

Rb 原子の変調移行分光を用いた

420 nm 半導体レーザーの周波数安定化

中川研究室 学部 4 年 奥野央志

1 背景・目的

中川研では、中性原子である Rb 原子を量子スピンとした量子シミュレーションの開発を行っている。そこで Rb 原子をリドベルグ状態と呼ばれるものに励起するのだが、エネルギー準位間隔が狭いという特徴がある。これは周波数の線幅が狭いことを意味し、したがって周波数の安定なレーザーが必要とされる。特に修士一年の高瀬さんと私が行っているのは 420nm 青色半導体レーザーである。今まで波長 480nm と 780nm のレーザーを用いて二光子吸収を利用していたが、波長 480 nm のレーザーは 200mW まで程度しかパワーが出せないという欠点があり、パワー不足が懸念される。また、基底準位から中間準位へ励起するレーザーのパワーは、中間準位からの自然放出を抑えるために大きくすることはできない。したがってこれらを解決するために、同じ順位から励起準位への遷移ができる波長 1013 nm と 420 nm のレーザーによる二光子吸収に変更し、1013 nm のレーザーの 1 W 程度まで出力できるパワーを利用しようと試みている。そういった理由で今回は 420nm の周波数安定化を行った。

2 原理

2.1 ドップラー広がり

実際の気体原子はそれぞれ動いているので運動速度を持つ。運動している原子は動いていない原子が持つ共鳴角周波数から変化するドップラー現象が起きる。また、気体の運動速度による原子数分布は一般にマクスウェル・ボルツマン分布をしている。このため、スペクトル線がガウス型関数の広がりを持つようになる。これをドップラー広がりと呼ぶ。動いていない原子の共鳴角周波数を ω_0 、速度 v で動いている原子の共鳴角周波数を ω 、波数を k とするとき、原子の運動方向が入射光の向きと同じなら、共鳴角周波数は、 $\omega = \omega_0 - kv$ となり低くなる。逆なら $\omega = \omega_0 + kv$ となり高くなる。この結果、それぞれの原子の共鳴角周波数は原子が運動していない場合から変化する。

2.2 飽和吸収分光法

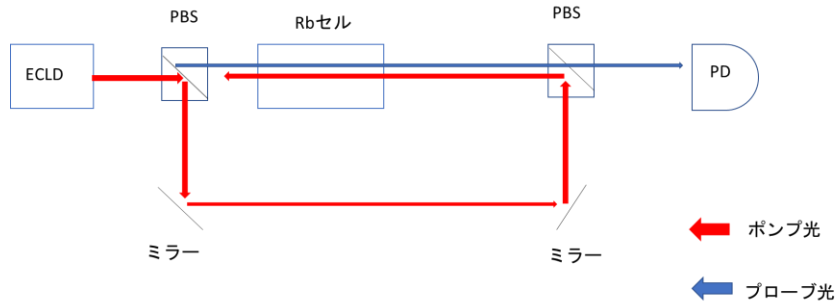


図1 飽和吸収分光法

このドップラー広がり排除のための分光法として飽和吸収分光法がある。二本のレーザー光を対向に重ね、一方のポンプ光で原子を励起させ、もう一方のプローブ光の透過強度を測定する手法である。この時、ポンプ光はプローブ光より強くする。ポンプ光の角周波数 ω_0 、運動していない原子の共鳴角周波数も ω_0 と仮定すると、ポンプ光はその運動していない原子を励起する。この時のポンプ光は先ほども述べたように原子の励起が飽和するように強いものとする。次に角周波数 ω_0 のプローブ光を入射すると、共鳴角周波数 ω_0 の原子は大半が励起されているので、プローブ光の透過強度は上がる。したがってプローブ光の透過強度を測定すると”ドップラーフリー”な吸収線を見ることができる。

2.3 変調移行分光法

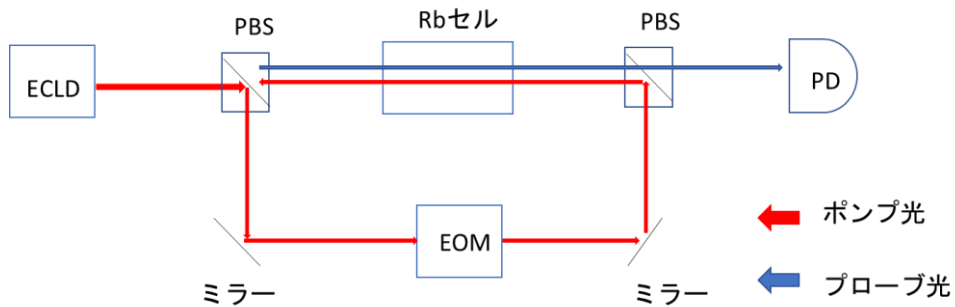


図2 変調移行分光法

変調移行分光法は、飽和吸収分光法の原理を用いた分光法の一つである。図を見るとわかるように、先ほどの飽和吸収分光法の光学系のポンプ光の通り道に EOM という装置が入っている。この EOM は電気光学変調器という位相変調を行うことができる装置で、これを入れると、ポンプ光にはサイドバンドと呼ばれる周波数が付帯する。このプローブ光に対向してプローブ光を入射すると、サイドバンドは Rb セル内の原子を介してプローブ光に“移行”し、プローブ光がサイドバンドを持つようになる。このポンプ光からプローブ光にサイドバンドが移行する過程には四光波混合という現象が使われている。四光波混合は 2 つ、もしくは 3 つの異なる周波数をもつ光が原子を介して新たな周波数を持つ光を生み出すことを言う。

エネルギー準位図を使うと、もともとのポンプ光の周波数を ω_1 、プローブ光の周波数を ω_2 とし、EOMによってサイドバンドが付帯したポンプ光の周波数を $\omega_1 + \Omega$ とする。また、原子の規定準位を g 、励起準位を e とする。まずポンプ光によりRBセル内の原子は励起される。次に原子がエネルギーを放出し、そのエネルギーはポンプ光のサイドバンドに移る。エネルギーの失った原子は再びプローブ光によって励起され、光を放出するが、その周波数は、 $\omega_2 - \Omega$ となっている。

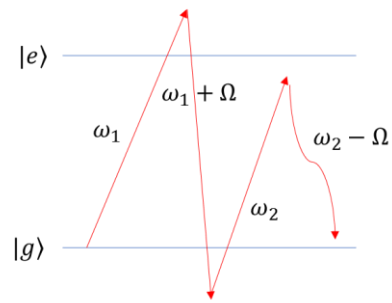


図3 四光波混合

したがってこれでポンプ光のサイドバンドがプローブ光に移行したといえる。ここではポンプ光のサイドバンドを $\omega_1 + \Omega$ としたが $\omega_1 - \Omega$ でも同様なことが起こり、 $\omega_2 + \Omega$ が発生する。

2.4 誤差信号

PDから出た測定信号はFGからEOMにかけている信号と同じものを参照信号として両者はMIXERで掛け合わされる。その後信号はローパスフィルタを通り、誤差信号として取り出される。この誤差信号はもとのスペクトル線を微分した波形となる。

3 結果

3.1 吸収線の線幅

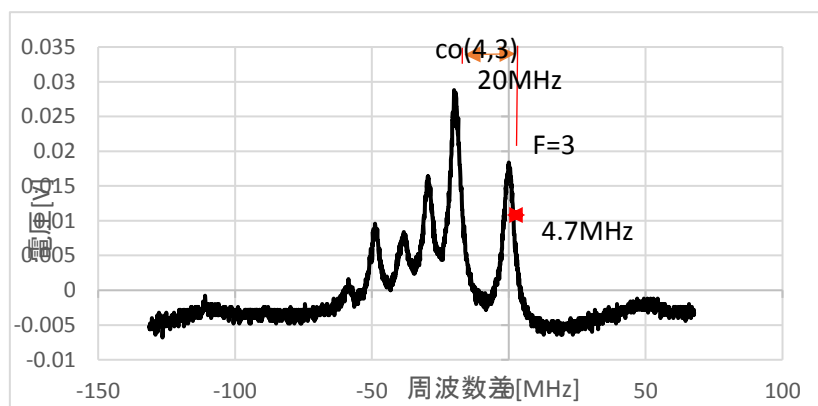


図5 吸収線の線幅

$^{85}\text{Rb}5S_{1/2}F=3 \rightarrow 6P_{3/2}F=4$ の吸収線の自然幅は 1.45 MHz というのはわかっている。実際の吸収線の線幅は図のようになった。飽和吸収分光法では実際の線幅は 4.8MHz となった。

3.2 誤差信号と周波数ロック

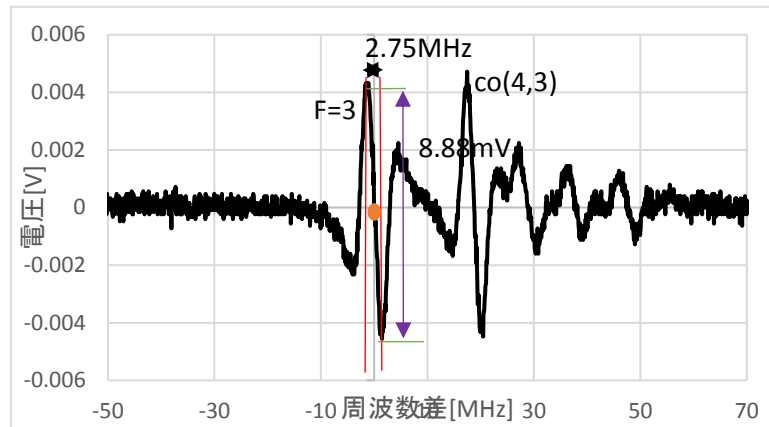


図 6 誤差信号

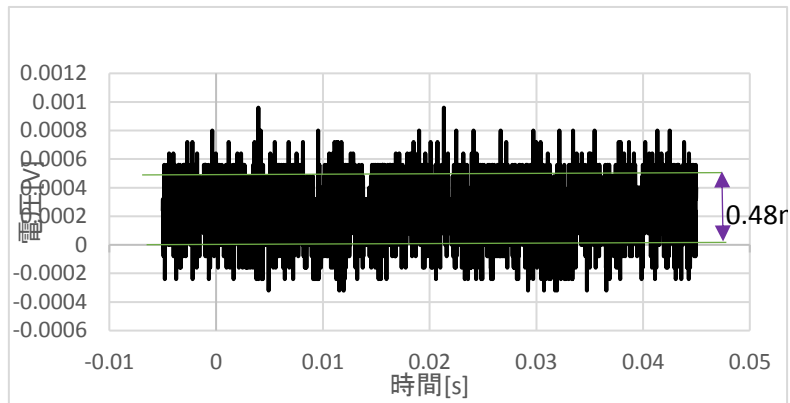


図 7 周波数ロック後

もともとの吸収線の頂点、つまりその微分波形である誤差信号では 0mV となっている点を基準として周波数ロックを行った。この周波数ロックしたものが右図であり、誤差信号の電圧と線幅と周波数ロック後の電圧を比較することにより、周波数ゆらぎを求めることができます。この式より周波数ゆらぎは 149kHz と求まった。

4 まとめ

今回、飽和吸収分光法で線幅 4.8 MHz、周波数揺らぎは 149kHz となった。目標としていた 100kHz には及ばなかったため改善の必要がある。これには制御回路が本研究用に設計されたものではないために最適化されていないことが考えられる。今後、さらにもう一台の 420 nm のレーザーを運用する計画があるので、現在の制御回路を参考にしながら、最適化された制御回路の作成に取り組む。