

原子スペクトルの磁気光学効果を用いたレーザー制御

小 林 憲 治 埼玉大学大学院教育学研究科
阿 部 純 也 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：ルビジウム、ゼーマン効果、偏光、レーザー、チューニングレンジ

1. はじめに

1960年にレーザーが開発されて以降、レーザーの狭帯域化や波長可変化技術の発展によって従来までのランプ光源では行えなかった光学分野の研究がレーザーを光源とすることで急速に進展するようになった。例えば気体原子を絶対零度付近まで冷却し、それを多数集めて原子の波動性としてのふるまいを観測することが可能となった。また光の量子的性質を制御・利用することで量子コンピューターを開発するなど新たな技術の誕生が期待され、従来よりも精度が高い次世代の原子時計を開発する研究も行われている¹⁾。これらの研究の光源としてのレーザーの発振周波数は極めて高い安定度が求められる。しかし、レーザーの発振周波数は温度や振動といった外部環境の影響を受けやすい欠点がある。したがってそれを克服し、発振周波数を実験が行われているあいだ、安定化する技術の開発は極めて重要な課題である。

レーザーの発振周波数を安定化するには、まずそのレーザー光を制御する基準となる参照信号を得て、その次に参照信号とレーザーの発振周波数の差である偏差を求め、最後に制御系を介してその偏差が0となるようにレーザーへとフィードバックを行うのが一般的である。その参照信号として気体原子の飽和吸収スペクトルが用いられることが多い。飽和吸収信号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と極めて狭いから²⁾、これを参照信号に用いると高い精度でレーザーの発振周波数を制御することができる。しかし、このスペクトルを得るためには多くの装置を要するので機器配置の複雑化、厳密な光学調整作業が避けられず、実験結果の再現性に乏しい。また高い精度で制御ができる反面、制御可能な周波数範囲は狭い。そこで、我々はレーザーの発振周波数安定化に向けてルビジウム (Rb) の D_2 線の吸収スペクトルと磁気光学効果を用いて、簡略な実験配置と広いチューニング幅を同時に達成できるレーザーの制御法の実現を試みた。Rbは飽和蒸気圧が高く ($\approx 10^{-7}$ torr @ 293K) 真空装置や加熱装置無しでRb原子の分光実験が可能である。このRbが封入されたガラスセルに両端から永久磁石で磁界を加えて磁気光学効果の1つであるZeeman効果をそのエネルギー準位に生じさせ、縮退を解く。Zeeman効果によるエネルギー準位のシフト量は磁界の強さに比例する。そこに、2種類の円偏光成分 (σ^+ 偏光と σ^- 偏光) に分けた半導体レーザー (LD) 光を照射し、その透過光をそれぞれ検出する。これら2種類の円偏光を吸収したDoppler吸収信号のピーク位置は、磁界を加えず吸収させた場合のそれと比較して互いに逆で同じ大きさの周波数だけシフトしている。シフトの向きは σ^+ 偏光を吸収した信号のピーク位置は高周波数 (短波長) 側にシフトし、 σ^- 偏光を吸収した信号のそれは低周波数 (長波長) 側へシフトする。これらの信号の差を検出してロッキングポイントを発生させて安定化を行う。この方法はレ

レーザー光の強度や周波数の変調を行う必要がなく、装置が簡略化され機器の調整も容易となり、安定化による実験結果の再現性が高まる。また、得られる信号の周波数幅はDoppler効果を受けているから飽和吸収信号のそれよりも大幅に広い。つまり、それに応じてロッキングポイントとして設定が可能と考えられる範囲（ロッキングレンジ）も広がる。また、本研究では同じ原理に基づいて偏光子を用いた方法での安定化も試みた。偏光子とマッチした直線偏光のLD光をRbに照射し、その透過光を2種類の円偏光成分由来の直線偏光に分けた後に検出し、得られた2つの信号からロッキングポイントを発生させ安定化を行う。これによってRbセルへの照射が1方向だけで済み、安定度は同じまま光学調整を更に簡単にできると期待される。

2. 円偏光を用いたLDの発振周波数安定化実験

まず、Rb原子の吸収スペクトルにおける磁気光学効果の観測を行い、観測した信号によってロッキングポイントを発生させた。その実験配置を図1に示す。図中の実線は光の経路、点線は電気信号の経路を表している。さらに光信号の検出用にフォトダイオード（PD）を複数用いたのでそれぞれを区別して表す。光源は発振波長780nmの外部共振器型LD（New Focus社製TLB-6013-D）を使用した。このLDに50mAの注入電流を加えて発振させた。Rbは同位体として ^{85}Rb （72.15%）と ^{87}Rb （27.85%）の2種類が存在する³⁾。磁気光学効果観測用のセルには ^{87}Rb だけが封入されているが、もう一方のセルには ^{85}Rb と ^{87}Rb の両方が封入されている。レーザーの発振波長を ^{87}Rb の共鳴波長である780.247nm付近で連続掃引させて出力した。それを2方向に分けた。一方は波長計に入れて発振波長をモニターした。もう一方はRbセルへ双方向から照射するためにもう一度2方向に分けた。それぞれの経路でLD光を $\lambda/4$ 板に通し、 σ^+ 偏光と σ^- 偏光へ変化させて強度調節用のNDフィルターに通した。このあと2つのビームを双方向から永久磁石で磁界を加えた ^{87}Rb のみが封入されたセルへ照射し、それぞれの透過光をPDで検出した。また、磁気光学効果の確認のため、 $\lambda/4$ 板を透過後の光の一部をさらに分けて ^{85}Rb と ^{87}Rb の両方が封入された磁界を加えていないセルへ照射し、この透過光をPDで検出した。PD1は磁界を加えていないセルの吸収信号検出用とした。PD2では σ^+ 偏光を検出し、PD3では σ^- 偏光を検出するように $\lambda/4$ 板を調節して磁気光学効果を観測した。得られた信号を図2に示す。横軸は波長で縦軸は透過光強度である。図2中でPD1のスペクトルだけピークが2つあるが、短波長側の大きいピークの方は ^{85}Rb による吸収である。 ^{87}Rb の吸収によるピークに注目すると、PD2の信号のピーク位置がPD1のそれと比較して短波長側へシフトし、PD3のそれは逆に長波長側へシフトした。さらに検出したPD2の透過スペクトルのDoppler広がりからこのときのシフト量を見積もった。 ^{87}Rb のDoppler広がりをもつ吸収スペクトルの半値全幅（FWHM）は511MHz（@300K）である。これとそれぞれのピーク位置間の距離からシフト量を見積もった結果、 σ^+ 偏光によるピーク位置のシフト量は約90.0MHz、 σ^- 偏光では約89.7MHzとなり、ほぼ等しい大きさであった。これらの結果から磁気光学効果の観測が確認できた。

磁気光学効果の観測を確認した後、 σ^+ 偏光と σ^- 偏光を検出したPDの信号を減算回路に通してLDの制御のためのロッキングポイントを発生させた。ロッキングポイントはPD3からPD2の信号を減算して発生させた。ロッキングポイントとなるゼロクロスポイントは、2つの透過光強度値が等しい点で得られる。その結果を図3に示す。横軸は波長、縦軸は減算回路の出力電圧である。得られた信号は0Vと交差し、その左右で極性が変化している。信号の極大値と極小値間がロッ

キングレンジと考えられる。図3の結果から、ロッキングレンジを ^{87}Rb のDopplerスペクトルのFWHM (511MHz) を用いて換算すると552MHzとなった。 Rb 原子の飽和吸収スペクトルを使用したときのロッキングレンジは約10MHzと見込まれるので、この値と比べるとロッキングレンジはおよそ50倍に拡大したことになる。

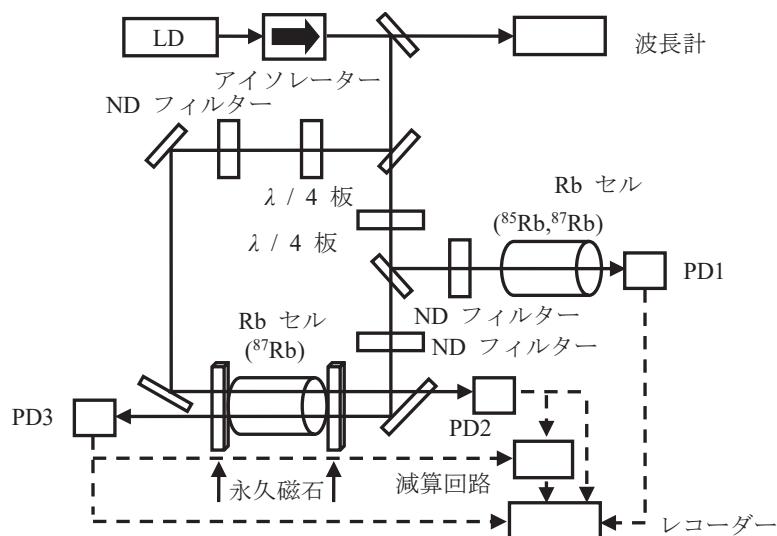


図1 磁気光学効果観測の実験配置
(LD：半導体レーザー、PD：フォトダイオード)

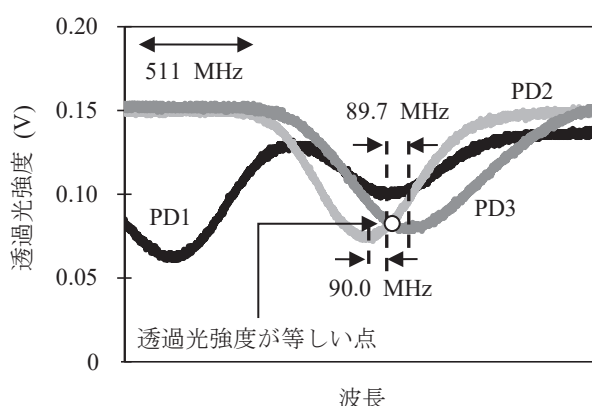


図2 磁気光学効果の観測結果

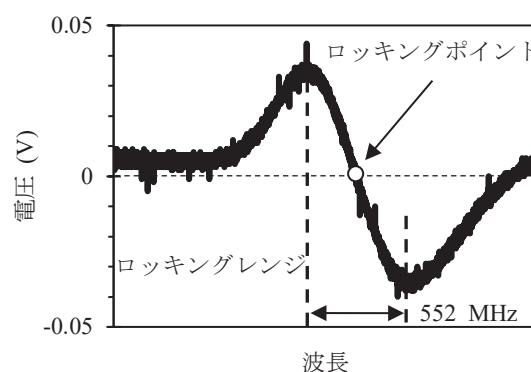


図3 ロッキングポイントの発生結果

ロッキングポイントの発生を確認できたので、次にLDの発振周波数の安定化を行った。実験配置を図4に示す。LDの出力光はアイソレーターに通したあと、磁界を加えたRbセルへ入射する光、安定度の評価用の ^{87}Rb の飽和吸収信号を検出する光、波長計に入射する光の3経路へ分けた。飽和吸収スペクトルは原子の自然幅程度に狭い周波数幅をもつスペクトルで、これを用いて安定度の評価を精密に行うために測定した。まず、LDの発振波長を連続掃引させPD1とチョッパー（変調周波数1.3kHz）の信号をロックイン増幅器へ入力して飽和吸収スペクトルを測定した。その結果を図5に示す。横軸は波長、縦軸は飽和吸収強度である。得られたピークは図6に示す ^{87}Rb の原子準位における基底状態の $5^2S_{1/2}$ ($F=2$) から、励起状態の $5^2P_{3/2}$ ($F'=1, 2,$) への遷移⁴⁾ とそれらに伴うクロスオーバー共鳴のピークの合計6つである。クロスオーバー共鳴とは、ある原子へ対向からレーザー光を照射した際に、それがもつエネルギーがその原子の励起状態における2つの

エネルギー準位間のちょうど中間に相当すると、原子が共鳴を起こしてレーザー光への吸収量が相対的に減少する現象である。6つのピークについて図の短波長側（高周波側）からP1からP6までの記号を付け、理論的に得られるスペクトルとこれらをフィッティングさせ、このスペクトルのFWHMを求めた結果、12.13MHzとなった。各ピークの間隔と原子のエネルギー構造を比べてP1は $5^2S_{1/2}F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}F'=1$ の遷移、P4は $5^2S_{1/2}F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}F'=2$ の遷移、P6は $5^2S_{1/2}F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}F'=3$ の遷移に伴うピークで、P2はP1とP4、P3はP1とP6、P5はP4とP6のそれぞれクロスオーバー共鳴^{2, 4)}によるピークと確認できた。

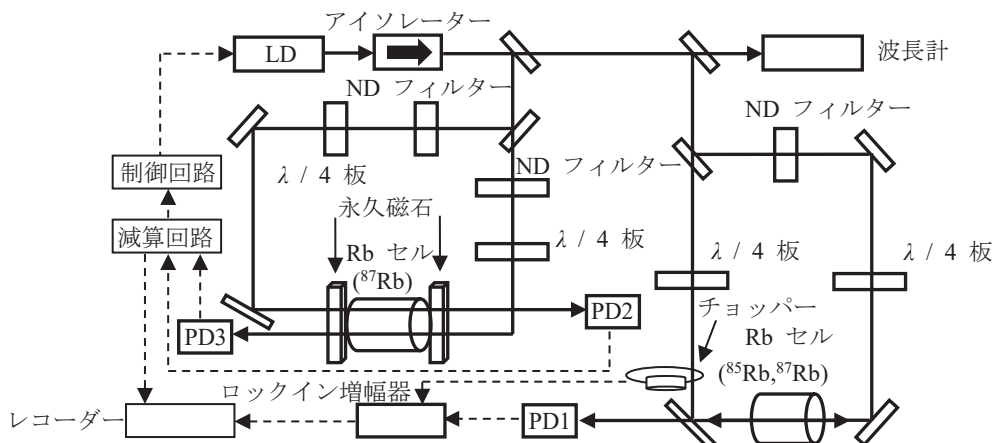


図4 LDの発振周波数制御

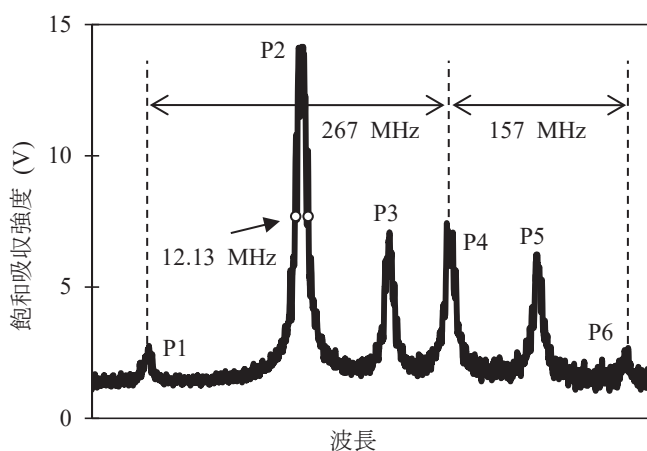


図5 測定した ^{87}Rb の飽和吸収信号

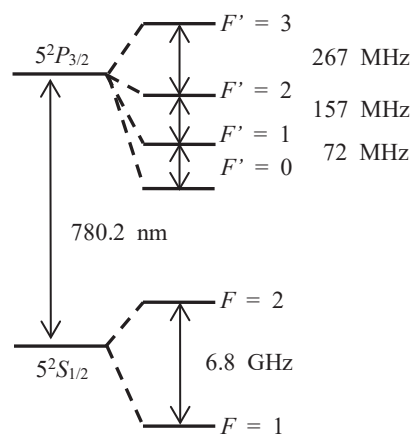


図6 ^{87}Rb のエネルギー準位

検出後に、図4のPD2とPD3の信号を減算回路に入力して安定化のためのロッキングポイントを図5中の最も強い強度信号であるP2のフリンジのおよそ半分の高さの位置に設定した。そしてLDの発振波長の連続掃引を停止した。停止後にLDの発振波長をロッキングポイント付近に調整した。ここで、制御回路を動作させてその出力をLDの注入電流にフィードバックした。制御回路は増幅回路、積分回路、微分回路、加算回路から構成されている。安定化の実験結果を図7に示す。横軸は時間、縦軸は飽和吸収強度とエラー信号の出力電圧である。本実験ではエラー信号から安定化が行われているか判断した。その出力が0 V付近で一定であるならば安定化されていると考えてよい。図7中でエラー信号が0 V付近で一定となり、安定化されていると確認できた。安定化中の飽和吸収強度は電圧値で3.84Vから8.84Vまでの変動をした。図5のP2付近を拡大し今回

の変動を周波数幅に換算した結果を図8に示す。横軸は波長、縦軸は信号強度である。吸収強度の3.84Vから8.84Vまでの変動はLDの発振周波数の変動幅として7.79MHzに相当した。これは飽和吸収スペクトルにおけるピークのFWHM (12.13MHz) よりも狭い周波数となった。

次に、LDの発振周波数を安定化したまま、チューニングができる周波数の範囲を測定した。ロッキングポイントを図5中の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、PD2が検出する信号強度を決めるNDフィルターを調整して光強度を増加させ、ロッキングポイントを長波長側に移動させた。この移動によって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と制御が外れるので、それまでに観測できたスペクトルを図5と比べてチューニング幅を見積もった。図9にその結果を示す。横軸は時間、縦軸は飽和吸収強度とエラー信号の出力電圧である。図9中でP1～P4間 (267MHz) のピークを4つ検出できたが、それ以降は制御不能となった。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250MHz以上チューニングできることが分かった。

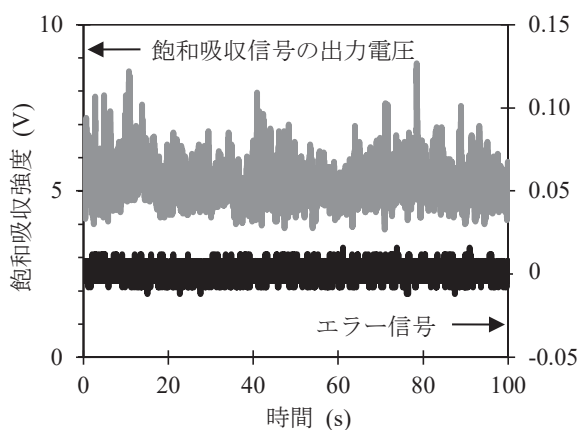


図7 安定化制御の結果

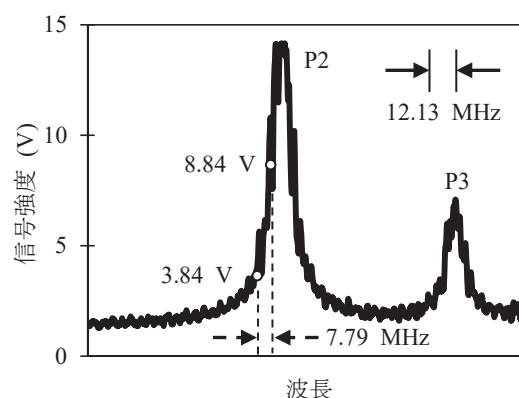


図8 周波数の変動幅の見積もり

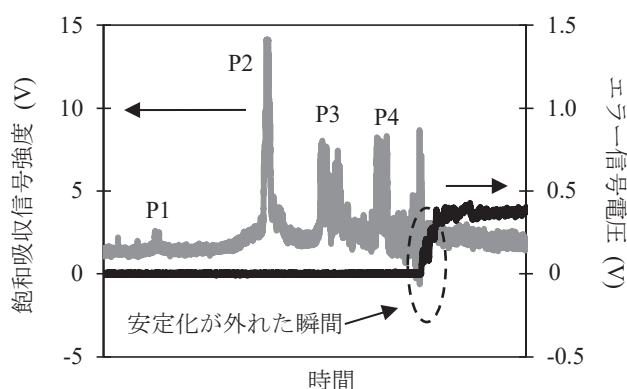


図9 チューニング幅の測定結果

3. 直線偏光のレーザー光を用いたLDの発振周波数安定化実験

実験配置のさらなる簡略化を目指し、グランテラー偏光子 (THORLABS社製GT10-B) とウォラストンプリズム (THORLABS社製WP10) の2つの偏光子を用いて、直線偏光の光を1本だけ入射させたときに得られる透過光の強度信号からLDの発振周波数安定化を試みた。グランテラー偏光子 (GTP) は透過した光を直線偏光に変え、ウォラストンプリズム (WP) は透過した光を直

線偏光に変えた後に2方向に分離させる役割を担う。この方法で上記と同じような原子スペクトルの磁気光学効果の観測とロッキングポイントの発生をする実験を行った。実験配置を図10に示す。LDの出力光は直線偏光の光であるが、GTPを通すことで確実にそれとマッチする直線偏光成分のみを透過させた。その光はやはり磁界を加えたRbセルへ入射した。透過光は $\lambda/4$ 板、WPの順番で通すことによって、 σ^+ 偏光と σ^- 偏光のそれぞれに由来する2つの偏光成分を空間的に分離させた。PD2は σ^+ 偏光に由来する偏光、PD3は σ^- 偏光に由来する偏光を検出した。これらの信号に加えて、磁気光学効果の確認用の信号を先の実験と同じRbセルとPD1で検出した。その結果を図11に示す。横軸は波長で縦軸は透過光強度である。PD1の ^{87}Rb のピーク位置を基準にPD2とPD3のそれらが互いに逆にシフトした結果から、偏光子を用いても磁気光学効果の観測を行うことができたといえる。さらに、検出したPD3の透過スペクトルのDoppler広がりからピークのシフト量を見積もると、 σ^+ 偏光によるピーク位置のシフト量は約131MHz、 σ^- 偏光では約123MHzとなり、ここでもほぼ同じ値となった。ただ、これらの値において8MHzの差が生じたが、これは磁界が一様に加えられていなかったことが原因と考えられる。

磁気光学効果の観測を確認した後、PD3が検出する光強度を調節してロッキングポイントが発生させた。ロッキングポイントはPD3からPD2の信号を減算して発生させた。その結果を図12に示す。横軸は波長、縦軸は減算回路の出力電圧である。得られた信号はあるポイントで0Vと交差しその左右で極性が変わり、想定通りのロッキングポイントを設定できた。ただし2つの透過光強度が厳密に等しくなっていないので、Rbが吸収を起こさない波長（周波数）域で減算出力の結果

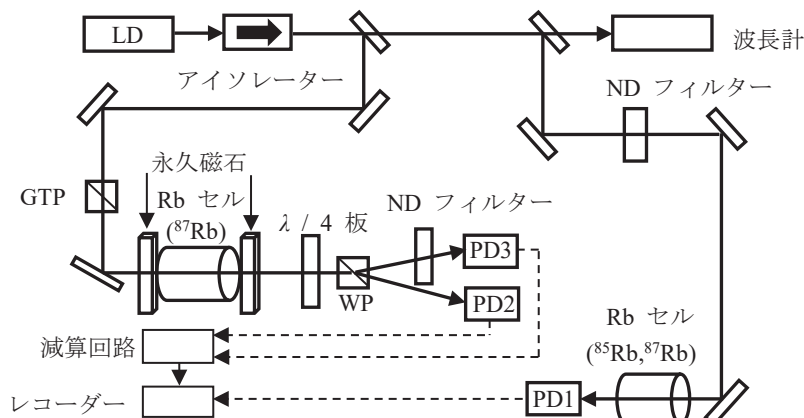


図10 簡略化した磁気光学効果観測の実験配置

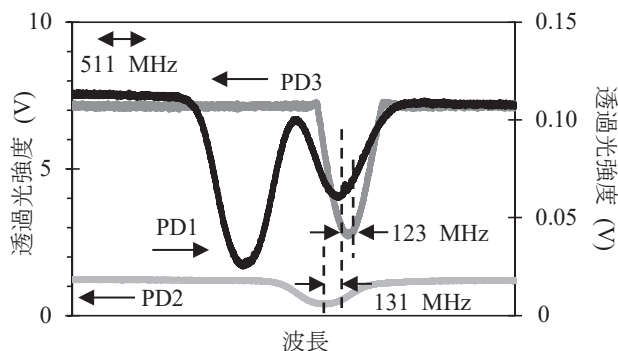


図11 磁気光学効果の観測結果

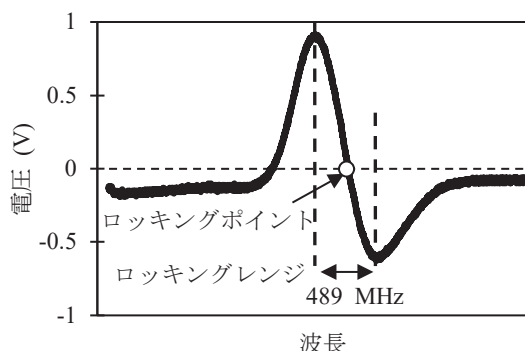


図12 ロッキングポイントの確認結果

果が 0 V とならなかった。ここでロッキングレンジを ^{87}Rb のDopplerスペクトルのFWHM (511MHz) を用いて換算し求めると、489MHzとなった。やはりこの値は飽和吸収信号を用いるときのロッキングレンジよりもおよそ50倍に広がっている。

ロッキングポイントの発生を確認できたので、このあと実際にLDの発振周波数の安定化に取り組んだ。実験配置を図13に示す。LDの出力光はアイソレーターに通したあと、磁界を加えたRbセルへ入射する光、安定度の評価用の ^{87}Rb の飽和吸収スペクトルを得る光、波長計に入射する光の3経路へ分けた。まず、飽和吸収スペクトルの観測を行った。LDの発振波長を連続掃引させ、PD1とチョッパー（変調周波数1.3kHz）の信号をロックイン増幅器へ入力して飽和吸収スペクトルを検出した。その結果を図14に示す。横軸は波長、縦軸は飽和吸収強度である。図中の6つのピークに、図の短波長側（高周波側）からP1'からP6'までの記号を付けた。得られた飽和吸収スペクトルと理論的に得られるスペクトルをフィッティングさせ、実験で得られた飽和吸収スペクトルのFWHMを求めたところ12.14MHzとなった。その後、図13のPD2とPD3の信号を減算回路に入力してロッキングポイントを図14中の最も強い強度信号であるP2'の最大強度値のおよそ半分となる強度のポイントに設定した。ここで、LDの発振波長の連続掃引を止め、それをロッキングポイント付近に調整した。調整後、制御回路を動作させ、その出力信号をLDの注入電流にフィードバックした。安定化の結果を図15に示す。横軸は時間、縦軸は飽和吸収強度とエラー信号

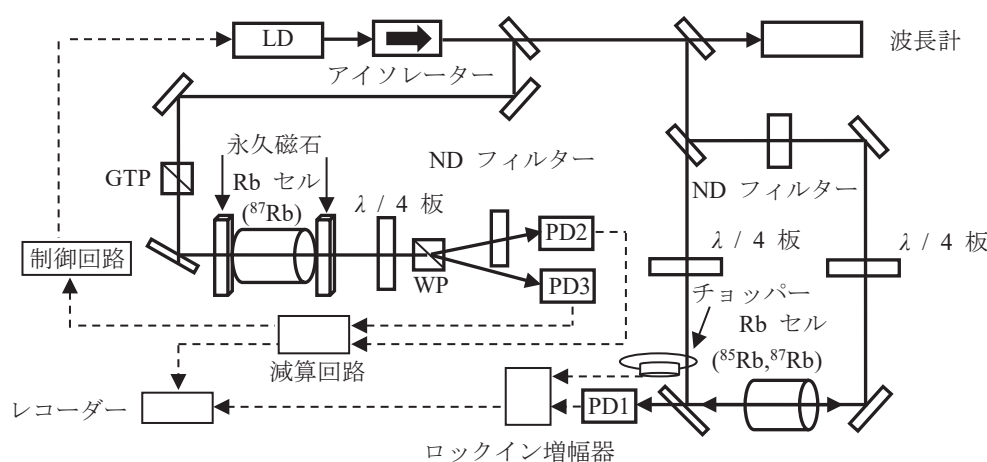


図13 簡略化したLDの発振周波数制御実験配置

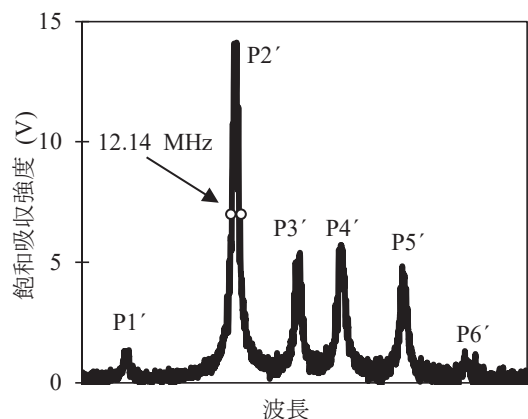


図14 測定した ^{87}Rb の飽和吸収信号

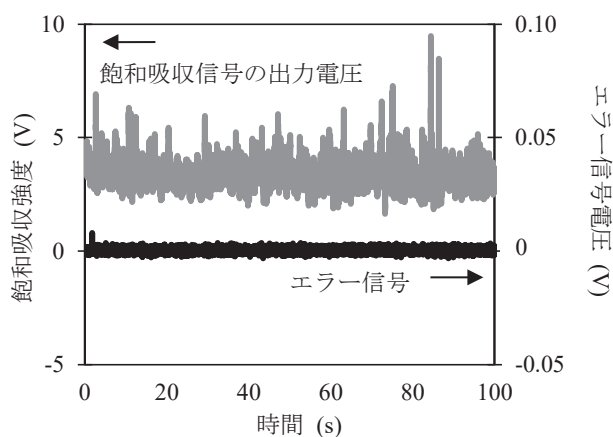


図15 安定化制御の結果

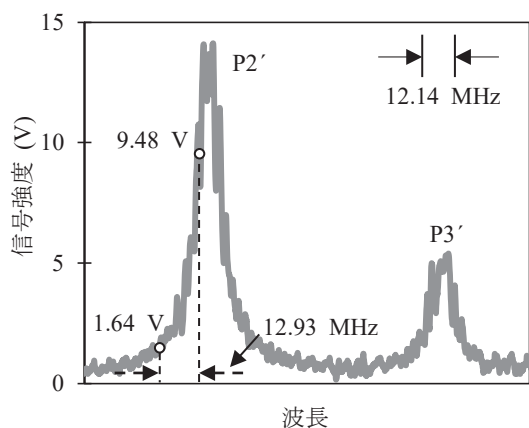


図16 周波数の変動幅の見積もり

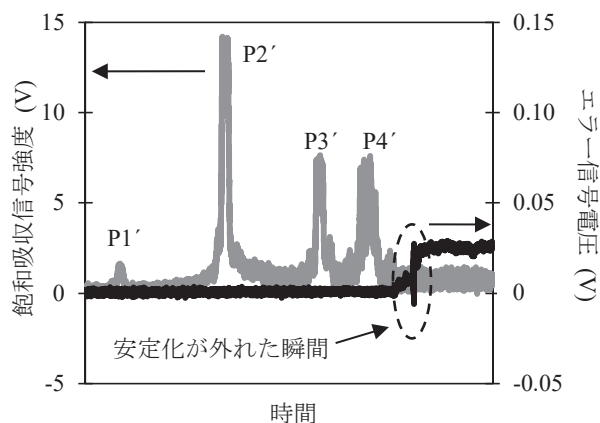


図17 チューニング幅の測定結果

号電圧である。図15中でエラー信号が0 V付近で一定に保つことができたので、図中の時間においてLDの発振周波数の安定化は行われていると判断できる。この安定化中の飽和吸収強度は1.64Vから9.48Vまでの範囲で変動した。変動幅を図14のP2'付近を拡大した図16中に当てはめて周波数幅に換算した。横軸は波長で縦軸は信号強度である。安定化中における1.64Vから9.48Vまでの強度変動からLDの発振周波数の変動幅を求めたところ12.93MHzとなった。これは飽和吸収スペクトルのピークのFWHM (12.14MHz) よりも0.79MHzだけ広い周波数幅での制御となった。

次に、LDの発振周波数を安定化させつつ、そのチューニング可能な範囲を測定した。ロッキングポイントを図14中のP1'よりも短波長側に設定し、LDの安定化を開始した。制御開始後に、PD3が検出する信号強度を決めるNDフィルターを調整して、その信号強度を減少させてロッキングポイントを長波長側に移動させた。この移動によって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が発生できず、制御が外れるまでのスペクトルを測定し、それを図14と比べてチューニング幅を見積もった。図17にその結果を示す。横軸は時間、縦軸は飽和吸収強度とエラー信号電圧である。図17中においてP1'～P4'間 (267MHz) の4つのピークを検出し、それ以降では制御が外れたことが分かる。この測定結果から、安定化を保ちながらLDの発振周波数を250MHz以上わたりチューニングすることに成功した。

4. まとめ

磁気光学効果と円偏光を用いて、LDの発振周波数を安定化させた。気体の ^{87}Rb 原子が封入されたガラスセルの左右の両側から永久磁石で磁界を加えた。そのセルへ $\lambda/4$ 板で σ^+ 偏光と σ^- 偏光の2種類の円偏光成分に変化させたLDの光を、双方向から入射して吸収のピーク位置が互いに異なる2つの透過スペクトルを測定した。これら2つのスペクトルからロッキングポイントが発生させて、制御回路によるフィードバックをLDに施した結果、制御時間100秒間において7.79MHzにまで発振周波数を安定化することができた。この値は、安定度の評価に用いた ^{87}Rb の飽和吸収スペクトルの半値全幅である12.13MHzよりも狭い値である。また、安定化を維持しながらレーザーのチューニングを行ったところ、250MHz以上の周波数幅でチューニングを行うことができた。原子の自然幅は数MHz～数十MHzであり^{5, 6)}、それと同程度の周波数幅をもつ飽和吸収スペクトルを用いた安定化では数十MHz程度の周波数幅しかチューニングできないので、この値はそれの

10倍以上の値である。

結果の再現性を高めて、かつ実験配置をもっと簡単にするために偏光子を用いて同様の安定化の制御を行った。その結果、制御時間100秒間において12.93MHzまで発振周波数を安定化することができた。先の結果よりも安定度が悪くなったが、それでも飽和吸収スペクトルの半値全幅程度の安定度を実現することができた。同様に、レーザーの発振周波数のチューニング可能な周波数幅を求めたところ、この方法でも250MHz以上の周波数幅でチューニングできた。この結果から、LDの発振周波数における広いチューニング幅をもつ安定化を行うことができたといえる。この方法で安定化されたレーザーと、外部参照共振器を組み合わせることで、発振周波数を変動させられるレーザーで共振器のミラーの反射率の設定された共鳴条件に合えば、あらゆる発振周波数値で制御を行うことができると期待される。

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. 27-43.
- 2) Wolfgang Demtröder: *Laser Spectroscopy Vol.2: Experimental Techniques Fourth edition* (Springer, 2008) pp. 93-102.
- 3) 日本化学会：「化学便覧基礎編（全2冊）」（丸善株式会社 1966）pp. 21-48,556-557.
- 4) 久我隆弘：「量子光学」（朝倉書店 2003）p. 56.
- 5) Wolfgang Demtröder: *Laser Spectroscopy Vol.1: Basic Principles Fourth edition* (Springer, 2008) pp. 62-64.
- 6) Harold J. Metcalf, Peter van der Straten: *Laser Cooling and Trapping* (Springer, 1999) pp. 273-278.

(2016年 9 月16日提出)

(2016年12月15日受理)

Laser Control Using the Magneto-Optical Effect in Atomic Spectra

KOBAYASHI, Kenji

Graduate School of Education, Saitama University

ABE, Junya

Graduate School of Education, Saitama University

OHMUKAI, Ryuzo

Faculty of Education, Saitama University

Abstract

We stabilized the oscillation frequency of a laser diode by using the Zeeman effect of an atomic spectrum. We applied a magnetic field with a permanent magnet to rubidium atoms enclosed in a glass cell. Two circularly polarized (σ^+ and σ^-) laser beams were entered into the cell to obtain the Zeeman-shifted, Doppler-broadened spectra. The error signal for controlling the laser frequency was generated with these spectra. As a result, the stability of the laser frequency reached 7.8 MHz. The tuning range was more than 250 MHz, which was determined from the saturated absorption signal. For a simpler experimental arrangement, we performed another frequency control experiment using the linearly polarized laser beam, where we detected both the blue- and the red-shifted Doppler-broadened spectra due to the Zeeman effect with a single incident laser beam. The resultant stability of the laser frequency was 12.9 MHz. Though the stability worsened, the tuning range was almost the same as the previous one. The oscillation frequencies of a variety of single-mode cw lasers should be controlled with a wider tuning range when our developed stabilization techniques are combined with a transfer cavity.

Keywords: rubidium, Zeeman effect, polarization, laser, tuning range