

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5381400号
(P5381400)

(45) 発行日 平成26年1月8日(2014.1.8)

(24) 登録日 平成25年10月11日(2013.10.11)

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

請求項の数 12 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2009-153402 (P2009-153402)	(73) 特許権者	000002369
(22) 出願日	平成21年6月29日 (2009.6.29)		セイコーエプソン株式会社
(65) 公開番号	特開2010-206767 (P2010-206767A)		東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
(43) 公開日	平成22年9月16日 (2010.9.16)	(74) 代理人	100091292
審査請求日	平成24年6月8日 (2012.6.8)		弁理士 増田 達哉
(31) 優先権主張番号	特願2009-25652 (P2009-25652)	(74) 代理人	100091627
(32) 優先日	平成21年2月6日 (2009.2.6)		弁理士 朝比 一夫
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(74) 代理人	100095728
			弁理士 上柳 雅誉
		(74) 代理人	100107261
			弁理士 須澤 修
		(74) 代理人	100127661
			弁理士 宮坂 一彦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子干渉装置、原子発振器、および磁気センサー

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

エネルギー準位が異なる2つの基底準位を持った気体状のアルカリ金属原子に中心周波数が異なる複数の共鳴光対を入射し、前記複数の共鳴光対の前記中心周波数同士の周波数差が前記アルカリ金属原子の速度分散に対応したドップラー幅よりも小さく、かつ、前記共鳴光対をなす2つの共鳴光の周波数差に基づくエネルギー差が前記2つの基底準位間のエネルギー差と一致しており、前記アルカリ金属原子に電磁誘起透過現象を発生させることを特徴とする、量子干渉装置。

【請求項2】

速度成分の異なる複数の前記アルカリ金属原子に電磁誘起透過現象を発生させることを特徴とする、請求項1に記載の量子干渉装置。

10

【請求項3】

前記アルカリ金属原子の速度に起因するドップラー効果を利用して、電磁誘起透過現象に寄与する前記アルカリ金属原子の数を増大させることを特徴とする、請求項2に記載の量子干渉装置。

【請求項4】

光源と、

前記光源から入射された光を第1の発振信号及び第2の発振信号に基づき変調し、前記複数の共鳴光対を含む光を出射する変調手段と、を備えることを特徴とする請求項1乃至3のいずれか一項に記載の量子干渉装置。

20

【請求項 5】

前記変調手段は、

前記第 1 の発振信号に基づき入射された光を変調して出射する第 1 の電気光学変調素子、及び前記第 2 の発振信号に基づき入射された光を変調して出射する第 2 の電気光学変調素子を有し、前記第 1 の電気光学変調素子と前記第 2 の電気光学変調素子が直列に接続されている構成を備えることを特徴とする請求項 4 に記載の量子干渉装置。

【請求項 6】

前記変調手段は、

前記第 1 の発振信号及び前記第 2 の発振信号を混合する混合手段と、

前記混合手段の出力信号に基づき前記光源から入射された前記光を変調して出射する電気光学変調素子と、を備えることを特徴とする請求項 4 に記載の量子干渉装置。

10

【請求項 7】

第 1 の発振信号及び第 2 の発振信号を混合した信号に基づき変調された光を出射する光源を備え、

前記光源から出射された前記光が前記複数の共鳴光対を含む光であることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか一項に記載の量子干渉装置。

【請求項 8】

前記第 1 の発振信号の周波数を f_1 、前記第 2 の発振信号の周波数を f_2 、及び前記光源から出射される光の周波数または中心周波数を f_0 としたとき、

前記複数の共鳴光対を含む光は、

周波数が $f_0 - f_2 - f_1$ の第 1 の共鳴光、周波数が $f_0 - f_2$ の第 2 の共鳴光、周波数が $f_0 - f_2 + f_1$ の第 3 の共鳴光、周波数が $f_0 - f_1$ の第 4 の共鳴光、周波数が f_0 の第 5 の共鳴光、周波数が $f_0 + f_1$ の第 6 の共鳴光、周波数が $f_0 + f_2 - f_1$ の第 7 の共鳴光、周波数が $f_0 + f_2$ の第 8 の共鳴光、及び周波数が $f_0 + f_2 + f_1$ の第 9 の共鳴光を含む光であることを特徴とする請求項 4 乃至 7 のいずれか一項に記載の量子干渉装置。

20

【請求項 9】

前記光源は直線偏光の光を出射するものであることを特徴とする請求項 4 乃至 8 のいずれか一項に記載の量子干渉装置。

【請求項 10】

前記複数の共鳴光対が波長板を通過して前記アルカリ金属原子に入射する構成を備え、前記波長板を通過した前記複数の共鳴光対は円偏光または楕円偏光の光であることを特徴とする請求項 9 に記載の量子干渉装置。

30

【請求項 11】

請求項 1 乃至 10 のいずれか一項に記載の量子干渉装置を備えたことを特徴とする原子発振器。

【請求項 12】

請求項 1 乃至 10 のいずれか一項に記載の量子干渉装置を備えたことを特徴とする磁気センサー。

【発明の詳細な説明】

40

【技術分野】

【0001】

本発明は、量子干渉装置、原子発振器、および磁気センサーに関し、さらに詳しくは、EIT現象を効率良く発生させるための技術に関するものである。

【背景技術】

【0002】

電磁誘起透過方式（EIT方式、CPT方式と呼ばれることもある）による原子発振器は、アルカリ金属原子に波長の異なる二つの共鳴光を同時に照射すると、二つの共鳴光の吸収が停止する現象（EIT現象）を利用した発振器である。図12（a）は一つのアルカリ金属原子のエネルギー状態を示したものである。第1基底準位23と励起準位21と

50

のエネルギー差に相当する波長を有する第1共鳴光、あるいは第2基底準位24と励起準位21とのエネルギー差に相当する波長を有する第2共鳴光を、それぞれ単独でアルカリ金属原子に照射すると、良く知られているように光吸収が起きる。ところが、このアルカリ金属原子に第1共鳴光と第2共鳴光を同時に照射し、同時に照射される第1共鳴光と第2共鳴光の周波数差が正確に第1基底準位23と第2基底準位24のエネルギー差 (E_{12}) に一致すると、図12(a)の系は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21への励起が停止し透明化 (EIT) 現象が起きる。この現象を利用し、第1共鳴光と第2共鳴光との波長差が E_{12} からずれた時の光吸収挙動の急峻な変化を検出、制御することで、高精度な発振器をつくることのできる。また、 E_{12} は外部磁気の強さやゆらぎで敏感に変化するので、EIT現象を利用して高感度な磁気センサーをつくることもできる。

10

【0003】

ところで、EIT現象による光出力信号のSN比を向上させるには、共鳴光と相互作用するアルカリ金属の原子数を増やしてやればよい。例えば、特許文献1では、原子発振器の出力信号のSN比を良くすることを目的として、気体状のアルカリ金属原子を閉じ込めたセルの厚みを大きくしたり、或いはセルに入射するレーザー光のビーム径を大きくするといった方法が開示されている。いずれの方法も、アルカリ金属原子が共鳴光に接触する領域を広くするために、図12(b)或いは図12(c)のようにセルの厚みか高さを大きくしている。ここで使用されているレーザー光については、EIT現象の発現条件を満たす2種類の波長のレーザー光を一对のみ用いている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2004-96410公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

セル内の気体状のアルカリ金属原子の集団を構成する個々の原子に着目すると、それぞれの運動状態に応じた一定の速度分布を持っている。この原子集団に対して入射されるレーザー光の波長が2種類(一对)のみだと、原子の運動によるドップラー効果(ドップラーシフト)の影響で、実際に相互作用できるのは、セル内の多数の原子の内、レーザー入射方向に対する特定の速度成分の値を持ったごく一部の原子に限られてしまい、EIT発現に寄与する原子の割合が極めて低い。特許文献1に開示されている従来技術は、このようなEIT発現効率が低い状態で構成された原子発振器であるので、信号対雑音比(S/N比)の大きい所望の吸収スペクトルを得るには、セルの厚みか或いは高さの何れかを大きくしなければならず、信号対雑音比を維持しながら小型化することは困難であるという課題があった。つまり、セル内の単位体積あたりでEIT現象に寄与する原子数に変わりはないままである。本発明は、かかる課題に鑑みてなされたものであり、波長が異なる複数の共鳴光対を生成することにより、セル内のより多くの気体状のアルカリ金属原子に対してEIT現象を効率よく発生させる量子干渉装置を提供し、これを利用することで小型

30

40

【課題を解決するための手段】

【0006】

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。

【0007】

[適用例1] 本発明の量子干渉装置は、エネルギー準位が異なる2つの基底準位を持った気体状のアルカリ金属原子に中心周波数が異なる複数の共鳴光対を入射し、前記複数の共鳴光対の前記中心周波数同士の周波数差が前記アルカリ金属原子の速度分散に対応したドップラー幅よりも小さく、かつ、前記共鳴光対をなす2つの共鳴光の周波数差に基づ

50

くエネルギー差が前記2つの基底準位間のエネルギー差と一致しており、前記アルカリ金属原子に電磁誘起透過現象を発生させることを特徴とする。

【0008】

本発明の量子干渉装置の特徴は、励起レーザー光対（共鳴光対）の数を2対以上の複数対にして、それぞれのレーザー光対の中心周波数が互いに異なるように構成した点である。これにより、単位体積あたり、より多くの気体状のアルカリ金属原子に対してEIT現象を発生させることができる。

〔適用例2〕本発明の量子干渉装置では、速度成分の異なる複数の前記アルカリ金属原子に電磁誘起透過現象を発生させることが好ましい。

〔適用例3〕本発明の量子干渉装置では、前記アルカリ金属原子の速度に起因するドップラー効果を利用して、電磁誘起透過現象に寄与する前記アルカリ金属原子の数を増大させることが好ましい。

〔適用例4〕本発明の量子干渉装置では、光源と、前記光源から入射された光を第1の発振信号及び第2の発振信号に基づき変調し、前記複数の共鳴光対を含む光を出射する変調手段と、を備えることが好ましい。

〔適用例5〕本発明の量子干渉装置では、前記変調手段は、前記第1の発振信号に基づき入射された光を変調して出射する第1の電気光学変調素子、及び前記第2の発振信号に基づき入射された光を変調して出射する第2の電気光学変調素子を有し、前記第1の電気光学変調素子と前記第2の電気光学変調素子が直列に接続されている構成を備えることが好ましい。

〔適用例6〕本発明の量子干渉装置では、前記変調手段は、前記第1の発振信号及び前記第2の発振信号を混合する混合手段と、前記混合手段の出力信号に基づき前記光源から入射された前記光を変調して出射する電気光学変調素子と、を備えることが好ましい。

〔適用例7〕本発明の量子干渉装置では、第1の発振信号及び第2の発振信号を混合した信号に基づき変調された光を出射する光源を備え、前記光源から出射された前記光が前記複数の共鳴光対を含む光であることが好ましい。

〔適用例8〕本発明の量子干渉装置では、前記第1の発振信号の周波数を f_1 、前記第2の発振信号の周波数を f_2 、及び前記光源から出射される光の周波数または中心周波数を f_0 としたとき、

前記複数の共鳴光対を含む光は、周波数が $f_0 - f_2 - f_1$ の第1の共鳴光、周波数が $f_0 - f_2$ の第2の共鳴光、周波数が $f_0 - f_2 + f_1$ の第3の共鳴光、周波数が $f_0 - f_1$ の第4の共鳴光、周波数が f_0 の第5の共鳴光、周波数が $f_0 + f_1$ の第6の共鳴光、周波数が $f_0 + f_2 - f_1$ の第7の共鳴光、周波数が $f_0 + f_2$ の第8の共鳴光、及び周波数が $f_0 + f_2 + f_1$ の第9の共鳴光を含む光であることが好ましい。

【0009】

〔適用例9〕本発明の量子干渉装置では、前記光源は直線偏光の光を出射するものであることが好ましい。

【0010】

光源から出射される共鳴光対は光の伝播方向に垂直な面内で、電気ベクトルの先端が直線を描く場合、その光は直線偏光と呼ばれる。従って、光源から出射する共鳴光対は偏光をかけなければ直線偏光となる。また、光の偏光状態は直交した二つの直線偏光の重ね合わせとして考えることができる。これにより、光源からの共鳴光は元々直線偏光のため、偏光する手段が不必要であるため、光源の構成が単純化できる。

【0011】

〔適用例10〕本発明の量子干渉装置では、前記複数の共鳴光対が波長板を通過して前記アルカリ金属原子に入射する構成を備え、前記波長板を通過した前記複数の共鳴光対は円偏光または楕円偏光の光であることが好ましい。

【0012】

10

20

30

40

50

光源から出射される共鳴光対は光の伝播方向に垂直な面内で、電気ベクトルの先端が円を描く場合、その光は円偏光と呼ばれる。共鳴光対を円偏光に変換すると、波長 λ の光透過強度が通常の約 6 倍に増大することが実験的に確認されている。これにより、EIT 現象による光出力信号の S/N 比を向上させることができる。

【0014】

光源から出射される共鳴光対は光の伝播方向に垂直な面内で、電気ベクトルの先端が楕円を描く場合、その光は楕円偏光と呼ばれる。共鳴光対の光路上に光路と直交するように波長板を置いてその面を回転させると、偏光状態が変化して直交偏光と円偏光の間に連続的に変化する楕円偏光が存在することが分かる。従って、楕円偏光であっても EIT 現象による光出力信号の S/N 比を向上させることができる。

10

【0016】

波長板とは、直交する偏光成分の間に位相差を生じさせる複屈折素子のことである。位相差 (180°) を生じるものを $\lambda/2$ 板または半波長板と呼び、直線偏光の偏光方向を変えるために用いる。位相差 $\lambda/2$ (90°) を生じるものを $\lambda/4$ 板または四分の一波長板と呼び、直線偏光を円偏光(楕円偏光)に変換、また逆に円偏光(楕円偏光)を直線偏光に変換するために用いる。本発明では、直線偏光を円偏光又は楕円偏光に変える必要があるため、 $\lambda/4$ 板が使用され、光源から出射した直線偏光の共鳴光対を波長板により円偏光又は楕円偏光に変えて、ガスセルに入射させる必要がある。これにより、簡単な構成で EIT 現象による光出力信号の S/N 比を向上させることができる。

【0017】

[適用例 1.1] 本発明の原子発振器は、本発明の量子干渉装置を備えたことを特徴とする。

20

【0018】

原子発振器に本発明の量子干渉装置を備えることにより、S/N 比の高い状態で EIT 現象を発現させることができるため、原子発振器の小型化が可能となる。

【0019】

[適用例 1.2] 本発明の磁気センサーは、本発明の量子干渉装置を備えたことを特徴とする。

【0020】

原子発振器の発振周波数は、原子の 2 つの基底準位間のエネルギー差 (E_{12}) を基準としている。 E_{12} の値は、外部磁気の強さやゆらぎで変化するため、原子発振器のセルには、外部磁気の影響を受けないように、磁気シールドが施されている。そこで磁気シールドを外し、 E_{12} の変化を発振周波数変化から読取ることにより、外部磁気の強さや変動を測定する磁気センサーをつくることができる。本発明の量子干渉装置を備えることにより、S/N 比の高い状態で EIT 現象を発現させることができるため、磁気センサーの小型化が可能となる。

30

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図 1】気体状態のアルカリ金属原子の速度分布の概略図である。

【図 2】本発明の第 1 の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。

40

【図 3】(a) 及び (b) はガスセルに入射する共鳴光の周波数スペクトラムを示す図である。

【図 4】ガスセルに入射した共鳴光と気体状のアルカリ金属原子の移動方向の様子を示す図である。

【図 5】原子運動によるエネルギーのドップラー拡がりとは本発明の共鳴光との関係を説明する模式図である。

【図 6】本発明の第 2 の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。

【図 7】本発明の第 3 の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。

【図 8】本発明の実施形態に係る磁気センサーの構成を示す図である。

【図 9】(a) は、波長の異なる 2 つの共鳴光対による EIT 現象に係る光透過強度の図

50

、(b)は波長の異なる2つの共鳴光対を変調したときのEIT現象に係る光透過強度の図である。

【図10】本発明の第4の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。

【図11】本発明の第5の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。

【図12】(a)は従来のEIT方式の原理を説明する図、(b)、(c)は従来のガスセルと共鳴光の関係を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

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。

10

図1は容器に閉じ込められた気体状のアルカリ金属原子集団の速度分布の概略図を示したものである。

図1の横軸は気体状のアルカリ金属原子の速度を、縦軸はその速度を有する気体状のアルカリ金属原子の数の割合を示している。図1に示すように、速度0を中心として気体状のアルカリ金属原子は温度に応じた一定の速度分布を持つ。ここで、速度とは、レーザー光を気体状のアルカリ金属原子集団に照射した時の、照射方向に平行な原子速度成分を表し、光源に対し相対的に静止している速度の値を0としている。ここで、本願発明者らは気体状のアルカリ金属原子の速度がEIT現象に大きく影響を与えていることに着目した。気体状のアルカリ金属原子の速度に分布があると、光のドップラー効果(ドップラーシフト)により共鳴光の見かけ上の波長、すなわち気体状のアルカリ金属原子から見た共鳴光の波長に分布を生じる。このため第1共鳴光と第2共鳴光を1対で同時に照射してもEIT現象を起こさずに残ってしまう気体状のアルカリ金属原子が集団の中で相当数存在することに着目した。従来の方法、即ち第1共鳴光と第2共鳴光を1対で同時にアルカリ金属原子集団に照射する場合、セル内に封入されていた気体状のアルカリ金属原子集団のうち、EIT現象に寄与できるのは、一部のアルカリ金属原子だけであった。そこで、本願発明者らは、ドップラー効果の影響のため、従来EIT現象に寄与せず無駄になっていた気体状のアルカリ金属原子も、EIT現象に寄与させるべく工夫を施した。以下、本発明について詳細に説明する。

20

【0023】

図2は本発明の第1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50は、波長が異なるコヒーレント光対を2対以上(後述するように3対)の共鳴光を入射したときの量子干渉効果による光吸収特性を利用して発振周波数を制御する原子発振器であって、各共鳴光を出射するLD(VCSSEL)(コヒーレント光源)2と、LD2の中心波長を発生する中心波長発生手段1と、二つの異なる基底状態のエネルギー差(E12)に相当する周波数(9.2GHz)の1/2(4.596GHz)を発振する発振器9と、約25MHzの周波数を発振する発振器10と、電気信号によりLD2から出射された共鳴光11に周波数変調を与えるEOM(電気光学変調素子)3、4と、EOM4により変調された光12の波長により光の吸収量を変化させる、気体状セシウム(アルカリ金属として)原子を封入したガスセル5と、ガスセル5から透過する光13を検出する光検出器(光検出手段)6と、光検出器6の出力に基づきガスセル5のEIT状態を検出して出力電圧を制御する周波数制御手段7と、を備えて構成されている。尚、発振器10の発振周波数は25MHzとしたが、この周波数はセシウム原子の典型的なドップラー幅(例えば室温で約1GHz)に対して十分小さい値である。この周波数は適宜変更することができる。また、発振器9の出力周波数は、セシウムの場合E12に相当する周波数が約9.2GHz(4.596GHz×2)であるので、4.596GHzとし、周波数制御手段7から出力される制御電圧により電圧制御水晶発振器8を制御して得られた周波数を適倍して生成される。そして、発振器10の周波数(25MHz)によりEOM3を変調し、発振器9の周波数(4.596GHz)によりEOM4を変調して、EOM3とEOM4をLD2の出射側に直列に配置した。尚、EOM3と発振器10の組み合わせ

30

40

50

と、EOM 4 と発振器 9 の組み合わせの配列順序を逆にしても構わない。

【0024】

即ち、本実施形態の原子発振器 50 の構成が従来と異なる点は、LD 2 から出射された共鳴光 11 に対し変調手段として EOM 3 を介すことで、波長が異なる 2 つの共鳴光対を 2 対以上 (3 対) とした点である。従来の原子発振器では、波長の異なる 2 つの共鳴光対を 1 対のみ用意して、同時に照射される 2 つの共鳴光の周波数差 (波長の差) が正確に夫々の基底準位のエネルギー差 E_{12} に一致するように周波数を制御していた。しかし、原子の運動による共鳴光のドップラー効果の為、ガスセル 5 内に閉じ込められたセシウム原子集団の共鳴光波長には分布が生じ、1 対の共鳴光では、偶然その波長に対応する共鳴条件を満たす速度で運動している一部のセシウム原子としか相互作用をおこさないで、EIT 現象を発生する効率が悪かった。そこで本実施形態では、波長の異なる少なくとも 4 つ (2 つの共鳴光対) の共鳴光をガスセル 5 に封入された気体状のセシウム原子と相互作用させるように光変調手段を構成した。これにより、ガスセル 5 内で単位体積あたりで EIT 現象に寄与するセシウム原子の数を増大させることが可能となり、効率よく EIT 信号を取得することができる。

10

【0025】

図 3 (a) 及び (b) はガスセルに入射する共鳴光の周波数スペクトラムを示す図である。図 4 はガスセルに入射した共鳴光と気体状のセシウム原子の移動方向の様子を示す図である。

次に本実施形態の動作について図 3 及び図 4 を参照しながら説明する。LD 2 の共鳴光 11 は中心波長が λ_0 (中心周波数 f_0) となるように中心波長制御手段 1 で制御される。LD 2 の共鳴光 11 に対して、EOM 3 と 4 で周波数変調をかけると、ガスセル 5 には、図 3 (a) に示す周波数スペクトラム 30 ~ 32 を有する共鳴光 12 が入力される。ここで、図 3 (a) において、A - A' の周波数差は 9.2 GHz であり、この一対の共鳴光に対しては、 v_0 を適当な値に設定することで図 4 に示す入射光 12 の方向に対する速度成分が小さい気体状のセシウム原子 15 が EIT 現象を発生する。また、B - B' の周波数差も 9.2 GHz であり、この一対の共鳴光に対しては、図 4 に示す入射光 12 と反対方向の速度成分を持つ気体状のセシウム原子 14 が EIT 現象を発生する。また、図 3 (a) において、C - C' の周波数差も 9.2 GHz であり、この一対の共鳴光に対しては、図 4 に示す入射光 12 と同じ方向の速度成分を持つ気体状のセシウム原子 16 が EIT 現象を発生する。このように、ガスセル 5 内の原子は様々な速度分布を持っている。そこで上記のようにサイドバンド B、B'、C、C' の成分を与えた共鳴光 12 をガスセル 5 に入射すると、A - A'、B - B'、及び C - C' の周波数差は何れも 9.2 GHz となり、これら 3 対のレーザー光はいずれも対応する速度成分を持つ気体状のセシウム原子と相互作用を起こし、その結果 EIT 現象に寄与するセシウム原子の割合が増大する。これにより、信号対雑音比 (S/N 比) の大きい所望の EIT 信号を得ることができる。

20

30

【0026】

尚、本実施形態では EOM 4 の変調周波数を気体状のセシウム原子の周波数差の $1/2$ (4.596 GHz) としたが、周波数差の 9.2 GHz としても構わない。そのときの共鳴光の周波数スペクトラムは図 3 (b) のようになり、周波数スペクトラム 33 ~ 35 が発生するが、例えば、周波数スペクトラム 33 は使用せずに、周波数スペクトラム 34 と 35 (周波数スペクトラム 33 と 34 でも可) を使用する。即ち、A - A' の周波数差は 9.2 GHz であり、この一対の共鳴光に対しては、 v_0 を適当な値に設定することで図 4 に示す入射光 12 の方向に対する速度成分が小さい気体状のセシウム原子 15 が EIT 現象を発生する。B - B' の周波数差も 9.2 GHz であり、この一対の共鳴光に対しては、図 4 に示す入射光 12 と反対方向の速度成分を持つ気体状のセシウム原子 14 が EIT 現象を発生する。また、C - C' の周波数差も 9.2 GHz であり、この一対の共鳴光に対しては、図 4 に示す入射光 12 と同じ方向の速度成分を持つ気体状のセシウム原子 16 が EIT 現象を発生する。このように、ガスセル 5 内の原子は様々な速度分布を持っている。そこで上記のようにサイドバンド B、B'、C、C' の成分を与えた共鳴光 12

40

50

をガスセル5に入射すると、A - 0、B - 1、及びC - 2の周波数差は何れも9.2 GHzとなり、これら3対のレーザー光はいずれも対応する速度成分を持つ気体状のセシウム原子と相互作用を起こし、その結果EIT現象に寄与するセシウム原子の割合が増大する。これにより、信号対雑音比(S/N比)の大きい所望のEIT信号を得ることができる。

【0027】

即ち、少なくとも2つの共鳴光対(ここでは3対)の共鳴光を発生させるためには、LD2から出射される共鳴光にサイドバンドを重畳させて発生させ、その周波数スペクトラムを利用することが考えられる。また、共鳴光を変調する周波数は、二つの異なる基底状態のエネルギー差(E12)に相当する周波数(9.2 GHz)の1/2の4.596 GHzと、セシウム原子の典型的なドップラー幅(例えば室温で約1 GHz)に対して十分小さい値である周波数(ここでは25 MHz)によって変調する必要がある。また、光を変調するためのEOMを利用する。そこで本実施形態では、2種類の周波数を夫々発振する発振器9、10を用意して、LD2の出射側に直列に配置したEOM3と4、を夫々の周波数で変調する。これにより、LD2から出射した共鳴光11から、9.2 GHzの周波数差を維持した3対の周波数スペクトラムを有する共鳴光を生成することができる。

また、本実施形態ではEOM3とEOM4を1個ずつ備えたが、EOM4と、少なくとも2つ以上のEOM3をLD2の出射側に直列に配置するようにしても良い。これにより、共鳴光対の数を任意に設定し、櫛歯様の周波数間隔で発生させることができる。

【0028】

図5は原子運動によるエネルギーのドップラー拡がりとは本発明の共鳴光との関係を説明する模式図である。容器に封入された気体状のアルカリ金属原子集団のエネルギー状態図は、図12に示した一つの原子に対するエネルギー状態図の励起準位をドップラー拡がりに相当するエネルギー帯で置き換えることで表現できる。図5における20、21、22の各準位は、図4における、それぞれ16、15、14で示された原子に対応する励起準位である。これにより、速度分布を持った気体状のアルカリ金属原子集団に対して、複数の共鳴光の対によりEIT現象に寄与する原子の割合が増大していることがわかる。そこで、例えば1対の共鳴光に割り当てられるパワーが従来のパワーにほぼ等しい設定にすれば、吸収の飽和限界が高くなりトータルのパワーが増大するので、高いコントラストのEIT信号が取得できる。また、トータルの光照射パワーが従来とほぼ等しい場合は、本発明の1対の共鳴光あたりのパワーは減少するので、EIT信号のパワーブロードニング(光パワーが強いと、EIT信号の線幅が増大してしまう現象)が抑えられ、従来に比べ、半値幅が狭い良好なEIT信号が取得できる。従ってこれを発振器に適用した場合、周波数安定性を従来より向上させることができる。

【0029】

図6は本発明の第2の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。同じ構成要素には図2と同じ参照番号を付して説明する。図6が図2と異なる点は、EOM4を削除して、発振器10、及び発振器9の出力信号を混合する混合器17を備え、混合器17の出力信号18によりEOM3を駆動して、EOM3をLD2の出射側に配置する。これにより、EOM3から出射される共鳴光12は、図3(a)と同様の周波数スペクトラムを発生する。

即ち、光を変調するためには、EOMを用いているが、周波数スペクトラムの数を増やすと、それだけEOMの数を増やさなければならず、コスト的に高くなり、且つ部品点数が増加するといった問題がある。そこで本実施形態では、EOMを変調する信号を予め混合器17により混合しておき、その出力信号18により1つのEOM3を変調する。これにより、EOMの数を最小限にして、部品点数を削減することができる。

【0030】

図7は本発明の第3の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。同じ構成要素には図6と同じ参照番号を付して説明する。図7が図6と異なる点は、EOM3を削除して、混合器17の出力信号19により直接LD2を変調駆動する。これにより、LD2が

10

20

30

40

50

ら出射される共鳴光 11 は、図 3 (a) と同様の周波数スペクトラムを発生する。

即ち、LD 2 から出射された共鳴光 11 は、中心波長が 0 となるように中心波長制御手段 1 で制御されている。そして、中心波長を変調するためには、LD 2 から出射された共鳴光 11 を EOM で変調する方法以外に、LD 2 そのものを変調する方法がある。そこで本実施形態では、発振器 10、及び発振器 9 の出力周波数を混合する混合器 17 により混合された信号 19 で LD 2 そのものを変調駆動する。これにより、EOM を不要とすることができる。また、発振器 10 の出力周波数は、電圧制御水晶発振器 8 から PLL 等を介して (発振器 9 の回路の一部を利用することもできる) 生成することもできる。その場合は発振器 10 も不要となる。

また、図示は省略するが、従来の EIT 方式による原子発振器に備えられている LD を、夫々異なる波長の面発光レーザーをアレイ状に配置した構成としても構わない。

【 0031 】

図 8 は本発明の実施形態に係る磁気センサーの構成を示す図である。同じ構成要素には図 7 と同じ参照番号を付して説明する。図 8 が図 7 と異なる点は、ガスセル 5 の近傍に、被測定磁気発生源 37 を配し、周波数制御手段 7 の出力信号の変動を測定する磁気測定器 36 と、を備えた点である。原子発振器の発振周波数は、原子の 2 つの基底準位間のエネルギー差 (E12) を基準としている。E12 の値は、外部磁気の強さやゆらぎで変化するため、原子発振器のセルには、外部磁気の影響を受けないように、磁気シールドが施されている。そこで磁気シールドを外し、E12 の変化を発振周波数変化から読取ることにより、外部磁気の強さや変動を測定する磁気センサーをつくることのできる。本発明の構成とすることにより、S/N 比の高い状態で EIT 現象を発現させることのできるため、磁気センサーの小型化が可能となる。

【 0032 】

図 9 (a) は、波長の異なる 2 つの共鳴光対による EIT 現象に係る光透過強度の図であり、図 9 (b) は波長の異なる 2 つの共鳴光対を変調したときの EIT 現象に係る光透過強度の図である。図 9 (a) から、波形 41 は VCSEL からの直線偏光された光透過強度の波形であり、その共鳴光対を更に波長板を通過させて円偏光としたときの光透過強度が波形 42 である。波形 42 は波形 41 に対して約 20% レベルが増加しているのが分かる。また、図 9 (b) のように共鳴光対を変調すると、複数の共鳴光対はいずれも対応する速度分布を持つ気体状のセシウム原子と相互作用を起こし、複数のピークを持った波形 43 が発現する。本実施形態では、例えば、図 10 のように LD 2 とガスセル 5 の間に波長板 40 を光路と直交するように配置して、波長板面を徐々に回転すると共鳴光対 11 が円偏光となったときに、波長 0 で光透過強度が最大の波形 45 となることが確認された。従って、共鳴光対を直線偏光から円偏光に変化する過程で光透過強度が波形 43 (直線偏光)、波形 44 (楕円偏光)、波形 45 (円偏光) となることが確認された。

即ち、LD 2 から出射される共鳴光対 11 は光の伝播方向に垂直な面内で、電気ベクトルの先端が円を描く場合、その光は円偏光と呼ばれる。共鳴光対を円偏光に変換すると、波長 0 の光透過強度が通常の約 6 倍に増大することが実験的に確認されている。これにより、EIT 現象による光出力信号の S/N 比を向上させることができる。

また、LD 2 から出射される共鳴光対 11 は光の伝播方向に垂直な面内で、電気ベクトルの先端が楕円を描く場合、その光は楕円偏光と呼ばれる。共鳴光対の光路上に光路と直交するように波長板を置いてその面を回転させると、偏光状態が変化して直交偏光と円偏光の間に連続的に変化する楕円偏光が存在することが分かる。従って、楕円偏光であっても EIT 現象による光出力信号の S/N 比を向上させることができる。

【 0033 】

図 10 は、本発明の第 4 の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。第 4 の実施形態は、図 7 の構成に波長板 40 を追加した構成である。即ち、LD 2 とセル 5 の間に波長板 40 を光路と直交するように配置したものである。LD 2 から出射した直線偏光の共鳴光対 11 は波長板 40 に入射して、90 度位相が偏光されて円偏光 11a となる。尚、波長板 40 は LD 2 とセル 5 の間であれば何処でも良く、LD 2 の出射面の近傍や、セ

10

20

30

40

50

ル 5 の入射口の近傍でも構わない。

【 0 0 3 4 】

図 1 1 は、本発明の第 5 の実施形態に係る原子発振器の構成を示す図である。第 5 の実施形態は、図 6 の構成に波長板 4 0 を追加した構成である。即ち、E O M 3 とセル 5 の間に波長板 4 0 を光路と直交するように配置したものである。L D 2 から出射した直線偏光の共鳴光対 1 1 は E O M 3 により変調されて共鳴光 1 2 となり、波長板 4 0 に入射して、9 0 度位相が偏光されて円偏光 1 2 a となる。尚、波長板 4 0 は E O M 3 とセル 5 の間であれば何処でも良く、E O M 3 の出射面の近傍や、セル 5 の入射口の近傍でも構わない。

即ち、波長板とは、直交する偏光成分の間に位相差を生じさせる複屈折素子のことである。位相差 (1 8 0 °) を生じるものを $\lambda / 2$ 板または半波長板と呼び、直線偏光の偏光方向を変えるために用いる。位相差 $\lambda / 2$ (9 0 °) を生じるものを $\lambda / 4$ 板または四分の一波長板と呼び、直線偏光を円偏光 (楕円偏光) に変換、また逆に円偏光 (楕円偏光) を直線偏光に変換するために用いる。本実施形態では、直線偏光を円偏光又は楕円偏光に変える必要があるため、 $\lambda / 4$ 板が使用され、L D 2 から出射した直線偏光の共鳴光対 1 1 を波長板 4 0 により円偏光又は楕円偏光に変えて、ガスセル 5 に入射させる必要がある。これにより、簡単な構成で E I T 現象による光出力信号の S N 比を向上させることができる。

【 符号の説明 】

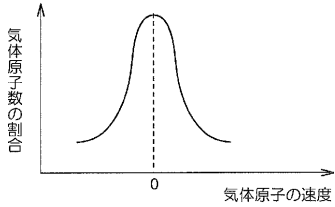
【 0 0 3 5 】

1 中心波長制御手段、2 L D、3 E O M、4 E O M、5 ガスセル、6 光検出器、7 周波数制御手段、8 電圧制御水晶発振器、9 発振器、1 0 発振器、1 1、1 2、1 3 共鳴光、1 4、1 5、1 6 気体状のセシウム原子、1 7 混合器 1 8、1 9 変調信号、4 0 波長板、4 1 変調をかけないときの直線偏光された波形、4 2 変調をかけないときの円偏光された波形、4 3 変調をかけたときの直線偏光された波形、4 4 変調をかけたときの楕円偏光された波形、4 5 変調をかけたときの円偏光された波形、5 0、5 1、5 2、5 3、5 4 原子発振器

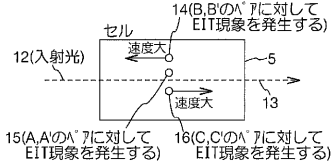
10

20

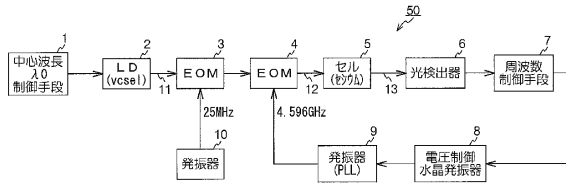
【図1】



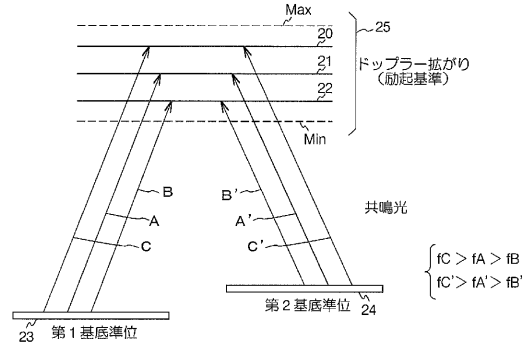
【図4】



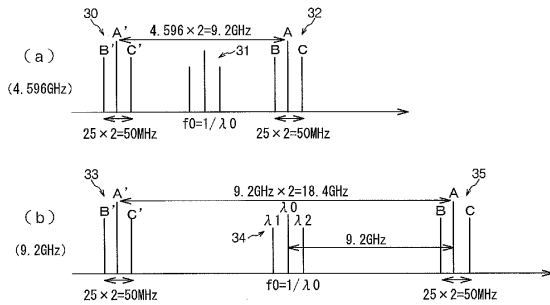
【図2】



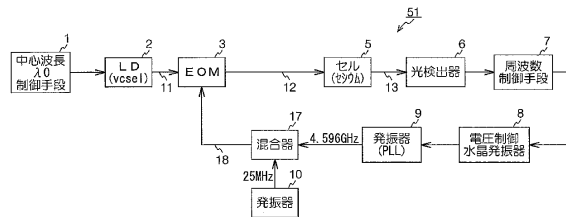
【図5】



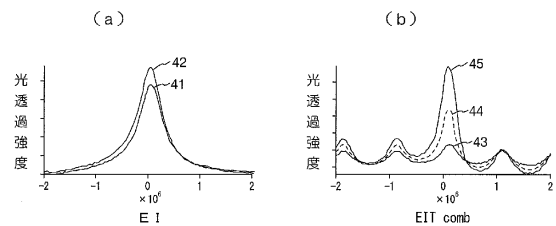
【図3】



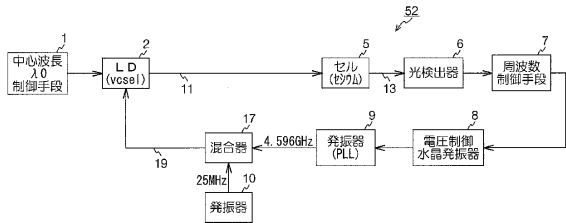
【図6】



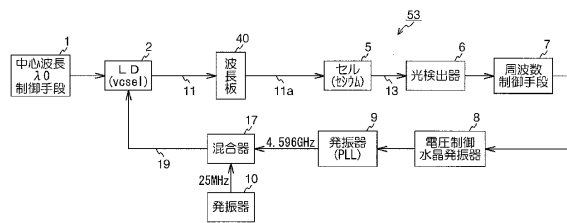
【図9】



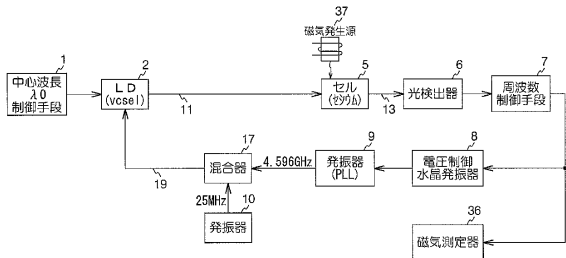
【図7】



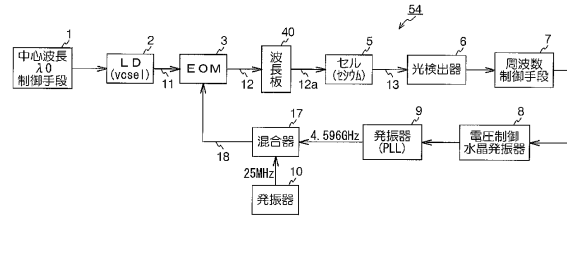
【図10】



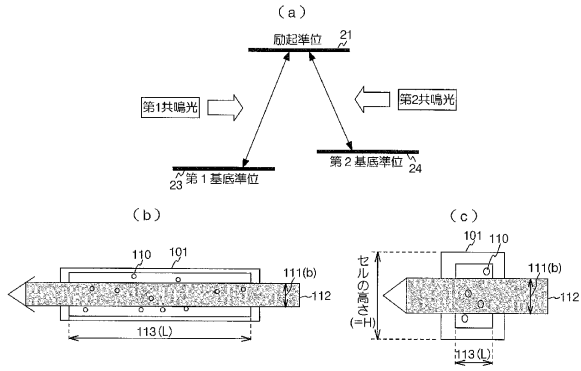
【図8】



【図11】



【図12】



フロントページの続き

- (72)発明者 青山 拓
東京都日野市日野4 2 1 - 8 エプソントヨコム株式会社内
- (72)発明者 塚道 幸治
東京都日野市日野4 2 1 - 8 エプソントヨコム株式会社内

審査官 小林 正明

- (56)参考文献 特表2007-530965(JP,A)
特表2005-522887(JP,A)
特開2008-211138(JP,A)
特表2008-522411(JP,A)
特開2006-115513(JP,A)
特開平01-207984(JP,A)
特開2007-527994(JP,A)
M. Zhu, HIGH CONTRAST SIGNAL IN A COHERENT POPULATION TRAPPINGBASED ATOMIC FREQUENCY S
TANDARD APPLICATION, Proceedings of the 2003 IEEE International Frequency Control Symp
osium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 20
03年 5月 4日, p.16-21

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H03L 7/26
IEEE Explore