

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5818000号
(P5818000)

(45) 発行日 平成27年11月18日 (2015.11.18)

(24) 登録日 平成27年10月9日 (2015.10.9)

(51) Int.Cl.		F I
H03L 7/26	(2006.01)	H03L 7/26
H01S 1/06	(2006.01)	H01S 1/06

請求項の数 7 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2011-269998 (P2011-269998)	(73) 特許権者	000002369
(22) 出願日	平成23年12月9日 (2011.12.9)		セイコーエプソン株式会社
(65) 公開番号	特開2013-123091 (P2013-123091A)		東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
(43) 公開日	平成25年6月20日 (2013.6.20)	(74) 代理人	100090387
審査請求日	平成26年12月2日 (2014.12.2)		弁理士 布施 行夫
		(74) 代理人	100090398
			弁理士 大淵 美千栄
		(72) 発明者	青山 拓
			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
		(72) 発明者	高橋 哲也
			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	橋本 和志
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子発振器、原子発振器の制御方法及び量子干渉装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

周波数変調された制御信号を生成する制御信号生成部と、
前記制御信号の周波数に応じ、所定の周波数差を有する第1の光と第2の光とを発生させる光発生部と、

前記第1の光と前記第2の光とが照射される金属原子と、
前記金属原子を透過した光を検出する光検出部と、
前記光検出部の検出信号に基づいて、前記制御信号生成部を制御する周波数制御部と、
前記光検出部の検出信号のレベルに応じて、前記制御信号の最大周波数偏移を变化させるように前記制御信号生成部を制御する最大周波数偏移制御部と、
を有し、

前記第1の光と前記第2の光とが共鳴光対となるような周波数を有する前記制御信号を
前記制御信号生成部が生成できるように、当該制御信号生成部を前記周波数制御部と前記最大周波数偏移制御部とで制御する、原子発振器。

【請求項 2】

前記制御信号生成部は、
前記周波数制御部の出力信号に応じた周波数の発振信号を生成する発振信号生成部と、
変調信号を生成する変調信号生成部と、
前記発振信号を前記変調信号で周波数変調する周波数変調部と、
前記周波数変調部の出力信号の周波数を変換して前記制御信号を生成する周波数変換部

10

20

と、を有し、

前記周波数制御部は、

前記変調信号と同じ周波数の信号に基づいて、前記光検出部の検出信号を検波し、

最大周波数偏移制御部は、

前記光検出部の検出信号のレベルに応じて前記変調信号の振幅を変化させることにより、前記最大周波数偏移を変化させる、請求項 1 に記載の原子発振器。

【請求項 3】

最大周波数偏移制御部は、

前記制御信号の周波数を一定にする、前記光検出部の検出信号の強度と前記制御信号の最大周波数偏移との対応関係に従って、前記変調信号の振幅を変化させる請求項 2 に記載の原子発振器。

10

【請求項 4】

最大周波数偏移制御部は、

前記制御信号の周波数を一定にする、前記光検出部の検出信号の強度と前記制御信号の最大周波数偏移との対応関係の情報を記憶し、当該対応関係の情報に基づいて、前記制御信号の最大周波数偏移を変化させる、請求項 1 又は 2 に記載の原子発振器。

【請求項 5】

前記原子発振器の外部からの信号に基づいて、前記対応関係の情報を変更する最大周波数偏移情報変更部を有する、請求項 4 に記載の原子発振器。

【請求項 6】

20

周波数変調された制御信号を生成させる制御信号生成ステップと、

前記制御信号の周波数に応じ、所定の周波数差を有する第 1 の光と第 2 の光を発生させる光発生ステップと、

前記第 1 の光と前記第 2 の光を金属原子に照射する光照射ステップと、

前記金属原子を透過した光を検出する光検出ステップと、

前記光検出ステップで得られた検出信号に基づいて、前記制御信号生成ステップを制御する周波数制御ステップと、

前記光検出ステップで得られた検出信号のレベルに応じて、前記制御信号の最大周波数偏移を変化させるように前記制御信号生成ステップを制御する最大周波数偏移制御ステップと、

30

を含み、

前記第 1 の光と前記第 2 の光とが共鳴光対となるような周波数を有する前記制御信号を前記制御信号生成ステップで生成できるように、当該制御信号生成ステップを前記周波数制御ステップと前記最大周波数偏移制御ステップとで制御する、原子発振器の制御方法。

【請求項 7】

周波数変調された制御信号を生成する制御信号生成部と、

前記制御信号の周波数に応じ、所定の周波数差を有する第 1 の光と第 2 の光を発生させる光発生部と、

前記第 1 の光と前記第 2 の光が照射される金属原子と、

前記金属原子を透過した光を検出する光検出部と、

40

前記光検出部の検出信号に基づいて、前記制御信号生成部を制御する周波数制御部と、

前記光検出部の検出信号のレベルに応じて、前記制御信号の最大周波数偏移を変化させるように前記制御信号生成部を制御する最大周波数偏移制御部と、を有し、

前記第 1 の光と前記第 2 の光とが共鳴光対となるような周波数を有する前記制御信号を前記制御信号生成部が生成できるように、当該制御信号生成部を前記周波数制御部と前記最大周波数偏移制御部とで制御する、量子干渉装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子発振器、原子発振器の制御方法及び量子干渉装置に関する。

50

【背景技術】

【0002】

図19に示すように、アルカリ金属原子は、タームシンボル $^2S_{1/2}$ で表される基底準位と、タームシンボル $^2P_{1/2}$ 、 $^2P_{3/2}$ で表される2つの励起準位とを有することが知られている。さらに、 $^2S_{1/2}$ 、 $^2P_{1/2}$ 、 $^2P_{3/2}$ の各準位は、複数のエネルギー準位に分裂した超微細構造を有している。具体的には、 $^2S_{1/2}$ は $I + 1/2$ と $I - 1/2$ の2つの基底準位を持ち、 $^2P_{1/2}$ は $I + 1/2$ と $I - 1/2$ の2つの励起準位を持ち、 $^2P_{3/2}$ は $I + 3/2$ 、 $I + 1/2$ 、 $I - 1/2$ 、 $I - 3/2$ の4つの励起準位を持っている。ここで、 I は核スピン量子数である。

【0003】

$^2S_{1/2}$ の $I - 1/2$ の基底準位にある原子は、D2線を吸収することで、 $^2P_{3/2}$ の $I + 1/2$ 、 $I - 1/2$ 、 $I - 3/2$ のいずれかの励起準位に遷移することができるが、 $I + 3/2$ の励起準位に遷移することはできない。 $^2S_{1/2}$ の $I + 1/2$ の基底準位にある原子は、D2線を吸収することで、 $^2P_{3/2}$ の $I + 3/2$ 、 $I + 1/2$ 、 $I - 1/2$ のいずれかの励起準位に遷移することができるが、 $I - 3/2$ の励起準位に遷移することはできない。これらは、電気双極子遷移を仮定した場合の遷移選択則による。逆に、 $^2P_{3/2}$ の $I + 1/2$ 又は $I - 1/2$ の励起準位にある原子は、D2線を放出して $^2S_{1/2}$ の $I + 1/2$ 又は $I - 1/2$ の基底準位（元の基底準位又は他方の基底準位のいずれか）に遷移することができる。ここで、 $^2S_{1/2}$ の $I + 1/2$ 、 $I - 1/2$ の2つの基底準位と $^2P_{3/2}$ の $I + 1/2$ 又は $I - 1/2$ の励起準位からなる3準位（2つの基底準位と1つの励起準位からなる）は、D2線の吸収・発光による型の遷移が可能であることから型3準位と呼ばれる。これに対して、 $^2P_{3/2}$ の $I - 3/2$ の励起準位にある原子は、D2線を放出して必ず $^2S_{1/2}$ の $I - 1/2$ の基底準位（元の基底準位）に遷移し、同様に、 $^2P_{3/2}$ の $I + 3/2$ の励起準位にある原子は、D2線を放出して必ず $^2S_{1/2}$ の $I + 1/2$ の基底準位（元の基底準位）に遷移する。すなわち、 $^2S_{1/2}$ の $I + 1/2$ 、 $I - 1/2$ の2つの基底準位と $^2P_{3/2}$ の $I - 3/2$ 又は $I + 3/2$ の励起準位からなる3準位は、D2線の吸収・放出による型の遷移が不可能であることから型3準位を形成しない。

【0004】

ところで、気体状のアルカリ金属原子に、型3準位を形成する第1の基底準位（ $^2S_{1/2}$ の $I - 1/2$ の基底準位）と励起準位（例えば、 $^2P_{3/2}$ の $I + 1/2$ の励起準位）とのエネルギー差に相当する周波数（振動数）を有する共鳴光（共鳴光1とする）と、第2の基底準位（ $^2S_{1/2}$ の $I + 1/2$ の基底準位）と励起準位とのエネルギー差に相当する周波数（振動数）を有する共鳴光（共鳴光2とする）とを同時に照射すると、2つの基底準位の重ね合わせ状態、即ち量子コヒーレンス状態（暗状態）になり、励起準位への励起が停止する電磁誘起透過（EIT: Electromagnetically Induced Transparency）現象（CPT (Coherent Population Trapping) と呼ばれることもある）が起こることが知られている。このEIT現象を起こす共鳴光対（共鳴光1と共鳴光2）の周波数差はアルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差 E_{12} に相当する周波数と正確に一致する。例えば、セシウム原子は、2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数は9.192631770 GHzであるので、セシウム原子に、周波数差が9.192631770 GHzの2種類のD1線又はD2線のレーザー光を同時に照射すると、EIT現象が起こる。

【0005】

従って、図20に示すように、周波数が f_1 の光と周波数が f_2 の光を気体状のアルカリ金属原子に同時に照射したとき、この2種類の光が共鳴光対となってアルカリ金属原子がEIT現象を起こすか否かでアルカリ金属原子を透過する光の強度が急峻に変化する。この急峻に変化する透過光の強度を示す信号はEIT信号と呼ばれ、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2$ が E_{12} に相当する周波数 f_{12} と正確に一致するときにEIT信号のレベルがピーク値を示す。そこで、EIT信号のピークトップを検出し、アルカリ金属原子に

10

20

30

40

50

照射する２種類の光の周波数差 $f_1 - f_2$ が E_{12} に相当する周波数 f_{12} と正確に一致するように制御することで、高精度な発振器を実現することができる。

【０００６】

図２１は、従来のＥＩＴ方式による原子発振器の一般的な構成の概略図である。図２１に示すように、従来のＥＩＴ方式による原子発振器は、電流駆動回路により発生した周波数 f_0 ($= v / \lambda_0$: v は光の速度、 λ_0 は光の波長) を設定するための駆動電流に、周波数が f_m の変調信号を重畳することにより、半導体レーザーに変調をかけて周波数が $f_0 + f_m$ の光と周波数が $f_0 - f_m$ の光を発生させる。この２種類の光はガスセルに同時に照射され、光検出器によりガスセルを透過した光の強度を検出する。ガスセルは気体状のアルカリ金属原子とこれを封入する容器とから構成されており、同時に照射された２種類の光が共鳴光対となれば、アルカリ金属原子がＥＩＴ現象を起こし、ガスセルを透過する光の強度が大きくなる。そこで、この原子発振器は、低周波発振器が発生する数十Hz～数百Hz程度の低周波信号を用いて検波を行うことで、光検出器が検出する光の強度が最大になるように電圧制御水晶発振器（VCO : Voltage Controlled Crystal Oscillator）の発振周波数を制御し、PLL（Phase Locked Loop）を介して周波数が f_m の変調信号を生成する。このような構成によれば、半導体レーザーが出射する、周波数が $f_0 + f_m$ の光と周波数が $f_0 - f_m$ の光の周波数差 $2f_m$ が E_{12} に相当する周波数と一致するように、すなわち、変調信号の周波数 f_m が E_{12} に相当する周波数の $1/2$ の周波数と一致するように制御がかかる。従って、電圧制御水晶発振器（VCO）の発振動作が極めて安定に継続し、周波数安定度が極めて高い発振信号を発生させることができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００７】

【特許文献１】米国特許第６３２０４７２号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００８】

ところで、従来の原子発振器では、低周波信号を用いた検波により、ＥＩＴ信号のピークトップを検出し、変調信号の周波数 f_m が E_{12} に相当する周波数の $1/2$ の周波数と正確に一致するように制御がかかるためには、ＥＩＴ信号が左右対称であることが前提となっている。逆に言えば、従来の原子発振器では、ＥＩＴ信号が左右非対称であれば、変調信号の周波数 f_m と E_{12} に相当する周波数の $1/2$ の周波数がわずかにずれた状態で安定する可能性がある。このような状態でも、高い周波数安定度が確保され、例えば、電圧制御水晶発振器（VCO）の発振周波数を所望の周波数に変換する回路を付加することで、周波数精度も確保できる。

【０００９】

ところが、周囲環境の温度の急激な変化等に起因してＥＩＴ信号のピーク値（強度）が変化して非対称の度合いが変わると、変調信号の周波数 f_m と E_{12} に相当する周波数の $1/2$ の周波数との差が変動し、原子発振器の周波数安定度が低下する原因となる。

【００１０】

本発明は、以上のような問題点に鑑みてなされたものであり、本発明のいくつかの態様によれば、ＥＩＴ信号の強度が変化しても高い周波数安定度を維持することが可能な原子発振器、原子発振器の制御方法及び量子干渉装置を提供することができる。

【課題を解決するための手段】

【００１１】

（１）本発明は、共鳴光対によって金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる原子発振器であって、周波数変調された制御信号を生成する制御信号生成部と、前記制御信号の周波数に応じた周波数差の第１の光と第２の光を発生させる光発生部と、前記第１の光と前記第２の光が照射される金属原子と、前記金属原子を透過した光を検出する光検出部と、

前記光検出部の検出信号に基づいて、前記第1の光と前記第2の光が前記共鳴光対となるように前記制御信号の周波数を制御する周波数制御部と、前記光検出部の検出信号に応じて、前記制御信号の最大周波数偏移を制御する最大周波数偏移制御部と、を含む、原子発振器である。

【0012】

本発明によれば、制御信号の周波数に応じた周波数差の第1の光と第2の光を金属原子に照射し、金属原子を透過した光を検出して金属原子に照射される第1の光と第3の光が金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる共鳴光対となるように制御信号の周波数を制御する。このフィードバック制御により、第1の光と第2の光の周波数差を一定に保持することができるので、安定した周波数の発振信号を得ることができる。

10

【0013】

特に、本発明では、光検出部の検出信号に応じて、制御信号の最大周波数偏移を制御することで、EIT信号強度の変化による発振信号の周波数変動分を、最大周波数偏移の変化による発振信号の周波数変動分で打ち消すことができるので、EIT信号強度が変化しても発振信号の周波数を一定に保持することができる。従って、従来よりも高い周波数安定度の原子発振器を実現することができる。

【0014】

(2)この原子発振器において、前記制御信号生成部は、前記周波数制御部の出力信号に応じた周波数の発振信号を生成する発振信号生成部と、所与の変調信号を生成する変調信号生成部と、前記発振信号を前記変調信号で周波数変調する周波数変調部と、前記周波数変調部の出力信号の周波数を変換して前記制御信号を生成する周波数変換部と、を含み、前記周波数制御部は、前記変調信号と同じ周波数の信号に基づいて、前記光検出部の検出信号を検波し、最大周波数偏移制御部は、前記光検出部の検出信号に基づいて、前記変調信号の振幅を制御するようにしてもよい。

20

【0015】

(3)この原子発振器において、最大周波数偏移制御部は、前記制御信号の周波数を一定にする、前記光検出部の検出信号の強度と前記制御信号の最大周波数偏移との対応関係に従って、前記変調信号の振幅を制御するようにしてもよい。

【0016】

(4)この原子発振器において、最大周波数偏移制御部は、前記制御信号の周波数を一定にする、前記光検出部の検出信号の強度と前記制御信号の最大周波数偏移との対応関係の情報を記憶し、当該対応関係の情報に基づいて、前記制御信号の最大周波数偏移を制御するようにしてもよい。

30

【0017】

光検出部の検出信号の強度と制御信号の最大周波数偏移との対応関係は、製造条件のばらつき等に起因してサンプル毎に異なると考えられるので、あらかじめサンプル毎にこの対応関係を求めて記憶しておくことで、サンプル間のEIT信号の特性ばらつきを吸収することができる。従って、サンプルに依存せず高い周波数安定度を確保できる。

【0018】

(5)この原子発振器は、当該原子発振器の外部からの信号に基づいて、前記対応関係の情報を変更する最大周波数偏移情報変更部を含むようにしてもよい。

40

【0019】

このようにすれば、経年変化によりEIT信号の特性が変わっても、あらかじめ光検出部の検出信号の強度と制御信号の最大周波数偏移との対応関係を求めて、記憶されている当該対応関係の情報を更新することで、長期間にわたって高い周波数安定度を維持することができる。

【0020】

(6)本発明は、共鳴光対によって金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる原子発振器の制御方法であって、周波数変調された制御信号を生成させる制御信号生成ステップと、前記制御信号の周波数に応じた周波数差の第1の光と第2の光を発生させる光発生ステ

50

ップと、前記第 1 の光と前記第 2 の光を金属原子に照射する光照射ステップと、前記金属原子を透過した光を検出する光検出ステップと、前記光検出ステップの検出結果に基づいて、前記第 1 の光と前記第 2 の光が前記共鳴光対となるように前記制御信号の周波数を制御する周波数制御ステップと、前記光検出ステップの検出結果に応じて、前記制御信号の最大周波数偏移を制御する最大周波数偏移制御ステップと、を含む、原子発振器の制御方法である。

【 0 0 2 1 】

(7) 本発明は、共鳴光対によって金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる量子干渉装置であって、周波数変調された制御信号を生成する制御信号生成部と、前記制御信号の周波数に応じた周波数差の第 1 の光と第 2 の光を発生させる光発生部と、前記第 1 の光と前記第 2 の光が照射される金属原子と、前記金属原子を透過した光を検出する光検出部と、前記光検出部の検出信号に基づいて、前記第 1 の光と前記第 2 の光が前記共鳴光対となるように前記制御信号の周波数を制御する周波数制御部と、前記光検出部の検出信号に応じて、前記制御信号の最大周波数偏移を制御する最大周波数偏移制御部と、を含む、量子干渉装置である。

【 0 0 2 2 】

本発明によれば、制御信号の周波数に応じた周波数差の第 1 の光と第 2 の光を金属原子に照射し、金属原子を透過した光を検出して金属原子に照射される第 1 の光と第 3 の光が金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる共鳴光対となるように制御信号の周波数を制御する。このフィードバック制御により、第 1 の光と第 2 の光の周波数差を一定に保持することができるので、安定した周波数の発振信号を得ることができる。

【 0 0 2 3 】

特に、本発明では、光検出部の検出信号に応じて、制御信号の最大周波数偏移を制御することで、EIT 信号強度の変化による発振信号の周波数変動分を、最大周波数偏移の変化による発振信号の周波数変動分で打ち消すことができるので、EIT 信号強度が変化しても発振信号の周波数を一定に保持することができる。従って、従来よりも高い周波数安定度の量子干渉装置を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 4 】

【図 1】本実施形態の量子干渉装置の機能ブロック図。

【図 2】本実施形態の量子干渉装置の他の機能ブロック図。

【図 3】第 1 実施形態の原子発振器の構成例を示す図。

【図 4】半導体レーザーの出射光の周波数スペクトルを示す概略図。

【図 5】周波数変調についての説明図。

【図 6】検波についての説明図。

【図 7】検波についての説明図。

【図 8】検波回路に構成例を示す図。

【図 9】検波についての説明図。

【図 10】検波についての説明図。

【図 11】左右非対称な EIT 信号のモデルをグラフ化した図。

【図 12】EIT 信号強度とロック周波数との関係のシミュレーション結果を示す図。

【図 13】ロック周波数と最大周波数偏移との関係のシミュレーション結果を示す図。

【図 14】ロック周波数を一定に維持するための最大周波数偏移と EIT 信号強度との関係のシミュレーション結果を示す図。

【図 15】第 2 実施形態の原子発振器の構成例を示す図。

【図 16】第 3 実施形態の原子発振器の構成例を示す図。

【図 17】変形例 1 の原子発振器における半導体レーザーの出射光の周波数スペクトルを示す概略図。

【図 18】変形例 2 の原子発振器の構成例を示す図。

【図 19】アルカリ金属原子のエネルギー準位を模式的に示す図。

【図 20】E I T 信号の一例を示す概略図。

【図 21】従来の E I T 方式による原子発振器の一般的な構成の概略図。

【発明を実施するための形態】

【0025】

以下、本発明の好適な実施形態について図面を用いて詳細に説明する。なお、以下に説明する実施の形態は、特許請求の範囲に記載された本発明の内容を不当に限定するものではない。また以下で説明される構成の全てが本発明の必須構成要件であるとは限らない。

【0026】

1. 量子干渉装置

図 1 は、本実施形態の量子干渉装置の機能ブロック図である。本実施形態の量子干渉装置 1 は、光発生部 10、金属原子 20、光検出部 30、制御信号生成部 40、周波数制御部 50、最大周波数偏移制御部 60 を含んで構成されている。

10

【0027】

制御信号生成部 40 は、周波数変調された制御信号 12 を生成する。

【0028】

光発生部 10 は、制御信号 12 の周波数に応じた周波数差の第 1 の光と第 2 の光を発生させる。

【0029】

金属原子 20 は、 s 型 3 準位を有する金属原子であり、例えば、ナトリウム (Na) 原子、ルビジウム (Rb) 原子、セシウム (Cs) 原子等のアルカリ金属原子である。

20

【0030】

光検出部 30 は、光発生部 10 から照射されて金属原子 20 を透過した光を検出する。

【0031】

周波数制御部 50 は、光検出部 30 の検出信号に基づいて、第 1 の光と第 2 の光が共鳴光対 (金属原子 20 に電磁誘起透過現象を発生させる共鳴光対) となるように制御信号 12 の周波数を制御する。

【0032】

最大周波数偏移制御部 60 は、光検出部 30 の検出信号に応じて、制御信号 12 の最大周波数偏移を制御する。最大周波数偏移制御部 60 は、例えば、制御信号 12 の周波数を一定にする、光検出部 30 の検出信号の強度と制御信号 12 の最大周波数偏移との対応関係の情報を記憶し、当該対応関係の情報に基づいて、制御信号 12 の最大周波数偏移を制御するようにしてもよい。

30

【0033】

制御信号生成部 40 は、発振信号生成部 42、変調信号生成部 44、周波数変調部 46、周波数変換部 48 を含むように構成してもよい。

【0034】

発振信号生成部 42 は、周波数制御部 50 の出力信号に応じた周波数の発振信号 43 を生成する。

【0035】

変調信号生成部 44 は、所与の変調信号 45 を生成する。

40

【0036】

周波数変調部 46 は、発振信号 43 を変調信号 45 で周波数変調する。

【0037】

周波数変換部 48 は、周波数変調部 46 の出力信号の周波数を変換して制御信号 12 を生成する。

【0038】

周波数制御部 50 は、例えば、変調信号 45 と同じ周波数の信号に基づいて、光検出部 30 の検出信号を検波するようにしてもよい。

【0039】

最大周波数偏移制御部 60 は、例えば、光検出部 30 の検出信号に基づいて、変調信号

50

45の振幅を制御するようにしてもよい。最大周波数偏移制御部60は、例えば、制御信号12の周波数を一定にする、光検出部30の検出信号の強度と制御信号12の最大周波数偏移との対応関係に従って、変調信号42の振幅を制御するようにしてもよい。

【0040】

図2は、本実施形態の量子干渉装置の他の機能ブロック図である。図2に示すように、本実施形態の量子干渉装置1では、図1に示した量子干渉装置1に対して、最大周波数偏移情報変更部70が追加されている。

【0041】

最大周波数偏移情報変更部70は、量子干渉装置1の外部からの信号に基づいて、光検出部30の検出信号の強度と制御信号12の最大周波数偏移との対応関係の情報を変更する。

10

【0042】

図2のその他の各構成の機能は、図1と同様であるため同じ符号を付しており、その説明を書略する。

【0043】

以下では、量子干渉装置1の一例として、原子発振器を例に挙げて詳細に説明する。

【0044】

2. 原子発振器

2-1. 第1実施形態

図3は、第1実施形態の原子発振器の構成例を示す図である。図3に示すように、第1実施形態の原子発振器1は、半導体レーザー110、ガスセル120、光検出器130、検波回路140、電流駆動回路150、低周波発振器160、検波回路170、電圧制御水晶発振器(VCXO)180、周波数変調回路190、低周波発振器200、振幅制御回路210、周波数変換回路220を含んで構成されている。

20

【0045】

ガスセル120は、容器中に気体状のアルカリ金属原子が封入されたものである。

【0046】

半導体レーザー110は、周波数の異なる複数の光を発生させてガスセル120に照射する。具体的には、電流駆動回路150が出力する駆動電流によって、半導体レーザー110の出射光の中心波長 λ_0 (中心周波数は f_0)が制御される。そして、半導体レーザー110は、周波数変換回路220の出力信号を変調信号とし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、周波数変換回路220の出力信号(変調信号)を重畳することにより、半導体レーザー110は変調がかかった光を発生させる。このような半導体レーザー110は、例えば、端面発光レーザー(Edge Emitting Laser)や、垂直共振器面発光レーザー(VCSSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser)等の面発光レーザーなどで実現することができる。

30

【0047】

光検出器130は、ガスセル120を透過した光を検出し、光の強度に応じた検出信号を出力する。前述したように、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 E_{12} に相当する周波数と一致する2種類の光をアルカリ金属原子に照射すると、アルカリ金属原子はEIT現象を起こす。このEIT現象を起こすアルカリ金属原子の数が多いほどガスセル120を透過する光の強度が増大し、光検出器130の出力信号の電圧レベルが高くなる。

40

【0048】

光検出器130の出力信号は検波回路140と検波回路170に入力される。検波回路140は、数Hz~数百Hz程度の低い周波数で発振する低周波発振器160の発振信号を用いて光検出器130の出力信号を同期検波する。

【0049】

電流駆動回路150は、検波回路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、半導体レーザー110の出射光の中心波長 λ_0 (中心

50

周波数 f_0) を制御する。具体的には、アルカリ金属原子の $^2P_{3/2}$ の $I - 1/2$ の励起準位 ($I + 1/2$ の励起準位でもよい) と $^2S_{1/2}$ の $I - 1/2$ の基底準位とのエネルギー差に相当する波長 λ_1 (周波数 f_1)、アルカリ金属原子の $^2P_{3/2}$ の $I - 1/2$ の励起準位 ($I + 1/2$ の励起準位でもよい) と $^2S_{1/2}$ の $I + 1/2$ の基底準位とのエネルギー差に相当する波長 λ_2 (周波数 f_2) に対して、中心波長 λ_0 が $(\lambda_1 + \lambda_2) / 2$ に一致する (中心周波数 f_0 が $(f_1 + f_2) / 2$ に一致する) ように制御される。あるいは、アルカリ金属原子の $^2P_{1/2}$ の $I - 1/2$ の励起準位 ($I + 1/2$ の励起準位でもよい) と $^2S_{1/2}$ の $I - 1/2$ の基底準位とのエネルギー差に相当する波長 λ_1 (周波数 f_1)、アルカリ金属原子の $^2P_{1/2}$ の $I - 1/2$ の励起準位 ($I + 1/2$ の励起準位でもよい) と $^2S_{1/2}$ の $I + 1/2$ の基底準位とのエネルギー差に相当する波長 λ_2 (周波数 f_2) に対して、中心波長 λ_0 が $(\lambda_1 + \lambda_2) / 2$ に一致する (中心周波数 f_0 が $(f_1 + f_2) / 2$ に一致する) ように制御されるようにしてもよい。

【 0 0 5 0 】

ただし、いずれの場合も、中心波長 λ_0 は必ずしも $(\lambda_1 + \lambda_2) / 2$ と正確に一致させる必要はなく、 $(\lambda_1 + \lambda_2) / 2$ を中心とする所定範囲の波長であってもよい。なお、検波回路 140 による同期検波を可能とするために、電流駆動回路 150 が発生する駆動電流には低周波発振器 160 の発振信号 (検波回路 140 に供給される発振信号と同じ信号) が重畳される。

【 0 0 5 1 】

半導体レーザー 110、ガスセル 120、光検出器 130、検波回路 140、電流駆動回路 150 を通るフィードバックループにより、半導体レーザー 110 が発生させる光の中心波長 λ_0 (中心周波数 f_0) が微調整される。

【 0 0 5 2 】

検波回路 170 は、数 Hz ~ 数百 Hz 程度の低い周波数で発振する低周波発振器 200 の発振信号を用いて光検出器 130 の出力信号を同期検波する。そして、検波回路 170 の出力信号の大きさに応じて、電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 の発振周波数が微調整される。電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 は、例えば、数 MHz ~ 数 10 MHz 程度で発振する。

【 0 0 5 3 】

振幅制御回路 210 は、光検出器 130 の検出信号のレベルに応じて、低周波発振器 200 の発振信号の振幅を制御する。

【 0 0 5 4 】

周波数変調回路 190 は、検波回路 170 による同期検波を可能とするために、振幅制御回路 210 の出力信号 (振幅が調整された低周波発振器 200 の発振信号) を変調信号として電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 の出力信号を周波数変調 (FM: Frequency Modulation) する。

【 0 0 5 5 】

周波数変換回路 220 は、一定の周波数変換率で周波数変調回路 190 の出力信号を周波数変換する。例えば、電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 の発振周波数の中心値を 10 MHz として、ガスセル 120 に封入されたアルカリ金属原子がセシウム原子であれば E_{12} に相当する周波数は 9.192631770 GHz なので、周波数変換率は $(9.192631770 \text{ GHz} / 10 \text{ MHz})$ に設定される。周波数変換回路 220 は、例えば、PLL (Phase Locked Loop) 回路により実現することができる。

【 0 0 5 6 】

このような構成の原子発振器 1 において、仮に EIT 信号が左右対称であれば、半導体レーザー 110、ガスセル 120、光検出器 130、検波回路 170、電圧制御水晶発振器 (VCO) 180、周波数変調回路 190、周波数変換回路 220 を通るフィードバックループにより、周波数変換回路 220 の出力信号の周波数が E_{12} に相当する周波数の $1/2$ の周波数と正確に一致するように微調整される。例えば、アルカリ金属原子がセシウム原子であれば、 E_{12} に相当する周波数が 9.192631770 GHz なの

10

20

30

40

50

で、周波数変換回路 220 の出力信号の周波数が 4.596315885 GHz と一致した状態で安定する。

【0057】

そして、前述したように、周波数変換回路 220 の出力信号が変調信号（変調周波数 f_m ）となり、半導体レーザー 110 が共鳴光対を含む複数の光を発生させてガスセル 120 に照射する。

【0058】

図 4 は、半導体レーザー 110 の出射光の周波数スペクトルを示す概略図である。図 4 において、横軸は光の周波数であり、縦軸は光の強度である。

【0059】

図 4 に示すように、半導体レーザー 110 の出射光には、中心周波数 f_0 （ $= v / \lambda_0$ ： v は光の速度、 λ_0 は中心波長）を有する光と、その両側に変調周波数 f_m ずつ周波数が異なる複数の光が含まれている。変調周波数 f_m は E_{12} に相当する周波数の $1/2$ に等しいので、周波数 f_1 （ $= f_0 + f_m$ ）の光と周波数 f_2 （ $= f_0 - f_m$ ）の光は、その差 $f_1 - f_2$ （ $= 2 f_m$ ）が E_{12} にほぼ等しく、ガスセル 120 に封入されたアルカリ金属原子に EIT 現象を起こさせる共鳴光対となる。

【0060】

なお、図 3 の半導体レーザー 110、ガスセル 120 に含まれるアルカリ金属原子、光検出器 130、検波回路 170、振幅制御回路 210 は、それぞれ図 1 の光発生部 10、金属原子 20、光検出部 30、周波数制御部 50、最大周波数偏移制御部 60 に相当する。また、図 3 の電圧制御水晶発振器（VCXO）180、周波数変調回路 190、低周波発振器 200、周波数変換回路 220 による構成は、図 1 の制御信号生成部 40 に相当する。また、図 3 の電圧制御水晶発振器（VCXO）180、低周波発振器 200、周波数変調回路 190、周波数変換回路 220 は、それぞれ図 1 の発振信号生成部 42、変調信号生成部 44、周波数変調部 46、周波数変換部 48 に相当する。

【0061】

次に、光検出器 130 の出力信号の同期検波の一例について詳細に説明する。

【0062】

まず、振幅制御回路 210 が無いものとして考えると、周波数変調回路 190 は、低周波発振器 200 の発振信号を変調信号として電圧制御水晶発振器（VCXO）180 の出力信号を周波数変調することになる。

【0063】

図 5（A）に示すように、低周波発振器 200 の発振信号は、周波数が f_s （周期が $1/f_s$ ）、振幅が A_s の正弦波であり、周波数変調における最大周波数偏移（周波数デビエーション） f は、この振幅 A_s に比例する。図 5（B）は、周波数変調回路 190 の出力信号の周波数スペクトラムを示す図であり、周波数変調回路 190 の出力信号は、低周波発振器 200 の発振周波数 f_{VCXO} を中心周波数として、その両側に f_s 間隔で複数の周波数成分を含む。そして、周波数変換回路 220 により周波数変調回路 190 の出力信号の周波数が N （ $= f_m / f_{VCXO}$ ）倍されるので、周波数変換回路 220 の出力信号（半導体レーザー 110 の変調信号）は、厳密には、変調周波数 f_m を中心周波数として、その両側に $f_s \times N$ の間隔で複数の周波数成分を含む。

【0064】

半導体レーザー 110 は、この周波数変換回路 220 の出力信号を変調信号として変調がかけられる。従って、半導体レーザー 110 の出射光には、厳密には、図 4 に示した各周波数成分の光とともに、その両側に $f_s \times N$ の間隔の複数の光も含まれる。このような複数の光がガスセル 120 に照射され、ガスセル 120 を透過した光が光検出器 130 で検出されるので、光検出器 130 の出力信号には直流成分とともに低周波数成分も含まれる。具体的には、図 4 に示した共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2$ （ $= 2 f_m$ ）が E_{12} に相当する周波数 f_{12} と正確に一致する場合、図 6（A）に示すように、光検出器 130 の検出信号には、ピークの直流成分と一定振幅の周波数 $2 f_s$ の低周波数成分が含まれる

10

20

30

40

50

。また、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2$ が E_{12} に相当する周波数 f_{12} から少しだけずれた場合 ($f_1 - f_2 = f_{12} - \delta$ の場合) も、図 6 (B) に示すように、光検出器 130 の検出信号には、同様に、ピークの直流成分と周波数 $2f_s$ の低周波数成分が含まれる。ただし、周波数 $2f_s$ の低周波数成分の振幅は 1 周期毎に変化し、2 周期 ($1/f_s$) 毎に同じ振幅になる。

【0065】

一方、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2$ が E_{12} に相当する周波数 f_{12} からかなりずれた場合 ($f_1 - f_2 = f_{12} - \delta$ あるいは $f_1 - f_2 = f_{12} + \delta$ の場合)、図 7 (A) や図 7 (B) に示すように、光検出器 130 の検出信号には、直流成分と周波数 f_s の低周波数成分が含まれる。

10

【0066】

そこで、検波回路 170 は、例えば、図 8 に示すように構成することができる。すなわち、図 8 に示すように、光検出器 130 の出力信号と周波数発生源 172 が発生させる一定周波数 f_s の発振信号とをミキサー 174 で混合し、周波数 f_s が減衰域に含まれるローパスフィルタ 176 を通して電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 に出力する。検波回路 170 をこのような構成にすれば、ミキサー 174 の出力信号には、光検出器 130 の出力信号と周波数 f_s の発振信号との和信号と差信号が発生するので、光検出器 130 の出力信号に含まれる直流成分がミキサー 174 に入力されると、ミキサー 174 の出力には周波数 f_s の信号のみが発生するが、ローパスフィルタ 176 で除去される。また、光検出器 130 の出力信号が、図 6 (A) のような周波数 $2f_s$ の低周波成分を含む場合、この周波数 $2f_s$ の低周波成分がミキサー 174 に入力されると、ミキサー 174 の出力には周波数 $3f_s$ の信号と周波数 f_s の信号が発生するが、これらの信号もローパスフィルタ 176 で除去される。つまり、光検出器 130 の出力信号が図 6 (A) のような場合、検波回路 170 の出力信号の電圧値は 0 (基準電圧値) となる。この検波回路 170 の出力信号が電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 に入力されるため、電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 の発振周波数は変化しない。

20

【0067】

これに対して、光検出器 130 の出力信号が、図 6 (B) のような周波数 $2f_s$ の低周波成分を含む場合、この周波数 $2f_s$ の低周波成分がミキサー 174 に入力されると、ミキサー 174 の出力には周波数 $3f_s$ の信号と周波数 f_s の信号が発生するが、これらの信号はローパスフィルタ 176 で除去される。ところが、この $2f_s$ の低周波成分は振幅が 2 周期 ($1/f_s$) 毎に同じ振幅になるので、光検出器 130 の出力信号には、周波数 f_s の低周波成分もわずかに含まれる。この周波数 f_s の低周波成分がミキサー 174 に入力されると、ミキサー 174 の出力には周波数 $2f_s$ の信号と正電圧の直流信号が発生する。周波数 $2f_s$ の信号はローパスフィルタ 176 で除去されるが、正電圧の直流信号は除去されずに残る。つまり、光検出器 130 の出力信号が図 6 (B) のような場合、検波回路 170 の出力信号の電圧値は正 (基準電圧値よりも高い電圧値) となる。この検波回路 170 の出力信号が電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 に入力されると、電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 の発振周波数は高い方に变化する。

30

【0068】

また、光検出器 130 の出力信号が、図 7 (A) のような周波数 f_s の低周波成分を含む場合、この周波数 f_s の低周波成分がミキサー 174 に入力されると、ミキサー 174 の出力には周波数 $2f_s$ の信号と正電圧の直流信号が発生する。周波数 $2f_s$ の信号はローパスフィルタ 176 で除去されるが、正電圧の直流信号は除去されずに残る。つまり、光検出器 130 の出力信号が図 7 (A) のような場合、検波回路 170 の出力信号の電圧値は正 (基準電圧値よりも高い電圧値) となる。この検波回路 170 の出力信号が電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 に入力されると、電圧制御水晶発振器 (VCO) 180 の発振周波数は高い方に变化する。

40

【0069】

同様に、光検出器 130 の出力信号が、図 7 (B) のような周波数 f_s の低周波成分を

50

含む場合、この周波数 f_s の低周波成分がミキサー 174 に入力されると、ミキサー 174 の出力には周波数 $2f_s$ の信号と負電圧の直流信号が発生する。周波数 $2f_s$ の信号はローパスフィルタ 176 で除去されるが、負電圧の直流信号は除去されずに残る。つまり、光検出器 130 の出力信号が図 7 (B) のような場合、検波回路 170 の出力信号の電圧値は負（基準電圧値よりも低い電圧値）となる。この検波回路 170 の出力信号が電圧制御水晶発振器（VCO）180 に入力されると、電圧制御水晶発振器（VCO）180 の発振周波数は低い方に变化する。

【0070】

このように、検波回路 170 の出力信号の電圧値に応じて、電圧制御水晶発振器（VCO）180 の発振周波数を変化させることで、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2$ が E_{12} に相当する周波数 f_{12} と一致するように（周波数変換回路 120 の周波数 f_m が E_{12} に相当する周波数 f_{12} の $1/2$ の周波数と一致するように）、フィードバック制御することができる。ただし、図 6 (A)、図 6 (B)、図 7 (A)、図 7 (B) では、ガスセル 120 の透過光の EIT 信号が左右対称であることを前提としており、その結果、光検出器 130 の検出信号の強度も、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2 = f_{12}$ を中心として左右対称になっている。そのため、光検出器 130 の検出信号の強度がピークとなるようにフィードバック制御がかかり、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2$ が E_{12} に相当する周波数 f_{12} と一致する状態で安定する。

【0071】

一方、EIT 信号が左右非対称の場合、光検出器 130 の検出信号の強度も、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2 = f_{12}$ を中心として左右非対称になる。そのため、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2 = f_{12}$ である場合、図 9 (A) に示すように、光検出器 130 の検出信号に含まれる周波数 $2f_s$ の低周波成分の振幅は一定にならず、1 周期毎に振幅が変化し、2 周期（ $1/f_s$ ）毎に同じ振幅になる。従って、この周波数 $2f_s$ の低周波成分が検波回路 170 に入力されると、図 6 (B) の場合と同様に、検波回路 170 の出力信号の電圧値は正（基準電圧値よりも高い電圧値）となる。この検波回路 170 の出力信号が電圧制御水晶発振器（VCO）180 に入力されると、電圧制御水晶発振器（VCO）180 の発振周波数は高い方に变化する。

【0072】

これに対して、図 9 (B) に示すように、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2$ が f_{12} から少しだけずれた状態（ $f_1 - f_2 = f_{12} + \Delta$ ）で、光検出器 130 の検出信号に含まれる周波数 $2f_s$ の低周波成分の振幅が一定になる。従って、この周波数 $2f_s$ の低周波成分が検波回路 170 に入力されると、図 6 (A) の場合と同様に、検波回路 170 の出力信号の電圧値は 0（基準電圧値）となる。この検波回路 170 の出力信号が電圧制御水晶発振器（VCO）180 に入力されるため、電圧制御水晶発振器（VCO）180 の発振周波数は変化しない。従って、 $f_1 - f_2 = f_{12} + \Delta$ となるように（周波数変換回路 120 の周波数 $f_m = (f_{12} + \Delta) / 2$ となるように）、フィードバック制御がかかる。

【0073】

このように、EIT 信号が左右非対称であれば、光検出器 130 の検出信号の強度も、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2 = f_{12}$ を中心として左右非対称になるので、光検出器 130 の検出信号の強度がピークから少しずれた値となるようにフィードバック制御がかかり、共鳴光対の周波数差 $f_1 - f_2$ が E_{12} に相当する周波数 f_{12} から少しずれた周波数と一致する状態で安定する。このような周波数がずれた状態でも高い周波数安定度を確保することはできる。

【0074】

ところで、ガスセル 120 の温度が不安定になる等の要因で EIT 信号のピーク値（強度）が変化し、これに応じて EIT 信号の線幅が変化することが考えられる。例えば、図 9 (B) の状態（ $f_1 - f_2 = f_{12} + \Delta$ ）で電圧制御水晶発振器（VCO）180 の発振周波数が安定している場合に、EIT 信号のピーク値（強度）が低下して図 10 の

10

20

30

40

50

ように線幅が広がった場合、 $f_1 - f_2 = f_{12} + f_4$ の状態、光検出器130の検出信号に含まれる周波数 $2f_s$ の低周波数成分の振幅が一定になり、電圧制御水晶発振器(VCXO)180の発振周波数が安定する。図9(B)の例と図10の例を比較すると、 $f_4 > f_3$ であり、EIT信号のピーク値(強度)が低下すると電圧制御水晶発振器(VCXO)180の発振周波数が高い方向にシフトしている。従って、EIT信号が左右非対称の場合、EIT信号のピーク値(強度)が変化することで線幅が変化すると、周波数安定度が劣化する可能性がある。

【0075】

従って、EIT信号が左右非対称の場合、EIT信号のピーク値(強度)が変化することで線幅が変化しても、電圧制御水晶発振器(VCXO)180の発振周波数が変化しないように、何らかの対策を考える必要がある。そこで、左右非対称なEIT信号をモデル化し、EIT信号のピーク値(強度)を変化させて、電圧制御水晶発振器(VCXO)180が安定発振する時の周波数変換回路220の出力信号の周波数(ロック周波数 f_{lock})の変化の様子をシミュレーションで確認した。図11は、左右非対称なEIT信号のモデルをグラフ化した図であり、図12は、シミュレーション結果を示す図である。図11の各軸の単位は任意単位であり、横軸は $(f_1 - f_2) - f_{12}$ の値、縦軸はガスセル120の透過光の強度である。また、図12の各軸の単位は任意単位であり、横軸はEIT信号強度、縦軸はロック周波数 f_{lock} である。図12に示す4つのグラフG1, G2, G3, G4は、それぞれ、EIT信号強度の変化に伴うEIT信号の線幅変化の度合い(BF: Broadening Factor)が0, 0.5, 1.0, 2.0のモデルに対するシミュレーション結果である。なお、BF=0は、EIT信号強度の変化に伴ってEIT信号の線幅変化が起きないモデルである。図12のシミュレーション結果によれば、ロック周波数 f_{lock} は、EIT信号強度の増加に対して線形に減少する。

【0076】

また、EIT信号が左右非対称の場合、低周波発振器200の発振信号の振幅 A_s (周波数変調回路190の周波数変調における最大周波数偏移(周波数デビエーション) f)を変えると、上述した同期検波の原理より、検波回路170の出力信号に含まれる周波数 f_s あるいは $2f_s$ の信号波形が変化し、ロック周波数 f_{lock} が変化すると考えられる。そこで、図11に示した左右非対称なEIT信号のモデルに対して、EIT信号の強度は一定のまま、最大周波数偏移(周波数デビエーション) f を変化させて、ロック周波数 f_{lock} の変化の様子をシミュレーションで確認した。図13は、シミュレーション結果を示す図である。図13の各軸の単位は任意単位であり、横軸はロック周波数 f_{lock} 、縦軸は最大周波数偏移(周波数デビエーション) f である。図13のシミュレーション結果によれば、ロック周波数 f_{lock} は、最大周波数偏移(周波数デビエーション) f の増加に対して単調増加する。

【0077】

図12のシミュレーション結果と図13のシミュレーション結果より、EIT信号の強度が変化しても、その変化の程度に応じて、最大周波数偏移(周波数デビエーション) f を適切に変化させることで、ロック周波数 f_{lock} を一定に維持することができると考えられる。特に、EIT信号の非線形性の状態によっては、EIT信号の強度の変化に応じて、最大周波数偏移(周波数デビエーション) f を最適に変化させることで、ロック周波数 f_{lock} を $f_{12}/2$ からのずれがない状態(EIT信号のピークを検出する状態)で一定に維持することができる場合もあると考えられる。図14は、ロック周波数 f_{lock} を $f_{12}/2$ からのずれがない状態で一定に維持するための、最大周波数偏移(周波数デビエーション) f とEIT信号強度との関係をシミュレーションにより求めた結果を示す図である。図14のシミュレーション結果によれば、最大周波数偏移(周波数デビエーション) f を、EIT信号強度の増加に対してほぼ線形に増加させることで、ロック周波数 f_{lock} を一定に維持することができる。

【0078】

周波数変調回路190の周波数変調における最大周波数偏移(周波数デビエーション)

10

20

30

40

50

f は、低周波発振器 200 の発振信号の振幅 A_s に比例するので、低周波発振器 200 の発振信号の振幅を変えることで、最大周波数偏移（周波数デビエーション） f を変えることができる。また、EIT 信号強度の変化は、光検出器 130 の検出信号（直流成分）のレベルの変化として現れる。従って、光検出器 130 の検出信号のレベルに応じて、図 14 に示したような所定の対応関係に従って低周波発振器 200 の発振信号の振幅を変化させることで、ロック周波数 f_{locked} を一定に維持することができると考えられる。

【0079】

そこで、本実施形態の原子発振器 1 では、振幅制御回路 210 を追加し、振幅制御回路 210 により、光検出器 130 の検出信号のレベルに応じて、所定の対応関係に従って低周波発振器 200 の発振信号の振幅を制御している。例えば、サンプル評価などで得られる実際の EIT 信号に合致したモデルを作成して上述の各種シミュレーションを行い、EIT 信号強度を変数として、多項式近似により、ロック周波数 f_{locked} を一定に維持するための最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の式を求める。そして、振幅制御回路 210 は、この最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の式に従うように、低周波発振器 200 の発振信号の振幅を制御する。

【0080】

なお、振幅制御回路 210 は、光検出器 130 の検出信号のレベルに応じて可変利得増幅器の利得を変えることで低周波発振器 200 の発振信号の振幅を制御するようにしてもよいし、光検出器 130 の検出信号のレベルに応じて可変アッテネーターの減衰量を変えることで低周波発振器 200 の発振信号の振幅を制御するようにしてもよい。

【0081】

このように、本実施形態の原子発振器によれば、振幅制御回路 210 を設けることで、EIT 信号強度の変化によるロック周波数の変動分を、最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の変化によるロック周波数の変動分で打ち消すことができるので、EIT 信号強度が変化してもロック周波数を一定に保持することができる。従って、従来よりも高い周波数安定度の原子発振器を実現することができる。特に、ロック周波数 $f_{locked} = f_{12} / 2$ に維持するような最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の多項式が得られる場合は、従来よりも高い周波数精度と周波数安定度の原子発振器を実現することができる。

【0082】

2-2. 第 2 実施形態

第 1 実施形態の原子発振器では、最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の式が不変としていたが、製造条件のばらつき等に起因してサンプル間で EIT 信号の特性が異なることが想定される。そこで、第 2 実施形態の原子発振器では、各サンプルの EIT 信号の特性に応じて最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の式を補正する。

【0083】

図 15 は、第 2 実施形態の原子発振器の構成例を示す図である。図 15 に示すように、第 2 実施形態の原子発振器 1 では、図 3 に示した第 1 実施形態の原子発振器 1 に対して、補正回路 230 が追加されている。なお、第 2 実施形態におけるその他の構成は、第 1 実施形態と同じであるため同じ符号を付しており、その説明を省略する。

【0084】

補正回路 230 は、振幅制御回路 210 による低周波発振器 200 の発振信号の振幅制御に用いられる最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の式を補正する。例えば、設計段階では、多項式近似により、最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の式（多項式）を求めて、振幅制御回路 210 が当該多項式に従って低周波発振器 200 の発振信号の振幅を制御するように設計しておく。そして、各サンプルの検査時などに、実際の EIT 信号の特性を評価し、最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の正しい式を求める。補正回路 230 には、この最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の正しい式の情報を記憶させ、振幅制御回路 210 は、最大周波数偏移（周波数デビエーション

） f の正しい式に従って、低周波発振器 200 の発振信号の振幅を制御する。例えば、書き込みが可能な不揮発性のメモリーに、最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の正しい式（多項式）の各係数値、あるいは最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の正しい式（多項式）の各係数値と設計段階の式（多項式）の各係数値との差分を書き込むことで、補正回路 230 を構成することができる。前者の場合、振幅制御回路 210 は、不揮発性のメモリーに書き込まれた各係数値の多項式に従って、低周波発振器 200 の発振信号の振幅を制御する。後者の場合、振幅制御回路 210 は、不揮発性のメモリーに書き込まれた各係数値の差分から正しい係数値を求めて、当該正しい係数値の多項式に従って、低周波発振器 200 の発振信号の振幅を制御する。

【0085】

10

第2実施形態におけるその他の構成は、第1実施形態と同じであるため同じ符号を付しており、その説明を省略する。

【0086】

なお、図15の半導体レーザー110、ガスセル120に含まれるアルカリ金属原子、光検出器130、検波回路170は、それぞれ図1の光発生部10、金属原子20、光検出部30、周波数制御部50に相当する。また、図15の振幅制御回路210と補正回路230による構成は、図1の最大周波数偏移制御部60に相当する。また、図15の電圧制御水晶発振器（VCXO）180、周波数変調回路190、低周波発振器200、周波数変換回路220による構成は、図1の制御信号生成部40に相当する。また、図15の電圧制御水晶発振器（VCXO）180、低周波発振器200、周波数変調回路190、周波数変換回路220は、それぞれ図1の発振信号生成部42、変調信号生成部44、周波数変調部46、周波数変換部48に相当する。

20

【0087】

この第2実施形態の原子発振器によれば、サンプル毎に適切な最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の式を不揮発性のメモリーに記憶させておくことで、サンプル間のEIT信号の特性ばらつきを吸収することができるので、サンプルに依存せずに高い周波数安定度を確保できる。

【0088】

2-3. 第3実施形態

第2実施形態の原子発振器では、補正回路230を設けたことでサンプル間のEIT信号の特性ばらつき（初期ばらつき）を吸収することができる。しかし、経年変化により、EIT信号の特性が変わると、これに応じて最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の正しい式も変わるので、第2実施形態の原子発振器では、時間の経過とともに、低周波発振器200の発振信号の振幅制御の精度が低下することが考えられる。そこで、第3実施形態の原子発振器では、最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の式を書き換え可能に構成する。

30

【0089】

図16は、第3実施形態の原子発振器の構成例を示す図である。図16に示すように、第3実施形態の原子発振器1では、図15に示した第2実施形態の原子発振器1に対して、設定変更回路240が追加されている。

40

【0090】

設定変更回路240は、振幅制御回路210による低周波発振器200の発振信号の振幅制御に用いられる最大周波数偏移（周波数デビエーション） f の式（具体的には各係数値）を書き換える。例えば、補正回路230の不揮発性メモリーを外部から書き換え可能にするインターフェース回路として構成される。設定変更回路240は、例えば、外部からクロック信号とシリアルデータ信号が入力され、書き込みアドレス、書き込みデータ（各係数値）、書き込み信号などを生成して不揮発性メモリーに出力する。

【0091】

第3実施形態におけるその他の構成は、第1実施形態及び第2実施形態と同じであるため同じ符号を付しており、その説明を省略する。

50

【 0 0 9 2 】

なお、図 1 6 の半導体レーザー 1 1 0、ガスセル 1 2 0 に含まれるアルカリ金属原子、光検出器 1 3 0、検波回路 1 7 0、設定変更回路 2 4 0 は、それぞれ図 2 の光発生部 1 0、金属原子 2 0、光検出部 3 0、周波数制御部 5 0、最大周波数偏移情報変更部 7 0 に相当する。また、図 1 6 の振幅制御回路 2 1 0 と補正回路 2 3 0 による構成は、図 2 の最大周波数偏移制御部 6 0 に相当する。また、図 1 6 の電圧制御水晶発振器 (V C X O) 1 8 0、周波数変調回路 1 9 0、低周波発振器 2 0 0、周波数変換回路 2 2 0 による構成は、図 2 の制御信号生成部 4 0 に相当する。また、図 1 6 の電圧制御水晶発振器 (V C X O) 1 8 0、低周波発振器 2 0 0、周波数変調回路 1 9 0、周波数変換回路 2 2 0 は、それぞれ図 2 の発振信号生成部 4 2、変調信号生成部 4 4、周波数変調部 4 6、周波数変換部 4 8 に相当する。

10

【 0 0 9 3 】

この第 3 実施形態の原子発振器によれば、経年変化により E I T 信号の特性が変わっても、あらかじめ最大周波数偏移 (周波数デビエーション) f の式を求めて不揮発性メモリーに記憶されている情報を更新することで、長期間にわたって高い周波数安定度を維持することができる。例えば、メンテナンスの際に E I T 信号の特性を評価して最大周波数偏移 (周波数デビエーション) f の式の各係数値を求めて、不揮発性メモリーに記憶されている各係数値を更新すればよい。

【 0 0 9 4 】

3 . 変形例

20

本発明は本実施形態に限定されず、本発明の要旨の範囲内で種々の変形実施が可能である。

【 0 0 9 5 】

3 - 1 . 変形例 1

例えば、本実施形態の原子発振器 1 において、半導体レーザー 1 1 0 の中心波長 λ_0 (中心周波数 f_0) が、ガスセル 1 2 0 に封入されたアルカリ金属原子の $^2P_{1/2}$ の $I - 1/2$ の励起準位 ($I + 1/2$ の励起準位でもよい) と $^2S_{1/2}$ の $I + 1/2$ の基底準位とのエネルギー差に相当する波長 λ_2 (周波数 f_2) にほぼ一致するように電流駆動回路 1 5 0 による駆動電流を制御するとともに、周波数変換回路 2 2 0 が変調回路 1 9 0 の出力信号を $E_{1/2}$ に相当する周波数に等しい周波数の信号に変換するように変形してもよい。あるいは、本実施形態の原子発振器 1 において、半導体レーザー 1 1 0 の中心波長 λ_0 (中心周波数 f_0) が、ガスセル 1 2 0 に封入されたアルカリ金属原子の $^2P_{1/2}$ の $I - 1/2$ の励起準位 ($I + 1/2$ の励起準位でもよい) と $^2S_{1/2}$ の $I - 1/2$ の基底準位とのエネルギー差に相当する波長 λ_1 (周波数 f_1) にほぼ一致するように電流駆動回路 1 5 0 による駆動電流を制御するとともに、周波数変換回路 2 2 0 が変調回路 1 9 0 の出力信号を $E_{1/2}$ に相当する周波数に等しい周波数の信号に変換するように変形してもよい。前者のケースでは中心波長 λ_0 が λ_2 に一致する (中心周波数 f_0 が f_2 に一致する) ように制御され、後者のケースでは中心波長 λ_0 が λ_1 に一致する (中心周波数 f_0 が f_1 に一致する) ように制御される。

30

【 0 0 9 6 】

40

図 1 7 (A) は、前者のケースの半導体レーザー 1 1 0 の出射光の周波数スペクトルを示す概略図であり、図 1 7 (B) は、後者のケースの半導体レーザー 1 1 0 の出射光の周波数スペクトルを示す概略図である。図 1 7 (A) 及び図 1 7 (B) において、横軸は光の周波数であり、縦軸は光の強度である。図 1 7 (A) の場合は、 f_1 と f_0 の差 $f_1 - f_0$ が $E_{1/2}$ に相当する周波数にほぼ等しいので、周波数 f_1 の光と中心周波数 f_0 の光がガスセル 1 2 0 に封入されたアルカリ金属原子に E I T 現象を起こさせる共鳴光対となる。一方、図 1 7 (B) の場合は、 f_0 と f_2 の差 $f_0 - f_2$ が $E_{1/2}$ に相当する周波数にほぼ等しいので、中心周波数 f_0 の光と周波数 f_2 の光がガスセル 1 2 0 に封入されたアルカリ金属原子に E I T 現象を起こさせる共鳴光対となる。

【 0 0 9 7 】

50

3 - 2 . 変形例 2

また、例えば、図 1 8 に示すように、図 3 に示した第 1 実施形態の原子発振器 1 を電気光学変調器 (E O M : Electro-Optic Modulator) を用いた構成に変形してもよい。図 1 8 において、図 1 と同じ構成には同じ符号を付しており、その説明を省略する。

【 0 0 9 8 】

図 1 8 に示す原子発振器 1 では、半導体レーザー 1 1 0 は、周波数変換回路 2 2 0 の出力信号 (変調信号) による変調がかけられず、単一周波数 f_0 の光を発生させる。この周波数 f_0 の光は、電気光学変調器 (E O M) 2 5 0 に入射し、周波数変換回路 2 2 0 の出力信号 (変調信号) によって変調がかけられる。その結果、図 4 と同様の周波数スペクトルを有する光を発生させることができる。図 1 8 の原子発振器 1 では、半導体レーザー 1 1 0 と電気光学変調器 (E O M) 2 5 0 による構成が図 1 の光発生部 1 0 に相当する。

【 0 0 9 9 】

なお、電気光学変調器 (E O M) 2 5 0 の代わりに、音響光学変調器 (A O M : Acousto-Optic Modulator) を用いてもよい。

【 0 1 0 0 】

同様に、第 2 実施形態や第 3 実施形態の原子発振器を電気光学変調器 (E O M) や音響光学変調器 (A O M) を用いた構成に変形してもよい。

【 0 1 0 1 】

なお、本実施形態及び本変形例では原子発振器を例に挙げて説明したが、本発明は、原子発振器に限らず、共鳴光対によって金属原子に電磁誘起透過現象を発生させる様々な量子干渉装置に適用することができる。

【 0 1 0 2 】

例えば、本実施形態又は変形例の原子発振器と同様の構成により、ガスセル 1 2 0 の周辺の磁場の変化に追従して電圧制御水晶発振器 (V C X O) 1 8 0 の発振周波数が変化するため、ガスセル 1 2 0 の近傍に磁気測定対象物を配置することで磁気センサーとして機能する量子干渉装置を実現することもできる。

【 0 1 0 3 】

また、例えば、本実施形態又は変形例の原子発振器と同様の構成により、極めて安定した金属原子の量子干渉状態 (量子コヒーレンス状態) を作り出すことができるので、ガスセル 1 2 0 に入射する共鳴光対を取り出すことで、量子コンピュータ等に用いる光源として機能する量子干渉装置を実現することもできる。

【 0 1 0 4 】

また、例えば、本実施形態又は変形例の原子発振器と同様の構成により、半導体レーザー 1 1 0 とガスセル 1 2 0 の間の空間に微粒子が存在すると共鳴光対の可干渉性が低下して E I T 信号の強度が低下するため、E I T 信号のプロファイルを解析することで、微粒子センサーとして機能する量子干渉装置を実現することもできる。

【 0 1 0 5 】

本発明は、実施の形態で説明した構成と実質的に同一の構成 (例えば、機能、方法及び結果が同一の構成、あるいは目的及び効果が同一の構成) を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成の本質的でない部分を置き換えた構成を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成と同一の作用効果を奏する構成又は同一の目的を達成することができる構成を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成に公知技術を付加した構成を含む。

【 符号の説明 】

【 0 1 0 6 】

1 量子干渉装置、1 a 原子発振器、1 0 光発生部、1 2 制御信号、2 0 金属原子、3 0 光検出部、4 0 制御信号生成部、4 2 発振信号生成部、4 3 発振信号、4 4 変調信号生成部、4 5 変調信号、4 6 周波数変調部、4 8 周波数変換部、5 0 周波数制御部、6 0 最大周波数偏移制御部、7 0 最大周波数偏移情報変更部、1 1 0 半導体レーザー、1 2 0 ガスセル、1 3 0 光検出器、1 4 0 検波回路、1 5

10

20

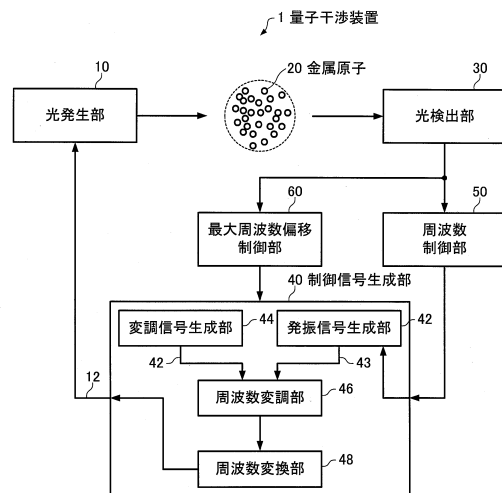
30

40

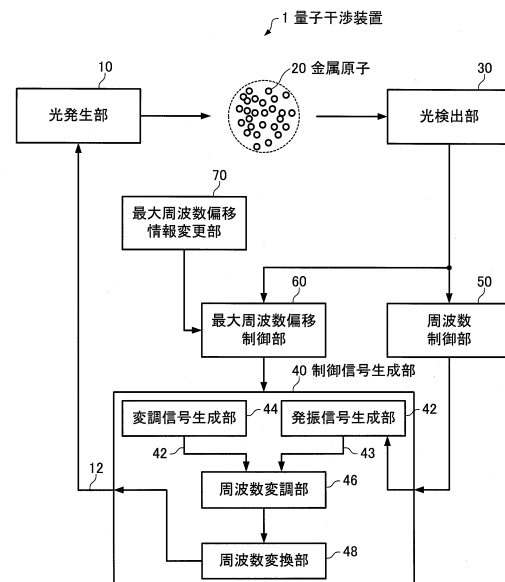
50

0 電流駆動回路、160 低周波発振器、170 検波回路、172 周波数発生源、174 ミキサー、176 ローパスフィルター、180 電圧制御水晶発振器（VCXO）、190 周波数変調回路、200 低周波発振器、210 振幅制御回路、220 周波数変換回路、230 補正回路、240 設定変更回路、250 電気光学変調器（EOM）

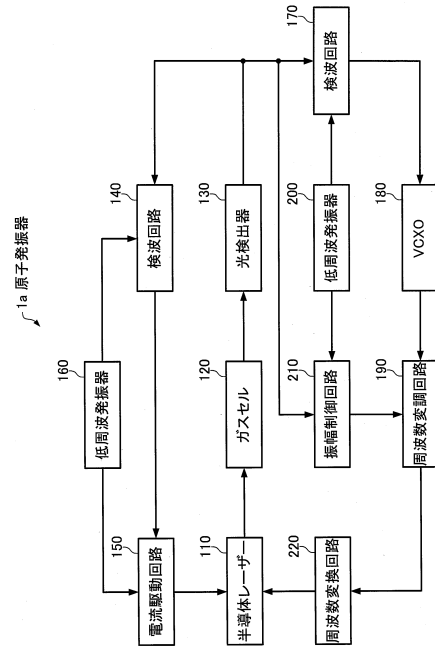
【図1】



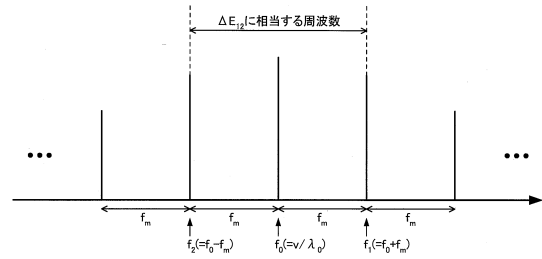
【図2】



【図 3】

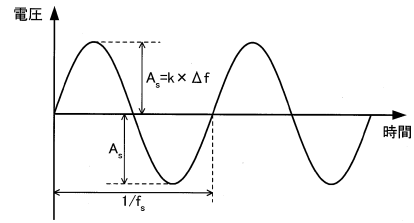


【図 4】

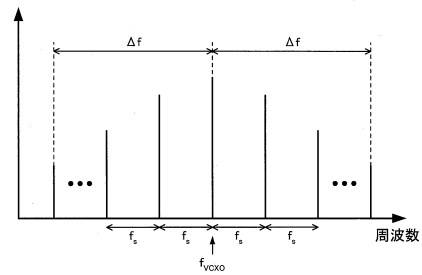


【図 5】

(A)

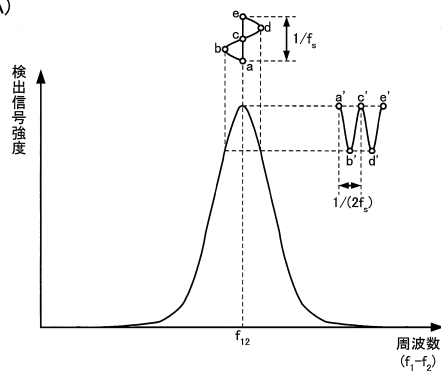


(B)

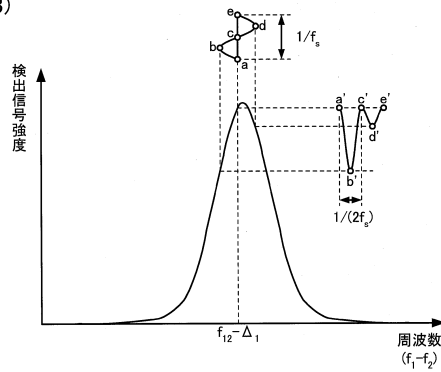


【図 6】

(A)

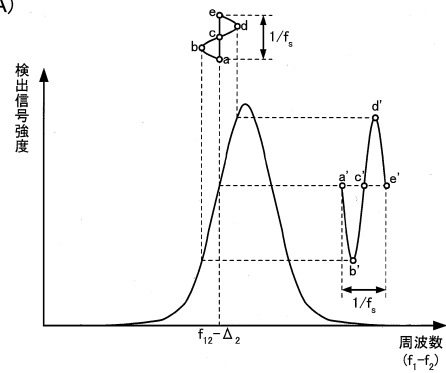


(B)

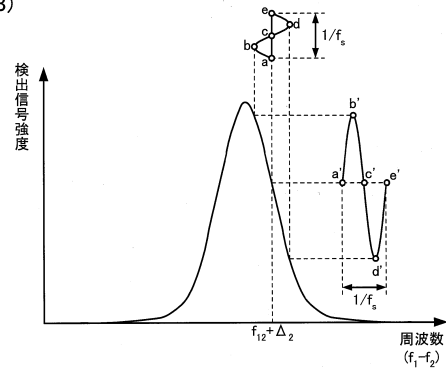


【図 7】

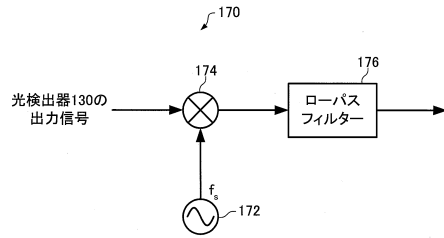
(A)



(B)

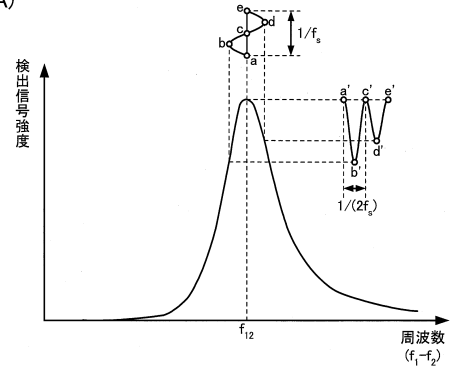


【図 8】

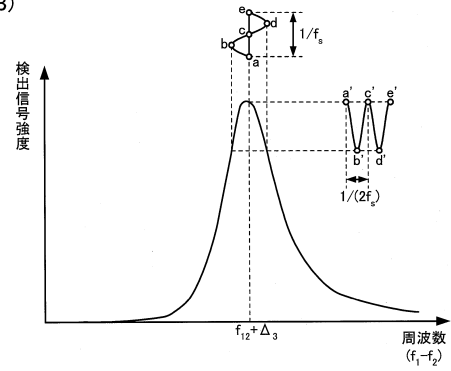


【図 9】

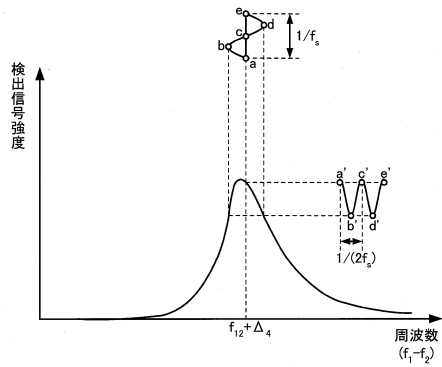
(A)



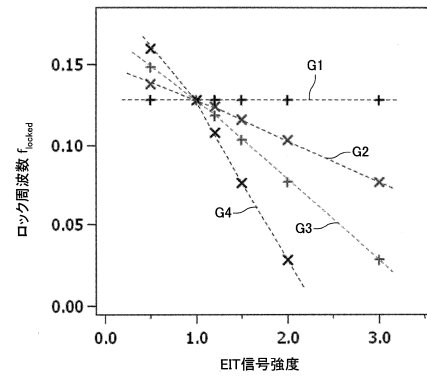
(B)



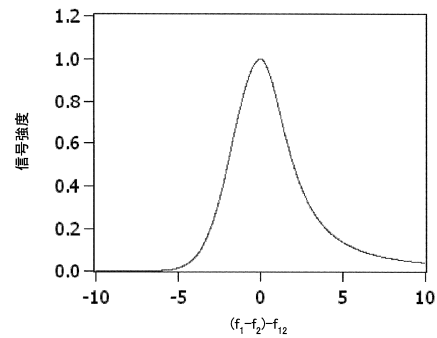
【図 10】



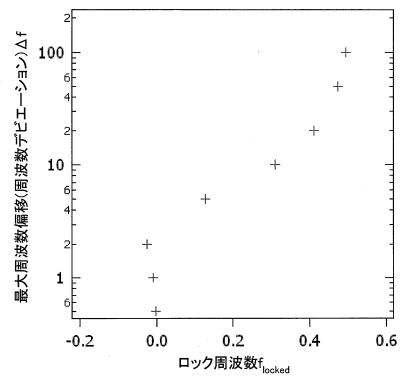
【図 12】



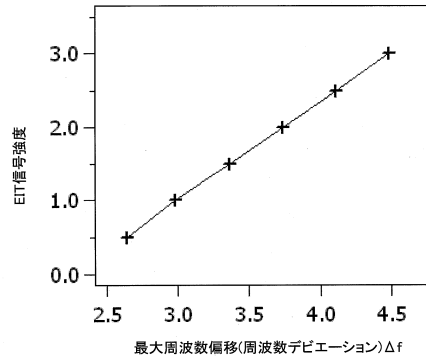
【図 11】



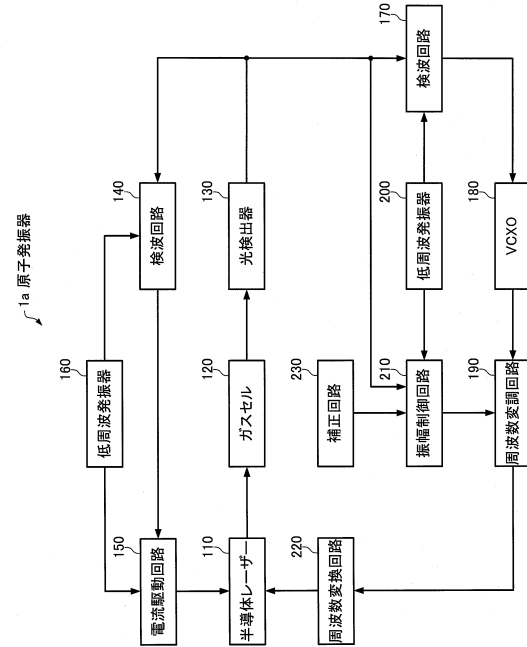
【図 13】



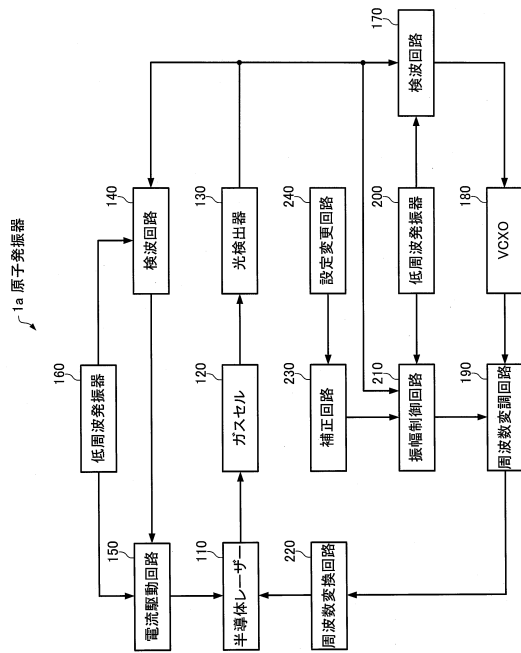
【図 14】



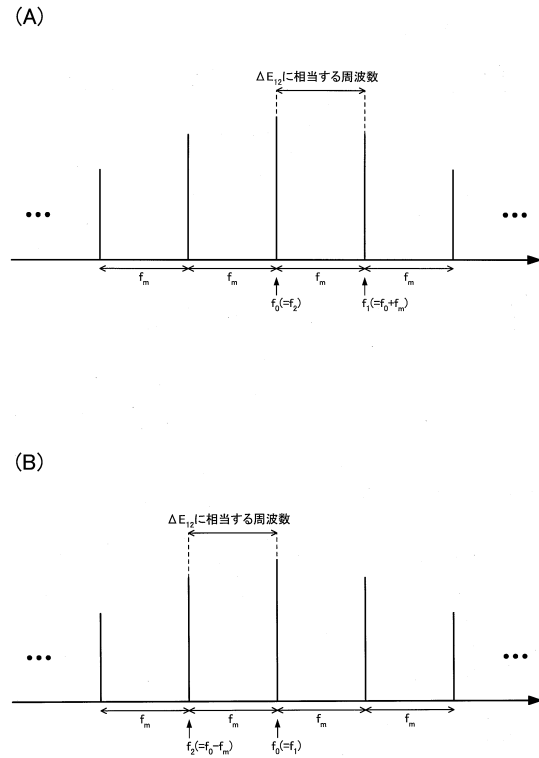
【図 15】



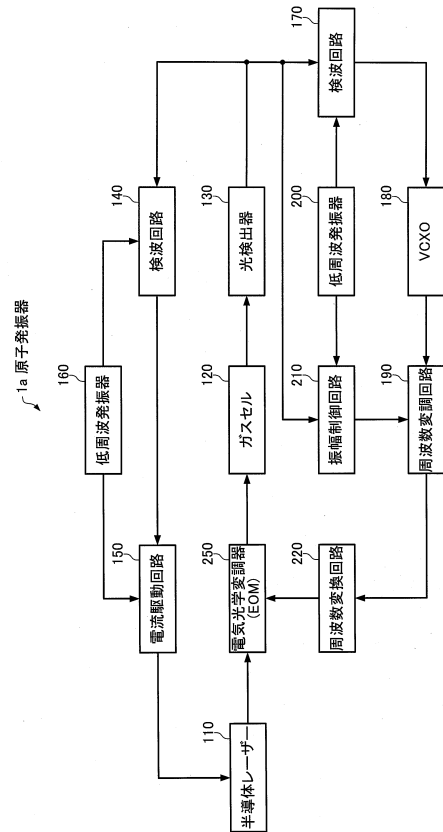
【図 16】



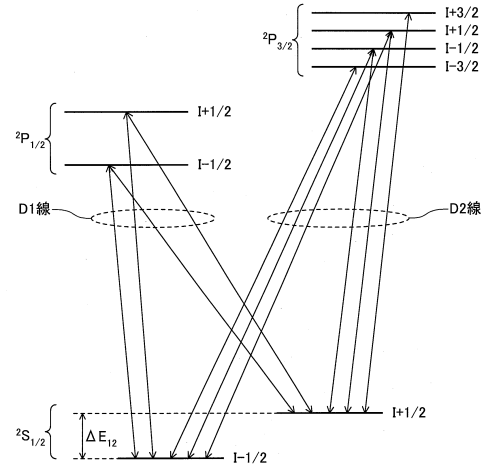
【図 17】



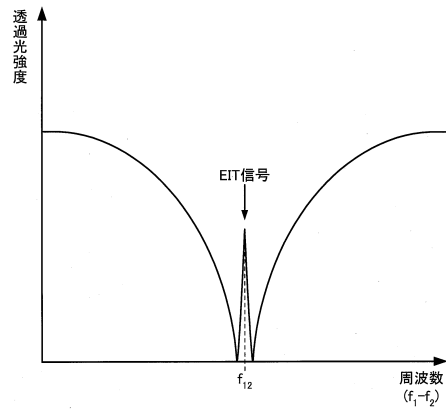
【図 18】



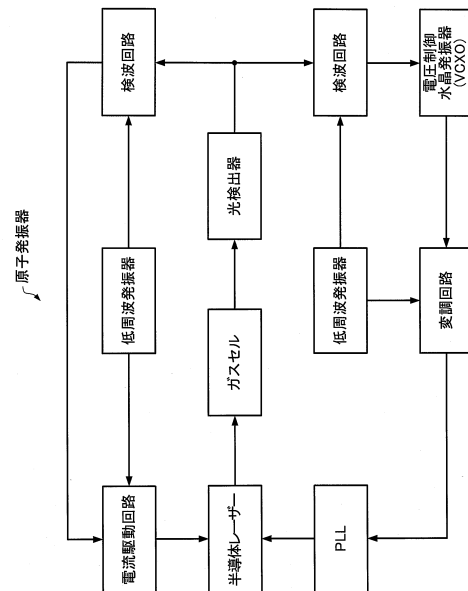
【図 19】



【図 20】



【図 21】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2005-265836(JP,A)
米国特許出願公開第2008/0317075(US,A1)
特開2010-226282(JP,A)
特開2010-206160(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H03L 7/26
H01S 1/06