

周波数マーカによる安定化レーザーのチューナビリティ評価

新井 葵 埼玉大学大学院教育学研究科
亀山壮吾 埼玉大学教育学部自然科学講座理科分野
大向隆三 埼玉大学教育学部自然科学講座理科分野

キーワード：半導体レーザー、ファブリー・ペロー共振器、チューニング幅、周波数安定化

1. はじめに

レーザー光は、普通の光との物理的に異なる点は出力光のスペクトルの幅が極めて狭く、指向性に優れ、コヒーレントな光であり、高いパワー密度といろいろな時間幅の光パルスを作ることができるレーザーは、今日も物理学だけでなく、化学、工学、生物学、医学など多くの分野で応用されている。その中でもレーザー分光学は、レーザー光の特徴を利用して物質と光の相互作用を調べ、電子や原子、分子といったミクロな観点から物質の性質を理解するものである。¹⁾ そのレーザー分光光源に用いられるレーザーの一つに半導体レーザー（LD）がある。LDはその種類によってさまざまな周波数の光を出力でき、小型で軽量、線幅が狭く、高効率、かつ発振周波数の操作性に優れているため、最近よく用いられるようになっている。しかしLDは熱や振動などの外的要因によって発振周波数が変動してしまうといった課題がある。扱う原子の共鳴周波数は非常に狭いスペクトル幅であるため、精密で照射光周波数の高い正確性が求められる分光実験では、LDの発振周波数の安定化制御が必要不可欠である。

レーザーの発振周波数を安定化させるには、レーザー光を制御するための基準となる信号が必要である。基準信号とレーザーの発振周波数との偏差を求め、制御系を介してその偏差が0になるようにレーザーへフィードバックさせるのが一般的である。安定化に用いる基準信号は気体原子の飽和吸収スペクトルを用いることが多い。その理由は、飽和吸収スペクトルは原子の種類ごとに厳密に決められた共鳴周波数付近でしか得られず、さらにそのスペクトルの周波数幅も原子の自然幅程度（数 MHz ~ 数十 MHz）と極めて狭いので、高い精度での制御が可能になるからである。その反面、この方法には制御可能な周波数の範囲も数十 MHzに限定されてしまうことに加えて、また実験配置も複雑になってしまうデメリットがある。現在、我々の研究グループはこの課題の解決のために簡略な実験配置と広いチューニング幅を同時に達成することを目標に研究を進めており、Rbの吸収スペクトルと磁気光学効果を用いたレーザー制御法を試みている。Rbは飽和蒸気圧が高く（ $\approx 10^{-7}$ torr @ 293 K）真空装置や加熱装置を必要とせず気体の原子を発生させることができるため、密封空間内に気体原子として扱える。²⁾ ^{87}Rb のみが封入されたガラスセルに磁場を加えて、磁気光学効果の一つであるゼーマン効果を起こす。そこに2種類の円偏光（ σ^+ 偏光と σ^- 偏光）の合成である直線偏光光線を照射し、その透過光をそれぞれの円偏光成分に分離し検出する。これら2種類の円偏光を吸収したドップラー吸収スペクトルは、磁場を加え

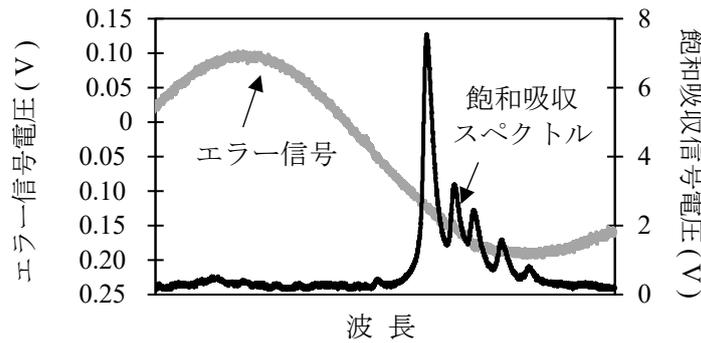


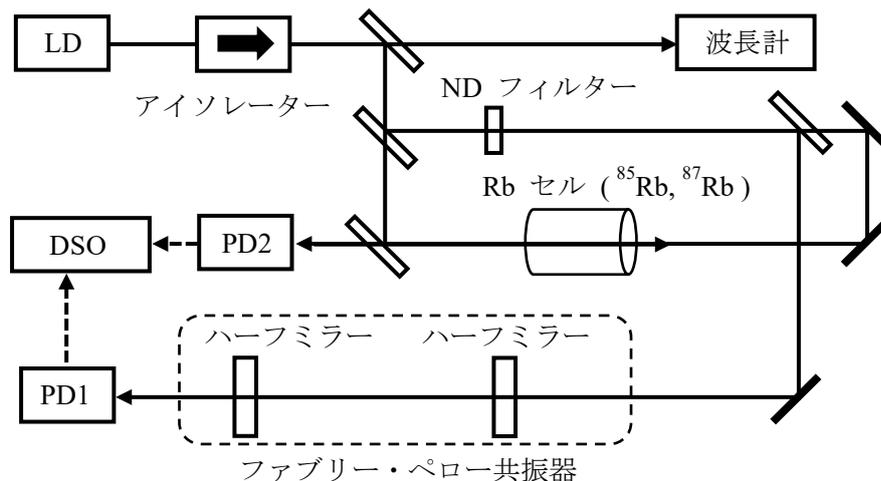
図 1 エラー信号と飽和吸収スペクトル

ずに吸収させたものに比べてそれぞれ高周波と低周波に同じ周波数だけシフトする。そのシフト量は磁場の大きさに比例する。^{3,4)} この 2 つの信号の差をとることでエラー信号を得る。この信号をレーザーの発振周波数の安定化に用いている。この方法で、安定度がおよそ 7 MHz と原子の自然幅程度の精度を保ちつつ、チューニング幅がこれまでの安定化方法よりも格段に広い 300 MHz 以上を得ることに成功している。現在、チューニング幅の評価方法には ^{87}Rb 原子の飽和吸収スペクトルを用いている。飽和吸収スペクトルに見られる 6 つのピーク間の周波数は原子のエネルギー構造と選択則によって決まっている。レーザーを制御した状態でエラー信号の元となる 2 つの信号のうち片方の信号強度を ND フィルターで一定方向に変化させて LD の発振周波数を連続的に移動させ飽和吸収スペクトルを検出する。観測した飽和吸収スペクトルのピークの数によってチューニング幅を決定している。しかし飽和吸収が見られる共鳴周波数はドップラー信号の低周波側に偏っているため、ゼーマン効果によってシフトさせた 2 つのドップラー信号で作るエラー信号の全体を把握することができない。図 1 は実験で用いているエラー信号と飽和吸収スペクトルを同時にモニターしたものである。これに示すように、飽和吸収スペクトルの信号ピークがエラー信号の長波長側の範囲にしかないことが明らかである。また、この飽和吸収スペクトルは交差共鳴法によって得ているため、光学経路の複雑化や Rb セルの双方向から同一直線上に透過させる厳密な光学調整が必要になるといった課題があった。そこで本研究では、ゼーマン効果を用いたレーザー発振周波数の安定化方法におけるチューニング幅の正確な測定を実現するために、ファブリー・ペロー共振器を作製し、それを周波数マーカーとしてレーザー発振周波数制御のチューニング幅の評価に用いる方法を試みた。ファブリー・ペロー共振器は、透過率を持たせた 2 枚の平面鏡を向かい合わせにして反射面を平行に保ったものに、光を入射させると、多重干渉によって特定の条件も満たした周波数の光が強く透過する。この高強度で透過する周波数の間隔を自由スペクトル領域 (FSR) とする。この FSR は等間隔であり、その間隔は向かい合わせの平面鏡間の距離によって決まる。FSR は光速 c 、ミラー間隔 d 、ミラー間の媒質 (空気) の屈折率を n とすると、 $\nu_{\text{FSR}} = c / 2nd$ で求めることができる。¹⁾ そのため、ファブリー・ペロー共振器の FSR を任意の値に設定し、チューニング幅を測定するために飽和吸収スペクトルの代わりとして使えば、測定の初めと終わりの透過光強度と透過光強度のピークの数からチューニング幅を算出でき、チューニング幅測定の精度の向上が見込める。また、光学経路の調整に関しては、共振器の 2 つの平面鏡間で反射光が同一直線上になるようにし、その後共振器の信号を見な

から微調整をする程度で済むため光学経路の簡略化を期待できる。

2. ファブリー・ペロー共振器の設計と透過光スペクトルの測定

まず、周波数マーカーとして用いるファブリー・ペロー共振器を設計・作製し、その透過光信号を測定することを試みた。その実験配置を図 2 に示す。光源には発振周波数 780 nm の外部共振器型 LD (New Focus 社製 TLB - 6013 - D) を使用した。この LD に 55 mA の注入電流を加えて発振させた。ファブリー・ペロー共振器の性能評価には、 ^{85}Rb 原子のドップラースペクトル、及び飽和吸収スペクトルを用いるため、レーザーの発振波長を ^{85}Rb の共鳴波長である 780.245 nm 付近で連続掃引させて出力した。Rb セルにはガラス容器中に Rb 原子 (^{85}Rb と ^{87}Rb) が封入されている。 ^{85}Rb の吸収スペクトルをファブリー・ペロー共振器の性能評価に使う理由は、存在比率が高いので飽和吸収スペクトルの強度が大きく測定され、S/N 比の良い信号を得ることができるからである。LD からの出力光はアイソレーターを通したあと、共振器に入射させる光、評価用の ^{85}Rb のドップラースペクトルと飽和吸収スペクトルを検出する光、発振波長をモニターするための波長計に入射させる光に分けた。ファブリー・ペロー共振器部分は光学調整の簡便さ及び、チューニング幅測定に便利な共振器信号のフリンジの形を考慮し、透過率 50 % のハーフミラー (PSMH - 30C05 - 10 - 550) 2 枚を鉛直方向と水平方向に微調整ができるミラーホルダーに取り付け、これまで得られているエラー信号から算出できるチューニング幅が 500 MHz 程度であることから FSR が 100 MHz 程度になるようにミラー間隔を $d=1.32\text{ m}$ に設定した。これらから共振器の性能の理論値は FSR が 113 MHz、フィネス F が 4.44 になる。なお、フィネスとは共振器信号のフリンジの鋭さを示すものであり、 $F = \pi\sqrt{R}/(1-R)$ で与えられる。¹⁾ ハーフミラーを透過した光を PD1 で受光し、共振器信号をモニターしながら共振器ミラーの角度を微調整し、信号のフリンジが最も大きくなるようにした。Rb セルを透過した光は PD2 で検出した。また、 ^{85}Rb



LD : 半導体レーザー、PD : 光検出器、DSO : デジタルオシロスコープ
 実線矢印 : 光信号、点線矢印 : 電気信号

図 2 共振器信号の測定実験配置

のドップラー信号とその中にある飽和吸収スペクトルを同時に検出し、飽和吸収スペクトルのピーク間隔から、共振器の FSR の測定を試みた。

実験結果は図 3 の通りであった。縦軸が信号電圧で、横軸が周波数である。①が共振器信号で、②がドップラー信号である。得られた共振器信号は予想していた通り、等間隔に連続してフリンジが見れる信号であった。このピークからピークまでの間隔が FSR となる。またドップラー信号には小さな飽和吸収スペクトルの 2 つのピークが見られた。 ^{85}Rb のドップラー信号の半値全幅 (FWHM) は 508 MHz (@ 290 K) なので、ドップラー信号の中に見られた飽和吸収スペクトルの 2 つのピーク間隔を測定すると、約 30 MHz であった。本来 ^{85}Rb の飽和吸収スペクトルは基底状態 $5S_{1/2} (F=3)$ から励起状態 $5P_{3/2} (F'=2, 3, 4)$ の 3 つの準位への遷移とそれらに伴うクロスオーバー共鳴によるピークの 6 つのピークが存在する。今回見られた 2 つのピークは測定したピーク間隔と飽和吸収スペクトルのそれぞれの信号強度から $5S_{1/2} F=3 \rightarrow 5P_{3/2} F'=4$ と $5S_{1/2} F=3 \rightarrow 5P_{3/2} F'=3$ のクロスオーバー共鳴と $5S_{1/2} F=3 \rightarrow 5P_{3/2} F'=3$ と $5S_{1/2} F=3 \rightarrow 5P_{3/2} F'=2$ のクロスオーバー共鳴⁵⁾ であると判断できる。また、 ^{85}Rb の D_2 線の遷移が起きる周波数間隔と、クロスオーバー共鳴がそれぞれの遷移が起きる周波数のちょうど中間であるということから、ドップラー信号に見られるこのピークの周波数間隔は 31.7 MHz だとわかる。よって、以降の測定ではこの飽和吸収スペクトルの 2 つのピーク間隔を 31.7 MHz として共振器信号の FSR を見積もった。測定した FSR は 116 ± 3 MHz であった。理論値と比較するとこの値は誤差の範囲で一致していた。また共振器信号を、入射光強度に対する透過光強度の比と光の周波数の関数式でフィッティングするとフィネスの値が 2.09 であった。フィネスにおいては理論値を大きく下回る結果となった。今回の差が生じた原因は、フィネスの理論式は共振器内で往復する光を幾何光学的に扱った結果得られた式であるが、実際は、光は波でもあるので回折現象が生じ、共振器内での光のロスが大きくなったことが考えられる。本研究ではファブリー・ペロー共振器を周波数マーカーとして扱うため、測定で得られた FSR の値が理論値に従っており、且つ共振器信号のピークの位置が明確であることが優先して求められる。そこで本研究においてこのファブリー・ペロー共振器は周波数マーカーとしての性能については問題ないと判断した。

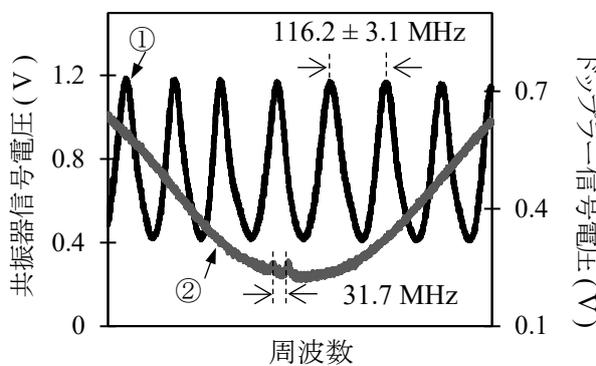


図 3 共振器信号測定結果 ($d=1.32$ m)

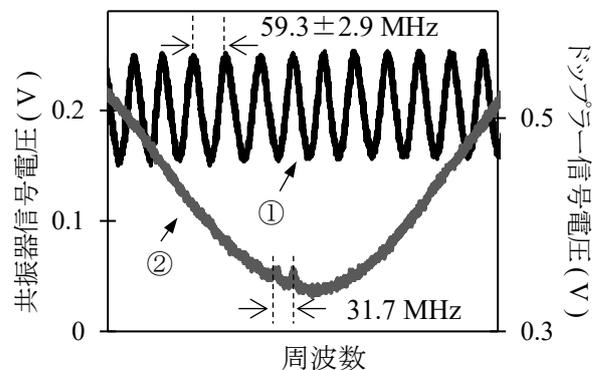


図 4 共振器信号測定結果 ($d=2.62$ m)

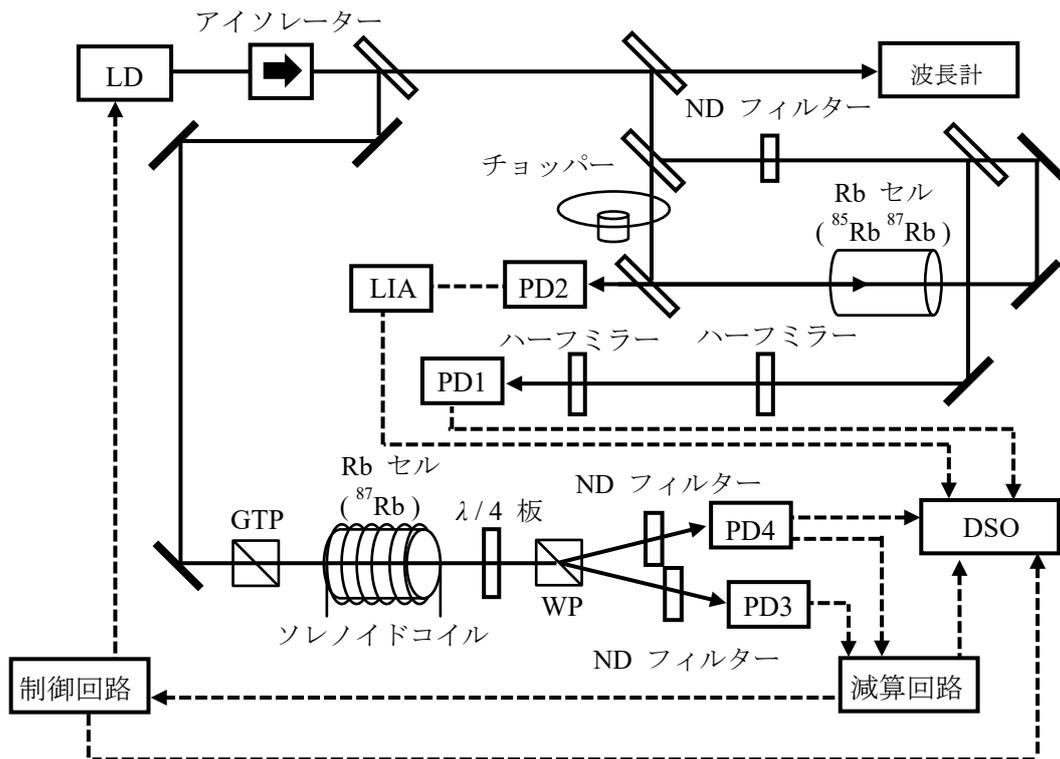
チューニング幅を測定するための周波数マーカーとして共振器を用いる場合、共振器の FSR の値は小さいほど性能が良いと考えられる。共振器信号の FSR の値を小さくするにはミラー間隔を長くする必要があるが、本研究で使用できるスペースは限られている。そこで今回の実験で使用可能なスペースでも長いミラー間距離を確保する方法として、共振器の 2 枚のミラーの間にアルミミラーを追加して設置し V 字の光学配置で共振器を作製することを試みた。共振器入射口のハーフミラーからアルミミラーまでの距離を 1.25 m、アルミミラーから PD1 側のハーフミラーまでの距離を 1.37 m として全長 2.62 m に設定した。このときの共振器の FSR の値は 57.2 MHz でフィネス F は 4.44 となる。

ミラー間隔 $d = 2.62$ m での実験結果を図 4 に示した。縦軸が信号電圧で、横軸が周波数である。①が共振器信号で、②がドップラースペクトルである。 ^{85}Rb のドップラー信号の中にある飽和吸収スペクトルの 2 つのピークの間隔から共振器信号の FSR とフィッティングによりフィネスを見積もった。測定からわかった FSR は 59.3 ± 2.9 MHz で、フィネスは 1.23 であった。FSR の値は理論値と比べ誤差の範囲で一致していた。フィネスは理論値よりも低く、前の実験で得られたものよりさらに低かった。これは、共振器を構成するミラーの間隔が伸びたことによりレーザー光の回折の効果が増したことや、途中のアルミミラーの反射率が 100% ではなく光ロスの原因になったことが原因と考えられる。しかし前述したように FSR が理論値に従っており、ピーク的位置が分かるので周波数マーカーとして今回の研究に使うことができると判断した。ただ、今回作製したファブリー・ペロー共振器はミラーホルダーにハーフミラーを取り付け、それをブレッドボードにボルトで固定している簡易的なものである。ミラー間隔を比較的自由に定めることができるが、その反面ブレッドボードを経由してミラーに振動がよく伝わってしまう。そのためブレッドボードに手を置く動作や、ブレッドボード上に配置した光学機器に触れるだけでも共振器信号が乱れてしまった。共振器長を長く取れば FSR を狭くでき、チューニング幅をより正確に測定できると期待されるが、同時に振動の影響も大きくなりチューニング幅の測定の際に起きる振動で FSR が不明確になってしまうことも危惧される。このあとの実験では FSR と振動を考慮して共振器長を決めた。

3. 安定化半導体レーザーのチューニングレンジ測定

次に前章の通り作製した共振器を用いて、実際に安定化制御したレーザーのチューニング幅を測定した。実験配置は図 5 に示した通りである。LD の出力光をアイソレーターに通したあと、4 つの経路に分けた。1 つ目はソレノイドコイルで磁場を加えた ^{87}Rb のみが封入されているセルへ入射する光、2 つ目は共振器に入射する光、3 つ目は従来のチューニング幅の評価方法に使っていた ^{87}Rb の飽和吸収スペクトルを検出する光、最後に波長計に入射する光である。磁場を加えた Rb セルを透過させるレーザー光は Rb セルに入射する前にグランテーラープリズム (GTP) に透過させ確実に Rb セルを直線偏光の光が入射するようにした。Rb セル透過後に $\lambda/4$ 板に通し、その後ウォラストンプリズム (WP) で σ^+ 偏光と σ^- 偏光に基づく 2 つの直線偏光に分離しそれぞれの光強度を検出した。その後これら 2 つの信号を減算回路に入力し、レーザー制御に用いる

エラー信号を発生させた。エラー信号を PI 制御回路に入力して制御信号を発生させ、それを LD へフィードバックさせてレーザーの発振周波数を安定化した。共振器はミラー間隔を $d = 1.32 \text{ m}$ に設定し、FSR は理論値に従い 113 MHz とした。また、従来のチューニング幅の測定方法で用いていた ^{87}Rb の飽和吸収スペクトルは PD2 とチョッパー (変調周波数 1.5 kHz) の信号をロックイン増幅器へ入力して得た。なお、図 6 は LD の波長連続的に変化させて観測した ^{87}Rb の飽和吸収スペクトルである。縦軸は信号電圧で、横軸は波長である。最も短波長側にあるピークから長波長側へ P1、P2 のように番号を付けた。



LD : 半導体レーザー、PD : 光検出器

LIA : ロックイン増幅器、DSO : デジタルオシロスコープ

GTP : グランテーラープリズム、WP : ウォラストンプリズム

実線矢印 : 光信号、点線矢印 : 電気信号

図 5 チューニング幅の測定実験配置

作製したファブリー・ペロー共振器は振動に弱くチョッパーを回している状態では共振器信号が乱れてしまったため、チューニング幅の測定は従来の方法と周波数マーカーを使った方法を別々に行った。初めに従来の方法でチューニング幅を測定した。現在可能であるエラー信号の最大のチューニング幅を得るためにソレノイドコイルに流す電流値を 3.0 A に設定しゼーマンシフトさせた。発生させたエラー信号のロッキングポイントを飽和吸収スペクトルの P1 よりも短波長側に設定し、LD の安定化を開始した。制御開始後、PD3 前の ND フィルターで PD3 が受光する光強度を調整しロッキングポイントを長波長側にシフトさせた。これにより LD の発振周波

数が連続的に変化しながら飽和吸収スペクトルを検出した。ロッキングポイントを発生できなくなるか、あるいは制御回路からのフィードバック信号がサチュレーションを起こしてしまうと制御が外れるので、それまでに観測できた飽和吸収スペクトルを飽和吸収スペクトルと比べてチューニング幅を見積もった。図 7 にその結果を示す。縦軸は信号電圧、横軸は時間である。P1 よりも短波長の位置から安定化制御を行っている。エラー信号が 0V に保たれているので安定化制御は維持されている。図 7 中の点線で囲んだ時点でフィードバック信号がサチュレーションを起こしたため、制御が外れた瞬間とした。安定化制御中にスペクトルのピークは P1 から P5 まで確認できた。 ^{87}Rb の飽和吸収スペクトル (図 6) の P1 から P4 までで 267.2 MHz で P4 から P6 まで 157.1 MHz であり P5 は P4 と P6 の中心に現れる。このことから、安定化をしたまま LD の発振周波数を少なくとも 300 MHz 以上の範囲でチューニングができることまで分かった。しかし、1 章でも述べたようにこの方法では飽和吸収スペクトルの P1 よりも短波長側のチューニング幅を測定することはできなかった。

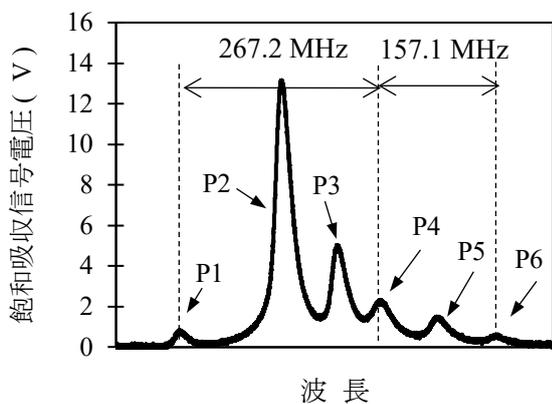


図 6 ^{87}Rb 飽和吸収スペクトル

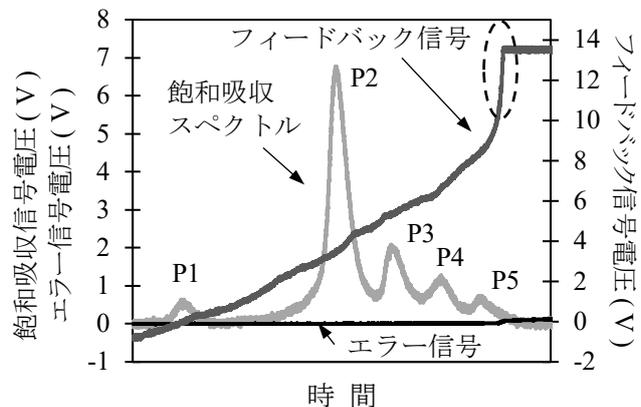


図 7 従来のチューニング幅測定結果

次に周波数マーカーを使った方法でチューニング幅を正確に測定することを試みた。前述のようにソレノイドコイルに流す電流値を 3.0 A に設定しエラー信号を発生させた。ロッキングポイントはエラー信号の極小部分 (長波長側) になるように設定し LD の安定化を開始した。制御開始後、PD3 前の ND フィルターで PD3 が受光する光強度を調整しロッキングポイントを短波長側にシフトさせた。これにより、エラー信号の極小から極大 (端から端) までの範囲のチューニング幅を測定できる。共振器信号は隣り合うピークの信号強度が同じため、LD の発振周波数を連続的に変化させたことを示すために PD4 で ^{87}Rb の吸収信号を同時に検出した。共振器信号のピークの数によってチューニング幅を見積もった。図 8 にその結果を示す。縦軸は信号電圧、横軸は時間である。図 8 中でフィードバック信号が減少し始めた瞬間が PD3 前の ND フィルターを回し始めた瞬間であるので、この瞬間が測定開始の瞬間である。エラー信号が 0V に保たれているので安定化制御は維持されている。またフィードバック信号がサチュレーションを起こした瞬間を制御が外れた瞬間とした。ロッキングポイントの周波数をシフトさせている間で共振器信号に 5 つのピークが観測された。さらに、測定開始の共振器信号強度がおおよそ 0.55 V であ

った。FSR は 113 MHz に設定しているので、開始時点から最初のピークまでの間隔は周波数で換算すると 26.6 MHz であり、これらのことから LD の安定化制御時にチューニングできた範囲は 478.6 MHz であることが分かった。従来の ^{87}Rb の飽和吸収スペクトルを用いた方法では P1 よりも短波長側のチューニング幅を測定することができなかった。また、ピークからピークまでの間を周波数に換算することができなかった。しかし、周波数マーカーを使う方法では、どの周波数領域でも透過光信号をモニターできる。また、信号のピークから隣のピークまでの間隔が等しい周波数で規則的に現れるので透過信号からチューニング幅を容易に決定できる。このように、従来の方法での欠点を克服でき、正確にチューニング幅を測定できるようになったと言える。

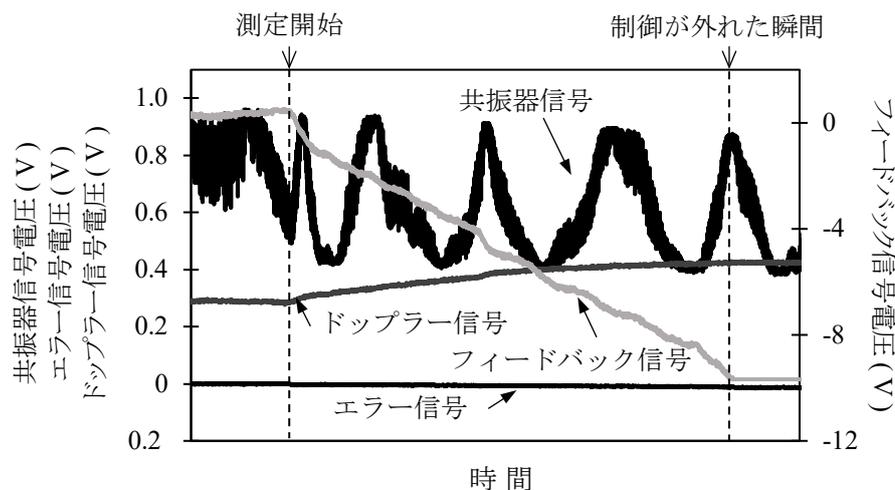


図8 共振器信号を使ったチューニング幅測定結果

4. まとめ

周波数マーカーとしてファブリー・ペロー共振器を作製し、それを用いて LD の発振周波数安定化中のチューニング幅の測定を行った。共振器の FSR は理論値と測定値で誤差の範囲で一致していたため、共振器長から求められる理論値を用いてチューニング幅の測定に使えることが可能であるとわかった。 ^{87}Rb の飽和吸収スペクトルを使ったチューニング幅の測定では決まった周波数領域にしか信号が存在しないので飽和吸収スペクトルの最も短波長側にあるピークから長波長側に 300 MHz 以上のチューニング幅があるとしかわからなかったが、周波数マーカーを用いることで原子の吸収信号が存在する周波数領域と関係なく幅広い領域で我々のレーザー制御のチューニング幅を決定できるようになり、478.6 MHz と、従来よりもチューニングできていることを明らかにできた。また共振器長は可変で FSR を簡単に変えることができるようにした。共振器の間にミラーを置き共振器中の光路を折っても共振器信号の FSR は理論値に従って得られることが分かった。しかし、作製した共振器は振動に弱く、設置している台に手を置いているだけでもミラー間距離が微小に変化し FSR が変動してしまうため、チューニング幅の測定の際には細心の注意を払う必要があるという課題も明らかになった。これについては、ミラーマウントの下

部に除震ゴムを敷くなどして伝わる振動を極力減らすことで、今回よりも狭い FSR の共振器信号でさらに精度よくチューニング幅を測定できることが期待される。

参考文献

- 1) 榎田孝司：「光物理学」共立出版株式会社 1995 年 pp. 9 - 12, pp. 135 - 140
- 2) 日本化学会：「化学便覧基礎編（全 2 冊）」丸善株式会社 1966 年 pp. 21 - 48, pp. 556 - 557
- 3) 山口一郎：「応用光学」オーム社 1998 年 pp. 232 - 233
- 4) Arnold Sommerfeld 「光学」（瀬谷正男・波岡武訳）講談社 1969 年 pp. 111 - 119
- 5) B. Sheehy, S - Q. Shang, R. Watts, S. Hatamian, H. Metcalf “Diode laser deceleration and collimation of a rubium beam” J. Opt. Soc. Am. B Vol. 6, No. 10, pp. 2165 - 2170

(2020年3月31日提出)

(2020年4月10日受理)

Accurate Tunability of Stabilized Laser Measured with Frequency Marker

ARAI, Aoi

Graduate School of Education, Saitama University

KAMEYAMA, Sougo

Faculty of Education, Saitama University

OHMUKAI, Ryuzo

Faculty of Education, Saitama University

Abstract

The tunability of the frequency of a stabilized laser was accurately determined with a frequency marker. The marker was a Fabry-Perot optical cavity that consisted of two plane mirrors arranged in parallel. The intensity of the laser light transmitted through this marker was monitored while we continuously changed the stabilized laser frequency, and we determined the tunability of the stabilized laser on the basis of how many resonant peaks were observed. Previously, we determined the tunability of our stabilized laser to be more than 300 MHz using the spectrum at which atomic saturation occurs. However, it turned out that the precise tunability was 478.6 MHz with this technique.

Keywords : laser diode, Fabry-Perot cavity, tunability, frequency stabilization