

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2021-12902

(P2021-12902A)

(43) 公開日 令和3年2月4日(2021.2.4)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
H O 1 S 3/10 (2006.01)	H O 1 S 3/10 Z	2 F 0 5 6
H O 1 S 3/137 (2006.01)	H O 1 S 3/137	5 F 1 7 2
H O 1 S 3/00 (2006.01)	H O 1 S 3/00 G	
G O 1 K 11/12 (2021.01)	G O 1 K 11/12 H	

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2019-124798 (P2019-124798)	(71) 出願人	301022471
(22) 出願日	令和1年7月3日 (2019.7.3)		国立研究開発法人情報通信研究機構
			東京都小金井市貫井北町4-2-1
		(74) 代理人	110001807
			特許業務法人磯野国際特許商標事務所
		(72) 発明者	ピオトル モルジンスキー
			東京都小平市喜平町3丁目2-8-501
		(72) 発明者	井戸 哲也
			東京都小金井市貫井北町4-2-1 国立
			研究開発法人情報通信研究機構内
		Fターム(参考)	2F056 VF15 VF16
			5F172 NN05 NN24 NP04 NP12 NP16
			NP18 NR02 NR14

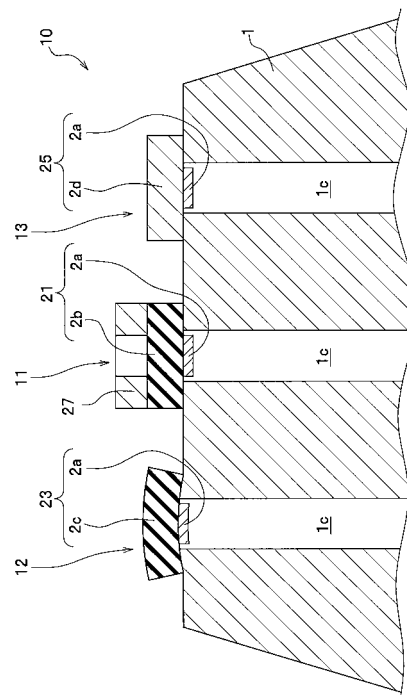
(54) 【発明の名称】 複合光共振器、温度センサ、光共振器装置

(57) 【要約】

【課題】ナノケルビンオーダーの温度管理によって、光共振器の 10^{-15} 未満の周波数の確度を実現可能な光共振器装置を提供する。

【解決手段】複合光共振器10は、スペーサ1に互いに並行するように形成された空洞1cと、それぞれの空洞1cの両端に設けられた反射鏡21, 23, 25とを備える光共振器11, 12, 13が設けられ、光共振器12の反射鏡23と光共振器13の反射鏡25とは、それぞれの基板2c, 2dによって熱膨張係数が異なる。複合光共振器10の温度が変動すると、熱膨張によって共振器長が変化し、さらに熱膨張係数の高い反射鏡23が撓んで光共振器12の共振器長がより大きく変化する。光共振器12, 13の共振周波数の差を計測することによって、複合光共振器10の温度変動を高精度で検出することができる。

【選択図】図5



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

スペーサの一面から他面まで貫通する空洞と前記空洞の両端に設けられた反射鏡とを備える光共振器を、前記スペーサに前記空洞が並行するように複数設けた複合光共振器であって、

一部の前記光共振器の反射鏡と他の前記光共振器の反射鏡とは熱膨張率が異なることを特徴とする複合光共振器。

【請求項 2】

スペーサの一面から他面まで貫通する空洞と前記空洞の両端に設けられた反射鏡とを備える光共振器を、前記スペーサに前記空洞が並行するように複数設けた複合光共振器であって、

10

一部の前記光共振器は、前記反射鏡よりも熱膨張率が低い補整部材を、前記反射鏡の前記空洞に対向する側の反対側に接続して備えることを特徴とする複合光共振器。

【請求項 3】

前記一部の光共振器の反射鏡の基板が前記スペーサと同じ材料で形成されている請求項 1 に記載の複合光共振器。

【請求項 4】

請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか一項に記載の複合光共振器と、前記複合光共振器のそれぞれの光共振器にレーザー光を導入するレーザー光源と、前記一部の光共振器と他の前記光共振器との共振周波数同士の差である共振周波数差を計測する周波数比較手段と、を備え、

20

前記共振周波数差が所定値となるときの前記複合光共振器の温度を基準温度として、前記周波数比較手段が計測した共振周波数差と前記所定値との差から、前記複合光共振器の温度と前記基準温度との差を検出する温度センサ。

【請求項 5】

請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか一項に記載の複合光共振器と、前記複合光共振器のそれぞれの光共振器にレーザー光を導入するレーザー光源と、前記一部の光共振器と他の前記光共振器との共振周波数同士の差である共振周波数差を計測する周波数比較手段と、前記複合光共振器の温度を制御する温度制御手段と、を備え、

前記温度制御手段は、前記共振周波数差が一定の値となるように、前記周波数比較手段が計測した共振周波数差に基づいて、前記複合光共振器の温度のフィードバック制御を行う光共振器装置。

30

【請求項 6】

請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか一項に記載の複合光共振器と、前記複合光共振器のそれぞれの光共振器にレーザー光を導入するレーザー光源と、前記一部の光共振器と他の前記光共振器との共振周波数同士の差である共振周波数差を計測する周波数比較手段と、前記複合光共振器の一つの光共振器に共振した光の波長をシフトさせる波長シフト手段と、を備え、

前記波長シフト手段は、前記周波数比較手段が計測した共振周波数差に基づいて、前記一つの光共振器の共振周波数の変動を打ち消すフィードフォワード制御を行う光共振器装置。

40

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、複合光共振器、温度センサ、及び光共振器装置に関する。

【背景技術】**【0002】**

原子や分子の遷移周波数を利用する原子時計に使用される光共振器は、スペーサに形成された空洞と、この空洞の両端に設けられた一对の反射鏡とを有する。共振周波数（共鳴周波数）は一对の反射鏡間の距離（共振器長）に依存するので、光共振器は、周波数変動

50

のないようにするために、温度変動による熱膨張、気圧変化による影響、及び機械的振動を極力皆無とするように構成される。

【 0 0 0 3 】

スペーサの熱膨張を抑制するために、スペーサを超低熱膨張材料で形成すると共に、温度調整機能を有する真空恒温チャンバに光共振器を収容し、さらに真空恒温チャンバと光共振器の間に熱遮蔽材を設けて、マイクロケルビン単位で温度管理される（非特許文献 1 ～ 3）。また、反射鏡にスペーサと同じ材料からなる補償部材を取り付けて、温度変動による反射鏡の撓みを抑制した光共振器が開示されている（特許文献 1）。また、複数の光共振器の並列動作によってそれぞれの帰還光の周波数を平均化して、熱振動による影響を軽減する装置が開示されている（特許文献 2）。また、光共振器は、機械的振動を抑制するために除振台に搭載される。さらに、一体のスペーサを共有する複数の光共振器を加速度センサに利用して、その出力の負帰還によって駆動する台に搭載されて能動的に除振する装置が開示されている（特許文献 3）。

10

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 4 】

【 特許文献 1 】 独国特許出願公開第 1 0 2 0 0 8 0 4 9 3 6 7 号明細書

【 特許文献 2 】 特許第 6 2 8 4 1 7 6 号公報

【 特許文献 3 】 特許第 6 2 5 6 8 7 6 号公報

【 非特許文献 】

20

【 0 0 0 5 】

【 非特許文献 1 】 J.Keller, S. Ignatovich, S. A. Webster, T. E. Mehlstaubler, "Simple vibration insensitive cavity for laser stabilization at the 10-16 level", Applied Physics B 116, 203 (2014), 2013

【 非特許文献 2 】 D.R. Leibrandt, J. C. Bergquist, T. Rosenband, "Cavity-stabilized laser with acceleration sensitivity below 10-12 g-1", Physical Review A 87, 023829 (2013), 2013

【 非特許文献 3 】 J.Alnis, A. Matveev, N. Kolachevsky, Th. Udem, T. W. Hansch, "Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Perot cavities", Physical Review A 77, 053809 (2008), 2008

30

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 6 】

しかし、光共振器は、周波数の不確かさ（確度）を 10^{-15} 未満として良好に維持するためには、ナノケルビン程度以下の温度安定性が必要とされ、現在の標準温度センサでは達成不可能である。このような温度センサの精度未満の温度変動をも抑制するために、光共振器は、大型化、精密化した恒温チャンバに、厚みのある、または二重以上の熱遮蔽材を介在して収容されるが、十分な温度管理は不可能である。

【 0 0 0 7 】

40

本発明は、前記問題点に鑑みてなされたものであり、ナノケルビンオーダーの高精度な温度センサ、及びこの温度センサを構成する複合光共振器、並びに、光共振器の 10^{-15} 未満の周波数の確度を実現可能な光共振器装置を提供することを課題とする。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 8 】

本発明に係る複合光共振器は、スペーサの一面から他面まで貫通する空洞と前記空洞の両端に設けられた反射鏡とを備える光共振器を、前記スペーサに前記空洞が並行するように複数設けた複合光共振器であって、一部の前記光共振器の反射鏡と他の前記光共振器の反射鏡とは熱膨張率が異なる構成である。

【 0 0 0 9 】

50

また、本発明に係る別の複合光共振器は、スペーサの一面から他面まで貫通する空洞と前記空洞の両端に設けられた反射鏡とを備える光共振器を、前記スペーサに前記空洞が並行するように複数設けた複合光共振器であって、一部の前記光共振器が、前記反射鏡よりも熱膨張率が低い補整部材を、前記反射鏡の前記空洞に対向する側の反対側に接続して備えるものである。

【0010】

かかる構成により、複合光共振器は、温度が変動したときに、一部の光共振器と他の光共振器とで共振器長の変化量が異なる。したがって、前記一部の光共振器と他の光共振器との共振周波数同士の差を計測することによって、温度変動を検知することができる。

【0011】

本発明に係る温度センサは、前記のいずれかの複合光共振器と、前記複合光共振器のそれぞれの光共振器にレーザー光を導入するレーザー光源と、前記一部の光共振器と他の前記光共振器との共振周波数同士の差である共振周波数差を計測する周波数比較手段と、を備え、前記共振周波数差が所定値となるときの前記複合光共振器の温度を基準温度として、前記周波数比較手段が計測した共振周波数差と前記所定値との差から、前記複合光共振器の温度と前記基準温度との差を検出する構成である。

【0012】

かかる構成により、温度センサは、一部の光共振器の温度感度が相対的に高い複合光共振器を備えて、さらに、前記一部の光共振器の共振周波数を他の光共振器の共振周波数との差として算出する周波数比較手段によって、複合光共振器の温度を高精度で検知することができる。

【0013】

本発明に係る光共振器装置は、前記のいずれかの複合光共振器と、前記複合光共振器のそれぞれの光共振器にレーザー光を導入するレーザー光源と、前記一部の光共振器と他の前記光共振器との共振周波数同士の差である共振周波数差を計測する周波数比較手段と、前記複合光共振器の温度を制御する温度制御手段と、を備え、前記温度制御手段は、前記共振周波数差が一定の値となるように、前記周波数比較手段が計測した共振周波数差に基づいて、前記複合光共振器の温度のフィードバック制御を行う構成である。

【0014】

かかる構成により、光共振器装置は、複合光共振器について、熱遮蔽材のような受動的な温度保持手段のみによらずに、また、別途温度センサを接触設置することなく、温度を所定温度に高精度で管理することができる。

【0015】

本発明に係る別の光共振器装置は、前記のいずれかの複合光共振器と、前記複合光共振器のそれぞれの光共振器にレーザー光を導入するレーザー光源と、前記一部の光共振器と他の前記光共振器との共振周波数同士の差である共振周波数差を計測する周波数比較手段と、前記複合光共振器の一つの光共振器に共振した光の波長をシフトさせる波長シフト手段と、を備え、前記波長シフト手段は、前記周波数比較手段が計測した共振周波数差に基づいて、前記一つの光共振器の共振周波数の変動を打ち消すフィードフォワード制御を行う構成である。

【0016】

かかる構成により、光共振器装置は、温度の微小な変動によって生じる共振周波数のドリフトを補償することができる。

【発明の効果】

【0017】

本発明によれば、ナノケルビンオーダーの高精度な温度センサ、及びこの温度センサを構成する複合光共振器、並びに、光共振器の 10^{-15} 未満の周波数の確度を実現可能な光共振器装置が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0018】

10

20

30

40

50

【図 1】本発明の実施形態に係る光共振器装置の構造を説明するブロック図である。

【図 2 A】本発明の実施形態に係る複合光共振器の構造を模式的に説明する外観図である。

【図 2 B】図 2 A の I I B - I I B 線における部分断面図である。

【図 3】図 1 に示す光共振器装置の波長安定化装置の構造を説明するブロック図である。

【図 4】図 1 に示す光共振器装置の同調器の構造を説明するブロック図である。

【図 5】本発明に係る複合光共振器の温度変化による変形を誇張して模式的に説明する部分断面図である。

【図 6】複合光共振器における光共振器毎の共振周波数の温度依存性を表すグラフである。

10

【発明を実施するための形態】

【0019】

本発明に係る複合光共振器、温度センサ、及び光共振器装置を実施するための形態について、図を参照して説明する。図面に示す複合光共振器及びその要素は、説明を明確にするために、大きさや位置関係等を誇張していることがあり、また、形状を単純化していることがある。また、同一構造の要素については、同じ符号を付して表す。

【0020】

〔光共振器装置〕

図 1 に示すように、本発明の実施形態に係る光共振器装置 100 は、複数の光共振器 11, 12, 13 を有する複合光共振器 10 と、光共振器 11, 12, 13 にレーザー光を導入するレーザー光源 3 と、光共振器 12 の共振周波数 f_2 と光共振器 13 の共振周波数 f_1 との差（共振周波数差）を計測する周波数比較器（周波数比較手段）7 と、複合光共振器 10 の温度を所定温度に制御する温度制御装置（温度制御手段）81 を備える真空恒温チャンバ 8 と、波長シフタ（波長シフト手段）9 と、を備え、光共振器 11 に共振した光を、温度変動による周波数ドリフト（変動）を波長シフタ 9 で打ち消して出力する。光共振器装置 100 はさらに、光アイソレータ 61 と、レーザー光源 3 が照射したレーザー光 L_0 を分岐させるビームスプリッタ 62, 63, 65 と、ミラー 64, 66 と、レーザー光源 3 の発振波長を安定化する波長安定化装置 4 と、光共振器 13, 12 に導入するレーザー光 L_1, L_2 をそれぞれ波長安定化する同調器 5, 5 と、を備える。また、真空恒温チャンバ 8 がその真空容器内に複合光共振器 10 を収容して、除振台（図示省略）に搭載されている。光共振器装置 100 が出力した光 L_{corr} は、外部の光周波数カウンタ（図示省略）等に入力される。なお、図 1、及び後記図 3 及び図 4 において、実線の矢印で電気信号を、ハッチングを付した矢印で光を、白抜き矢印で環境（温度及び圧力）の制御を、それぞれ表す。以下、各要素について詳細に説明する。

20

30

【0021】

（複合光共振器）

複合光共振器 10 は、スペーサの上面から下面まで貫通する空洞とこの空洞の両端に設けられた反射鏡とを有する光共振器を、それぞれの空洞が並行するように複数設ける。すなわち、これらの光共振器はそれぞれ、空洞を光路とするファブリペロー共振器であり、一つのスペーサを共有する。本実施形態に係る複合光共振器 10 は、図 2 A に示すように、3 つの光共振器 11, 12, 13 が一列に並んで設けられている。そのために、複合光共振器 10 は、3 本の空洞 1c が形成されたスペーサ 1、スペーサ 1 の空洞 1c 毎に両端に向かい合って設けられた反射鏡 21, 22、反射鏡 23, 24、及び反射鏡 25, 26、並びに、反射鏡 21, 22 のそれぞれに接合した補整部材 27 を備える。複合光共振器 10 を構成するこれらの部材は、低熱膨張材料で形成され、また、経年劣化し難い材料が好ましい。

40

【0022】

光共振器 11 は、その共振周波数でレーザー光源 3 の発振波長を安定化させる参照光共振器であり、かつ、周波数基準とする主光共振器として使用される。そのために、光共振器 11 は、共振周波数の安定性に特に優れるように構成される。さらに、光共振器 11 は

50

、温度感度が、他の光共振器の少なくとも一つよりも低く、すなわち光共振器 1 2 よりも低くなるように構成される。このような光共振器 1 1 は、スペーサ 1 の中心に形成された 1 本の空洞 1 c、及びその両端で向かい合う一対の反射鏡 2 1, 2 2、並びに補整部材 2 7, 2 7 で構成される。光共振器 1 2 及び光共振器 1 3 は、これら 2 つが組み合わせられて温度センサに使用される。そのために、光共振器 1 2 が光共振器 1 3 よりも温度感度が高くなるように構成される。また、光共振器 1 3 は、温度感度がより低くなるように構成されることが好ましい。光共振器 1 2 は、1 本の空洞 1 c、及びその両端で向かい合う一対の反射鏡 2 3, 2 4 で構成される。同様に、光共振器 1 3 は、1 本の空洞 1 c、及びその両端で向かい合う一対の反射鏡 2 5, 2 6 で構成される。

【0023】

スペーサ 1 は、外形が、双円錐台（樽型）で、さらに径の太い部分に鐳状に張り出した支持部を有する回転体である。この回転体の回転の軸をスペーサ 1 の中心軸と称する。スペーサ 1 は、一面から他面まで中心軸方向に貫通する空洞 1 c が 3 本形成されている。空洞 1 c は円柱形状である。空洞 1 c は、3 本が一方向に等間隔で並んで形成され、中央の 1 本の中心軸がスペーサ 1 の中心軸と一致する。スペーサ 1 の形状は、空洞 1 c を含めて回転対称性を有することが好ましい。また、スペーサ 1 の中心軸が特に機械的振動等の影響を受け難い位置であることから、中央の空洞 1 c が光共振器 1 1 に適用される。なお、空洞 1 c 内は、高真空であり、真空吸引のために、スペーサ 1 の外周面で開放するように、スペーサ 1 に形成された図示しない貫通孔と連通している。スペーサ 1 は、熱膨張係数が特に小さい材料（超低熱膨張材料）で形成される。具体的には、零膨脹率になる温度（Zero-Crossing 温度）が室温に近い U L E（Ultra-Low-Expansion、登録商標、Corning 社）ガラスやゼロデュア（Zerodur、登録商標、Schott 社）が挙げられ、クリープが小さいことから U L E ガラスが特に好ましい。

【0024】

反射鏡 2 1 及び反射鏡 2 2 は、光共振器 1 1 において、空洞 1 c の両端の開口部を塞ぐように、オプティカルコンタクトによってスペーサ 1 と接合されている。図 2 B に示すように、反射鏡 2 1, 2 2 は、それぞれ、反射面を構成する反射膜 2 a と、これを支持する基板 2 b とからなる。そして、反射鏡 2 1, 2 2 は、基板 2 b 上における空洞 1 c に対向する領域に、反射膜 2 a を成膜してなる。反射膜 2 a は、例えば、 SiO_2 と Ta_2O_5 の誘電体多層膜である。反射鏡 2 1, 2 2 は、ブラウン運動による共振周波数の変動を抑制するために、熱雑音の少ない基板 2 b を備えることが好ましい。このような基板 2 b として、石英ガラスが挙げられる。また、反射鏡 2 1 は平面鏡、反射鏡 2 2 は凹面（球面）鏡であり、それぞれの形状に基板 2 b が加工されている。あるいは、反射鏡 2 1 と反射鏡 2 2 とは、凸面鏡と凹面鏡の組合せでもよいし、両方が凹面鏡でもよい。

【0025】

反射鏡 2 3, 2 5 は反射鏡 2 1 と、反射鏡 2 4, 2 6 は反射鏡 2 2 と、それぞれ同一形状であり、これらは反射鏡 2 1, 2 2 と同様に、空洞 1 c の両端の開口部を塞ぐようにスペーサ 1 と接合されている。光共振器 1 2 の反射鏡 2 3, 2 4 は、それぞれ、反射面を構成する反射膜 2 a と、これを支持する基板 2 c とからなる。光共振器 1 3 の反射鏡 2 5, 2 6 は、それぞれ、反射面を構成する反射膜 2 a と、これを支持する基板 2 d とからなる。反射鏡 2 3, 2 4 と反射鏡 2 5, 2 6 とは、互いに熱膨張係数が異なる。そのために、反射鏡 2 3, 2 4 及び反射鏡 2 5, 2 6 のそれぞれの大部分を占める部材である基板 2 c と基板 2 d とは、互いに熱膨張係数の異なる材料で形成される。詳しくは、温度感度が高い光共振器 1 2 の反射鏡 2 3, 2 4 の基板 2 c の方が、熱膨張係数が高い材料とする。さらに、熱膨張係数の低い基板 2 d は、スペーサ 1 と同じ熱膨張係数であることが好ましく、すなわち、スペーサ 1 と同じ材料で形成されることが好ましい。例えば、スペーサ 1 が U L E ガラスで形成されている場合、反射鏡 2 5, 2 6 の基板 2 d が同じく U L E ガラスで形成され、これに対して、反射鏡 2 3, 2 4 の基板 2 c が石英ガラスや B K 7（ホウケイ酸クラウンガラス）で形成される。なお、光共振器 1 2 の反射鏡 2 3 及び反射鏡 2 4 は、少なくとも一方が反射鏡 2 5, 2 6 よりも熱膨張係数が高ければよい。例えば、反射鏡

24が熱膨張係数の高い基板2cを有し、かつ、反射鏡23が光共振器13の反射鏡25と同じ基板2dを有していてもよい。このような構成により、光共振器12は、反射鏡23, 24の両方が基板2cを有する場合よりも温度感度が低くなる。光共振器12は、後記するように、必要とする温度感度に応じて、反射鏡23, 24を設計される。

【0026】

補整部材27は、熱変動による光共振器11の共振周波数の変化を抑制するために設けられる。前記したように、反射鏡21, 22の基板2bは、石英ガラスが好適であるが、スペーサ1を構成するULEガラスよりも熱膨張係数が高い。そこで、反射鏡21, 22及びスペーサ1の熱膨張差による変形を抑制するために、反射鏡21, 22のスペーサ1との接合面と反対側に、基板2bよりも熱膨張係数の低い材料からなる補整部材27を接合する。補整部材27は、スペーサ1と反射鏡21, 22との接合と同様に、オブティカルコンタクトによって反射鏡21, 22(基板2b)と接合されている。補整部材27は、スペーサ1と同じ熱膨張係数であることが好ましく、すなわち、スペーサ1と同じ材料で形成されることが好ましい。補整部材27は、光共振器11に導入されるレーザー光の光路を避けて、空洞1cの延長上に貫通孔を有する円環柱形状に形成される。また、補整部材27は、反射鏡21, 22を、スペーサ1と共に両面から挟んでその撓みを抑制するために、厚さ及び反射鏡21, 22との接合面積が十分に大きいことが好ましい。

【0027】

光共振器11, 12, 13は、平面鏡である反射鏡21, 23, 25の側からレーザー光を導入されることが好ましく、また、光路が重力方向であることが好ましい。したがって、複合光共振器10は、図2Aに示すように、空洞1cの貫通方向を鉛直方向に向けて、真空恒温チャンバ8の真空容器内に設置される。その際、複合光共振器10は、スペーサ1の鉛直方向中心に設けられた鐔状の支持部における等間隔な3, 4点で、例えば環状の台座に取り付けられた柱によって支持されて、支持点以外を非接触とする。光共振器11, 12, 13への機械的振動等の影響を低減するために、支持点は、空洞1cからの距離が長い箇所とすることが好ましい。また、複合光共振器10は、室温近傍(例えば、25)で使用されることが好ましい。

【0028】

(レーザー光源、光学素子)

レーザー光源3は、光共振器11, 12, 13に導入するレーザー光の光源である。レーザー光源3は、供給する電流を変化させる等により、発振波長を僅かに変化させることができる。図1に示すように、レーザー光源3が照射したレーザー光L0は、光アイソレータ61を透過し、ビームスプリッタ62, 63及びミラー64によって分岐されて、波長安定化装置4または同調器5を経由して光共振器11, 12, 13に導入される。レーザー光L0はさらに、ビームスプリッタ65によって分岐されて、外部に出力される。光アイソレータ61は、レーザー光源3の発振動作の戻り光による擾乱を防止するものである。

【0029】

(波長安定化装置)

波長安定化装置4は、レーザー光源3の発振波長を、光共振器11の共振波長(共振周波数 f_0)にロックするPDH法(Pound-Drever-Hall method)によって安定化する。波長安定化装置4は、一例として、図3に示すように、レーザー光の位相を変調する光変調器42と、発振器43と、半波長板($\lambda/2$ 板、HWP)47と、PBS(偏光ビームスプリッタ)48と、4分の1波長板($\lambda/4$ 板、QWP)49と、光検出器(PD、Photodetector)44と、同期検波器45と、PID(Proportional-Integral-Differential、比例積分微分)制御器46と、を備える。

【0030】

光変調器42は、レーザー光源3から照射されて光アイソレータ61を透過したレーザー光L0を、発振器43からの信号に基づいて位相変調して側帯波を立てる。変調されたレーザー光は、その光量が半波長板47及びPBS48で調整されて、4分の1波長板4

10

20

30

40

50

9を經由して光共振器11に入射する。光共振器11から出力した光 L_{out0} は、4分の1波長板49を經由し、PBS48によって光検出器44に入力する。光検出器44は、光 L_{out0} を電気信号に変換する。同期検波器45は、この電気信号を発振器43からの信号で同期検波して、帰還信号を出力し、この帰還信号をPID制御器46が平滑化する。平滑化された帰還信号 S_{fb} は、レーザー光源3に帰還する。この帰還ループによって、レーザー光源3の出力波長を光共振器11の共振(共鳴)スペクトルにロックすることができる。

【0031】

(同調器)

同調器5は、レーザー光源3から照射されたレーザー光 L_0 を、光共振器12の共振波長(共振周波数 f_2)にロックすることによって、波長安定化したレーザー光 L_2 を得る。また、同調器5は、レーザー光 L_0 を光共振器13の共振波長(共振周波数 f_1)にロックすることによって、波長安定化したレーザー光 L_1 を得る。同調器5は、一例として、図4に示すように、波長を可変とする波長シフタ51と、レーザー光の位相を変調する光変調器52と、発振器53と、半波長板47と、PBS48と、4分の1波長板49と、光検出器(PD、Photodetector)54と、同期検波器55と、PID制御器56と、VCO(電圧制御発振器)57と、オフセット電圧源58と、を備える。なお、図4では、光共振器12にレーザー光 L_2 を導入する同調器5を示すが、光共振器13にレーザー光 L_1 を導入する同調器5も同様の構成である。

【0032】

波長シフタ51は、音響光学素子(AOM)等を備え、レーザー光 L_0 を、補正信号 S_{corr2} に基づいた波長にシフトさせる。光変調器52は、波長がシフトしたレーザー光を、発振器53からの信号に基づいて位相変調して側帯波を立てる。変調されたレーザー光は、その光量が半波長板47及びPBS48で調整されて、4分の1波長板49を經由して光共振器12に入射する。光共振器12から出力した光 L_{out2} は、4分の1波長板49を經由し、PBS48によって光検出器54に入力する。光検出器54は、光 L_{out2} を電気信号に変換する。同期検波器55は、この電気信号を発振器53からの信号で同期検波して、帰還信号を出力し、この帰還信号をPID制御器56が平滑化する。VCO57は、平滑化された帰還信号を、その強度に応じた周波数の交流信号を含む補正信号 S_{corr2} に変換する。前記周波数のオフセットは、オフセット電圧源58の電圧を調整することで設定することができる。同調器5は、光共振器12(または光共振器13)の共振波長を基準としたレーザー光の波長変動を反映した信号 S_{corr2} (または信号 S_{corr1})を出力する。ここで、PDH法のための変調は、独立な光変調器52を利用して行う以外に、波長安定化装置4で安定化されたレーザー光源3からの変調されているレーザー光を利用することもできる。また、VCO57の代わりに、シンセサイザ方式の信号発生器を用いることができる。

【0033】

(周波数比較器)

周波数比較器7は、光共振器13の共振周波数 f_1 と光共振器12の共振周波数 f_2 との差(共振周波数差) $\Delta f_{2-1}(=|f_2-f_1|)$ を計測して、電気信号として出力する。周波数比較器7が、温度変動によって相対的に変化し易い共振周波数 f_2 を、共振周波数 f_1 との差として計測することによって、共振周波数 f_2 の変化量を高精度で検出することができる。後記するように、複合光共振器10において、光共振器12,13の共振周波数差 Δf_{2-1} は数100MHzである。光共振器装置100においては、光共振器11や光共振器13の周波数の確度を 10^{-15} 未満に維持するために、周波数比較器7が、共振周波数差 Δf_{2-1} を1Hz未満の分解能で計測する。ここで、光共振器13,12に導入されるレーザー光 L_1, L_2 を波長安定化する同調器5が出力する補正信号 S_{corr1}, S_{corr2} (図1、図4参照)は、それぞれ周波数が、共振周波数 f_1, f_2 と光共振器11の共振周波数 f_0 との周波数差である。したがって、補正信号 S_{corr1}, S_{corr2} 間の周波数差(絶対値)は、光共振器12,13の共振周波数差 Δf_{2-1} と一致する。そ

10

20

30

40

50

ここで、図 1 に示すように、光共振器装置 100 においては、周波数比較器 7 に、同調器 5 から補正信号 S_{corr1} , S_{corr2} を入力する。このような周波数比較器 7 は、二重平衡混合器 (DBM) 等の周波数混合器 71 と、低周波域濾波器 (LPF) 72 と、周波数 - 電圧変換器 (FVC) 73 と、を備える。周波数混合器 71 は信号 S_{corr1} と信号 S_{corr2} とを混合し、その低周波数側の側帯波信号成分を LPF 72 が選択する。この選択された信号は、周波数が共振周波数差 Δf_{2-1} であり、FVC 73 が、周波数に対応した電圧の信号 S_{diff} に変換して出力する。

【0034】

(真空恒温チャンバ)

真空恒温チャンバ 8 は、内部を設定された温度に保持し、また、所定の圧力の真空状態とする。そのために、図 1 に示すように、真空恒温チャンバ 8 は、内部を外部環境から遮断する真空容器 (図示省略)、真空容器内の温度を制御する温度制御装置 81、及び真空容器内を真空排気する真空排気系 82 等を備える。光共振器装置 100 において、真空恒温チャンバ 8 は、真空容器に複合光共振器 10 を収容して、その温度を設定温度に保持すると共に、複合光共振器 10 の空洞 1c を高真空とする。真空容器は、高真空に対応した構造で、アルミニウム合金やステンレス鋼等で形成され、また、外部からレーザー光 L_0 , L_2 , L_1 を複合光共振器 10 の光共振器 11 , 12 , 13 に導入するために、AR コート (Anti-reflection coating) 等が形成された窓を備える。真空排気系 82 は、高真空ポンプ、圧力計及び流量計等を備える。温度制御装置 81 は、ペルチェ素子等を有する熱電冷却システム、これを制御する制御部、及び白金測温抵抗体等を用いた温度センサ等を備える。さらに、温度制御装置 81 は、複合光共振器 10 全体を均一な温度にするために、例えば、アルミニウム合金等で形成された通気孔を有する筐体を真空容器内に設置して備え、この筐体に複合光共振器 10 を収容して、筐体の外面に取り付けた熱電冷却システムで加熱、冷却する。あるいは、温度制御装置 81 は、真空容器を外側から加熱、冷却してもよい。また、真空恒温チャンバ 8 は、真空容器内に熱遮蔽材を備えていてもよい。

【0035】

(波長シフタ)

波長シフタ 9 は、同調器 5 の波長シフタ 51 と同様の構成を有し、レーザー光 L_0 を、入力された信号に基づいた波長にシフトさせる。光共振器装置 100 において、光共振器 11 に共振した光であるレーザー光 L_0 を出力する際に、波長シフタ 9 が、レーザー光 L_0 の温度変動による周波数ドリフトを補償する。そのために、波長シフタ 9 は、レーザー光 L_0 を、周波数比較器 7 が出力した信号 S_{diff} に基づいた波長にシフトさせて、光 L_{corr} として出力する。

【0036】

[温度センサ、光共振器装置の運転方法]

本発明に係る光共振器装置の運転方法、及び本発明に係る温度センサについて説明する。まず、図 5 及び図 6 を参照して、複合光共振器における光共振器の共振周波数の温度依存性について説明する。

【0037】

光共振器の共振周波数 f_0 は、共振器長 (光路長) l に依存する。共振器長の変化と共振周波数の変化の関係は下式 (1) で表される。 dl は共振器長の変化量、 df は共振周波数の変化量である。光共振器の共振器長 l とは、一対の反射鏡 (光共振器 11 においては反射鏡 21 , 22) の反射面同士の距離である。また、スぺーサは、温度変動によって熱膨張 (収縮) すると、共振器長が下式 (2) のように変化する。 α はスぺーサの熱膨張係数、 dT はスぺーサの温度変化量である。

$$df / f_0 = dl / l \quad \cdots (1)$$

$$dl = \alpha l \cdot dT \quad \cdots (2)$$

【0038】

したがって、超低熱膨張材料で形成されたスぺーサ 1 及び反射鏡 25 , 26 (基板 2d) からなる光共振器 13 は、温度に比例して (熱膨張係数が一定であると仮定した場合)

10

20

30

40

50

、僅かながらも共振器長が変化し、その結果、図 6 に実線で示すように、共振周波数 f_1 が変化する。なお、スペーサ 1 及び基板 2 d の熱膨張係数は、図 6 に示す温度域において正とする。一方、スペーサ 1 よりも熱膨張係数の高い基板 2 c を有する反射鏡 2 3, 2 4 を備える光共振器 1 2 は、温度が上昇すると、図 5 に示すように、反射鏡 2 3, 2 4 がスペーサ 1 との接合面を凹ますように撓んで変形する。このように、光共振器 1 2 は、温度変動によって、スペーサ 1 の膨張に反射鏡 2 3, 2 4 の変形が加わるので、共振器長の変化量が光共振器 1 3 よりも大きい。これに対して、光共振器 1 2 と同様に熱膨張係数の高い基板 2 b を有する反射鏡 2 1, 2 2 を備える光共振器 1 1 は、熱膨張係数の低い補整部材 2 7 によって反射鏡 2 1, 2 2 の変形が抑制される。なお、図 5 では、上下を図 2 B と逆にして、平面鏡である反射鏡 2 1, 2 3, 2 5 の側を示す。その結果、図 6 に破線で示すように、光共振器 1 2 の共振周波数 f_2 は、光共振器 1 3 の共振周波数 f_1 よりも温度依存性が大きく、すなわち、光共振器 1 2 は温度感度が高い。

【0039】

さらに、基板 2 c の熱膨張係数がスペーサ 1 や基板 2 d に対して大きいほど、共振周波数 f_1 , f_2 間の温度依存性の差も大きい。また、光共振器 1 2 の反射鏡 2 3, 2 4 の両方が基板 2 c を有する方が、一方が基板 2 d を有する構造よりも、温度感度が高い。共振周波数 f_1 , f_2 の各温度依存性 df_1/dT , df_2/dT は、予め、スペーサ 1、反射鏡 2 5, 2 6 及び反射鏡 2 3, 2 4 の各材料や寸法等に基づいて、シミュレーションで算出することができる。共振周波数 f_2 の温度依存性は、共振周波数 f_1 の温度依存性よりも $1 \mu K$ あたり $5 Hz$ 以上大きいことが好ましく、 $10 Hz$ 以上大きいことがさらに好ましい。

【0040】

ここで、複合光共振器 1 0 において、光共振器 1 1, 1 2, 1 3 は、同一形状に設計されていても、スペーサ 1 や反射鏡 2 1 ~ 2 6 の加工精度上、各共振器長に微小な誤差を有する。そのため、数 $100 THz$ である共振周波数 f_0 , f_2 , f_1 は、数 $100 MHz$ 程度の範囲でバラツキを有する。図 6 においては、 $f_1 < f_2$ とする。この場合、光共振器 1 3, 1 2 の共振周波数差 Δf_{2-1} ($= |f_2 - f_1|$) は、温度が高いほど比例して大きくなる。一方、 $f_1 > f_2$ の場合には、温度が高いほど小さくなる。

【0041】

このことから、光共振器 1 3, 1 2 の共振周波数差 Δf_{2-1} を計測することによって、複合光共振器 1 0 の温度 T を導出することができる。例えば、共振周波数差 Δf_{2-1} がある所定値（以下、参照値と称する） Δf_{ref} となるとき複合光共振器 1 0 の温度を基準温度 T_{ref} に設定する。図 6 においては、このとき、 $f_1 = f_0$ 、 $f_2 = f_0 + \Delta f_{ref}$ とする（ $f_1 < f_2$ ）。なお、複合光共振器 1 0 がある温度（基準温度） T_{ref} であるときの共振周波数差 Δf_{2-1} を参照値 Δf_{ref} に設定してもよいし、光共振器 1 1 の共振周波数 f_0 を基準にして参照値 Δf_{ref} 及び基準温度 T_{ref} を設定してもよい。共振周波数差 Δf_{2-1} の、参照値 Δf_{ref} との大小関係を含む差（ $\Delta f_{2-1} - \Delta f_{ref}$ ）から、共振周波数 f_1 , f_2 の温度依存性 df_1/dT , df_2/dT に基づいて、複合光共振器 1 0 の温度 T を基準温度 T_{ref} との差（ $T - T_{ref}$ ）として算出することができる。光共振器装置 1 0 0 においては、前記したように、周波数比較器 7 が、共振周波数差 Δf_{2-1} に対応した電圧の信号 S_{diff} を出力するので、信号 S_{diff} の電圧から、複合光共振器 1 0 の温度 T の基準温度 T_{ref} との差（ $T - T_{ref}$ ）を算出することができる。

【0042】

このように、スペーサ 1 を共有し、かつ反射鏡の熱膨張係数が異なる光共振器 1 3, 1 2 を備える複合光共振器 1 0 によれば、共振周波数差 Δf_{2-1} を計測することによって、複合光共振器 1 0 の温度 T を基準温度 T_{ref} との差として検出することができる。特に、共振周波数差 Δf_{2-1} を $1 Hz$ 未満で計測することによって、光共振器装置 1 0 0 をナノケルビンオーダーの温度センサとして使用することができる。

【0043】

また、光共振器 1 1 について、共振周波数 f_0 の温度依存性 df_0/dT を光共振器 1

2, 13と同様に予め算出しておくことにより、共振周波数差 Δf_{2-1} から、複合光共振器10の温度変動に伴う共振周波数 f_0 の変動(ドリフト)量を推測することができる。そこで、光共振器装置100は、周波数比較器7が出力した信号 S_{diff} を波長シフタ9に入力するように構成され、外部に出力されるレーザー光 L_0 を、波長シフタ9が信号 S_{diff} の電圧に応じた波長にシフトする。波長シフタ9によって波長をシフトされた光 L_{corr} は、推測による基準温度 T_{ref} における共振周波数を有する。このように、光共振器装置100は、温度感度の互いに異なる光共振器12と光共振器13とによって、光共振器12よりも温度感度の低い光共振器11について、その共振した光の温度変動による周波数ドリフトを打ち消すフィードフォワード制御を可能とする。その結果、光共振器11の共振周波数の長期安定度を改善することができる。

10

【0044】

〔変形例〕

光共振器装置100において、周波数比較器7が共振周波数差 $\Delta f_{2-1} \neq \Delta f_{ref}$ を算出した場合には、 $T \neq T_{ref}$ であることが検出される。そこで、 $(\Delta f_{2-1} - \Delta f_{ref})$ に応じて温度制御装置81を駆動して、真空恒温チャンバ8の真空容器内の温度を上昇または降下させることにより、 $\Delta f_{2-1} = \Delta f_{ref}$ に補整、すなわち複合光共振器10の温度 T を基準温度 T_{ref} に補整することができる。そのために、光共振器装置100は、周波数比較器7が出力した信号 S_{diff} を温度制御装置81に入力するように構成されてもよい。温度制御装置81の制御部が信号 S_{diff} の電圧に応じて熱電冷却システムを駆動して、温度を上昇、降下、または維持する。このように、光共振器装置100は、温度感度の互いに異なる光共振器12と光共振器13とによって、温度の高精度なフィードバック制御を可能とし、光共振器12よりも温度感度の低い光共振器11について、共振周波数の長期安定度を改善することができる。したがって、光共振器装置100は、レーザー光 L_0 を、温度変動による周波数ドリフトのない、光共振器11に共振した光として、直接に出力することができる、波長シフタ9が不要となる。

20

【0045】

前記のように、基準温度 T_{ref} に補整するために温度制御装置81が温度を上昇または降下させたとき、光共振器11, 12, 13の各共振周波数が基準温度 T_{ref} における値に推移する、すなわち $\Delta f_{2-1} = \Delta f_{ref}$ に補整されるまでには時間がかかる場合がある。そこで、光共振器装置100は、波長シフタ9によるレーザー光 L_0 の周波数のフィードフォワード制御と温度制御装置81による温度のフィードバック制御とが併用されてもよい。そのために、光共振器装置100は、周波数比較器7が出力した信号 S_{diff} を、波長シフタ9と温度制御装置81とに入力するように構成される。このような構成により、光共振器装置100は、短期的には、波長シフタ9によってレーザー光 L_0 の周波数ドリフトを補償して出力しつつ、中長期的には、温度制御装置81によって周波数ドリフトのないレーザー光 L_0 を得ることができる。

30

【0046】

複合光共振器10は、温度センサのみに使用される場合には、光共振器12と光共振器13の2つのみを設けた構造としてもよい。また、光共振器13は、超低熱膨張材料からなる基板2dによらずに、光共振器11のように補整部材27を備えて、反射鏡25, 26の変形を抑制する構成としてもよい。さらにこのことから、光共振器13に代えて光共振器11を、光共振器12と組み合わせて温度センサに使用することができる。このように、複合光共振器10は、2つの光共振器11, 12(または光共振器12, 13)を備える場合には、ダミーの光共振器を1つ備える構成としてもよいし、スペーサ1に中心軸で対称に2本の空洞1cを形成してもよい。また、光共振器12について、熱膨張係数の高い基板2cを有する反射鏡23, 24の一方に、補整部材27を接合して、温度感度を低く調整してもよい。

40

【0047】

光共振器装置100において、光共振器11と光共振器12の共振周波数差を計測して複合光共振器10の温度変動を検出する場合には、光共振器12に導入するレーザー光 L

50

2を波長安定化する同調器5の補正信号 S_{corr2} のみを、周波数比較器7のFVC73に
入力して信号 S_{diff} に変換すればよい。前記したように、補正信号 S_{corr2} は、周波数が
、光共振器12の共振周波数 f_2 と光共振器11の共振周波数 f_0 との周波数差である。

【0048】

図1に示す光共振器装置100においては、1台のレーザー光源3が照射したレーザー
光 L_0 を分岐させて光共振器11, 12, 13に導入しているが、レーザー光源3を2台
ないし3台備えて、それぞれに波長安定化装置4を設けて独立したレーザー光を導入して
もよい。この場合、周波数比較器7は、一例として、周波数混合器71に代えて光検出器
を備える。光共振器装置100は、光共振器13, 12から波長安定化装置4または同調
器5に入力する出力光 L_{out1} , L_{out2} を、それぞれビームスプリッタ(図示せず)で分
岐させて、周波数比較器7の光検出器にも入力するように構成される。そして、光検出器
上で出力光 L_{out1} , L_{out2} を干渉させてビート周波数を有する電気信号を抽出する。

【0049】

複合光共振器10は、温度感度の高い光共振器を2以上備えてもよい。例えば、光共振
器13を光共振器12と同様に温度感度の高い構成として、光共振器11との共振周波数
差を計測する。このような複合光共振器10においては、光共振器12, 13の各共振周
波数の平均(特許文献2参照)と光共振器11の共振周波数との差を計測して、温度変動
を検出する。あるいは、光共振器13と光共振器11の共振周波数差、光共振器12と光
共振器11の共振周波数差をそれぞれ計測してもよい。さらにこの場合、光共振器12と
光共振器13とで温度感度の異なる構成として、光共振器11を含めて3段階の温度感度
としてもよい。このような構成は、基板2b, 2c, 2dを、3段階に異なる熱膨張係数
とすることによって得られる。あるいは、光共振器12の反射鏡23, 24は両方共に熱
膨張係数の高い構成とし、光共振器13の反射鏡25, 26は一方のみ熱膨張係数の高い
構成とするか補整部材27を設ける。また、複合光共振器10は、4以上の光共振器を備
えて、温度センサ以外の用途を追加されてもよい(例えば、特許文献3参照)。

【0050】

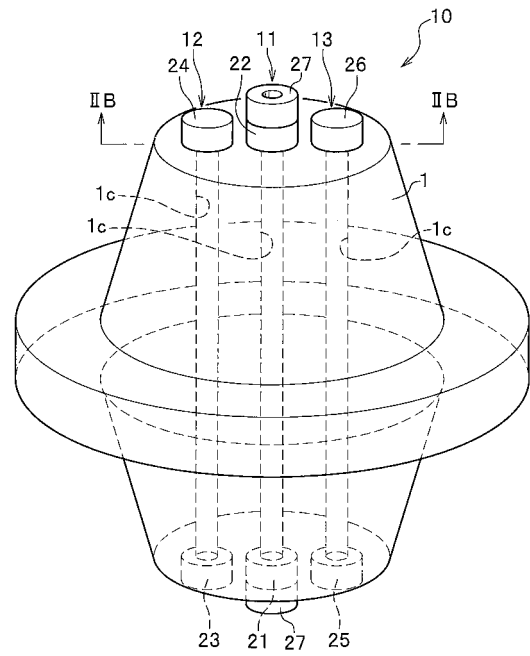
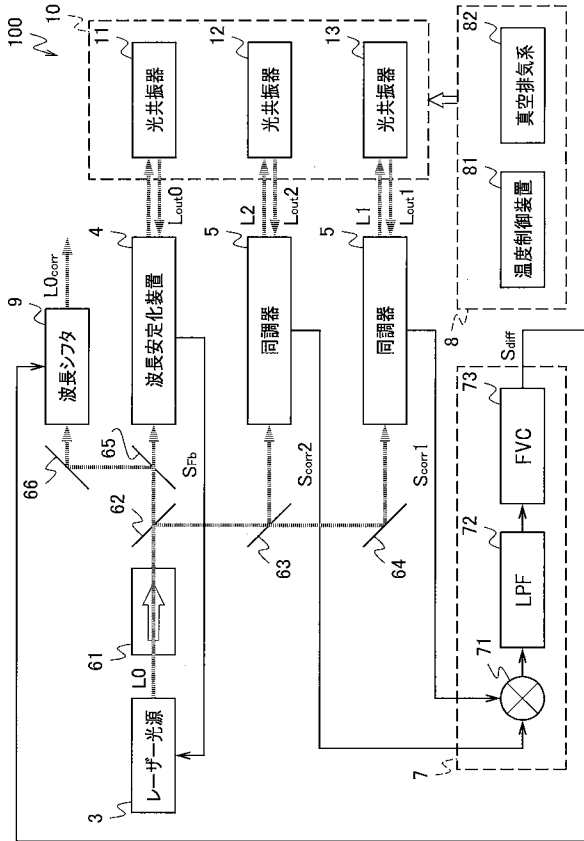
以上、本発明に係る複合光共振器、温度センサ、及び光共振器装置を実施するための各
実施形態について述べてきたが、本発明はこれらの実施形態に限定されるものではなく、
請求項に示した範囲で種々の変更が可能である。

【符号の説明】

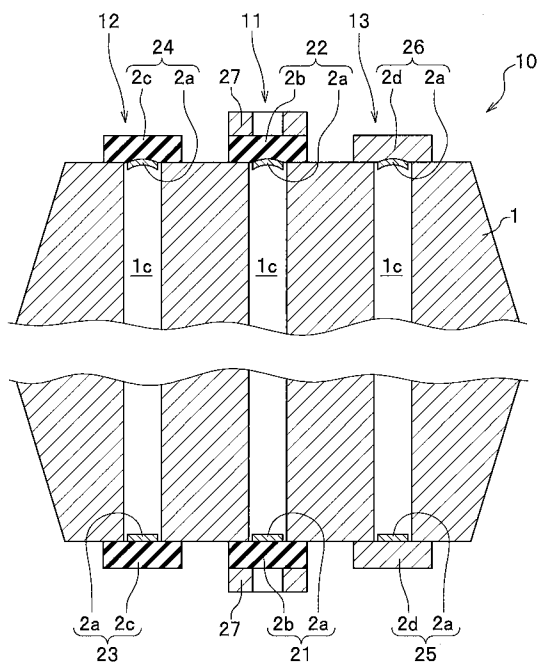
【0051】

- 100 光共振器装置
- 10 複合光共振器
- 1 スペーサ
- 11, 12, 13 光共振器
- 1c 空洞
- 21, 23, 25 反射鏡
- 22, 24, 26 反射鏡
- 27 補整部材
- 2a 反射膜
- 2b, 2c, 2d 基板
- 3 レーザー光源
- 4 波長安定化装置
- 5 同調器
- 7 周波数比較器(周波数比較手段)
- 8 真空恒温チャンバ
- 81 温度制御装置(温度制御手段)
- 9 波長シフタ(波長シフト手段)

【 図 2 A 】



【 図 2 B 】



【 図 3 】

