

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5910806号
(P5910806)

(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
G O 2 B	5/28	(2006.01)	G O 2 B 5/28

請求項の数 8 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2011-55432 (P2011-55432)	(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2012-191119 (P2012-191119A)		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面発光型レーザーと、
 前記面発光型レーザーから出射された光が入射する入射部を有し、当該入射部に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、
 化合物半導体の基体と、
 を含み、
 前記波長選択部は、
 所定の波長範囲の光を透過させる光フィルター部と、
 前記光フィルター部が透過させる光の波長範囲を変化させる光フィルター特性制御部と、
 を有し、
 前記面発光型レーザーは、前記基体上に位置し、かつ、光を出射する出射部を備え、
 前記基体は、前記面発光型レーザーが前記基体上に位置する面に対して突出する凸部を含み、

前記光フィルター部は、前記凸部上に位置し、
前記面発光型レーザーから出射された光は、反射面を有するプリズムを介して前記光フィルター部に入射し、
前記入射部と前記基体の前記面発光型レーザーが位置する面との距離は、前記出射部と前記基体の前記面発光型レーザーが位置する面との距離より離れてい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】

前記光フィルター部は、エタロンであり、
前記光フィルター特性制御部は、電気光学効果によって、前記光フィルター部が透過させる光の波長範囲を変化させる、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。

10

【請求項 3】

前記光フィルター部は、
前記波長選択部に入射した光を反射させ、互いに対向する第 1 ミラーおよび第 2 ミラーと、
前記第 1 ミラーと前記第 2 ミラーとの間に配置された基板と、
を有し、
前記基板の材質は、化合物半導体である、ことを特徴とする請求項 2 に記載の原子発振器用の光学モジュール。

【請求項 4】

20

前記光フィルター特性制御部は、前記基板に電圧を印加する第 1 電極および第 2 電極を有する、ことを特徴とする請求項 3 に記載の原子発振器用の光学モジュール。

【請求項 5】

前記第 1 電極は、前記基体の前記光フィルター部が位置する側と反対側に位置し、
前記第 2 電極は、前記光フィルター部の前記基体が位置する側と反対側に位置する、ことを特徴とする請求項 4 に記載の原子発振器用の光学モジュール。

【請求項 6】

前記光フィルター部の前記基板は、前記基体側から積層された第 1 層、第 2 層、および第 3 層を有し、
前記第 1 層の屈折率および前記第 3 層の屈折率は、前記第 2 層の屈折率より小さく、
前記第 2 層は、前記面発光型レーザーから出射した光を伝播させる、ことを特徴とする請求項 5 に記載の原子発振器用の光学モジュール。

30

【請求項 7】

請求項 1 ないし 6 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 8】

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面発光型レーザーと、
前記面発光型レーザーから出射された光が入射する入射部を有し、当該入射部に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、
化合物半導体の基体と、
を含み、
前記波長選択部は、
所定の波長範囲の光を透過させる光フィルター部と、
前記光フィルター部が透過させる光の波長範囲を変化させる光フィルター特性制御部と、

40

50

を有し、

前記面発光型レーザーは、前記基体上に位置し、かつ、光を出射する出射部を備え、

前記基体は、前記面発光型レーザーが前記基体上に位置する面に対して突出する凸部を含み、

前記光フィルター部は、前記凸部上に位置し、

前記面発光型レーザーから出射された光は、反射面を有するプリズムを介して前記光フィルター部に入射し、

前記入射部と前記基体の前記面発光型レーザーが位置する面との距離は、前記出射部と前記基体の前記面発光型レーザーが位置する面との距離より離れていることを特徴とする原子発振器。

10

【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CPT (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。CPT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(EIT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、CPT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。

20

【0003】

CPT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、EIT現象を発現させている。

【先行技術文献】

30

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2009-89116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、EIT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(AC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。

40

【0006】

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。

【課題を解決するための手段】

【0007】

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、

50

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、

所定の波長範囲の光を透過させる光フィルター部と、

前記光フィルター部が透過させる光の波長範囲を変化させる光フィルター特性制御部と

10

を有する。

【0008】

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、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、光フィルター部が透過させる光の波長範囲を変化させる光フィルター特性制御部を有しているため、製造誤差や環境変化等による光フィルター部の波長選択特性（光フィルター部が透過させる光の波長範囲）のずれを補正することができる。

20

【0009】

本発明に係る原子発振器用の光学モジュールにおいて、

前記光フィルター部は、エタロンであり、

前記光フィルター特性制御部は、電気光学効果によって、前記光フィルター部が透過させる光の波長範囲を変化させることができる。

【0010】

このような原子発振器用の光学モジュールによれば、光フィルター部を簡易な構成にすることができる。さらに、光フィルター部の波長選択特性を、高精度かつ容易に制御できる。

30

【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、

前記光フィルター部は、

前記波長選択部に入射した光を反射させ、互いに対向する第1ミラーおよび第2ミラーと、

前記第1ミラーと前記第2ミラーとの間に配置された基板と、

を有し、

前記基板の材質は、化合物半導体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、第1ミラーと第2ミラーとの間の距離を小さくでき、装置の小型化を図ることができる。

40

【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、

前記光フィルター特性制御部は、前記基板に電圧を印加する第1電極および第2電極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、光フィルター特性制御部を簡易な構成にすることができる。

【0015】

本発明に係る原子発振器用の光学モジュールにおいて、

50

さらに、化合物半導体の基体を含み、
前記光源は、半導体レーザーであり、
前記光フィルター部および前記光源は、前記基体上に位置し、
前記第1電極は、前記基体の前記光フィルター部が位置する側と反対側に位置し、
前記第2電極は、前記光フィルター部の前記基体が位置する側と反対側に位置することができる。

【0016】

このような原子発振器用の光学モジュールによれば、波長選択部および光源が同じ基体に形成されているため、装置の小型化を図ることができる。

【0017】

なお、本発明に係る記載では、「上方」という文言を、例えば、「特定のもの（以下、「A」という）の「上方」に他の特定のもの（以下、「B」という）を形成する」などと用いる場合に、A上に直接Bを形成するような場合と、A上に他のものを介してBを形成するような場合とが含まれるものとして、「上方」という文言を用いている。同様に、「下方」という文言は、A下に直接Bを形成するような場合と、A下に他のものを介してBを形成するような場合とが含まれるものとする。

【0018】

本発明に係る原子発振器用の光学モジュールにおいて、
前記光フィルター部の前記基板は、前記基体側から積層された第1層、第2層、および第3層を有し、
前記第1層の屈折率および前記第3層の屈折率は、前記第2層の屈折率より小さく、
前記第2層は、前記光源から出射した光を伝播させることができる。

【0019】

このような原子発振器用の光学モジュールによれば、基板を光導波路とすることができる。したがって、波長選択部から射出される光のビーム径を制御することができ、波長選択部を透過した光をガスセルに効率よく照射することができる。

【0020】

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、端面発光型レーザーであることができる。

【0021】

このような原子発振器用の光学モジュールによれば、端面発光型レーザーを構成する層の膜厚の制御によって、光源（端面発光型レーザー）と波長選択部との間のアライメントができる。したがって、光源と波長選択部との間のアライメント精度を向上させることができる。さらに、例えば、波長選択部に光源からの光を入射させるための光学素子が不要となる。

【0022】

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。

【0023】

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。

【0024】

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。

【0025】

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、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、周波数安定度を高めることができる。

【0026】

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用であって、
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する波長選択部と、
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、
所定の波長範囲の光を選択して射出する光フィルター部と、
前記光フィルター部が選択する波長範囲を変化させる光フィルター特性制御部と、
を有する。

10

【0027】

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、光フィルター部が透過させる光の波長範囲を変化させる光フィルター特性制御部を有しているため、製造誤差や環境変化等による光フィルター部の波長選択特性（光フィルター部が透過させる光の波長範囲）のずれを補正することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0028】

【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断面図。

30

【図6】端面発光型レーザーを用いた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断面図。

【発明を実施するための形態】

【0029】

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。

【0030】

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。

40

【0031】

原子発振器1は、光学モジュール2と、制御部50と、を含む。

【0032】

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。

【0033】

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。

【0034】

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

50

2 光 L 2 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光フィルター部 20 a と、光フィルター部 20 a の選択する波長範囲を変化させる光フィルター特性制御部 20 b と、を有する。

【0035】

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 L 2 が照射される。

【0036】

光検出部 40 は、ガスセル 30 を透過した第 2 光 L 2 の強度を検出する。

【0037】

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 W 1 および第 2 側帯波 W 2 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 W 1、および周波数 $f_2 = f_0 - f_m$ を有する第 2 側帯波 W 2 を発生させる。

【0038】

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 W 1 及び第 2 側帯波 W 2 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 L 1 の周波数スペクトラムを示す図である。

【0039】

図 2 (B) に示すように、光源 10 において発生する第 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 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。

【0040】

図 2 (A) 及び図 2 (B) に示すように、第 1 側帯波 W 1 の周波数 f_1 と第 2 側帯波 W 2 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 G L 1 と基底準位 G L 2 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 W 1 と周波数 f_2 を有する第 2 側帯波 W 2 によって E I T 現象を起こす。

【0041】

ここで、E I T 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 G L 1 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 W 1、あるいは基底準位 G L 2 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 W 2 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 G L 1 と基底準位 G L 2 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 W 1 と第 2 側帯波 W 2 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 W 1 と第 2 側帯波 W 2 がアルカリ金属原子を透過する透明化現象（E I T 現象）が起きる。この E I T 現象を利用し、第 1 側帯波 W 1 と第 2 側帯波 W 2 との周波数差 $f_1 - f_2$ が基底準位 G L 1 と基底準位 G L 2 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。

【0042】

しかし、図 2 (B) に示した第 1 光 L 1 がガスセル 30 に直接照射されると、第 1 側帯

10

20

30

40

50

波 W_1 と第 2 側帯波 W_2 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 W_1 と第 2 側帯波 W_2 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 W_1 と第 2 側帯波 W_2 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。したがって、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 W_1 と第 2 側帯波 W_2 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。

10

【0043】

図 3 は、波長選択部 20 から射出された第 2 光 L_2 の周波数スペクトラムを示す図である。

【0044】

第 2 光 L_2 は、第 1 光 L_1 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 L_2 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 W_1 、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 W_2 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。

20

【0045】

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。

【0046】

図 4 は、原子発振器 1 の構成を示すブロック図である。

【0047】

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 150 と、変調回路 160 と、を含む。

【0048】

光学モジュール 2 は、半導体レーザー 110 と、波長選択装置 120 と、ガスセル 130 と、光検出器 140 と、を含む。

30

【0049】

半導体レーザー 110 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 110 が出射するレーザー光（第 1 光 L_1 ）は、電流駆動回路 150 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 160 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 150 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 110 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 110 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。

40

【0050】

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。

【0051】

波長選択装置 120 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 120 は、所定の波長範囲の光を選択して射出する光フィルター素子 120a と、光フィルター素子 120a が選択する波長範囲を変

50

化させる光フィルター特性制御装置 120b と、を有する。

【0052】

光フィルター素子 120a は、第 1 光から第 1 側帯波 W1 および第 2 側帯波 W2 を選択して射出することができる。そのため、光フィルター素子 120a に入射した第 1 光 L1 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 L2 として射出することができる。すなわち、第 2 光 L2 では、第 1 光 L1 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 L2 は、第 1 側帯波 W1、および第 2 側帯波 W2 のみを有している。光フィルター素子 120a は、後述するように、エタロンであってもよいし、ファイバーブラッググレーティング (FBG) であってもよい。

【0053】

光フィルター特性制御装置 120b は、光フィルター素子 120a 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。光フィルター特性制御装置 120b は、例えば、電気光学効果によって、光フィルター素子 120a (例えば、エタロン) の波長選択特性を変化させることができる。ここで、電気光学効果とは、物質の光に対する屈折率が、外部より静電場を加えることによって変化する現象をいう。光フィルター特性制御装置 120b は、例えば、光フィルター素子 120a に電場を印加することにより光フィルター素子 120a の屈折率を変化させ、光フィルター素子 120a の波長選択特性を変化させる。波長選択装置 120 は、光フィルター特性制御装置 120b によって、製造誤差や環境変化 (熱、光など) 等による光フィルター素子 120a 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 L1 から第 1 側帯波 W1 および第 2 側帯波 W2 を、精度よく選択することができる。

【0054】

光フィルター特性制御装置 120b は、光検出器 140 の出力信号に基づいて、光フィルター素子 120a に加える電場の強度を調整し、光フィルター素子 120a の波長選択特性を制御してもよい。光学モジュール 2 では、例えば、光フィルター素子 120a、ガスセル 130、光検出器 140、光フィルター特性制御装置 120b を通るフィードバックループにより光フィルター素子 120a に印加される電場の強度が調整され、光フィルター素子 120a の波長選択特性が制御される。

【0055】

また、光フィルター特性制御装置 120b は、予め取得された光フィルター素子 120a の波長選択特性のずれのデータに基づいて、光フィルター素子 120a に印加される電場の強度を調整し、光フィルター素子 120a の波長選択特性のずれを補正してもよい。

【0056】

ガスセル 130 は、容器中に気体状のアルカリ金属原子 (ナトリウム (Na) 原子、ルビジウム (Rb) 原子、セシウム (Cs) 原子等) が封入されたものである。ガスセル 130 には、波長選択装置 120 から射出された第 2 光 L2 が照射される。

【0057】

このガスセル 130 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 EIT 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、D1 線における基底準位 GL1 と基底準位 GL2 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 EIT 現象を起こす。

【0058】

光検出器 140 は、ガスセル 130 を透過した第 2 光 L2 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 140 の出力信号は、電流駆動回路 150 および変調回路 160 に入力される。また、光検出器 140 の出力信号は、さらに、光フィルター特性制御装置 120b に入力されてもよい。光検出器 140 は、例えば、フォトダイオードである。

【0059】

10

20

30

40

50

電流駆動回路 150 は、光検出器 140 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 110 に供給し、第 1 光 L1 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 110、波長選択装置 120、ガスセル 130、光検出器 140、電流駆動回路 150 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。

【0060】

変調回路 160 は、光検出器 140 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 140 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 110 に供給される。半導体レーザー 110 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 W1 と第 2 側帯波 W2 を発生させる。

10

【0061】

なお、半導体レーザー 110、波長選択装置 120、ガスセル 130、光検出器 140 は、それぞれ図 1 の光源 10、波長選択部 20、ガスセル 30、光検出部 40 に対応する。また、光フィルター素子 120a は、図 1 の光フィルター部 20a に対応し、光フィルター特性制御装置 120b は、図 1 の光フィルター特性制御部 20b に対応する。また、電流駆動回路 150、変調回路 160 は、図 1 の制御部 50 に対応する。

【0062】

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 110 が発生させる第 1 光 L1 の第 1 側帯波 W1 と第 2 側帯波 W2 の周波数差がガスセル 130 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 EIT 現象を起こさないため、第 1 側帯波 W1 と照射光 W2 の周波数に応じて光検出器 140 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 110、波長選択装置 120、ガスセル 130、光検出器 140、および変調回路 160 を通るフィードバックループにより、第 1 側帯波 W1 と第 2 側帯波 W2 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。

20

【0063】

図 5 は、光学モジュール 2 の要部(半導体レーザー 110 および波長選択装置 120)を模式的に示す断面図である。

30

【0064】

光学モジュール 2 は、図 5 に示すように、さらに、基体 170 を含む。半導体レーザー 110 および波長選択装置 120 は、基体 170 に形成されている。このように半導体レーザー 110 および波長選択装置 120 がモノリシックに形成されることにより、装置の小型化を図ることができる。

【0065】

基体 170 の材質は、化合物半導体である。具体的には、基体 170 の材質は、例えば、GaAs、InP、GaN 等の III-V 族半導体や、ZnO、ZnSe 等の II-VI 族半導体である。ここでは、基体 170 の材質が第 1 導電型(例えば n 型) GaAs である場合について説明する。

40

【0066】

半導体レーザー 110 は、第 1 半導体層 112 と、活性層 114 と、第 2 半導体層 116 と、を含む面発光型レーザーである。

【0067】

第 1 半導体層 112 は、基体 170 上に形成されている。第 1 半導体層 112 は、例えば、n 型(第 1 導電型) $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 層と n 型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 層とを交互に積層した分布ブラッグ反射型(DBR)半導体ミラーである。

【0068】

50

活性層 114 は、第 1 半導体層 112 上に形成されている。活性層 114 は、例えば、GaAs ウェル層と $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ バリア層とから構成される量子井戸構造を 3 つ重ねた多重量子井戸 (MQW) 構造を有する。

【0069】

第 2 半導体層 116 は、例えば、p 型 (第 2 導電型) $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 層と p 型 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 層とを交互に積層した DBR 半導体ミラーである。

【0070】

p 型の第 2 半導体層 116、不純物がドーピングされていない活性層 114、および n 型の第 1 半導体層 112 により、pin ダイオードが形成される。

【0071】

半導体レーザー 110 の電極 118 は、基体 170 の下面に形成されている。電極 118 は、基体 170 を介して、第 1 半導体層 112 と電氣的に接続されている。電極 118 は、半導体レーザー 110 を駆動するための一方の電極である。なお、電極 118 は、後述する光フィルター特性制御装置 120b の第 1 電極 128 と共通の電極である。

【0072】

半導体レーザー 110 の電極 119 は、第 2 半導体層 116 の上面に形成されている。電極 119 は、第 2 半導体層 116 と電氣的に接続されている。電極 119 は、半導体レーザー 110 を駆動するための他方の電極である。

【0073】

電極 118, 119 で、pin ダイオードに順方向の電圧を印加すると、活性層 114 において、電子と正孔との再結合が起こり、該再結合による発光が生じる。そこで生じた光が第 2 半導体層 116 と第 1 半導体層 112 との間を往復する際に誘導放出が起こり、光の強度が増幅される。光利得が光損失を上まわると、レーザー発振が起こり、第 2 半導体層 116 の上面からレーザー光 (第 1 光 L1) が出射される。半導体レーザー 110 から出射された光 L1 は、プリズム 180 で反射されて、波長選択装置 120 (光フィルター素子 120a) に入射する。プリズム 180 は、第 1 光 L1 の進行方向を変えて、第 1 光 L1 を波長選択装置 120 (光フィルター素子 120a) に入射させるための光学素子である。なお、本実施形態においては、第 1 光 L1 の進行方向を変えるためにプリズム 180 を用いているが、第 1 光 L1 を反射させて進行方向を変えることができれば、他の光学素子を用いてもよい。例えば、反射ミラーなどを用いることができる。

【0074】

光学モジュール 2 において、光フィルター素子 120a は、図示の例では、エタロンである。光フィルター素子 120a は、第 1 ミラー 121 と、第 2 ミラー 122 と、第 1 ミラー 121 と第 2 ミラー 122 との間に配置された基板 123 と、を含む。ミラー 121 および 122 は、ミラーに入射した光の一部を透過させ、一部を反射させるような半透過ミラーである。

【0075】

光フィルター素子 120a は、ミラー 121, 122 間の干渉作用により、入射した光 L1 のうち、所定の波長範囲の光 (第 1 側帯波 W1 および第 2 側帯波 W2) を透過させる。光フィルター素子 120a に光が入射すると、ミラー 121, 122 間の干渉作用により、基板 123 の長さ (第 1 ミラー 121 と第 2 ミラー 122 との間の距離) D および基板 123 の屈折率に応じた波長の光が選択的に光フィルター素子 120a を透過する。光フィルター素子 120a では、第 1 側帯波 W1 および第 2 側帯波 W2 に対する透過率が大きく、基本波 F に対する透過率が小さい。これにより、光フィルター素子 120a に入射した光 L1 の基本波 F の強度を減少または基本波 F を消滅させて射出することができる。したがって、光フィルター素子 120a は、例えば、第 1 側帯波 W1 および第 2 側帯波 W2 のみを含む第 2 光 L2 を射出することができる。

【0076】

第 1 ミラー 121 と第 2 ミラー 122 は、基板 123 を介して、互いに対向している。第 1 ミラー 121 および第 2 ミラー 122 は、例えば、 Ta_2O_5 膜と SiO_2 膜とを交

10

20

30

40

50

互に積層した多層膜からなる。ミラー 121, 122 は、例えば、 Ta_2O_5 膜と SiO_2 膜を 3 ペア成膜した層構造を有している。第 1 ミラー 121 および第 2 ミラー 122 の反射率は、例えば、90%である。

【0077】

基板 123 は、基板 170 上に形成されている。基板 123 は、基板 170 側から順に形成された、第 1 層 124、第 2 層 125、および第 3 層 126 を有している。第 1 層 124 の屈折率および第 3 層 126 の屈折率は、第 2 層 125 の屈折率より小さい。したがって、第 1 層 124 および第 3 層 126 は、クラッド層として機能し、第 2 層 125 は、第 1 光 L1 を伝播させるコア層として機能する。すなわち、基板 123 は、第 1 光 L1 を伝搬させる光導波路である。光学モジュール 2 では、基板 123 が光導波路であるため、光フィルター素子 120a から射出される光 L2 のビーム径を制御することができ、ガスセル 130 に光 L2 を効率よく照射することができる。第 1 層 124 および第 3 層 126 の材質は、例えば、AlGaAs であり、第 2 層 125 の材質は、例えば、GaAs である。

10

【0078】

なお、基板 123 は、光導波路を形成しなくてもよい。基板 123 は、複数の層 124, 125, 126 を有せずに、単層であってもよい。

【0079】

基板 123 の材質は、特に限定されず、GaAs、InP、GaN 等の III-V 族半導体や、ZnO、ZnSe 等の II-VI 族半導体であってもよい。基板 123 の材質として、例えば、GaAs を用いた場合、フリースペクトラルレンジを 9.2 GHz、半値全幅を 0.3 GHz 程度とすると、基板 123 の長さ D は 28.46 mm 程度である。エタロンの基板の材質として一般的な SiO_2 を用いた場合、基板の長さは、70.66 mm 程度である。このように、基板 123 の材質として、屈折率の大きい化合物半導体を用いることで、基板 123 の長さ D を短くすることができる。

20

【0080】

光フィルター特性制御装置 120b は、光フィルター素子 120a に電場を供給するための第 1 電極 128 および第 2 電極 129 を有している。光フィルター特性制御装置 120b は、電極 128, 129 間に電圧を印加することにより、基板 123 に電場を供給することができる。これにより、電気光学効果が生じて基板 123 の屈折率が変化し、光フィルター素子 120a の波長選択特性を変化させることができる。第 1 電極 128 は、基板 170 の、光フィルター素子 120a が位置する側と反対側に位置している。第 1 電極 128 は、基板 170 の下方に形成されている。第 1 電極 128 は、上述した半導体レーザー 110 の電極 118 と共通の電極である。第 2 電極 129 は、光フィルター素子 120a の、基板 170 が位置する側と反対側に位置している。第 2 電極 129 は、絶縁層 190 を介して、光フィルター素子 120a の上方に形成されている。電極 128, 129 間に、絶縁層 190 が形成されることにより、電極 128, 129 間に電流が流れて電圧降下が生じることを防ぐことができる。

30

【0081】

なお、ここでは、光フィルター素子 120a がエタロンである場合について説明したが、光フィルター素子 120a は、光ファイバーのコアに周期的な屈折率変化を与えたファイバーブラッググレーティングであってもよい。ファイバーブラッググレーティングは、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。

40

【0082】

また、ここでは、光フィルター素子 120a の波長選択特性を、電気光学効果を用いて補正したが、例えば、熱光学効果（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）を用いて補正してもよい。この場合、光学モジュール 2 は、光フィルター素子 120a に熱を供給するための部材を有していてもよい。

【0083】

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。

50

【 0 0 8 4 】

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 8 5 】

光学モジュール 2 によれば、波長選択装置 1 2 0 が、光フィルター特性制御装置 1 2 0 b を有しているため、製造誤差や環境変化（熱、光など）等による光フィルター素子 1 2 0 a の波長選択特性（光フィルター素子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。

10

【 0 0 8 6 】

例えば、光フィルター素子 1 2 0 a がエタロンである場合、光フィルター素子 1 2 0 a の波長選択特性（光フィルター素子が選択する波長範囲）は、図 5 に示す基板 1 2 3 の長さ D および基板 1 2 3 の屈折率に依存する。しかしながら、光フィルター素子 1 2 0 a の製造工程において、基板 1 2 3 の長さ D を正確に制御することは困難であり、基板 1 2 3 の長さ D 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、光学モジュール 2 によれば、光フィルター特性制御装置 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。

20

【 0 0 8 7 】

光学モジュール 2 では、光フィルター素子 1 2 0 a が、エタロンである。したがって、光フィルター素子を簡易な構成にすることができる。また、光フィルター素子（エタロン）1 2 0 a の基板 1 2 3 の材質が化合物半導体である。したがって、基板 1 2 3 の材質が、 SiO_2 である場合と比べて、基板 1 2 3 の長さ D を短くすることができ、装置の小型化を図ることができる。

【 0 0 8 8 】

光学モジュール 2 では、光フィルター特性制御装置 1 2 0 b が、電気光学効果によって、光フィルター素子 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、光フィルター素子の波長選択特性を、高精度かつ容易に制御できる。さらに、光フィルター特性制御装置 1 2 0 b が、基板 1 2 3 に電圧を印加するための第 1 電極 1 2 8 および第 2 電極 1 2 9 を含んで構成されている。したがって、光フィルター特性制御装置 1 2 0 b を簡易な構成にすることができる。

30

【 0 0 8 9 】

光学モジュール 2 では、波長選択装置 1 2 0 および半導体レーザー（光源）1 1 0 が基体 1 7 0 に形成されている。このように波長選択装置 1 2 0 と半導体レーザー 1 1 0 を基体 1 7 0 にモノリシックに形成することにより、装置の小型化を図ることができる。

【 0 0 9 0 】

光学モジュール 2 では、上述のように、光フィルター素子（エタロン）1 2 0 a の基板 1 2 3 が光導波路である。したがって、光フィルター素子 1 2 0 a から射出される光 L 2 のビーム径を制御することができ、ガスセル 1 3 0 に効率よく光 L 2 を照射することができる。

40

【 0 0 9 1 】

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。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。

【 0 0 9 2 】

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。

【 0 0 9 3 】

50

なお、上述した実施形態は一例であって、これらに限定されるわけではない。

【0094】

例えば、上述した図5に示す半導体レーザー110は、面発光型レーザーであったが、半導体レーザーは、端面発光型レーザーであってもよい。図6は、端面発光型レーザーを用いた光学モジュール2Dの要部を模式的に示す断面図である。以下、図6に示す光学モジュール2Dにおいて、上述した図5に示す光学モジュール2の構成と同様の構成については同一の符号を付し、その説明を省略する。

【0095】

第1半導体層112は、基体170上に形成されている。第1半導体層112としては、例えば、第1導電型（例えばn型）AlGaAs層などを用いることができる。

10

【0096】

活性層114は、第1半導体層112上に形成されている。活性層114は、例えば、GaAsウェル層とAlGaAsバリア層とから構成される量子井戸構造を3つ重ねた多重量子井戸（MQW）構造を有する。

【0097】

第2半導体層116は、活性層114上に形成されている。第2半導体層116としては、例えば、第2導電型（例えばp型）のAlGaAs層などを用いることができる。

【0098】

例えば、p型の第2半導体層116、不純物がドーピングされていない活性層114、およびn型の第1半導体層112により、pinダイオードが構成される。第2半導体層116および第1半導体層112の各々は、活性層114よりも禁制帯幅が大きく、屈折率が小さい層である。活性層114は、光を増幅する機能を有する。第1半導体層112および第2半導体層116は、活性層114を挟んで、注入キャリア（電子および正孔）並びに光を閉じ込める機能を有する。

20

【0099】

半導体レーザー110では、電極118、119間に、pinダイオードの順バイアス電圧を印加すると、活性層114において電子と正孔との再結合が起こる。この再結合により発光が生じる。この生じた光を起点として、連鎖的に誘導放出が起こり、光強度が増幅される。光利得が光損失を上まわると、レーザー発振が起こり、レーザー光が生じ、活性層114の側面からレーザー光（第1光L1）が出射される。

30

【0100】

光学モジュール2Dによれば、半導体レーザー110として端面発光型レーザーを用いることで、半導体レーザー110の各層112、114、116の積層方向に対して垂直にレーザー光を出射することができる。したがって、各層112、114、116の膜厚の制御によって、半導体レーザー110と波長選択装置120との間のアライメントができる。したがって、半導体レーザー110と波長選択装置120との間のアライメント精度を向上させることができる。さらに、例えば、波長選択装置120にレーザー光を入射させるためのプリズム等の光学素子が不要となる。

【0101】

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。

40

【符号の説明】

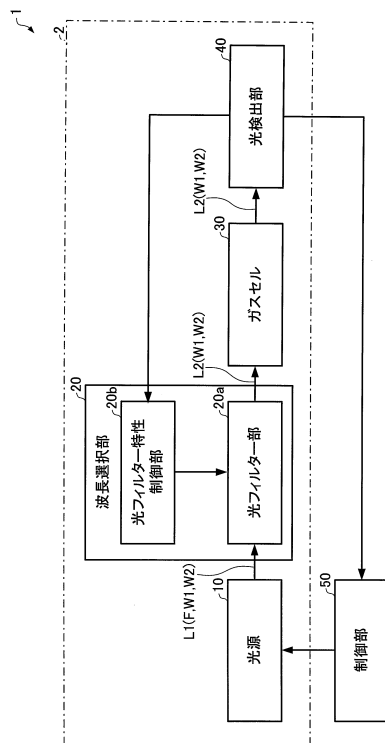
【0102】

1 原子発振器、2 光学モジュール、10 光源、20 波長選択部、
20a 光フィルター部、20b 光フィルター特性制御部、
30 ガスセル、40 光検出部、50 制御部、110 半導体レーザー、
112 第1半導体層、114 活性層、116 第2半導体層、
118、119 電極、120 波長選択装置、120a 光フィルター素子、
120b 光フィルター特性制御装置、121 第1ミラー、122 第2ミラー、

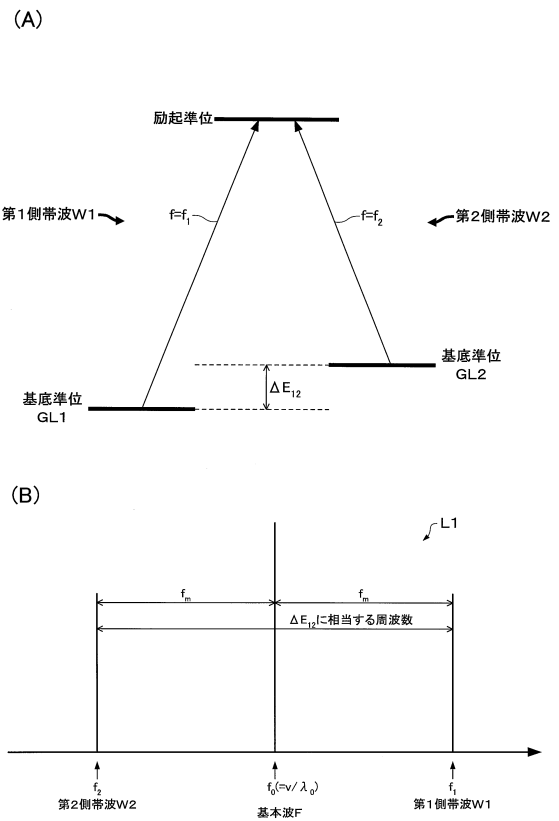
50

1 2 3 基板、1 2 4 第 1 層、1 2 5 第 2 層、1 2 6 第 3 層、
 1 2 8 第 1 電極、1 2 9 第 2 電極、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 基体、
 1 8 0 プリズム

【図 1】



【図 2】



フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第2004/111717(WO, A1)

特開2005-037762(JP, A)

特開2010-050162(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, No.11, p.112801-1 - 112801-3

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/00 - 1/125

H01S 1/00 - 1/06

H01S 5/00 - 5/50

H03L 1/00

H03L 7/26

Science Direct