

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6519169号  
(P6519169)

(45) 発行日 令和1年5月29日 (2019.5.29)

(24) 登録日 令和1年5月10日 (2019.5.10)

(51) Int.Cl.		F I	
<b>H O 1 S</b>	<b>1/06</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>H O 1 S</b> 1/06
<b>H O 3 L</b>	<b>7/26</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>H O 3 L</b> 7/26
<b>G O 4 F</b>	<b>5/14</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>G O 4 F</b> 5/14

請求項の数 13 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2014-257006 (P2014-257006)	(73) 特許権者	000002369
(22) 出願日	平成26年12月19日 (2014.12.19)		セイコーエプソン株式会社
(65) 公開番号	特開2016-119351 (P2016-119351A)		東京都新宿区新宿四丁目1番6号
(43) 公開日	平成28年6月30日 (2016.6.30)	(74) 代理人	100091292
審査請求日	平成29年12月13日 (2017.12.13)		弁理士 増田 達哉
		(74) 代理人	100091627
			弁理士 朝比 一夫
		(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
		(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
		審査官	島田 英昭
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子共鳴遷移装置、原子発振器、時計、電子機器および移動体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

原子を封入している原子セルと、  
 前記原子の D 1 線に共鳴する第 1 光を出射する第 1 光源部と、  
 前記第 1 光と異なる波長であって前記原子の D 1 線または D 2 線に共鳴する第 2 光を出射する第 2 光源部と、  
 前記原子セルを通過した前記第 1 光と前記第 2 光との干渉による光ビートを検出してビート信号を生成する検出部と、  
 前記ビート信号を分周する分周器を含む出力部と、  
 を備えることを特徴とする原子共鳴遷移装置。

【請求項 2】

前記第 2 光は、前記原子の D 2 線に共鳴する光である請求項 1 に記載の原子共鳴遷移装置。

【請求項 3】

前記第 2 光は、前記原子の D 1 線に共鳴する光である請求項 1 に記載の原子共鳴遷移装置。

【請求項 4】

前記原子は、アルカリ金属原子である請求項 1 ないし 3 のいずれか 1 項に記載の原子共鳴遷移装置。

【請求項 5】

10

20

前記アルカリ金属原子は、セシウム原子である請求項 4 に記載の原子共鳴遷移装置。

【請求項 6】

前記第 1 光の波長が前記原子の吸収スペクトルのピーク波長となるように前記第 1 光源部を制御する第 1 制御部を備える請求項 1 ないし 5 のいずれか 1 項に記載の原子共鳴遷移装置。

【請求項 7】

前記第 1 制御部は、前記第 1 光の波長が前記原子の飽和吸収スペクトルのピーク波長となるように前記第 1 光源部を制御する請求項 6 に記載の原子共鳴遷移装置。

【請求項 8】

前記第 2 光の波長が前記原子の吸収スペクトルのピーク波長となるように前記第 2 光源部を制御する第 2 制御部を備える請求項 1 ないし 7 のいずれか 1 項に記載の原子共鳴遷移装置。

10

【請求項 9】

前記第 2 制御部は、前記第 2 光の波長が前記原子の飽和吸収スペクトルのピーク波長となるように前記第 2 光源部を制御する請求項 8 に記載の原子共鳴遷移装置。

【請求項 10】

前記第 1 光と前記第 2 光とが前記原子セル内で交差する請求項 7 または 9 に記載の原子共鳴遷移装置。

【請求項 11】

請求項 1 ないし 10 のいずれか 1 項に記載の原子共鳴遷移装置を備えることを特徴とする原子発振器。

20

【請求項 12】

請求項 1 ないし 10 のいずれか 1 項に記載の原子共鳴遷移装置を備えることを特徴とする時計。

【請求項 13】

請求項 1 ないし 10 のいずれか 1 項に記載の原子共鳴遷移装置を備えることを特徴とする電子機器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

30

本発明は、原子共鳴遷移装置、原子発振器、時計、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。

【0003】

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 (例えば、特許文献 1 参照)。

40

【0004】

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、気体状のアルカリ金属原子を封入したガスセルと、ガスセル中のアルカリ金属原子を共鳴させる共鳴光対 (第 1、第 2 の光) を出射する光源と、ガスセルを透過した共鳴光対を検出する光検出部と、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アルカリ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

50

検出器で検出し、その E I T 信号を基準信号として用いる。

【 0 0 0 5 】

また、特許文献 1 に係る原子発振器では、回路部分の小型化や省電力化を図る目的で、ガスセルを透過した複数の光の干渉により得られるビート信号に基づいて、第 1、第 2 の光が E I T 現象を生じさせる共鳴光対となるように周波数制御を行う。

【 0 0 0 6 】

しかし、量子干渉効果を利用した原子発振器、すなわち、E I T 信号を基準信号として用いる原子発振器では、一般に、ガスセル内のアルカリ金属原子に定磁場を印加することが行われる。そのため、特許文献 1 に係る原子発振器においても、磁場発生のためのコイルや、外部磁場を遮蔽するためのシールド等が必要となり、その結果、装置の小型化を十分に図ることができないという問題があった。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 7 】

【特許文献 1】特開 2 0 1 1 - 1 6 0 2 5 1 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 8 】

本発明の目的は、小型化を図ることができる原子共鳴遷移装置を提供すること、また、かかる原子共鳴遷移装置を備える原子発振器、時計、電子機器および移動体を提供することにある。

20

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 9 】

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。

【 0 0 1 0 】

[ 適用例 1 ]

本発明の原子共鳴遷移装置は、原子を封入している原子セルと、  
前記原子の D 1 線に共鳴する第 1 光を出射する第 1 光源部と、  
前記第 1 光と異なる波長であって前記原子の D 1 線または D 2 線に共鳴する第 2 光を出射する第 2 光源部と、  
前記原子セルを通過した前記第 1 光と前記第 2 光との干渉による光ビートを検出してビート信号を生成する検出部と、  
を備えることを特徴とする。

30

【 0 0 1 1 】

このような原子共鳴遷移装置によれば、電磁誘起透明化現象による信号である E I T 信号を用いずに、ビート信号を用いて、原子のエネルギー遷移に基づく高精度な発振特性を有する原子発振器を実現することができる。そのため、従来のように E I T 信号を用いた装置に必要であった磁気コイル、磁気シールドおよび偏光板等の部品が不要となり、その結果、装置の小型化を図ることができる。しかも、第 1 光および第 2 光のうちの少なくとも第 1 光として原子の D 1 線に共鳴する光を用いるため、D 2 線のみを用いた場合に比べて、原子の吸収の線幅を狭くすることができ、その結果、S / N 比を向上させることができる。

40

【 0 0 1 2 】

[ 適用例 2 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記第 2 光は、前記原子の D 2 線に共鳴する光であることが好ましい。

【 0 0 1 3 】

これにより、第 1 光の波長と第 2 光の波長との差を大きくして、ビート信号の周波数を高くすることができる。その結果、短期安定度を高めることができる。

50

## 【 0 0 1 4 】

## [ 適用例 3 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記第 2 光は、前記原子の D 1 線に共鳴する光であることが好ましい。

## 【 0 0 1 5 】

これにより、第 1 光および第 2 光の双方について原子の吸収の線幅を狭くすることができる。

## 【 0 0 1 6 】

## [ 適用例 4 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記原子は、アルカリ金属原子であることが好ましい 10

## 【 0 0 1 7 】

これにより、原子の吸収の線幅を比較的簡単に狭くすることができる。また、ビート信号に混入するノイズを低減することができる。

## 【 0 0 1 8 】

## [ 適用例 5 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記アルカリ金属原子は、セシウム原子であることが好ましい。

## 【 0 0 1 9 】

セシウム原子は、アルカリ金属の中でも、D 1 線と D 2 線との周波数差が比較的大きい 20  
。そのため、第 1 光の波長と第 2 光の波長との差を大きくして、ビート信号の周波数を高くすることができる。

## 【 0 0 2 0 】

## [ 適用例 6 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記第 1 光の波長が前記原子の吸収スペクトルのピーク波長となるように前記第 1 光源部を制御する第 1 制御部を備えることが好ましい。

これにより、第 1 光を原子の D 1 線に共鳴させることができる。

## 【 0 0 2 1 】

## [ 適用例 7 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記第 1 制御部は、前記第 1 光の波長が前記原子の飽 30  
和吸収スペクトルのピーク波長となるように前記第 1 光源部を制御することが好ましい。

これにより、第 1 光による原子の吸収の線幅を狭くすることができる。

## 【 0 0 2 2 】

## [ 適用例 8 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記第 2 光の波長が前記原子の吸収スペクトルのピーク波長となるように前記第 2 光源部を制御する第 2 制御部を備えることが好ましい。

これにより、第 2 光を原子の D 1 線または D 2 線に共鳴させることができる。

## 【 0 0 2 3 】

## [ 適用例 9 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記第 2 制御部は、前記第 2 光の波長が前記原子の飽 40  
和吸収スペクトルのピーク波長となるように前記第 2 光源部を制御することが好ましい。

これにより、第 2 光による原子の吸収の線幅を狭くすることができる。

## 【 0 0 2 4 】

## [ 適用例 1 0 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記第 1 光と前記第 2 光とが前記原子セル内で交差することが好ましい。

## 【 0 0 2 5 】

これにより、第 1 光および第 2 光の少なくとも一方の光の波長が原子の飽和吸収スペクトルとなるように制御することができる。

## 【 0 0 2 6 】

## [ 適用例 1 1 ]

本発明の原子共鳴遷移装置では、前記ビート信号を用いてクロック信号を出力する出力部を備えることが好ましい。

これにより、ビート信号に基づく高精度なクロック信号を得ることができる。

## 【 0 0 2 7 】

## [ 適用例 1 2 ]

本発明の原子発振器は、本発明の原子共鳴遷移装置を備えることを特徴とする。

これにより、小型な原子発振器を提供することができる。

## 【 0 0 2 8 】

## [ 適用例 1 3 ]

本発明の時計は、本発明の原子共鳴遷移装置を備えることを特徴とする。

これにより、小型な原子共鳴遷移装置を備える時計を提供することができる。

## 【 0 0 2 9 】

## [ 適用例 1 4 ]

本発明の電子機器は、本発明の原子共鳴遷移装置を備えることを特徴とする。

これにより、小型な原子共鳴遷移装置を備える電子機器を提供することができる。

## 【 0 0 3 0 】

## [ 適用例 1 5 ]

本発明の移動体は、本発明の原子共鳴遷移装置を備えることを特徴とする。

これにより、小型な原子共鳴遷移装置を備える移動体を提供することができる。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 3 1 】

【図 1】本発明の第 1 実施形態に係る原子発振器（原子共鳴遷移装置）を示す概略図である。

【図 2】原子セル内の原子（セシウム原子）のエネルギー状態と共鳴光対（第 1 光、第 2 光）との関係の一例を示す図である。

【図 3】図 1 に示す第 1 光源部および第 2 光源部からそれぞれ出射される光を説明するための図である。

【図 4】図 3 に示す原子セルの横断面図である。

【図 5】（ a ）は、原子セル内の原子の吸収スペクトルを示す図、（ b ）は、検出部で検出されるビート信号を示す図である。

【図 6】本発明の第 2 実施形態に係る原子発振器（原子共鳴遷移装置）を示す概略図である。

【図 7】図 6 に示す第 1 光源部および第 2 光源部からそれぞれ出射される光を説明するための図である。

【図 8】本発明の時計の一例を示す斜視図である。

【図 9】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概略構成を示す図である。

【図 10】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 】

## 【 0 0 3 2 】

以下、本発明の原子共鳴遷移装置、原子発振器、時計、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。

## 【 0 0 3 3 】

## 1. 原子発振器（原子共鳴遷移装置）

まず、本発明の原子発振器（本発明の原子共鳴遷移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、本発明の原子共鳴遷移装置を原子発振器に適用した例を説明するが、本発明の原子共鳴遷移装置は、これに限定されず、例えば、磁気センサー、量子メモリ等のデバイスにも適用可能である。

## 【 0 0 3 4 】

## &lt; 第 1 実施形態 &gt;

図 1 は、本発明の第 1 実施形態に係る原子発振器（原子共鳴遷移装置）を示す概略図である。図 2 は、原子セル内の原子（セシウム原子）のエネルギー状態と共鳴光対（第 1 光、第 2 光）との関係の一例を示す図である。図 3 は、図 1 に示す第 1 光源部および第 2 光源部からそれぞれ出射される光を説明するための図、図 4 は、図 3 に示す原子セルの横断面図である。図 5（a）は、原子セル内の原子の吸収スペクトルを示す図、図 5（b）は、検出部で検出されるビート信号を示す図である。

## 【 0 0 3 5 】

図 1 に示す原子発振器 1 は、原子を封入している原子セル 2（ガスセル）と、原子セル 2 内の原子に照射する第 1 光 L L 1 を出射する第 1 光源部 3 1 と、原子セル 2 内の原子に照射する第 2 光 L L 2 を出射する第 2 光源部 3 2 と、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 を合成して原子セル 2 に入射させる光学部品 3 3、3 4 と、原子セル 2 を透過した第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 を検出する検出部 4 と、第 1 光 L L 1 の波長を制御する第 1 制御部 5 1 と、第 2 光 L L 2 の波長を制御する第 2 制御部 5 2 と、検出部 4 の検出結果を用いてクロック信号を出力する出力部 5 3 と、を備えている。

## 【 0 0 3 6 】

この原子発振器 1 では、第 1 光源部 3 1 から出射する第 1 光 L L 1 の波長と第 2 光源部 3 2 から出射する第 2 光 L L 2 の波長とが互いに異なっていて、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 が互いに重なり合っとうなり（光ビート L L）を生じさせる。ここで、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 の波長は、第 1 制御部 5 1 および第 2 制御部 5 2 により原子セル 2 内の原子の吸収スペクトルに一致するように高精度に制御される。特に、第 1 光 L L 1 が原子セル 2 内の原子の D 1 線に共鳴するように制御され、また、第 2 光 L L 2 が原子セル 2 内の原子の D 1 線または D 2 線に共鳴するように制御される。

## 【 0 0 3 7 】

そして、検出部 4 において、光ビート L L の周波数と等しいビート信号を検出し、出力部 5 3 において、このビート信号を用いてクロック信号を生成・出力する。

## 【 0 0 3 8 】

このような原子発振器 1 によれば、電磁誘起透明化現象による信号である E I T 信号を用いずに、光ビート L L に基づくビート信号を用いて、原子のエネルギー遷移に基づく高精度な発振特性を有する原子発振器を実現することができる。したがって、E I T 信号を生じさせる必要がないし、また、E I T 信号を生じさせたとしても、その E I T 信号を用いる必要がない。そのため、従来のように E I T 信号を用いた装置に必要であった磁気コイル、磁気シールドおよび偏光板等の部品が不要となり、その結果、装置の小型化を図ることができる。しかも、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 のうちの少なくとも第 1 光 L L 1 として原子の D 1 線に共鳴する光を用いるため、D 2 線のみを用いた場合に比べて、原子の吸収の線幅を狭くすることができ、その結果、S / N 比を向上させることができる。

## 【 0 0 3 9 】

以下、原子発振器 1 の各部を順次説明する。

## 〔 原子セル 〕

原子セル 2 内には、ガス状の原子が封入されている。この原子としては、少なくとも 2 つの異なる共鳴波長の遷移を有するもの、すなわち、吸収スペクトルが少なくとも 2 つのピークを有するものであれば、あらゆる原子を用いることができるが、吸収スペクトルのピークの線幅が狭く、かつ、容易にガス状とすることができるという観点から、ルビジウム原子、セシウム原子、ナトリウム原子等のアルカリ金属原子を用いることが好ましい。また、原子セル 2 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。ただし、吸収スペクトルのピークの線幅を狭くするという観点から、原子セル 2 内には、アルカリ金属原子以外の原子ができるだけ含まれないことが好ましい。なお、以下では、原子セル 2 内にアルカリ金属原子を封入した場合を例に説明する。

## 【 0 0 4 0 】

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

#### 【0041】

$6S_{1/2}$  の  $F = 3$  の第 1 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  $F = 4$  の第 2 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  $F = 3$  または  $F = 4$  の基底準位（元の基底準位または他方の基底準位のいずれか）に遷移することができる。このような  $6S_{1/2}$  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 準位は、D 2 線の吸収・発光による 型の遷移が可能であることから 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 準位も、D 1 線の吸収・発光による 型の遷移が可能であるから 型 3 準位を形成する。

#### 【0042】

これに対し、 $6P_{3/2}$  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。したがって、 $6S_{1/2}$  の  $F = 3$ 、 $4$  の 2 つの基底準位と  $6P_{3/2}$  の  $F = 2$  または  $F = 5$  の励起準位からなる 3 準位は、D 2 線の吸収・放出による 型の遷移が不可能であることから 型 3 準位を形成しない。

#### 【0043】

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。

#### 【0044】

このようなアルカリ金属を封入している原子セル 2 は、図 3 および図 4 に示すように、胴体部 21 と、胴体部 21 を挟んで設けられた 1 対の窓部 22、23 とを有している。この原子セル 2 では、胴体部 21 が 1 対の窓部 22、23 の間に配置されていて、気体状のアルカリ金属が封入されている内部空間 S を胴体部 21 および 1 対の窓部 22、23 が区画形成（構成）している。

#### 【0045】

より具体的に説明すると、胴体部 21 は、板状をなしており、この胴体部 21 には、胴体部 21 の厚さ方向に貫通している貫通孔 211 が形成されている。

#### 【0046】

この胴体部 21 の構成材料としては、特に限定されず、ガラス材料、水晶、金属材料、樹脂材料、シリコン材料等が挙げられるが、中でも、ガラス材料、水晶、シリコン材料のいずれかをを用いることが好ましく、シリコン材料を用いることがより好ましい。これにより、幅や高さが 10 mm 以下となるような小さい原子セル 2 を形成する場合であっても、エッチング等の微細加工技術を用いて、高精度な胴体部 21 を容易に形成することができる。特に、シリコンは、エッチングによる微細加工が可能である。したがって、シリコンを用いて胴体部 21 を構成することにより、原子セル 2 の小型化を図っても、胴体部 21 を簡単かつ高精度に形成することができる。また、一般に、窓部 22、23 はガラスで構成されるが、シリコンはガラスに比べて熱伝導性に優れている。したがって、胴体部 21 の放熱性を優れたものとすることができる。また、窓部 22、23 がガラスで構成されて

10

20

30

40

50

いる場合、胴体部 2 1 と窓部 2 2、2 3 とを陽極接合により簡単に気密的に接合することができ、原子セル 2 の信頼性を優れたものとすることができる。

【0047】

このような胴体部 2 1 の一方の面には、窓部 2 2 が接合され、一方、胴体部 2 1 の他方の面には、窓部 2 3 が接合されている。これにより、貫通孔 2 1 1 の一端開口が窓部 2 2 により封鎖されるとともに、貫通孔 2 1 1 の他端開口が窓部 2 3 により封鎖されている。

【0048】

このように、貫通孔 2 1 1 を窓部 2 2、2 3 により封鎖することにより、気体状のアルカリ金属原子が封入されている内部空間 S が形成されている。本実施形態では、貫通孔 2 1 1 の横断面、すなわち、内部空間 S の横断面は、円形をなしている。なお、内部空間 S の横断面形状は、円形に限定されず、例えば、四角形、五角形等の多角形、楕円形等であってもよい。

【0049】

胴体部 2 1 と窓部 2 2、2 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、気密的に接合できるものであれば、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、表面活性化接合法等を用いることができるが、直接接合法または陽極接合法を用いることが好ましい。これにより、胴体部 2 1 と窓部 2 2、2 3 とを簡単に気密的に接合することができ、原子セル 2 の信頼性を優れたものとすることができる。

【0050】

このような胴体部 2 1 に接合されている各窓部 2 2、2 3 は、それぞれ、板状をなしていて、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 に対する透過性を有している。そして、一方の窓部 2 2 は、原子セル 2 の内部空間 S 内へ第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 が入射する入射側窓部であり、他方の窓部 2 3 は、原子セル 2 の内部空間 S 内から第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 が出射する出射側窓部である。

【0051】

窓部 2 2、2 3 の構成材料としては、それぞれ、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 に対する透過性を有していれば、特に限定されず、例えば、ガラス材料、水晶等が挙げられるが、ガラス材料を用いることが好ましい。これにより、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 に対する優れた透過性を有する窓部 2 2、2 3 を実現することができる。また、胴体部 2 1 がシリコンで構成されている場合、ガラスを用いて窓部 2 2、2 3 を構成することにより、胴体部 2 1 と窓部 2 2、2 3 とを陽極接合により簡単に気密的に接合することができ、原子セル 2 の信頼性を優れたものとすることができる。なお、窓部 2 2、2 3 の厚さや第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 の強度によっては、窓部 2 2、2 3 をシリコンで構成することもできる。この場合でも、胴体部 2 1 と窓部 2 2、2 3 とを直接接合または陽極接合することができる。

【0052】

このような原子セル 2 は、図示しないヒーターにより所望の温度に温度制御される。これにより、原子セル 2 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。

【0053】

[ 第 1 光源部・第 2 光源部 ]

第 1 光源部 3 1 は、前述した原子セル 2 内の原子の D 1 線に共鳴する第 1 光 L L 1 ( 第 1 共鳴光 ) を出射する機能を有する。一方、第 2 光源部 3 2 は、第 1 光 L L 1 と異なる波長であって原子セル 2 内の原子の D 1 線または D 2 線に共鳴する第 2 光 L L 2 ( 第 2 共鳴光 ) を出射する機能を有する。ここで、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 は、それぞれ、可干渉性 ( コヒーレント性 ) を有する光である。

【0054】

例えば、原子セル 2 内の原子がセシウム原子である場合、第 1 光 L L 1 の波長は、D 1 線 ( 第 1 基底準位から  $6P_{1/2}$  励起準位への遷移 ) に共鳴する 894 nm であり、第 2 光 L L 2 の波長は、D 2 線 ( 第 1 基底準位から  $6P_{3/2}$  励起準位への遷移 ) に共鳴する

10

20

30

40

50



850 nmである(図2参照)。なお、第2光LL2の波長は、D1線(第2基底準位から $6P_{1/2}$ 励起準位への遷移)に共鳴する波長であってもよく、この波長は、第1基底準位と第2基底準位とのエネルギー差Eに相当する波長の分だけ、第1光LL1の波長とは異なることになる。

【0055】

このような第1光源部31および第2光源部32は、それぞれ、前述したような光を射出し得るものであれば特に限定されないが、例えば、端面発光レーザー、垂直共振器面発光レーザー(VCS EL)等の半導体レーザーを用いて構成することができる。

【0056】

[光学部品]

光学部品33は、例えば、ミラーであり、光学部品34は、例えば、偏光ビームスプリッターである。

【0057】

光学部品33は、第2光源部32からの第2光LL2を光学部品34に向けて反射する。そして、光学部品34は、第1光源部31からの第1光LL1をそのまま通過させて原子セル2へ入射させるとともに、光学部品33で反射した第2光LL2を反射させて原子セル2へ入射させる。したがって、図3に示すように、第1光LL1および第2光LL2は、互いに光軸が一致する(または平行となる)ように合成され、原子セル2に入射する。

【0058】

ここで、光学部品33、34は、第1光LL1と第2光LL2とを合成する「合成部」を構成している。このような合成部により、第1光LL1および第2光LL2を互いに光軸を一致させて原子セル2に照射することができる。なお、光学部品33を省略してもよい。この場合、第2光LL2が光学部品34に入射するような向きで、第2光源部32を設置すればよい。

【0059】

このように合成された第1光LL1および第2光LL2は、互いの光軸が一致または平行となっていて、かつ、互いに異なる波長であるため、干渉により光ビートLL(ビート信号光)となる。図3では、第1光LL1の光軸a1および第2光LL2の光軸a2がそれぞれ原子セル2の中心軸aと一致している場合を図示しているが、これらの軸が互いに平行であればよい。

【0060】

また、合成された第1光LL1および第2光LL2は、図3および図4では、第1光LL1の通過領域が第2光LL2の通過領域に包含されているが、これらの通過領域が一致していてもよいし、第2光LL2の通過領域が第1光LL1の通過領域に包含されていてもよいし、これらの光の通過領域の一部同士が重なっていてもよい。ここで、効率的に干渉を生じさせる観点から、原子セル2内において、第1光LL1の幅W1は、第2光LL2の幅W2にできるだけ近いことが好ましく、具体的には、幅W2に対して0.8以上1.2以下であることが好ましい。また、幅W1、W2は、それぞれ、原子セル2内の幅Wよりも小さいことが好ましく、具体的には、幅Wに対して0.5以上0.99以下であることが好ましい。

【0061】

[検出部]

検出部4は、原子セル2内を透過した第1光LL1および第2光LL2の強度を検出する機能を有する。

【0062】

ここで、原子セル2内を通過した第1光LL1および第2光LL2は、前述したように干渉により光ビートLL(ビート信号光)となっている。検出部4は、この光ビートLLを検出して、光ビートLLのうなりの周波数(ビート周波数)と等しい周波数のビート信号を含む検出信号を生成・出力する機能を有する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 6 3 】

例えば、原子セル 2 内の原子がアルカリ金属原子である場合、吸収スペクトルは、図 5 ( a ) に示すように、D 1 線による隣接する 2 つのピーク P 1 1、P 1 2 と、D 2 線による隣接する 2 つのピーク P 2 1、P 2 2 と、を有する。ピーク P 1 1 は、図 2 に示す第 2 基底準位から  $6P_{1/2}$  励起準位への遷移に対応し、ピーク P 1 2 は、図 2 に示す第 1 基底準位から  $6P_{1/2}$  励起準位への遷移に対応し、ピーク P 2 1 は、図 2 に示す第 2 基底準位から  $6P_{3/2}$  励起準位への遷移に対応し、ピーク P 2 2 は、図 2 に示す第 1 基底準位から  $6P_{3/2}$  励起準位への遷移に対応している。

## 【 0 0 6 4 】

したがって、例えば、図 2 に示すように、第 1 基底準位から  $6P_{1/2}$  励起準位へ遷移する D 1 線を第 1 光 L L 1 として用い、第 1 基底準位から  $6P_{3/2}$  励起準位へ遷移する D 2 線を第 2 光 L L 2 として用いた場合、ピーク P 1 2 の周波数とピーク P 2 2 の周波数との差は、第 1 光 L L 1 の周波数  $f_1$  と第 2 光 L L 2 の周波数  $f_2$  との差 ( $f_2 - f_1$ ) となる。例えば、原子セル 2 内の原子がセシウム原子である場合、周波数差 ( $f_2 - f_1$ ) は  $16.6 \text{ THz}$  であり、原子セル 2 内の原子がナトリウム原子である場合、周波数差 ( $f_2 - f_1$ ) は  $515 \text{ GHz}$  であり、原子セル 2 内の原子がルビジウム原子である場合、周波数差 ( $f_2 - f_1$ ) は  $7.12 \text{ THz}$  である。

## 【 0 0 6 5 】

そして、図 5 ( b ) に示すように、光ビート L L のビート周波数は、この周波数差 ( $f_2 - f_1$ ) に等しい周波数となる。すなわち、光ビート L L の周期は、 $1 / (f_2 - f_1)$  となる。

## 【 0 0 6 6 】

なお、第 1 基底準位から  $6P_{1/2}$  励起準位へ遷移する D 1 線を第 1 光 L L 1 として用い、第 2 基底準位から  $6P_{1/2}$  励起準位へ遷移する D 1 線を第 2 光 L L 2 として用いた場合、光ビート L L のビート周波数は、ピーク P 1 1 の周波数とピーク P 1 2 の周波数との差、すなわち、図 2 に示す第 1 基底準位と第 2 基底準位とのエネルギー差  $E$  に相当する周波数  $f_3$  に等しい周波数となる。例えば、原子セル 2 内の原子がセシウム原子である場合、周波数  $f_3$  は  $9.2 \text{ GHz}$  であり、原子セル 2 内の原子がナトリウム原子である場合、周波数  $f_3$  は  $1.7716 \text{ GHz}$  であり、原子セル 2 内の原子がルビジウム ( $^{85}\text{Rb}$ ) 原子である場合、周波数  $f_3$  は  $3.0357 \text{ GHz}$  であり、原子セル 2 内の原子がルビジウム ( $^{87}\text{Rb}$ ) 原子である場合、周波数  $f_3$  は  $6.8346 \text{ GHz}$  である。

## 【 0 0 6 7 】

また、ピーク P 1 1、P 1 2 のそれぞれの線幅は、ピーク P 2 1、P 2 2 のそれぞれの線幅よりも狭い。

## 【 0 0 6 8 】

このような検出部 4 としては、前述したような吸収スペクトルおよび光ビート L L を検出し得るものであれば、特に限定されないが、例えば、フォトダイオード等の光検出器 (高速受光素子) を用いることができる。

## 【 0 0 6 9 】

[ 第 1 制御部および第 2 制御部 ]

第 1 制御部 5 1 は、前述した検出部 4 の検出結果を用いて、第 1 光源部 3 1 を制御する機能を有する。同様に、第 2 制御部 5 2 は、検出部 4 の検出結果を用いて、第 2 光源部 3 2 を制御する機能を有する。

## 【 0 0 7 0 】

より具体的に説明すると、第 1 制御部 5 1 は、検出部 4 の検出結果を用いて、第 1 光 L L 1 の波長が原子セル 2 内の原子の吸収スペクトルのピーク波長 (例えば図 5 ( a ) に示すピーク P 1 2 の波長) となるように、第 1 光源部 3 1 を制御する。これにより、第 1 光 L L 1 を原子セル 2 内の原子の D 1 線に共鳴させることができる。

## 【 0 0 7 1 】

また、第 2 制御部 5 2 は、検出部 4 の検出結果を用いて、第 2 光 L L 2 の波長が原子セ

10

20

30

40

50

ル 2 内の原子の吸収スペクトルのピーク波長（例えば図 5（a）に示すピーク P 2 2 の波長）となるように、第 2 光源部 3 2 を制御する。これにより、第 2 光 L L 2 を原子セル 2 内の原子の D 2 線に共鳴させることができる。

【0072】

このような第 1 制御部 5 1 および第 2 制御部 5 2 は、それぞれ、例えば、検波回路、変調回路および低周波発振器を有して構成することができ、フィードバックループにより、第 1 光源部 3 1 および第 2 光源部 3 2 が有する半導体レーザーのバイアス電流を設定し、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 の中心波長を前述したような波長となるように調整する。

【0073】

なお、本実施形態では、第 1 制御部 5 1 および第 2 制御部 5 2 が、検出部 4 の検出結果を用いて第 1 光源部 3 1 および第 2 光源部 3 2 を制御しているが、検出部 4 とは別途設けられた検出部（受光素子）の検出結果を用いて第 1 光源部 3 1 および第 2 光源部 3 2 を制御してもよい。この場合、例えば、原子セル 2 と検出部 4 との間に偏光ビームスプリッターを配置し、分岐した光ビーム L L を別途の検出部で受光すればよい。

【0074】

〔出力部〕

出力部 5 3 は、前述した検出部 4 の検出結果を用いて、クロック信号を出力する機能を有する。これにより、ビート信号に基づく高精度なクロック信号を得ることができる。

【0075】

具体的に説明すると、出力部 5 3 は、検出部 4 の検出信号に含まれるビート信号を分周し、クロック信号（例えば 10 MHz または 1 Hz のクロック信号）を生成・出力する。

【0076】

このような出力部 5 3 は、例えば、フリップフロップ回路および DDS（Direct Digital Synthesizer）を有して構成することができ、また、出力部 5 3 は、必要に応じて、検出部 4 の検出信号からビート信号のみを選択して取り出すフィルター、ビート信号を増幅させる信号増幅回路等の他の回路を有していてもよい。

【0077】

以上説明したような原子発振器 1 によれば、電磁誘起透明化現象による信号である EIT 信号を用いずに、ビート信号を用いて、原子のエネルギー遷移に基づく高精度な発振特性を有する原子発振器を実現することができる。したがって、EIT 信号を生じさせる必要がないし、また、EIT 信号を生じさせたとしても、その EIT 信号を用いる必要がない。そのため、従来のように EIT 信号を用いた装置に必要であった磁気コイル、磁気シールドおよび偏光板等の部品が不要となり、その結果、装置の小型化を図ることができる。しかも、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 のうちの少なくとも第 1 光 L L 1 として原子の D 1 線に共鳴する光を用いるため、D 2 線のみを用いた場合に比べて、原子の吸収の線幅を狭くすることができ、その結果、S/N 比を向上させることができる。

【0078】

ここで、第 2 光 L L 2 が原子の D 2 線に共鳴する光であることにより、第 1 光 L L 1 の波長と第 2 光 L L 2 の波長との差を大きくして、ビート信号の周波数を高く（大きく）することができる。その結果、短期安定度を高めることができる。

【0079】

これに対し、第 2 光 L L 2 が原子の D 1 線に共鳴する光であることにより、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 の双方について、原子の吸収の線幅を狭くすることができる。

【0080】

また、原子セル 2 内の原子がアルカリ金属原子であることにより、原子の吸収の線幅を比較的簡単に狭くすることができる。また、ビート信号に混入するノイズを低減することができる。特に、セシウム原子は、アルカリ金属の中でも、D 1 線と D 2 線との周波数差が比較的大きい。そのため、第 1 光 L L 1 が D 1 線、第 2 光 L L 2 が D 2 線である場合において、原子セル 2 内の原子がセシウム原子であることにより、第 1 光 L L 1 の波長と第

10

20

30

40

50

2 光 L L 2 の波長との差を大きくして、ビート信号の周波数を高くすることができる。

【 0 0 8 1 】

< 第 2 実施形態 >

次に、本発明の第 2 実施形態について説明する。

【 0 0 8 2 】

図 6 は、本発明の第 2 実施形態に係る原子発振器（原子共鳴遷移装置）を示す概略図、図 7 は、図 6 に示す第 1 光源部および第 2 光源部からそれぞれ出射される光を説明するための図である。

【 0 0 8 3 】

本実施形態は、飽和吸収スペクトルを用いて第 1 光および第 2 光の波長を制御する以外は、前述した第 1 実施形態と同様である。

【 0 0 8 4 】

なお、以下の説明では、第 2 実施形態に関し、前述した実施形態との相違点を中心に説明し、同様の事項に関してはその説明を省略する。また、図 6、7 において、前述した実施形態と同様の構成については、同一符号を付している。

【 0 0 8 5 】

図 6 に示す原子発振器 1 A は、光学部品 3 4 と原子セル 2 との間で第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 を分岐して異なる 2 つの方向から原子セル 2 に照射するように配置された光学部品 3 5、3 6、3 7 を備えている。

【 0 0 8 6 】

光学部品 3 5 は、例えば、偏光ビームスプリッターであり、光学部品 3 6、3 7 は、それぞれ、例えば、ミラーである。

【 0 0 8 7 】

光学部品 3 5 は、光学部品 3 4 からの第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 を、そのまま通過させて原子セル 2 へ入射させるとともに、光学部品 3 6 に向けて反射させる。すなわち、光学部品 3 5 は、光学部品 3 4 からの第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 からなる光を、原子セル 2 に入射する光 L L a と、光学部品 3 6 に入射する光 L L b とに分岐する。光 L L a は、原子セル 2 を介して検出部 4 で受光される。一方、光 L L b は、光学部品 3 7 で反射して、図 7 に示すように、光 L L a とは異なる方向で原子セル 2 に入射する。そして、原子セル 2 を通過した光 L L b は、図示しない反射防止部に入射する。図 7 では、光 L L a の光軸と光 L L b の光軸とが原子セル 2 内において直交する場合を示している。なお、光 L L b の光軸は、光 L L a の光軸と異なる方向であればよく、図示のものに限定されない。また、本実施形態では、原子セル 2 の胴体部 2 1 は、光 L L b に対する透過性を有するように構成されている。

【 0 0 8 8 】

このように光 L L b を光 L L a と異なる方向から原子セル 2 内に入射させることにより、検出部 4 において、原子セル 2 内の原子の飽和吸収スペクトルのピークを検出することができる。この飽和吸収スペクトルのピークは、通常の吸収スペクトルのピークよりも線幅が狭い。

【 0 0 8 9 】

そこで、第 1 制御部 5 1 は、第 1 光 L L 1 の波長が原子セル 2 内の原子の飽和吸収スペクトルのピーク波長となるように第 1 光源部 3 1 を制御する。これにより、第 1 光 L L 1 による原子の吸収の線幅を狭くすることができる。同様に、第 2 制御部 5 2 は、第 2 光 L L 2 の波長が原子セル 2 内の原子の飽和吸収スペクトルのピーク波長となるように第 2 光源部 3 2 を制御する。これにより、第 2 光 L L 2 による原子の吸収の線幅を狭くすることができる。その結果、短期周波数安定度を向上させることができる。

【 0 0 9 0 】

このように、第 1 光 L L 1 と第 2 光 L L 2 とが原子セル 2 内で交差することにより、第 1 光 L L 1 および第 2 光 L L 2 の波長が原子セル 2 内の原子の飽和吸収スペクトルのピーク波長となるように制御することができる。

以上説明したような第２実施形態によっても、小型化を図ることができる。

【００９１】

２．時計

次に、本発明の時計の一例について説明する。図８は、本発明の時計の一例を示す斜視図である。

【００９２】

時計５００は、腕時計であり、手首に装着することができる。また、時計５００の内部には、前述したように小型化された原子発振器１が搭載されており、原子発振器１から出力されるクロック信号に基づく時刻を表示部５０１に表示することができる。

【００９３】

３．電子機器

図９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概略構成を示す図である。

【００９４】

図９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。

ＧＰＳ衛星２００は、測位情報（ＧＰＳ信号）を送信する。

【００９５】

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。

【００９６】

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。

【００９７】

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。

【００９８】

４．移動体

図１０は、本発明の移動体の一例を示す図である。

【００９９】

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。

【０１００】

なお、本発明の電子機器は、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置（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（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）、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、ＧＰＳモジュール等に適用することができる。

10

20

30

40

50

## 【 0 1 0 1 】

以上、本発明の原子共鳴遷移装置、原子発振器、時計、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。

## 【 0 1 0 2 】

また、本発明の各部の構成は、前述した実施形態の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。

## 【 符号の説明 】

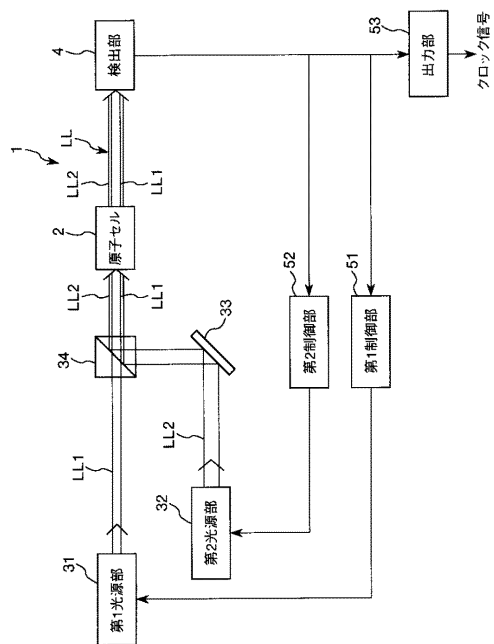
## 【 0 1 0 3 】

1	原子発振器	10
1 A	原子発振器	
2	原子セル	
4	検出部	
2 1	胴体部	
2 2	窓部	
2 3	窓部	
3 1	第 1 光源部	
3 2	第 2 光源部	
3 3	光学部品	
3 4	光学部品	20
3 5	光学部品	
3 6	光学部品	
3 7	光学部品	
5 1	第 1 制御部	
5 2	第 2 制御部	
5 3	出力部	
1 0 0	測位システム	
2 0 0	G P S 衛星	
2 1 1	貫通孔	
3 0 0	基地局装置	30
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	
4 0 0	G P S 受信装置	
4 0 1	アンテナ	
4 0 2	衛星受信部	
4 0 3	アンテナ	
4 0 4	基地局受信部	
5 0 0	時計	40
5 0 1	表示部	
1 5 0 0	移動体	
1 5 0 1	車体	
1 5 0 2	車輪	
a	中心軸	
a 1	光軸	
a 2	光軸	
f 1	周波数	
f 2	周波数	
f 3	周波数	50

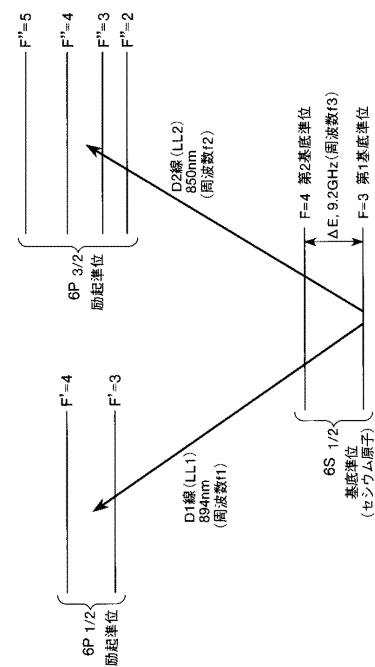
L L 光ビート  
 L L 1 第1光  
 L L 2 第2光  
 L L a 光  
 L L b 光  
 P 1 1 ピーク  
 P 1 2 ピーク  
 P 2 1 ピーク  
 P 2 2 ピーク  
 S 内部空間  
 W 幅  
 W 1 幅  
 W 2 幅  
 E エネルギー差

10

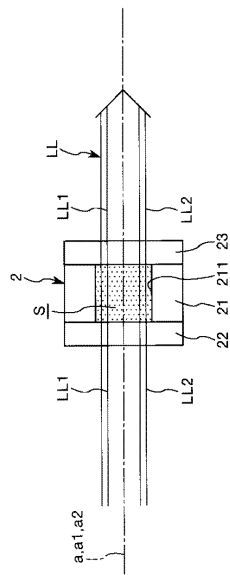
【図1】



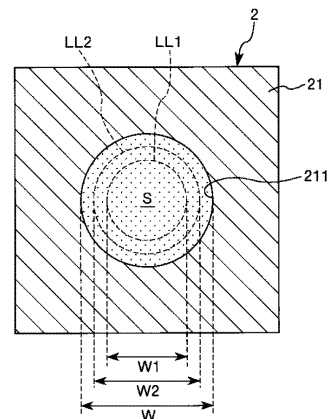
【図2】



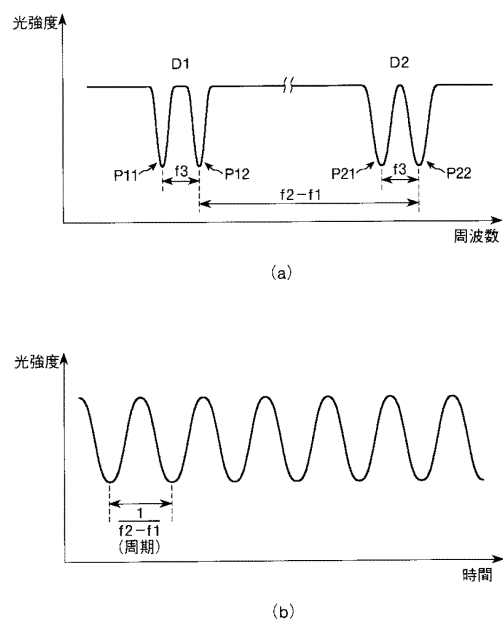
【 図 3 】



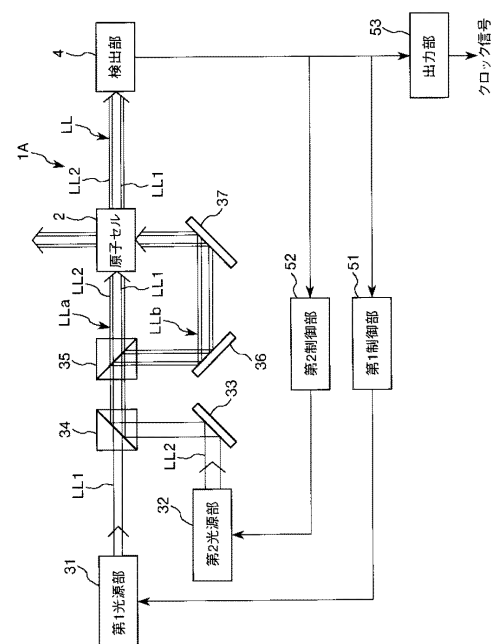
【 図 4 】



【 図 5 】

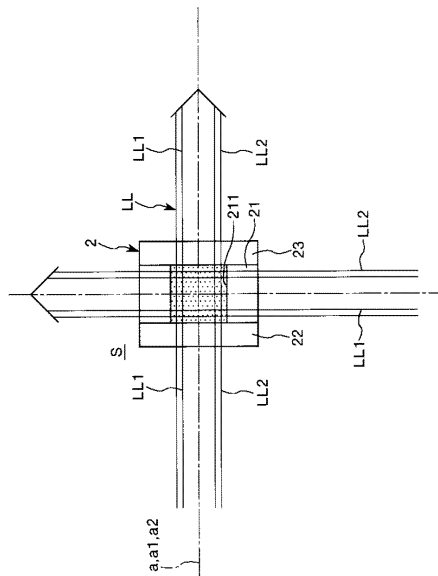


【 図 6 】

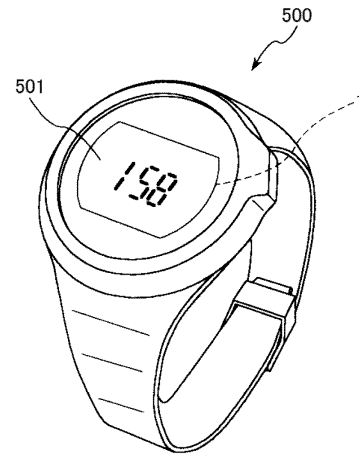




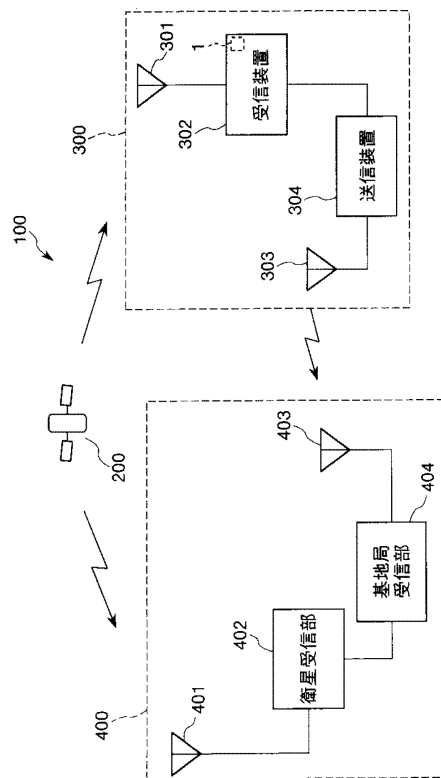
【図 7】



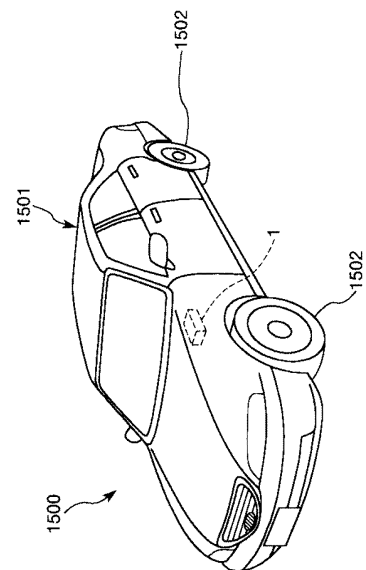
【図 8】



【図 9】



【図 10】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開昭62-154683(JP,A)  
特開2006-073755(JP,A)  
特開2012-190916(JP,A)  
特開平06-069583(JP,A)  
特開2000-261092(JP,A)  
特開2014-160351(JP,A)  
特開2014-022547(JP,A)  
特開2011-160251(JP,A)  
特開昭63-136682(JP,A)  
特表2014-523002(JP,A)  
米国特許第08873061(US,B1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 1/00 - 1/06  
G04F 5/14  
H03L 7/26