

プロジェクト名： 紫色狭帯域チューナブル半導体レーザー光源の高安定化に関する研究

プロジェクト代表者： 大 向 隆 三 (教育学部・准教授)

1 はじめに

近年、レーザー光と原子の間の相互作用が詳細に研究されるようになり、今や光を用いて原子の内的・外的自由度を操作する技術が実現しつつある。当該研究を遂行する上では、多くの原子で共鳴波長が 400 nm 程度以下の領域に存在しているので、この波長域でのレーザー開発と整備が差し迫った重要な課題となる。我々は、このような光源としてコスト・信頼性・周波数制御性能などの点から半導体レーザー (LD) をベースとした光源が理想的であると考え、最近発明された紫色 LD を用い、回折格子による光フィードバックの方法を駆使して波長可変・狭帯域な外部共振器型紫色 LD 光源の開発を行ってきた。その結果、スペクトル線幅が 8 MHz 以下で、波長が 398.774 nm から 399.738 nm の範囲でチューニング可能な光源を開発することができた。しかし、この光源はシングルモード発振を維持できる時間に制限があり、動作が不安定であるという欠点も明らかとなった。この原因は、LD と光フィードバック用ミラーにより構成される複合共振器において、外的な環境変化 (温度変化や機械的な振動) のために両者の共鳴条件にズレが生じているためと考えられる。

そこで本研究では、外部共振器型紫色 LD 光源を安定化するための参照信号となる光信号の発生を試みた。具体的には、飽和蒸気圧の高さ・共鳴周波数の LD 光源とのマッチングなどから、ルビジウム (Rb) 原子の吸収スペクトルを用いてその共鳴周波数にロックした近赤外 LD 光を発生させる実験を行った。このようなレーザー光を発生できれば、その信号を基準として、異なる波長 (今の場合、近赤外光と紫色光) で動作する参照共振器を経由して紫色 LD の発振条件を制御することが可能になり、我々が当初目標としていた LD ベースの紫色レーザー光源を完成させるための重要な基盤技術となる。

2 実験配置

実験配置を Fig. 1 に示す。外部共振器型近赤外 LD (出力 3 mW) からの出力光を光アイソレータに通し、ビームサンプラーで 2 つのビームに分けた。一方は波長計に入れて波長の値をモニターするために使用し、もう一方を原子分光用の光とした。原子分光用の光はさらにハーフミラーで等分され、2 つの光は Rb 原子の封入されたガラスセルに対して逆向きに同じ経路で入射させた。LD の発振波長を変化させながら Rb セルの透過光強度をフォトダイオードでモニターし、チョッパーを用いてロックイン検出を行なうことにより、高感度に Rb 原子の飽和吸収信号を検出した。得られた信号はサーボ回路に入力した。この回路は、オフセット操作回路、比例制御回路、積分制御回路、加算回路により構成されている。これらの制御のあとサーボ回路から出力される信号を誤差信号として LD の注入電流へフィードバックさせることにより、外部共振器型近赤外 LD の発振周波数を Rb 飽和吸収信号のフリンジ (吸収スペクトルのスロープ) へ安定化させるよう試みた。

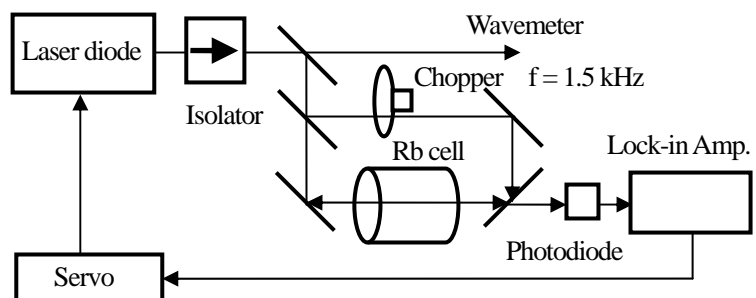


Fig. 1 Experimental setup

3 実験結果

Rb原子の飽和吸収スペクトル測定結果をFig. 2 に示す。横軸は周波数、縦軸は吸収強度である。飽和吸収測定に使用した2つの光強度は両方とも 0.36 mW/cm^2 であった。Fig. 2 の結果では、 ^{85}Rb の基底状態 ($5S_{1/2}$) $F=3$ から励起状態 ($5P_{3/2}$) $F=2, 3, 4$ への吸収ピーク (①、③、⑥) と交差共鳴 (②、④、⑤) のピークを観測できた。これら6個の吸収スペクトル線幅は 14 MHz であり、Rb 原子の自然幅に対するレーザー光による飽和広がりを考慮した値 (約 10 MHz) と合致した。

これくらいのスペクトル幅をもつ吸収線を利用すれば、 1 MHz 以下のレーザー周波数安定度を実現できると見込まれるので、この信号を用いて実際に近赤外 LD の発振周波数安定化実験に移ることとした。Fig.2 で観測された6個の吸収スペクトルのうち、もっとも吸収強度の大きかった交差共鳴のピーク⑤にレーザー周波数をロックさせることを試みた。LD の発振周波数が揺らげば、その出力光を用いてモニターして

いる飽和吸収強度も変化する。我々は、その変化の大きさから LD の発振周波数の安定度を見積り、評価した。実験結果は Fig. 3 の通りであった。この図では横軸が安定化制御をかけている時間 (制御開始を 0 秒とした) であり、縦軸は安定化制御時にモニターされた飽和吸収強度を示す。安定化制御後では、100 秒のあいだにモニターした飽和吸収強度はほとんど変化せず、ほぼ一定の値を示した。Fig. 3 の飽和吸収強度の変動幅を Fig. 2 のスペクトルと対応させた結果、制御後の発振周波数安定度は 100 秒で 0.4 MHz という値を得た。測定時間を 7200 秒まで拡大させて同様の実験を行っても、安定度は 0.4 MHz のままであった。LD に何も制御を加えないフリーラン時では、この光源は 100 秒で 54 MHz 、7200 秒では 260 MHz もの周波数ドリフトを示していた。従って、我々の周波数制御により、当該光源の発振周波数の安定度は飛躍的に改善し、フリーラン時に比べて 100 倍以上にまで向上できたことが明らかとなった。

4 まとめ

飽和分光法を利用し、交差共鳴によって生じた Rb 原子の吸収線を用いて近赤外 LD 光の発振周波数安定化実験を実施した。その結果、7200 秒において 0.4 MHz の安定度を達成した。これは、フリーラン時における発振周波数安定度と比べて 100 倍以上向上しており、原子の自然幅 (数メガヘルツ) に比べても $1/10$ 以下の周波数幅に相当する。我々の当初の研究目的を十分満足する性能を実現できた。今後は、この高安定化した近赤外 LD 光を使って高安定な参照共振器を開発し、そこへ外部共振器型紫色 LD の発振周波数をロックさせることにより高安定な LD ベース紫色光源の開発へと進む予定である。

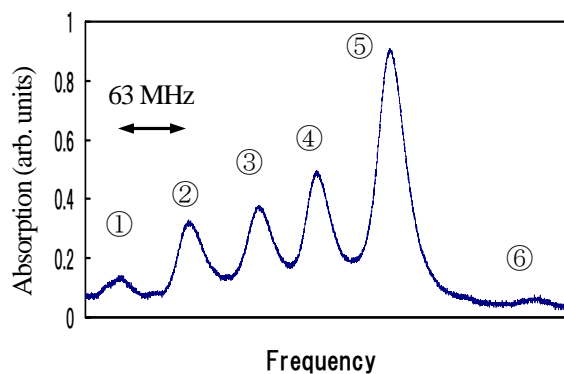


Fig. 2 Saturation spectrum

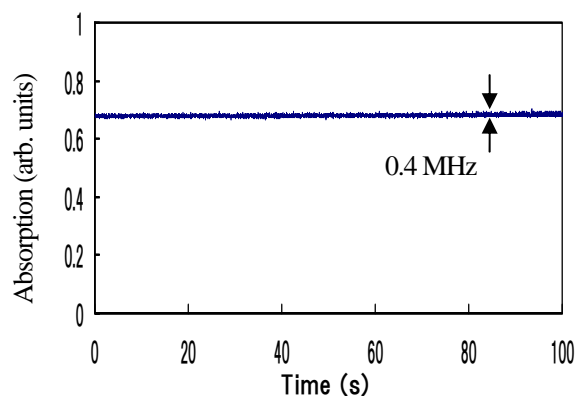


Fig. 3 Absorption intensity