

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7207558号
(P7207558)

(45)発行日 令和5年1月18日(2023.1.18)

(24)登録日 令和5年1月10日(2023.1.10)

(51)国際特許分類 F I
 G 0 1 N 21/39 (2006.01) G 0 1 N 21/39
 G 0 1 N 21/3504(2014.01) G 0 1 N 21/3504
 G 0 2 F 1/37 (2006.01) G 0 2 F 1/37

請求項の数 5 (全19頁)

(21)出願番号	特願2021-545044(P2021-545044)	(73)特許権者	000001993 株式会社島津製作所 京都府京都市中京区西ノ京桑原町1番地
(86)(22)出願日	令和1年9月12日(2019.9.12)	(74)代理人	110001069 弁理士法人京都国際特許事務所
(86)国際出願番号	PCT/JP2019/035842	(72)発明者	真野 和音 京都府京都市中京区西ノ京桑原町1番地 株式会社島津製作所内
(87)国際公開番号	WO2021/048967	審査官	伊藤 裕美
(87)国際公開日	令和3年3月18日(2021.3.18)		
審査請求日	令和3年6月4日(2021.6.4)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 ガス吸光分光測定装置、周波数ロック方法、及びガス吸光分光測定方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

レーザー照射部と、被測定ガスが収容される測定セルを含む、前記レーザー照射部から照射された光を共振させる光共振器と、該光共振器から取り出された光を検出する第1検出部と、を具備し、キャピティリングダウン吸収分光法により前記被測定ガス中の成分濃度を求めるガス吸光分光測定装置であって、前記レーザー照射部は、

発振周波数の調整が可能であるレーザー光源と、

前記レーザー光源から放出されたレーザー光をその周波数のまま又は周波数を所定倍して選択的に出射可能である周波数変換部と、

前記周波数変換部から出射されたレーザー光を、変調信号を用いて周波数変調する周波数変調部と、

前記光共振器に照射された前記周波数変調部による変調後のレーザー光に対する、該光共振器からの戻り光を検出する第2検出部と、

前記第2検出部による検出信号と前記変調信号とに基づいて、前記光共振器に照射されたレーザー光の周波数と該光共振器のモード周波数との差を反映したエラー信号を生成し、該エラー信号に応じて前記レーザー光源の発振周波数を制御するフィードバック制御部と、を備えるガス吸光分光測定装置。

【請求項2】

レーザー照射部と、被測定ガスが収容される測定セルを含む、前記レーザー照射部から照射された光を共振させる光共振器と、該光共振器から取り出された光を検出する第1検出部

10

20

と、を具備し、キャビティリングダウン吸収分光法により前記被測定ガス中の成分濃度を求めるガス吸光分光測定装置であって、前記レーザ照射部は、

発振周波数の調整が可能であるレーザ光源と、

前記レーザ光源から放出されたレーザ光を複数に分岐する分岐部と、

前記分岐部で分岐された一つのレーザ光を周波数を所定倍して出射する周波数変換部と、

前記周波数変換部から出射されたレーザ光を、第1変調信号を用いて周波数変調する第1の周波数変調部と、

前記分岐部で分岐された他のレーザ光を、第2変調信号を用いて周波数変調する第2の周波数変調部と、

前記第1の周波数変調部により変調された第1のレーザ光と前記第2の周波数変調部により変調された第2のレーザ光とをそれぞれ光学的に分離可能な態様で共に前記光共振器に入射させる合一部と、

10

前記光共振器に照射された前記第1のレーザ光に対する該光共振器からの戻り光、及び、該光共振器に照射された前記第2のレーザ光に対する該光共振器からの戻り光を、それぞれ独立に検出する第2検出部と、

前記第2検出部による検出信号と前記第1変調信号とに基づいて、前記第1のレーザ光の周波数と前記光共振器のモード周波数との差を反映した第1のエラー信号を生成し、該第1のエラー信号に応じて前記レーザ光源における発振周波数をフィードバック制御し、それにより該発振周波数を前記光共振器のモード周波数に合わせたあと、該フィードバック制御の状態を維持する、又は、前記第2のレーザ光に由来する戻り光に対する前記第2検出部による検出信号と前記第2変調信号とに基づいて、該第2のレーザ光の周波数と前記光共振器のモード周波数との差を反映した第2のエラー信号を生成し、該第2のエラー信号に応じたフィードバック制御を行うことにより前記レーザ光源における発振周波数の制御を続行するフィードバック制御部と、

20

を備えるガス吸光分光測定装置。

【請求項3】

レーザ光源の発振周波数を光共振器の共振周波数にロックする周波数ロック方法であって、

レーザ光の周波数を、前記発振周波数の整数倍に変換する第1工程と、

周波数が変換された前記レーザ光を、変調信号を用いて変調する第2工程と、

変調された前記レーザ光を前記光共振器に入射させる第3工程と、

前記光共振器からの戻り光を検出する第4工程と、

検出した前記戻り光と前記変調信号とに基づいて、前記光共振器に入射したレーザ光の周波数と前記光共振器のモード周波数との差に応じたエラー信号を生成する第5工程と、

前記エラー信号をフィードバックして前記レーザ光源の発振周波数を制御する第6工程と、

30

を実行する周波数ロック方法。

【請求項4】

請求項3に記載の周波数ロック方法を用い、

前記レーザ光源の発振周波数を前記光共振器のモード周波数に合わせたあと、前記第6工程におけるフィードバック制御を維持しつつ、前記レーザ光源からのレーザ光を用いたキャビティリングダウン吸収分光法による測定を実行する第7工程、

40

をさらに実行するガス吸光分光測定方法。

【請求項5】

請求項3に記載の周波数ロック方法を用い、

前記レーザ光源の発振周波数を前記光共振器のモード周波数に合わせたあと、前記レーザ光源から放出された基本周波数のレーザ光を、変調信号を用いて周波数変調して前記光共振器に照射し、その戻り光に基づくフィードバック制御を実施しつつ、前記レーザ光源からの基本周波数のレーザ光を用いたキャビティリングダウン吸収分光法による測定を実行する第7工程、

50

をさらに実行するガス吸光分光測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザー光に対する吸収を利用して被測定ガス中の成分濃度を測定するガス吸光分光測定装置及びガス吸光分光測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

被測定ガス中の特定の成分の濃度を測定する手法として、レーザー吸収分光法が広く利用されている。レーザー吸収分光法には幾つかの手法があるが、その手法の一つとして、キャビティリングダウン吸収分光法 (Cavity Ring-Down absorption Spectroscopy、以下、慣用に従って「CRDS」と称することがある) がある。CRDSは、光共振器を用いて光吸収のための実効光路長を長くすることにより検出感度を改善する手法である (非特許文献1など参照)。

【0003】

図5は一般的なCRDS装置の概略構成図である。図5において、レーザー光源部100から射出された所定波長のレーザー光は光スイッチ101を通して、被測定ガスが収容されている筒状の測定セル20に導入される。測定セル20の両端には、高反射率 (ごく僅かに光が透過する) を有するミラー21、22が対向して配置されている。この測定セル20及び一对のミラー21、22が光共振器2を構成する。この光共振器2は例えばレーザー装置等で一般的に用いられているファブリペロー共振器と同様のものであり、共振し得る光の波長 (周波数) はセル長等の共振条件に応じて決まっている。なお、光共振器2は、2枚のミラーを対向して配置した構成の共振器でなく、3枚以上のミラーで構成されるリング型の共振器であってもよい。

【0004】

光共振器2において共振し得る周波数は一般にモード周波数と呼ばれる。図6は、モード周波数とレーザー光の周波数との関係を示すスペクトルである。図6に示すように、モード周波数は所定の周波数間隔で存在し、光共振器2に導入されたレーザー光の周波数がこのモード周波数と一致しないとき、光のパワーは光共振器2内に蓄積されない。一方、レーザー光源部100においてレーザー光の発振周波数がモード周波数と一致するように調整されると、光のパワーが光共振器2内に蓄積される。

【0005】

CRDS装置では、光のパワーが光共振器2内に十分に蓄積された状態で、該光共振器2へ入射するレーザー光を光スイッチ101によって急峻に遮断する。すると、その直前に光共振器2内に蓄積されていた光は、一对のミラー21、22の間を多数回 (実際には数千~数万回) 往復する。その間、測定セル20内に封入されている被測定ガス中の成分による吸収を受けて光は徐々に減衰していく。その際に、光共振器2の出射側ミラー22を経て外部へと漏れ出る一部の光の減衰の状態を、光検出器3によって連続的に検出する。光検出器3により検出したデータに基づいて光の減衰の時定数 (リングダウン時間) を求めることで、そのときのレーザー光の周波数における被測定ガス中の目的成分の吸収係数を算出することができる。そして、その吸収係数に基づいて、目的成分の絶対濃度を求めることができる。また、レーザー光源部100におけるレーザー光の発振周波数を所定の範囲で走査しながら、同様にキャビティリングダウン (CRD) 信号の測定を繰り返すことにより、被測定ガス中の目的成分による吸収スペクトルを取得することもできる。

【0006】

被測定ガス中の目的成分の吸収係数を求めるには、通常、次の(1)式が用いられる (特許文献1等参照)。

$$= (1/c) \{ (1/\tau) - (1/\tau_0) \} \dots(1)$$

ここで、 c は光速、 τ は測定セル20内に被測定ガスが収容されているときのリングダウン時間、 τ_0 は測定セル20内に被測定ガスが収容されていない (例えば真空状態である)

10

20

30

40

50

とき又は被測定ガス中の成分による吸収が全く無視できるときのリングダウン時間である。一方、目的成分（吸収物質）の吸収係数、数密度 n 、及び吸収断面積の関係は次の(2)式で示される。

$$= n \dots(2)$$

【0007】

したがって、(1)式及び(2)式を用いて、二つのリングダウン時間、 t_0 から、吸収断面積が既知である成分についての絶対濃度を計算することができる。CRDS装置では、光共振器2を用いて光が被測定ガス中を透過する実効的な距離（光路長）を伸ばしているため、二つのリングダウン時間、 t_0 の差が大きくなる。それによって、微量な目的成分によるごく僅かな光吸収をも検出することができ、他の方式のレーザー吸収分光法に比べて高い検出感度を実現することができる。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【文献】特開2011-119541号公報

特開2015-32700号公報

【非特許文献】

【0009】

【文献】橋口幸治、「ガス中微量水分の高効率な計測技術に関する調査研究」、産業技術総合研究所、産総研計量標準報告、2015年10月、Vol.9、No.2、pp.185-205

20

ドレバー（R. W. P. Drever）、ほか6名、「レーザー・フェイズ・アンド・フリクエンシー・スタビライゼーション・ユージング・アン・オプティカル・リゾネータ（Laser Phase and Frequency Stabilization Using an Optical Resonator）」、アプライド・フィジックス（Appl. Phys.）B、1983年、Volume 31、Issue 2、pp.97-105

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

上述したようにCRDS装置では原理的に、光共振器のモード周波数とレーザー光の発振周波数とが一致した状態で測定を実施する必要がある。光共振器のモード周波数とレーザー光の発振周波数とを一致させる手法として、非特許文献2に詳細に開示されているPDH（Pound-Drever-Hall）法がしばしば用いられる。

30

【0011】

PDH法を利用したCRDS装置（特許文献2等参照）では、レーザー光源部からのレーザー光の発振周波数を位相変調素子により変調して光共振器に入射させる。そして、その入射光に対し光共振器において反射されて戻って来た光を光検出器により検出し、その検出信号を変調信号で同期検出することによりエラー信号を取得する。このエラー信号はレーザー光の発振周波数と光共振器のモード周波数との差の情報を有しており、発振周波数とモード周波数との一致性が高いほどエラー信号は小さくなる。そこで、エラー信号が最も小さくなるようにレーザー光源部におけるレーザー光の発振周波数を制御することにより、該発振周波数をモード周波数に一致させる。こうしたフィードバック制御により、レーザー光の発振周波数を光共振器のモード周波数にロックさせることができる。

40

【0012】

上記PDH法等により周波数をロックさせる手法を用いない場合には、例えばレーザー光の発振周波数を変化させながら該発振周波数と光共振器のモード周波数とが一致するタイミングを待ってCRD信号を取得する必要がある。そのため、測定を実施することができるタイミングがかなり限定される。これに対し、PDH法を利用するとレーザー光の発振周波数をモード周波数に常に一致させておくことができるため、単位時間当たりの測定回数を増やすことができ、測定効率を大幅に改善することができる。

【0013】

しかしながら、従来のPDH法を用いたCRDS装置は次のような問題を有する。

50

P D H法によりレーザ光の発振周波数をフィードバック制御するためには、その制御の開始時点でエラー信号が得られている必要がある。P D H法を実施する一般的な回路では、上記エラー信号はレーザ光の発振周波数とモード周波数との差が小さいとき（一般的には周波数スペクトル上の縦モードのパルス線幅程度以下であるとき）にしか得られない。一方、C R D S装置において高い検出精度や感度を達成するには、縦モードのパルス線幅を狭くする（厳密には縦モードのパルス線幅が狭くなる共振条件とする）必要があり、そうするとP D H法におけるエラー信号を生成できる周波数領域も非常に狭くなる。このため、C R D S装置にP D H法を適用する場合、ごく狭い縦モードのパルス線幅の周波数領域にレーザ光の発振周波数が収まるように、該レーザ光の発振周波数を高い精度で制御する必要がある。

10

【 0 0 1 4 】

即ち、C R D S装置における測定精度や感度を高めるために光共振器の縦モードのパルス線幅を狭めると、レーザ光の発振周波数を高い精度で制御する必要が生じ、レーザ光源部やレーザ制御回路のコストが高くなってしまふ。逆に、レーザ光の発振周波数を制御する精度を緩和するには、光共振器の縦モードのパルス線幅を広げる必要があり、そうするとC R D S装置における測定精度や感度が低下してしまうというジレンマがある。

【 0 0 1 5 】

本発明は上記課題を解決するために成されたものであり、その目的とするところは、P D H法を利用したC R D S装置において、レーザ光の発振周波数の高精度な制御を行うことなく、レーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とを迅速に一致させ、それら周波数が一致した状態を維持しながら高い精度及び感度の測定を実施することができるガス吸光分光測定装置及びガス吸光分光測定方法を提供することである。

20

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 6 】

本発明に係るガス吸光分光測定装置の一態様は、レーザ照射部と、被測定ガスが収容される測定セルを含む、前記レーザ照射部から照射された光を共振させる光共振器と、該光共振器から取り出された光を検出する第1検出部と、を具備し、キャビティリングダウン吸収分光法により前記被測定ガス中の成分濃度を求めるガス吸光分光測定装置であって、前記レーザ照射部は、

発振周波数の調整が可能であるレーザ光源と、

30

前記レーザ光源から放出されたレーザ光をその周波数のまま又は周波数を所定倍して選択的に出射可能である周波数変換部と、

前記周波数変換部から出射されたレーザ光を、変調信号を用いて周波数変調する周波数変調部と、

前記光共振器に照射された前記周波数変調部による変調後のレーザ光に対する、該光共振器からの戻り光を検出する第2検出部と、

前記第2検出部による検出信号と前記変調信号とに基づいて、前記光共振器に照射されたレーザ光の周波数と該光共振器のモード周波数との差を反映したエラー信号を生成し、該エラー信号に応じて前記レーザ光源の発振周波数を制御するフィードバック制御部と、を備える。

40

【 0 0 1 7 】

本発明に係るガス吸光分光測定装置の他の態様は、レーザ照射部と、被測定ガスが収容される測定セルを含む、前記レーザ照射部から照射された光を共振させる光共振器と、該光共振器から取り出された光を検出する第1検出部と、を具備し、キャビティリングダウン吸収分光法により前記被測定ガス中の成分濃度を求めるガス吸光分光測定装置であって、前記レーザ照射部は、

発振周波数の調整が可能であるレーザ光源と、

前記レーザ光源から放出されたレーザ光を複数に分岐する分岐部と、

前記分岐部で分岐された一つのレーザ光を周波数を所定倍して出射する周波数変換部と、

前記周波数変換部から出射されたレーザ光を、第1変調信号を用いて周波数変調する第

50

1の周波数変調部と、

前記分岐部で分岐された他のレーザ光を、第2変調信号を用いて周波数変調する第2の周波数変調部と、

前記第1の周波数変調部により変調された第1のレーザ光と前記第2の周波数変調部により変調された第2のレーザ光とをそれぞれ光学的に分離可能な態様で共に前記光共振器に入射させる合一部と、

前記光共振器に照射された前記第1のレーザ光に対する該光共振器からの戻り光、及び、該光共振器に照射された前記第2のレーザ光に対する該光共振器からの戻り光を、それぞれ独立に検出する第2検出部と、

前記第2検出部による検出信号と前記第1変調信号とに基づいて、前記第1のレーザ光の周波数と前記光共振器のモード周波数との差を反映した第1のエラー信号を生成し、該第1のエラー信号に応じて前記レーザ光源における発振周波数をフィードバック制御し、それにより該発振周波数を前記光共振器のモード周波数に合わせたあと、該フィードバック制御の状態を維持する、又は、前記第2のレーザ光に由来する戻り光に対する前記第2検出部による検出信号と前記第2変調信号とに基づいて、該第2のレーザ光の周波数と前記光共振器のモード周波数との差を反映した第2のエラー信号を生成し、該第2のエラー信号に応じたフィードバック制御を行うことにより前記レーザ光源における発振周波数の制御を続行するフィードバック制御部と、

を備える。

【0018】

また本発明に係る周波数ロック方法の一態様は、レーザ光源の発振周波数を光共振器の共振周波数にロックする周波数ロック方法であって、

前記レーザ光源によるレーザ光の周波数を、前記発振周波数の整数倍に変換する第1工程と、

周波数が変換された前記レーザ光を、変調信号を用いて変調する第2工程と、

変調された前記レーザ光を前記光共振器に入射させる第3工程と、

前記光共振器からの戻り光を検出する第4工程と、

検出した前記戻り光と前記変調信号とに基づいて、前記光共振器に入射したレーザ光の周波数と前記光共振器のモード周波数との差に応じたエラー信号を生成する第5工程と、

前記エラー信号をフィードバックして前記レーザ光源の発振周波数を制御する第6工程と、

を実行するものである。

【0019】

また本発明に係るガス吸光分光測定方法の一態様は、上記態様の周波数ロック方法を用い、前記レーザ光源の発振周波数を前記光共振器のモード周波数に合わせたあと、前記第6工程におけるフィードバック制御を維持しつつ、前記レーザ光源からのレーザ光を用いたキャビティリングダウン吸収分光法による測定を実行する第7工程、

をさらに実行するものである。

【0020】

また本発明に係るガス吸光分光測定方法の他の態様は、上記態様の周波数ロック方法を用い、前記レーザ光源の発振周波数を前記光共振器のモード周波数に合わせたあと、前記レーザ光源から放出された基本周波数のレーザ光を、変調信号を用いて周波数変調して前記光共振器に照射し、その戻り光に基づくフィードバック制御を実施しつつ、前記レーザ光源からの基本周波数のレーザ光を用いたキャビティリングダウン吸収分光法による測定を実行する第7工程、

をさらに実行するものである。

【発明の効果】

【0021】

本発明の上記各態様のガス吸光分光測定装置、周波数ロック方法、及びガス吸光分光測定方法における、レーザ光の発振周波数のフィードバック制御の手法は、上述したPDH

10

20

30

40

50

法によるものである。また、ここでレーザ光源部から放出されるレーザ光の周波数を変換する際の「所定倍」とは、典型的には1以外の自然数（正の整数）倍であり、通常は2倍である。

【0022】

本発明の上記各態様のガス吸光分光測定装置、周波数ロック方法、及びガス吸光分光測定方法では、例えば装置の起動直後等の、レーザ光源におけるレーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とが一致していない状態では、そのレーザ光の基本周波数ではなく、それを所定倍例えば2倍した周波数のレーザ光を利用したPDH法によるフィードバック制御により、レーザ光源の発振周波数が調整される。光共振器に用いられるミラーの反射率は光の周波数に依存し、基本周波数において高い反射率を示すミラーの反射率は、所定倍の周波数においては基本周波数における反射率よりも下がる。そのため、所定倍の周波数における光共振器の縦モードのパルス幅は基本周波数におけるそれよりも広くなり、レーザ光の周波数とモード周波数とのずれが或る程度大きくても適切なエラー信号が得られ、レーザ光の周波数がモード周波数に一致するように良好なフィードバック制御が行われる。

10

【0023】

このようにして、本発明の上記各態様のガス吸光分光測定装置、周波数ロック方法、及びガス吸光分光測定方法によれば、レーザ光源におけるレーザ光の発振周波数を高い精度で制御することなく、レーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とを迅速に一致させ、それが維持された状態で高い精度及び感度のCRDS測定を実施することができる。

20

【0024】

その結果、レーザ光の発振周波数を高い精度で以て制御する必要がなくなることで、装置のコストを抑えることができる。

また、レーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とを迅速に一致させてその状態を維持することができるので、単位時間あたりに実施可能な測定の回数を増やし測定効率を向上させることができる。

また、一定の周波数間隔で現れる各モード周波数に対してレーザ光の発振周波数を順番に迅速に一致させるような制御も可能であるので、広い周波数領域に亘るCRD信号を取得する際にも測定時間を短縮することができる。

さらにまた、従来はPDH法によるレーザ光の発振周波数の制御を適用することが困難であった反射率が極めて高い超高反射ミラーを、光共振器のミラーとして採用することができるので、CRDSの測定精度や感度を従来よりも高めることができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0025】

【図1】本発明の第1の実施形態であるCRDS装置の要部の構成図。

【図2】第1の実施形態のCRDS装置において測定開始前の処理の手順の一例を示すフローチャート。

【図3】第1の実施形態のCRDS装置においてレーザ光の周波数のフィードバック制御の際に得られるエラー信号の周波数依存性を示す図。

【図4】本発明の第2の実施形態であるCRDS装置の要部の構成図。

40

【図5】一般的なCRDS装置の概略構成図。

【図6】光共振器のモード周波数とレーザ光の発振周波数との関係を示す概略スペクトル図。

【発明を実施するための形態】

【0026】

[第1の実施形態]

本発明に係るガス吸光分光測定装置の第1の実施形態について、添付図面を参照して説明する。

図1は、第1の実施形態のCRDS装置の要部の構成図である。図2は、本実施形態のCRDS装置において測定開始前の処理の手順の一例を示すフローチャートである。図3

50

は、本実施形態のCRDS装置において、レーザ光の周波数のフィードバック制御の際に得られるエラー信号の周波数依存性を示す図である。

【0027】

図1に示すように、本実施形態のCRDS装置は、レーザ光源部10を含むレーザ照射部1と、光共振器2と、主光検出器3と、を備える。光共振器2及び主光検出器3は、図5に示した従来一般的なCRDS装置における構成要素と同じであり、同じ符号を付してある。

【0028】

レーザ照射部1は、レーザ光源部10のほか、レーザ制御部11、周波数変換部12、発振部13、位相変調部14、光スイッチ15、偏光ビームスプリッタ16、1/4波長板17、副光検出器18、及び信号処理部19、を含む。

10

【0029】

周波数変換部12は、レーザ光源部10で生成された基本周波数(波長)のレーザ光をそのまま、又は2倍の周波数(2)のレーザ光に変換して、選択的に出射するものである。この出射するレーザ光の周波数の切替えは、機械的に又は電氣的に制御される。

具体的な例としては、周波数変換部12は、ガルバノミラー等の高速に光路を切替え可能である素子を用い、非線形光学結晶や擬似位相整合素子を通過する光路と通過しない光路とを切り替える、或いは、両方の光路に光を並行に入射させ、音響光学変調器(AOM=Acoust Optical Modulator)等を用いて一方の光路を選択的に遮断することで、得られるレーザ光の周波数を切り替える構成とすることができる。また別の例としては、擬似位相整合素子のように変換できる入射波長の許容範囲が非常に狭い素子を用いる場合には、その素子の温度変化によって波長変換効率を大きく変化させることができるので、それによって基本波と倍波を切り替えるようにすることもできる。

20

【0030】

位相変調部14は例えば、電氣的に光の屈折率を変化させることが可能な電気光学変調器(EOM=Electro-Optic Modulator)であり、発振部13から入力される変調信号に基づいて、周波数変換部12を介して入射されたレーザ光の周波数及び位相に変調を施すものである。

【0031】

光スイッチ15は図5中の光スイッチ101と同じであり、位相変調部14を介して入射されたレーザ光を短時間で遮断する光学素子である。偏光ビームスプリッタ16は、光スイッチ15を介して入射された光の一つの偏光成分(例えばS偏光)を選択的に透過させるとともに、1/4波長板17を介して戻って来た、入射光とは異なる偏光成分(例えばP偏光)の戻り光を内部の反射面で略直角方向に反射させるものである。

30

【0032】

1/4波長板17は、直線偏光状態と円偏光状態とを可逆的に変化させる光学素子であり、偏光ビームスプリッタ16から到来する光の偏光状態を変化させて光共振器2に入射させるとともに、該光共振器2から戻って来た光の偏光状態を再び変化させて偏光ビームスプリッタ16へと戻す。副光検出器18は偏光ビームスプリッタ16において反射された戻り光を検出可能な位置に設置され、その戻り光の強度に応じた電気信号を出力する。信号処理部19は機能ブロックとして、エラー信号生成部191とロック判定部192とを含む。レーザ制御部11は信号処理部19からの信号に応じてレーザ光源部10の発振周波数を調整する。

40

【0033】

本実施形態のCRDS装置の動作を説明する。

ここでは一例として、光共振器2の往復の共振器長Lが1m、周波数変換部12において周波数の変換を行わない場合のレーザ光の基本周波数に対するミラー21、22の反射率Rが99.99%、周波数変換部12において周波数変換を行うことで得られる周波数2のレーザ光を光共振器2に入射させた場合のミラー21、22の反射率Rが99%、であるとする。光共振器2における縦モードのパルス線幅は、次の(3)式で表すことがで

50

きる。

$$FWHM \{ c (1 - R) \} / 2 L R \dots (3)$$

(3)式は、ミラー 2 1、2 2 の反射率が縦モードのパルス線幅に大きな影響を及ぼすことを意味している。

【 0 0 3 4 】

(3)式によれば、周波数 における縦モードのパルス半値全幅は約 5 kHz、周波数 2 における縦モードのパルス半値全幅は約 0 . 5 MHz (= 5 0 0 kHz) となる。PDH法においてエラー信号が適切に得られる周波数範囲が縦モードのパルス半値全幅の 2 倍程度であると想定すると、エラー信号が取得可能である周波数範囲は、周波数 においては ± 5 kHz、周波数 2 においては $\pm 0 . 5$ MHz となる。即ち、光共振器 2 に導入するレーザ光の周波数を 2 倍に上げることで、エラー信号が取得可能である周波数範囲は約 1 0 0 倍に広がることになり、初期的なレーザ光の周波数の精度が大幅に緩和される。

10

【 0 0 3 5 】

図 3 には、基本周波数 の光を用いたときにエラー信号生成部 1 9 1 で生成されるエラー信号の周波数依存性を実線で示している。エラー信号の絶対値が小さくなる（ゼロに近づく）ようにレーザ光の発振周波数を制御する場合、エラー信号が周波数に対して単調に変化する周波数範囲でしか適切なエラー信号が得られない。図 3 に示したように、基本周波数 の光について適切なエラー信号が取得可能である周波数範囲は非常に狭い。これに対し、基本周波数 2 の光についてのエラー信号は点線で示すように、適切なエラー信号が取得可能である周波数範囲はかなり拡大される。当初のレーザ光の周波数がこの周波数範囲に入っていれば、PDH法によりレーザ光の周波数がモード周波数に一致するように調整される。そこで、本実施形態のCRDS装置では、CRDS測定を実施する際に以下の手順でレーザ光の周波数を調整している。

20

【 0 0 3 6 】

レーザ光の基本周波数が光共振器 2 のモード周波数に一致していない初期状態では、ロック判定部 1 9 2 は非ロック状態であることを示す信号を出力する。この信号を受けて周波数変換部 1 2 はレーザ光源部 1 0 から入射されたレーザ光の周波数を 2 倍に変換し、周波数 2 のレーザ光を出射させる（ステップ S 1 ）。

【 0 0 3 7 】

このレーザ光は、発振部 1 3 で生成される変調信号に基づいて位相変調部 1 4 で周波数変調され、光スイッチ 1 5、偏光ビームスプリッタ 1 6、及び 1 / 4 波長板 1 7 を経て光共振器 2 に照射される。偏光ビームスプリッタ 1 6 を通過する際に直線偏光状態である特定の偏光成分（例えば S 偏光）が選択され、1 / 4 波長板 1 7 を通過する際に直線偏光は円偏光に変換される。光共振器 2 に照射されたレーザ光は測定セル 2 0 内に入り一対のミラー 2 1、2 2 の間で往復反射するが、その光の一部は、入射側ミラー 2 1 を通してレーザ照射部 1 へと戻る。

30

【 0 0 3 8 】

この戻り光は 1 / 4 波長板 1 7 を経て偏光ビームスプリッタ 1 6 に達する。1 / 4 波長板 1 7 で円偏光から直線偏光に変換されると、先の入射時とは異なる偏光成分（例えば P 偏光）になるため、この戻り光は偏光ビームスプリッタ 1 6 の内部の面で反射されて副光検出器 1 8 へと向かう。副光検出器 1 8 は入射した戻り光の強度に応じた検出信号を出力する。戻り光に基づく検出信号は、光共振器 2 の共振モードに関する情報を含む。エラー信号生成部 1 9 1 は、この検出信号と発振部 1 3 から得られる変調信号とから、光共振器 2 のモード周波数とレーザ光の周波数 2 との差の情報を含むエラー信号を生成する。レーザ光の周波数 2 とモード周波数との差が小さいほどエラー信号（絶対値）は小さくなる。レーザ制御部 1 1 は上記エラー信号が小さくなるようにレーザ光源部 1 0 におけるレーザ光の発振周波数を制御する。即ち、PDH法によるフィードバック制御を実行することで、レーザ光の周波数 2 と光共振器 2 におけるモード周波数とを一致させる（ステップ S 2 ）。

40

【 0 0 3 9 】

50

なお、レーザ光の基本周波数 とモード周波数とが一致していて該レーザ光が光共振器 2 で共振する状態である場合、その 2 倍の周波数 2 のレーザ光も光共振器 2 で共振する。何故なら、光共振器 2 の共振条件は、共振周波数を f 、往復の共振器長を L としたとき、

$$f = n \cdot (c / L) \quad (\text{但し、} n \text{ は自然数}) \quad \dots (4)$$

であるから、基本周波数の光が共振する場合には、当然、その整数倍の周波数の光も共振することになる。

【 0 0 4 0 】

上述したように、光共振器 2 に導入されるレーザ光の周波数が 2 である場合の、エラー信号が取得可能である周波数範囲は $\pm 0.5 \text{ MHz}$ とかなり広い。そのため、レーザ光源部 10 におけるレーザ光の当初の発振周波数 の 2 倍の周波数とモード周波数との差が或る程度大きくても、つまりは発振周波数が高い精度で制御されていなくても、適切なフィードバック制御に必要なエラー信号を生成し周波数のロック動作を実施することができる。

10

【 0 0 4 1 】

エラー信号生成部 191 で生成されるエラー信号は、レーザ光の周波数 2 とモード周波数との差をリアルタイムで反映している。そこで、ロック判定部 192 は生成されたエラー信号に基づいて周波数 2 とモード周波数とのずれが所定の周波数範囲に収まっているか否かを繰り返し判定する（ステップ S3）。具体的には、周波数 2 においてエラー信号が取得可能である周波数範囲、例えばモード周波数 $\pm 5 \text{ kHz}$ に収まっているか否かを判定すればよい。ロック判定部 192 は、周波数ずれが所定の周波数範囲に収まる（ステップ S3 で Yes）とロック状態であることを示すロック検出信号を出力する。

20

【 0 0 4 2 】

上記ロック検出信号に応じて周波数変換部 12 は出射するレーザ光の周波数を 2 から、つまり基本周波数に切り替える（ステップ S4）。光共振器 2 の共振モードは周波数軸上で、周波数 0 から等周波数間隔の位置に現れる。したがって、レーザ光の周波数 2 においてその周波数とモード周波数とが十分に一致していれば、レーザ光の周波数が 2 に変化してもその周波数とモード周波数とが十分に一致している。そのため、周波数変換部 12 においてレーザ光の周波数が切り替えられたあとも、それ以前と同様に、PHD法によるフィードバック制御が継続され、レーザ光源部 10 でのレーザ光の発振周波数はモード周波数に十分に一致した状態に維持される（ステップ S5）。もちろん、このときに、ロック判定部 192 は、周波数ずれが所定の周波数範囲に収まっていることを示すロック検出信号を出力し続ける。

30

【 0 0 4 3 】

そして、光共振器 2 に導入するレーザ光の周波数を 2 に維持した状態で、CRDSによる測定を実施する（ステップ S6）。即ち、光共振器 2 の内部にレーザ光のパワーを蓄積したあとに光スイッチ 15 により光を遮断し、出射側ミラー 22 を通して漏出する光の強度変化を主光検出器 3 で検出する。このときには縦モードのパルス線幅が狭く、ミラー 21、22 の反射率は非常に高いので、高感度の測定を行うことができる。また、PDH法によりレーザ光の発振周波数がモード周波数に一致している状態が継続されるので、単位時間当たりの CRDS による測定の回数を増やすことができ、高い測定効率を達成することができる。

40

【 0 0 4 4 】

以上のように本実施形態の CRDS 装置では、レーザ光源部 10 でのレーザ光の発振周波数を高精度に制御することなく、高感度の CRDS の測定を行うことができる。また、レーザ光の発振周波数と光共振器 2 のモード周波数とを迅速に一致させることができるので測定を直ぐに開始することができると共に、単位時間当たりの測定回数を増やし測定効率を高めることができる。

【 0 0 4 5 】

また、広範囲の周波数領域に亘る CRD 信号を取得したい場合に、一定の周波数間隔で現れる各共振モードに対してレーザ光の発振周波数を順番に一致させていきながら各モード周波数における CRD 信号を取得していく方法がある。本実施形態の CRDS 装置では

50

、複数のモードの周波数それぞれに対してレーザ光の発振周波数を順番に迅速に一致させることができるので、上記方法により広範囲の周波数領域に亘るCRD信号を取得するのに有益である。

【0046】

なお、図1に示した構成において、光学素子を含む各部の配置は一例であり、例えば光スイッチ15を1/4波長板17と光共振器2との間に配置する等、その配置を適宜変更することは当然可能である。

【0047】

[第2の実施形態]

次に、本発明に係るガス吸光分光測定装置の第2の実施形態について、添付図面を参照して説明する。

10

図4は第2の実施形態のCRDS装置の要部の構成図である。このCRDS装置では、周波数 ω_1 のレーザ光と周波数 ω_2 のレーザ光とを切り替えて光共振器2に入射するのではなく、周波数が互いに異なる二つのレーザ光を同時に光共振器2に入射する構成となっている。

【0048】

図4に示すように、レーザ照射部4は、レーザ光源部40、光カプラ41、第2発振部42、第2位相変調部43、第2光サーキュレータ44、1/2波長板45、周波数変換部46、第1発振部47、第1位相変調部48、第1光サーキュレータ49、偏光ビームスプリッタ50、光スイッチ51、第1副光検出器52、第2副光検出器53、信号処理部54、及びレーザ制御部55、を含む。第1の実施形態の装置と同様に、信号処理部54は機能ブロックとして、エラー信号生成部541及びロック判定部542を含む。

20

【0049】

光カプラ41は入射した光を複数(ここでは二つ)に分割する光学素子であり、スプリッタでもよい。また、第1、第2光サーキュレータ49、44は、三つのポートを有する非往復式で且つ一方向型の光学素子である。即ち、第1ポートに入射された光は第2ポートへのみ出射され、第2ポートへ入射された光は第3ポートのみに出射される。また、1/2波長板45は、入射された直線偏光を所定角度だけ回転させて出射させる光学素子である。

【0050】

本実施形態のCRDS装置において、CRDS測定を実施する際の動作を説明する。
レーザ光源部40で生成された周波数 ω_1 のレーザ光は光カプラ41で2系統に分岐され、その一方は第2位相変調部43に、他方は1/2波長板45を通して周波数変換部46に導入される。第2発振部42で生成された変調信号に基づいて第2位相変調部43において、周波数 ω_1 のレーザ光の周波数(及び位相)は変調され、第2光サーキュレータ44を通して偏光ビームスプリッタ50に入射される。一方、1/2波長板45はレーザ光の直線偏光の偏光方位を所定角度だけ回転させることで、例えばS偏光をP偏光に変換する。周波数変換部46はこのレーザ光の周波数を ω_1 から2倍の $2\omega_1$ に変換し、第1位相変調部48は第1発振部47で生成された変調信号に基づいて、周波数 ω_2 のレーザ光の周波数を変調する。変調を受けたレーザ光は、第1光サーキュレータ49を通して偏光ビームスプリッタ50に入射される。

30

40

【0051】

偏光ビームスプリッタ50は、第2光サーキュレータ44を経て入射した周波数 ω_1 (但し変調されている)のレーザ光の特定の偏光成分(例えばS偏光)を選択的に透過させ光スイッチ51へ向かわせる。また、偏光ビームスプリッタ50は、第1光サーキュレータ49を経て入射した周波数 ω_2 (但し変調されている)のレーザ光の特定の偏光成分(例えばP偏光)を選択的に反射させ、光スイッチ51に向かわせる。したがって、光スイッチ51が開放状態であるとき、光共振器2には、周波数 ω_1 でS偏光であるレーザ光と周波数 ω_2 でP偏光であるレーザ光とが共に導入される。

【0052】

50

周波数 f の S 偏光であるレーザ光と周波数 $2f$ の P 偏光であるレーザ光とは一対のミラー 21、22 間で往復反射するが、その光の一部は入射側ミラー 21 を透過して偏光ビームスプリッタ 50 に戻る。この戻り光の偏光状態は元の照射光の偏光状態と同じである。そのため、周波数 f の S 偏光である戻り光は偏光ビームスプリッタ 50 を透過して第 2 光サーキュレータ 44 まで戻り、第 2 光サーキュレータ 44 により進行方向が変えられて第 2 副光検出器 53 に入射する。一方、周波数 $2f$ の P 偏光である戻り光は偏光ビームスプリッタ 50 で反射されて第 1 光サーキュレータ 49 まで戻り、第 1 光サーキュレータ 49 で進行方向が変えられて第 1 副光検出器 52 に入射する。

【0053】

上述したように、波長 λ の光と波長 2λ の光はいずれも光共振器 2 において共振する。したがって、第 1 副光検出器 52 による検出信号及び第 2 副光検出器 53 による検出信号はいずれも、光共振器 2 の共振モードに関する情報を含む。信号処理部 54 においてエラー信号生成部 541 は、第 2 副光検出器 53 による検出信号と第 2 発振部 42 による変調信号とから、光共振器 2 のモード周波数とレーザ光の周波数 f との差の情報を含む第 2 エラー信号を生成するとともに、第 1 副光検出器 52 による検出信号と第 1 発振部 47 による変調信号とから、光共振器 2 のモード周波数とレーザ光の周波数 $2f$ との差の情報を含む第 1 エラー信号を生成する。

【0054】

レーザ光の基本周波数が光共振器 2 のモード周波数に一致していない初期状態では、ロック判定部 542 は非ロック状態であることを示す信号を出力する。この場合、エラー信号生成部 541 は、周波数 $2f$ の戻り光に基づくエラー信号を選択してレーザ制御部 55 に送り、レーザ制御部 55 はこのエラー信号が小さくなるようにレーザ光源部 40 におけるレーザ光の発振周波数を制御する。即ち、周波数 $2f$ のレーザ光を用いた PDH 法によるフィードバック制御を実行することで、レーザ光の発振周波数とモード周波数とを一致させる。

【0055】

ロック判定部 542 は上記二つのエラー信号から、レーザ光の発振周波数とモード周波数とのずれが所定の周波数範囲に収まっているか否かを判定し、周波数ずれが所定の周波数範囲に収まる状態になるとロック検出信号を出力する。この信号を受けてエラー信号生成部 541 は、周波数 $2f$ の戻り光に基づくエラー信号ではなく、周波数 f の戻り光に基づくエラー信号を選択してレーザ制御部 55 に送るように動作を切り替える。このように切り替えられたあとは、周波数 f のレーザ光を用いた PDH 法によるフィードバック制御が実行され、レーザ光源部 10 でのレーザ光の発振周波数はモード周波数に十分に一致した状態に維持される。

【0056】

このようにレーザ光源部 10 でのレーザ光の発振周波数がモード周波数に十分に一致した状態で CRDS の測定が実施される。なお、CRDS の測定は周波数が $2f$ のレーザ光を用いても行うことができるが、周波数 $2f$ では周波数が f である場合に比べてミラー 21、22 の反射率が低いため、リングダウン時間が短く、その分だけ測定精度及び感度が低くなる。周波数が $2f$ であるレーザ光を用いて CRDS の測定を行うことの利点は実質的でないため、CRDS の測定は周波数が f であるレーザ光を用いて行えばよい。

【0057】

[第 2 の実施形態の変形例]

上記第 2 の実施形態の CRDS 装置では、第 1 の実施形態の CRDS 装置と同様に、PDH 法によるフィードバック制御に利用する光の周波数を当初の $2f$ から f へと切り替えている。これは一般に、レーザ光の発振周波数とモード周波数が一旦一致したあとは、周波数 f の光を用いた PDH 法によるフィードバック制御を実施したほうが、レーザ光の発振周波数の揺らぎを抑えて高い精度を維持することができるためである。但し、周波数 $2f$ の光を用いた PDH 法によるフィードバック制御を行っている状態でも、レーザ光の発振周波数の揺らぎが測定精度のうえで実質的に問題になることはあまりない。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 8 】

そこで、第2の実施形態のCRDS装置では、PDH法によるレーザ光の発振周波数のフィードバック制御は周波数2の光を利用して実施し、周波数の光について得られたエラー信号はCRDSによる測定が可能な状態になったことの判定にのみ利用するようにその構成を変更してもよい。具体的には、エラー信号生成部541はレーザ制御部55に送るエラー信号を常に周波数2の光を利用したエラー信号にし、ロック判定部542は周波数の光について得られたエラー信号が所定の範囲に収まったときにロック検出信号を出力し、図示しない制御部は、そのロック検出信号が得られてからCRDSの測定を実施する。こうした構成でも、第1、第2の実施形態のCRDS装置とほぼ同様に、レーザ光の発振周波数の高精度の制御を行うことなく、高精度及び高感度の測定を実施することができる。

10

【 0 0 5 9 】

なお、上記実施形態では、レーザ光の発振周波数（基本周波数）を2倍にしていたが、これは2以外の自然数倍にしてもよい。このようにレーザ光の周波数を変化させても、光共振器2で共振が生じることが上記説明から明らかである。ただし、実際には、基本周波数を2倍にするだけで適切なエラー信号が取得できる周波数範囲は大幅に拡大されるため、基本周波数を3以上の自然数倍にする必要性は実質的にない。

【 0 0 6 0 】

また、光共振器2で共振する光の周波数は往復の共振器長に依存するから、第1の実施形態の装置では、レーザ光の発振周波数をn倍にする際にそのnが自然数から若干ずれていても光共振器2の往復の共振器長を微調整することで共振を生じさせることができる。したがって、レーザ光の発振周波数を厳密に自然数倍する構成でなくてもよい。

20

【 0 0 6 1 】

また、上記実施形態はいずれも本発明の各態様の一例であり、本発明の趣旨の範囲で適宜に変形や修正、追加などを行っても、本願特許請求の範囲に包含されることは明らかである。

【 0 0 6 2 】

〔 種々の態様 〕

以上、図面を参照して本発明における実施形態を説明したが、上記複数の実施形態及びその変形例は、以下の態様の具体例であることが当業者には容易に理解される。

30

【 0 0 6 3 】

（第1項）本発明の一態様に係るガス吸光分光測定装置は、レーザ照射部と、被測定ガスが収容される測定セルを含む、前記レーザ照射部から照射された光を共振させる光共振器と、該光共振器から取り出された光を検出する第1検出部と、を具備し、キャビティリングダウン吸収分光法により前記被測定ガス中の成分濃度を求めるガス吸光分光測定装置であって、前記レーザ照射部は、

発振周波数の調整が可能であるレーザ光源と、

前記レーザ光源から放出されたレーザ光をその周波数のまま又は周波数を所定倍して選択的に出射可能である周波数変換部と、

前記周波数変換部から出射されたレーザ光を、変調信号を用いて周波数変調する周波数変調部と、

40

前記光共振器に照射された前記周波数変調部による変調後のレーザ光に対する、該光共振器からの戻り光を検出する第2検出部と、

前記第2検出部による検出信号と前記変調信号とに基づいて、前記光共振器に照射されたレーザ光の周波数と該光共振器のモード周波数との差を反映したエラー信号を生成し、該エラー信号に応じて前記レーザ光源の発振周波数を制御するフィードバック制御部と、を備えるものである。

【 0 0 6 4 】

第1項に記載のガス吸光分光測定装置では、例えば装置の起動直後等の、レーザ光源におけるレーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とが一致していない状態では、そ

50

のレーザ光の基本周波数ではなく、それを所定倍した周波数のレーザ光を利用したPDH法によるフィードバック制御により、レーザ光源の発振周波数がモード周波数に一致するように調整される。

【0065】

所定倍の周波数における光共振器の縦モードのパルス幅は基本周波数におけるそれよりも広いため、PDH法によるフィードバック制御を行うのに適切なエラー信号が得られる周波数範囲が広がる。それにより、レーザ光の周波数とモード周波数との差が或る程度大きくても、レーザ光の周波数がモード周波数に一致するように良好なフィードバック制御が行われ、該レーザ光の発振周波数は調整される。そして、レーザ光の発振周波数がモード周波数に十分に一致する状態になったときに、基本周波数のレーザ光を利用したPDH法によるフィードバック制御に移行し、例えばレーザ光の発振周波数がモード周波数に十分に一致した状態で測定が実行される。

10

【0066】

このようにして第1項に記載のガス吸光分光測定装置によれば、レーザ光源におけるレーザ光の発振周波数を高い精度で制御することなく、レーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とを迅速に一致させ、それが維持された状態で高い精度及び感度のCRDS測定を実施することができる。レーザ光の発振周波数を高い精度で以て制御する必要がなくなることで、装置のコストを抑えることができる。また、レーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とを迅速に一致させてその状態を維持することができるので、単位時間あたりに実施可能な測定の回数を増やし測定効率を向上させることができる。

20

【0067】

(第2項)本発明の他の態様に係るガス吸光分光測定装置は、レーザ照射部と、被測定ガスが収容される測定セルを含む、前記レーザ照射部から照射された光を共振させる光共振器と、該光共振器から取り出された光を検出する第1検出部と、を具備し、キャビティリングダウン吸収分光法により前記被測定ガス中の成分濃度を求めるガス吸光分光測定装置であって、前記レーザ照射部は、

発振周波数の調整が可能であるレーザ光源と、

前記レーザ光源から放出されたレーザ光を複数に分岐する分岐部と、

前記分岐部で分岐された一つのレーザ光を周波数を所定倍して出射する周波数変換部と、

前記周波数変換部から出射されたレーザ光を、第1変調信号を用いて周波数変調する第1の周波数変調部と、

30

前記分岐部で分岐された他のレーザ光を、第2変調信号を用いて周波数変調する第2の周波数変調部と、

前記第1の周波数変調部により変調された第1のレーザ光と前記第2の周波数変調部により変調された第2のレーザ光とをそれぞれ光学的に分離可能な態様で共に前記光共振器に入射させる合一部と、

前記光共振器に照射された前記第1のレーザ光に対する該光共振器からの戻り光、及び、該光共振器に照射された前記第2のレーザ光に対する該光共振器からの戻り光を、それぞれ独立に検出する第2検出部と、

前記第2検出部による検出信号と前記第1変調信号とに基づいて、前記第1のレーザ光の周波数と前記光共振器のモード周波数との差を反映した第1のエラー信号を生成し、該第1のエラー信号に応じて前記レーザ光源における発振周波数をフィードバック制御し、それにより該発振周波数を前記光共振器のモード周波数に合わせたあと、該フィードバック制御の状態を維持する、又は、前記第2のレーザ光に由来する戻り光に対する前記第2検出部による検出信号と前記第2変調信号とに基づいて、該第2のレーザ光の周波数と前記光共振器のモード周波数との差を反映した第2のエラー信号を生成し、該第2のエラー信号に応じたフィードバック制御を行うことにより前記レーザ光源における発振周波数の制御を続行するフィードバック制御部と、

40

を備えるものである。

【0068】

50

上記第 1 項に記載のガス吸光分光測定装置では、レーザ光源におけるレーザ光の発振周波数をフィードバック制御するループ中においてレーザ光の周波数が切り替えられるのに対し、上記第 2 項に記載のガス吸光分光測定装置では、レーザ光源におけるレーザ光の発振周波数をフィードバック制御するループ中においてレーザ光源でのレーザ光の発振周波数の制御に利用されるエラー信号が切り替えられる。つまりは光の切替えではなく電気信号が切り替えられる。したがって、第 2 項に記載のガス吸光分光測定装置においても、装置の起動直後等の、レーザ光源におけるレーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とが一致していない状態では、基本周波数を所定倍した周波数のレーザ光を利用した P D H 法によるフィードバック制御により、レーザ光源の発振周波数がモード周波数に一致するように調整される。そして、レーザ光の発振周波数がモード周波数に十分に一致する状態になったときに、基本周波数のレーザ光を利用した P D H 法によるフィードバック制御に移行し、例えばレーザ光の発振周波数がモード周波数に十分に一致した状態で測定が実施される。

10

【 0 0 6 9 】

第 2 項に記載のガス吸光分光測定装置によれば、第 1 項に記載の装置と同様に、レーザ光源におけるレーザ光の発振周波数を高い精度で制御することなく、レーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とを迅速に一致させ、それが維持された状態で高い精度及び感度の C R D S 測定を実施することができる。レーザ光の発振周波数を高い精度で制御する必要がなくなることで、装置のコストを抑えることができる。また、レーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とを迅速に一致させてその状態を維持することができるので、単位時間あたりに実施可能な測定の回数を増やし測定効率を向上させることができる。

20

【 0 0 7 0 】

(第 3 項) 本発明の一態様に係る周波数ロック方法は、レーザ光源の発振周波数を光共振器の共振周波数にロックする周波数ロック方法であって、

前記レーザ光源によるレーザ光の周波数を、前記発振周波数の整数倍に変換する第 1 工程と、

周波数が変換された前記レーザ光を、変調信号を用いて変調する第 2 工程と、

変調された前記レーザ光を前記光共振器に入射させる第 3 工程と、

前記光共振器からの戻り光を検出する第 4 工程と、

検出した前記戻り光と前記変調信号とに基づいて、前記光共振器に入射したレーザ光の周波数と前記光共振器のモード周波数との差に応じたエラー信号を生成する第 5 工程と、

前記エラー信号をフィードバックして前記レーザ光源の発振周波数を制御する第 6 工程と、

を実行するものである。

30

【 0 0 7 1 】

第 3 項に記載の周波数ロック方法によれば、レーザ光源におけるレーザ光の発振周波数を高い精度で制御することなく、レーザ光の発振周波数と光共振器のモード周波数とを迅速に一致させ、その周波数をロックさせることができる。

【 0 0 7 2 】

(第 4 項) また本発明の一態様に係るガス吸光分光測定方法は、第 3 項に記載の周波数ロック方法を用い、

前記レーザ光源の発振周波数を前記光共振器のモード周波数に合わせたあと、前記第 6 工程におけるフィードバック制御を維持しつつ、前記レーザ光源からのレーザ光を用いたキャビティリングダウン吸収分光法による測定を実行する第 7 工程、

をさらに実行するものである。

40

【 0 0 7 3 】

(第 5 項) 本発明の他の態様に係るガス吸光分光測定方法は、第 3 項に記載の周波数ロック方法を用い、

前記レーザ光源の発振周波数を前記光共振器のモード周波数に合わせたあと、前記レー

50

ザ光源から放出された基本周波数のレーザー光を、変調信号を用いて周波数変調して前記光共振器に照射し、その戻り光に基づくフィードバック制御を実施しつつ、前記レーザー光源からの基本周波数のレーザー光を用いたキャビティリングダウン吸収分光法による測定を実行する第7工程、

をさらに実行するものである。

【0074】

第4項及び第5項に記載のガス吸光分光測定方法によれば、レーザー光の発振周波数がモード周波数に十分に一致した状態で測定が実施されるので、高い精度及び感度のCRDS測定を実施することができる。

【符号の説明】

【0075】

- 1、4 ... レーザ照射部
- 10、40 ... レーザ光源部
- 11、55 ... レーザ制御部
- 12、46 ... 周波数変換部
- 13、42、47 ... 発振部
- 14、43、48 ... 位相変調部
- 15、51 ... 光スイッチ
- 16、50 ... 偏光ビームスプリッタ
- 17 ... 1/4波長板
- 18、52、53 ... 副光検出器
- 19、54 ... 信号処理部
- 191、541 ... エラー信号生成部
- 192、542 ... ロック判定部
- 2 ... 光共振器
- 20 ... 測定セル
- 21、22 ... ミラー
- 3 ... 主光検出器
- 41 ... 光カプラ
- 44、49 ... 光サーキュレータ
- 45 ... 1/2波長板

10

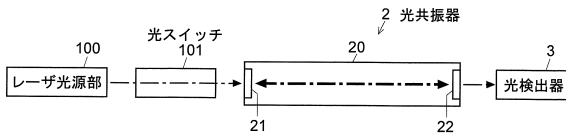
20

30

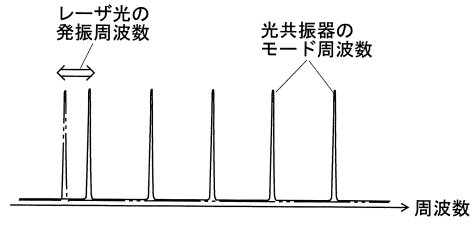
40

50

【図5】



【図6】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2015-032700(JP,A)
米国特許第08154727(US,B2)
特表2018-502289(JP,A)
国際公開第2014/106940(WO,A1)
米国特許出願公開第2014/0125993(US,A1)
特開平11-121847(JP,A)
特開2003-168841(JP,A)
特開平08-204275(JP,A)
特開2019-114721(JP,A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
G01N 21/00 - G01N 21/61
H01S 3/10 - H01S 3/139
G02F 1/37 - G02F 1/383
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)