

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第6337456号
(P6337456)

(45) 発行日 平成30年6月6日(2018.6.6)

(24) 登録日 平成30年5月18日(2018.5.18)

(51) Int.Cl.

F I

H O 3 L 7/26 (2006.01)

H O 1 S 1/06 (2006.01)

H O 3 L 7/26

H O 1 S 1/06

請求項の数 10 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2013-258548 (P2013-258548)	(73) 特許権者	000002369
(22) 出願日	平成25年12月13日(2013.12.13)		セイコーエプソン株式会社
(65) 公開番号	特開2015-115886 (P2015-115886A)		東京都新宿区新宿四丁目1番6号
(43) 公開日	平成27年6月22日(2015.6.22)	(74) 代理人	100091292
審査請求日	平成28年11月8日(2016.11.8)		弁理士 増田 達哉
		(74) 代理人	100091627
			弁理士 朝比 一夫
		(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
		審査官	橋本 和志
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子干渉装置、原子発振器、電子機器および移動体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

金属原子が封入されている内部空間を有するガスセルと、
電力の供給を受けて前記ガスセルを加熱する加熱部と、
電源端子と、
前記電源端子から出力される電圧を昇圧して前記加熱部に印加する昇圧回路と、
光を前記ガスセルに向けて出射する光出射部と、
前記ガスセル内を透過した前記光の強度を検出する光検出部と、
前記光出射部の駆動を制御する光出射部制御部と、
前記加熱部の駆動を制御する温度制御部と、

を備え、

前記昇圧回路は、前記光出射部、前記光検出部、前記光出射部制御部および前記温度制御部には接続されていないことを特徴とする量子干渉装置。

【請求項2】

前記昇圧回路は、スイッチングレギュレータ機能を有する請求項1に記載の量子干渉装置。

【請求項3】

前記昇圧回路のスイッチング周波数は、10kHz以上、10MHz以下の範囲内にある請求項2に記載の量子干渉装置。

【請求項4】

前記昇圧回路の電圧の増幅率は、2倍以上、5倍以下の範囲内にある請求項1ないし3のいずれか1項に記載の量子干渉装置。

【請求項5】

前記加熱部は、発熱抵抗体を有するヒーターを備える請求項1ないし4のいずれか1項に記載の量子干渉装置。

【請求項6】

前記ヒーターを収納し、磁気シールド性を有する容器を備えている請求項5に記載の量子干渉装置。

【請求項7】

磁気シールド性を有する遮蔽部を備えている請求項1ないし6のいずれか1項に記載の量子干渉装置。

【請求項8】

請求項1ないし7のいずれか1項に記載の量子干渉装置を備えることを特徴とする原子発振器。

【請求項9】

請求項1ないし7のいずれか1項に記載の量子干渉装置を備えることを特徴とする電子機器。

【請求項10】

請求項1ないし7のいずれか1項に記載の量子干渉装置を備えることを特徴とする移動体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、量子干渉装置、原子発振器、電子機器および移動体に関するものである。

【背景技術】

【0002】

長期的に高精度な発振特性を有する発振器として、ルビジウム、セシウム等のアルカリ金属の原子のエネルギー遷移に基づいて発振する原子発振器が知られている（例えば、特許文献1参照）。

一般に、原子発振器の動作原理は、光およびマイクロ波による二重共鳴現象を利用した方式と、波長の異なる2種類の光による量子干渉効果（CPT：Coherent Population Trapping）を利用した方式とに大別されるが、量子干渉効果を利用した原子発振器は、二重共鳴現象を利用した原子発振器よりも小型化できることから、近年、様々な機器への搭載が期待されている。

【0003】

量子干渉効果を利用した原子発振器は、例えば、特許文献1に開示されているように、ガス状の金属原子を封入したガスセルと、ガスセル中の金属原子に周波数の異なる2種の共鳴光を含むレーザー光を照射する半導体レーザーと、ガスセルを透過したレーザー光を検出する光検出器と、を備えている。そして、このような原子発振器では、2種類の共鳴光の周波数差が特定の値のときに2種類の共鳴光の双方がガスセル内の金属原子に吸収されずに透過する電磁誘起透明化（EIT：Electromagnetically Induced Transparency）現象を生じるが、そのEIT現象に伴って発生する急峻な信号であるEIT信号を光検出器で検出する。

【0004】

また、原子発振器は、ガスセルを加熱するヒーターと、ガスセル内にレーザー光の軸に沿った方向の磁場を発生させるコイルとを有している。前記ヒーターによりガスセルを加熱することで、ガスセル内のアルカリ金属を所望濃度のガス状に維持する。また、前記磁場によりゼーマン分裂が生じ、これにより、ガスセル内に存在するアルカリ金属の原子の縮退している異なるエネルギー準位間のギャップを拡げて、分解能を向上させることができ、その結果、原子発振器の発振周波数の精度を高めることができる。

【 0 0 0 5 】

ところで、原子発振器の消費電力を低減するためには、電源電圧を小さくする必要がある。但し、ヒーターについては、そのヒーターに供給する電力が換わらないように、電圧が低下した分、電流を増大させる。このため、ヒーターへの通電により発生する磁場が大きくなり、その磁場がガスセル内に作用することで、原子発振器の発振周波数の精度が低下する等の悪影響を及ぼす。なお、このような問題は、前記光およびマイクロ波による二重共鳴現象を利用した原子発振器においても同様である。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 6 】

10

【 特許文献 1 】 特開 2 0 0 1 - 3 3 9 3 0 2 号公報

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 7 】

本発明の目的は、消費電力を低減しつつ、加熱部への通電により発生する磁場を小さくすることができる量子干渉装置および原子発振器を提供すること、また、かかる量子干渉装置を備える信頼性に優れた電子機器および移動体を提供することにある。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 8 】

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、以下の形態または適用例として実現することが可能である。

20

〔 適用例 1 〕

本発明の量子干渉装置は、金属原子が封入されている内部空間を有するガスセルと、電力の供給を受けて前記ガスセルを加熱する加熱部と、電源端子と、

前記電源端子から出力される電圧を昇圧して前記加熱部に印加する昇圧回路と、を備えることを特徴とする。

【 0 0 0 9 】

これにより、まず、電源電圧を小さくすることで消費電力を低減することができる。そして、昇圧回路で加熱部に印加される電圧を昇圧することにより、加熱部に供給する電力を一定に保持しつつ、加熱部を流れる電流を減少させることができ、これにより、加熱部への通電によりその加熱部で発生する磁場を小さくすることができる。これによって、加熱部で発生する磁場がガスセル内に悪影響を及ぼすことを防止または抑制することができ、ガスセルの内部空間に発生させる磁場を安定させることができ、原子発振器の発振周波数の精度を向上させることができる。また、磁気シールドを簡素化することが可能になる。

30

【 0 0 1 0 】

〔 適用例 2 〕

本発明の量子干渉装置では、前記昇圧回路は、スイッチングレギュレータ機能を有することが好ましい。

40

これにより、高効率かつ低コストとすることができる。

〔 適用例 3 〕

本発明の量子干渉装置では、前記昇圧回路のスイッチング周波数は、10kHz以上、10MHz以下の範囲内にあることが好ましい。

これにより、原子共鳴への影響を防止または低減することができる。

【 0 0 1 1 】

〔 適用例 4 〕

本発明の量子干渉装置では、前記昇圧回路の電圧の増幅率は、2倍以上、5倍以下の範囲内にあることが好ましい。

これにより、加熱部への通電により発生する磁場を小さくすることができる。

50

〔適用例 5〕

本発明の量子干渉装置では、光を前記ガスセルに向けて出射する光出射部と、前記ガスセル内を透過した前記光の強度を検出する光検出部と、前記光出射部の駆動を制御する光出射部制御部と、前記加熱部の駆動を制御する温度制御部と、を備え、
前記昇圧回路は、前記光出射部、前記光検出部、前記光出射部制御部および前記温度制御部には接続されていないことが好ましい。

これにより、前記昇圧回路を加熱部専用のものとすることができ、その昇圧回路の各パラメーターを加熱部に対して最適になるように自在に設定することができる。

10

【0012】

〔適用例 6〕

本発明の量子干渉装置では、前記加熱部は、発熱抵抗体を有するヒーターを備え、前記ヒーターの駆動を制御する温度制御部を有することが好ましい。

これにより、ガスセル内のアルカリ金属を所望濃度のガス状に維持することができる。

〔適用例 7〕

本発明の量子干渉装置では、前記ヒーターを収納し、磁気シールド性を有する容器を備えていることが好ましい。

これにより、ヒーターで発生する磁場がガスセル内に作用することを防止または抑制することができる。

20

【0013】

〔適用例 8〕

本発明の量子干渉装置では、磁気シールド性を有する遮蔽部を備えていることが好ましい。

これにより、不要な磁場がガスセル内に作用することを防止または抑制することができる。

〔適用例 9〕

本発明の原子発振器は、本発明の量子干渉装置を備えることを特徴とする。

これにより、消費電力を低減しつつ、加熱部への通電により発生する磁場を小さくすることができ、これによって、ガスセルの内部空間に発生させる磁場を安定させることができ、原子発振器の発振周波数の精度を向上させることができ、また、磁気シールドを簡素化することが可能になる。

30

【0014】

〔適用例 10〕

本発明の電子機器は、本発明の量子干渉装置を備えることを特徴とする。

これにより、低消費電力で、優れた信頼性を有する電子機器を提供することができる。

〔適用例 11〕

本発明の移動体は、本発明の量子干渉装置を備えることを特徴とする。

これにより、低消費電力で、優れた信頼性を有する移動体を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

40

【0015】

【図 1】本発明の実施形態に係る原子発振器の概略構成を示す模式図である。

【図 2】アルカリ金属のエネルギー状態を説明するための図である。

【図 3】光出射部から出射される 2 つの光の周波数差と、光検出部で検出される光の強度との関係を示すグラフである。

【図 4】図 1 に示す原子発振器の分解斜視図である。

【図 5】図 1 に示す原子発振器の縦断面図である。

【図 6】図 1 に示す原子発振器が備える光出射部およびガスセルを説明するための模式図である。

【図 7】図 1 に示す原子発振器が備えるヒーターを収納するケーシング（容器）を示す模

50

式図（断面図）である。

【図 8】GPS 衛星を利用した測位システムに本発明の原子発振器を用いた場合のシステム構成概要図である。

【図 9】本発明の移動体の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

以下、本発明の量子干渉装置、原子発振器、電子機器および移動体を添付図面に示す実施形態に基づいて詳細に説明する。

1. 原子発振器（量子干渉装置）

まず、本発明の原子発振器（本発明の量子干渉装置を備える原子発振器）について説明する。なお、以下では、本発明の量子干渉装置を原子発振器に適用した例を説明するが、本発明の量子干渉装置は、これに限定されず、原子発振器の他、例えば、磁気センサー、量子メモリー等にも適用可能である。

【0017】

<実施形態>

図 1 は、本発明の実施形態に係る原子発振器の概略構成を示す模式図である。また、図 2 は、アルカリ金属のエネルギー状態を説明するための図、図 3 は、光出射部から出射される 2 つの光の周波数差と、光検出部で検出される光の強度との関係を示すグラフである。

【0018】

図 1 に示す原子発振器 1 は、量子干渉効果を利用した原子発振器である。

この原子発振器 1 は、図 1 に示すように、光出射側のユニットである第 1 ユニット 2 と、光検出側のユニットである第 2 ユニット 3 と、ユニット 2、3 間に設けられた光学部品 41、42、43 と、第 1 ユニット 2 および第 2 ユニット 3 を制御する制御部 6 と、を備える。

【0019】

ここで、第 1 ユニット 2 は、光出射部 21 と、光出射部 21 を収納する第 1 パッケージ 22 とを備える。

また、第 2 ユニット 3 は、ガスセル 31 と、光検出部 32 と、ヒーター（加熱部）33 と、温度センサー 34 と、コイル 35 と、これらを収納する第 2 パッケージ 36 とを備える。

【0020】

まず、原子発振器 1 の原理を簡単に説明する。

図 1 に示すように、原子発振器 1 では、光出射部 21 がガスセル 31 に向けて励起光 L を出射し、ガスセル 31 を透過した励起光 LL を光検出部 32 が検出する。

ガスセル 31 内には、ガス状のアルカリ金属（金属原子）が封入されており、アルカリ金属は、図 2 に示すように、3 準位系のエネルギー準位を有し、エネルギー準位の異なる 2 つの基底状態（基底状態 1、2）と、励起状態との 3 つの状態をとり得る。ここで、基底状態 1 は、基底状態 2 よりも低いエネルギー状態である。

【0021】

光出射部 21 から出射された励起光 LL は、周波数の異なる 2 種の共鳴光 1、2 を含んでおり、この 2 種の共鳴光 1、2 を前述したようなガス状のアルカリ金属に照射したとき、共鳴光 1 の周波数 ω_1 と共鳴光 2 の周波数 ω_2 との差 $(\omega_1 - \omega_2)$ に応じて、共鳴光 1、2 のアルカリ金属における光吸収率（光透過率）が変化する。

そして、共鳴光 1 の周波数 ω_1 と共鳴光 2 の周波数 ω_2 との差 $(\omega_1 - \omega_2)$ が基底状態 1 と基底状態 2 とのエネルギー差に相当する周波数に一致したとき、基底状態 1、2 から励起状態への励起がそれぞれ停止する。このとき、共鳴光 1、2 は、いずれも、アルカリ金属に吸収されずに透過する。このような現象を CPT 現象または電磁誘起透明化現象（EIT: Electromagnetically Induced Transparency）と呼ぶ。

【0022】

10

20

30

40

50

例えば、光出射部 2 1 が共鳴光 1 の周波数 ω_1 を固定し、共鳴光 2 の周波数 ω_2 を変化させていくと、共鳴光 1 の周波数 ω_1 と共鳴光 2 の周波数 ω_2 との差 ($\omega_1 - \omega_2$) が基底状態 1 と基底状態 2 とのエネルギー差に相当する周波数 ω_0 に一致したとき、光検出部 3 2 の検出強度は、図 3 に示すように、急峻に上昇する。このような急峻な信号を E I T 信号として検出する。この E I T 信号は、アルカリ金属の種類によって決まった固有値をもっている。したがって、このような E I T 信号を用いることにより、発振器を構成することができる。

【 0 0 2 3 】

以下、本実施形態の原子発振器 1 の具体的な構成について説明する。

図 4 は、図 1 に示す原子発振器の分解斜視図、図 5 は、図 1 に示す原子発振器の縦断面図、図 6 は、図 1 に示す原子発振器が備える光出射部およびガスセルを説明するための模式図、図 7 は、図 1 に示す原子発振器が備えるヒーターを収納するケーシング（容器）を示す模式図（断面図）である。

【 0 0 2 4 】

なお、図 4 および図 5 では、説明の便宜上、互いに直交する 3 つの軸として、X 軸、Y 軸および Z 軸を図示しており、その図示された各矢印の先端側を「+ 側」、基端側を「- 側」とする。また、以下では、説明の便宜上、X 軸に平行な方向を「X 軸方向」、Y 軸に平行な方向を「Y 軸方向」、Z 軸に平行な方向を「Z 軸方向」といい、また、+ Z 方向側（図 5 の上側）を「上」、- Z 方向側（図 5 の下側）を「下」という。

【 0 0 2 5 】

原子発振器 1 は、図 4 に示すように、制御部 6 が実装され、第 1 ユニット 2、第 2 ユニット 3 および光学部品 4 1、4 2、4 3 を保持する配線基板 5（保持部材）と、第 1 ユニット 2 および第 2 ユニット 3 と配線基板 5 とを電氣的に接続するコネクタ 7 1、7 2 とを備える。

そして、第 1 ユニット 2 および第 2 ユニット 3 は、配線基板 5 の配線（図示せず）およびコネクタ 7 1、7 2 を介して制御部 6 に電氣的に接続され、制御部 6 により駆動制御される。

【 0 0 2 6 】

以下、原子発振器 1 の各部を順次詳細に説明する。

（第 1 ユニット）

前述したように、第 1 ユニット 2 は、光出射部 2 1 と、光出射部 2 1 を収納する第 1 パッケージ 2 2 とを備える。

〔光出射部〕

光出射部 2 1 は、ガスセル 3 1 中のアルカリ金属原子を励起する励起光 L L を出射する機能を有する。

【 0 0 2 7 】

より具体的には、光出射部 2 1 は、前述したような周波数の異なる 2 種の光（共鳴光 1 および共鳴光 2）を含む光を励起光 L L として出射するものである。

共鳴光 1 の周波数 ω_1 は、ガスセル 3 1 中のアルカリ金属を前述した基底状態 1 から励起状態に励起（共鳴）し得るものである。

また、共鳴光 2 の周波数 ω_2 は、ガスセル 3 1 中のアルカリ金属を前述した基底状態 2 から励起状態に励起（共鳴）し得るものである。

【 0 0 2 8 】

この光出射部 2 1 としては、前述したような励起光 L L を出射し得るものであれば、特に限定されないが、例えば、垂直共振器面発光レーザー（VCSEL）等の半導体レーザー等を用いることができる。

また、このような光出射部 2 1 は、図示しない温度調節素子（発熱抵抗体、ペルチェ素子等）により、所定温度に温度調節される。

【 0 0 2 9 】

〔第 1 パッケージ〕

第 1 パッケージ 2 2 は、前述した光出射部 2 1 を収納する。

この第 1 パッケージ 2 2 は、図 5 に示すように、基体 2 2 1 (第 1 基体) と、蓋体 2 2 2 (第 1 蓋体) とを備える。

基体 2 2 1 は、光出射部 2 1 を直接的または間接的に支持する。本実施形態では、基体 2 2 1 は、板状をなし、平面視で円形をなしている。

【0030】

そして、この基体 2 2 1 の一方の面 (実装面) には、光出射部 2 1 (実装部品) が設置 (実装) される。また、基体 2 2 1 の他方の面には、図 5 に示すように、複数のリード 2 2 3 が突出している。この複数のリード 2 2 3 は、図示しない配線を介して光出射部 2 1 に電氣的に接続されている。

10

このような基体 2 2 1 には、基体 2 2 1 上の光出射部 2 1 を覆う蓋体 2 2 2 が接合されている。

【0031】

蓋体 2 2 2 は、一端部が開口した有底筒状をなしている。本実施形態では、蓋体 2 2 2 の筒状部は、円筒状をなす。

この蓋体 2 2 2 の一端部の開口は、前述した基体 2 2 1 により塞がれている。

そして、蓋体 2 2 2 の他端部、すなわち蓋体 2 2 2 の開口とは反対側の底部には、窓部 2 3 が設けられている。

【0032】

この窓部 2 3 は、ガスセル 3 1 と光出射部 2 1 との間の光軸 (励起光 LL の軸 a) 上に設けられている。

20

そして、窓部 2 3 は、前述した励起光 LL に対して透過性を有する。

本実施形態では、窓部 2 3 は、レンズである。これにより、励起光 LL を無駄なくガスセル 3 1 へ照射することができる。

【0033】

また、窓部 2 3 は、励起光 LL を平行光とする機能を有する。すなわち、窓部 2 3 はコリメートレンズであり、内部空間 S における励起光 LL は平行光である。これにより、内部空間 S に存在するアルカリ金属の原子のうち、光出射部 2 1 から出射した励起光 LL により共鳴するアルカリ金属の原子の数を多くすることができる。その結果、EIT 信号の強度を高めることができる。

30

【0034】

なお、窓部 2 3 は、励起光 LL に対する透過性を有するものであれば、レンズに限定されず、例えば、レンズ以外の光学部品であってもよいし、単なる光透過性の板状部材であってもよい。この場合、前述したような機能を有するレンズは、例えば、後述する光学部品 4 1、4 2、4 3 と同様、第 1 パッケージ 2 2 および第 2 パッケージ 3 6 との間に設けられていてもよい。

このような蓋体 2 2 2 の窓部 2 3 以外の部分の構成材料としては、特に限定されず、例えば、セラミックス、金属、樹脂等を用いることができる。

【0035】

ここで、蓋体 2 2 2 の窓部 2 3 以外の部分が励起光に対して透過性を有する材料で構成されている場合、蓋体 2 2 2 の窓部 2 3 以外の部分と窓部 2 3 とを一体的に形成することができる。また、蓋体 2 2 2 の窓部 2 3 以外の部分が励起光に対して透過性を有しない材料で構成されている場合、蓋体 2 2 2 の窓部 2 3 以外の部分と窓部 2 3 とを別体で形成し、これらを公知の接合方法により接合すればよい。

40

【0036】

また、基体 2 2 1 と蓋体 2 2 2 とは気密的に接合されているのが好ましい。すなわち、第 1 パッケージ 2 2 内が気密空間であることが好ましい。これにより、第 1 パッケージ 2 2 内を減圧状態または不活性ガス封入状態とすることができ、その結果、原子発振器 1 の特性を向上させることができる。

また、基体 2 2 1 と蓋体 2 2 2 との接合方法としては、特に限定されないが、例えば、

50

ろう接、シーム溶接、エネルギー線溶接（レーザー溶接、電子線溶接等）等を用いることができる。

【 0 0 3 7 】

なお、基体 2 2 1 と蓋体 2 2 2 との間には、これらを接合するための接合部材が介在していてもよい。

また、第 1 パッケージ 2 2 内には、前述した光出射部 2 1 以外の部品が収納されていてもよい。

例えば、第 1 パッケージ 2 2 内には、光出射部 2 1 の温度を調節する温度調節素子や温度センサー等が収納されていてもよい。かかる温度調節素子としては、例えば、発熱抵抗体（ヒーター）、ペルチェ素子等が挙げられる。

10

【 0 0 3 8 】

このような基体 2 2 1 および蓋体 2 2 2 を有して構成された第 1 パッケージ 2 2 によれば、光出射部 2 1 から第 1 パッケージ 2 2 外への励起光の出射を許容しつつ、光出射部 2 1 を第 1 パッケージ 2 2 内に収納することができる。

また、第 1 パッケージ 2 2 は、基体 2 2 1 が第 2 パッケージ 3 6 とは反対側に配置されるように、後述する配線基板 5 に保持されている。

【 0 0 3 9 】

（第 2 ユニット）

前述したように、第 2 ユニット 3 は、ガスセル 3 1 と、光検出部 3 2 と、ヒーター 3 3 と、温度センサー 3 4 と、コイル 3 5 と、これらを収納する第 2 パッケージ 3 6 とを備える。

20

〔ガスセル〕

ガスセル 3 1 内には、ガス状のルビジウム、セシウム、ナトリウム等のアルカリ金属が封入されている。また、ガスセル 3 1 内には、必要に応じて、アルゴン、ネオン等の希ガス、窒素等の不活性ガスが緩衝ガスとしてアルカリ金属ガスとともに封入されていてもよい。

【 0 0 4 0 】

例えば、ガスセル 3 1 は、図 6 に示すように、柱状の貫通孔 3 1 1 a を有する本体部 3 1 1 と、その貫通孔 3 1 1 a の両開口を封鎖する 1 対の窓部 3 1 2、3 1 3 とを有する。これにより、前述したようなアルカリ金属が封入される内部空間 S が形成されている。

30

本体部 3 1 1 を構成する材料としては、特に限定されず、金属材料、樹脂材料、ガラス材料、シリコン材料、水晶等が挙げられるが、加工性や窓部 3 1 2、3 1 3 との接合の観点から、ガラス材料、シリコン材料を用いるのが好ましい。

このような本体部 3 1 1 には、窓部 3 1 2、3 1 3 が気密的に接合されている。これにより、ガスセル 3 1 の内部空間 S を気密空間とすることができる。

【 0 0 4 1 】

本体部 3 1 1 と窓部 3 1 2、3 1 3 との接合方法としては、これらの構成材料に応じて決められるものであり、特に限定されないが、例えば、接着剤による接合方法、直接接合法、陽極接合法等を用いることができる。

また、窓部 3 1 2、3 1 3 を構成する材料としては、前述したような励起光 L L に対する透過性を有していれば、特に限定されないが、例えば、シリコン材料、ガラス材料、水晶等が挙げられる。

40

【 0 0 4 2 】

このような各窓部 3 1 2、3 1 3 は、前述した光出射部 2 1 からの励起光 L L に対する透過性を有している。そして、一方の窓部 3 1 2 は、ガスセル 3 1 内へ入射する励起光 L L が透過するものであり、他方の窓部 3 1 3 は、ガスセル 3 1 内から出射した励起光 L L が透過するものである。

このようなガスセル 3 1 は、ヒーター 3 3 により加熱され、所定温度に温度調節される。

【 0 0 4 3 】

50

〔光検出部〕

光検出部 32 は、ガスセル 31 内を透過した励起光 LL (共鳴光 1、2) の強度を検出する機能を有する。

この光検出部 32 としては、上述したような励起光を検出し得るものであれば、特に限定されないが、例えば、太陽電池、フォトダイオード等の光検出器 (受光素子) を用いることができる。

【0044】

〔ヒーター〕

ヒーター 33 は、前述したガスセル 31 (より具体的にはガスセル 31 中のアルカリ金属) を加熱する機能を有する。これにより、ガスセル 31 中のアルカリ金属を所望濃度のガス状に維持することができる。

10

このヒーター 33 は、電力の供給を受けて駆動される、すなわち、通電により発熱するものであり、例えば、ガスセル 31 の外表面上に設けられた発熱抵抗体で構成されている。このような発熱抵抗体は、例えば、プラズマ CVD、熱 CVD のような化学蒸着法 (CVD)、真空蒸着等の乾式メッキ法、ゾル・ゲル法等を用いて形成される。

【0045】

ここで、かかる発熱抵抗体は、ガスセル 31 の励起光 LL の入射部または出射部に設けられる場合、励起光に対する透過性を有する材料、具体的には、例えば、ITO (Indium Tin Oxide)、IZO (Indium Zinc Oxide)、 In_3O_3 、 SnO_2 、Sb 含有 SnO_2 、Al 含有 ZnO 等の酸化物等の透明電極材料で構成される。

20

なお、ヒーター 33 は、ガスセル 31 を加熱することができるものであれば、特に限定されず、ガスセル 31 に対して非接触であってもよい。また、ヒーター 33 に代えて、または、ヒーター 33 と併用して、ペルチェ素子やセラミックヒーターを用いて、ガスセル 31 を加熱してもよい。

このようなヒーター 33 は、後述する制御部 6 の温度制御部 62 に電氣的に接続され、通電制御される。

【0046】

また、図 7 に示すように、ヒーター 33 は、磁気シールド性を有し、ヒーター 33 で発生する磁場 (磁界) を外部に対して遮蔽するケーシング (遮蔽部) (容器) 331 に収納されている。これにより、ヒーター 33 への通電によりそのヒーター 33 で発生する磁場がガスセル 31 内に作用することを防止または抑制することができる。

30

このようなケーシング 331 の構成材料としては、磁気シールド性を有する材料が用いられ、例えば、Fe、各種鉄系合金 (ケイ素鉄、パーマロイ、アモルファス、センダスト、コパール) 等の軟磁性材料が挙げられ、中でも、磁気シールド性が優れるという観点から、コパール、パーマロイ等の Fe-Ni 系合金を用いることが好ましく、パーマロイを用いることがより好ましい。なお、前記ケーシング 331 が省略されていてもよいことは、言うまでもない。

【0047】

〔温度センサー〕

40

温度センサー 34 は、ヒーター 33 またはガスセル 31 の温度を検出するものである。そして、この温度センサー 34 の検出結果に基づいて、前述したヒーター 33 の発熱量が制御される。これにより、ガスセル 31 内のアルカリ金属原子を所望の温度に維持することができる。

【0048】

なお、温度センサー 34 の設置位置は、特に限定されず、例えば、ヒーター 33 上であってもよいし、ガスセル 31 の外表面上であってもよい。

温度センサー 34 としては、それぞれ、特に限定されず、サーミスタ、熱電対等の公知の各種温度センサーを用いることができる。

このような温度センサー 34 は、図示しない配線を介して、後述する制御部 6 の温度制

50

御部 6 2 に電氣的に接続されている。

【 0 0 4 9 】

[コイル]

コイル 3 5 は、通電により、内部空間 S に励起光 L L の軸 a に沿った方向（平行な方向）の磁場を発生させる機能を有する。これにより、ゼーマン分裂により、内部空間 S に存在するアルカリ金属の原子の縮退している異なるエネルギー準位間のギャップを拡げて、分解能を向上させ、E I T 信号の線幅を小さくすることができる。その結果、原子発振器 1 の発振周波数の精度を高めることができる。

【 0 0 5 0 】

なお、コイル 3 5 が発生する磁場は、直流磁場または交流磁場のいずれかの磁場であってもよいし、直流磁場と交流磁場とを重畳させた磁場であってもよい。

このコイル 3 5 の設置位置は、特に限定されず、図示しないが、例えば、ソレノイド型を構成するようにガスセル 3 1 の外周に沿って巻回して設けられていてもよいし、ヘルムホルツ型を構成するように 1 対のコイルをガスセル 3 1 を介して対向させてもよい。

このコイル 3 5 は、図示しない配線を介して、後述する制御部 6 の磁場制御部 6 3 に電氣的に接続されている。これにより、コイル 3 5 に通電を行うことができる。

【 0 0 5 1 】

[第 2 パッケージ]

第 2 パッケージ 3 6 は、前述したガスセル 3 1、光検出部 3 2、ヒーター 3 3、温度センサー 3 4 およびコイル 3 5 を収納する。

この第 2 パッケージ 3 6 は、磁気シールド性を有し、ガスセル 3 1 内のアルカリ金属を外部磁場から遮蔽する「遮蔽部（磁気シールドケース）」を構成する。これにより、不要な磁場がガスセル 3 1 内に作用することを防止または抑制することができる。なお、さらに、磁気シールド性を有する図示しないパッケージを有し、そのパッケージに、第 2 パッケージ 3 6 等が収納されていてもよい。

【 0 0 5 2 】

この第 2 パッケージ 3 6 は、前述した第 1 ユニット 2 の第 1 パッケージ 2 2 と同様に、構成されている。

具体的には、第 2 パッケージ 3 6 は、図 5 に示すように、基体 3 6 1（第 2 基体）と、蓋体 3 6 2（第 2 蓋体）とを備える。

基体 3 6 1 は、ガスセル 3 1、光検出部 3 2、ヒーター 3 3、温度センサー 3 4 およびコイル 3 5 を直接的または間接的に支持する。本実施形態では、基体 3 6 1 は、板状をなし、平面視で円形をなしている。

【 0 0 5 3 】

そして、この基体 3 6 1 の一方の面（実装面）には、ガスセル 3 1、光検出部 3 2、ヒーター 3 3、温度センサー 3 4 およびコイル 3 5（複数の実装部品）が設置（実装）される。また、基体 3 6 1 の他方の面には、図 5 に示すように、複数のリード 3 6 3 が突出している。この複数のリード 3 6 3 は、図示しない配線を介して光検出部 3 2、ヒーター 3 3、温度センサー 3 4 およびコイル 3 5 に電氣的に接続されている。

【 0 0 5 4 】

このような基体 3 6 1 の構成材料としては、磁気シールド性を有する材料が用いられ、例えば、Fe、各種鉄系合金（ケイ素鉄、パーマロイ、アモルファス、センダスト、コパール）等の軟磁性材料が挙げられ、中でも、磁気シールド性が優れるという観点から、コパール、パーマロイ等の Fe - Ni 系合金を用いることが好ましく、例えば基体 3 6 1 と蓋体 3 6 2 との気密接合を必要とせずに、より磁気シールド性に優れるという観点から、パーマロイを用いることがより好ましい。また基体 3 6 1 と蓋体 3 6 2 との気密接合が溶接により簡単かつ確実に行えるという観点からは、コパールを用いることがより好ましい。なお、第 2 パッケージ 3 6 は、磁気シールド性を有していなくてもよく、その場合は、基体 3 6 1 の構成材料としては、前記以外のものを用いてもよい。

【 0 0 5 5 】

このような基体 3 6 1 には、基体 3 6 1 上のガスセル 3 1、光検出部 3 2、ヒーター 3 3、温度センサー 3 4 およびコイル 3 5 を覆う蓋体 3 6 2 が接合されている。

蓋体 3 6 2 は、一端部が開口した有底筒状をなしている。本実施形態では、蓋体 3 6 2 の筒状部は、円筒状をなす。

この蓋体 3 6 2 の一端部の開口は、前述した基体 3 6 1 により塞がれている。

【 0 0 5 6 】

そして、蓋体 3 6 2 の他端部、すなわち蓋体 3 6 2 の開口とは反対側の底部には、窓部 3 7 が設けられている。

この窓部 3 7 は、ガスセル 3 1 と光出射部 2 1 との間の光軸（軸 a）上に設けられている。

10

そして、窓部 3 7 は、前述した励起光に対して透過性を有する。

【 0 0 5 7 】

本実施形態では、窓部 3 7 は、光透過性を有する板状部材で構成されている。

なお、窓部 3 7 は、励起光に対する透過性を有するものであれば、光透過性を有する板状部材に限定されず、例えば、レンズ、偏光板、 $\lambda/4$ 波長板等の光学部品であってもよい。

このような蓋体 3 6 2 の窓部 3 7 以外の部分の構成材料としては、特に限定されず、例えば、セラミックス、金属、樹脂等を用いることができる。

【 0 0 5 8 】

ここで、蓋体 3 6 2 の窓部 3 7 以外の部分が励起光に対して透過性を有する材料で構成されている場合、蓋体 3 6 2 の窓部 3 7 以外の部分と窓部 3 7 と一体的に形成することができる。また、蓋体 3 6 2 の窓部 3 7 以外の部分が励起光に対して透過性を有しない材料で構成されている場合、蓋体 3 6 2 の窓部 3 7 以外の部分と窓部 3 7 とを別体で形成し、これらを公知の接合方法により接合すればよい。

20

【 0 0 5 9 】

また、基体 3 6 1 と蓋体 3 6 2 とは気密的に接合されているのが好ましい。すなわち、第 2 パッケージ 3 6 内が気密空間であることが好ましい。これにより、第 2 パッケージ 3 6 内を減圧状態または不活性ガス封入状態とすることができ、その結果、原子発振器 1 の特性を向上させることができる。

また、基体 3 6 1 と蓋体 3 6 2 との接合方法としては、特に限定されないが、例えば、ろう接、シーム溶接、エネルギー線溶接（レーザー溶接、電子線溶接等）等を用いることができる。

30

【 0 0 6 0 】

なお、基体 3 6 1 と蓋体 3 6 2 との間には、これらを接合するための接合部材が介在していてもよい。

また、第 2 パッケージ 3 6 内には、少なくともガスセル 3 1 および光検出部 3 2 が収納されていればよく、また、前述したガスセル 3 1、光検出部 3 2、ヒーター 3 3、温度センサー 3 4 およびコイル 3 5 以外の部品が収納されていてもよい。

【 0 0 6 1 】

このような基体 3 6 1 および蓋体 3 6 2 を有して構成された第 2 パッケージ 3 6 によれば、光出射部 2 1 からの励起光の第 2 パッケージ 3 6 内への入射を許容しつつ、ガスセル 3 1 および光検出部 3 2 を第 2 パッケージ 3 6 内に収納することができる。したがって、前述したような第 1 パッケージ 2 2 と組み合わせて第 2 パッケージ 3 6 を用いることにより、光出射部 2 1 からガスセル 3 1 を介して光検出部 3 2 への励起光の光路を確保しつつ、光出射部 2 1 およびガスセル 3 1 を互いに非接触の別々のパッケージに収納することができる。

40

また、第 2 パッケージ 3 6 は、基体 3 6 1 が第 1 パッケージ 2 2 とは反対側に配置されるように、後述する配線基板 5 に保持されている。

【 0 0 6 2 】

（光学部品）

50

前述したような第 1 パッケージ 2 2 と第 2 パッケージ 3 6 との間には、複数の光学部品 4 1、4 2、4 3 が配置されている。この複数の光学部品 4 1、4 2、4 3 は、それぞれ、前述した第 1 パッケージ 2 2 内の光出射部 2 1 と、前述した第 2 パッケージ 3 6 内のガスセル 3 1 との間の光軸（軸 a）上に設けられている。

また、本実施形態では、第 1 パッケージ 2 2 側から第 2 パッケージ 3 6 側へ、光学部品 4 1、光学部品 4 2、光学部品 4 3 の順に配置されている。

【0063】

光学部品 4 1 は、 $\lambda/4$ 波長板である。これにより、例えば、光出射部 2 1 からの励起光が直線偏光である場合、その励起光を円偏光（右円偏光または左円偏光）に変換することができる。

10

前述したようにコイル 3 5 の磁場によりガスセル 3 1 内のアルカリ金属原子がゼーマン分裂した状態において、仮に直線偏光の励起光をアルカリ金属原子に照射すると、励起光とアルカリ金属原子との相互作用により、アルカリ金属原子がゼーマン分裂した複数の準位に均等に分散して存在することとなる。その結果、所望のエネルギー準位のアルカリ金属原子の数が他のエネルギー準位のアルカリ金属原子の数に対して相対的に少なくなるため、所望の EIT 現象を発現する原子数が減少し、所望の EIT 信号が小さくなり、その結果、原子発振器 1 の発振特性の低下をもたらす。

【0064】

これに対し、前述したようにコイル 3 5 の磁場によりガスセル 3 1 内のアルカリ金属原子がゼーマン分裂した状態において、円偏光の励起光をアルカリ金属原子に照射すると、励起光とアルカリ金属原子との相互作用により、アルカリ金属原子がゼーマン分裂した複数の準位のうち、所望のエネルギー準位のアルカリ金属原子の数を他のエネルギー準位のアルカリ金属原子の数に対して相対的に多くすることができる。そのため、所望の EIT 現象を発現する原子数が増大し、所望の EIT 信号が大きくなり、その結果、原子発振器 1 の発振特性を向上させることができる。

20

【0065】

本実施形態では、光学部品 4 1 は、円板状をなしている。そのため、後述するような形状の貫通孔 5 3 に係合した状態で光軸（軸 a）に平行な軸線周りに光学部品 4 1 を回転させることができる。なお、光学部品 4 1 の平面視形状は、これに限定されず、例えば、四角形、五角形等の多角形をなしていてもよい。

30

このような光学部品 4 1 に対して第 2 ユニット 3 側には、光学部品 4 2、4 3 が配置されている。

【0066】

光学部品 4 2、4 3 は、それぞれ、減光フィルター（ND フィルター）である。これにより、ガスセル 3 1 に入射する励起光 LL の強度を調整（減少）させることができる。そのため、光出射部 2 1 の出力が大きい場合でも、ガスセル 3 1 に入射する励起光を所望の光量とすることができる。本実施形態では、前述した光学部品 4 1 により円偏光に変換された励起光の強度を光学部品 4 2、4 3 により調整する。

【0067】

本実施形態では、光学部品 4 2、4 3 は、それぞれ、板状をなしている。また、光学部品 4 2、4 3 の平面視形状は、それぞれ、円形をなしている。そのため、後述するような形状の貫通孔 5 3 に係合した状態で光軸（軸 a）に平行な軸線周りに光学部品 4 2、4 3 をそれぞれ回転させることができる。

40

なお、光学部品 4 2、4 3 の平面視形状は、これに限定されず、例えば、四角形、五角形等の多角形をなしていてもよい。

【0068】

また、光学部品 4 2 および光学部品 4 3 は、互いに減光率が等しくてもよいし異なってもよい。

また、光学部品 4 2、4 3 は、それぞれ、上側と下側とで連続的または段階的に減光率の異なる部分を有していてもよい。この場合、光学部品 4 2、4 3 を配線基板 5 に対して

50

上下方向での位置を調整することにより、励起光の減光率を調整することができる。

【0069】

また、光学部品42、43は、それぞれ、周方向で連続的または断続的に減光率が異なる部分を有していてもよい。この場合、光学部品42、43を回転させることにより、励起光の減光率を調整することができる。なお、この場合、光学部品42、43の回転中心が軸aに対してずれていればよい。

なお、この光学部品42、43のうちのいずれか一方の光学部品を省略してもよい。また、光出射部21の出力が適度である場合、光学部品42、43の双方を省略することができる。

また、光学部品41、42、43は、前述した種類、配置順、数等に限定されない。例えば、光学部品41、42、43は、それぞれ、 $\lambda/4$ 波長板または減光フィルターに限定されず、レンズ、偏光板等であってもよい。

【0070】

(配線基板)

配線基板5は、図示しない配線を有し、かかる配線を介して、配線基板5に搭載された制御部6等の電子部品と、コネクタ71、72とを電気的に接続する機能を有する。

また、配線基板5は、前述した第1パッケージ22、第2パッケージ36および複数の光学部品41、42、43を保持する機能を有する。

【0071】

この配線基板5は、第1パッケージ22および第2パッケージ36が空間を介して互いに非接触な状態でこれらを保持する。これにより、光出射部21とガスセル31との間の熱干渉を防止または抑制し、光出射部21とガスセル31とを独立して高精度に温度制御することができる。

具体的に説明すると、図4に示すように、配線基板5は、その厚さ方向に貫通する貫通孔51、52、53、54、55が形成されている。

【0072】

ここで、貫通孔51(第1貫通孔)は、配線基板5のX軸方向での一端部側に設けられ、貫通孔52(第2貫通孔)は、配線基板5のX軸方向での他端部側に設けられている。そして、貫通孔53、54、55(第3貫通孔)は、配線基板5の貫通孔51と貫通孔52との間に設けられている。

本実施形態では、貫通孔51、52、53、54、55は、互いに独立して形成されている。そのため、配線基板5の剛性を優れたものとすることができる。

【0073】

そして、貫通孔51内には、第1パッケージ22の一部が上側から挿入され、これにより、第1パッケージ22は、配線基板5に対してX軸方向、Y軸方向およびZ軸方向での位置決めがされている。

本実施形態では、貫通孔51のY軸方向での幅は、第1パッケージ22のY軸方向での幅(円筒部の直径)よりも小さい。そのため、第1パッケージ22は、その円筒部の中心軸が配線基板5に対して上側に位置した状態で、貫通孔51の縁部に係合(当接)する。

【0074】

また、第1パッケージ22を貫通孔51の縁部に当接させることにより、第1パッケージ22と配線基板5との接触面積を小さくすることができる。これにより、第1パッケージ22と配線基板5との間の熱の伝達を抑制することができる。

同様に、貫通孔52内には、第2パッケージ36の一部が挿入され、これにより、第2パッケージ36は、配線基板5に対してX軸方向、Y軸方向およびZ軸方向での位置決めがされている。また、第1パッケージ22と同様に、第2パッケージ36を貫通孔52の縁部に当接させることにより、第2パッケージ36と配線基板5との接触面積を小さくすることができる。これにより、第2パッケージ36と配線基板5との間の熱の伝達を抑制することができる。

【0075】

このように、第 1 パッケージ 2 2 と第 2 パッケージ 3 6 との間の配線基板 5 を介した熱伝達を抑制することができるので、光出射部 2 1 とガスセル 3 1 との間の熱干渉を抑制することができる。

このような貫通孔 5 1、5 2 を有する配線基板 5 によれば、第 1 パッケージ 2 2 および第 2 パッケージ 3 6 を配線基板 5 に設置することにより、光出射部 2 1 および光検出部 3 2 を含む光学系の位置決めを行うことができる。そのため、配線基板 5 に対する第 1 パッケージ 2 2 および第 2 パッケージ 3 6 の設置を容易なものとすることができる。

【 0 0 7 6 】

また、第 1 パッケージ 2 2 および第 2 パッケージ 3 6 を保持する部材を配線基板 5 とは別途設ける場合に比し、部品点数を少なくすることができる。その結果、原子発振器 1 の低コスト化および小型化を図ることができる。

10

また、本実施形態では、前述したように、配線基板 5 には、第 1 パッケージ 2 2 が挿入される貫通孔 5 1 と、第 2 パッケージ 3 6 が挿入される貫通孔 5 2 とが個別に形成されているため、配線基板 5 の剛性を優れたものとしつつ、第 1 パッケージ 2 2 および第 2 パッケージ 3 6 を配線基板 5 で保持することができる。

【 0 0 7 7 】

また、貫通孔 5 3 内には、光学部品 4 1 の一部が挿入され、これにより、光学部品 4 1 は、配線基板 5 に対して X 軸方向、Y 軸方向および Z 軸方向での位置決めがされている。

同様に、貫通孔 5 4 内には、光学部品 4 2 の一部が挿入され、これにより、光学部品 4 2 は、配線基板 5 に対して X 軸方向、Y 軸方向および Z 軸方向での位置決めがされている。

20

【 0 0 7 8 】

また、貫通孔 5 5 内には、光学部品 4 3 の一部が挿入され、これにより、光学部品 4 3 は、配線基板 5 に対して X 軸方向、Y 軸方向および Z 軸方向での位置決めがされている。

このような貫通孔 5 3、5 4、5 5 を有する配線基板 5 によれば、光学部品 4 1、4 2、4 3 をそれぞれ保持するので、原子発振器 1 の製造時に配線基板 5 の各部品を取り付ける際、第 1 パッケージ 2 2 および第 2 パッケージ 3 6 を配線基板 5 に保持させた状態で、光学部品 4 1、4 2、4 3 をその位置または姿勢を調整しながら配線基板に設置することができる。

【 0 0 7 9 】

30

貫通孔 5 3 は、第 1 パッケージ 2 2 と第 2 パッケージ 3 6 とを結ぶ線分に沿った軸線（例えば、軸 a）周りに光学部品 4 1 を回転可能に保持し得る。これにより、光学部品 4 1 を配線基板 5 の貫通孔 5 3 に係合させて軸 a に平行な方向での位置決めを行った状態で、光学部品 4 1 の軸 a 周りの姿勢を調整することができる。

同様に、貫通孔 5 4 は、第 1 パッケージ 2 2 と第 2 パッケージ 3 6 とを結ぶ線分に沿った軸線周りに光学部品 4 2 を回転可能に保持し得る。また、貫通孔 5 5 は、第 1 パッケージ 2 2 と第 2 パッケージ 3 6 とを結ぶ線分に沿った軸線周りに光学部品 4 3 を回転可能に保持し得る。

【 0 0 8 0 】

本実施形態では、貫通孔 5 3、5 4、5 5 は、光学部品 4 1、4 2、4 3 の板面が互いに平行となるように形成されている。また、貫通孔 5 3、5 4、5 5 は、光学部品 4 1、4 2、4 3 の板面がそれぞれ軸 a に対して垂直となるように形成されている。なお、貫通孔 5 3、5 4、5 5 は、光学部品 4 1、4 2、4 3 の板面が互いに非平行となるように形成されていてもよいし、光学部品 4 1、4 2、4 3 の板面がそれぞれ軸 a に対して傾斜するように形成されていてもよい。

40

ここで、前述したように光学部品 4 1 が $\lambda/4$ 波長板であるため、配線基板 5 に対する第 1 パッケージ 2 2 の姿勢によらず、光学部品 4 1 を回転により姿勢を調整することにより、光出射部 2 1 からの励起光を直線偏光から円偏光へ変換することができる。

【 0 0 8 1 】

光学部品 4 1、4 2、4 3 を配線基板 5 に設置するに際しては、例えば、まず、配線基

50

板 5 に第 1 ユニット 2 および第 2 ユニット 3 を設置・固定する。その後、光学部品 4 1、4 2、4 3 をそれぞれ対応する貫通孔 5 3、5 4、5 5 に係合させた状態で、E I T 信号等を確認しながら、各光学部品 4 1、4 2、4 3 の位置および姿勢のうちの少なくとも一方を変化させる。そして、所望の E I T 信号を確認したとき、その状態で、各光学部品 4 1、4 2、4 3 を配線基板 5 に対して固定する。かかる固定は、特に限定されないが、例えば、光硬化性接着剤を用いるのが好適である。光硬化性接着剤は、硬化前であれば各貫通孔 5 3、5 4、5 5 に供給しても各光学部品 4 1、4 2、4 3 の位置または姿勢を変化させることができ、そして、所望時に短時間で硬化させて固定を行える。

このような配線基板 5 としては、各種プリント配線基板を用いることができるが、前述したように保持した第 1 パッケージ 2 2、第 2 パッケージ 3 6 および光学部品 4 1、4 2、4 3 の位置関係を維持するのに必要な剛性を確保する観点から、リジット部を有する基板、例えば、リジット基板、リジットフレキシブル基板等を用いるのが好ましい。

【 0 0 8 2 】

なお、配線基板 5 として、リジット部を有しない配線基板（例えば、フレキシブル基板）を用いた場合であっても、例えば、かかる配線基板に、剛性を向上させるための補強部材を接合することにより、第 1 パッケージ 2 2、第 2 パッケージ 3 6 および光学部品 4 1、4 2、4 3 の位置関係を維持することができる。

このような配線基板 5 の一方の面には、制御部 6 およびコネクタ 7 1、7 2 が設置されている。なお、配線基板 5 には、制御部 6 以外の電子部品が搭載されていてもよい。

【 0 0 8 3 】

[制御部]

図 1 に示す制御部 6 は、ヒーター 3 3、コイル 3 5 および光出射部 2 1 をそれぞれ制御する機能を有する。

本実施形態では、制御部 6 は、配線基板 5 に搭載された I C (Integrated Circuit) チップで構成されている。

このような制御部 6 は、光出射部 2 1 の共鳴光 1、2 の周波数を制御する励起光制御部（光出射部制御部）6 1 と、ガスセル 3 1 中のアルカリ金属の温度を制御する温度制御部 6 2 と、ガスセル 3 1 に印加する磁場を制御する磁場制御部 6 3 とを有する。

【 0 0 8 4 】

温度制御部 6 2 は、温度センサー 3 4 の検出結果に基づいて、ヒーター（加熱部）3 3 の駆動を制御する、すなわち、ヒーター 3 3 への通電を制御する。これにより、ガスセル 3 1 を所望の温度範囲内に維持することができる。

また、磁場制御部 6 3 は、コイル 3 5 が発生する磁場が一定となるように、コイル 3 5 への通電を制御する。

【 0 0 8 5 】

また、励起光制御部 6 1 は、前述した光検出部 3 2 の検出結果に基づいて、光出射部 2 1 の駆動を制御する、すなわち、光出射部 2 1 から出射される共鳴光 1、2 の周波数を制御する。より具体的には、励起光制御部 6 1 は、前述した光検出部 3 2 の検出結果に基づいて、前述した周波数差（ $\omega 1 - \omega 2$ ）がアルカリ金属固有の周波数 $\omega 0$ となるように、光出射部 2 1 から出射される共鳴光 1、2 の周波数を制御する。

【 0 0 8 6 】

また、励起光制御部 6 1 は、水晶発振器（発振回路）1 3 と、水晶発振器の出力端子に電氣的に接続された通倍器 6 1 1 とを備えており、その水晶発振器 1 3 の発振周波数（共振周波数）を光検出部 3 2 の検出結果に基づいて同期・調整しながら原子発振器 1 の出力信号として出力する。水晶発振器 1 3 としては、例えば、電圧制御型水晶発振器等を用いることができる。

ここで、前記水晶発振器 1 3 の発振周波数の調整について、具体例として、アルカリ金属固有の周波数 $\omega 0$ が 9 . 2 G H z であり、水晶発振器 1 3 の発振周波数を 1 0 k H z に保持し、その 1 0 k H z の信号を原子発振器 1 の出力信号として出力する場合を例に挙げて説明する。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 7 】

まず、水晶発振器 1 3 から出力された信号（周波数：1 0 k H z）は、通倍器 6 1 1 で 4.6×10^5 倍（周波数：4.6 G H z）に通倍され、所定の直流電流と合成され、周波数変調された後、光出射部 2 1 に送出される。光出射部 2 1 は、その信号で駆動され、前述した励起光 L L を出射し、ガスセル 3 1 内を透過した励起光 L L は、光検出部 3 2 で受光される。光検出部 3 2 では、励起光 L L の強度が検出され、この光検出部 3 2 の検出結果は、励起光制御部 6 1 に入力される。励起光制御部 6 1 では、E I T 信号の強度と、予め設定された閾値とを比較し、E I T 信号の強度が閾値以上であれば、水晶発振器 1 3 が 1 0 k H z で発振しているものと判定し、水晶発振器 1 3 の発振周波数をロック（固定）する。

10

【 0 0 8 8 】

しかし、水晶発振器 1 3 の水晶が経時的に劣化すること等の理由で、水晶発振器 1 3 の発振周波数は、長期間の間には経時的に変化してしまう。そこで、水晶発振器 1 3 の発振周波数の調整が行われる。

水晶発振器 1 3 の発振周波数の調整の際は、水晶発振器 1 3 の発振周波数を 1 0 k H z 付近で変更しつつ、前記のようにして、E I T 信号の強度と閾値とを比較し、その E I T 信号の強度が閾値以上のときに、水晶発振器 1 3 の発振周波数をロックする。これにより、水晶発振器 1 3 が 1 0 k H z で発振する状態が保持される。

【 0 0 8 9 】

〔コネクタ〕

20

コネクタ 7 1（第 1 コネクタ）は、第 1 パッケージ 2 2 に装着され、光出射部 2 1 と配線基板 5 とを電氣的に接続する機能を有する。これにより、コネクタ 7 1 を介して、第 1 パッケージ 2 2 内の光出射部 2 1 が制御部 6 に電氣的に接続されている。

また、コネクタ 7 2（第 2 コネクタ）は、第 2 パッケージ 3 6 に装着され、光検出部 3 2、ヒーター 3 3、温度センサー 3 4、コイル 3 5 等と配線基板 5 とを電氣的に接続する機能を有する。これにより、コネクタ 7 2 を介して、第 2 パッケージ 3 6 内の光検出部 3 2、ヒーター 3 3、温度センサー 3 4 およびコイル 3 5 が制御部 6 に電氣的に接続されている。

【 0 0 9 0 】

コネクタ 7 1 は、図 4 に示すように、第 1 パッケージ 2 2 に装着されるコネクタ部 7 1 2 と、配線基板 5 に固定される固定部 7 1 3 と、コネクタ部 7 1 2 と固定部 7 1 3 とを接続するケーブル部 7 1 4 とを備える。

30

コネクタ部 7 1 2 は、シート状をなし、その厚さ方向に貫通する複数の貫通孔 7 1 1 を有する。

【 0 0 9 1 】

この複数の貫通孔 7 1 1 は、第 1 パッケージ 2 2 の複数のリード 2 2 3 に対応して設けられている。この複数の貫通孔 7 1 1 には、それぞれ対応して、複数のリード 2 2 3 が挿通されている。

このような複数のリード 2 2 3 は、それぞれ、例えば半田等により、図 5 に示すようにコネクタ部 7 1 2 に対して固定されるとともに、コネクタ部 7 1 2 に設けられた配線（図示せず）に電氣的に接続されている。

40

【 0 0 9 2 】

一方、固定部 7 1 3 は、シート状をなし、例えば異方性導電接着剤（A C F）等により、図 5 に示すように配線基板 5 に対して固定されるとともに、固定部 7 1 3 に設けられた配線（図示せず）が前述した配線基板 5 の配線（図示せず）に電氣的に接続されている。

また、この固定部 7 1 3 の配線（図示せず）は、ケーブル部 7 1 4 に設けられた配線（図示せず）を介して、コネクタ部 7 1 2 の配線（図示せず）に電氣的に接続されている。

【 0 0 9 3 】

以上説明したようなコネクタ 7 1 と同様に、コネクタ 7 2 は、図 4 に示すように、

50

第２パッケージ３６に装着されるコネクタ部７２２と、配線基板５に固定される固定部７２３と、コネクタ部７２２と固定部７２３とを接続するケーブル部７２４とを備える。

コネクタ部７２２は、シート状をなし、その厚さ方向に貫通する複数の貫通孔７２１を有する。

【００９４】

この複数の貫通孔７２１は、第２パッケージ３６の複数のリード３６３に対応して設けられている。この複数の貫通孔７２１には、それぞれ対応して、複数のリード３６３が挿通されている。

このような複数のリード３６３は、それぞれ、例えば半田等により、図５に示すようにコネクタ部７２２に対して固定されるとともに、コネクタ部７２２に設けられた配線（図示せず）に電氣的に接続されている。

【００９５】

一方、固定部７２３は、シート状をなし、例えば異方性導電接着剤（ＡＣＦ）等により、図５に示すように配線基板５に対して固定されるとともに、固定部７２３に設けられた配線（図示せず）が前述した配線基板５の配線（図示せず）に電氣的に接続されている。

また、この固定部７２３の配線（図示せず）は、ケーブル部７２４に設けられた配線（図示せず）を介して、コネクタ部７２２の配線（図示せず）に電氣的に接続されている。

【００９６】

このようなコネクタ部７１、７２は、それぞれ、フレキシブル基板で構成されている。すなわち、コネクタ部７１にあっては、コネクタ部７１２、固定部７１３およびケーブル部７１４がそれぞれフレキシブル基板で構成されているとともに、コネクタ部７１２、固定部７１３およびケーブル部７１４が一体で構成されている。同様に、コネクタ部７２にあっては、コネクタ部７２２、固定部７２３およびケーブル部７２４がそれぞれフレキシブル基板で構成されているとともに、コネクタ部７２２、固定部７２３およびケーブル部７２４が一体で構成されている。

このようにフレキシブル基板で構成されたコネクタ部７１、７２を用いることにより、原子発振器１の小型化および低コスト化を図ることができる。

【００９７】

なお、光出射部２１と配線基板５との電氣的な接続、および、光検出部３２等と配線基板５との電氣的な接続は、それぞれ、前述したコネクタ部７１、７２に限定されず、例えば、コネクタ部がソケット状をなすものであってもよい。

以上説明した原子発振器１は、図１に示すように、配線基板５に設けられ、電源１６に電氣的に接続された電源端子１５を有しており、電源１６から電源端子１５には、電源電圧が印加されている。なお、電源１６は、原子発振器１に内蔵または着脱自在でもよく、また、原子発振器１の外部の電源であってもよい。

【００９８】

電源端子１５の出力端子は、励起光制御部６１および温度制御部６２に電氣的に接続されており、電源電圧は、電源端子１５を介して励起光制御部６１および温度制御部６２に印加されている。

また、原子発振器１は、配線基板５に設けられ、ヒーター３３に印加される電圧を昇圧する昇圧回路１４を有している。昇圧回路１４は、電源端子１５とヒーター３３との間に設けられており、その昇圧回路１４の入力端子は、電源端子１５に電氣的に接続され、昇圧回路１４の出力端子は、ヒーター３３に電氣的に接続されている。これにより、電源電圧は、昇圧回路１４で昇圧されてヒーター３３に印加される。これによって、ヒーター３３に供給する電力を一定に保持しつつ、ヒーター３３を流れる電流を小さくすることができる。これにより、ヒーター３３へ通電した際にヒーター３３を流れる電流により発生する磁場を小さくでき、その磁場がガスセル３１内に悪影響を及ぼすことを防止または抑制することができる。

【0099】

昇圧回路14としては、電圧を昇圧できるものであれば、特に限定されないが、例えば、スイッチングレギュレータ等のスイッチングレギュレータ機能を有するものが好ましい。スイッチングレギュレータ機能は直流電圧を異なる値の直流電圧に変換して出力する機能であり、スイッチングレギュレータ機能を有する昇圧回路を用いることにより、高効率かつ低コストとすることができる。

【0100】

また、昇圧回路14としてスイッチングレギュレータ機能を有する昇圧回路を用いる場合、スイッチング周波数は、特に限定されず、諸条件により適宜設定されるものであるが、10kHz以上、10MHz以下であることが好ましく、100kHz以上、3MHz以下であることがより好ましい。ここで、ヒーター33への通電により発生する磁場は、昇圧回路14のスイッチング周波数に依存する成分を有する。一方、光出射部21は、低周波数（例えば、100Hz程度）で周波数変調された信号で駆動され、励起光LLを出射するので、原子共鳴は、その周波数変調の周波数付近の周波数成分を有する磁場の影響を受け易い。このため、スイッチング周波数は、前記周波数変調の周波数から離間させることが好ましい。したがって、スイッチング周波数が前記下限値よりも小さいと、他の条件によっては、そのヒーター33への通電により発生する磁場が原子共鳴へ悪影響を及ぼすこととなる。また、スイッチング周波数が前記上限値よりも大きいと、他の条件によっては、出力周波数に近づくために、例えば出力信号にノイズが発生することになる。

【0101】

また、昇圧回路14の電圧の増幅率は、特に限定されず、諸条件により適宜設定されるものであるが、2倍以上、5倍以下であることが好ましく、3倍以上、4.5倍以下であることがより好ましい。なお、前記電圧の増幅率とは、増幅後の電圧を増幅前の電圧で除した値である。電圧の増幅率が前記下限値よりも小さいと、他の条件によっては、ヒーター33への通電により発生する磁場が大きくなり過ぎることがある。また、電圧の増幅率が前記上限値よりも大きいと、他の条件によっては、高耐圧の部材が必要になり、装置の大型化、高コスト化を招くことや、ノイズが大きくなることがある。

【0102】

また、ヒーター33に供給する電流は、特に限定されず、諸条件により適宜設定されるものであるが、1.5A以下であることが好ましく、300mA以下であることがより好ましく、1mA以上、300mA以下であることがさらに好ましい。また、ヒーター33に印加する電圧は、特に限定されず、諸条件により適宜設定されるものであるが、6V以上、15V以下であることが好ましく、8V以上、14V以下であることがより好ましい。

また、昇圧回路14の出力端子は、光出射部21、光検出部32、励起光制御部61および温度制御部62等の他の部位には電氣的に接続されていない。すなわち、この昇圧回路14は、ヒーター33専用のものである。これにより、昇圧回路14の各パラメーターをヒーター33に対して最適になるように自在に設定することができる。

【0103】

以上説明したように、原子発振器1によれば、まず、電源電圧を小さくすることで消費電力を低減することができる。そして、昇圧回路14でヒーター33に印加される電圧を昇圧することにより、ヒーター33に供給する電力を一定に保持しつつ、ヒーター33を流れる電流を減少させることができ、これにより、ヒーター33への通電によりそのヒーター33で発生する磁場を小さくすることができる。これによって、ヒーター33で発生する磁場がガスセル31内に悪影響を及ぼすことを防止または抑制することができ、ガスセル31の内部空間Sに発生させる磁場を安定させることができ、原子発振器1の発振周波数の精度を向上させることができる。また、磁気シールドを簡素化することが可能になる。

【0104】

2. 電子機器

10

20

30

40

50

以上説明したような原子発振器は、各種電子機器に組み込むことができる。このような電子機器は、優れた信頼性を有する。

以下、本発明の電子機器について説明する。

図8は、GPS衛星を利用した測位システムに本発明の原子発振器を用いた場合のシステム構成概要図である。

図8に示す測位システム100は、GPS衛星200と、基地局装置300と、GPS受信装置400とで構成されている。

【0105】

GPS衛星200は、測位情報（GPS信号）を送信する。

基地局装置300は、例えば電子基準点（GPS連続観測局）に設置されたアンテナ301を介してGPS衛星200からの測位情報を高精度に受信する受信装置302と、この受信装置302で受信した測位情報をアンテナ303を介して送信する送信装置304とを備える。

【0106】

ここで、受信装置302は、その基準周波数発振源として前述した本発明の原子発振器1を備える電子装置である。このような受信装置302は、優れた信頼性を有する。また、受信装置302で受信された測位情報は、リアルタイムで送信装置304により送信される。

GPS受信装置400は、GPS衛星200からの測位情報をアンテナ401を介して受信する衛星受信部402と、基地局装置300からの測位情報をアンテナ403を介して受信する基地局受信部404とを備える。

【0107】

3. 移動体

図9は、本発明の移動体の一例を示す図である。

この図において、移動体1500は、車体1501と、4つの車輪1502とを有しており、車体1501に設けられた図示しない動力源（エンジン）によって車輪1502を回転させるように構成されている。このような移動体1500には、原子発振器1が内蔵されている。

このような移動体によれば、優れた信頼性を発揮することができる。

【0108】

なお、本発明の原子発振器（本発明の量子干渉装置）を備える電子機器は、前述したものに限定されず、例えば、携帯電話機、デジタルスチルカメラ、インクジェット式吐出装（例えばインクジェットプリンター）、パーソナルコンピューター（モバイル型パーソナルコンピューター、ラップトップ型パーソナルコンピューター）、テレビ、ビデオカメラ、ビデオテープレコーダー、カーナビゲーション装置、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、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）、フライトシミュレーター、地上デジタル放送、携帯電話基地局等に適用することができる。

【0109】

以上、本発明の量子干渉装置、原子発振器、電子機器および移動体について、図示の実施形態に基づいて説明したが、本発明は、これらに限定されるものではない。

また、本発明の量子干渉装置、原子発振器、電子機器および移動体では、各部の構成は、同様の機能を発揮する任意の構成のものに置換することができ、また、任意の構成を付加することもできる。

また、本発明は、前述した各実施形態の任意の構成同士を組み合わせるようにしてもよい。

【0110】

また、本発明は、加熱部に印加される電圧を昇圧する昇圧回路を有していれば、原子発

10

20

30

40

50

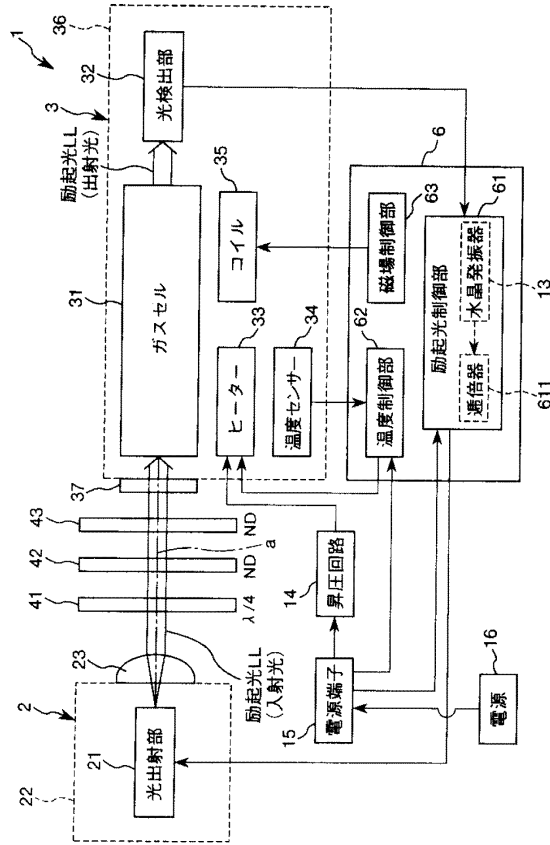
例えば、前述した実施形態では、光出射部と光検出部との間にガスセルが配置されている構造を例に説明したが、光出射部および光検出部をガスセルに対して同じ側に配置し、ガスセルの光出射部および光検出部とは反対側の面、または、ガスセルの光出射部および光検出部とは反対側に設けられたミラーで反射した光を光検出部で検出してもよい。

また、前述した実施形態では、配線基板に形成された貫通孔に第 1 パッケージ、第 2 パッケージおよび光学部品をそれぞれ係合させた場合を例に説明したが、これに限定されず、例えば、第 1 パッケージ、第 2 パッケージおよび光学部品を配線基板の一方の面上に配置してもよいし、第 1 パッケージ、第 2 パッケージおよび光学部品を一括して箱状またはブロック状のホルダーで保持し、そのホルダーを配線基板上に配置してもよい。また、1 つのパッケージ内に、光射出部、ガスセル、光検出部等を含む複数の構成部品を収納してもよい。

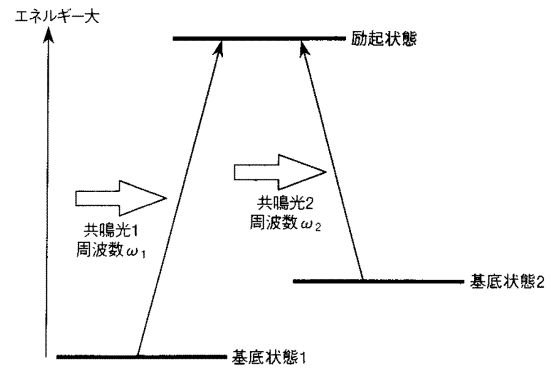
【 0 1 1 2 】

1	原子発振器	2	第1ユニット	3	第2ユニット	5	配線基板	6		
制御部	1 3	水晶発振器	1 4	昇圧回路	1 5	電源端子	1 6	電源	2	20
1	光射出部	2 2	パッケージ	2 3	窓部	3 1	ガスセル	3 2	光検	
出部	3 3	ヒーター	3 3 1	ケーシング	3 4	温度センサー	3 5	コイ		
ル	3 6	パッケージ	3 7	窓部	4 1	光学部品	4 2	光学部品	4 3	
	光学部品	5 1	貫通孔	5 2	貫通孔	5 3	貫通孔	5 4	貫通孔	5 5
	貫通孔	6 1	励起光制御部	6 2	温度制御部	6 3	磁場制御部	7 1		
	コネクター	7 2	コネクター	1 0 0	測位システム	2 0 0	G P S 衛星			
2 2 1	基体	2 2 2	蓋体	2 2 3	リード	3 0 0	基地局装置	3 0 1		
	アンテナ	3 0 2	受信装置	3 0 3	アンテナ	3 0 4	送信装置	3 1 1		
	本体部	3 1 1 a	貫通孔	3 1 2	窓部	3 1 3	窓部	3 6 1	基体	3
6 2	蓋体	3 6 3	リード	4 0 0	G P S 受信装置	4 0 1	アンテナ	4	30	
0 2	衛星受信部	4 0 3	アンテナ	4 0 4	基地局受信部	6 1 1	通倍器			
	7 1 1	貫通孔	7 1 2	コネクター部	7 1 3	固定部	7 1 4	ケーブル		
部	7 2 1	貫通孔	7 2 2	コネクター部	7 2 3	固定部	7 2 4	ケーブル		
ル部	1 5 0 0	移動体	1 5 0 1	車体	1 5 0 2	車輪	a	軸	L L	
励起光	S	内部空間								

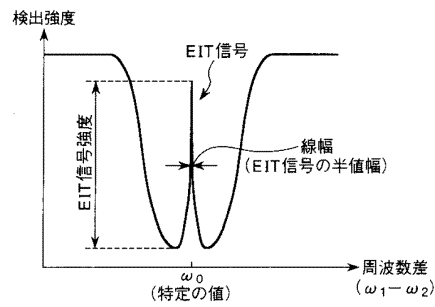
【図 1】



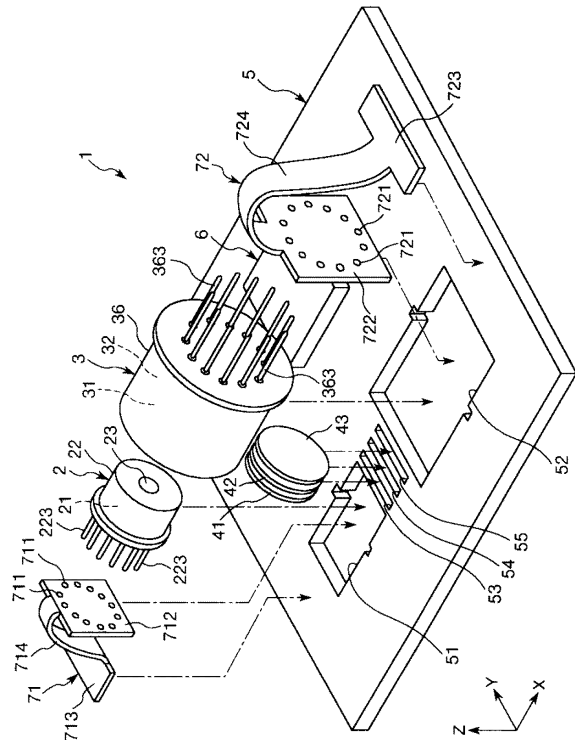
【図 2】



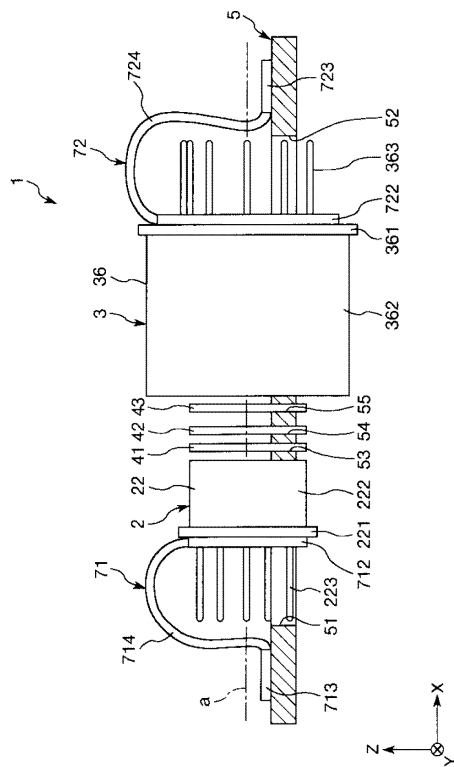
【図 3】



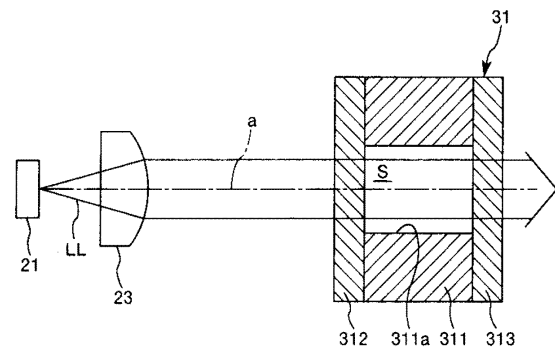
【図 4】



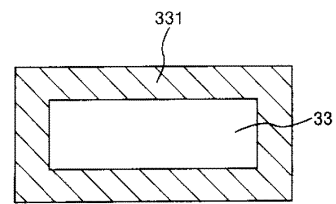
【 図 5 】



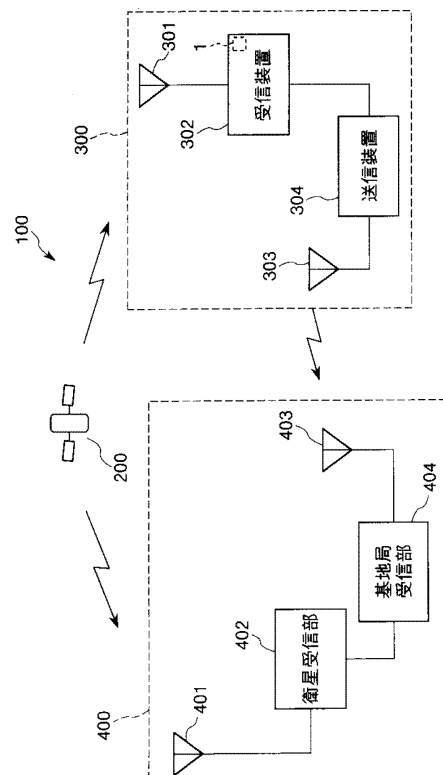
【 図 6 】



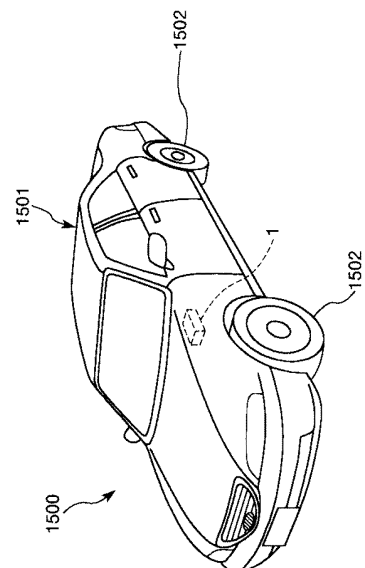
【 圖 7 】



【圖 8】



【 図 9 】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開 2 0 1 3 - 0 3 0 5 1 3 (J P , A)
特開 2 0 0 5 - 0 0 0 1 1 1 (J P , A)
特開 2 0 1 2 - 2 5 7 4 0 8 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)
H 0 3 L 7 / 2 6
H 0 1 S 1 / 0 6