

レーザーの高精度制御に向けた高フィネストランスファー共振器の開発

傳 田 晟 矢	埼玉大学大学院教育学研究科
藤 原 昇 平	埼玉大学教育学部理科教育講座
大 向 隆 三	埼玉大学教育学部自然科学講座

キーワード：トランスファー共振器、変調分光、半導体レーザー、共鳴周波数

1. はじめに

近年のレーザー技術の発展は著しく、発振スペクトル線幅の狭窄化や発振波長の可変化が進んだ結果、レーザーを光源とした原子分光に関する研究が飛躍的に発展した¹⁾。種々のレーザーの中でも半導体レーザー (LD) は小型で軽量、高効率、長寿命、かつ発振周波数の操作性に優れ、精密で高度な分光実験用光源として適している。しかし、LDの発振周波数は温度によって変化しやすく、安定性と再現性に乏しい。そこで、LDの発振周波数を安定化制御する技術の確立が強く望まれている。

我々はこの課題の解決のためにレーザーの発振周波数制御において、それを安定化するための周波数基準となるトランスファー共振器の開発に取り組んでいる。一般に共振器からの共鳴信号をレーザーの発振周波数制御における参照信号として利用する方法は利便性と汎用性に優れているが、その反面共振器の共鳴周波数が温度により変化するので、実験室の温度変化の影響を受けて参照信号の再現性と安定性が劣る。そこで、温度の影響を受けず再現性と安定性に優れている原子の共鳴周波数を基準として安定化されたレーザー (マスターレーザー) の発振周波数に共振器の共鳴周波数を安定化し、その安定化された共振器を別の周波数帯のレーザー (スレーブレーザー) の発振周波数制御に用いることで、簡便な実験配置で高い周波数の再現性と安定度のレーザー光源を実現することができる。ここで用いられる共振器がトランスファー共振器である。これまでに、マスターレーザーとして発振波長780nmの外部共振器型LDをルビジウム (Rb) 原子の D_2 線の飽和吸収信号を基準にとって安定化制御し、LDの発振周波数を0.7MHz以内の範囲で安定化することに成功した²⁾。そして、マスターレーザーを基準に今度は共振器の透過光スペクトル信号の傾斜部で制御を行うサイド・オブ・フリンジ法によって、別に設けたトランスファー共振器の共鳴周波数の安定化制御を行った。その結果、トランスファー共振器の安定度をRb原子の共鳴周波数に対して3.3MHzの範囲で安定化できた³⁾。サイド・オブ・フリンジ制御は共振器の透過光スペクトル信号をそのままの形で、共振器の安定化制御における参照信号として用いる簡便な方法である。しかし、光源レーザーの強度変動によってロッキングポイントが変動してしまう欠点があるので、その改善にも取り組み、入射光と透過光の信号の間で除算や減算による光強度変動補償^{4, 5)}を行い、共振器への入射光強度が変動してもロッキングポイントを変動させずに共鳴周波数の安定化制御を維持することに成功した。その時のマスターレーザー光の周波数における共振器の共鳴周波数の安定度は約1.3MHzであった⁴⁾。この共振器の共鳴周波数の安定度は、これを基準に安定化したスレーブレーザーを光源として、自然幅が数MHz程度の原子で分光実験を行う場合には十分とはいえない。

そこで、トランスファー共振器の共鳴周波数の安定度を現状よりも高めるために、この共振器の高フィネス化を試みる。フィネスとは共振器の周波数分解能を示す指標で、大きな数値であるほど幅の狭いスペクトル信号が得られ、共振器の共鳴周波数変動に対して参照信号が敏感に変化を示すようになる。このような高フィネス共振器を用いて共鳴周波数の安定化制御を行うことで、トランスファー共振器の安定度の向上が期待できる。共振器の高フィネス化は共振器に使用するミラーの反射率を高くすることで実現できる。例えば我々が従来用いたトランスファー共振器に関しては、文献[4]ではミラーの反射率が98%、フィネスが77.8であった。今回はミラーの反射率を99.5%まで高め、フィネスを313まで大きくしたトランスファー共振器の共鳴周波数の安定化制御を行うこととした。

また、今回は共振器への入射光強度変化によるロッキングポイントの変動が生じない制御を実現するため、共振器の干渉フリンジのピークポイントをロッキングポイントとして制御するトップ・オブ・フリンジ制御を試みる。トップ・オブ・フリンジ制御は共振器の透過光スペクトルの微分スペクトルを発生させ、共鳴周波数の安定化制御に用いる方法である。図1にサイド・オブ・フリンジ制御とトップ・オブ・フリンジ制御それぞれの制御方法の模式図を示す。サイド・オブ・フリンジ制御は共振器の透過フリンジをそのまま用いて、傾斜部分にロッキングポイントを設定しているが、トップ・オブ・フリンジ制御はもとの透過フリンジを1次微分したスペクトルからロッキングポイントを設定するので、常にもとのフリンジの頂点である共振器の共鳴周波数で安定化させることができる。

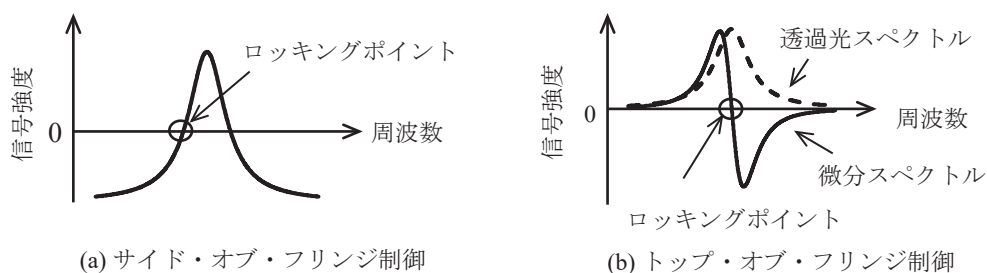


図1 共振器の制御方法とロッキングポイント

今回の実験では変調分光法により共振器の透過光スペクトルの1次微分スペクトルを得る。変調分光法では周波数変調と位相敏感検波法の組み合わせによる変調周波数成分の検出により、周波数軸上で透過スペクトルを微分した形状のスペクトルが得られる。今回は周波数変調の手段として共振器長を微小変調し、その透過光信号を位相敏感検波法によって検出することで微分スペクトルを発生させた。

2. 高フィネス共振器の設計と透過光スペクトルの測定

本研究で設計・製作する高フィネストランスファー共振器は図2で示すような共焦点型ファブリ・ペロー共振器である。高フィネス化をはかるため前述の通りミラーは780nm光の反射率を99.5%、凹面の曲率半径を300mmとした。共振器長が300mmになるように中空円筒状のスーパーインバー製金属胴体とピエゾ素子を2枚のミラーの間に挟み込むようにアラルダイトで接着し、共振器を組み立てた。スーパーインバーは熱膨張率の低い合金で、温度変化による共振器長の伸び縮みを極力抑制するために用いた。ピエゾ素子には中空円筒の形状をしたPiezomechanik製

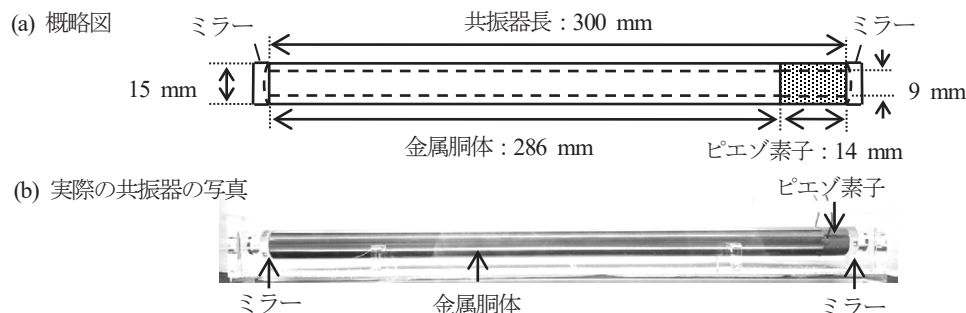


図2 実験に用いた共焦点型ファブリー・ペロー共振器

HPSt150/14-10/12を用い、本体の長さ14mm、内径9mm、外径15mm、印加電圧に対するストローク長は $-30\text{V} \sim +150\text{V}$ の範囲で $16\mu\text{m}$ 、 $0\text{V} \sim +150\text{V}$ の範囲で $12\mu\text{m}$ である⁶⁾。共振器内には共鳴時にミラーを固定端とした光定在波が作られるので、共振器長に対して一定の条件を満たす周波数の光が入射されたときに共振器内でこの光が共鳴し、有限の幅を持ったピーク（フリンジ）が透過光信号に現れる。共焦点型ファブリー・ペロー共振器では、あるピークからその隣のピークまでの距離である自由スペクトル領域（ ν_{FSR} ）、フィネス（ F ）、フリンジの半値全幅（ $\Delta\nu_{1/2}$ ）がそれぞれ式（1）～（3）のように与えられる⁷⁾。

$$\nu_{\text{FSR}} = \frac{c}{4L} \quad (1)$$

$$F = \frac{\pi R}{1 - R^2} \quad (2)$$

$$\Delta\nu_{1/2} = \frac{\nu_{\text{FSR}}}{F} = \frac{c}{4L} \cdot \frac{1 - R^2}{\pi R} \quad (3)$$

これらの式から、今回使用する共振器の性能の理論値は ν_{FSR} が250MHz、 F が313、 $\Delta\nu_{1/2}$ が0.8MHzになる。そこで、実際に組み立てたトランスファ共振器の性能確認のためこの共振器の透過スペクトルの測定を行った。実験配置を図3に示す。光源には発振波長780nmの外部共振器型LD（New Focus TLB-6013D）を使用し、その出力光を戻り光防止のためにアイソレーターに通したあと共振器に入射した。そして、共振器のpiezo素子に周波数100Hzで8V_{pp}の三角波電圧を印加し、共振器長を掃引させた。そして、共振器の透過光を光検出器で受光し、電気信号に変換したあと、オシロスコープでそれを測定・記録した。実験結果を図4に示す。ここで二つの鋭いフリンジが観測されたので、このピーク間距離が ν_{FSR} （250MHz）とみなした。これと比較して干渉フリンジのピークの半値全幅を見積もったところ1.7MHzという結果が得られた。これは理論値に比べ0.9MHz大きな値である。実際の半値全幅が理論値よりも広がった原因としては、入射レーザー光と共振器のモードマッチングの不備と共振器組み立て時のミラーのミスアライメント、特にミラー

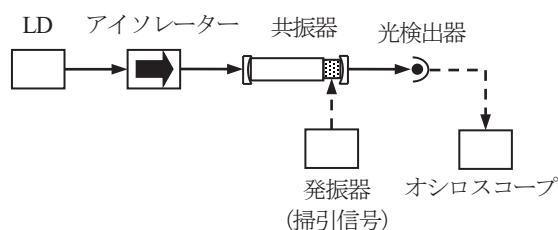


図3 透過光スペクトル測定の実験配置

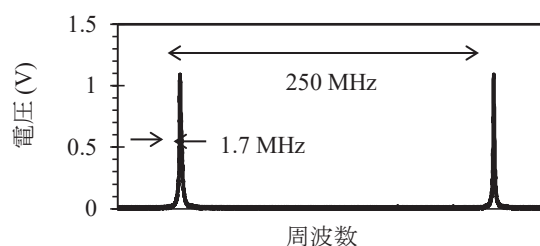


図4 透過光スペクトル測定の実験結果

間距離とミラーの曲率半径の値の不一致が考えられる。文献〔4〕では共振器の干渉フリンジピークの半値全幅は3.2MHzであったので、これと比較すると今回得られた半値全幅1.7MHzという値は半分程度まで小さくなった。したがって、高フィネス化の目的であったトランスファー共振器の共鳴周波数の安定度の向上も期待できる。

3. 変調分光法による微分スペクトルの測定

次に、図4に示した透過光スペクトルの微分スペクトルを変調分光法によって測定することを試みた。変調分光法による微分スペクトルの測定原理は以下の通りである。共振器の透過光スペクトルを共振器の共鳴周波数 ν に関する関数 $I(\nu)$ と考え、周波数を ν_0 の近傍で振幅 ν_m 、周波数 ω_m で変調すると、そのときに得られる透過光スペクトルは次の式(4)の通り表される。

$$I(\nu_0 + \nu_m \cos \omega_m t) = I(\nu_0) + \left. \frac{dI(\nu)}{d\nu} \right|_{\nu=\nu_0} \nu_m \cos \omega_m t + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 I(\nu)}{d\nu^2} \right|_{\nu=\nu_0} (\nu_m \cos \omega_m t)^2 + \dots \quad (4)$$

この式(4)の右辺第2項はもとのスペクトルの周波数に関する1次微分と変調信号を乗じた形になっている。位相敏感検波器(PSD)は乗算と低周波フィルタ(LPF)によって特定の周波数だけを抜き出して測定する装置であり、これによって式(4)の右辺第2項だけを抜き出し元のスペクトルの微分スペクトルを得る。実際にこの変調分光法によって共振器の干渉フリンジの微分スペクトルを測定する実験配置を図5に示す。変調信号を共振器のピエゾ素子に印加し、共振器長に対して変調を行った。共振器の共鳴周波数は共振器長によって決まるので、これは間接的に共振器の共鳴周波数を変調していることになる。実験で使用するPSDは最適な条件で微分信号の検出と共振器の安定化制御を行うために自作した⁸⁾。また、掃引信号と変調信号を合わせてピエゾ素子に印加するために加算回路を使用した。図5の実験配置で変調信号を周波数400Hzで3mV_{pp}の矩形波電圧、掃引信号を周波数0.05Hzで8V_{pp}の三角波電圧とし、PSDのLPFの時定数を10msに設定して実験を行い、PSDの出力信号をオシロスコープで測定・記録した。実験結果を図6に示す。透過光スペクトルの1次微分は元のスペクトルの傾きに相当するので干渉フリンジのピーク、すなわち共鳴周波数の位置で微分信号は0Vになり、その前後では信号の極性が反転するはずである。図6の結果は確かにそのようになっている。ただし、図6の結果では信号の正の極大値と負の極大値の絶対値が一致しなかった。これは、主に共振器の組み立て時のミラーのミスアライメントによってフリンジが共鳴周波数を中心としてその両側で形状が非対称であったことを反映していると考えられる。

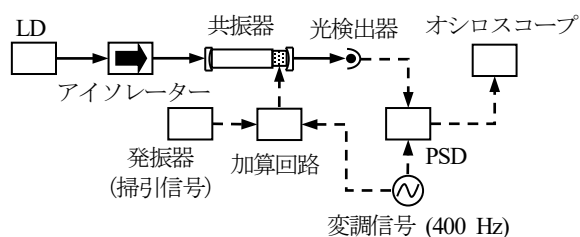


図5 微分スペクトル測定の実験配置

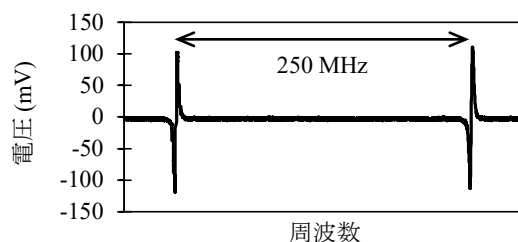


図6 微分スペクトル測定の実験結果

4. 高フィネス共振器のトップ・オブ・フリンジ制御

続いて、共振器の干渉フリンジの微分信号を用いた共振器のトップ・オブ・フリンジ制御を試みた。今回、共振器の安定化制御はPI制御により行った。PI制御回路は誤差信号に比例した信号と積分した信号とを加えてフィードバックする制御方法である。比例制御を行う反転増幅回路は図7のように製作した。この回路では、入力信号を0.05～1.1倍にして出力できる。また、積分制御を行う積分回路を図8のように製作した。この回路ではコンデンサの容量を選択することで、信号積分の時定数を10s～77sの間で設定することができる。これら二つの回路を合わせてPI制御回路となる。また、今回は十分に長い時間制御を維持できるように piezo 素子に印加する信号の電圧範囲を広げる目的で高電圧化回路も用いた。共振器の安定化制御で実際に行うことは piezo 素子に適切な電圧を印加して、その長さの変化を補償し、温度変化が生じても共振器長を一定に保つことである。したがって、piezo 素子で実際に補うことのできる共振器長の変化量を超えてしまうと制御することはできなくなる。今回使用している piezo 素子の印加電圧範囲は-30V～+150Vであるが、今まではPI制御回路などの製作で実際に用いている汎用オペアンプ (Texas Instruments 製 LF356) の出力電圧範囲が-15V～+15Vに限られており、これが piezo 素子の実際のストローク幅を制限していた。そこで、0V～+150Vの電圧範囲で動作する高電圧オペアンプ (Apex 社 PA84) を用いた増幅回路で高電圧化した信号を piezo 素子にフィードバックし、印加する方法に改めた。高電圧化回路は-15V～+15Vの電圧範囲の信号を 0V～+150Vの電圧範囲の信号に変換するために図9のような概略になっている。

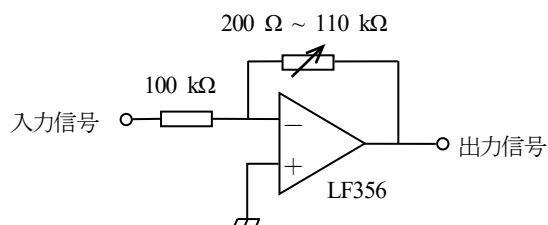


図7 比例制御を行う反転増幅回路

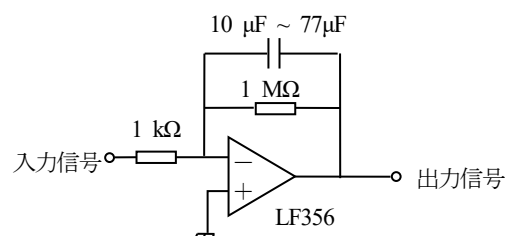


図8 積分制御を行う積分回路

以上のPI制御回路と高電圧化回路を用いて共振器の安定化制御を試みた。実験配置図を図10に示す。変調信号は周波数2kHzで6mV_{pp}の矩形波とし、PSDのLPFの時定数は1msに設定した。またPI制御回路は反転増幅回路の増幅率を0.1、積分回路の時定数を77sに設定した。

光検出器の出力信号を透過光信号、PSDの出力信号を微分信号、高電圧化回路の出力信号、すなわち piezo 素子への入力信号をフィードバック信号として、これら3つの信号をオシロスコープで波形を測定・記録した。共振器の piezo 素子に直流電圧を印加することで共振器長を微調整し、共振器の共鳴周波数を入射LD光の周波数に近づけてからPI制御回路のスイッチを入れ、制御を開始した。制御開始直後の透過光信号、微分信号、フィードバック信号を図11に示す。制御がうまく行われていれば、共振器の共鳴周波数が入射LD光の周波数にロックされるので、透過光信号はフリンジのピーク電圧に維持されるはずである。また、同様の理由で微分信号は0Vに維持されるはずである。そして、フィードバック信号は共振器の piezo 素子部分の長さに連動して時々刻々と変化する。ここで、温度変化による金属胴体の伸縮は時間的に緩やかな変化であると考えられるので、フィードバック信号も緩やかに変化していると考えられる。図11で示した結果を見ると、

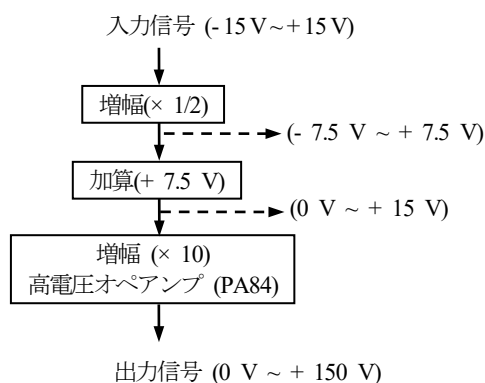


図9 高電圧化回路の概略図

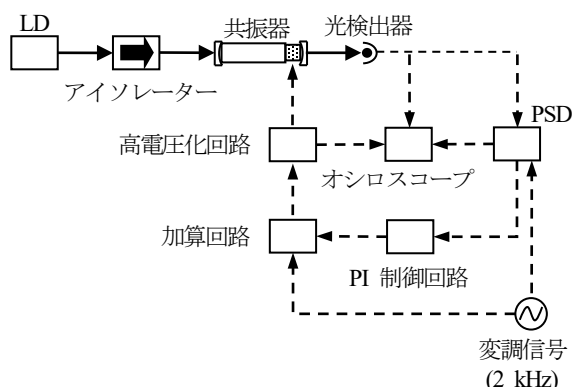


図10 共振器の安定化制御実験配置

透過光信号、微分信号、フィードバック信号のいずれもがそのような振舞いであるので、制御がうまく行われていることが分かる。続いて、制御開始から2時間経過したときの透過光信号、微分信号、フィードバック信号の波形を測定・記録した。その結果を図12に示す。図12に示した結果でも透過光信号はフリンジのピーク電圧に、微分信号は0Vに維持されたままであり、フィードバック信号は緩やかな変化であるため制御がうまく行われていることが分かる。図11の終わりから図12の始まりまでの約2時間の間も信号の様子を目視で確認していたが所望の信号が観測されていたので、今回共振器の共鳴周波数を入射レーザー光の周波数に少なくとも2時間のあいだロックし続けることができた結論付けられる。

次に安定化制御中の微分信号の電圧幅から、入射LD光の周波数に対する共振器の共鳴周波数の変化を安定度として求めた。安定化制御中であっても、共振器の共鳴周波数と入射レーザー光

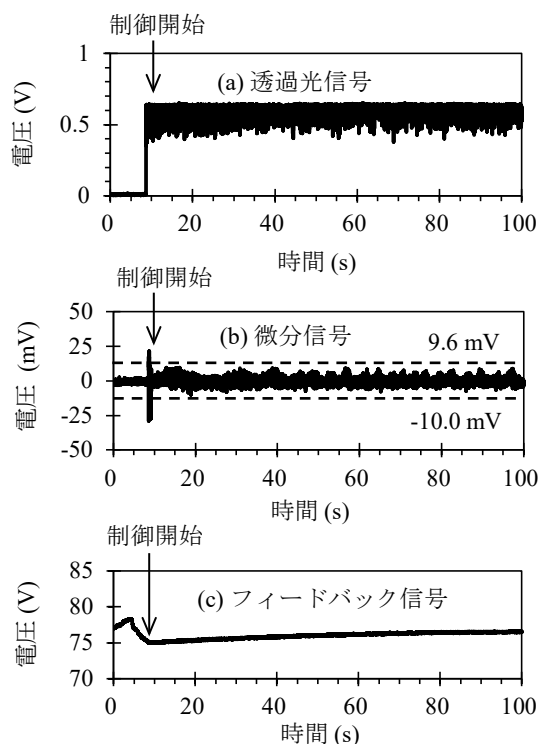


図11 制御開始時の信号の様子

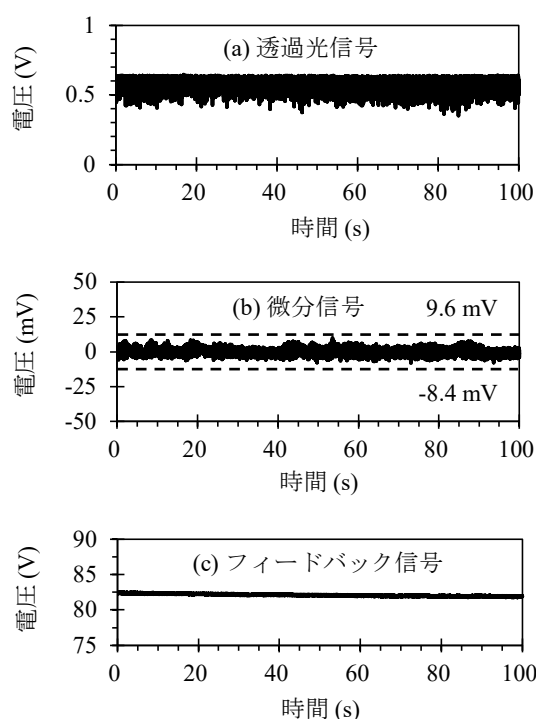


図12 制御開始2時間後の信号の様子

の周波数の間にはわずかながら差が生じる。このため、図11 (b) や図12 (b) の微分信号には一定の電圧幅が見られる。この電圧幅を図6のような干渉フリンジの微分スペクトルと比較して周波数幅に換算し、共振器の共鳴周波数の安定度を見積もった。なお、透過光信号でも図4のような透過光スペクトルと比較することで電圧幅を周波数幅に換算できるが、今回はトップ・オブ・フリンジにおける制御であり、透過光スペクトルからはフリンジのピーク付近において電圧幅から周波数幅を正しく求められない可能性が高いため、微分信号の電圧幅から求めた。まず図11 (b) の制御開始時の微分信号の電圧は -10.0mV から 9.6mV までだったので、干渉フリンジの微分スペクトルと比較してこの電圧範囲を周波数幅に換算したところ 0.17MHz と見積もられた。次に、図12 (b) の制御開始2時間後の微分信号の電圧は -8.4mV から 9.6mV までだったので、この範囲を周波数幅に換算したところ 0.16MHz と見積もられた。制御開始時と2時間経過後の共鳴周波数の安定度を比較するとほぼ等しい値なので、時間が経過しても共鳴周波数の安定度はほぼ一定であることが分かった。従来の共振器の共鳴周波数の安定度は約 1.3MHz であった³⁾。これに対して、今回の高フィネス共振器の安定度は約 0.17MHz となり、従来の安定度の1/10程度まで値を小さくできたので、期待通りに安定度の向上が確認された。この安定度は典型的な原子の自然幅（数MHz程度）と比べても1/10以下であり、このような原子を対象として分光実験を行う際の、光源LDの発振周波数安定化基準としても十分な安定度であると言える。

5. まとめ

共振器の共鳴周波数の安定度向上を目的として、共振器の高フィネス化とそのトップ・オブ・フリンジ制御を試みた。共振器のフィネスを313まで上げて設計し、変調分光法により得られる微分スペクトル信号を参照信号として安定化制御を行った。その結果入射LD光の周波数に対して、共振器の共鳴周波数を 0.17MHz 以内の範囲で2時間にわたって安定化制御することができた。ここで得られた共振器の共鳴周波数の安定度は、過去に行った共振器安定化用LDの安定化における、制御基準として用いたRbの自然幅（約 6MHz ）⁹⁾や安定化されたレーザーの周波数安定度（ 0.7MHz ）²⁾、様々な原子の自然幅（数MHz～数十MHz）⁹⁾と比較してもはるかに小さな値であり、原子分光実験における光源レーザー安定化用の周波数基準として十分な性能にまで改良できた。ただ、現状はPSDで測定される微分信号の帯域幅が 160Hz 程度と狭い。帯域幅の拡大には、高い周波数での変調が必要だが、ピエゾ素子で現在よりも高い周波数で変調することは現実的に難しい。したがって、数MHz以上の高い周波数で変調できる電気光学変調素子（EOM）を用いて入射LD光の周波数変調を行うことにより、微分信号の帯域幅の拡大と共振器の共鳴周波数の安定度の向上が見込める。

引用文献

- 1) 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.27-44.
- 2) 上敷領静香、大向隆三、兵頭政春、近藤一史：「交差共鳴を用いたレーザーの発振周波数制御」埼玉大学紀要（教育学部）第62巻1号（2013）pp.241-248.
- 3) 管野敬之、須田純平、近藤一史、大向隆三：「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」埼玉大学紀要（教育学部）第64巻2号（2015）pp.243-250.
- 4) 和泉勇輝：「光強度変動補償機構を備えた共振器制御方法の開発」平成24年度埼玉大学大学院教育学

研究科修士論文

- 5) 飯田克也、近藤一史、大向隆三:「強度モニターを利用した共振器の制御方法の開発」埼玉大学紀要(教育学部)第63巻2号(2014) pp.195-204.
- 6) Piezomechanik社ウェブサイト: <http://www.piezomechanik.com/en/products/>
- 7) Melles Griot社ウェブサイト: http://www.repairfaq.org/sam/laser/FPI25_3RG.pdf
- 8) 傳田晟矢、近藤一史、大向隆三:「原子スペクトルの測定に向けた位相敏感検波器の試作」埼玉大学紀要(教育学部)第63巻2号(2014) pp.205-215.
- 9) Harold J. Metcalf, Peter van der Straten: *Laser Cooling and Trapping* (Springer, 1999) pp.274- 275.

(2017年10月 2 日提出)

(2017年11月18日受理)

Stable and High Finesse Transfer Cavity towards a Precise Control of a Laser

DENDA, Seiya

Graduate School of Education, Saitama University

FUJIWARA, Syohei

Faculty of Education, Saitama University

OHMUKAI, Ryuzo

Faculty of Education, Saitama University

Abstract

To obtain a reference signal accurate enough for maintaining laser oscillation frequency, we stabilized the resonance frequency of a high-finesse transfer cavity whose finesse amounts to 313. We observed the derivative spectrum of the transmission one by modulating the cavity length and phase-sensitive detection and used this derivative signal as an error signal for controlling the cavity length. With the servo control, we successfully locked the resonance frequency of the high-finesse transfer cavity for 2 hours. Furthermore, the frequency stability was estimated to be 0.17 MHz when the signal bandwidth in the servo system corresponded to almost 160 Hz. This performance is sufficient to be used as a highly-versatile and stable reference signal for a light source in high-resolution spectroscopy of atoms.

Keywords: transfer cavity, modulation spectroscopy, laser diode, resonance frequency