位 1 (23) と基底準位 2 (24) に短時間で復帰することから、図 4 の特性は時間経過で変動する事はない。本実施形態では、この特徴を温度検出に利用するものである。

【0026】

いま、ガスセル 3 a が高温下で C P T 共振している状態で、例えば励起光 2 (22) を

停止させるか、或いは励起光 2 (2 2) のスペクトル成分を基底準位 2 (2 4) と励起準位 2 1 のラビ周波数から著しく離れた場合、光検出器 5 には図 4 の実線 3 3 に相当する光量 V B が検出される。この時の励起光 1 (2 0) の波長と全く同じ波長を後に再現した場合、ガスセル 3 a 内の温度が変動していると蒸気中の原子数が異なるため、検出光量が例えば実線 3 2 の V A や実線 3 4 の V C のように異なってしまう。そこで、温度制御部 8 により検出光量が同一となる様に調整を行うと、同一波長、同一光量で、検出光量も同じ状態に復帰したとき、ガスセル 3 a 内の原子数が同一になった事を意味し、結果的に同一温度に復帰した事になる。これにより、ガスセル 3 a の温度制御を相対的に高精度で行う事が可能となる。尚、初期の温度設定は、調整時に波長や光源の輝度をプリセットする方法が有効である。また、図 2 にある熱筒 1 0 は直接温度計測のために動作することはないので省略してもよいが、高精度の温度維持を原子発振器の性能に寄与させるためには、より効果的な温度維持方法と言える。

10

【 0 0 2 7 】

この例に示す、励起光 2 (2 2) を停止した状態では、C P T 共振は消失するが、原子発振器は高精度の水晶発振器を原子共鳴に同期補正するものであり、 $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-13}$ 程度の高精度な周波数補正は数時間以上の間隔で制御するのが一般的であり、例えば数分に一度の割合で C P T 共振を止めて温度補正を行い、再び C P T 共振に復帰させる事は、回路構成でも制御のソフトウェアでも十分に現実的である。また、C P T 共振時の波形 3 0 のラビ周波数における光検出器 5 の最大値 P の変動を検出して温度制御することも可能であるが、実際は、この変動値は非常に小さく、検出が困難であるので現実的ではない。

20

【 0 0 2 8 】

図 5 は本発明の第 3 の実施形態に係るルビジウム原子発振器の光学系の要部構成図である。このルビジウム原子発振器 1 0 0 は、ルビジウムランプ (以下、R b ランプと記す) 5 5 を点灯するランプ励振部 5 1 と、ルビジウムガスセル (以下、R b ガスセルと記す) 5 6 中のルビジウム原子を励起する R b ランプ 5 5 と、ルビジウム原子を封入した R b ガスセル 5 6 と、R b ガスセル 5 6 中のルビジウム原子の共振周波数により励振するマイクロ波共振器 5 3 と、マイクロ波共振器 5 3 にマイクロ波を放射する放射用アンテナ 5 4 と、R b ガスセル 5 6 を透過した光の強度を検出するフォトセンサ 5 7 と、A m p 5 9 に現れる低周波振幅変調信号の位相を弁別する位相弁別器 6 0 と、マイクロ波の位相を低周波により変調する低周波位相信号発生器 6 1 と、電圧制御水晶発振器 6 3 の発振信号をマイクロ波に通倍する周波数通倍合成変調部 6 2 と、位相弁別器 6 0 の電圧に基づいて所定の周波数を発振する電圧制御水晶発振器 6 3 と、マイクロ波共振器 5 3 を加熱するヒータ (加熱手段) 6 4 と、フォトセンサ 5 7 により検出されたルビジウム光の強度に基づいてヒータ 6 4 を制御する温度制御部 (温度制御手段) 6 5 と、を備えて構成されている。尚、R b ランプ 5 5、マイクロ波共振器 5 3 及びフォトセンサ 5 7 により構成されるユニットを光マイクロ波ユニット 5 8 と呼ぶ。また、周波数通倍合成変調部 6 2 の出力は放射用アンテナ 5 4 に接続されている。

30

【 0 0 2 9 】

次に、本発明のルビジウム原子発振器の動作については公知であるので、ここでは説明を省略するが、本発明の主たる構成要素であるマイクロ波共振器 5 3 について図 6 を参照して概略を説明する。ルビジウム原子発振器の動作プロセスにおいて、定常状態にあるエネルギー順位 ($F = 1$) より高い順位 ($F = 2$) にある電子を $F = 1$ の順位に落とすためのマイクロ波の存在が原子発振器として動作させるに当たって非常に重要であり、そのマイクロ波の強度を十分高めるためにマイクロ波共振器 5 3 が用いられる。そして、マイクロ波共振器 5 3 内に取り付けられた放射用アンテナ 5 4 から $6.83468 \cdots \text{GHz}$ を送出し、この周波数に同調をとるようにマイクロ波共振器 5 3 は設計されている。

40

【 0 0 3 0 】

このような二重共鳴法は、単一の光源により片方の基底準位の原子を励起させ、他方の基底準位の原子をマイクロ波による誘導放出で励起対象の基底準位に至らしめる共振法で

50

、マイクロ波の周波数を共振周波数付近で掃引しながら検出器で吸収の程度を監視し、吸収が最大となったときの波長に水晶発振器等を同期させる方式である。例えばこの方法でも、ある程度温度が一致した状態から最大吸収の絶対値が一致する様な温度制御を施せば、原子数や原子状態が再現したことになる、つまりは同一温度に至ったと判断できる。

【 0 0 3 1 】

図 7 は本発明のルビジウム原子発振器の温度制御方法を説明する図である。R b ランプ 5 5 からの入射光の波長に応じた光吸収が最大になった励起周波数における光の強度 V_b を温度制御部 6 5 内のメモリ（光強度記憶手段）に記憶する。そして温度制御部 6 5 が、ルビジウム原子を封入したマイクロ波共振器 5 3 の温度補正を行う場合、メモリに記憶された光の強度 V_b と現時点での R b ランプ 5 5 からの入射光の波長に応じた光吸収により得られた光の強度 V_a 又は V_c とを比較し、現時点での光の強度 V_a 又は V_c が、メモリに記憶された光の強度 V_b と一致するようにヒータ 6 4 を制御するものである。

10

【図面の簡単な説明】

【 0 0 3 2 】

【図 1】本発明の第 1 の実施形態に係る原子発振器の光学系の要部構成図である。

【図 2】本発明の第 2 の実施形態に係る原子発振器の光学系の要部構成図である。

【図 3】C P T 方式による原子の型準位系を説明する図である。

【図 4】C P T が成立しているときと、励起光 2 が停止した時の検出器出力例を示す図である。

【図 5】本発明の第 3 の実施形態に係るルビジウム原子発振器の光学系の要部構成図である。

20

【図 6】二重共鳴法の動作原理を説明する図である。

【図 7】本発明のルビジウム原子発振器の温度制御方法を説明する図である。

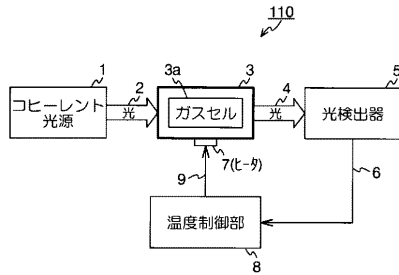
【図 8】従来の一般的な原子発振器のガスセル周辺部の構成を示す図である。

【符号の説明】

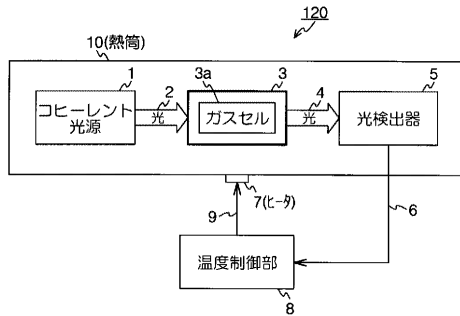
【 0 0 3 3 】

1 コヒーレント光源、2、4 光、3 a ガスセル、3 ガスセル保持部材、5 光検出器、7 ヒータ、8 温度制御部、1 0 熱筒、1 1 0 光学系

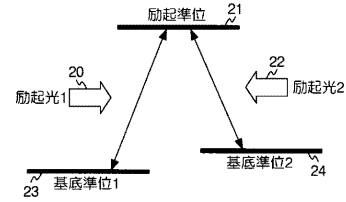
【図 1】



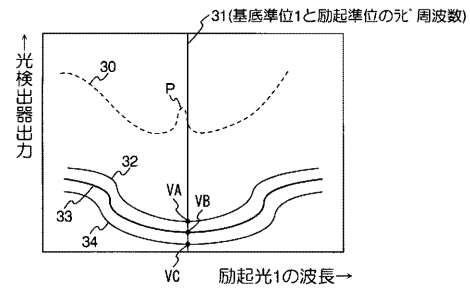
【図 2】



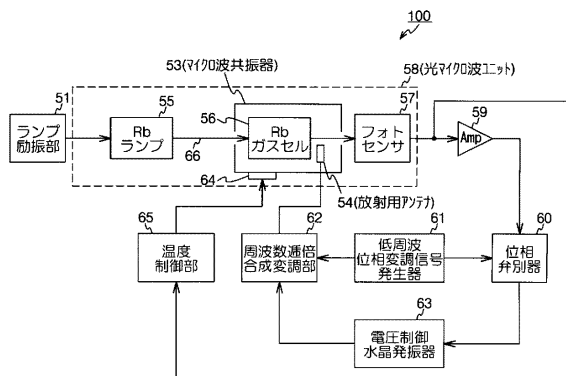
【図 3】



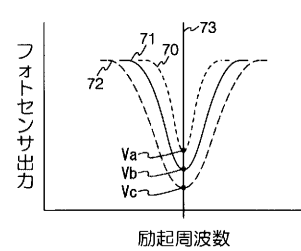
【図 4】



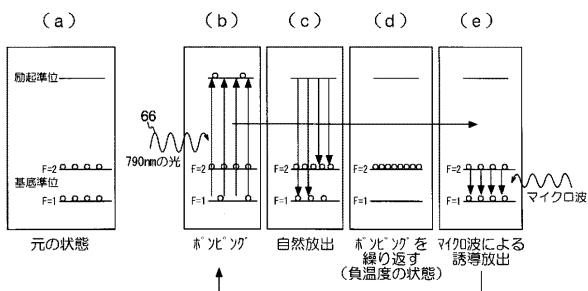
【図 5】



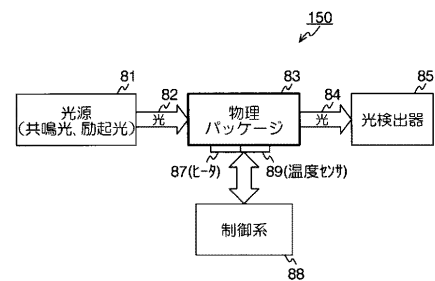
【図 7】



【図 6】



【図 8】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2001-285064(JP,A)

特開平10-284772(JP,A)

特開昭62-257776(JP,A)

特開平06-120584(JP,A)

特開平09-205365(JP,A)

特開昭56-061834(JP,A)

特開2001-156635(JP,A)

特開2002-344314(JP,A)

結城佑、他2名、ルビジウム原子発振器の諸特性、テレビジョン学会全国大会講演予稿集、日本
、社団法人映像情報メディア学会、1970年 9月15日、テレビジョン学会全国大会講演予
稿集(6)、pp.125-126

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H03L 7/26,

H01S 1/00-1/06,

CiNi i