

# 半導体レーザーの製作 その2

## 半導体レーザーの周波数安定化

量子・物質工学科 清水(和)研究室 前田 知里

### 1 目的

我々の研究室では、原子干渉計の開発を行っており、新たに準安定状態アルゴン原子を用いた原子干渉計の開発に着手することとなった。本研究では、準安定状態アルゴン原子をレーザー冷却する為の光源として、半導体レーザーシステムを製作する。

研究1において、製作した半導体レーザーは外部共振器によって制御することによりシングルモードで発振させ、注入電流と温度及びグレーティング角を制御することによって必要な発振波長(811.754nm)を得ることに成功した。しかし、レーザー冷却では高い周波数安定度を持ったレーザーが必要であり、このままでは周波数シフトなどによる不安定さから冷却用の光源としては使うことが出来ない。よって本研究では、製作した半導体レーザーの周波数を1~2 MHzまで安定化させることを目的とする。

### 2 方法

レーザー周波数の安定化に用いられる基準は原子の共鳴線である。しかし、原子は熱運動をしている為、ドップラー幅を持つ。温度を300Kとしたときのアルゴンのドップラー幅 $\Delta\nu_D$ は363MHz、励起寿命から計算される自然幅 $\gamma$ は5.9MHzであるので、共鳴線の自然幅はドップラー幅に埋もれてしまっている。そのため、自然幅程度の分解能を持つ飽和吸収分光法を用いて誤差信号を得、レーザーの制御系にフィードバックをかけることによって安定化を行う。

#### 2.1 偏光分光法

これまで、飽和吸収分光を用いた周波数安定化法としては、ロックインアンプを用いて飽和吸収信号の微分信号を取り出し、これを誤差信号としてフィードバックをかける方法が主に行われてきた。この方法はロックインアンプを使用するため、S/Nの高い誤差信号が得られるが、変調をかけなければならない。レーザーの周波数そのものに変調をかける方法は、レーザー周波数安定化という目的に対しそぐわない。ゼーマン効果を利用し原子の共鳴周波数に変調をかける方法は、コイルを使用するため、速い変調が行えない。

本研究では、偏光分光法による周波数安定化を試みた。偏光分光法は無変調で誤差信号が得られ、簡略な装置で周波数の安定化が出来る、という利点がある。

偏光分光法は、スピン偏極した原子に光が入射した時に、光の偏光方向によって屈折率が異なることを利用している。偏光分光法ではポンプ光に円偏光( $\sigma^+$ または $\sigma^-$ )、プローブ光に直線偏光( $\sigma^+ + \sigma^-$ )を用いる。

図1のような上準位と下準位にそれぞれ磁気量子数の異なる準位のある二準位系を考える。ここに上下準位間の共鳴周波数を持つポンプ光(図1では $\sigma^+$ )を入射すると、下準位の磁気量子数が小さい準位( $m = -\frac{1}{2}$ )の原子のみが上準位の磁気量子数が大きい準位( $m = \frac{1}{2}$ )に励起される。励起された原子は自然放出して、下準位の $m = \frac{1}{2}$ と $m = -\frac{1}{2}$ のどちらかの準位に落ちる。入射光は $\sigma^+$ 光なので $m = -\frac{1}{2}$ の準位に落ちた原子は再び励起されるが、 $m = \frac{1}{2}$ の準位に落ちた原子は励起されない。よって原子は光の吸収放出を繰り返すことで、下準位の磁気量子数が大きい準位( $m = \frac{1}{2}$ )に偏る。これをスピン偏極といい、このとき原子は $\sigma^+$ 光を吸収しなくなり、 $\sigma^-$ 光のみを吸収するようになる。

このため、 $\sigma^+$  光と  $\sigma^-$  光の吸収係数  $\alpha^+$ 、 $\alpha^-$  と屈折率  $n^+$ 、 $n^-$  に違いが生じる。 $\sigma^+$  光の屈折率  $n^+$  には吸収がないため変化は表れないが、 $\sigma^-$  光には吸収により屈折率  $n^-$  に分散が生じる。屈折率に生じる分散は図 2 のように共鳴周波数  $\omega_0$  を境に正負が逆転する形になっているので、誤差信号として周波数安定化に用いる事が出来る。

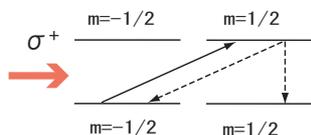


図 1: スピン偏極の原理

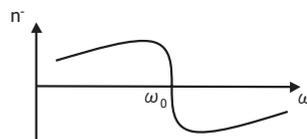


図 2: 屈折率の分散

この屈折率の分散を誤差信号として取り出すために、直線偏光のプローブ光を入射させる。直線偏光は  $\sigma^+$  円偏光と  $\sigma^-$  円偏光の重ねあわせとして考えられる。

図 3 のような光学系で考える。アルゴンは放電セル中で、放電によって準安定状態に励起される。半導体レーザーから出た光は  $\lambda/4$  板によって円偏光 (図 3 では  $\sigma^+$ ) となり放電セルにポンプ光として入射する。このとき放電セル中の準安定状態アルゴンはスピン偏極する (図 3(1))。放電セルをでた光は偏光ビームスプリッター (PBS) によって円偏光から直線偏光に変えられる (図 3(2))。光はミラーで跳ね返され、 $\lambda/2$  板で 45 度偏光方向を傾けられ、プローブ光として放電セルに入射する (図 3(3))。放電セル中の準安定状態アルゴンはスピン偏極をおこしているため、放電セルを通ってきた光の  $\sigma^-$  円偏光には、屈折率の分散が生じ、位相がずれるので、偏光方向は  $\Delta\theta$  傾く (図 3(4))。偏光方向が傾いた光はビームスプリッター (BS) によってはねられ、偏光ビームスプリッターによって P 偏光と S 偏光に分けられ、それぞれフォトダイオード (PD) によって検出される (図 3(5))。

PD で検出される各偏光成分は、吸収がなければ、同じ強度になるが、スピン偏極によって生じた傾き  $\Delta\theta$  によって、強度に差が生じる。この強度差  $\Delta I$  をとる事で、スピン偏極によって生じた偏光面の回転の角度  $\Delta\theta$  に関する情報を得ることが出来る。これには分散の情報が含まれているので、強度差  $\Delta I$  は誤差信号として利用できる。

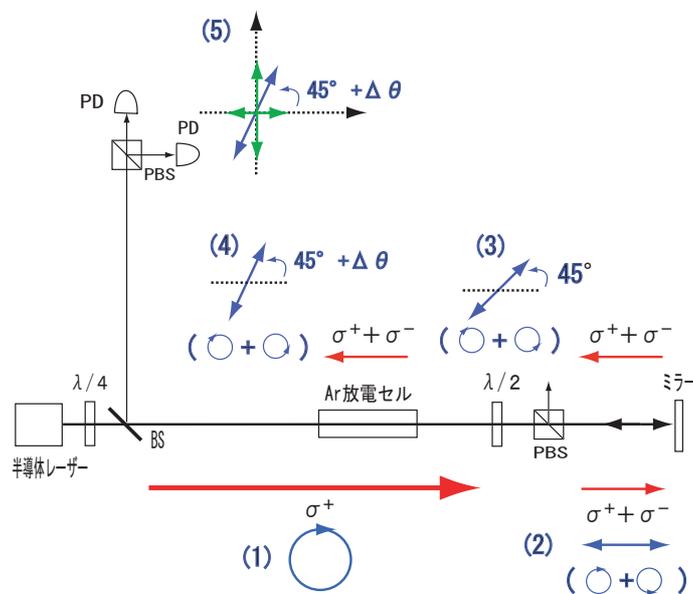


図 3: 偏光面の回転

## 2.2 実験

図4に実験装置図を示す。半導体レーザーから出た光は図3のように偏光を操作され、フォトダイオードで検出される。 $\lambda/2$ 板は、原子が共鳴しない周波数の光を入れたときに二つのフォトダイオードで検出される信号がオシロスコープ上で同じになるように調整する。フォトダイオードで検出された二つの信号を、差動増幅器によって差をとり、増幅し、誤差信号を得る。誤差信号を半導体レーザーシステムのピエゾ (PZT) コントローラーにフィードバックさせ、周波数を安定化する。

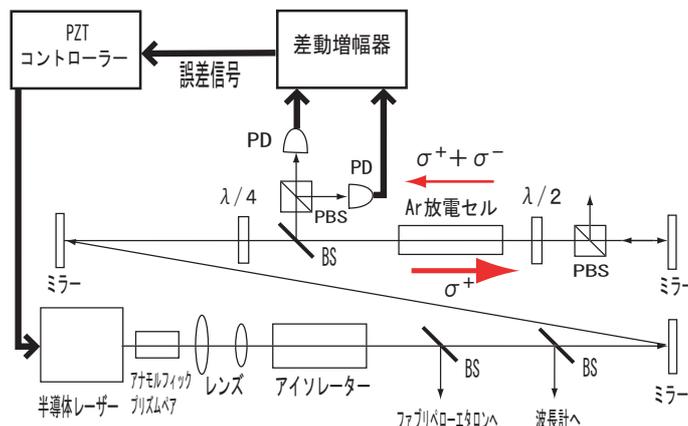


図 4: 実験装置図

## 3 実験結果

実験で得られた誤差信号を図5に示す。中央にある赤色の信号が誤差信号、下方にある黄色と青の信号は差をとる前の飽和吸収信号である。誤差信号の幅は 30.6MHz、高さは 6.16V であり、これらの値から求められる誤差信号の傾きの逆数は 5MHz である。この値を用いて、オシロスコープで観測される誤差信号の電圧を周波数に変換する事が出来る。

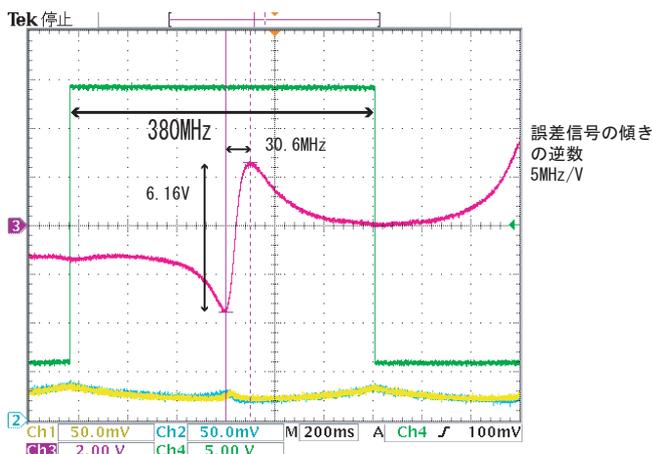


図 5: 実験で得られた誤差信号

周波数をロックした時の誤差信号を図 6 に示す。図 6 の中央でちょうどロックをかけており、図 5 で求めた誤差信号の傾きの逆数から、安定度が約 20MHz から 1MHz 程度になっていることがわかる。

周波数ロック後の誤差信号を図 7 に示す。振幅から周波数安定度は 1.06MHz になっており、1MHz 程度の安定度が達成されている事がわかる。

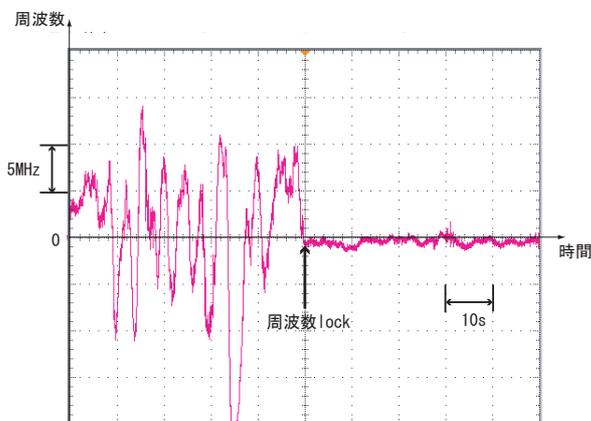


図 6: 周波数安定化時の誤差信号の変化

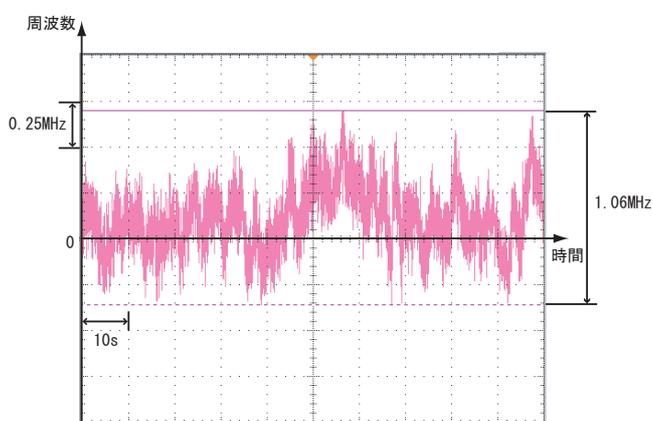


図 7: 周波数安定化後の誤差信号

## 4 まとめ

外部共振器によって、シングルモード発振し、波長選択、波長掃引が可能な準安定状態アルゴントラップ用の半導体レーザーを製作した。

製作した半導体レーザーを偏光分光法を用いて 1MHz 程度の安定度で安定化することが出来た。

## 5 今後の課題

本研究で得られた 1MHz 程度の安定度というのは、半導体レーザーの安定度としては向上の余地が十分にある値であるので、今後も安定化装置に改良を加えていく必要がある。主に、より高い安定度を得るためのより高感度、低ノイズな計測、制御系の開発、さらに長時間の周波数変化を制御するためのサーボ回路の製作があげられる。

また、準安定状態アルゴントラップの実現のためには、安定度は十分だが、強度が不十分であるので、注入同期法などを用いた出力の増幅が必要である。