

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2018年5月31日(31.05.2018)



(10) 国際公開番号

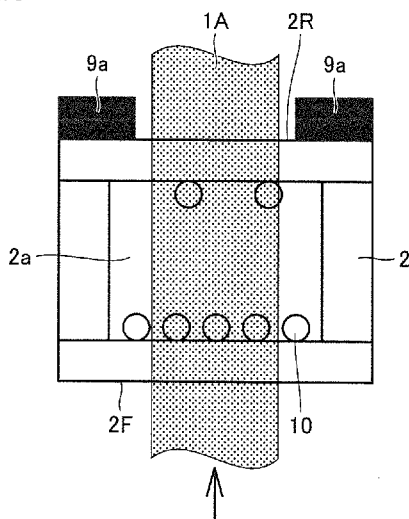
WO 2018/096730 A1

- (51) 国際特許分類:
H03L 7/26 (2006.01) *H01S 1/06* (2006.01)
G04F 5/14 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2017/027678
- (22) 国際出願日: 2017年7月31日(31.07.2017)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2016-226800 2016年11月22日(22.11.2016) JP
- (71) 出願人: 株式会社村田製作所
(MURATA MANUFACTURING CO., LTD.) [JP/
JP]; 〒6178555 京都府長岡京市東神足 1
丁目 1 0 番 1 号 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: 松田 賢二 (MATSUDA, Kenji);
〒6178555 京都府長岡京市東神足 1 丁目 1 0 番
1 号 株式会社村田製作所内 Kyoto (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人深見特許事務所(FUKAMI
PATENT OFFICE, P.C.); 〒5300005 大阪府大
阪市北区中之島三丁目 2 番 4 号 中之島フェス
ティバルタワー・ウエスト Osaka (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,

(54) Title: ATOMIC OSCILLATOR AND ELECTRONIC DEVICE

(54) 発明の名称: 原子発振器および電子機器

FIG.3



(57) Abstract: The purpose of the present invention is to provide: an atomic oscillator that either does not require a dimming filter at all, or at the least does not require a dimming filter having high dimming characteristics; and an electronic device provided with the atomic oscillator. According to the present invention, an atomic oscillator (100) is provided with: a light source (1); a gas cell (2) having an internal space (2a) in which alkali metal atoms are encapsulated; and a photodetector (3) that detects light which has been emitted from the light source (1) and transmitted through the gas cell (2). The light incident on an incidence window (2F) is dimmed by attaching, in a liquid or solid state on at least the incidence window (2F), the alkali metal atoms (10) encapsulated in the internal space (2a).

(57) 要約: 本発明の目的は、減光フィルタ自体を不要、または少なくとも減光特性の高い減光フィルタを不要とする原子発振器および原子発振器を備える電子機器を提供する。本発明は、光源(1)と、アルカリ金属原子が封入された内部空間(2a)を有するガスセル(2)と、光源(1)から出射され、ガスセル(2)を透過した光を検出する光検出器(3)とを備える原子発振器(100)である。内部空間(2a)に封入したアルカリ金属原子(10)を液体の状態または固体の状態として少なくとも入射窓(2F)に付着させることにより、入射窓(2F)に入射する光を減光する。

QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告(条約第21条(3))

明 細 書

発明の名称：原子発振器および電子機器

技術分野

[0001] 本発明は、原子発振器および原子発振器を備える電子機器に関する。

背景技術

[0002] 原子発振器は、ルビジウム、セシウム等の原子を気密封入したガスセルに 2 種類の波長の異なるレーザ光を照射することで、量子干渉効果 (Coherent Population Trapping (CPT)) を利用して共鳴周波数を得ることができ。ガスセル中の原子はレーザ光を吸収し、2 種類の光の周波数差に応じて光吸収特性 (透過率) が変化することが知られている。特に、原子発振器は、2 種類の光のいずれも吸収されずに透過する現象 (Electromagnetically Induced Transparency (EIT)) を利用して、原子に吸収されず透過する透過光スペクトルを EIT 信号として検出している。具体的な原子発振器の構成については、例えば特許文献 1 (特開 2013-239611 号公報) に開示されている。

[0003] 特許文献 1 に開示されている原子発振器では、光源である半導体レーザとガスセルとの間に減光フィルタ (ND フィルタ) を設けている。減光フィルタは、半導体レーザの出射光の一部のみを透過させ、減光フィルタを透過した光がガスセルに入射する。一般的に、半導体レーザを原子発振器に用いた場合、最適な EIT 信号を得るために必要とされる光強度以上の光がガスセルに入射されるので、ガスセルに入射する光を調整する減光フィルタが必須の構成となっている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献 1：特開 2013-239611 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] しかし、特許文献１に開示されている原子発振器では、光源とガスセルとの間に減光フィルタを設ける必要があるため、部品点数が多くなるという問題があった。また、原子発振器に減光フィルタを用いる場合であっても、減光フィルタのみで最適なＥＩＴ信号を得るために必要とされる光強度まで減光するには、減光特性の高い減光フィルタが必要となる。特に減光フィルタに吸収型を採用した場合、減光特性が厚みに依存するため高い減光特性を得るためには厚い減光フィルタが必要となる。その結果、特許文献１に開示されている原子発振器では、減光フィルタを小型化できない問題があった。

[0006] そこで、本発明の目的は、減光フィルタ自体を不要、または少なくとも減光特性の高い減光フィルタを不要とする原子発振器および原子発振器を備える電子機器を提供する。

課題を解決するための手段

[0007] 本発明の一形態に係る原子発振器は、光源と、アルカリ金属原子が封入された内部空間を有するガスセルと、光源から出射され、ガスセルを透過した光を検出する光検出部とを備え、ガスセルは、光源からの光を入射する入射窓と、光検出部に光を出射する出射窓と、入射窓と出射窓とを保持する側壁とを含み、内部空間に封入したアルカリ金属原子を液体の状態または固体の状態として少なくとも入射窓に付着させることにより、入射窓に入射する光を減光する。

[0008] 本発明の一形態に係る電子機器は、上記に記載の原子発振器を備える。

発明の効果

[0009] 本発明によれば、少なくとも入射窓に内部空間に封入したアルカリ金属原子を液体の状態または固体の状態として付着させることにより、入射窓に入射する光を減光するので、減光フィルタ自体を不要、または少なくとも減光特性の高い減光フィルタを不要とすることができる。

図面の簡単な説明

[0010] [図１]本発明の実施の形態１に係る原子発振器の構成を説明するための概略図である。

[図2]本発明の実施の形態 1 に係る原子発振器の機能を説明するためのブロック図である。

[図3]本発明の実施の形態 1 に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[図4]光源からの光の透過率と光検出部での信号強度との関係を説明するための図である。

[図5]光源からの光の透過率と E | T 信号の線幅との関係を説明するための図である。

[図6]光源からの光の周波数と E | T 信号との関係を説明するための図である。

[図7]本発明の実施の形態 1 の変形例に係る原子発振器の構成およびガスセル内の状態を説明するための概略図である。

[図8]本発明の実施の形態 1 の別の変形例に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[図9]本発明の実施の形態 2 に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[図10]本発明の実施の形態 2 の変形例に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[図11]本発明の実施の形態 3 に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[図12]本発明の実施の形態 3 の変形例に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[図13]本発明の実施の形態 4 に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[図14]本発明の実施の形態 5 に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[図15]熱伝導性の高い材料のパターンを形成した入射窓を構成を説明するための概略図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下に、本発明の実施の形態に係る原子発振器について図面を参照して詳しく説明する。なお、図中同一符号は同一または相当部分を示す。

[0012] (実施の形態 1)

以下に、本発明の実施の形態 1 に係る原子発振器について図面を参照しながら説明する。図 1 は、本発明の実施の形態 1 に係る原子発振器 100 の構成を説明するための概略図である。図 1 では、原子発振器 100 の構成のうち、光源 1 から光検出器 3 までは量子部について図示してある。原子発振器 100 は、量子部以外に、後述する光源波長制御回路 7 および周波数制御回路 8 の構成（図 2 参照）や、特に図示していないが信号源となる水晶発振器および量子部からの出力信号を水晶発振器にフィードバックするフィードバック回路などの構成を含んでいる。本願明細書では、説明を簡単にするために原子発振器の量子部について説明する。また、以下の記載において、原子発振器の量子部を単に原子発振器と記載する場合がある。

[0013] 図 1 に示す原子発振器 100 は、光源 1、ガスセル 2、光検出器 3、光学部材 4、波長板 5 およびヒータ 9a で構成されている。原子発振器 100 は、光源 1 からの光 1A を光学部材 4 および波長板 5 を介してガスセル 2 に入射し、ガスセル 2 を透過した光を光検出器 3 で検出して EIT 信号を得ている。

[0014] 図 2 は、本発明の実施の形態 1 に係る原子発振器 100 の機能を説明するためのブロック図である。図 2 に示す原子発振器 100 では、図 1 に示した原子発振器 100 の量子部の構成以外に、駆動するために必要な温度コントロール回路 6、9、光源波長制御回路 7、および周波数制御回路 8 も図示している。

[0015] さらに、図 1 および図 2 に示した原子発振器 100 の構成要素について詳しく説明する。光源 1 は、例えばシングルモードの VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting LASER) を用いる。具体的には、光の波長が 894.6 nm の Cs-D1 線の VCSEL を光源 1 に用いる。なお、光源 1 に

は、光の波長が852.3 nmのCs-D2線のVCSEL、795.0 nmのRb-D1線のVCSEL、780.2 nmのRb-D2線のVCSELなどを用いてもよい。また、光源1は、VCSELに限定されずDFB (Distributed Feedback) レーザやDBR (Distributed Bragg Reflector) レーザなどを用いてもよい。

[0016] 光源1にVCSELを用いる場合、VCSELの個体差により光の波長がばらつくため、温度コントロール回路6を用いて894.6 nmの波長の光が出力できるように調整している。温度コントロール回路6は、光源1の近傍に設けたサーミスタや熱電対で測定した温度に基づき、光源1に設けたヒータで温度を調節する。原子発振器100を原子時計に用いるのであれば、温度コントロール回路6は、光源1を30℃～125℃辺りの温度範囲で調節する。なお、温度コントロール回路6は、光源1の近くに配置されたサーミスタや熱電対などのセンサ（図示せず）によって温度を測定しながら光源1の温度を調節している。

[0017] VCSELから出力される光の波長を制御する方法として、温度を調整する以外に動作電流を調整する方法もある。CSAC (Chip-Scale Atomic Clock) 用途の原子発振器100に用いる光源1には、動作電流として0.8～2 mA程度のVCSELが用いられる。本実施の形態1に係る光源1では、VCSELの動作温度を76.9℃、動作電流（DC電流値）を1.1 mAとして実験を行っている。また、光源1のVCSELは、入力側にバイアス・ティ (Bias Tees) を設け、当該バイアス・ティでDC電流と4.596315885 GHzのRF信号とを合成した信号を入力側に入力している。そのため、光源1のVCSELは、周波数変調することでCsの遷移周波数である9.192631770 GHz差を持つ2つの光を1次のサイドバンドで作り出している。RF信号の信号強度は、VCSELまでの配線やVCSEL自体のインピーダンス、DC電流、動作温度によって最適値が異なるため測定系によって大きく値が異なる。本実施の形態1に係る光源1では、EIT信号の信号強度（ピークの信号強度とボトムの信号強度との差）が

最大となるように調整している。E I T 信号の信号強度が最大となる条件が、V C S E L からの光の 1 次のサイドバンドの強度が最大になる周波数変調に相当する。V C S E L を周波数変調した場合、1 次のサイドバンド以外にキャリア成分や 2 次以降の高次モードの成分も発生するが、これらの成分はノイズ要因となるため 1 次のサイドバンド以外の成分はなるべく抑圧することが望ましい。

[0018] 原子発振器 100 は、光源 1 とガスセル 2 の間にレンズ等の光学部材 4 を配置してある。光学部材 4 は、光源 1 から出射された拡散光を平行（コリメート）光にしたり、スポット径を変えたりとガスセル 2 に入射する光形状を調整するために用いられる。本実施の形態 1 に係る光学部材 4 では、スポット径が 2 mm となるようにコリメータレンズを使用している。なお、光源 1 のスポット径は、ピークの光強度に対して $1/e^2$ の光強度となる範囲とする一般的な定義を用いている。原子発振器 100 では、光学部材 4 で平行光になった光がガスセル 2 を透過して光検出器 3 に至る。

[0019] さらに、原子発振器 100 は、光源 1 とガスセル 2 の間に波長板 5 を配置してある。波長板 5 は、光源 1 からの光の偏光を変えるために用いる。光源 1 から出た光は、一般的に直線偏光である。直線偏光を用いた E I T 信号は、外部磁場により大きく変動するエネルギー準位を使用するため周波数変動が生じやすい。そのため、通常、原子発振器では、外部磁場による周波数変動の小さい準位を用いるため、波長板 5 を用いて光源 1 からの直線偏光の光を波長板 5 で円偏光の光に変えてガスセル 2 に入射している。本実施の形態 1 に係る波長板 5 では、右回り円偏光となるように波長板を配置している。なお、ガスセル 2 に入射する円偏光は、右回り円偏光でも左回り円偏光でもよい。

[0020] ガスセル 2 は、K, Na, Cs, Rb などのアルカリ金属ガス（原子）を気密封入した密封容器である。ガスセル 2 は、光源 1 に対する近方端に光を入射する入射窓（入射側）と、遠方端に光を出射する出射窓（出射側）と、入射窓と出射窓とを保持する側壁（側面）とで構成されている。原子発振器

のガスセルでは、Cs, Rbのアルカリ金属ガスが気密封入されている。ガスセル2のサイズが10mm以下の場合、内部空間2a内のアルカリ金属ガスを増やすため、ヒータ9aを温度コントロール回路9で調節してガスセル2を温めている。例えば、原子発振器に用いるガスセルであれば、使用温度として30℃～125℃程度である。温度コントロール回路9は、ガスセル2の近傍に設けたサーミスタや熱電対で測定した温度に基づき、ガスセル2に設けたヒータで温度を調節する。

[0021] ガスセル2で必要とされるアルカリ金属ガスの量は、飽和蒸気圧の量である。しかし、アルカリ金属ガスはガスセル2の容器と反応する等により徐々に消費されるため、ガスセル2には飽和蒸気圧の量よりも多くのアルカリ金属ガスが封入されている。具体的に、一辺の長さが数mm程度のガスセルであれば数 μ g程度のアルカリ金属ガスがガスセル2に封入してある。なお、飽和蒸気圧の量よりも多く封入したアルカリ金属原子は固体または液体の状態で内部空間2a内に留まることになる。

[0022] さらに、本実施の形態1に係るガスセル2では、ヒータ9aを用いて内部空間2a内に留まる固体または液体の状態のアルカリ金属原子を、入射窓に集めて付着させている。具体的に、アルカリ金属原子が相対的に温度の低い領域に固体または液体の状態となって集まる性質を利用して、ガスセル2の出射窓に設けたヒータ9aで出射窓を加熱して、出射窓に対して入射窓の温度を低くして、アルカリ金属原子を入射窓に集めて付着させている。図3は、本発明の実施の形態1に係るガスセル2内の状態を説明するための図である。図3に示すガスセル2では、光源1から出た光1Aを遮らない出射窓2Rの位置にヒータ9aが設けられている。具体的に、ヒータ9aは、出射窓2Rにおける光1Aの光軸の周辺部に設けられている。ガスセル2は、ヒータ9aでガスセル2を加熱することで出射窓2Rに対して入射窓2Fの温度が低くなるような温度勾配を内部空間2aに生じさせる。そのため、出射窓2R側に対して入射窓2F側の飽和蒸気圧の量が小さくなり、固体または液体の状態のアルカリ金属原子10が入射窓2Fに多く集まることになる。つ

まり、気化したアルカリ金属原子 10 は、出射窓 2 R 側に比べ温度の低い入射窓 2 F 側で冷却されることで凝集し、固体または液体の状態となる。なお、ヒータ 9 a は、通常、ガスセル 2 内に封入してあるアルカリ金属ガスの原子数量を確保するためにガスセル 2 を高温に加熱しているが、本実施の形態 1 では固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F に集めるためにも使用している。もちろん、アルカリ金属ガスの原子数量を確保するためのヒータと、固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F に集めるためのヒータとを分けてガスセル 2 に設けてもよい。

[0023] 従来の原子発振器では、光路上に固体または液体の状態のアルカリ金属原子が集まらないようにして光源から光検出器 3 に至る光を妨げないようにガスセルが設計されていた。しかし、本実施の形態 1 に係るガスセル 2 では、固体または液体の状態のアルカリ金属原子が光を減光する特性を有していることを利用して、入射窓 2 F に集めた固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を減光フィルタとして用いている。つまり、本実施の形態 1 に係る原子発振器 100 では、光源 1 からの光の強度を減衰させる減光フィルタに代えて、図 3 に示すガスセル 2 の入射窓 2 F に集めた固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を減光フィルタとして利用している。

[0024] ガスセル 2 は、光源 1 からの光を入射するため、少なくとも光経路上において透明であることが必要である。そのため、ガスセル 2 の入出射窓には、石英ガラス、ホウケイ酸ガラス、アルミノケイ酸ガラスなどのガラスが用いられる。なお、ガスセル 2 の側面には、ガラスやガラスと陽極接合が可能な Si が用いられる。ガスセル 2 に用いる部材は、光源 1 からの光をなるべく透過させる高透過率の部材が望ましく、AR コート等反射防止加工を行ってもよい。

[0025] ガスセル 2 の容器サイズは、光軸方向および光軸に対して垂直方向のいずれの方向においても大きい方が良好な EIT 信号を得ることができる。これは、ガスセル 2 内でアルカリ金属ガスに光が当たる領域が広くなり、アルカリ金属ガスに光が当たる時間が長くなるためである。ただし、小型の原子発

振器が望まれており、ガスセルの容器サイズは、一辺の長さが1 mm～10 mm程度である。

[0026] ガスセル2には、アルカリ金属ガス以外にバッファガスが封入されている。ガスセル内にアルカリ金属ガスのみであると、容器壁面にアルカリ金属原子が短時間で衝突して観測する時間が短くなる問題があった。そこで、観測する時間を延ばすためにバッファガスと呼ばれる不活性ガスをアルカリ金属ガスと共にガスセル内に封入する。これにより、アルカリ金属ガスがバッファガスと衝突することで移動速度を低減して容器壁面に衝突するまでの時間を長くして、観測する時間を延ばしている。封入する不活性ガスは、He, N₂, Ne, Ar, Kr, Xeがある。ガスセルには、300 Torr以下程度の不活性ガスを封入する。なお、バッファガスの温度特性によるEIT信号への影響を抑えるため、温度特性の異なる不活性ガスを同時に封入する。例えば、ガスセルにマイナスの温度特性を持つArとプラスの温度特性を持つN₂とを同時に封入する。

[0027] ガスセル2では、アルカリ金属ガスとしてCs、バッファガスとしてArとNeとの混合ガス（ArとNeとの比率は7：3で合計圧力75 Torr）を封入している。また、ガスセル2の動作温度は67℃で、ガスセル2の容器サイズは光軸方向の長さが2 mmである。

[0028] ガスセル2に外部磁場が加わるとアルカリ金属原子のエネルギー準位がゼーマン分裂し、複数のEIT信号が得られることが知られている。そこで、ガスセル2は、外部磁場の影響を低減するために、磁気シールド2bおよびバイアス磁場2cを加える構成を採用している。磁気シールド2bは、電磁軟鉄、珪素鋼、パーマロイ、アモルファス等の磁性材料が用いられる。バイアス磁場2cは、3軸のヘルムホルツコイル（図示せず）を用いて発生させ、光軸方向に約100 mGの磁場として印加されている。なお、ガスセル2にバイアス磁場2cを印加する構成は、ヘルムホルツコイルに限定されない。

[0029] 光検出器3には、PD（photo diode）を用いている。PDは、光を電流

に変換する素子で、例えば近赤外波長に吸収帯を持つ Si の PIN フォトダイオードである。PIN フォトダイオードは、逆バイアス電圧を印加することで高速な応答が可能となるが、原子発振器に用いる場合は特に高速な応答を必要としないため逆バイアス電圧は印加していない。

[0030] 光検出器 3 は、PD で得た信号から EIT 信号のピーク位置と吸収線のピーク位置を検出する。良好な EIT 信号を得るためには吸収線のピーク位置で CPT を生じさせる必要があり、吸収線のピーク位置が光源 1 からの光の波長に相当する。

[0031] 光源波長制御回路 7 は、光源 1 からの光の波長を制御している。具体的に、光源波長制御回路 7 は、光検出器 3 で得た吸収線のピーク位置に応じて DC 電源（図示せず）の電流（または電圧）を補正して、吸収線のピーク位置で光源 1 からの光の波長が安定するように制御している。

[0032] 周波数制御回路 8 は、光検出器 3 から得た信号に応じて光源 1 の駆動電流に重畳させる RF 信号を生成し、ガスセル 2 内が CPT 状態となるように RF 信号の周波数を制御している。具体的に、周波数制御回路 8 は、光源 1 に入力する 4.596315885 kHz の RF 信号を、温度補償水晶発振器（TCXO）の信号（10 MHz）を基に電圧制御発振器（VCO）および位相同期回路（PLL）を用いて生成している。なお、周波数制御回路 8 は、EIT 信号のピーク位置および吸収線のピーク位置を光検出器 3 で検出できるように、RF 信号の周波数を変調（例えば、10 kHz）して光源 1 からの光の波長を掃引している。

[0033] 本実施の形態 1 に係る原子発振器 100 では、前述したようにガスセル 2 の入射窓 2F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子を集めて付着させて減光フィルタとして用いている（図 3 参照）。以下、実験結果を示しながら本実施の形態 1 に係る原子発振器 100 について説明する。図 3 に示すガスセル 2 の入射窓 2F には、固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10（例えば、Cs）が集まっている。そのため、ガスセル 2 の入射窓 2F に入射した光は、アルカリ金属原子 10 で散乱または吸収されるため、入射窓 2

Fに入射した光の透過率は低下する。なお、以下の説明では、アルカリ金属原子 10 として Cs を用いた実験結果を示しているが、K, Na, Rb などのアルカリ金属原子を用いても同様の効果が得られる。

[0034] 図 4 は、光源 1 からの光の透過率と光検出器 3 での信号強度との関係を示明するための図である。図 4 では、横軸を透過率 (%) に、縦軸を信号強度 (V) にそれぞれ設定してある。図 4 に示すように、入射窓 2 F にアルカリ金属原子 10 を多く集めるほど透過率が低下し、それに伴い光検出器 3 で検出される光の強度が低下する。なお、図 4 では、アルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F 側に集めた場合の測定結果を点 F、アルカリ金属原子 10 を出射窓 2 R 側に集めた場合の測定結果を点 R としてそれぞれ示している。光源 1 からの光の透過率と光検出器 3 での信号強度との関係は、アルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F 側に集めても、出射窓 2 R 側に集めてもほぼ同じ結果となっている。

[0035] 次に、原子発振器 100 で得られる EIT 信号は、EIT 信号の線幅が細いほど良好である。しかし、EIT 信号の線幅が太くなる理由としてパワーブロードニングと、ライトシフトとがある。パワーブロードニングは、Cs 等のアルカリ金属ガスに入射する光の強度密度が大きいほど EIT 信号の線幅が太くなる現象である。そのため、光源とガスセルとの間に減光フィルタを配置することで、ガスセルに入射する光の強度を減衰させてパワーブロードニングを抑制することができる。

[0036] 次に、ライトシフトは、アルカリ金属ガスに光が入射した場合、当該光の影響でアルカリ金属ガスが持つ固有のエネルギー準位が変化する現象である。つまり、ライトシフトは、EIT 信号を発生させる周波数が光の影響でわずかに変動する。また、ライトシフトは、入射する光の強度の変化にも影響を受けるため、減光フィルタで入射する光の強度を減衰させておくことで、光源 1 の変化に対してガスセル 2 に入射する光の強度の変化を小さくしてライトシフトを抑制することができる。

[0037] 原子発振器 100 は、EIT 信号の線幅が細い良好な EIT 信号を得るた

めに、パワースプレッドニングおよびライトシフトを抑制する必要がある。従来の原子発振器では、ガスセルに入射する光の強度を減光フィルタで減衰していたが、原子発振器 100 では、図 3 のようにアルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F 側に付着させ減光フィルタとして用いることで、ガスセル 2 に入射する光の強度を減衰させている（図 4 参照）。

[0038] 具体的に、アルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F 側に集めることで、EIT 信号の線幅が細い良好な EIT 信号を得ることを説明する。図 5 は、光源からの光の透過率と EIT 信号の線幅との関係を説明するための図である。図 5 では、横軸を透過率（％）に、縦軸を線幅（Hz）にそれぞれ設定してある。図 5 に示すように、アルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F 側に集め透過率を低下させると EIT 信号の線幅が細くなっている（点 F）。例えば、点 F は、透過率が 100％（減光率 0％）のときに EIT 信号の線幅が約 2.0 kHz であるが、透過率が 60％（減光率 40％）になると EIT 信号の線幅が約 1.6 kHz となり、EIT 信号の線幅が約 20％改善している。さらに、透過率が 10％（減光率 90％）になると EIT 信号の線幅が約 0.8 kHz となり、EIT 信号の線幅が約 60％改善している。なお、比較例としてアルカリ金属原子 10 を出射窓 2 R 側に集めた場合、透過率を低下させても EIT 信号の線幅は変化しない（点 R）。例えば、点 R は、透過率が 60％（減光率 40％）のときに EIT 信号の線幅が約 2.1 kHz で、透過率が 10％（減光率 90％）のときも EIT 信号の線幅が約 2.1 kHz と変化しない。これは、アルカリ金属原子 10 を出射窓 2 R 側に集めても、ガスセル 2 に入射する光の強度を減衰させることができず、パワースプレッドニングおよびライトシフトを抑制することができないためである。

[0039] 図 5 の点 R が示すように、アルカリ金属原子 10 を出射窓 2 R 側に集めて付着させて出射窓 2 R 側の透過率を変化させても、EIT 信号の線幅には影響を与えない。しかし、図 4 で示したように出射窓 2 R 側に付着したアルカリ金属原子 10 により出射窓 2 R を透過する光の強度が減衰するため、光検出器 3 で検出できる光の信号強度が低下することになる。そのため、出射窓

2 R 側に付着したアルカリ金属原子 1 0 は、E I T 信号の特性を悪化させる可能性がある。

[0040] アルカリ金属原子 1 0 を入射窓 2 F 側に集めた場合、アルカリ金属原子 1 0 が粒状に分布した形で入射窓 2 F の内部空間 2 a 側に付着する。これは入射窓 2 F の部材との関係によるものと考えられるが、光の透過率が同じであれば入射窓 2 F の内部空間 2 a 側に付着するアルカリ金属原子 1 0 の状態は粒状に限定されず、一様な膜状であっても良い。

[0041] ここで、透過率は、ガスセル 2 の入射窓 2 F から入った光の強度に対してガスセル 2 内部を通過して出射窓 2 R から出力された光の強度の割合とする。ただし、実際のガスセル 2 の入射窓 2 F にアルカリ金属原子 1 0 を付着させた場合、入射窓 2 F の部材（例えば、ガラス）による反射および吸収の影響が存在するため、透過率の測定は、入射窓 2 F の部材による反射および吸収を別途測定し、その影響を除く必要がある。なお、透過率は、吸収線自体の吸収量が光の強度によって影響を受けるため、アルカリ金属原子 1 0 の吸収波長からずらした波長で測定する。なお、減光率は、 $100\% - \text{透過率}$ で求められる。

[0042] また、E I T 信号の信号強度および E I T 信号の線幅について説明する。図 6 は、光源 1 からの光の周波数と E I T 信号との関係を説明するための図である。図 6 では、横軸を周波数（k H z）に、縦軸を E I T 信号の信号強度（V）にそれぞれ設定してある。図 6 では、E I T 信号の信号強度が最大となる周波数を 0（ゼロ）k H z となるように周波数を変換して図示してある。E I T 信号の信号強度 I は、E I T 信号のピークの信号強度と E I T 信号のボトムの信号強度との差である。E I T 信号の線幅 L W は、E I T 信号の信号強度 I が 50% のときの周波数幅である。

[0043] 以上のように、本実施の形態 1 に係る原子発振器 1 0 0 では、光源 1 と、アルカリ金属原子 1 0 が封入された内部空間 2 a を有するガスセル 2 と、光源 1 から出射され、ガスセル 2 を透過した光を検出する光検出器 3 とを備えている。ガスセル 2 は、光源 1 からの光を入射する入射窓 2 F と、光検出器

3に光を出射する出射窓2 Rと、入射窓2 Fと出射窓2 Rとを保持する側壁と含む。内部空間2 aに封入したアルカリ金属原子1 0を液体の状態または固体の状態として少なくとも入射窓2 Fに付着させることにより、入射窓2 Fに入射する光を減光する。そのため、原子発振器1 0 0では、減光フィルタ自体を設けなくても良好なE I T信号を得ることができる。原子発振器1 0 0では、仮に減光フィルタ自体を不要にすることができなくとも、入射窓2 Fに付着させたアルカリ金属原子1 0で入射窓2 Fに入射する光をある程度減光することができるので、減光特性の高い減光フィルタを用いなくともよい。

[0044] 原子発振器1 0 0では、良好なE I T信号を得るために減光特性の高い減光フィルタを用いなくともよいので、吸収型の減光フィルタであれば厚みを薄くすることができる。原子発振器1 0 0では、液体の状態または固体の状態として入射窓2 Fに付着させるアルカリ金属原子1 0の量は、他の面に付着させるアルカリ金属原子1 0の量より多いため、逆にE I T信号の線幅の改善に寄与しない出射窓2 R側へのアルカリ金属原子1 0の付着を抑えることができる。原子発振器1 0 0は、出射窓2 R側へのアルカリ金属原子1 0の付着を抑えることで、E I T信号の特性悪化を防ぐこともできる。

[0045] 原子発振器1 0 0では、少なくとも出射窓2 Rの温度に対する入射窓2 Fの温度が低いので、ガスセル2にアルカリ金属原子1 0（例えば、Cs）のガス圧を飽和蒸気圧の量よりも多めに入れたアルカリ金属原子1 0が固体や液体の状態となって入射窓2 F側に付着する。入射窓2 F側に付着した固体や液体の状態となったアルカリ金属原子1 0が減光フィルタと同様の機能を持っているので、原子発振器1 0 0は、入射窓2 F側に付着したアルカリ金属原子1 0が減光フィルタと同程度の透過率になるように設定すれば、減光フィルタが不要となり光学系を簡素化することができる。なお、原子発振器1 0 0は、ガスセル2の入射窓2 Fにおいて光源1からの光を4 0 %以上減光（透過率6 0 %以下）するように、入射窓2 F側に付着したアルカリ金属原子1 0を設定できれば、E I T信号の線幅を改善することができる（図5

参照)。

[0046] (変形例)

原子発振器 100 では、ガスセル 2 の出射窓 2 R にヒータ 9 a (第 1 加熱部) を設け、ヒータ 9 a で出射窓 2 R を加熱することで固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F に多く集めて付着させる構成とした。しかし、ヒータ 9 a は、入射窓 2 F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 が多く集めることができれば、出射窓 2 R に設けられる構成に限定されない。図 7 は、本発明の実施の形態 1 の変形例に係る原子発振器 100 a の構成およびガスセル 2 内の状態を説明するための概略図である。なお、図 7 (a) が原子発振器 100 a の構成を示し、図 7 (b) がガスセル 2 内の状態を示している。

[0047] 図 7 (a) に示す原子発振器 100 a は、ガスセル 2 の出射窓 2 R 側の側壁 (側面) にヒータ 9 a を設け、ヒータ 9 a で出射窓 2 R 側の側壁を加熱することで固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F に多く集めて付着させる構成である。図 7 (b) に示すガスセル 2 では、ヒータ 9 a で出射窓 2 R 側の側壁を加熱することで、入射窓 2 F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 が多く付着している様子が示されている。そのため、図 7 (b) に示すガスセル 2 でも、図 3 で示したガスセル 2 と同様、入射窓 2 F に付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を減光フィルタとして機能させることができる。なお、図 7 (b) に示すガスセル 2 において、図 3 に示すガスセル 2 と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0048] 図 1 に示す原子発振器 100 では、コリメータレンズである光学部材 4 で光源 1 から出た光を平行光にし、平行光になった光をガスセル 2 に入射して光検出器 3 で検出する構成である。しかし、ガスセル 2 を透過する光は平行光に限定されない。図 7 (a) に示す原子発振器 100 a では、光源 1 から出た光が光検出器 3 に至るまで広がる光である。原子発振器 100 a では、光源 1 から出た光を平行光にする必要がないため光学部材 4 を設けていない

。また、原子発振器 100a では、ガスセル 2 の入射窓 2F に付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 だけで光源 1 からの光の強度を十分に減衰できないため、減光フィルタ 13 を設けてある。なお、原子発振器 100a において、図 1 に示す原子発振器 100 と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0049] 減光フィルタ 13 は、光源 1 からの光の強度を減衰させるための ND (Neutral Density) フィルタである。なお、減光フィルタ 13 でガスセル 2 に入射する光の強度を減衰させすぎると EIT 信号自体が観測できなくなるので、EIT 信号の検出限界を踏まえて最適の ND 値を設定する必要がある。減光フィルタ 13 には、ガラス基板に金属膜を成膜し光を反射する反射型や素材自体が光を吸収する吸収型がある。

[0050] 原子発振器 100a に用いる減光フィルタ 13 は、ガスセル 2 の入射窓 2F に付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 と組み合わせて、ガスセル 2 に入射する光源 1 からの光の強度を減衰させている。そのため、減光フィルタ 13 は、高い減光特性が要求されないため、吸収型であれば厚みを薄くすることが可能となる。

[0051] さらに、別の変形例について説明する。図 3 に示したガスセル 2 では、出射窓 2R のみにヒータ 9a を設ける構成であった。しかし、入射窓 2F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を多く集められる構成であれば、ガスセルの構成は出射窓 2R のみにヒータ 9a を設ける構成に限定されない。図 8 は、本発明の実施の形態 1 の別の変形例に係るガスセル 2 内の状態を説明するための図である。なお、図 8 に示すガスセル 2 において、図 3 に示すガスセル 2 と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0052] 図 8 に示すガスセル 2 では、出射窓 2R にヒータ 9a を設け、入射窓 2F の側壁側にヒータ 9b (第 2 加熱部) をさらに設けている。これにより、図 8 に示すガスセル 2 は、ヒータ 9a で出射窓 2R を加熱し、ヒータ 9b で入射窓 2F の外側 (側壁側) を加熱することで固体または液体の状態のアルカ

り金属原子 10 を入射窓 2 F の中心部に多く集めて付着させることができる。光源 1 からの光はガスセル 2 の内部空間 2 a を透過して光検出器 3 に至る。そのため、入射窓 2 F の周辺部に比べて中心部の方が、液体の状態または固体の状態として付着させるアルカリ金属原子 10 の量が多いので、ガスセル 2 の中心軸を通る光軸 1 B の光の強度をより減衰させることが可能となる。

[0053] また、光源 1 に用いる VCSEL のようなレーザ光では、光の強度が中心部に近づくほど強くなり、光軸に対して垂直な方向において光の強度がガウス分布となっている。そのため、入射窓 2 F の中心部に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を多く付着させることで光の強度の均一化を図ることも可能である。

[0054] なお、入射窓 2 F の中心部に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を多く付着させるため、温度コントロール回路 9（温度調節部）がヒータ 9 a（第 1 加熱部）の温度に対してヒータ 9 b（第 2 加熱部）の温度が低くなるように調節する。また、ヒータ 9 b は、入射窓 2 F の側壁側に設ける場合に限定されず、側壁の入射窓 2 F 側に設けてもよい。

[0055] （実施の形態 2）

本実施の形態 1 に係る原子発振器 100 では、ガスセル 2 の出射窓 2 R にヒータ 9 a を設け、ヒータ 9 a で出射窓 2 R を加熱することで固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F に多く集めて付着させる構成とした。しかし、入射窓 2 F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を多く集めて付着させる構成であれば、ガスセルの構成はヒータ 9 a を設ける構成に限定されない。図 9 は、本発明の実施の形態 2 に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[0056] 図 9 に示すガスセル 2 では、出射窓 2 R に比べて入射窓 2 F を構成する部材の厚みを薄くすることで、入射窓 2 F 側の放熱性を高めている。入射窓 2 F 側の放熱性が高いガスセル 2 は、出射窓 2 R に対して入射窓 2 F の温度が低くなるような温度勾配を内部空間 2 a に生じさせる。そのため、出射窓 2

R側に対して入射窓2F側の飽和蒸気圧の量が小さくなり、固体または液体の状態のアルカリ金属原子10が入射窓2Fに多く集まることになる。図9に示すガスセル2では、部材の厚みが薄い入射窓2Fに固体または液体の状態のアルカリ金属原子10が多く付着している様子が示されている。そのため、図9に示すガスセル2でも、図3で示したガスセル2と同様、入射窓2Fに付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子10を減光フィルタとして機能させることができる。なお、図9に示すガスセル2において、図3に示すガスセル2と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0057] 以上のように、ガスセル2は、入射窓2F側を構成する部材の厚みが出射窓2R側を構成する部材の厚みより薄いので、入射窓2F側の放熱性が高く固体または液体の状態のアルカリ金属原子10を入射窓2Fに多く集めて付着させることができる。

[0058] (変形例)

入射窓2F側の放熱性を高めるために、放熱部材を入射窓2F側に設けてもよい。図10は、本発明の実施の形態2の変形例に係るガスセル2内の状態を説明するための図である。図10に示すガスセル2では、出射窓2Rに比べて構成する部材の厚みを薄くした入射窓2Fに放熱部材11を設けて、入射窓2F側の放熱性をさらに高めている。放熱部材11は、放熱性の高い部材であれば、例えば熱伝導性の高い材料（例えば、カーボン、ガラス、シリコン、アルミニウムなどの金属材料）、金属材料をフィン状に加工して放熱性を高めた部材、電氣的にファンを駆動して冷却する部材、これらを組み合わせた部材などである。なお、放熱部材11は、バイアス磁場2cに影響を与えない非磁性の材料が望ましい。また、放熱部材11を設ける位置は、入射窓2Fの側壁側に設ける場合に限定されず、側壁の入射窓2F側に設けてもよい。図10に示すガスセル2では、放熱部材11を設けた入射窓2Fに固体または液体の状態のアルカリ金属原子10が多く付着している様子が示されている。そのため、図10に示すガスセル2でも、図3で示したガス

セル 2 と同様、入射窓 2 F に付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O を減光フィルタとして機能させることができる。なお、図 1 O に示すガスセル 2 において、図 3 に示すガスセル 2 と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0059] 以上のように、ガスセル 2 は、入射窓 2 F 側に放熱部材 1 1 を設けることで、入射窓 2 F 側の放熱性を高めて固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O を入射窓 2 F に多く集めて付着させることができる。なお、図 1 O に示すガスセル 2 では、出射窓 2 R に比べて構成する部材の厚みを薄くした入射窓 2 F に放熱部材 1 1 を設けているが、入射窓 2 F 側の放熱性を高めることができれば、出射窓 2 R と同じ厚みの部材の入射窓 2 F に放熱部材 1 1 を設けてもよい。

[0060] (実施の形態 3)

本実施の形態 2 に係るガスセル 2 では、出射窓 2 R に比べて入射窓 2 F を構成する部材の厚みを薄くすることで入射窓 2 F 側の放熱性を高めて、固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O を入射窓 2 F に多く集めて付着させる構成とした。しかし、入射窓 2 F 側の放熱性を高めて、入射窓 2 F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O を多く集めて付着させる構成であれば、ガスセルの構成は出射窓 2 R に比べて構成する部材の厚みが薄い入射窓 2 F を用いる構成に限定されない。図 1 1 は、本発明の実施の形態 3 に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[0061] 図 1 1 に示すガスセル 2 では、出射窓 2 R に比べて熱伝導性の高い部材を入射窓 2 F a に用いることで、入射窓 2 F a 側の放熱性を高めている。入射窓 2 F a 側の放熱性が高いガスセル 2 は、出射窓 2 R に対して入射窓 2 F a の温度が低くなるような温度勾配を内部空間 2 a に生じさせる。そのため、出射窓 2 R 側に対して入射窓 2 F a 側の飽和蒸気圧の量が小さくなり、固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O が入射窓 2 F a に多く集まることになる。図 1 1 に示すガスセル 2 では、熱伝導性の高い部材を用いた入射窓 2 F a に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O が多く付着している

様子が示されている。そのため、図 11 に示すガスセル 2 でも、図 3 で示したガスセル 2 と同様、入射窓 2 F a に付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を減光フィルタとして機能させることができる。なお、図 11 に示すガスセル 2 において、図 3 に示すガスセル 2 と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0062] 熱伝導性の高い部材を用いた入射窓 2 F a は、単一の材料で構成しても、複合材料で構成してもよい。例えば、入射窓 2 F a は、光源 1 からの光が透過する部分をガラスで構成し、それ以外の部分を金属材料で構成した複合材料でもよい。

[0063] 以上のように、ガスセル 2 は、入射窓 2 F a を構成する部材の熱伝導性が出射窓 2 R を構成する部材の熱伝導性より高いので、固体または液体の状態のアルカリ金属原子 10 を入射窓 2 F a に多く集めて付着させることができる。

[0064] (変形例)

熱伝導性の高い部材を入射窓に用いるのではなく、ガスセル 2 の外側に設けてもよい。図 12 は、本発明の実施の形態 3 の変形例に係るガスセル 2 内の状態を説明するための図である。図 12 に示すガスセル 2 では、熱伝導性の高い部材 12 (例えば、アルミニウム、真鍮等の非磁性の金属材料) でガスセル 2 全体を覆い、熱伝導性の高い部材 12 を介してヒータ 9 a でガスセル 2 を加熱する構成である。つまり、図 12 に示すガスセル 2 では、ヒータ 9 a でガスセル 2 を直接加熱するのではなく、熱伝導性の高い部材 12 でガスセル 2 を間接的に加熱している。なお、図 12 に示すガスセル 2 では、熱伝導性の高い部材 12 を介してガスセル 2 を間接的に加熱しているので、ヒータ 9 a の配置位置は熱伝導性の高い部材 12 のいずれの場所でもよく、配置位置は特に制限されない。

[0065] また、熱伝導性の高い部材 12 は、出射窓 2 R 側の開口部 B に比べて入射窓 2 F 側の開口部 A を大きくしている。そのため、出射窓 2 R 側と比べ入射窓 2 F 側でのガスセル 2 と熱伝導性の高い部材 12 との接触面積が小さくな

るので、入射窓 2 F 側の加熱能力が小さくなる。入射窓 2 F 側の加熱能力が小さいガスセル 2 は、出射窓 2 R に対して入射窓 2 F の温度が低くなるような温度勾配を内部空間 2 a に生じさせる。そのため、出射窓 2 R 側に対して入射窓 2 F 側の飽和蒸気圧の量が小さくなり、固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O が入射窓 2 F に多く集まることになる。図 1 2 に示すガスセル 2 では、開口部 A が大きい入射窓 2 F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O が多く付着している様子が示されている。そのため、図 1 2 に示すガスセル 2 でも、図 3 で示したガスセル 2 と同様、入射窓 2 F に付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O を減光フィルタとして機能させることができる。なお、図 1 2 に示すガスセル 2 において、図 3 に示すガスセル 2 と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0066] 以上のように、ガスセル 2 は、熱伝導性の高い部材 1 2 でガスセル 2 を覆い、出射窓 2 R 側の開口部 B に比べて入射窓 2 F 側の開口部 A を大きくすることで、入射窓 2 F 側の加熱能力を小さくして固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O を入射窓 2 F に多く集めて付着させることができる。

[0067] (実施の形態 4)

本実施の形態 2 に係るガスセル 2 では、出射窓 2 R に比べて入射窓 2 F を構成する部材の厚みを薄くすることで入射窓 2 F 側の放熱性を高めて、固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O を入射窓 2 F に多く集めて付着させる構成とした。しかし、入射窓 2 F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O を多く集めて付着させる構成であれば、ガスセルの構成は限定されない。図 1 3 は、本発明の実施の形態 4 に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[0068] 図 1 3 に示すガスセル 2 では、入射窓 2 F の内部空間 2 a 側の面に溝を形成することで、固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 O を入射窓 2 F に多く集めている。図 1 3 (a) に示すガスセル 2 では、光源 1 から出た光 1 A が透過する入射窓 2 F の部分 (中心部) に溝 2 S を形成してある。溝 2

Sは、他の入射窓2 Fの面よりも低くなっており、固体または液体の状態のアルカリ金属原子1 0が多く集まることになる。図1 3 (a) に示すガスセル2では、溝2 Sを設けた入射窓2 Fに固体または液体の状態のアルカリ金属原子1 0が多く付着している様子が示されている。そのため、図1 3 (a) に示すガスセル2でも、図3で示したガスセル2と同様、入射窓2 Fに付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子1 0を減光フィルタとして機能させることができる。なお、図1 3 (a) に示すガスセル2において、図3に示すガスセル2と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0069] 溝の形状は、図1 3 (a) に示す溝2 Sに限定されず、図1 3 (b) に示す溝2 Tのように入射窓2 Fの中心部に向かって溝が深くなる形状でもよい。図1 3 (b) に示すガスセル2では、溝2 Tのように入射窓2 Fの中心部に向かって溝を深くすることで、固体または液体の状態のアルカリ金属原子1 0が入射窓2 Fの中心部に多く集まり付着する構成となる。そのため、図1 3 (b) に示すガスセル2では、ガスセル2に入射する光源1からの光の強度をより減衰させることが可能となるので、ガウス分布となっているレーザー光に対して光の強度の均一化を図ることも可能となる。

[0070] 図1 3 (b) に示すガスセル2では、溝2 Tを設けた入射窓2 Fに固体または液体の状態のアルカリ金属原子1 0が多く付着している様子が示されている。そのため、図1 3 (b) に示すガスセル2でも、図3で示したガスセル2と同様、入射窓2 Fに付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子1 0を減光フィルタとして機能させることができる。なお、図1 3 (b) に示すガスセル2において、図3に示すガスセル2と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。なお、溝の数は、図1 3 (a) および図1 3 (b) に示したように入射窓2 Fの中心部に1つ設ける構成に限定されない。例えば、図示していないが、入射窓2 Fの中心部に小さな溝を複数設けてもよい。

[0071] 以上のように、入射窓2 Fは、中心部において内部空間2 a側の面に少な

くとも1つの溝2 S, 2 T (凹部) が形成されているので、固体または液体の状態のアルカリ金属原子10を入射窓2 Fに多く集めて付着させることができる。さらに、溝2 T (凹部) は、周辺部に比べて中心部の方を深くすることで、固体または液体の状態のアルカリ金属原子10を入射窓2 Fの中心部に多く集めることができる。なお、溝を形成する位置は、ガスセル2に入射する光が入射窓2 Fの中心部であるため、図13のように入射窓2 Fの中心部に溝2 S, 2 Tを形成しているが、入射窓2 Fの中心部からずらして光を入射させる場合は、光の入射位置に合わせて溝2 S, 2 Tの位置をずらして形成する。

[0072] (実施の形態5)

本実施の形態2に係るガスセル2では、出射窓2 Rに比べて入射窓2 Fを構成する部材の厚みを薄くすることで入射窓2 F側の放熱性を高めて、固体または液体の状態のアルカリ金属原子10を入射窓2 Fに多く集めて付着させる構成とした。しかし、入射窓2 Fに固体または液体の状態のアルカリ金属原子10を多く集めて付着させる構成であれば、ガスセルの構成は限定されない。図14は、本発明の実施の形態5に係るガスセル内の状態を説明するための図である。

[0073] 図14に示すガスセル2では、少なくとも出射窓2 Rの内部空間2 a側の面にアルカリ金属原子10が付着することを阻害するコーティング膜を形成することで、固体または液体の状態のアルカリ金属原子10を入射窓2 Fに多く集めている。図14(a)に示すガスセル2では、出射窓2 Rの内部空間2 a側の面にパラフィン系材料のコーティング膜2 Cを形成してある。パラフィン系材料のコーティング膜2 Cが形成してある出射窓2 Rの面は、アルカリ金属原子10の付着が阻害されるので、入射窓2 Fの面に固体または液体の状態のアルカリ金属原子10が多く集まることになる。図14(a)に示すガスセル2では、出射窓2 Rの面にコーティング膜2 Cが形成してあるので、コーティング膜2 Cが形成されていない入射窓2 Fに固体または液体の状態のアルカリ金属原子10が多く付着している様子が示されている。

そのため、図 1 4 (a) に示すガスセル 2 でも、図 3 で示したガスセル 2 と同様、入射窓 2 F に付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 0 を減光フィルタとして機能させることができる。なお、図 1 4 (a) に示すガスセル 2 において、図 3 に示すガスセル 2 と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0074] コーティング膜 2 C を形成する面は、図 1 4 (a) に示すように出射窓 2 R の面に限定されず、図 1 4 (b) に示すように入射窓 2 F の面以外の面に形成してもよい。具体的に、図 1 4 (b) に示すガスセル 2 では、出射窓 2 R の面、側壁の面にパラフィン系材料のコーティング膜 2 C を形成してある。そのため、図 1 4 (b) に示すガスセル 2 では、入射窓 2 F の面以外の面にアルカリ金属原子 1 0 の付着が阻害されるので、入射窓 2 F の面に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 0 がより多く集まることになる。図 1 4 (b) に示すガスセル 2 では、コーティング膜 2 C が形成されていない入射窓 2 F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 0 が多く付着している様子が示されている。そのため、図 1 4 (b) に示すガスセル 2 でも、図 3 で示したガスセル 2 と同様、入射窓 2 F に付着した固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 0 を減光フィルタとして機能させることができる。なお、図 1 4 (b) に示すガスセル 2 において、図 3 に示すガスセル 2 と同じ構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。

[0075] 以上のように、ガスセル 2 は、出射窓 2 R の内部空間 2 a 側の面に、液体の状態または固体の状態のアルカリ金属原子 1 0 が付着することを阻害するコーティング膜 2 C をさらに含むので、コーティング膜 2 C が形成されていない入射窓 2 F に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 0 を多く集めることができる。なお、コーティング膜 2 C を側壁の内部空間 2 a 側の面にさらに設けてもよい。ここで、コーティング膜 2 C は、パラフィン系材料であると説明したが、液体の状態または固体の状態のアルカリ金属原子 1 0 が付着することを阻害する材料であればよく、例えば、オクタデシルトリクロシラン等の有機ケイ素系化合物などであってもよい。

[0076] (その他の変形例)

前述の実施の形態に係る原子発振器では、量子干渉効果 (C P T) を利用して共鳴周波数を得る構成について説明したが、これに限られない。原子発振器の動作原理には、光とマイクロ波を利用した二重共鳴法と呼ばれる方法があり、前述の実施の形態に係る原子発振器は、二重共鳴法にも同様に適用することができる。

[0077] 前述の実施の形態に係る原子発振器は、原子時計の基準発振器として使用することができると共に、基準発振器を必要とする携帯電話基地局の電子機器、携帯電話 (スマートフォン)、カーナビゲーションシステムのような G P S システムを利用した位置情報を必要とする受信機などの電子機器に用いることができる。

[0078] 前述の実施の形態に係る原子発振器は、特に制限がない限り、それぞれの実施の形態を自由に組み合わせてよい。例えば、実施の形態 1 に係るガスセル 2 に設けたヒータ 9 a の構成と、実施の形態 2 に係るガスセル 2 で出射窓 2 R に比べて入射窓 2 F を構成する部材の厚みを薄くする構成とを組み合わせてもよい。また、実施の形態 3 に係るガスセル 2 で出射窓 2 R に比べて熱伝導性の高い部材を入射窓 2 F a に用いる構成と、実施の形態 5 に係るガスセル 2 で出射窓 2 R の内部空間 2 a 側の面にコーティング膜 2 C を形成する構成とを組み合わせてもよい。

[0079] 図 1 1 で説明した熱伝導性の高い部材を用いた入射窓 2 F a の変形例として、例えば、入射窓の表面に熱伝導性の高い材料のパターンを形成することが考えられる。なお、熱伝導性の高い材料は、光源の波長に対して透過率の高い材料を用いることが望ましい。図 1 5 は、熱伝導性の高い材料のパターンを形成した入射窓を構成を説明するための概略図である。図 1 5 に示す入射窓 2 F は、外側の表面に I T O などの透明電極で網状の電極パターン 2 5 が形成してある。電極パターン 2 5 を形成した部分は、他の部分に比べて熱伝導性が高くなるため、付近にある気化したアルカリ金属原子を冷却して固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 0 に凝集させることができる。つ

まり、入射窓 2 F は、電極パターン 2 5 を形成することで、凝集させたい位置に固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 0 を凝集させることが可能となる。なお、電極パターン 2 5 の線幅や形成する間隔等を変更することで、入射窓 2 F の所望する位置に所望する量の固体または液体の状態のアルカリ金属原子 1 0 を凝集させることが可能となる。また、図 1 5 に示すガスセル 2 では、出射窓 2 R に比べて入射窓 2 F を構成する部材の厚みを薄くしてあるが、電極パターン 2 5 による放熱効果が得られるのであれば入射窓 2 F を構成する部材の厚みを出射窓 2 R と同じまたは厚くしてもよい。

[0080] 今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は、上記した説明ではなく、請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

符号の説明

[0081] 1 光源、1 b, 3 a プリント基板、2 ガスセル、2 a 内部空間、2 b 磁気シールド、2 c バイアス磁場、2 d 遮光部、3 光検出器、4 光学部材、5 波長板、6, 9 温度コントロール回路、9 a, 9 b ヒータ、7 光源波長制御回路、8 周波数制御回路、1 0 アルカリ金属原子、1 1 放熱部材、1 2 熱伝導性の高い部材、1 3 減光フィルタ、1 0 0, 1 0 0 a 原子発振器。

請求の範囲

- [請求項1] 光源と、
 アルカリ金属原子が封入された内部空間を有するガスセルと、
 前記光源から出射され、前記ガスセルを透過した光を検出する光検出部とを備え、
 前記ガスセルは、前記光源からの光を入射する入射窓と、前記光検出部に光を出射する出射窓と、前記入射窓と前記出射窓とを保持する側壁とを含み、
 前記内部空間に封入した前記アルカリ金属原子を液体の状態または固体の状態として少なくとも前記入射窓に付着させることにより、前記入射窓に入射する光を減光する、原子発振器。
- [請求項2] 液体の状態または固体の状態として前記入射窓に付着させる前記アルカリ金属原子の量は、他の面に付着させる前記アルカリ金属原子の量より多い、請求項1に記載の原子発振器。
- [請求項3] 前記入射窓は、周辺部に比べて中心部の方が、液体の状態または固体の状態として付着させる前記アルカリ金属原子の量が多い、請求項2に記載の原子発振器。
- [請求項4] 前記ガスセルは、前記入射窓において前記光源からの光を40%以上減光する、請求項1～請求項3のいずれか1項に記載の原子発振器。
- [請求項5] 前記ガスセルは、少なくとも前記出射窓の温度に対する前記入射窓の温度が低い、請求項1～請求項4のいずれか1項に記載の原子発振器。
- [請求項6] 前記ガスセルは、前記出射窓側に第1加熱部をさらに有する、請求項1～請求項5のいずれか1項に記載の原子発振器。
- [請求項7] 前記ガスセルは、前記入射窓の前記側壁側に第2加熱部をさらに有する、請求項6に記載の原子発振器。
- [請求項8] 前記第1加熱部および前記第2加熱部の温度を調節する温度調節部

をさらに備え、

前記温度調節部は、前記第 1 加熱部の温度に対して前記第 2 加熱部の温度が低くなるように調節する、請求項 7 に記載の原子発振器。

[請求項 9] 前記ガスセルは、前記入射窓側に放熱部材をさらに有する、請求項 1 ～請求項 5 のいずれか 1 項に記載の原子発振器。

[請求項 10] 前記ガスセルは、前記入射窓を構成する部材の熱伝導性が前記出射窓を構成する部材の熱伝導性より高い、請求項 1 ～請求項 5 のいずれか 1 項に記載の原子発振器。

[請求項 11] 前記ガスセルは、前記入射窓を構成する部材の厚みが前記出射窓を構成する部材の厚みより薄い、請求項 1 ～請求項 5 のいずれか 1 項に記載の原子発振器。

[請求項 12] 前記入射窓は、中心部において前記内部空間側の面に少なくとも 1 つの凹部が形成されている、請求項 1 ～請求項 5 のいずれか 1 項に記載の原子発振器。

[請求項 13] 前記凹部は、周辺部に比べて中心部の方が深い、請求項 1 2 に記載の原子発振器。

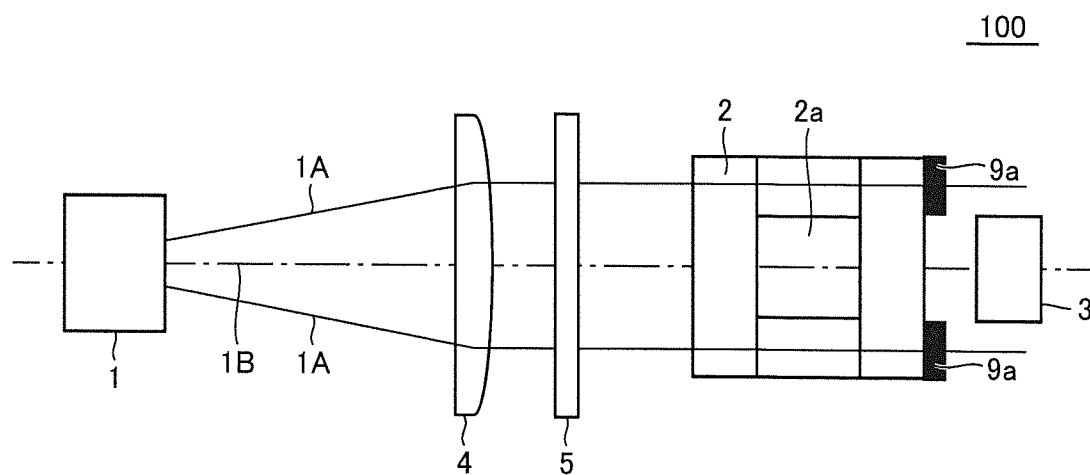
[請求項 14] 前記ガスセルは、前記出射窓の前記内部空間側の面に、液体の状態または固体の状態の前記アルカリ金属原子が付着することを阻害するコーティング膜をさらに含む、請求項 1 ～請求項 5 のいずれか 1 項に記載の原子発振器。

[請求項 15] 前記ガスセルは、前記コーティング膜を前記側壁の前記内部空間側の面にさらに設ける、請求項 1 4 に記載の原子発振器。

[請求項 16] 請求項 1 ～請求項 1 5 のいずれか 1 項に記載の前記原子発振器を備える電子機器。

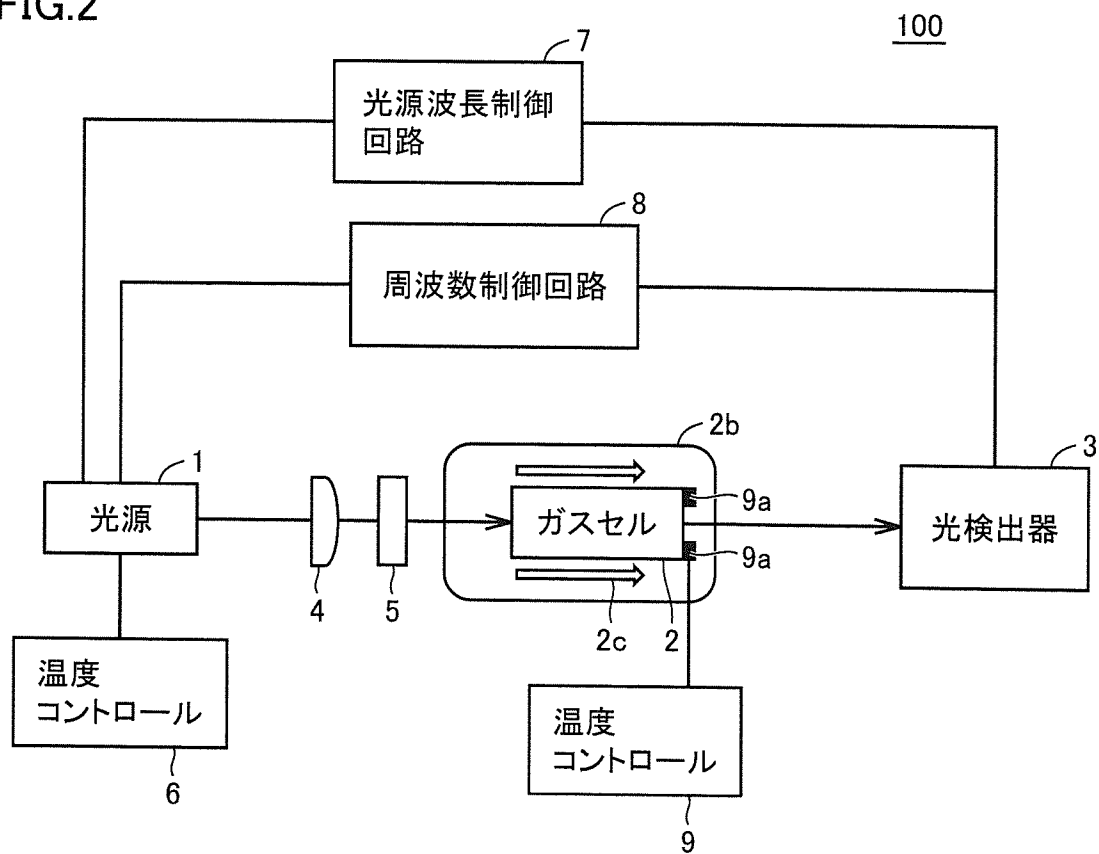
[図1]

FIG.1



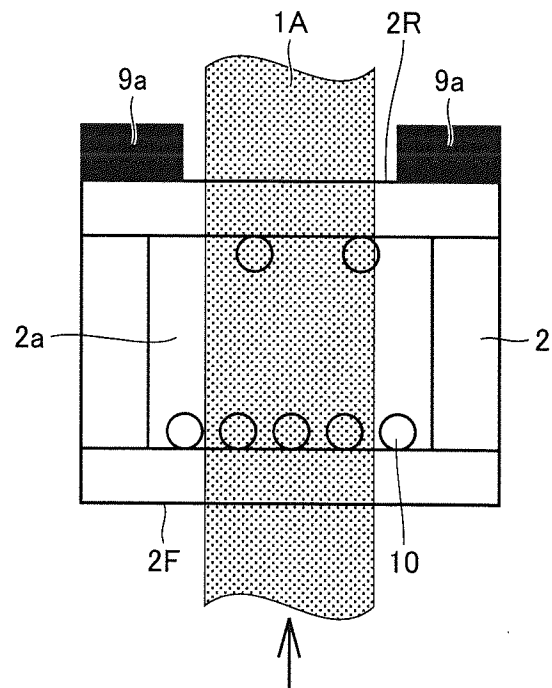
[図2]

FIG.2



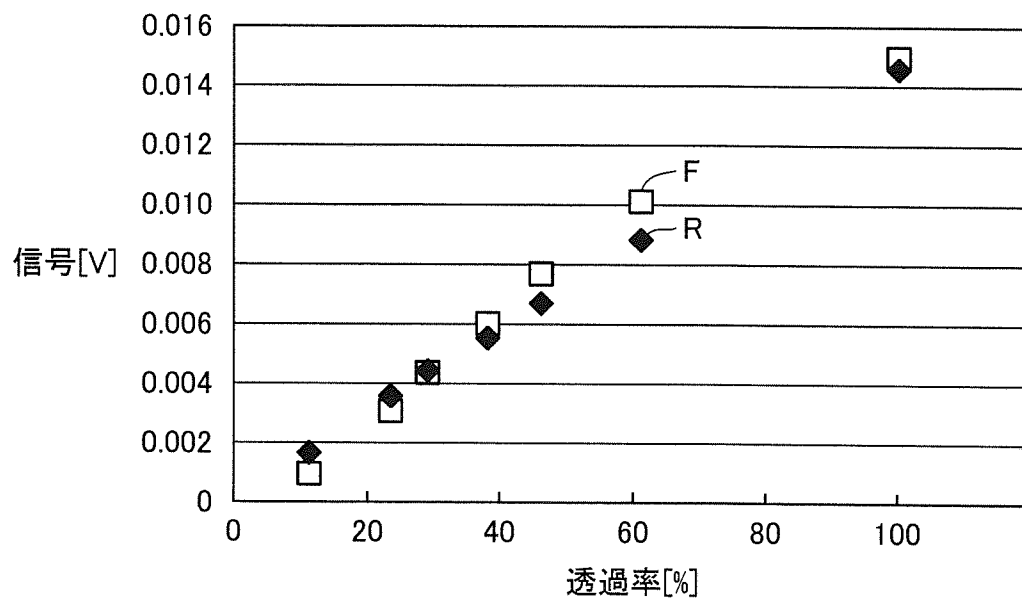
[図3]

FIG.3

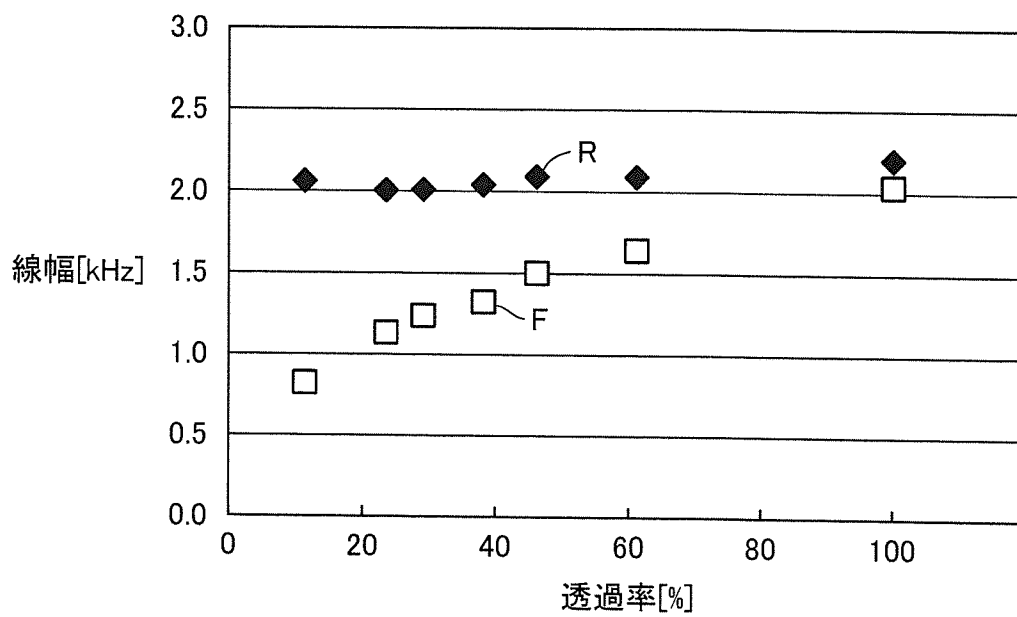


[図4]

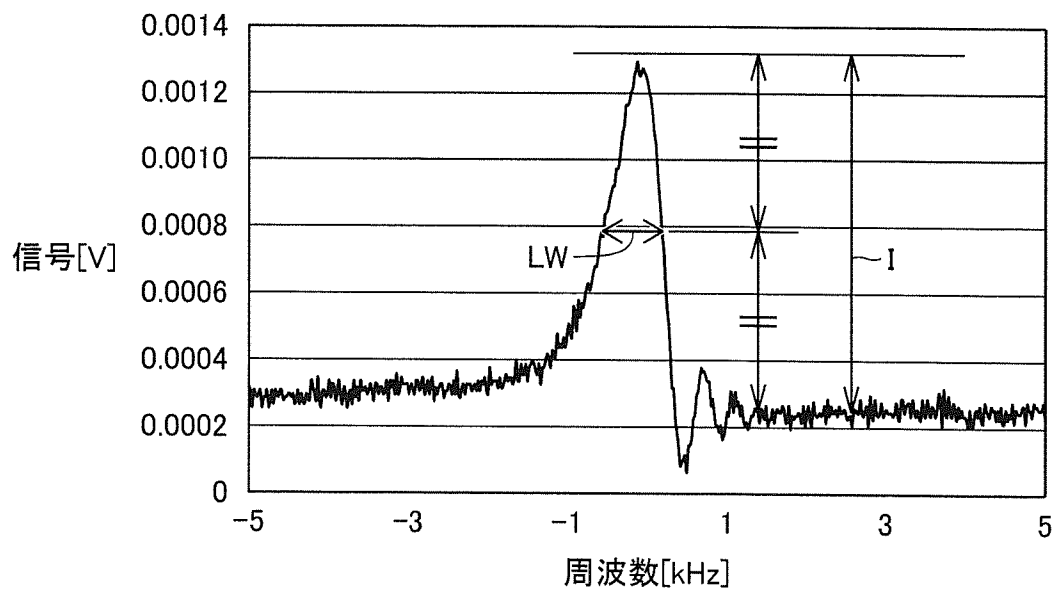
FIG.4



[図5]
FIG.5



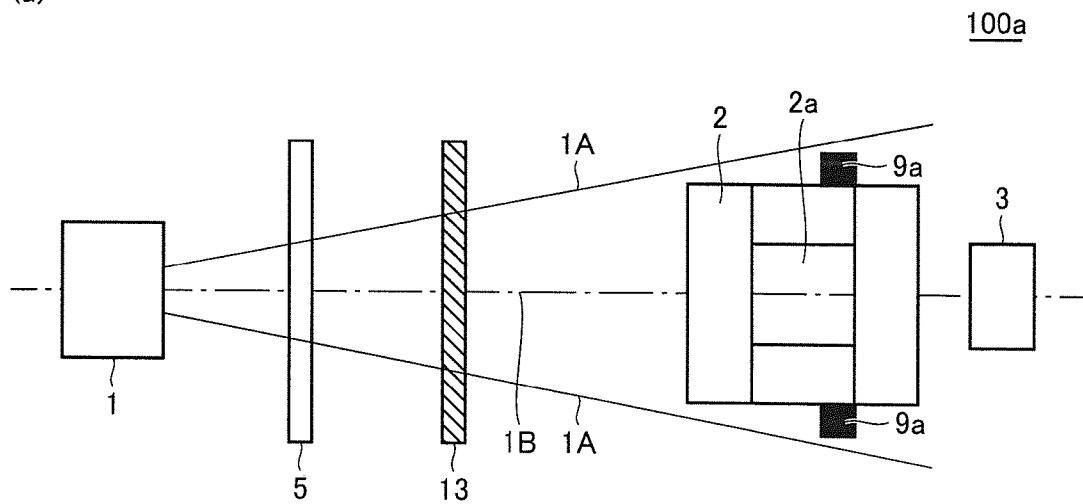
[図6]
FIG.6



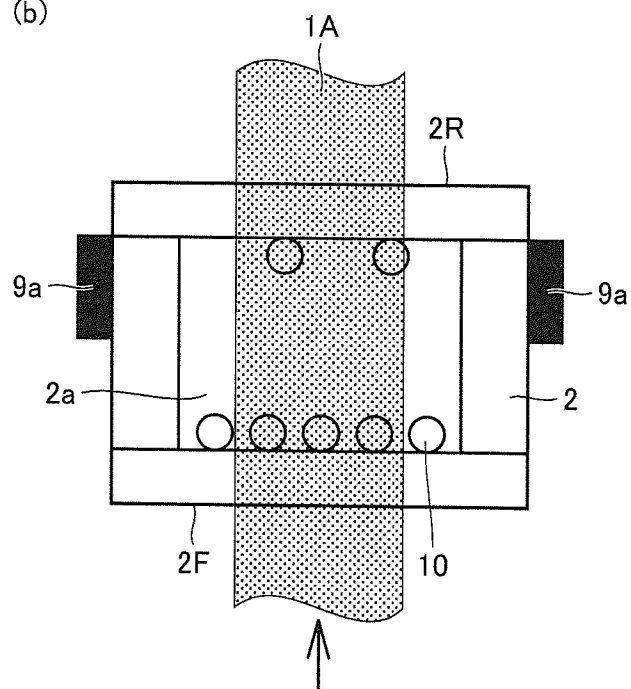
[図7]

FIG.7

(a)

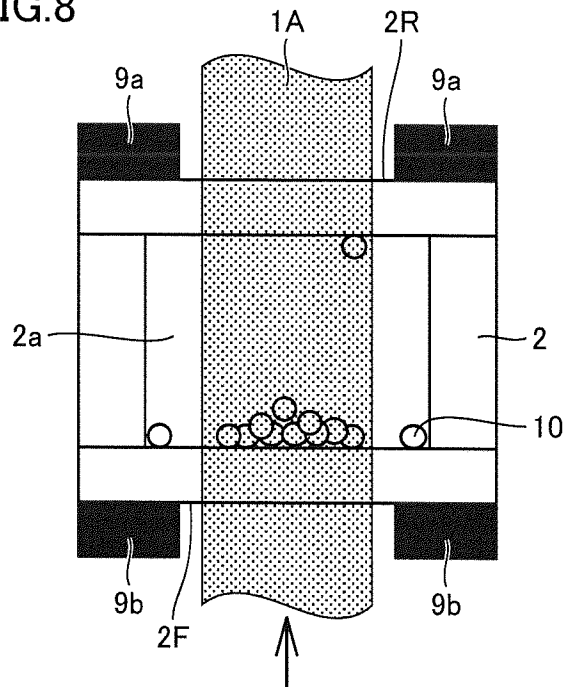


(b)



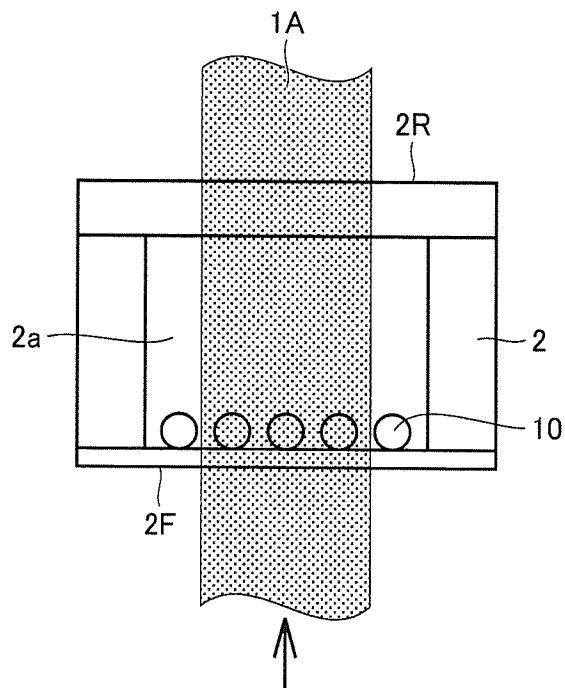
[図8]

FIG.8



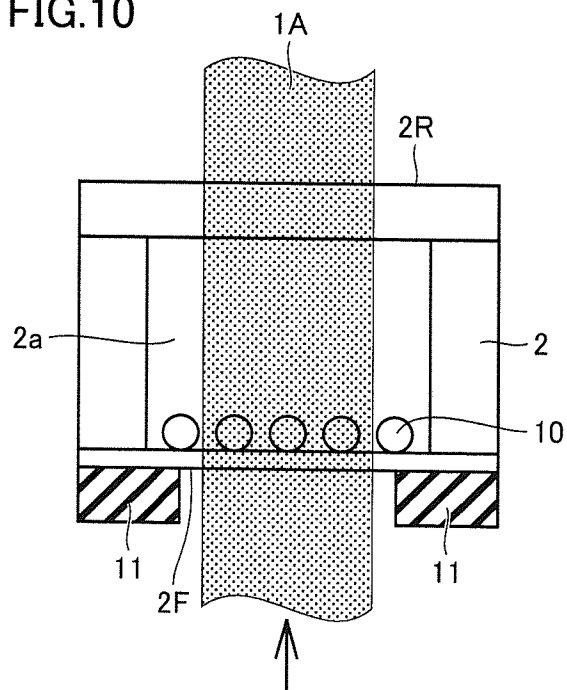
[図9]

FIG.9



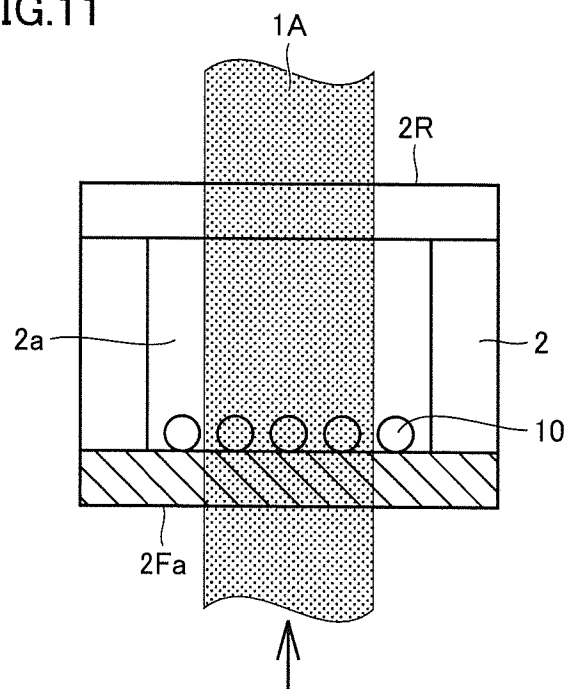
[図10]

FIG.10



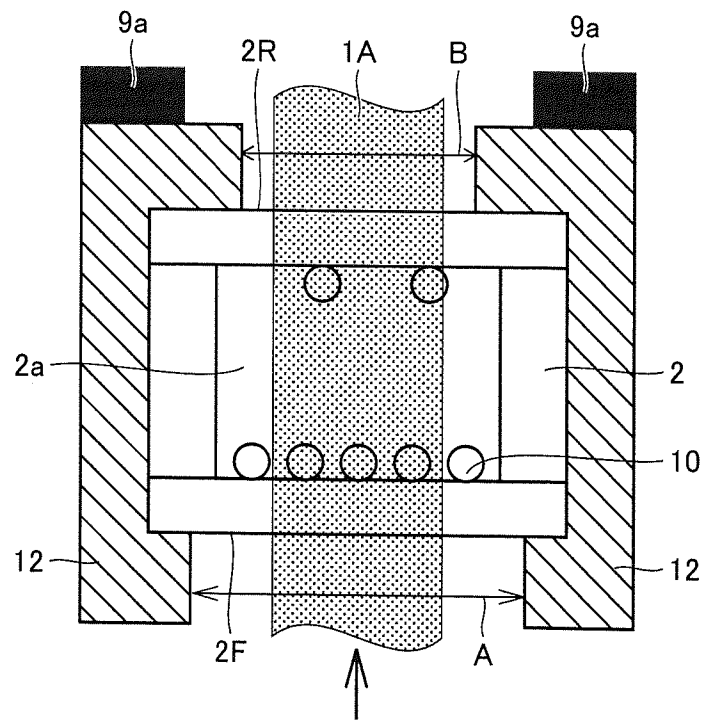
[図11]

FIG.11



[図12]

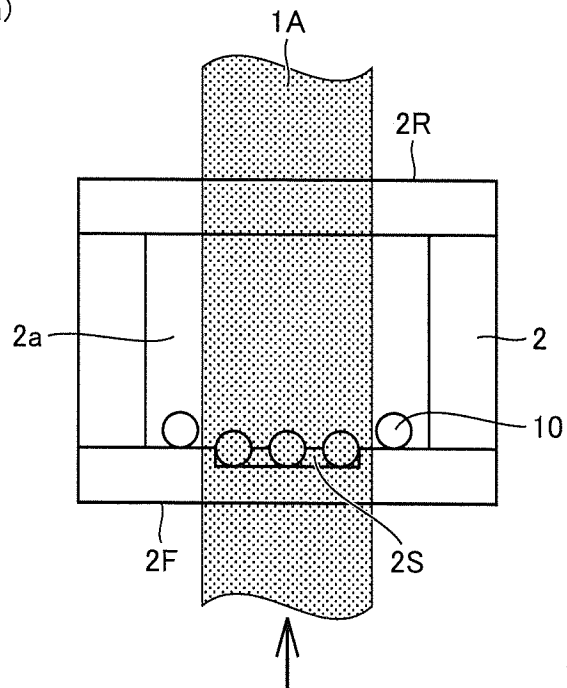
FIG.12



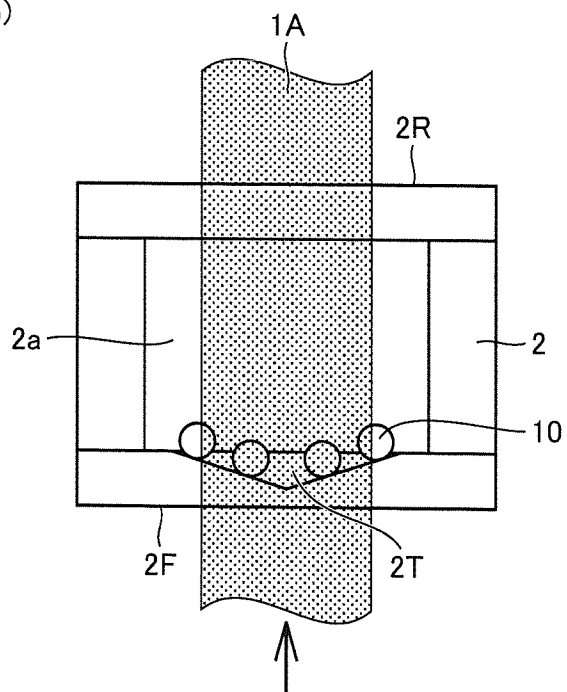
[図13]

FIG.13

(a)



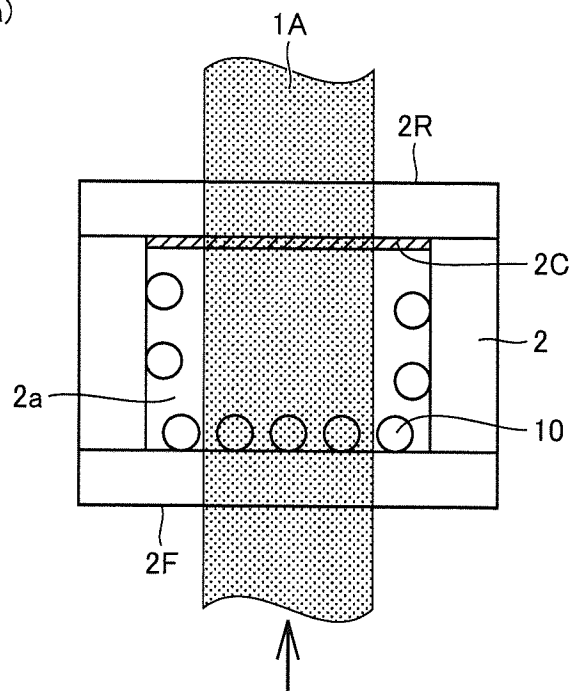
(b)



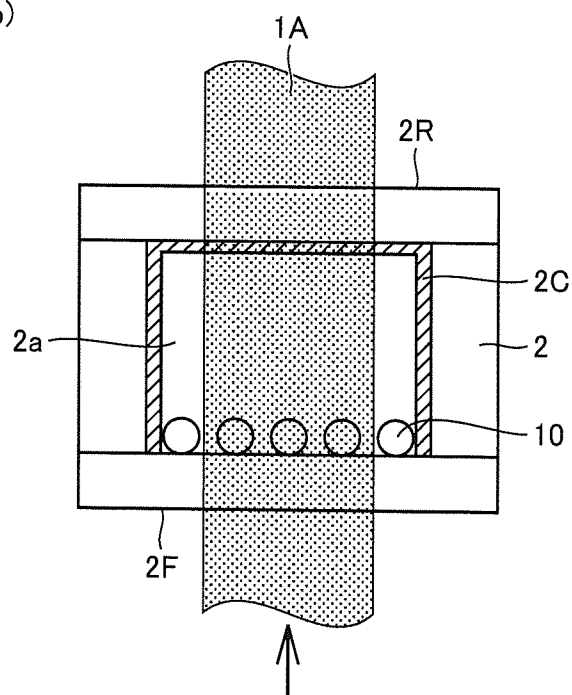
[図14]

FIG.14

(a)

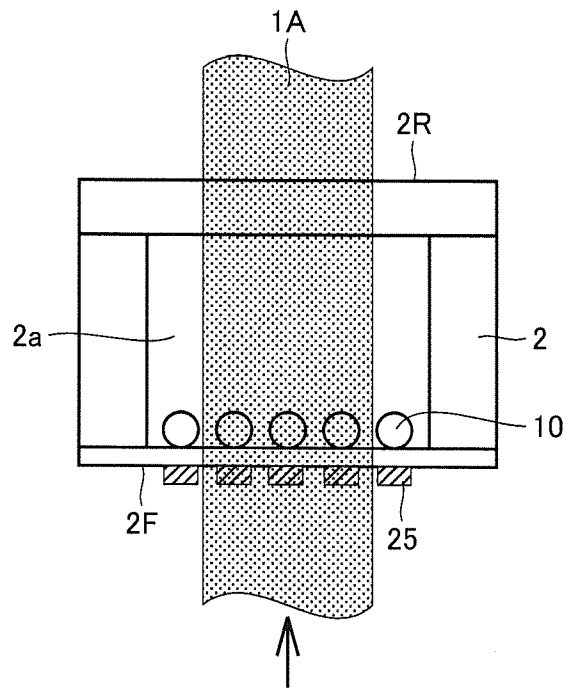


(b)



[図15]

FIG.15



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/027678

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H03L7/26(2006.01)i, G04F5/14(2006.01)i, H01S1/06(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H03L7/26, G04F5/14, H01S1/06

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 2009-302706 A (Seiko Epson Corp.), 24 December 2009 (24.12.2009), paragraphs [0002] to [0005] (Family: none)	1, 16 2-15
A	JP 2016-92442 A (Seiko Epson Corp.), 23 May 2016 (23.05.2016), fig. 1 to 4 & US 2016/0126965 A1 fig. 1 to 4 & CN 105577186 A	1-16

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
29 September 2017 (29.09.17)

Date of mailing of the international search report
17 October 2017 (17.10.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/027678

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2015-70331 A (Seiko Epson Corp.), 13 April 2015 (13.04.2015), paragraph [0053] & US 2015/0084707 A1 paragraphs [0127] to [0128] & CN 104518793 A	1-16
A	JP 2016-8836 A (Seiko Epson Corp.), 18 January 2016 (18.01.2016), paragraphs [0021] to [0023] & US 2015/0369427 A1 paragraphs [0032] to [0034] & EP 2960670 A1 & CN 105207674 A	14-15

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H03L7/26(2006.01)i, G04F5/14(2006.01)i, H01S1/06(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H03L7/26, G04F5/14, H01S1/06

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X A	JP 2009-302706 A（セイコーエプソン株式会社）2009.12.24, [0002]-[0005]（ファミリーなし）	1, 16 2-15
A	JP 2016-92442 A（セイコーエプソン株式会社）2016.05.23, 図1-4 & US 2016/0126965 A1, 図1-4 & CN 105577186 A	1-16
A	JP 2015-70331 A（セイコーエプソン株式会社）2015.04.13, [0053] & US 2015/0084707 A1, [0127]-[0128] & CN 104518793 A	1-16

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

29.09.2017

国際調査報告の発送日

17.10.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

橋本 和志

5W

4183

電話番号 03-3581-1101 内線 3576

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2016-8836 A (セイコーエプソン株式会社) 2016. 01. 18, [0021]-[0023] & US 2015/0369427 A1, [0032]-[0034] & EP 2960670 A1 & CN 105207674 A	14-15