

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5700056号
(P5700056)

(45) 発行日 平成27年4月15日(2015.4.15)

(24) 登録日 平成27年2月27日(2015.2.27)

(51) Int.Cl.

H01S 1/06 (2006.01)
H03L 7/26 (2006.01)

F 1

H01S 1/06
H03L 7/26

請求項の数 9 (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2013-11894 (P2013-11894)
 (22) 出願日 平成25年1月25日 (2013.1.25)
 (62) 分割の表示 特願2010-159505 (P2010-159505)
 の分割
 原出願日 平成22年7月14日 (2010.7.14)
 (65) 公開番号 特開2013-123068 (P2013-123068A)
 (43) 公開日 平成25年6月20日 (2013.6.20)
 審査請求日 平成25年6月21日 (2013.6.21)

(73) 特許権者 000002369
 セイコーエプソン株式会社
 東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
 (74) 代理人 100095728
 弁理士 上柳 雅善
 (74) 代理人 100116665
 弁理士 渡辺 和昭
 (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
 エプソン株式会社内
 審査官 佐藤 宙子

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】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の光学モジュールであって、
中心波長を有する基本波と、前記基本波の強度よりも小さい強度を有し、かつ、互いに
異なる波長を有する前記中心波長の第1側帯波および第2側帯波と、を含む第1光を発生
させる光源と、

前記第1光が入射され、前記第1側帯波および前記第2側帯波と、前記第1側帯波およ
び前記第2側帯波よりも強度が小さい前記基本波と、を含む第2光を射出させる波長選択
手段と、

アルカリ金属ガスを封入し、前記第2光が照射されるガスセルと、

前記ガスセルを透過した前記第2光の強度を検出する光検出手段と、を含む、光学モジ
ュール。

【請求項 2】

請求項1において、

前記波長選択手段は、エタロンである、光学モジュール。

【請求項 3】

請求項2において、

前記エタロンは、

前記第1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、光学モジュール。

【請求項 4】

請求項 3において、

さらに、基体を含み、

前記基体の材質は、化合物半導体であり、

前記光源は、半導体レーザーであり、

前記エタロンおよび前記光源は、基体に形成されている、光学モジュール。

【請求項 5】

請求項 4において、

前記エタロンの前記基板は、前記基体側から順に形成された第 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、前記第 1 光を伝播させる、光学モジュール。

【請求項 6】

請求項 4 または 5において、

前記光源は、端面発光型レーザーである、光学モジュール。

【請求項 7】

請求項 1 ないし 5 のいずれか 1 項において、

前記光源は、面発光型レーザーである、光学モジュール。

【請求項 8】

請求項 1において、

前記波長選択手段は、ファイバーグレーティングである、光学モジュール。

【請求項 9】

請求項 1 ないし 8 のいずれか 1 項に記載の光学モジュールを含む、原子発振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、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。

【0003】

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】

【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】

10

20

30

40

50

【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シユタルク効果）、原子発振器の周波数の安定度を低下させる場合がある。

【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。

10

【課題を解決するための手段】**【0007】**

本発明に係る光学モジュールは、

量子干渉効果を利用する原子発振器の光学モジュールであって、

中心波長を有する基本波と、互いに異なる波長を有する第1側帯波および第2側帯波と、を含む第1光を発生させる光源と、

前記第1光の前記第1側帯波および前記第2側帯波を選択して透過することによって、第2光を射出する波長選択手段と、

前記アルカリ金属ガスを封入し、前記第2光が照射されるガスセルと、

前記ガスセルを透過した前記第2光の強度を検出する光検出手段と、を含む。

20

【0008】

このような光学モジュールによれば、波長選択手段が、第1光の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シユ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。

【0009】

本発明に係る光学モジュールにおいて、

前記波長選択手段は、エタロンであることができる。

【0010】

このような光学モジュールによれば、波長選択手段を簡易な構成で形成できる。

30

【0011】

本発明に係る光学モジュールにおいて、

前記エタロンは、

前記第1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。

【0013】

本発明に係る光学モジュールにおいて、

さらに、基体を含み、

前記基体の材質は、化合物半導体であり、

前記光源は、半導体レーザーであり、

前記エタロンおよび前記光源は、基体に形成されていることができる。

40

【0014】

このような光学モジュールによれば、エタロン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。

【0015】

本発明に係る光学モジュールにおいて、

50

前記エタロンの前記基板は、前記基体側から順に形成された第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、前記第1光を伝播させることができる。

【0016】

このような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ます。したがって、波長選択手段から射出される第2光のビーム径を制御することができ、第2光をガスセルに効率よく照射することができる。

【0017】

本発明に係る光学モジュールにおいて、

10

前記光源は、端面発光型レーザーであることができる。

【0018】

このような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）と波長選択手段との間のアライメントができる。さらに、例えば、同じ基体に形成された波長変換手段に第1光を入射させるための光学素子が不要となる。したがって、光源と波長選択手段との間のアライメント精度を向上させることができる。

【0019】

本発明に係る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。

20

【0020】

このような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ます。

【0021】

本発明に係る光学モジュールにおいて、

前記波長選択手段は、ファイバーグレーティングであることができる。

【0022】

このような光学モジュールによれば、ファイバーグレーティングは、変形が容易であるため、設計の自由度を向上できる。

【0023】

本発明に係る原子発振器は、

30

本発明に係る光学モジュールを含む。

【0024】

このような原子発振器は、本発明に係る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ます。

【図面の簡単な説明】

【0025】

【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I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であり、図2(B)は、光源において発生する第1光の周波数スペクトラムを示す図。

40

【図3】波長選択手段から射出された第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。

【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】

【0026】

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。

【0027】

50

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。

【0028】

原子発振器1は、光学モジュール2と、制御手段50と、を含む。

【0029】

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

【0030】

光源10は、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。10

【0031】

波長選択手段20は、第1光L1の第1側帯波W1および第2側帯波W2を選択して透過することによって第2光L2を射出する。

【0032】

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。

【0033】

光検出手段40は、ガスセル30を透過した第2光L2の強度を検出する。

【0034】

制御手段50は、光検出手段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。具体的には、制御手段50は、光検出手段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、この変調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。20

【0035】

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において発生する第1光L1の周波数スペクトラムを示す図である。30

【0036】

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 （ $= v / \lambda_0$: 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。

【0037】

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1と基底準位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。40

【0038】

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W1、あるいは基底準位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W2を、それぞれ単独でアルカリ金属50

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1と基底準位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1と基底準位2のエネルギー差 E_{12} に相当する周波数からは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。

【0039】

図3は、波長選択手段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。 10

【0040】

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、波長選択手段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。

【0041】

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。 20

【0042】

図4は、原子発振器1の構成を示す図である。

【0043】

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。

【0044】

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

【0045】

半導体レーザー110は、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W1および第2側帯波W2と、を含む第1光L1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L1)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畠することにより、半導体レーザー110が出射する第1光L1に変調をかけることができる。これにより、第1光L1には、第1側帯波W1、および第2側帯波W2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。 30

【0046】

図2(B)に示すように、第1光L1は、中心周波数 f_0 ($= v / \lambda_0$: vは光の速度、 λ_0 は第1光L1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。 40

【0047】

波長選択素子120は、第1光の第1側帯波W1および第2側帯波W2を選択して透過する。すなわち、波長選択素子120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、波長選択素子120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は、第1光L1と比べて、基本波Fの 50

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、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。

【0048】

波長選択素子 120 は、後述するように、エタロンであってもよいし、ファイバーグレーティングであってもよい。

【0049】

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、第 2 光 L_2 が照射される。

10

【0050】

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）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 1 と基底準位 2 のエネルギー差に相当する周波数が 9.19263 · · · GHz なので、周波数差が 9.19263 · · · GHz の 2 つの光波が照射されると EIT 現象を起こす。

【0051】

光検出器 140 は、ガスセル 130 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 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。光検出器 140 は、フォトダイオードであってもよい。

20

【0052】

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して半導体レーザー 110 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。

【0053】

半導体レーザー 110、波長選択素子 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。

【0054】

30

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 が射出するレーザー光は、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。

【0055】

なお、半導体レーザー 110、波長選択素子 120、ガスセル 130、光検出器 140 は、それぞれ図 1 の光源 10、波長選択手段 20、ガスセル 30、光検出手段 40 に対応する。また、電流駆動回路 150、変調回路 160 は、図 1 の制御手段 50 に対応する。

【0056】

40

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 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 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 W_1 と第 2 側帯波 W_2 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。そのため、半導体レーザー 110、波長選択素子 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 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）とすることができます。

50

【 0 0 5 7 】

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

【 0 0 5 8 】

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および波長選択素子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および波長選択素子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。

【 0 0 5 9 】

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¹⁰、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。

【 0 0 6 0 】

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。

【 0 0 6 1 】

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）Al_{0.9}Ga_{0.1}As層とn型Al_{0.15}Ga_{0.85}As層とを交互に積層した分布プラグ反射型（DBR）半導体ミラーである。²⁰

【 0 0 6 2 】

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。

【 0 0 6 3 】

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。

【 0 0 6 4 】

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。³⁰

【 0 0 6 5 】

第1電極118は、基体170の下面に形成されている。第1電極118は、基体170を介して、第1半導体層112と電気的に接続されている。第1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。

【 0 0 6 6 】

第2電極119は、第2半導体層116の上面に形成されている。第2電極119は、第2半導体層116と電気的に接続されている。第2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。

【 0 0 6 7 】

第1電極118と第2電極119とで、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、波長選択素子120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を波長選択素子120に入射させるための光学素子である。⁴⁰

【 0 0 6 8 】

光学モジュール2において、波長選択素子120は、エタロンである。波長選択素子120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12

2との間に配置された基板123と、を含む。

【0069】

波長選択素子120は、干渉作用により、入射した光のうち、所定波長の光（第1側帯波W1および第2側帯波W2）を透過する。第1ミラー121と第2ミラー122との間の基板123に光が入射すると、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波長選択素子120を透過する。波長選択素子120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、波長選択素子120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を消滅させることができる。したがって、波長選択素子120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。10

【0070】

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、Ta₂O₅膜とSiO₂膜とを交互に積層した多層膜からなる。

【0071】

基板123は、基体170上に形成されている。基板123は、基体170側から順に形成された、第1層124、第2層126、および第3層128を有している。基板123は、第1層124の屈折率および第3層128の屈折率は、第2層126の屈折率より小さい。したがって、第1層124および第3層128は、クラッド層として機能し、第2層は、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、波長選択素子から射出される光L2のビーム径を制御することができ、ガスセル130に光を効率よく照射することができる。20

【0072】

第1層124および第3層128の材質は、例えば、AlGaAsであり、第2層126の材質は、例えば、GaAsである。

【0073】

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、フリースペクトルレンジを9.2GHz、半値全幅を0.3GHz程度とすると、基板123の長さDは28.5mm程度である。エタロンの基板の材質として一般的なSiO₂を用いた場合、基板の長さは、70.66mm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。30

【0074】

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, 126, 128を有さずに、単層であってもよい。

【0075】

ここでは、波長選択素子120がエタロンである場合について説明したが、波長選択素子120は、光ファイバーのコアに長手方向に周期的な屈折率変化を与えたファイバーグレーティングであってもよい。ファイバーグレーティングは、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

【0076】

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。

【0077】

光学モジュール2によれば、波長選択素子120が、第1光L1の基本波Fの強度を減少または基本波Fを消滅させることができる。これにより、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ことを抑制または防止できる。したがって、ACシユ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50

できる。

【0078】

光学モジュール2によれば、波長選択素子120が、エタロンである。したがって、簡易な構成で波長選択素子を形成できる。また、波長選択素子(エタロン)120の基板123の材質が化合物半導体である。したがって、基板123の材質を SiO_2 とした場合と比べて、基板123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。

【0079】

光学モジュール2によれば、波長選択素子(エタロン)120および半導体レーザー(光源)110が基体170に形成されている。このように波長選択素子120と半導体レーザー110を基体170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。

【0080】

光学モジュール2によれば、上述のように、波長選択素子(エタロン)120の基板123が光導波路である。したがって、波長選択素子120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に効率よく光を照射することができる。

【0081】

光学モジュール2によれば、光源10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。

【0082】

原子発振器1によれば、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。

【0083】

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。

【0084】

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。

【0085】

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。

【0086】

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。

【0087】

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。

【0088】

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、光を增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。

【0089】

半導体レーザー110では、第1電極118と第2電極119との間に、pinダイオ

10

20

30

40

50

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。

【0090】

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と波長選択素子 120との間のアライメントができる。さらに、例えば、同じ基板 170 上に形成された波長選択素子 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。したがって、半導体レーザー 110と波長選択素子 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。10

【0091】

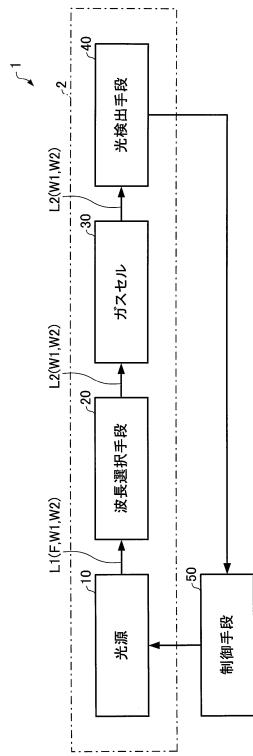
上記のように、本発明の実施形態について詳細に説明したが、本発明の新規事項および効果から実体的に逸脱しない多くの変形が可能であることは当業者には容易に理解できよう。従って、このような変形例はすべて本発明の範囲に含まれるものとする。

【符号の説明】

【0092】

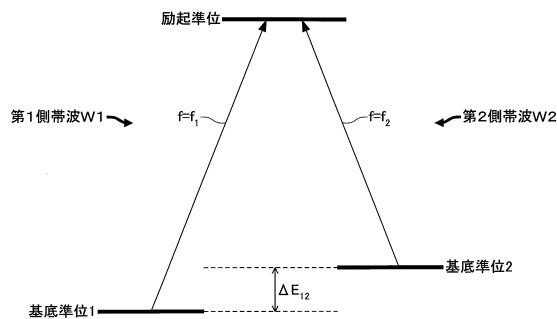
1 原子発振器、2 光学モジュール、10 光源、20 波長選択手段、30 ガスセル、40 光検出手段、50 制御手段、110 半導体レーザー、112 第 1 半導体層、114 活性層、116 第 2 半導体層、118 第 1 電極、119 第 2 電極、120 波長選択素子、121 第 1 ミラー、122 第 2 ミラー、123 基板、124 第 1 層、126 第 2 層、128 第 3 層、130 ガスセル、140 光検出器、150 電流駆動回路、160 变調回路、170 基体、180 プリズム。20

【図 1】

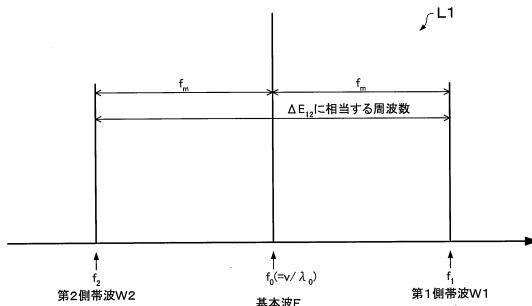


【図 2】

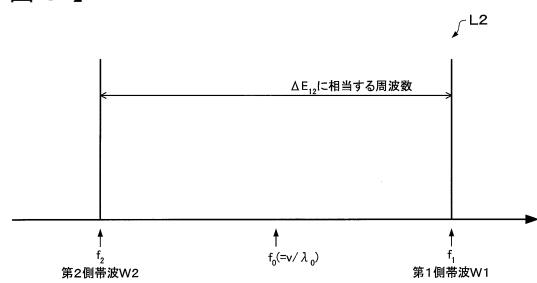
(A)



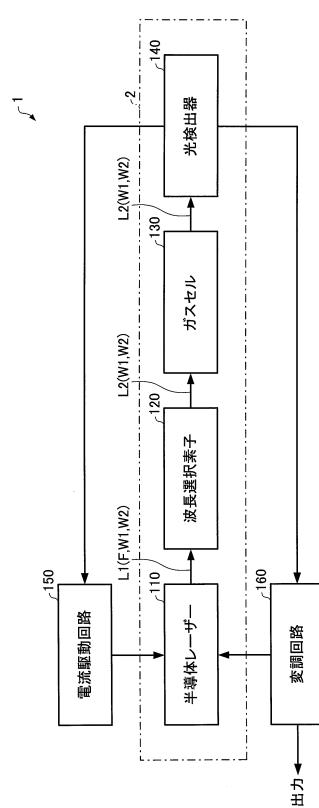
(B)



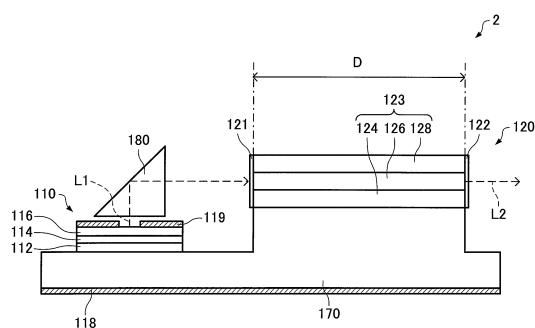
【図3】



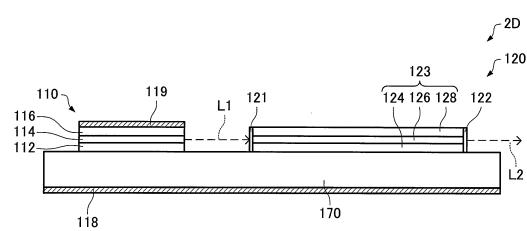
【図4】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2012-023179(JP,A)
特開2009-141048(JP,A)
特開2009-194418(JP,A)
特開2008-251945(JP,A)
特開2006-245179(JP,A)
特開昭63-088883(JP,A)
特開平03-053575(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 1/06
H03L 7/26
IEEE Xplore