

光強度変動補償機構を備えた参照共振器制御方法の開発

和 泉 勇 輝 埼玉大学大学院教育学研究科
大 向 隆 三 埼玉大学教育学部自然科学講座

キーワード：レーザー、光学共振器、共鳴周波数、光強度補償、除算回路

1. はじめに

レーザー技術の研究は「量子エレクトロニクス」の分野に属するものである。量子エレクトロニクスとは、原子・分子・原子核などと電磁波との相互作用を通信・制御あるいは測定などの目的に役立てる研究分野である。レーザー技術は20世紀前半から急速に進展してきており、世界初のレーザーが開発されたのが1960年と非常に新しい研究領域である。レーザーの前身となるメーザーがタウンズらによって1954年に開発され、1960年にはメイマンらにより世界初のレーザーであるルビーレーザーが開発された¹⁾。レーザーは開発以前の光と比べて単色であること、指向性・集光性に優れること、コヒーレントな光であることなど様々な特徴を持つ。現代では医療や通信、工学などをはじめとして様々な分野で利用されている²⁾。

さらに、レーザーは現在に至るまで発振周波数の拡大や狭スペクトル化など改善もなされており、その恩恵を受けて原子分光学の光源としても利用されている。原子分光学とは、原子がその種類に特有の不連続なエネルギー準位を持つことを利用し、様々なエネルギーの光を原子へ照射してそのときの光の吸収や放出から、原子の特性を知る研究分野である。新たに原子の詳細な分光学的情報を得ることができれば、これまでより高精度の原子時計の実現、量子状態の重ね合わせを利用して並列コンピューティングすることで、これまでにない計算速度を実現できると考えられる量子コンピュータの実現が可能になると期待される³⁾。

レーザーは発振を行うために、その内部に2枚の鏡を向かい合わせた共振器を利用している。この共振器の共鳴周波数とレーザー媒質である物質の共鳴周波数が一致したときに、光が共振器内で共鳴して発振が起こる。しかし、周囲の温度変化や振動などの外部環境の変化によって共振器長は容易に変化する。共振器長が変化すると、それに伴ってレーザーの発振周波数が変動してしまう。原子の共鳴周波数幅は非常に狭いため、レーザーの発振周波数が僅かであっても変動してしまうと原子を励起することができなくなり、測定を継続できなくなる致命的な問題となる。そのため、原子分光用光源にレーザーを用いるために、その発振周波数を所望の値に保つための方法の開発、研究が精力的に行われている。

レーザーの発振周波数を制御するためには何らかの方法で参照信号を得て、これを基準の周波数として変動したレーザーの発振周波数と基準の周波数の差からエラー信号を得ることで、フィードバック制御を行う必要がある。この参照信号を得る方法としては代表的に2つの方法が用いられてきた。1つは原子の飽和吸収スペクトルを利用する方法、もう1つはレーザーの外部にレーザーの発振周波数制御用の参照共振器を用いる方法である。しかし、原子の飽和吸収スペクトルを利用する方法は高安定であるが汎用性に乏しく、参照共振器を用いる方法では汎用性には富んでいるが、レーザー内部の共振器と同様に外部環境によって共鳴周波数が不安定というデメリット

トがある。そこで、本研究室では高安定かつ汎用性の高いレーザーの発振周波数制御を可能にするために、Rb原子の飽和吸収スペクトルを利用して安定化した近赤外LDを参照信号として、参照共振器の共鳴周波数の安定化した。その結果、参照共振器として用いる共焦点型ファブリーペロー共振器の共鳴周波数を少なくとも15分間に渡って3.3MHz以下の安定度で制御することに成功した⁴⁾。

しかし、この方法にも未だ欠点が残されている。この方法では、参照共振器の透過光信号を一定電圧減算することで0Vとの交点を作り、これをロッキングポイントとして設定して参照共振器の共鳴周波数を安定化している。制御中に何らかの要因によって原子によって安定化したレーザーの光強度が減少すると、0Vとの交点が当初の共鳴周波数から変化してしまいロッキングポイントを一定に保つことができない。さらにレーザー光強度が減少すると、ついには透過光信号と減算信号の差が0より小さくなり、ロッキングポイントが設定できなくなり制御が維持できなくなる。そこで、本研究ではこの問題を解決するために、除算回路を用いて新たに光源の光強度の変動を補償する機構を組み入れた技術を提案し、その開発を試みた。具体的には、レーザー光をハーフミラーで2つに分け、ファブリーペロー共振器から得られる透過光信号と光強度変動モニター信号を得る。ここで、共焦点型ファブリーペロー共振器の透過光強度 I_t は入射光強度を I_i 、共振器に用いたミラーの反射率を r 、共振器長を d 、入射する真空中の光の波長を λ 、その波数を k とすれば、以下のようになる⁵⁾。

$$I_t = \frac{(1-r)^4}{1+r^8 - 2r^4 \cos(4kd)} I_i \quad (1)$$

(1) 式から、透過光強度は入射光強度に比例する。そのため、レーザー光強度が変動すると透過光信号と光強度変動モニター信号は同じ割合で変動する。そこで、透過光信号電圧をモニター信号電圧で割り算した出力を得ることができれば、その出力は入射光強度の変動に依存せず常に一定となる。この出力を一定電圧減算してエラー信号を得れば、入射光強度が変動してもロッキングポイントの変動が起きることなく制御を維持することができると思われる。そのために必要な除算回路を製作し、光強度の変動を補償することができる参照共振器制御の実現を目指す。

2. 除算回路の製作と動作確認

本研究では除算回路を用いて光強度補償を目指す。まず、必要な除算回路を製作するにあたり、ANALOG DEVICES社製のICであるAD538を使用した。このICは、ワンチップで回路を簡易に製作することができる上に、ICの出力誤差が0.1%程度と高精度である特徴を持つ。図1にAD538を用いた除算回路の回路図を示す。この回路の出力電圧は V_{out} は、入力電圧 V_1 、 V_2 を用いると式(2)のように表すことができる。

$$V_{out} = 10 \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

また、AD538のデータシート上の性能は表1の通りである。スルーレートとは回路の応答速度の指標であり、出力電圧の変化量を変化に要した時間で割ることで求めることができる。製作した除算回路から式(2)の出力を得ることができるか、また正常動作する入力電圧の範囲を確かめるための実験と、図1の除算回路のスルーレートを求めるための実験を行った。まず、式(2)の

出力を得られるか確かめるために、 V_1 、 V_2 に同じ大きさの直流電圧を入力し、そのときの出力電圧を測定した。図2は出力電圧の測定結果である。 V_1 、 V_2 には0.100Vから14.98Vの範囲で直流電圧を入力した。式(2)の出力が得られていれば、 V_1 、 V_2 が同じ大きさであることから10Vで一定の信号が得られる。しかし、実際には入力電圧が0.100Vから4.08Vの範囲では9.95V、5.82Vから14.98Vの範囲では9.96Vとなった。

この結果から、データシート上の出力式(2)と実際の出力式の係数は一致していないと考えられる。しかし、入力電圧を変化させても出力電圧はほぼ一定であることから、製作した除算回路は入力電圧が0.100Vから14.98Vの範囲では正常に動作していることが確認できた。データシートには入力電圧が10V以下の範囲で正常に動作すると記載されていたが、実際にはそれより広い入力電圧の範囲で動作していた。

続いて、製作した除算回路のスルーレートを求めるために V_1 に一定の直流電圧を入力し、 V_2 に発振器から矩形波(オフセット+4.12V、周波数1kHz、振幅2.36V)を入力した。このとき、矩形波の変化に伴って変化する除算回路の出力電圧を測定し、その変化の大きさと変化に要した時間からスルーレートを求めた。図3は測定結果である。矩形波の変化に伴って除算回路の出力電圧が8.4V変化し、この変化に要した時間は6.10 μ sであった。この結果から、AD538のスルーレートを求めると1.4V/ μ sとなり、データシート上のスルーレートと本実験から求めたスルーレートは一致した。これらの結果から、製作した回路が本研究で用いる除算回路として適しているか考察する。

レーザー光強度が変動する要因としてはレーザー内部や周囲の温度変化が挙げられる。これらの温度変化が起きる要因としては、レーザーが発振を続けることによる熱の発生や、空調設備によるものが挙げられる。しかし、これらの要因でマイクロ秒のオーダーで温度変化が急激に起きるとは考えにくいことから、この除算回路のスルーレートは本研究で用いるためには十分なものであると考えられる。また、本研究では制御回路や除算回路の動作電源として ± 15 Vの直流電源を用いる。そのため各回路が動作する電圧は最大でも15Vであり、今回製作した除算回路の動作範囲は十分なものであると考えられる。これらのことから、今回製作した除算回路は本研究に適した

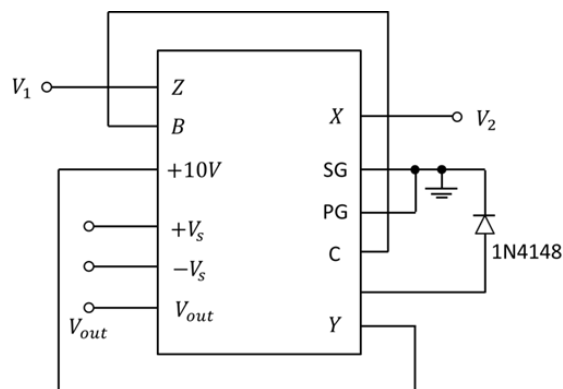


図1 AD538を用いた除算回路の回路図

表1 AD538のデータシート上の性能

正常動作可能な入力電圧	スルーレート
~10V	1.4 V/ μ s

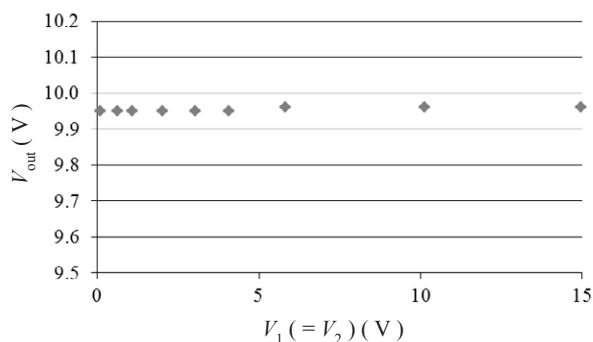


図2 $V_1 = V_2$ としたときの除算回路の出力電圧

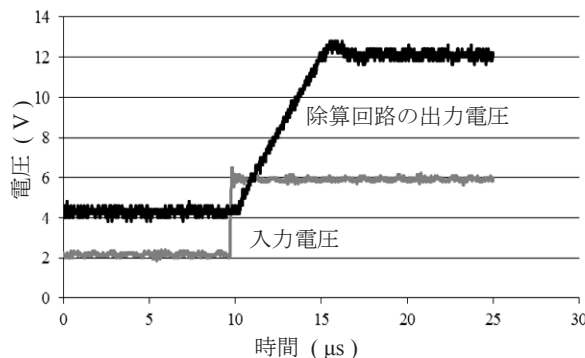


図3 矩形波を入力したときの除算回路の出力電圧

ものであり、この回路を用いて光強度の変動の補償を目指すこととした。

3. レーザー光強度を補償可能なファブリーペロー共振器の共鳴周波数の安定化制御

3-1 光強度を補償しないときの共鳴周波数の安定化制御

本研究ではファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化するためにPI制御回路を利用する。PI制御とは、比例 (P) 制御と積分 (I) 制御からなるフィードバック制御の1つである。PIそれぞれの操作によって設定値と実測値の差 (偏差) をなくすことで、ファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化することができる。そこで、後に除算回路による光強度を補償したときの制御について評価をするために、従来の方法でファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化し、そのときの安定度を求めた。図4に実験の配置図を示す。

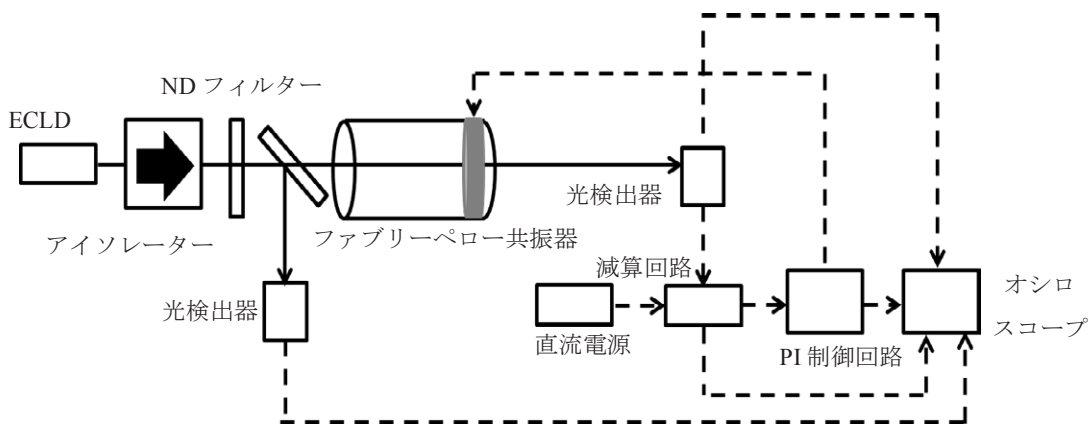


図4 従来のPI制御のみによる共振器の共鳴周波数安定化実験配置図

レーザー光をアイソレーターに通した後にハーフミラーで2つに分ける。1つはファブリーペロー共振器へ照射し透過光信号電圧を、もう1つからは光強度モニター信号電圧を得た。透過光信号電圧は減算回路へ入力し、透過光信号電圧から直流電源から得た一定電圧を減算しエラー信号電圧を得た。得られたエラー信号はPI制御回路に入力してフィードバック信号電圧を得て、この電圧をファブリーペロー共振器に備え付けた piezo素子にフィードバックすることで、ファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化した。PI制御によって共鳴周波数が正常に安定化されていれば、透過光信号電圧は中心値が一定の変動幅をもった信号になり、その変動幅から安定度を求めることができる。そこで、透過光信号電圧を測定して制御が正常にできているか、またその安定度はどの程度であるかを調べた。

図5は透過光信号電圧の測定結果である。制御開始前に使用した半導体レーザーの発振周波数を微調整してファブリーペロー共振器の共鳴周波数に近付けた後、PI制御回路を減算回路に接続したところ、透過光信号電圧は0.012Vを中心とした振幅0.005Vの変動幅をもった信号となった。この結果から、ファブリーペロー共振器の共鳴周波数の安定化が正常に開始されたと考えられる。そこで、この時の共鳴周波数の安定度を透過光信号電圧の変動幅から求める。図6はファブリーペロー共振器の piezo素子に三角波を印加すると得られる透過光電圧のスペクトルである。2つのフリンジピーク間隔はファブリーペロー共振器のFSRであり250MHzに相当する。制御開始後の透過光信号電圧の最大値は0.0168V、最小値は0.0064Vであった。この最大・最小値の幅に対応する周波数幅とFSRを比べることで共鳴周波数の安定度を求めたところ、1.33MHzであること

がわかった。典型的には原子の自然幅が十数メガヘルツ程度であり、この値と比べても高い安定度で共鳴周波数を安定化できていると言える。また、この後2時間に渡り制御を続けたところ、同じ安定度でファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化することができた。以上のことから、入射光強度が変動しなければ、従来のPI制御によってファブリーペロー共振器の共鳴周波数を少なくとも2時間に渡り1.33MHzの安定度で安定化することができることがわかった。

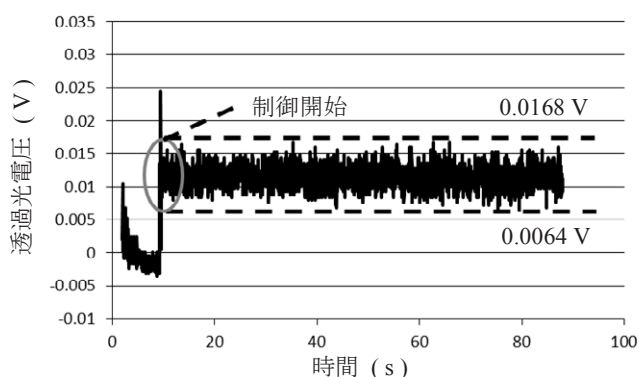


図5 制御開始直後の透過光信号電圧

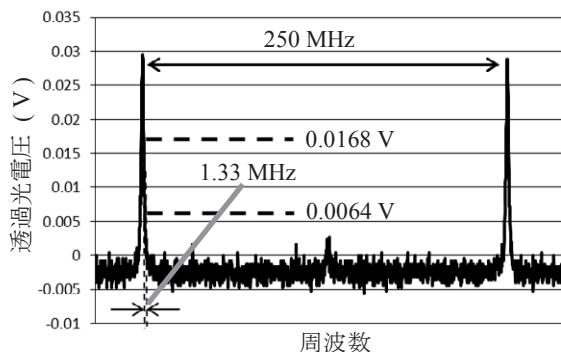


図6 透過光電圧スペクトルと制御時における透過光信号電圧幅との比較

次に、図4と同様の実験配置でファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化した後に、NDフィルターを用いて人為的にファブリーペロー共振器への入射光強度を減少させた。一般に共鳴周波数の安定化制御が維持できていれば、フィードバック信号電圧は連続的に変化する信号となり、制御が維持できなくなると急激に変化する。そこで、このときのフィードバック信号電圧を測定することで、入射光強度が減少したときの共鳴周波数の安定化への影響を考察した。図7はフィードバック信号電圧の測定結果である。はじめ、PI制御回路を切断していたため0 Vであったフィードバック信号は、PI制御回路を接続した瞬間に-3 Vに変化してそのまま連続的に変化する信号となった。このことから、共鳴周波数の安定化が正常に開始されたと考えられる。その後、NDフィルターによってファブリーペロー共振器への入射光強度を減少させたところ、モニター信号が0.054Vになった瞬間にフィードバック信号が-13Vへと急激に変化した。このときの入射光強度は、モニター信号が当初0.120Vであったことから当初の45.0%であった。よって、入射光強度が当初の45.0%になった瞬間にファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化できなくなったと考えられる。制御が維持できなくなった要因としては、入射光強度が減少することで得られる透過光電圧が小さくなり、透過光電圧ピークから減算回路によって減算した一定電圧の差が0 Vを下回ってしまい、ロッキングポイントが設定できなくなったことが挙げられる。

以上の結果から、従来のPI制御を主とした入射光強度の変動を補償する機構を含まないファブリーペロー共振器の共鳴周波数安定化制御では、透過光電圧ピークと減算した電圧の差が0 Vを下回るような入射光強度（本実験で設定したロッキングポイントであれば当初の45.0%）に達した段階でファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化できなくなることが確認できた。また、共鳴周波数を安定

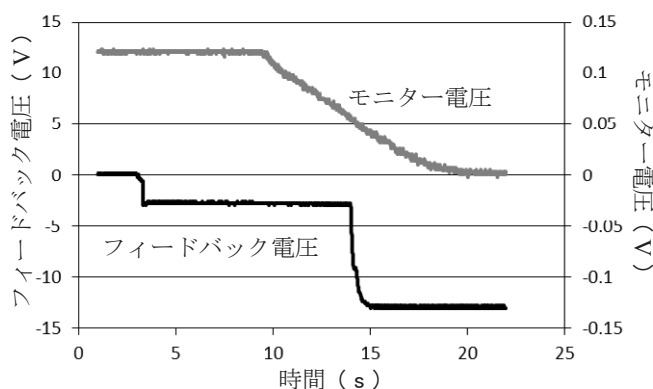


図7 光強度減少時のフィードバック信号電圧

化できなくても、入射光強度の減少に伴ってロッキングポイントの変動は生じていると考えられ、ファブリーペロー共振器を安定化するという目的に適う制御はなされていないと考えられる。

3-2 除算回路による光強度補償を兼ね備えた共鳴周波数の安定化制御

前節の結果を踏まえて、除算回路によって光強度の変動を補償した上でPI制御によるファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化した。図8は実験の配置図である。図4の配置で行った実験とは、透過光信号電圧とモニター信号電圧を除算回路に入力し、その出力を減算回路に入力している点が異なる。前節の実験と同様に、ファブリーペロー共振器の共鳴周波数の安定化を開始した後にNDフィルターを用いてファブリーペロー共振器への入射光強度を減少させた。このときのフィードバック信号電圧を測定して制御の維持が可能な入射光強度の範囲について、除算回路の出力電圧を測定して共鳴周波数の安定度とロッキングポイントについて考察した。

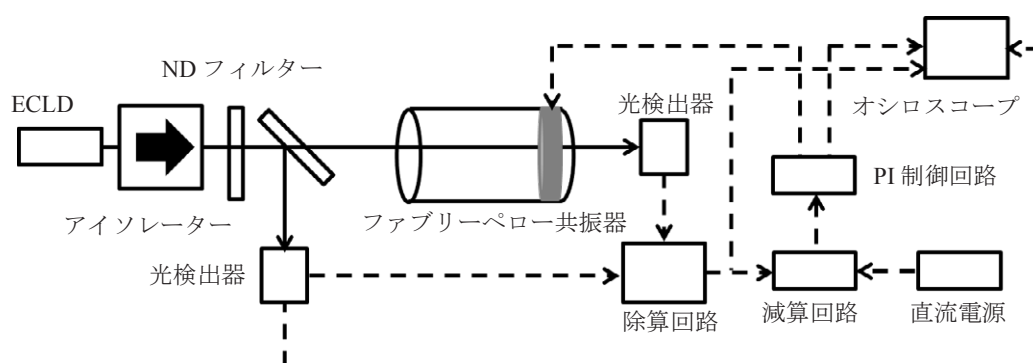


図8 除算回路により光強度を補償した共鳴周波数安定化実験配置図

図9はフィードバック信号の測定結果である。最初0Vであったフィードバック信号は、PI制御回路を接続した瞬間におよそ-2Vの信号となり、連続的に変化する信号となった。このことから共鳴周波数の安定化が正常に開始されたと考えられる。その後、NDフィルターを用いてファブリーペロー共振器への入射光強度を減少させたところ、モニター電圧が0.006Vになるまでフィードバック信号は連続的に得られ、モニター電圧がこの大きさに達した瞬間に急激に変化した。入射光強度を減少させる前のモニター電圧が0.135Vであったことから、入射光強度が当初の4.4%になるまで共鳴周波数を安定化できていたと考えられる。ファブリーペロー共振器への入射光強度の変動を補償しないと、入射光強度が当初のおよそ半分（前節の場合当初の45.0%）になると共鳴周波数を安定化できなくなっていたが、除算回路によって入射光強度の減少を補償すること

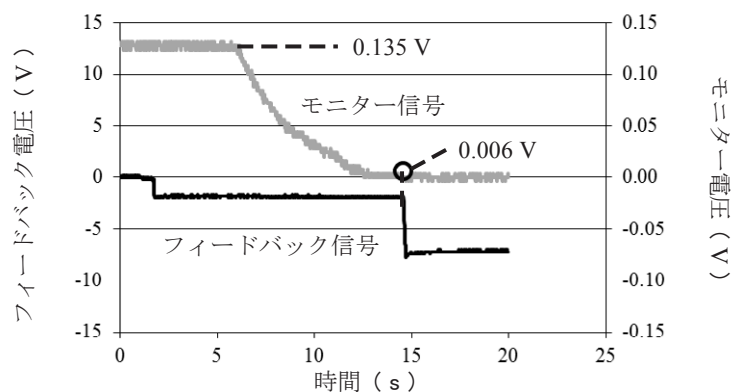


図9 光強度補償時のフィードバック信号電圧

で入射光強度が当初の4.4%という極めて弱い入射光強度になるまで共鳴周波数を安定化することが可能となり、入射光強度を補償しない場合に比べて制御可能な入射光強度の範囲が格段に広がった。

次に入射光強度の減少を補償したときの除算回路の出力電圧を測定した。入射光強度を補償できていれば、透過光電圧とモニター電圧が同じ割合で変化するため、除算回路の出力電圧は入射光強度が減少しても中心値が一定の変動幅を持った信号となると考えられる。実際に測定した除算回路の出力電圧は図10の黒線のようになった。最初0 Vであった除算回路の出力電圧はPI制御回路を接続した瞬間におよそ1 Vを中心とした変動幅を持った信号となり、その後継続して同様の信号が得られた。このことから正常に共鳴周波数の安定化が開始されたと考えられる。その後NDフィルターによって入射光強度をモニター電圧が0.016Vになるまで減少させた。当初のモニター電圧が0.135Vであったことから、このときの入射光強度は当初の12%である。入射光強度が減少すると、それに伴い除算回路の出力電圧の変動幅が大きくなった。このことから、入射光強度の減少によって共鳴周波数の安定度が低下していると考えられる。そこで、入射光強度が当初の12%まで減少したときの共鳴周波数の安定度を求めた。図11はファブリーペロー共振器のピエゾ素子に三角波を印加すると得られる除算回路の出力電圧のスペクトルである。制御開始後の除算回路の出力電圧の最大値は1.60V、最小値は0.40Vであった。この最大・最小値の幅に対応する周波数幅とFSRを比べることで共鳴周波数の安定度を求めたところ、1.96MHzであることがわかった。図4の実験結果から、入射光強度を一定に保ちつつ従来のPI制御で共鳴周波数を安定化したときの安定度が1.33MHzであることが確認できたが、この値と比べると安定度が0.63MHz悪化した。安定度が悪化した要因としては、入射光強度が減少に伴い得られる透過光電圧とモニター電圧が小さくなることでノイズの影響が大きくなり、除算回路の出力電圧が不安定になっていることが挙げられる。しかし、安定度が悪化しても1.96MHzという原子の自然幅と比べると十分に小さい値であることから、入射光強度が当初の12%まで減少したときでも分光用光源として用いるレーザーの発振周波数制御用のファブリーペロー共振器の共鳴周波数の安定度としては十分な値で制御できているといえる。また、図10の測定結果から入射光強度が減少しても除算回路の出力電圧の中心値は変化していないことがわかる。この中心値がロッキングポイントとなることから、光強度を補償したことで入射光強度が減少してもロッキングポイントを一定に保ちつつ共鳴周波数を安定化することができていたと考えられる。

これらの結果から、除算回路によって透過光電圧とモニター電圧を除算して光強度の補償をす

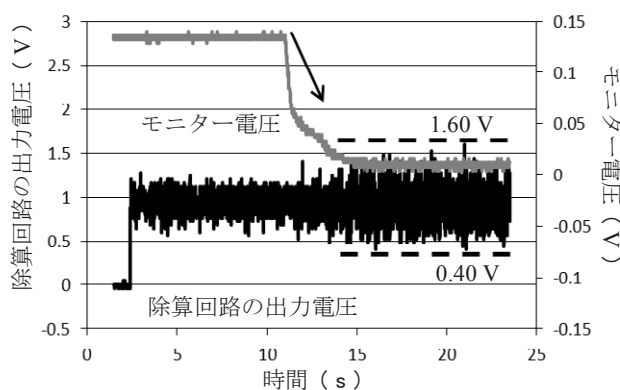


図10 光強度補償時の除算回路の出力電圧

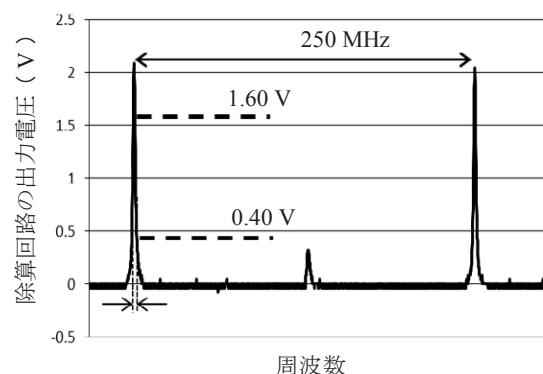


図11 除算回路の出力電圧スペクトルと制御時における除算回路の出力電圧幅との比較

ることで、従来のPI制御のみでは光強度が当初の45%程度まで減少すると制御が維持できなくなる問題を解決し、入射光強度が当初の4.4%とごくわずかな大きさになっても共鳴周波数を安定化することができるようになったと言える。また、その安定度は入射光強度が当初の12%に減少しても1.96MHzと高い安定度を有しており、制御の基準となるロッキングポイントも一定に保つことができた。

4. まとめ

ファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化する上で、参照信号を得るためのレーザー光強度が変動したときに生じるロッキングポイントの変動や制御の維持ができなくなる問題を解決するために除算回路を製作した。製作した除算回路は0.100Vから14.97Vまで正常に動作し、スルーレートも1.4V/ μ sと本研究で用いる上では十分な性能を有していたことから、この回路を用いて光強度の補償を目指した。従来のPI制御のみでファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化した状態で入射光強度を減少させたところ、入射光強度が当初の45%になると制御ができなくなった。そこで、除算回路で光強度を補償したところ、入射光強度が当初の4.4%になるまで共鳴周波数を安定化することができた。また、入射光強度減少時の共鳴周波数の安定度を求めると、入射光強度が当初の12%に減少しても1.96MHzと原子の自然幅に比べて十分に小さい値であり、制御の基準となるロッキングポイントも一定に保っていた。これらの結果から、ファブリーペロー共振器の共鳴周波数を安定化するために必要な参照信号を得るためのレーザー光の強度が変動しても、除算回路を用いることで光強度を補償できると期待される。

参考文献

- 1) 日本物理学会：「量子エレクトロニクス」(朝倉書店 1965) pp.1-16
- 2) 山口一郎、角田義人：「半導体レーザーと光計測」(学会出版 1992) pp.1-29
- 3) 嶺重慎・高橋義朗・田中耕一郎：「光と物理学」(京都大学学術出版会 2007) pp.27-43
- 4) 菅野敬之：「レーザーの発振周波数制御に向けた高安定参照共振器の開発」(埼玉大学大学院教育学研究科修士論文 2013) pp.57-72
- 5) 左貝潤一：「光学の基礎」(コロナ社1997) pp.172-177
- 6) ANALOG DEVICES社：「AD538 Data Sheet」http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD538.pdf
- 7) 岡村勉夫：「定本OPアンプ回路の設計」(CQ出版 1990) pp.161-230

(2016年3月11日提出)

(2016年5月10日受理)

Development of a Control Method for a Cavity by Compensating for Optical Intensity Fluctuation

IZUMI, Yuki

Graduate School of Education, Saitama University

OHMUKAI, Ryuzo

Faculty of Education, Saitama University

Abstract

Stabilizing the resonance frequency of a reference cavity cannot be achieved when the laser intensity fluctuates. To solve this problem, we attempted cavity control that compensates for laser intensity by dividing the transmitted light intensity of the cavity by the monitor signal intensity of an incident optical power. When stabilizing the cavity resonance without compensating for laser intensity, stabilization failed when the incident laser intensity decreased to 45.0% of the initial intensity. When stabilizing the resonance by compensation, stabilization was maintained until the incident intensity was decreased to 4.4 % of the initial intensity. With our technique, highly stable cavity resonance is expected to be achieved when the incident coherent light is generated from a complicated laser cavity like an external cavity for efficient frequency doubling .

Keywords: laser, cavity, resonance frequency, compensation for intensity fluctuation, division circuit