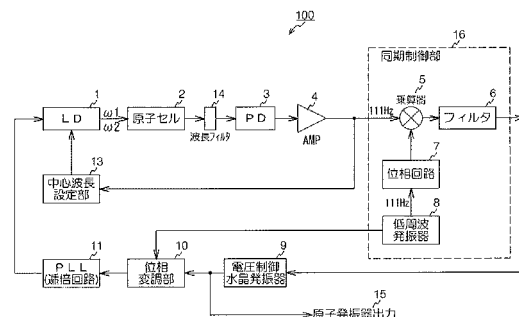




【特許請求の範囲】

【請求項 1】

アルカリ金属原子が封入された原子セルと、

前記アルカリ金属原子に電磁誘起透過現象を発現させるための第 1 の共鳴光、及び第 2 の共鳴光とキャリア光とを少なくとも含む光を前記アルカリ金属原子に照射する光源と、

前記アルカリ金属原子を透過した前記キャリア光と共に前記第 1 の共鳴光及び前記第 2 の共鳴光のうちいずれか一方の光を減衰させるフィルタと、

前記フィルタから出力された光を検出する光検出手段と、

前記光検出手段の出力信号に基づき、前記アルカリ金属原子に前記電磁誘起透過現象を発現させるように、前記第 1 の共鳴光と第 2 の共鳴光との周波数差を制御する制御手段と

10

、

を備えたことを特徴とする原子発振器。

【請求項 2】

前記フィルタは、所定の波長帯域を有する光を通過させる帯域通過フィルタ、又は所定の長波長帯域の光を通過させる長波長通過フィルタ、又は所定の短波長帯域の光を通過させる短波長通過フィルタの何れかであることを特徴とする請求項 1 に記載の原子発振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子発振器に関し、特に、EIT 信号の S/N を改善した原子発振器に関するものである。

20

【背景技術】

【0002】

アルカリ金属原子に電磁誘起透過現象を発現させるためには、周波数の異なる 2 つの共鳴光（周波数 ω_1 、 ω_2 ）をアルカリ金属原子に照射する必要がある。EIT 方式による原子発振器は、図 4 に示すように、第 1 基底準位 33 と第 2 基底準位 34 は準位のエネルギーが若干異なるため（ ΔE_{12} ）、共鳴光もそれぞれ第 1 共鳴光 31 と第 2 共鳴光 32 の波長 f_1 、 f_2 が若干異なる。同時に照射される第 1 共鳴光 31 と第 2 共鳴光 32 の周波数差 $f_1 - f_2$ （波長の差： $\omega_1 - \omega_2$ ）が正確に第 1 基底準位 33 と第 2 基底準位 34 のエネルギー差 ΔE_{12} に一致すると、図 4 の系は 2 つの基底準位の重ね合わせ状態になり、励起準位 30 への励起が停止する（EIT 現象と呼ぶ）。EIT はこの原理を利用して、第 1 共鳴光 31 と第 2 共鳴光 32 のどちらか、または両方の波長を変化させたときに、ガスセルでの光吸収（つまり励起準位 30 への転換）が停止する状態を検出、利用する方式である。

30

【0003】

図 5 は特許文献 1 に開示されている原子発振器の概略構成を示す図であり、半導体レーザー 40 と、アルカリ金属原子を封入した原子セル 41 と、原子セル 41 を透過した光を検知するフォトダイオード（PD）42 と、PD 42 で検知した信号を同期制御する制御手段 43 と、図示しない電圧制御発振器（VCO）の出力信号を逡倍して高周波を発生する高周波発生手段 44 と、半導体レーザー 40 に直流電流を与え、半導体レーザー 40 の波長を所定の値に設定する直流バイアス 46 と、それを制御する制御手段 47 と、高周波発生手段 44 と直流バイアス 46 を合成する合成手段 45 と、を備えて構成されている。

40

2 つの共鳴光 ω_1 、 ω_2 を一つの半導体レーザー 40 から発生させるには、半導体レーザー 40 に高周波発生手段 44 から高周波信号を入力することにより、半導体レーザー 40 の出力信号に周波数変調を与え、2 つの共鳴光 ω_1 、 ω_2 に対応する周波数成分を生成するようにしている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】US 6 320 472 B1

50

【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、特許文献1に開示されている従来技術は、半導体レーザー40に周波数変調を与えると、半導体レーザー40の出力には2つの共鳴光（周波数 ω_1 、 ω_2 ）以外の周波数成分（特にキャリア光の成分 ω_c が）含まれており（図6（a）参照）、この不要な成分がPD42により検出されて雑音成分となり、S/Nの劣化を招いて原子発振器の周波数安定度を劣化させる要因となっている。

例えば、キャリア光の成分 ω_c はアルカリ金属原子と反応（電磁誘起透過現象：EIT現象）を起こさずに原子セル41をそのまま透過し、PD42によって検出されてしまう。つまり、キャリア光は電磁誘起透過現象に全く寄与せず、PD42の出力信号に雑音成分として重畳されてしまう（図6（b）参照）。

【0006】

そこで、このキャリア光のみを波長フィルタで除去できれば、雑音成分を除去したEIT信号を検出することが可能となる。そのためには、原子セル41の共鳴光が入射する側（半導体レーザー40（光源）と原子セル41との間）に狭帯域の帯域除去フィルタを配置する必要がある。しかしながら、キャリア光のみを除去する狭帯域の帯域除去フィルタを実現するのは極めて困難である。なぜならば、キャリア光の成分は周波数的に共鳴光1（ ω_1 ）と共鳴光2（ ω_2 ）との間に配置されており、また、キャリア光の周波数は共鳴光1、2の周波数に接近しているので、共鳴光1、2の両者を除去せずに（減衰させずに）、キャリア光のみを除去する特性を有するフィルタを実現することは技術的に非常に困難だからである。

【0007】

本発明は、かかる課題に鑑みてなされたものであり、原子セルを透過した共鳴光対（ ω_1 、 ω_2 ）のうち、何れか一方が存在すれば、電磁誘起透過現象の発現させることができる点に着目して、原子セルの共鳴光が出射した側に広帯域の帯域通過フィルタを配置して、一方の共鳴光のみを通過させて、他方の共鳴光とキャリア光を減衰させることにより、EIT信号のS/Nを改善して周波数安定度を高めた原子発振器を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明は、上述の課題の少なくとも一部を解決するためになされたものであり、以下の形態又は適用例として実現することが可能である。

【0009】

〔適用例1〕アルカリ金属原子が封入された原子セルと、前記アルカリ金属原子に電磁誘起透過現象を発現させるための第1の共鳴光、及び第2の共鳴光とキャリア光とを少なくとも含む光を前記アルカリ金属原子に照射する光源と、前記アルカリ金属原子を透過した前記キャリア光と共に前記第1の共鳴光及び前記第2の共鳴光のうちいずれか一方の光を減衰させるフィルタと、前記フィルタから出力された光を検出する光検出手段と、前記光検出手段の出力信号に基づき、前記アルカリ金属原子に前記電磁誘起透過現象を発現させるように、前記第1の共鳴光と第2の共鳴光との周波数差を制御する制御手段と、を備えたことを特徴とする。

【0010】

光源から照射された光には、2つの共鳴光とキャリア光が存在する。この中で、2つの共鳴光は電磁誘起透過現象を発現させるためには必要な光であるが、キャリア光は全く電磁誘起透過現象の発現には寄与しない光である。しかし、キャリア光は原子セルをそのまま透過してしまうため、雑音成分となり、S/Nの劣化を招いて原子発振器の周波数安定度を劣化させる要因となっている。ここで注目すべきは、光源から照射された光には必ず2つの共鳴光が必要であるが、原子セルから透過した光には、2つの共鳴光の何れか一方が存在すれば、電磁誘起透過現象の発現させることができる点である。本発明では、この

点に着目して、一方の共鳴光のみを通過させて、他方の共鳴光とキャリア光を減衰させるフィルタを光検出手段の前に設置して、S/Nを改善して原子発振器の周波数安定度を高めるものである。

【0011】

〔適用例2〕前記フィルタは、所定の波長帯域を有する光を通過させる帯域通過フィルタ、又は所定の長波長帯域の光を通過させる長波長通過フィルタ、又は所定の短波長帯域の光を通過させる短波長通過フィルタの何れかであることを特徴とする。

【0012】

キャリア光を減衰して何れか一方の共鳴光を取り出すためには、何れかの共鳴光の波長に通過特性を持たせた帯域通過フィルタか、波長の長い方の共鳴光を通過させる長波長通過フィルタか、或いは波長の短い方の共鳴光を通過させる短波長通過フィルタを形成する。尚、これらフィルタのオクターブ特性は、さほど急峻にする必要はなく、隣接するキャリア周波数の一部が通過しても構わない。これにより、安価なフィルタによりキャリア光と何れか一方の共鳴光を有効に減衰させることができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】本発明の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。

【図2】(a)は、 ω_2 を通過させるためのフィルタの一例を示す図、(b)は、 ω_1 を通過させるためのフィルタの一例を示す図である。

【図3】(a)は、図2(a)の特性を有するフィルタによりPDで検出された各波長ごとのスペクトラム強度をグラフにした図、(b)は、図2(b)の特性を有するフィルタによりPDで検出された各波長ごとのスペクトラム強度をグラフにした図である。

【図4】EIT方式の原理を説明する図である。

【図5】特許文献1に開示されている原子発振器の構成を示すブロック図である。

【図6】(a)(b)は、図5の原子セルから透過する光のスペクトラムを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

以下、本発明を図に示した実施形態を用いて詳細に説明する。但し、この実施形態に記載される構成要素、種類、組み合わせ、形状、その相対配置などは特定の記載がない限り、この発明の範囲をそれのみに限定する主旨ではなく単なる説明例に過ぎない。

【0015】

図1は本発明の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。この原子発振器10は、半導体レーザーにより構成されるLD(光源)1と、LD1に直流電流を与え、LD1の波長を所定の値に設定する中心波長設定部13と、アルカリ金属が封止された原子セル2と、アルカリ金属原子を透過したキャリア光(ω_c)と共に第1の共鳴光(ω_1)、及び第2の共鳴光(ω_2)のうちいずれか一方の光を減衰させる波長フィルタ14と、波長フィルタ14を通過した原子セル2の透過光を検出するPD(光検出器)3と、PD3の電流出力を増幅し電圧に変換するAMP4と、AMP4に含まれる低周波信号(111Hz)と低周波発振器8の信号を同期検波し、誤差電圧を生成する乗算器5と、乗算器5の出力に含まれる交流成分を除去するフィルタ6と、乗算器5に入力される二つの信号間の位相差を0度にする位相回路7と、約111Hzの低周波信号を出力する低周波発振器8と、同期制御部16からの制御信号に従い、出力周波数が制御される電圧制御水晶発振器9と、電圧制御水晶発振器9の出力信号(原子発振器出力15)を低周波発信器8の出力信号にて位相変調する位相変調部10と、位相変調部10の出力信号を逡倍し、4.596GHzのマイクロ波信号を生成するPLL(逡倍回路)11と、を備えて構成される。

尚、電圧制御水晶発振器9の周波数を制御する制御信号を生成する同期制御部16は、乗算器5、フィルタ6、位相回路7、及び低周波発振器8により構成される。

【0016】

次に本発明に係る原子発振器 100 の動作について説明する。まず装置の電源を ON すると、PD 3 の出力が最小となるように中心波長設定部 13 が LD 1 の中心波長を設定する。次に、PLL 11 の出力信号を LD 1 に印加し、LD 1 にサイドバンド成分を発生させる（第 1 共鳴光 ($\omega 1$)、第 2 共鳴光 ($\omega 2$) の成分を発生）。このとき、PLL 11 の出力はフリーランの状態にあるが、ほぼ 4.596 GHz（共鳴周波数の約 $1/2$ ）の周波数を維持する（電圧制御水晶発振器 9 の周波数は安定している）。PLL 11 の出力がほぼ 4.596 GHz にあるとき、AMP 4 の出力に EIT 信号が出力される。尚、本実施形態では、波長フィルタ 14 によりキャリア光と何れか一方の共鳴光が減衰されているので、雑音成分であるキャリア光の周波数成分 (ωc) のレベルは抑制されて、S/N が大きい EIT 信号を得ることができる。

10

【0017】

このとき、PLL 11 の出力信号には 111 Hz の位相変調がかかっているため、LD 1 にも位相変調がかかり（第 1 共鳴光、又は第 2 共鳴光の波長がそれぞれ 111 Hz の周期で変化）、AMP 4 の出力は、何れか一方の共鳴光が 111 Hz 周期で脈動する。アンロック（非同期）状態では、PLL 11 の出力周波数が共鳴周波数の $1/2$ にロックされていないため、AMP 4 の出力において低周波発振器 8 の成分（111 Hz）のみ発生する。そこで、AMP 4 の出力において低周波発振器 8（111 Hz）の 2 倍の成分（222 Hz）が最少になるようにフィードバック制御され、PLL 11 の出力信号の周波数が共鳴周波数の $1/2$ に正確にロックされる。

20

【0018】

以上のとおり、LD 1 から照射された光には、2 つの共鳴光 $\omega 1$ 、 $\omega 2$ とキャリア光 ωc が存在する。この中で、2 つの共鳴光 $\omega 1$ 、 $\omega 2$ は EIT を発現させるためには必要な光であるが、キャリア光 ωc は全く EIT の発現には寄与しない光である。しかし、キャリア光 ωc は原子セル 2 をそのまま透過してしまうため、雑音成分となり、S/N の劣化を招いて原子発振器 100 の周波数安定度を劣化させる要因となっている。ここで注目すべきは、LD 1 から照射された光には必ず 2 つの共鳴光 $\omega 1$ 、 $\omega 2$ が必要であるが、原子セル 2 から透過した光には、2 つの共鳴光 $\omega 1$ 、 $\omega 2$ の何れか一方が存在すれば、EIT を発現させることができる点である。本実施形態では、この点に着目して、原子セル 2 を透過した共鳴光の何れか一方とキャリア光 ωc を減衰させる波長フィルタ 14 を、PD 3 の前に設置して S/N を改善して原子発振器 100 の周波数安定度を高めるものである。

30

【0019】

図 2 は本発明の波長フィルタの減衰特性を説明する図である。縦軸に減衰量を示し、横軸に周波数を示す。図の縦軸の減衰量は、下に行くほど大きくなることを表している。図 2 (a) は、 $\omega 2$ を通過させるためのフィルタの一例である。符号 20 の特性は、 $\omega 1$ を減衰させて、 ωc をある程度減衰させ $\omega 2$ はほとんど減衰させない特性を有している。このような特性のフィルタは比較的容易に且つ安価に構成することができる。符号 21 の特性は、 $\omega 1$ と ωc を同じレベルで減衰させて、 $\omega 2$ はほとんど減衰させない特性を有している。このような特性のフィルタは減衰特性をフィルタ 20 に比べて急峻にしたもので、フィルタ 20 より部品点数が増加するが、特性的には符号 20 より優れている。

【0020】

40

図 2 (b) は、 $\omega 1$ を通過させるためのフィルタの一例である。符号 22 の特性は、 $\omega 2$ を減衰させて、 ωc をある程度減衰させ $\omega 1$ はほとんど減衰させない特性を有している。このような特性のフィルタは比較的容易に且つ安価に構成することができる。符号 23 の特性は、 $\omega 2$ と ωc を同じレベルで減衰させて、 $\omega 1$ はほとんど減衰させない特性を有している。このような特性のフィルタは減衰特性を符号 22 に比べて急峻にしたもので、符号 22 の特性を有するフィルタより部品点数が増加するが、特性的には符号 22 より優れている。

【0021】

図 3 は、図 2 の特性を有するフィルタにより PD で検出された各波長ごとのスペクトラム強度をグラフにした図である。図 3 (a) は、図 2 (a) の特性を有するフィルタによ

50

りPDで検出された各波長ごとのスペクトラム強度をグラフにした図である。この図から明らかなおとおり、符号20の特性のフィルタを使用した場合は、 $\omega 1$ はほとんど減衰されて強度が低下し、 ωc は符号24のレベルまで減衰され、 $\omega 2$ は殆ど減衰されていないのが分る。また、図2(a)の符号21の特性のフィルタを使用した場合は、 $\omega 1$ は同じであるが、 ωc が符号25のように $\omega 1$ と同じレベルまで減衰されているのが分る。

【0022】

図3(b)は、図2(b)の特性を有するフィルタによりPDで検出された各波長ごとのスペクトラム強度をグラフにした図である。この図から明らかなおとおり、符号22の特性のフィルタを使用した場合は、 $\omega 2$ はほとんど減衰されて強度が低下し、 ωc は符号26のレベルまで減衰され、 $\omega 1$ は殆ど減衰されていないのが分る。また、図2(b)の符号23の特性のフィルタを使用した場合は、 $\omega 2$ は同じであるが、 ωc が符号27のように $\omega 2$ と同じレベルまで減衰されているのが分る。

10

【0023】

以上に説明のとおり、原子セルを透過したキャリア光を減衰させるフィルタを光検出手段の前に設置してS/Nを改善することにより、原子発振器の周波数安定度を高めることができる。

また、キャリア光を減衰して何れか一方の共鳴光を取り出すためには、何れかの共鳴光の周波数に通過特性を持たせた帯域通過フィルタか、周波数の低い方の共鳴光を通過させる低域通過フィルタか、或いは周波数に高い方の共鳴光を通過させる高域通過フィルタを形成するので、安価なフィルタによりキャリア光を有効に減衰させることができる。

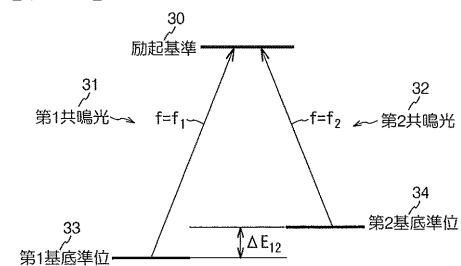
20

【符号の説明】

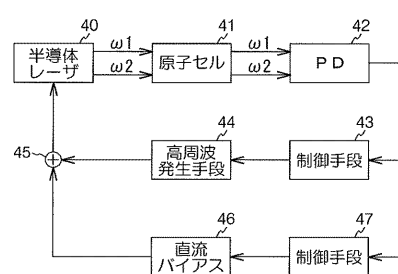
【0024】

1 LD、2 原子セル、3 PD、4 AMP、5 乗算器、6 フィルタ、7 位相回路、8 低周波発振器、9 電圧制御水晶発振器、10 位相変調部、11 PLL、13 中心波長設定部、14 波長フィルタ、20～23 フィルタ減衰特性、24～27 波長スペクトラム、100 原子発振器

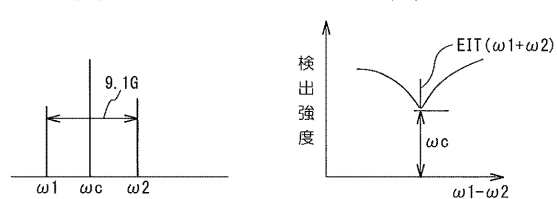
【图 4】



【图 5】



(a) (b)



フロントページの続き

Fターム(参考) 5J106 CC01 CC07 CC37 CC54 CC55 CC57 HH02 KK22 LL10