

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5910808号
(P5910808)

(45) 発行日 平成28年4月27日 (2016. 4. 27)

(24) 登録日 平成28年4月8日 (2016. 4. 8)

(51) Int.Cl.		F I	
H O 1 S	1/06	(2006.01)	H O 1 S 1/06
H O 3 L	7/26	(2006.01)	H O 3 L 7/26
H O 1 S	3/1055	(2006.01)	H O 1 S 3/1055

請求項の数 6 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2011-55434 (P2011-55434)	(73) 特許権者	000002369
(22) 出願日	平成23年3月14日 (2011. 3. 14)		セイコーエプソン株式会社
(65) 公開番号	特開2012-191121 (P2012-191121A)		東京都新宿区新宿四丁目1番6号
(43) 公開日	平成24年10月4日 (2012. 10. 4)	(74) 代理人	100090387
審査請求日	平成26年2月26日 (2014. 2. 26)		弁理士 布施 行夫
		(74) 代理人	100090398
			弁理士 大淵 美千栄
		(72) 発明者	西田 哲朗
			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	林 祥恵

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子発振器用の光学モジュールおよび原子発振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

量子干渉効果を利用する原子発振器用の光学モジュールであって、
 所定の波長を有する基本波、当該基本波の側帯波、を含む光を出射する光源と、
 前記光源からの光が入射し、当該入射した光のうち前記側帯波を透過させる波長選択部と、
 アルカリ金属ガスを封入し、前記波長選択部を透過した光が照射されるガスセルと、
 前記ガスセルに照射された光のうち前記ガスセルを透過した光の強度を検出する光検出部と、
 を含み、
 前記波長選択部は、
 ファイバーブラッググレーティングと、
 前記ファイバーブラッググレーティングの温度を制御する温度制御部と、
 を有し、
 前記ファイバーブラッググレーティングはボビンに巻きつけられ、
 前記ボビンに巻きつけられた前記ファイバーブラッググレーティングは、前記温度制御部によって加熱され、
 前記温度制御部は、熱光学効果によって、前記ファイバーブラッググレーティングが透過させる光の波長範囲を変化させ、
 前記光源に対する制御信号は、前記光学モジュールの外部から入力され、

10

20

前記光検出部の出力信号が前記光学モジュールの出力信号である、ことを特徴とする原子発振器用の光学モジュール。

【請求項 2】

前記温度制御部は、所定の抵抗値を示す抵抗体を有し、

前記抵抗体に流す電流を制御することにより、前記ファイバーブラッググレーティングの温度を制御する、ことを特徴とする請求項 1 に記載の原子発振器用の光学モジュール。

【請求項 3】

前記光源は、面発光型レーザーである、ことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の原子発振器用の光学モジュール。

【請求項 4】

さらに、前記光源から出射された光を、前記ファイバーブラッググレーティングに入射させる光学素子を有する、ことを特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれか 1 項に記載の原子発振器用の光学モジュール。

【請求項 5】

請求項 1 ないし 4 のいずれか 1 項に記載の原子発振器用の光学モジュールを含む、ことを特徴とする原子発振器。

【請求項 6】

量子干渉効果を利用する原子発振器であって、

所定の波長を有する基本波、当該基本波の側帯波、を含む光を出射する光源と、

前記光源からの光が入射し、当該入射した光のうち前記側帯波を透過させる波長選択部と、

アルカリ金属ガスを封入し、前記波長選択部を透過した光が照射されるガスセルと、

前記ガスセルに照射された光のうち前記ガスセルを透過した光の強度を検出する光検出部と、

前記光検出部からの信号を基にして前記光源に変調信号を出力する変調回路と、を含む、

前記波長選択部は、

ファイバーブラッググレーティングと、

前記ファイバーブラッググレーティングの温度を制御する温度制御部と、

を有し、

前記ファイバーブラッググレーティングはボビンに巻きつけられ、

前記ボビンに巻きつけられた前記ファイバーブラッググレーティングは、前記温度制御部によって加熱され、

前記温度制御部は、熱光学効果によって、前記ファイバーブラッググレーティングが透過させる光の波長範囲を変化させ、

前記変調信号を前記原子発振器の出力とする、ことを特徴とする原子発振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子発振器用の光学モジュールおよび原子発振器に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、量子干渉効果のひとつである C P T (Coherent Population Trapping) を利用した原子発振器が提案され、装置の小型化や低消費電力化が期待されている。C P T を利用した原子発振器は、アルカリ金属原子に互いに波長 (周波数) の異なる 2 つの共鳴光を同時に照射すると、2 つの共鳴光の吸収が停止する現象 (E I T 現象: Electromagnetically Induced Transparency) を利用した発振器である。例えば、特許文献 1 には、C P T を利用した原子発振器として、コヒーレントな光を発する光源と、アルカリ金属原子が封入されたガスセルと、ガスセルを透過した光の強度を検出する受光素子と、を有する光学モジュールを含んで構成された原子発振器が記載されている。

【 0 0 0 3 】

C P Tを利用した原子発振器では、例えば、光源として半導体レーザーが用いられる。光源として半導体レーザーを用いた原子発振器では、例えば、半導体レーザーの駆動電流を変調することによって半導体レーザーから出射される光に側帯波を発生させて、E I T現象を発現させている。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 4 】

【 特許文献 1 】 特開 2 0 0 9 - 8 9 1 1 6 号 公 報

【 発明の概要 】

10

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 5 】

しかしながら、駆動電流が変調された半導体レーザーから出射される光には、側帯波だけでなく、E I T現象に寄与しない中心波長を有する基本波（搬送波）も含まれる。この基本波がアルカリ金属原子に照射されると、アルカリ金属原子が吸収する光の波長（周波数）が変化して（A C シュタルク効果）、原子発振器の周波数の安定度を低下させる場合がある。

【 0 0 0 6 】

本発明のいくつかの態様に係る目的の1つは、周波数安定度の高い原子発振器を得ることが可能な原子発振器用の光学モジュールを提供することにある。また、本発明のいくつかの態様に係る目的の1つは、上記原子発振器用の光学モジュールを有する原子発振器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 7 】

本発明に係る原子発振器用の光学モジュールは、
量子干渉効果を利用する原子発振器用の光学モジュールであって、
所定の波長を有する基本波、当該基本波の側帯波、を含む光を出射する光源と、
前記光源からの光が入射し、当該入射した光のうち前記側帯波を透過させる波長選択部と、

アルカリ金属ガスを封入し、前記波長選択部を透過した光が照射されるガスセルと、
前記ガスセルに照射された光のうち前記ガスセルを透過した光の強度を検出する光検出部と、
を含み、

30

前記波長選択部は、
ファイバーブラッググレーティングと、
前記ファイバーブラッググレーティングの温度を制御する温度制御部と、
を有する。

【 0 0 0 8 】

このような原子発振器用の光学モジュールによれば、波長選択部が、光源からの光に含まれる基本波の強度を減少または基本波を消滅させることができる。これにより、E I T現象に寄与しない基本波がアルカリ金属原子に照射されることを抑制または防止できる。したがって、A C シュタルク効果による周波数変動を抑制することができ、周波数安定度の高い発振器を提供できる。さらに、波長選択部が、ファイバーブラッググレーティングの温度を制御するための温度制御部を有しているため、熱光学効果によってファイバーグレーティングの波長選択特性（ファイバーグレーティングが選択する波長範囲）を変化させることができる。これにより、波長選択部は、製造誤差や環境変化等によるファイバーブラッググレーティングの波長選択特性のずれを補正することができる。

40

【 0 0 0 9 】

本発明に係る原子発振器用の光学モジュールにおいて、
前記温度制御部は、所定の抵抗値を示す抵抗体を有し、

50

前記抵抗体に流す電流を制御することにより、前記ファイバーブラッググレーティングの温度を制御することができる。

【0010】

このような原子発振器用の光学モジュールによれば、波長選択部を簡易な構成とすることができる。

【0011】

本発明に係る原子発振器用の光学モジュールにおいて、
前記光源は、面発光型レーザーであることができる。

【0012】

このような原子発振器用の光学モジュールによれば、面発光型レーザーは、端面発光型レーザーと比べて、ゲインを生じさせるための電流が少ないため、低消費電力化を図ることができる。

10

【0013】

本発明に係る原子発振器用の光学モジュールにおいて、
前記光源から出射された光を、前記ファイバーブラッググレーティングに入射させる光学素子を有することができる。

【0014】

このような原子発振器用の光学モジュールによれば、光源から出射された光を、効率よくファイバーブラッググレーティングに導くことができる。

【0015】

20

本発明に係る原子発振器は、
本発明に係る原子発振器用の光学モジュールを含む。

【0016】

このような原子発振器は、本発明に係る原子発振器用の光学モジュールを含むため、ACシュタルク効果による周波数変動を抑制することができ、周波数安定度を高めることができる。

【0017】

本発明に係る原子発振器は、
量子干渉効果を利用する原子発振器であって、
所定の波長を有する基本波、当該基本波の側帯波、を含む光を出射する光源と、
前記光源からの光が入射し、当該入射した光のうち前記側帯波を透過させる波長選択部と、

30

アルカリ金属ガスを封入し、前記波長選択部を透過した光が照射されるガスセルと、
前記ガスセルに照射された光のうち前記ガスセルを透過した光の強度を検出する光検出部と、

を含み、

前記波長選択部は、
ファイバーブラッググレーティングと、
前記ファイバーブラッググレーティングの温度を制御する温度制御部と、

を有する。

40

【0018】

このような原子発振器によれば、波長選択部が、光源からの光に含まれる基本波の強度を減少または基本波を消滅させることができる。これにより、EIT現象に寄与しない基本波がアルカリ金属原子に照射されることを抑制または防止できる。したがって、ACシュタルク効果による周波数変動を抑制することができ、周波数安定度の高い発振器を提供できる。さらに、波長選択部が、ファイバーブラッググレーティングの温度を制御するための温度制御部を有しているため、熱光学効果によってファイバーブラッググレーティングの波長選択特性（ファイバーブラッググレーティングが選択する波長範囲）を変化させることができる。これにより、波長選択部は、製造誤差や環境変化等によるファイバーブラッググレーティングの波長選択特性のずれを補正することができる。

50

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】本実施形態に係る原子発振器の機能ブロック図。

【図2】図2(A)はアルカリ金属原子の型3準位モデルと第1側帯波及び第2側帯波の関係を示す図、図2(B)は、光源で発生する第1光の周波数スペクトラムを示す図。

【図3】波長選択部から射出された第2光の周波数スペクトラムを示す図。

【図4】本実施形態に係る原子発振器の構成を示すブロック図。

【図5】本実施形態に係る光学モジュールの要部を模式的に示す斜視図。

【発明を実施するための形態】

【0020】

10

以下、本発明の好適な実施形態について、図面を参照しながら説明する。

【0021】

まず、本実施形態に係る光学モジュールおよび原子発振器について、図面を参照しながら説明する。本実施形態に係る原子発振器は、本実施形態に係る光学モジュールを含む。図1は、本実施形態に係る原子発振器1の機能ブロック図である。原子発振器1は、量子干渉効果を利用した発振器である。

【0022】

原子発振器1は、光学モジュール2と、制御部50と、を含む。

【0023】

光学モジュール2は、光源10と、波長選択部20と、ガスセル30と、光検出部40と、を含む。

20

【0024】

光源10は、所定の中心波長（中心周波数）を有する基本波Fと、互いに異なる波長を有する第1側帯波W1および第2側帯波W2と、を含む第1光L1を発生させる。

【0025】

波長選択部20は、第1光L1から第1側帯波W1および第2側帯波W2を選択し、第2光L2として射出する。波長選択部20は、所定の波長範囲の光を選択して射出するファイバーブラッググレーティング（以下、「FBG」ともいう）20aと、FBG20aの温度を制御するための温度制御部20bと、を有する。温度制御部20bは、FBG20aの温度を制御することにより、FBG20aが選択する波長範囲（波長選択特性）を

30

【0026】

ガスセル30は、アルカリ金属ガスを封入しており、ガスセル30には、第2光L2が照射される。

【0027】

光検出部40は、ガスセル30を透過した第2光L2の強度を検出する。

【0028】

制御部50は、光検出部40の検出結果に基づいて、第1側帯波W1および第2側帯波W2の波長（周波数）差が、ガスセル30に封入されたアルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数に等しくなるように制御する。制御部50は、光検出部40の検出結果に基づいて、変調周波数 f_m を有する検出信号を発生させる。そして、光源10は、この検出信号に基づいて所定の周波数 f_0 を有する基本波Fを変調して、周波数 $f_1 = f_0 + f_m$ を有する第1側帯波W1、および周波数 $f_2 = f_0 - f_m$ を有する第2側帯波W2を発生させる。

40

【0029】

図2(A)は、アルカリ金属原子の型3準位モデルと第1側帯波W1及び第2側帯波W2の関係を示す図である。図2(B)は、光源10で発生する第1光L1の周波数スペクトラムを示す図である。

【0030】

図2(B)に示すように、光源10において発生する第1光L1は、中心周波数 f_0 （

50

$= v / \lambda_0$: v は光の速度、 λ_0 はレーザー光の中心波長) を有する基本波 F と、中心周波数 f_0 に対して上側サイドバンドに周波数 f_1 を有する第 1 側帯波 $W1$ と、中心周波数 f_0 に対して下側サイドバンドに周波数 f_2 を有する第 2 側帯波 $W2$ と、を含む。第 1 側帯波 $W1$ の周波数 f_1 は、 $f_1 = f_0 + f_m$ であり、第 2 側帯波 $W2$ の周波数 f_2 は、 $f_2 = f_0 - f_m$ である。

【0031】

図 2 (A) 及び図 2 (B) に示すように、第 1 側帯波 $W1$ の周波数 f_1 と第 2 側帯波 $W2$ の周波数 f_2 との周波数差が、アルカリ金属原子の基底準位 $GL1$ と基底準位 $GL2$ のエネルギー差 E_{12} に相当する周波数と一致している。したがって、アルカリ金属原子は、周波数 f_1 を有する第 1 側帯波 $W1$ と周波数 f_2 を有する第 2 側帯波 $W2$ によって EIT 現象を起こす。

10

【0032】

ここで、EIT 現象について説明する。アルカリ金属原子と光との相互作用は、型 3 準位系モデルで説明できることが知られている。図 2 (A) に示すように、アルカリ金属原子は 2 つの基底準位を有し、基底準位 $GL1$ と励起準位とのエネルギー差に相当する波長 (周波数 f_1) を有する第 1 側帯波 $W1$ 、あるいは基底準位 $GL2$ と励起準位とのエネルギー差に相当する波長 (周波数 f_2) を有する第 2 側帯波 $W2$ を、それぞれ単独でアルカリ金属原子に照射すると、光吸収が起きる。ところが、図 2 (B) に示すように、このアルカリ金属原子に、周波数差 $f_1 - f_2$ が基底準位 $GL1$ と基底準位 $GL2$ のエネルギー差 E_{12} に相当する周波数と正確に一致する第 1 側帯波 $W1$ と第 2 側帯波 $W2$ を同時に照射すると、2 つの基底準位の重ね合わせ状態、即ち量子干渉状態になり、励起準位への励起が停止して第 1 側帯波 $W1$ と第 2 側帯波 $W2$ がアルカリ金属原子を透過する透明化現象 (EIT 現象) が起きる。この EIT 現象を利用し、第 1 側帯波 $W1$ と第 2 側帯波 $W2$ との周波数差 $f_1 - f_2$ が基底準位 $GL1$ と基底準位 $GL2$ のエネルギー差 E_{12} に相当する周波数からずれた時の光吸収挙動の急峻な変化を検出し制御することで、高精度な発振器をつくることができる。

20

【0033】

しかし、図 2 (B) に示した第 1 光 $L1$ がガスセル 30 に直接照射されると、第 1 側帯波 $W1$ と第 2 側帯波 $W2$ と同時に、基本波 F がガスセル 30 すなわちアルカリ金属原子に照射されることになる。EIT 現象に寄与しない基本波 F がアルカリ金属原子に照射されると、AC シュタルク効果により、アルカリ金属原子が吸収する光の波長 (周波数) が変化する。これにより、アルカリ金属原子を透過する第 1 側帯波 $W1$ と第 2 側帯波 $W2$ の量が変化してしまう。EIT 現象を利用した発振器においては、アルカリ金属原子を透過する第 1 側帯波 $W1$ と第 2 側帯波 $W2$ の量を検知することで変調周波数 f_m を安定化させ、この変調周波数 f_m を発信器の出力として利用することにより、発信器の周波数安定度を高めている。従って、基本波 F によって生じる AC シュタルク効果は、第 1 側帯波 $W1$ と第 2 側帯波 $W2$ の検知精度を低下させ、変調周波数 f_m の安定度を低下させる。すなわち、発信器の周波数安定度を低下させてしまう。

30

【0034】

図 3 は、波長選択部 20 から射出された第 2 光 $L2$ の周波数スペクトラムを示す図である。

40

【0035】

第 2 光 $L2$ は、第 1 光 $L1$ と比べて、基本波 F が消滅または基本波 F の強度が減少した光である。図 3 の例では、第 2 光 $L2$ は、中心周波数 f_0 に対して上側サイドバンドに周波数 f_1 を有する第 1 側帯波 $W1$ 、および中心周波数 f_0 に対して下側サイドバンドに周波数 f_2 を有する第 2 側帯波 $W2$ のみを有している。このように、光学モジュール 2 では、波長選択部 20 によって、基本波 F の強度を減少または基本波 F を消滅させることができる。

【0036】

以下、本実施形態の原子発振器のより具体的な構成について説明する。

50

【 0 0 3 7 】

図 4 は、原子発振器 1 の構成を示すブロック図である。

【 0 0 3 8 】

原子発振器 1 は、図 4 に示すように、光学モジュール 2 と、電流駆動回路 1 5 0 と、変調回路 1 6 0 と、を含む。

【 0 0 3 9 】

光学モジュール 2 は、半導体レーザー 1 1 0 と、波長選択装置 1 2 0 と、ガスセル 1 3 0 と、光検出器 1 4 0 と、を含む。

【 0 0 4 0 】

半導体レーザー 1 1 0 は、所定の中心波長を有する基本波 F と、互いに異なる波長を有する第 1 側帯波 $W 1$ および第 2 側帯波 $W 2$ と、を含む第 1 光 $L 1$ を発生させる。半導体レーザー 1 1 0 が出射するレーザー光（第 1 光 $L 1$ ）は、電流駆動回路 1 5 0 が出力する駆動電流によって中心周波数 f_0 （中心波長 λ_0 ）が制御され、変調回路 1 6 0 の出力信号（変調信号）によって変調がかけられる。すなわち、電流駆動回路 1 5 0 による駆動電流に、変調信号の周波数成分を有する交流電流を重畳することにより、半導体レーザー 1 1 0 が出射する第 1 光 $L 1$ に変調をかけることができる。これにより、第 1 光 $L 1$ には、第 1 側帯波 $W 1$ 、および第 2 側帯波 $W 2$ が生成される。半導体レーザー 1 1 0 において発生する光は、可干渉性を有するため、量子干渉効果を得るために好適である。

【 0 0 4 1 】

図 2（B）に示すように、第 1 光 $L 1$ は、中心周波数 f_0 （ $=v/\lambda_0$ ： v は光の速度、 λ_0 は第 1 光 $L 1$ の中心波長）を有する基本波 F と、中心周波数 f_0 に対して上側サイドバンドに周波数 f_1 を有する第 1 側帯波 $W 1$ と、中心周波数 f_0 に対して下側サイドバンドに周波数 f_2 を有する第 2 側帯波 $W 2$ と、を含む。第 1 側帯波 $W 1$ の周波数 f_1 は、 $f_1 = f_0 + f_m$ であり、第 2 側帯波 $W 2$ の周波数 f_2 は、 $f_2 = f_0 - f_m$ である。

【 0 0 4 2 】

波長選択装置 1 2 0 は、第 1 光 $L 1$ から第 1 側帯波 $W 1$ および第 2 側帯波 $W 2$ を選択し、第 2 光 $L 2$ として射出する。波長選択装置 1 2 0 は、所定の波長範囲の光を選択して射出する F B G 1 2 0 a と、F B G 1 2 0 a の温度を制御するための温度制御装置 1 2 0 b と、を有する。

【 0 0 4 3 】

F B G 1 2 0 a は、第 1 光から第 1 側帯波 $W 1$ および第 2 側帯波 $W 2$ を選択して射出することができる。これにより、F B G 1 2 0 a に入射した第 1 光 $L 1$ の基本波 F の強度を減少または基本波 F を消滅させて、第 2 光 $L 2$ として射出することができる。すなわち、第 2 光 $L 2$ では、第 1 光 $L 1$ と比べて、基本波 F の強度が減少または基本波 F が消滅している。図 3 の例では、第 2 光 $L 2$ は、第 1 側帯波 $W 1$ および第 2 側帯波 $W 2$ のみを有している。

【 0 0 4 4 】

温度制御装置 1 2 0 b は、熱光学効果によって、F B G 1 2 0 a が選択する波長範囲（波長選択特性）を変化させることができる。ここで、熱光学効果とは、物質の光に対する屈折率が、外部より熱を加えることによって変化する現象をいう。具体的には、温度制御装置 1 2 0 b は、F B G 1 2 0 a の温度を制御することにより、F B G 1 2 0 a の屈折率を変化させ、F B G 1 2 0 a の波長選択特性を制御する。波長選択装置 1 2 0 は、温度制御装置 1 2 0 b によって、製造誤差や環境変化（熱、光など）等による F B G 1 2 0 a の波長選択特性のずれを補正することができるため、第 1 光 $L 1$ から第 1 側帯波 $W 1$ および第 2 側帯波 $W 2$ を、精度よく選択して射出することができる。

【 0 0 4 5 】

温度制御装置 1 2 0 b は、光検出器 1 4 0 の出力信号に基づいて、F B G 1 2 0 a の温度を調整し、F B G 1 2 0 a の波長選択特性を制御してもよい。光モジュール 2 では、例えば、F B G 1 2 0 a、ガスセル 1 3 0、光検出器 1 4 0、温度制御装置 1 2 0 b を通るフィードバックループにより F B G 1 2 0 a の温度が調整され、F B G 1 2 0 a の波長選

10

20

30

40

50

択特性が制御される。

【 0 0 4 6 】

また、温度制御装置 1 2 0 b は、予め取得された F B G 1 2 0 a の波長選択特性のずれのデータに基づいて、F B G 1 2 0 a の温度を調整し、F B G 1 2 0 a の波長選択特性のずれを補正してもよい。

【 0 0 4 7 】

ガスセル 1 3 0 は、容器中に気体状のアルカリ金属原子（ナトリウム（N a）原子、ルビジウム（R b）原子、セシウム（C s）原子等）が封入されたものである。ガスセル 1 3 0 には、波長選択装置 1 2 0 から射出された第 2 光 L 2 が照射される。

【 0 0 4 8 】

このガスセル 1 3 0 に対して、アルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数（波長）差を有する 2 つの光波（第 1 側帯波および第 2 側帯波）が照射されると、アルカリ金属原子が E I T 現象を起こす。例えば、アルカリ金属原子がセシウム原子であれば、D 1 線における基底準位 G L 1 と基底準位 G L 2 のエネルギー差に相当する周波数が $9.19263 \cdots \text{GHz}$ なので、周波数差が $9.19263 \cdots \text{GHz}$ の 2 つの光波が照射されると E I T 現象を起こす。

【 0 0 4 9 】

光検出器 1 4 0 は、ガスセル 1 3 0 を透過した第 2 光 L 2 を検出し、検出した光の量に応じた信号強度の信号を出力する。光検出器 1 4 0 の出力信号は、電流駆動回路 1 5 0 および変調回路 1 6 0 に入力される。また、光検出器 1 4 0 の出力信号は、さらに、温度制御装置 1 2 0 b に入力されてもよい。光検出器 1 4 0 は、例えば、フォトダイオードである。

【 0 0 5 0 】

電流駆動回路 1 5 0 は、光検出器 1 4 0 の出力信号に応じた大きさの駆動電流を発生させて半導体レーザー 1 1 0 に供給し、第 1 光 L 1 の中心周波数 f_0 （中心波長 λ_0 ）を制御する。半導体レーザー 1 1 0、波長選択装置 1 2 0、ガスセル 1 3 0、光検出器 1 4 0、電流駆動回路 1 5 0 を通るフィードバックループにより第 1 光の中心周波数 f_0 （中心波長 λ_0 ）が微調整されて安定する。

【 0 0 5 1 】

変調回路 1 6 0 は、光検出器 1 4 0 の出力信号に応じた変調周波数 f_m を有する変調信号を発生させる。この変調信号は、光検出器 1 4 0 の出力信号が最大になるように変調周波数 f_m が微調整されながら半導体レーザー 1 1 0 に供給される。半導体レーザー 1 1 0 が出射するレーザー光は、変調信号により変調がかけられ、第 1 側帯波 W 1 と第 2 側帯波 W 2 を発生させる。

【 0 0 5 2 】

なお、半導体レーザー 1 1 0、波長選択装置 1 2 0、ガスセル 1 3 0、光検出器 1 4 0 は、それぞれ図 1 の光源 1 0、波長選択部 2 0、ガスセル 3 0、光検出部 4 0 に対応する。また、F B G 1 2 0 a は、図 1 の F B G 2 0 a に対応し、温度制御装置 1 2 0 b は、図 1 の温度制御部 2 0 b に対応する。また、電流駆動回路 1 5 0、変調回路 1 6 0 は、図 1 の制御部 5 0 に対応する。

【 0 0 5 3 】

このような構成の原子発振器 1 において、半導体レーザー 1 1 0 が発生させる第 1 光 L 1 の第 1 側帯波 W 1 と第 2 側帯波 W 2 の周波数差がガスセル 1 3 0 に含まれるアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と正確に一致しなければ、アルカリ金属原子が E I T 現象を起こさないため、第 1 側帯波 W 1 と照射光 W 2 の周波数に応じて光検出器 1 4 0 の検出量は極めて敏感に変化する（検出量が増加する）。そのため、半導体レーザー 1 1 0、波長選択装置 1 2 0、ガスセル 1 3 0、光検出器 1 4 0、および変調回路 1 6 0 を通るフィードバックループにより、第 1 側帯波 W 1 と第 2 側帯波 W 2 との周波数差がアルカリ金属原子の 2 つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と極めて正確に一致するようにフィードバック制御がかかる。その結果、変調周波数は極めて安

10

20

30

40

50

定した周波数になるので、変調信号を原子発振器 1 の出力信号（クロック出力）とすることができる。

【 0 0 5 4 】

図 5 は、光学モジュール 2 の要部（半導体レーザー 1 1 0 および波長選択装置 1 2 0 ）を模式的に示す斜視図である。

【 0 0 5 5 】

半導体レーザー 1 1 0 としては、例えば、面発光型レーザーを用いることができる。面発光型レーザーは、端面発光型レーザーと比べて、ゲインを生じさせるための電流が少ないため、低消費電力化を図ることができる。なお、半導体レーザー 1 1 0 として、端面発光型レーザーを用いてもよい。半導体レーザー 1 1 0 から出射された光 L 1 は、図 5 に示すように、光学素子 1 7 0 によって集光され、F B G 1 2 0 a に入射する。光学素子 1 7 0 は、図示の例では、半導体レーザー 1 1 0 から出射される光 L 1 を集光して、F B G 1 2 0 a に入射させるためのレンズである。

【 0 0 5 6 】

F B G 1 2 0 a は、光ファイバーのコアに周期的な屈折率変化を与えたものである。そのため、光ファイバーの長手方向に周期的な屈折率変調が得られ、周期に合致した波長範囲の光信号（基本波 F ）は反射され、他の波長範囲の光信号（第 1 側帯波 W 1 および第 2 側帯波 W 2 ）は、この周期的な屈折率変動を感知せずに通過する。すなわち、F B G 1 2 0 a では、第 1 側帯波 W 1 および第 2 側帯波 W 2 に対する反射率が小さく、基本波 F に対する反射率が多い。したがって、F B G 1 2 0 a は、基本波 F を反射させ、第 1 側帯波 W 1 および第 2 側帯波 W 2 を透過させることができる。F B G 1 2 0 a は、光ファイバーを用いているため、変形が容易であり、設計の自由度を向上できる。F B G 1 2 0 a は、例えば、ポピン（図示しない）に巻き付けられていてもよい。

【 0 0 5 7 】

F B G 1 2 0 a は、図 5 に示すように、温度制御装置 1 2 0 b の発熱体 1 2 2 の上方に配置されている。なお、F B G 1 2 0 a と温度制御装置 1 2 0 b の発熱体 1 2 2 との間の位置関係は特に限定されず、発熱体 1 2 2 で発生した熱が F B G 1 2 0 a に伝わるように各々が配置されていればよい。F B G 1 2 0 a は、入射した第 1 光 L 1 から第 1 側帯波 W 1 および第 2 側帯波 W 2 を選択して透過させることができる。

【 0 0 5 8 】

温度制御装置 1 2 0 b は、F B G 1 2 0 a に熱を供給するための発熱体 1 2 2 を有している。温度制御装置 1 2 0 b から供給された熱により F B G 1 2 0 a の温度が変化すると、熱光学効果が生じて F B G 1 2 0 a の屈折率が変化し、F B G 1 2 0 a の波長選択特性（F B G が選択する波長範囲）が変化する。発熱体 1 2 2 は、例えば、所定の抵抗値を有し、電流が流れることにより発熱する抵抗体である。温度制御装置 1 2 0 b は、この発熱体（抵抗体）1 2 2 に流れる電流量を制御することにより、発熱体 1 2 2 の温度を調整し、F B G 1 2 0 a の温度を制御することができる。なお、温度制御装置 1 2 0 b は、F B G 1 2 0 a の温度を制御できれば特に限定されず、公知のホットプレート等を用いてもよい。

【 0 0 5 9 】

光学モジュール 2 および原子発振器 1 は、例えば、以下の特徴を有する。

【 0 0 6 0 】

光学モジュール 2 によれば、波長選択装置 1 2 0 が、第 1 光 L 1 の基本波 F の強度を減少または基本波 F を消滅させることができる。これにより、E I T 現象に寄与しない基本波 F がアルカリ金属原子に照射されることを抑制または防止できる。したがって、A C シュタルク効果による周波数変動を抑制することができ、周波数安定度の高い発振器を提供できる。

【 0 0 6 1 】

光学モジュール 2 によれば、波長選択装置 1 2 0 が、F B G 1 2 0 a の選択する波長範囲を変化させる温度制御装置 1 2 0 b を有しているため、製造誤差や環境変化（熱、光な

10

20

30

40

50

ど)によるF B G 1 2 0 aの波長選択特性(F B Gが選択する波長範囲)のずれを補正することができる。したがって、波長選択装置1 2 0は、第1光L 1から第1側帯波W 1および第2側帯波W 2を、精度よく選択して射出することができる。

【0062】

F B G 1 2 0 aの波長選択特性は、光ファイバーのコアに与えられた周期的な屈折率変化に依存する。F B G 1 2 0 aの製造工程において、光ファイバーのコアに周期的な屈折率変化を精度よく与えることは困難であり、F B G 1 2 0 aに製造誤差が生じる場合がある。このような場合であっても、波長選択装置1 2 0は、温度制御装置1 2 0 bを有するため、この製造誤差に起因する波長選択特性のずれを補正することができる。

【0063】

光学モジュール2では、温度制御装置1 2 0 bが、熱光学効果によって、F B G 1 2 0 aの波長選択特性を変化させることができる。これにより、F B G 1 2 0 aの波長選択特性を、容易に制御できる。さらに、温度制御装置1 2 0 bは、発熱体(抵抗体)を含んで構成されている。したがって、波長選択装置1 2 0を簡易な構成とすることができる。

【0064】

光学モジュール2では、半導体レーザー1 1 0が面発光型レーザーであることができる。面発光型レーザーは、端面発光型レーザーと比べて、ゲインを生じさせるための電流が少ないため、低消費電力化を図ることができる。

【0065】

光学モジュール2では、半導体レーザー1 1 0から出射された光L 1をF B G 1 2 0 aに入射させるための光学素子1 7 0を有する。これにより、半導体レーザー1 1 0で発生した光L 1を、効率よくF B G 1 2 0 aに導くことができる。

【0066】

原子発振器1では、光学モジュール2を有している。したがって、上述のように、周波数安定度の高めることができる。

【0067】

上記のように、本発明の実施形態について詳細に説明したが、本発明の新規事項および効果から実体的に逸脱しない多くの変形が可能であることは当業者には容易に理解できよう。従って、このような変形例はすべて本発明の範囲に含まれるものとする。

【符号の説明】

【0068】

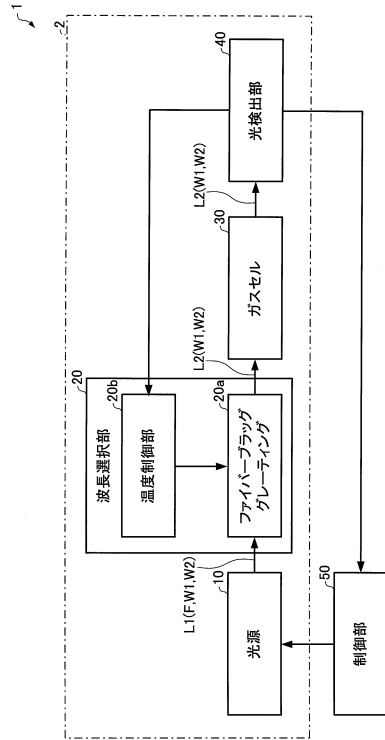
1 原子発振器、2 光学モジュール、1 0 光源、2 0 波長選択部、
2 0 a ファイバースラッググレーティング、2 0 b 温度制御部、
3 0 ガスセル、4 0 光検出部、5 0 制御部、1 1 0 半導体レーザー、
1 2 0 波長選択装置、1 2 0 a ファイバースラッググレーティング、
1 2 0 b 温度制御装置、1 2 2 発熱体、1 3 0 ガスセル、1 4 0 光検出器、
1 5 0 電流駆動回路、1 6 0 変調回路、1 7 0 光学素子

10

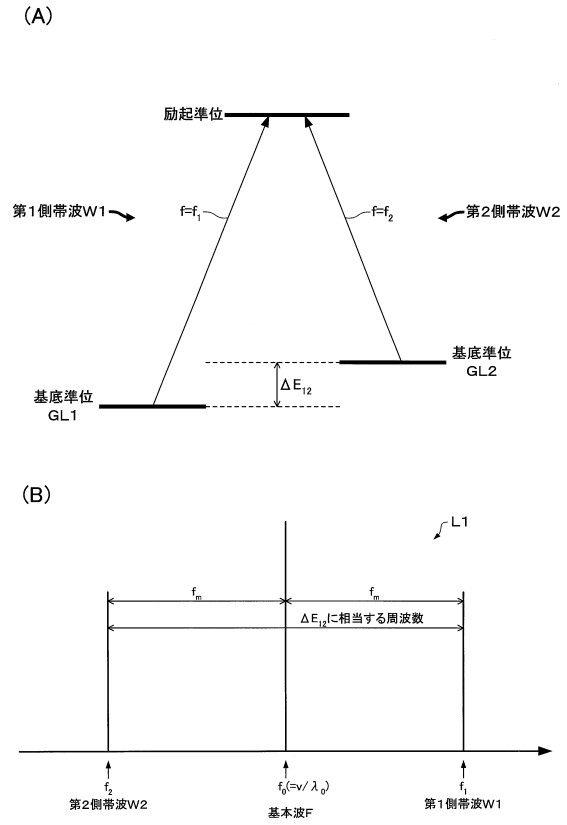
20

30

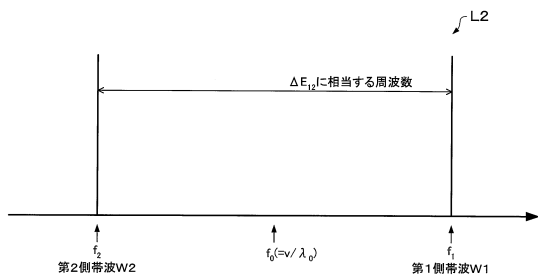
【図 1】



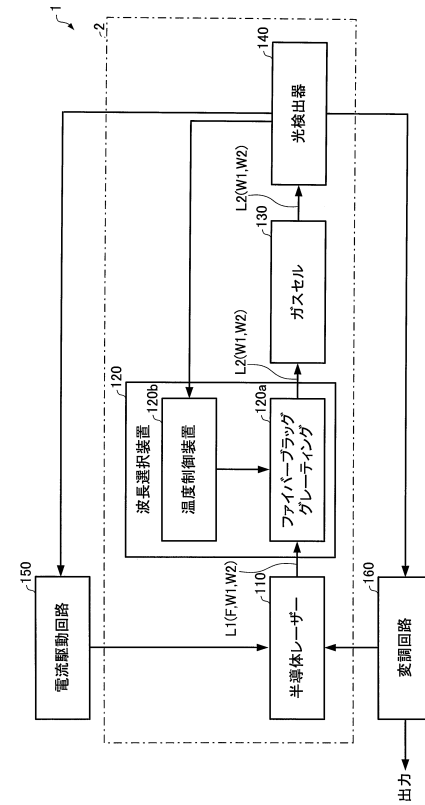
【図 2】



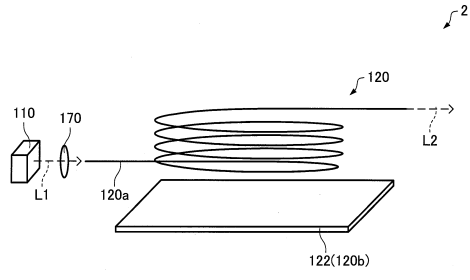
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第2007/052702(WO, A1)

特開2002-116473(JP, A)

I.H. Choi, et al., "Carrier Suppression of Phase Modulated Beam Using Optical Cavity for Coherent Population Trapping Clock", Japanese Journal of Applied Physics, 2010年11月, Vol.49, p.112801-1 - 112801-3

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 1/00 - 1/06

G02F 1/00 - 1/125

H01S 5/00 - 5/50

H01S 3/10 - 3/1055

H03L 1/00

H03L 7/26

Science Direct