

# 変調移行分光を用いた Rb 安定化周波数基準レーザーの開発

中川研究室 学部4年 豊沢一海

## 1 背景・目的

中川研究室では中性原子の Rb 原子同士で相互作用を見る実験を行っている。Rb 原子同士が相互作用するためには、リドベルグ状態と呼ばれるエネルギーの高い準位に原子を励起させる必要がある。励起には波長が 780nm と 480nm のレーザー光を用いる。480nm の光は 960nm の第二高調波発生で得る。960nm の光はトランスファー共振器によって用意し、この基準として周波数安定化された 780nm の光が必要となってくる。また、原子のレーザー冷却を行う際にも 780nm のレーザー光が基準として必要である。

今回はこの 780nm のレーザー光を、変調移行分光を用いて周波数安定化させる。Rb 原子の  $5S_{1/2} F = 2$  と  $5P_{3/2} F' = 3$  との準位間の遷移が、今回レーザーを安定化させる波長 780nm に対応している。

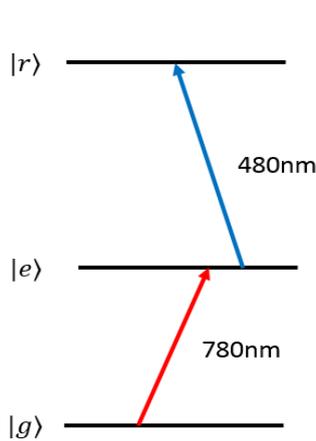


図1 リドベルグ状態への励起

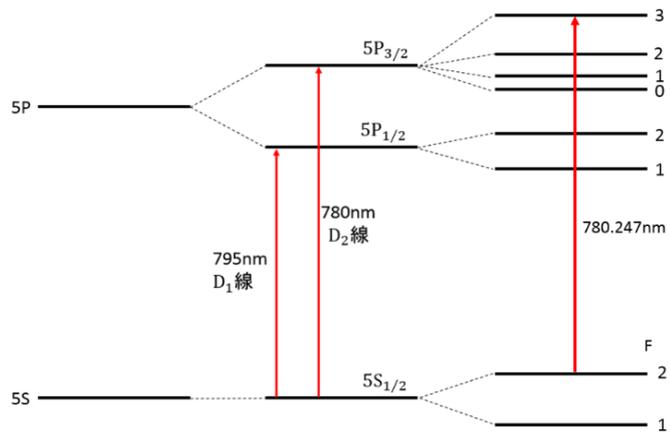


図2 Rb 原子のエネルギー準位

## 2 原理

### 2.1 飽和吸収分光

飽和吸収分光では原子を励起させる pump 光と強度を観測する probe 光を、原子の入ったセルに対向させて入射する。probe 光を電気光学変調器 (EOM) に通し、サイドバンドと呼ばれる周波数成分を作ることでキャリアの周波数とのビートを発生させる。こうすることによってフォトディテクターでプローブ光の強度変化を検出できるようになる。

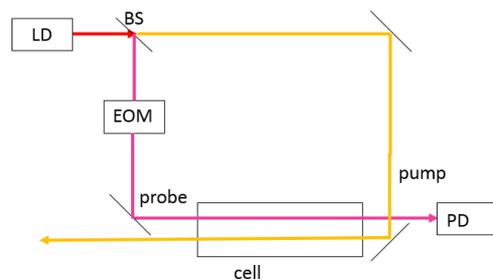


図3 飽和吸収分光の光学系

熱平衡状態では、原子はマクスウェル-ボルツマン分布をしている。片側から角周波数 $\omega$ の **pump** 光を入射すると、共鳴の条件を満たす速度 $v$ 成分の原子のみが光を吸収し励起される。入射するレーザー光の角周波数を変えれば、別の速度成分を持つ原子が励起される。**pump** 光と逆方向から入射した **probe** 光によっても同様に、速度 $-v$ の成分をもつ原子が励起される。入射するレーザー光の各周波数 $\omega$ が原子の共鳴周波数 $\omega_0$ と一致した時、**pump** 光と **probe** 光はどちらも速度  $0$  の原子を励起する。原子の吸収が飽和するのに十分な強度のレーザー光を入射していれば、**pump** 光によって励起された分の原子は、**probe** 光を吸収することはない。したがって、原子の共鳴周波数 $\omega_0$ と同じ周波数のレーザー光を入射した時のみ、透過した **probe** 光の強度が大きくなって出てくる。

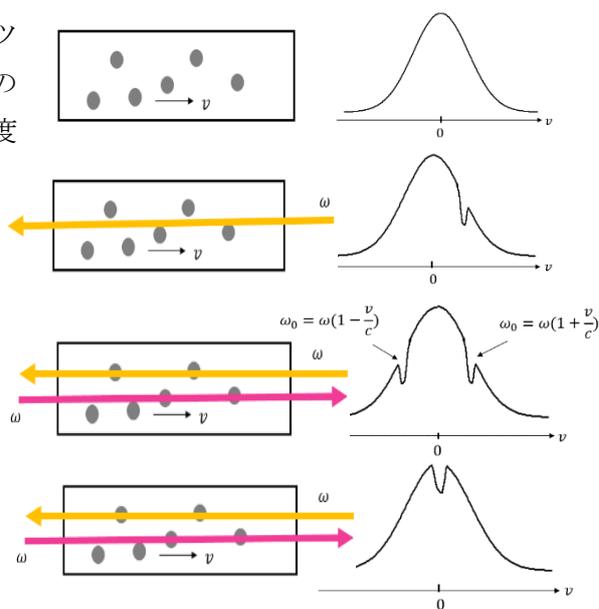


図4 基底状態の原子数

## 2.2 変調移行分光

変調移行分光では **pump** 光を EOM で変調する。この変調が原子を介して **probe** 光に移行するので、**probe** 光の強度変化をフォトディテクターで検出できるようになる。

**pump** 光に施した変調が **probe** 光に移行する過程として、**four-wave mixing** と呼ばれるものがある。**pump** 光のキャリア $\omega_c$ 、**pump** 光のサイドバンド $\omega_c + \omega_m$ 、**probe** 光 $\omega_p$ の3つの光が入射する場合に、原子が光を吸収・放出する際の運動量変化を考える。**pump** 光のキャリアを吸収して $+\hbar\omega/c$ 、**pump** 光のサイドバンドによる誘導放出して $-\hbar(\omega_c + \omega_m)/c$ 、**probe** 光の吸収で $-\hbar\omega_p/c$ の運動量変化がある。

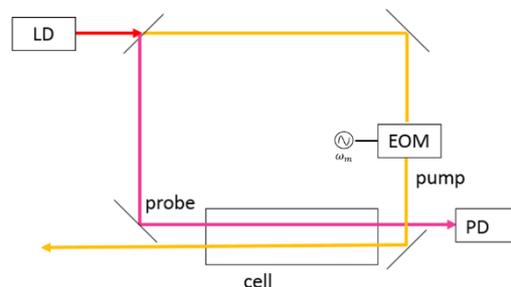


図5 変調移行分光

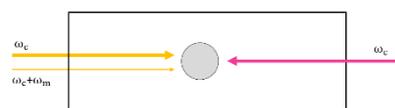


図6 four-wave mixing

原子が運動量保存則を満たすとすると、 $\omega = -(\omega_p + \omega_m)$ の光を放出することになり、これは **probe** 光と同方向で角周波数 $-(\omega_p + \omega_m)$ の光である。**pump** 光のサイドバンド $\omega_c - \omega_m$ を考えた場合には、**probe** 光の方向に $\omega_p - \omega_m$ の角周波数成分をもつ光が放出される[1]。これらが **probe** 光のサイドバンドとして振る舞うことになるため、**pump** 光から **probe** 光に原子を介して変調が移行したと言える。こうして、変調していない **probe** 光であっても **pump** 光からの変調移行によりビートが生じ、フォトディテクターで強度変化を検出できる

ようになる。

### 3 実験

変調移行分光は図7のような光学系を組んで行っている。Rb原子の入ったセル内での干渉を抑えるために、probe光をAOMで周波数シフトしている。Rbセルを通過したprobe光をフォトディテクターに入射し、電気信号に変換されたものを制御回路へ送る。

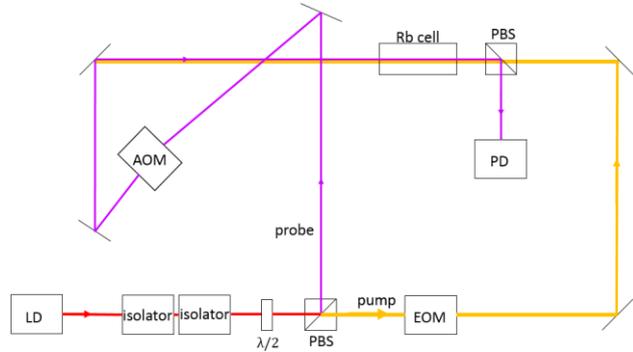


図7 変調移行分光 光学系

フォトディテクターからの信号とEOMの変調周波数の信号をダブルバランスドミキサー(DBM)に入力することで、誤差信号を得る。DBMからの出力で不要な周波数成分のものは、LC共振回路を用いて取り除いている。PI制御を行う部分に誤差信号を送って、その出力を外部共振器型半導体レーザーのLDとPZTにフィードバックする。LDへの電流を調節することで

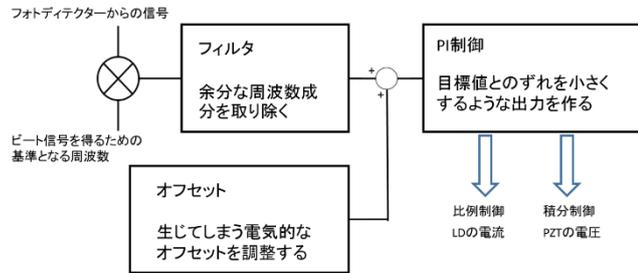


図8 制御回路の構成

LDの温度が変化し、屈折率が変化することで発振波長も変化する。PZTは加える電圧によって大きさが変化するもので、共振器のミラーに取り付けられている。したがってPZTへの電圧を調整すれば共振器長が変化し、レーザー光の周波数を制御できる。

### 4 結果

制御回路として従来の回路を用いて得た変調移行分光の誤差信号は、図9のようになった。ドップラーの影響がなく、バックグラウンドは0になっている。

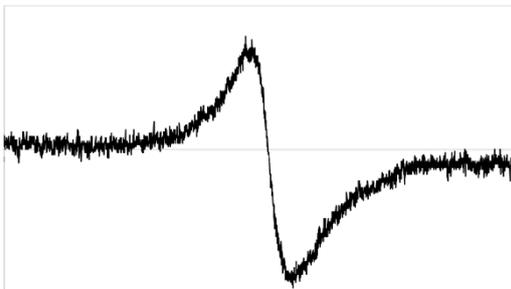


図9 誤差信号

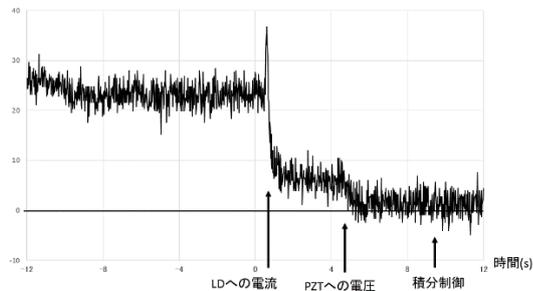


図10 レーザー周波数ロック

図 10 は制御回路からの出力を LD、PZT にフィードバックした時のもので、フィードバックをかけると目標値との差が小さくなることが確かめられた。

今回新たに作製した制御回路を用いた場合にも、変調移行分光での誤差信号を得ることは出来たが、信号が弱かった。

## 5 今後の課題

新しく制作した回路での誤差信号が弱く、レーザー周波数の安定化には使えないので、信号を大きくするためにアンプを入れる。レーザーロックするのに十分な強さの信号を得ることができれば、レーザー周波数を安定化させて基準レーザーとして使っていく。

### 参考文献

[1]Long Zhe LI, Sang Eon PARK, Heung-Ryoul NOH, Jong-Dae PARK, and Chang-Ho CHO 「Modulation Transfer Spectroscopy for a Two-Level Atomic System with a Non-Cycling Transition」 J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011), 074301