

(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2009-176852

(P2009-176852A)

(43) 公開日 平成21年8月6日(2009.8.6)

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

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2008-12284 (P2008-12284)
 (22) 出願日 平成20年1月23日 (2008. 1. 23)

(71) 出願人 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 100107261
 弁理士 須澤 修
 (74) 代理人 100127661
 弁理士 宮坂 一彦
 (72) 発明者 野村 博
 東京都日野市日野4 2 1-8 エプソント
 ヨコム株式会社内
 Fターム(参考) 5J106 CC10 GG02 KK12 LL10

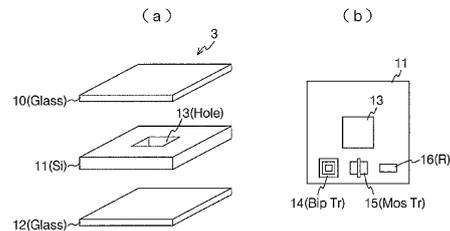
(54) 【発明の名称】 光学系及び原子発振器

(57) 【要約】

【課題】 部品点数を削減してガスセルを小型化すると共に、ガスセルの温度分布を均一にすることができ、且つ光吸収特性の劣化を改善できる原子発振器の光学系を提供する。

【解決手段】 このガスセル3は、少なくとも金属原子を封入するために厚み方向に貫通した開口部13を有するシリコン基板11と、開口部13を封止するガラス(透明部材)10、12と、を有し、図3(b)のようにシリコン基板11に、このシリコン基板11を加熱する発熱素子14、15、16を配置した。尚、図3(b)では、発熱素子としてバイポーラトランジスタ14、MOSトランジスタ15、抵抗16が示されているが、これらの何れか1種類だけで構成しても良く、或いは混在させても構わない。また、シリコン基板11は均一に加熱されることが重要なため、発熱素子はシリコン基板11上の一部に偏ることなく均一な分布となるように配置されるのが好ましい。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

波長が異なるコヒーレント光としての 2 種類の共鳴光を入射したときの量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の光学系であって、

前記共鳴光を出射するコヒーレント光源と、

前記コヒーレント光源の出射側に配置されガス状の金属原子を封入すると共に、該金属原子ガス中に共鳴光を通過させるガスセルと、

前記ガスセルを通過した光を検出する光検出手段と、
を備え、

前記ガスセルは、前記金属原子を封入するために厚み方向に貫通した開口部を有するシリコン基板と、前記開口部の両端を夫々封止する透明部材と、を有し、

前記シリコン基板に該シリコン基板を加熱する発熱素子を配置したことを特徴とする原子発振器の光学系。

10

【請求項 2】

前記シリコン基板に該シリコン基板の温度を検出する温度検出用素子を更に配置したことを特徴とする請求項 1 に記載の原子発振器の光学系。

【請求項 3】

前記温度検出用素子による温度情報に基づいて、前記発熱素子の動作状態を制御する温度制御回路を前記シリコン基板の外部に備え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の光学系。

20

【請求項 4】

前記温度制御回路を前記発熱素子及び前記温度検出用素子と共に前記シリコン基板に配置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の光学系。

【請求項 5】

前記シリコン基板面に均一な分布となるように複数の前記発熱素子を分散配置した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の光学系。

【請求項 6】

複数の前記発熱素子を前記シリコン基板の外周に沿った位置に配置した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の光学系。

【請求項 7】

前記シリコン基板の外周に沿った位置にはパワーの大きな発熱素子を配置し、前記パワーの大きな発熱素子群の内側にはパワーの小さな発熱素子を配置した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の光学系。

30

【請求項 8】

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 に記載の原子発振器の光学系。

【請求項 9】

前記ガス状の金属原子は、ルビジウム、又はセシウムであることを特徴とする請求項 1 に記載の原子発振器の光学系。

【請求項 10】

請求項 1 乃至 9 の何れか一項に記載の光学系を備えたことを特徴とする原子発振器。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子発振器の光学系に関し、さらに詳しくは、光学系を構成するガスセルを加熱する加熱技術に関するものである。

【背景技術】

【0002】

ルビジウム、セシウム等の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、原子をガス状態に保つ必要があるため、原子を気密封入したガスセルを一

50

定の温度に保って動作させている。原子発振器の動作原理は、光とマイクロ波を利用した二重共鳴法と、2種類のレーザ光による量子干渉効果（以下CPT: Coherent Population Trappingと記す）を利用する方法に大別されるが、両者共にガスセルに入射した光が、原子ガス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。

特許文献1には、CPTを利用した原子発振器のガスセル構造について開示されている。上記でも説明したとおり、原子のエネルギー遷移を利用する際に、原子をガス状態に保つ必要があるため、原子を気密封入したガスセルを一定の温度に保って動作させている。図6にはガスセル200を一定の温度に保持するために、キャビティ240の周囲にレイヤ210、220、230を配して、レイヤ210と220を挟むようにヒータ215により加熱してキャビティ240の温度を一定に保持している。

【特許文献1】US2006/0022761A1

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

しかし、特許文献1に開示されている従来の構成では、ガスセルを加熱するために、ヒータ215が必要となり、ガスセル全体が大きくなるといった問題と、ヒータ215に近い部分が過大に加熱されてしまうといった問題およびヒータによる光の吸収損失が生じるといった問題がある。

本発明は、かかる課題に鑑み、ガスセルを構成する基板上に発熱する素子を配置して基板自体を加熱することにより、部品点数を削減してガスセルを小型化すると共に、ガスセルの温度分布を均一にすることができ、且つ光吸収特性の劣化を改善した原子発振器の光学系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】

【0004】

本発明は、上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、以下の形態又は適用例として実現することが可能である。

【0005】

[適用例1]

本発明はかかる課題を解決するために、波長が異なるコヒーレント光としての2種類の共鳴光を入射したときの量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の光学系であって、前記共鳴光を出射するコヒーレント光源と、前記コヒーレント光源の出射側に配置されガス状の金属原子を封入すると共に、該金属原子ガス中に共鳴光を通過させるガスセルと、前記ガスセルを通過した光を検出する光検出手段と、を備え、前記ガスセルは、前記金属原子を封入するために厚み方向に貫通した開口部を有するシリコン基板と、前記開口部の両端を夫々封止する透明部材と、を有し、前記シリコン基板に該シリコン基板を加熱する発熱素子を配置したことを特徴とする。

【0006】

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量子干渉効果を利用したものである。この方式は、2つの基底準位が共鳴光を受けて、共通の励起準位と共鳴結合している3準位系（例えば型準位系）において、同時に照射される2つの共鳴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、3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つの共鳴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、本発明の光学系は、コヒーレント光源から出射した共鳴光はガスセルを通過し、ガスセルから出射した光は光検出手段により検出される。ここで、従来のルビジウム、セシウム等の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、原子をガス状態に保つ必要があるため、原子を気密封入したガスセルを一定の温度に保って動作させている。そのために、ガスセルを一定

10

20

30

40

50

の温度に保持するために、キャビティの周囲にレイヤを配して、レイヤを挟むようにヒータにより加熱してキャビティの温度を一定に保持している。その結果、ガスセルを加熱するために、ヒータが必要となり、ガスセル全体が大きくなるといった問題と、ヒータに近い部分が過大に加熱されてしまうといった問題、および光吸収特性の劣化といった問題がある。そこで本発明では、ガスセルを構成するシリコン基板に発熱する素子を配置してシリコン基板自体を加熱することにより、部品点数を削減してガスセルを小型化すると共に、ガスセルの温度分布を均一にすることができる。

【0007】

[適用例2]

また、前記シリコン基板に該シリコン基板の温度を検出する温度検出用素子を更に配置したことを特徴とする。

10

【0008】

シリコン基板上の温度を一定の値に保持するには、シリコン基板上の温度を検出しなければならない。そこで本発明では、シリコン基板に温度検出用素子を更に配置する。これにより、温度情報をフィードバックしてシリコン基板の温度を一定に制御することができる。

【0009】

[適用例3]

また、前記温度検出用素子による温度情報に基づいて、前記発熱素子の動作状態を制御する温度制御回路を前記シリコン基板の外部に備えたことを特徴とする。

20

【0010】

温度検出用素子からの温度情報は、シリコン基板の温度変化に追従して変化する。従って、温度と温度情報との関係が予めわかっているならば、温度情報からシリコン基板の温度を判断することができる。そこで本発明では、上限の温度に対する温度情報を受信すると、発熱素子を不動作として加熱を停止し、下限の温度に対する温度情報を受信すると、発熱素子を動作させて加熱を開始する温度制御回路、或いは連続動作により温度を一定に保つ温度制御回路等をシリコン基板の外部に備える。これにより、温度制御回路が基板温度の影響を受けずに、且つ制御方法をフレキシブルに変更することができる。

【0011】

[適用例4]

また、前記温度制御回路を前記発熱素子及び前記温度検出用素子と共に前記シリコン基板に配置したことを特徴とする。

30

【0012】

シリコン基板には、発熱素子と温度検出用素子が配置されているので、併せてこれらを制御する温度制御回路もシリコン基板に配置すれば、外部からは電源だけを供給すればよくなる。これにより、光学系全体を小型化することができる。

【0013】

[適用例5]

また、前記シリコン基板面に均一な分布となるように複数の前記発熱素子を分散配置したことを特徴とする。

40

【0014】

シリコン基板は一定の面積を有するため、基板全体を加熱するためには、1箇所を加熱するより均一に分散配置した方が短い時間で一定の温度に達する。また、均一に分散配置することにより、温度勾配をなくすことができる。

【0015】

[適用例6]

また、複数の前記発熱素子を前記シリコン基板の外周に沿った位置に配置したことを特徴とする。

【0016】

基板の外周は外気に曝されるため、温度の低下が大きい。そこで本発明では、基板の外

50

周に沿った位置に発熱素子を配置する。これにより、外気による温度低下を最小限にすることができる。

【0017】

[適用例7]

また、前記シリコン基板の外周に沿った位置にはパワーの大きな発熱素子を配置し、前記パワーの大きな発熱素子群の内側にはパワーの小さな発熱素子を配置したことを特徴とする。

【0018】

基板の外周は温度低下が大きく、内周にいくほど小さくなる。そこで本発明では、基板の外周に沿った位置にはパワーの大きな発熱素子を配置し、内周にはパワーの小さな発熱素子を配置する。これにより、加熱速度を高めると共に、温度勾配を低減することができる。

10

【0019】

[適用例8]

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。

【0020】

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の単色性が良く、位相の揃った光である。このような光の波長や位相の安定性の尺度としてコヒーレンスが定義されている。コヒーレンスが良く、すなわち波長や位相が安定な光は量子干渉効果を起こすことができる。その点ではレーザ光は最適である。

20

【0021】

[適用例9]

また、前記ガス状の金属原子は、ルビジウム、又はセシウムであることを特徴とする。

【0022】

セシウム原子を使えば、精度の高い原子発振器を実現できる。また、ルビジウム原子は手軽に広く普及している。よって、原子発振器の要求性能とコストを考慮して、いずれかの金属原子を選ぶことができる。

【0023】

[適用例10]

また、上記構成による光学系を原子発振器に備えたことを特徴とする。

30

【0024】

部品点数を削減してガスセルを小型化すると共に、ガスセルの温度分布を均一にすることができ、且つ光吸収特性の劣化を改善できるので、小型でしかもガスセルの温度安定度が高い高性能な原子発振器を提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0025】

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れ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1は、波長が異なるコヒーレント光としての2種類の共鳴光を入射したときの量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50の光学系1であって、共鳴光2aを出射するコヒーレント光源2と、コヒーレント光源2の出射側に配置されガス状の金属原子を封入すると共に、金属原子ガス中に共鳴光2aを通過させるガスセル3と、ガスセル3を通過した光3aを検出する光検出器(光検出手段)4と、を備えている。また、原子発振器50は光検出器4の出力信号により、発振周波数を制御する周波数制御回路8を更に備えて構成されている。また、本実施形態では、ガスセル3に配置された温度センサ(温度検出用素子)の情報6に基づいてガスセル3に配置した発熱素子の動作を制御する温度制御回路5を備えている(詳細は後述する)。尚、本発明の主旨は、原子発振器を構成する光学系の構成にあるので、原子発振器の周波数制御についての詳細な説

40

50

明は省略する。

【 0 0 2 6 】

即ち、本発明の原子発振器 5 0 は、レーザ光などのコヒーレント光の量子干渉効果を利用したものである。この方式は、2つの基底準位が共鳴光を受けて、共通の励起準位と共鳴結合している3準位系（例えば型準位系）において、同時に照射される2つの共鳴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、3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。C P Tはこの原理を利用して、2つの共鳴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、本発明の光学系 1 は、コヒーレント光源 2 から出射した共鳴光 2 a はガスセル 3 を通過し、ガスセル 3 から出射した光 3 a は光検出器 4 により検出される。ここで、従来のルビジウム、セシウム等の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、原子をガス状態に保つ必要があるため、原子を気密封入したガスセルを一定の温度に保って動作させている。そのために、ガスセルを一定の温度に保持するために、キャビティの周囲にレイヤを配して、レイヤを挟むようにヒータにより加熱してキャビティの温度を一定に保持している。その結果、ガスセルを加熱するために、ヒータが必要となり、ガスセル全体が大きくなるといった問題と、ヒータに近い部分が過大に加熱されてしまうといった問題、および光吸収特性の劣化といった問題がある。そこで本実施形態では、ガスセル 3 を構成するシリコン基板上に発熱する発熱素子を配置して基板自体を加熱することにより、部品点数を削減してガスセル 3 を小型化すると共に、ガスセル 3 の温度分布を均一にすることができ、且つ光吸収特性の劣化を改善できる。

10

20

【 0 0 2 7 】

また、コヒーレント光は、レーザ光が使用される。即ち、普通の光（ランプ光源等）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の単色性が良く、位相の揃った光である。このような光の波長や位相の安定性の尺度としてコヒーレンスが定義されている。コヒーレンスが良く、すなわち波長や位相が安定な光は量子干渉効果を起こすことができる。その点ではレーザ光は最適である。

また、ガス状の金属原子は、ルビジウム、又はセシウムが使用される。セシウム原子を使えば、精度の高い原子発振器を実現できる。また、ルビジウム原子は手軽に広く普及している。よって、原子発振器の要求性能とコストを考慮して、いずれかの金属原子を選ぶことができる。

30

また、上記構成による光学系 1 を原子発振器に備えることにより、部品点数を削減してガスセル 3 を小型化すると共に、ガスセルの温度分布を均一にすることができ、且つ光吸収特性の劣化を改善できるので、小型でしかもガスセル 3 の温度安定度が高い高性能な原子発振器を提供することができる。

【 0 0 2 8 】

図 2 は C P T 方式による原子の 3 準位系を説明する一例である。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、核スピン - 電子スピン相互作用による超微細構造により 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、よりエネルギーの高い準位へ励起する。また、図 2 の様に 2 つの基底準位が光を受けて、共通の励起準位と共鳴結合している状態を 2 光子共鳴と言う。図 2 において、基底準位 1 (2 3) と基底準位 2 (2 4) は準位のエネルギーが若干異なるため、共鳴光もそれぞれ共鳴光 1 (2 0) と共鳴光 2 (2 2) と波長が若干異なる。同時に照射される共鳴光 1 (2 0) と共鳴光 2 (2 2) の周波数差（波長の差）が正確に基底準位 1 (2 3) と基底準位 2 (2 4) のエネルギー差に一致すると、図 2 の系は 2 つの基底準位の重ね合わせ状態になり、励起準位 2 1 への励起が停止する。C P Tはこの原理を利用して、共鳴光 1 (2 0) と共鳴光 2 (2 2) 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 3 での光吸収（つまり励起準位 2 1 への転換）が停止する状態を検出、利用する方式である。尚、この光吸収が停止する状態でガスセル 3 を通過する光 3 a を E I T 信号と呼ぶ。

40

【 0 0 2 9 】

50

図3(a)は本発明の第1の実施形態に係るガスセルの構成を模式化した図である。図3(b)はシリコン基板上に配置した発熱素子を示す図である。このガスセル3は、少なくとも金属原子を封入するために厚み方向に貫通した開口部13を有するシリコン基板11と、開口部13を封止するガラス(透明部材)10、12と、を有し、図3(b)のようにシリコン基板11に、このシリコン基板11を加熱する発熱素子14、15、16を配置した。尚、図3(b)では、発熱素子としてバイポーラトランジスタ14、MOSトランジスタ15、抵抗16が示されているが、これらの何れか1種類だけで構成しても良く、或いは混在させても構わない。また、シリコン基板11は均一に加熱されることが重要なため、発熱素子はシリコン基板11上の一部に偏ることなく均一な分布となるように配置されるのが好ましい。

10

【0030】

また、シリコン基板11に、このシリコン基板11の温度を検出する温度センサを更に配置する。即ち、シリコン基板11の温度を一定の値に保持するには、シリコン基板11の温度を検出しなければならない。そこで本実施形態では、シリコン基板11に温度センサを更に配置する。これにより、温度情報をフィードバックして基板の温度を一定に制御することができる。温度センサは例えば抵抗値の変化を検出したり、サーミスタを配置してもよい。

また、温度センサによる温度情報に基づいて、発熱素子の動作を制御する温度制御回路をシリコン基板11の外部に備える。即ち、温度センサからの温度情報は、シリコン基板11の温度変化に追従して変化する。従って、温度と温度情報との関係が予めわかっているならば、温度情報からシリコン基板11の温度を判断することができる。そこで本実施形態では、上限の温度に対する温度情報を受信すると、発熱素子を不動作として加熱を停止し、下限の温度に対する温度情報を受信すると、発熱素子を動作させて加熱を開始する温度制御回路、或いは連続動作により温度を一定に保つ温度制御回路等をシリコン基板11の外部に備える。これにより、温度制御回路が基板温度の影響を受けずに、且つ制御方法をフレキシブルに変更することができる。尚、温度制御回路は、発熱素子を動作させたり不動作とする制御方法の他に、発熱素子に流す電流値をアナログ的に変化させるように制御しても構わない。また、パルス幅を変調して電流をデジタル的に制御しても構わない。

20

【0031】

また、温度制御回路をシリコン基板11に発熱素子及び温度センサと共に配置する。即ち、シリコン基板11には、発熱素子と温度センサが配置されているので、併せてこれらを制御する温度制御回路も基板に配置すれば、外部からは電源だけを供給すればよくなる。これにより、光学系全体を小型化することができる。

30

以上の説明では基板をシリコンとして説明したが、基板をガラスにより構成しても良い。即ち、基板をガラスにより構成し、ガラス上に回路を形成することも可能である。これにより、回路形成プロセスの選択幅を拡げることができる。

【0032】

図4はシリコン基板上に配置された発熱素子のレイアウトを示す図である。図4(a)は、発熱素子17をシリコン基板11の一部に偏ることなく均一な分布となるように配置した図である。この場合、発熱素子17の種類を同一とし、シリコン基板11と開口部13の略中間に配置する。図4(b)はシリコン基板11の外周に沿った位置に発熱素子17を寄せて配置した図である。シリコン基板11は外側が外気に曝されるため、温度分布としては一番温度が低くなる。そこで、発熱素子17をシリコン基板11の外周に沿った位置に寄せて配置して、温度低下を低減するものである。図4(c)はシリコン基板11の外周に沿った位置にパワーの大きい発熱素子17を配し、内側にパワーの小さい発熱素子18を配置する。これにより、温度低下の大きい外側は加熱温度を高くし、温度低下の少ない内側は加熱温度を低くして、全体的に温度を効率よく均一にすることができる。

40

【0033】

このように、発熱素子はシリコン基板11上に自由に配置できるので、ガスセルの大きさや、使用環境に応じて最適な発熱素子を配置することができる。尚、この配置は一例で

50

あり、他の配置にしても構わない。

即ち、シリコン基板 11 は一定の面積を有するため、シリコン基板全体を加熱するためには、1 箇所を加熱するよりも均一に分布するように分散配置した方が短い時間で一定の温度に達する。また、均一に配置することにより、温度勾配をなくすることができる。また、シリコン基板 11 の外周は外気に曝されるため、温度の低下が大きい。そこで本実施形態では、シリコン基板 11 の外周に沿った位置に発熱素子 17 を配置する。これにより、外気による温度低下を最小限にすることができる。また、シリコン基板 11 の外周は温度低下が大きく、内周に行くほど小さくなる。そこで本実施形態では、シリコン基板 11 の外周に沿った位置にはパワーの大きな発熱素子 17 を配置し、内周にはパワーの小さな発熱素子 18 を配置する。これにより、加熱速度を高めると共に、温度勾配を低減することができる。

10

【0034】

図 5 はシリコン基板上に配置された温度センサのレイアウトを示す図である。図 5 (a) は温度センサ 19 をシリコン基板 11 の 4 箇所配置した図である。シリコン基板の温度は全体が一定温度に達するまでには、所定の時間が必要となる。そこで温度センサ 19 をシリコン基板 11 の 4 箇所均等に配置し、各温度センサからの温度情報に基づいて、その温度センサの周辺にある発熱素子を制御する。これにより、無駄な加熱を削減することができ、効率よくシリコン基板を加熱することができる。図 5 (b) は温度センサ 19 を開口部 13 の近傍に配置した図である。開口部 13 にはガス状の金属原子が封入されている。そして金属原子をガス状態に保つ必要があるため、金属原子を気密封入したガスセルを一定の温度に保って動作させている。そのため、開口部 13 の温度が所定の温度になることが重要である。そこで温度センサ 19 を開口部 13 の近傍に配置する。これにより、金属原子を効率よくガス状態にすることができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0035】

【図 1】本発明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】CPT 方式による原子の 3 準位系を説明する図である。

【図 3】本発明の第 1 の実施形態に係るガスセルの構成を模式化した図である。

【図 4】シリコン基板上に配置された発熱素子のレイアウトを示す図である。

【図 5】シリコン基板上に配置された温度センサのレイアウトを示す図である。

30

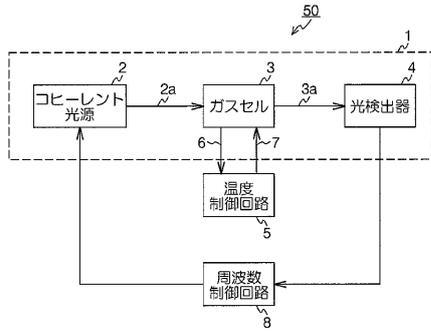
【図 6】従来のガスセルの構成図である。

【符号の説明】

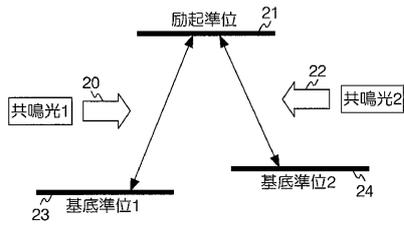
【0036】

1 光学系、2 コヒーレント光源、2 a 共鳴光、3 ガスセル、4 光検出器、5 温度制御回路、6 温度情報、7 制御信号、8 周波数制御回路、10、12 ガラス、11 シリコン基板、13 開口部、14、15、16 発熱素子、50 原子発振器

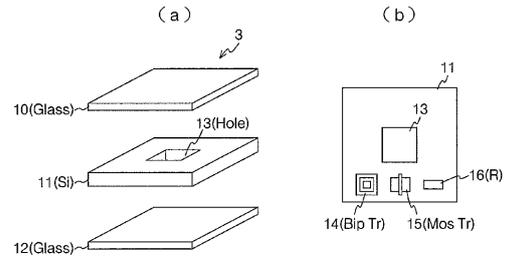
【 図 1 】



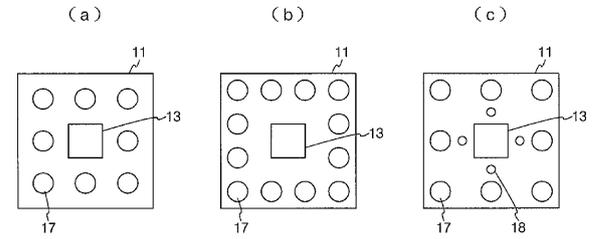
【 図 2 】



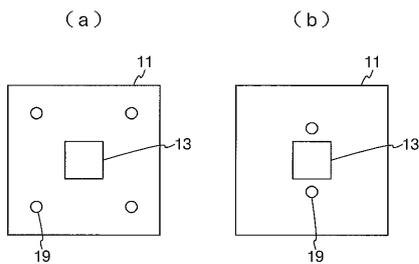
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】

