

# Rydberg 励起用周波数安定化波長 420nm 半導体レーザーの開発

中川研究室 修士4年 高瀬直美

## 1. 背景・目的

我々の研究室では、中性原子である Rb の Rydberg 状態を用いて原子間に相関を持たせることで、量子もつれの解析を行う量子シミュレータの開発を行っている[1]。Rydberg 状態では励起した原子がその近傍の原子の励起を抑制する Rydberg Blockade という現象が起こる。これを利用し、光格子トラップを用いて隣り合う原子が Rydberg Blockade の効果範囲に入るよう原子を配列し意図的に量子もつれの状態を再現することができる。このシミュレーションに用いる原子数を増やしていくことでより複雑な量子もつれ状態の解析が期待できる。

現在は Rb を Rydberg 状態に励起するために  $5P_{3/2}$  準位を中間準位とした波長 780 nm と 480 nm の2台のレーザー光による二光子吸収を行っている。これは  $5P_{3/2}$  準位を中間準位としており、寿命(自然幅 6 MHz)からの自然放出等によってコヒーレンス時間は数 $\mu$ s程度に制限されている。そこで、より寿命の長い  $6P_{3/2}$  準位(自然幅 1.4 MHz)を中間準位とした 420 nm と 1013 nm の2台のレーザーを用いた二光子吸収に変更することでシミュレータの改善が期待できる。また、480 nm のレーザーパワー(~200 mW)によって原子数が制限されていたが、1013 nm のレーザーは増幅器により 1 W以上の出力が得られる。実際に Harvard 大学の Lukin 等のグループによって、 $6P_{3/2}$  準位を中間準位とした Rydberg 状態への励起を利用した量子シミュレータの報告がされている[2]。

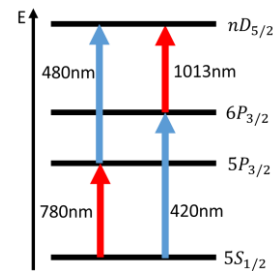


図 1. Rydberg 励起のエネルギー準位図

本研究では量子シミュレータに用いる励起用光源の開発を目的としている。量子シミュレータでは Rydberg 励起用光源が長いコヒーレンス時間を持つことが求められる。コヒーレンス時間は量子多体系のシミュレーションにおいてシミュレーションの精度に大きく影響する。そのため Rydberg 励起用光源である波長 420 nm と 1013 nm のレーザーは周波数安定化を行わなければならない。

## 2. Rydberg 励起光源の設計

量子シミュレータの Rydberg 励起用光源として求められる周波数安定化の条件は長期周波数安定化と短期周波数安定化の二つがある。

長期周波数安定化は Rydberg Blockade 効果を維持と目的としているため、Rydberg Blockade 効果によるエネルギー準位のシフト量  $\Delta E \gg \hbar\Delta\nu$  を満たすことが条件となる。 $\Delta\nu$  は周波数ゆらぎである。 $\Delta E \sim 10$  MHzより目標値は  $\Delta\nu < 100$  kHzとした。このときの周波数ゆらぎはレーザーの発振周波数の基準周波数に対するゆらぎである。本研究では波長 420 nm に対し変調移行分光法によって長期周波数安定を行っている。

それに対して短期周波数安定化は1回のシミュレーションの測定時間 1~10  $\mu$ sの間にレ

レーザーの位相のゆらぎ抑制と目的とし、フーリエ周波数 100 kHz~1 MHz の領域でレーザーの周波数雑音の抑制を行う。Harvard 大学のグループはこれによりコヒーレンス時間が 7  $\mu$ s から 27  $\mu$ s に増加したと報告されている [2]。周波数雑音が抑制されるということは、レーザーの線幅を狭窄化されることを意味する。そのため先行研究 [3] より、周波数雑音抑制の目標値としてフーリエ周波数  $f=1$  MHz でレーザー線幅  $\Delta\nu \sim 3$  kHz とした。以前に波長 420 nm の二台のレーザーによるビート信号をとったところ、レーザーの線幅は  $\Delta\nu = 23$  kHz であった。よって、 $S_v^{lock}(f)$  を周波数安定化した際の周波数雑音、 $S_v^{free}(f)$  を安定化前の周波数雑音とした時、周波数雑音の抑圧比の条件は

$$\frac{S_v^{lock}(f)}{S_v^{free}(f)} < \frac{1}{7} \quad (1)$$

となり、これを満たすことを短期周波数安定化の目標とした。これ約 -10 dB ( $f=1$  MHz) の雑音抑制に相当する。本研究では光帰還法による短期周波数安定化を行う。

また、Rydberg 励起光源ではこれらの周波数安定化は波長 420 nm と 1013 nm 共に必要となる。波長 1013 nm は安定化された波長 420 nm の光源を基準としたトランスファー共振器によって周波数安定化を行う。波長 420 nm と 1013 nm が Rydberg 励起の波長となっているかの確認のため EIT 信号の観測を行う。

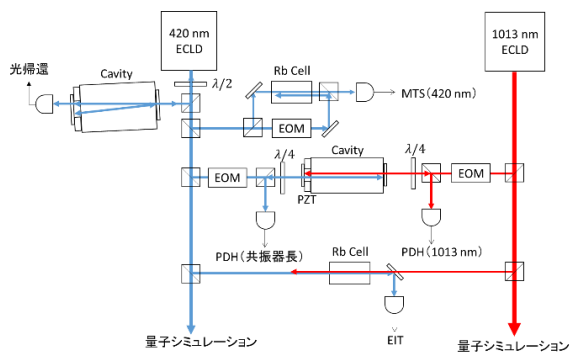


図 2. Rydberg 励起光源

### 3. 波長 420 nm の周波数安定化

#### 3.1 変調移行分光法による長期周波数安定化

長期周波数安定化は変調移行分光法によりドップラーフリーな Rb の吸収線を観測し行った。

変調移行分光法とは飽和吸収分光法の一形態である。飽和吸収分光法とはポンプ光とプローブ光を原子セル内へお互いに対向となるよう入射することで、ドップラー拡がりのない吸収線が観測できる手法である。変調移行分光法ではこのポンプ光へ電気光学変調器 (EOM) により変調を掛けることで、原子を介してプローブ光に変調を掛けることができる。

波長 420 nm の変調移行分光法による周波数安定化の実験系を下図に示した。

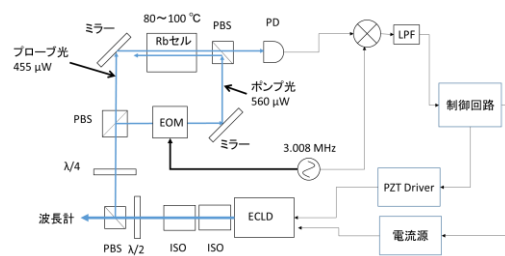
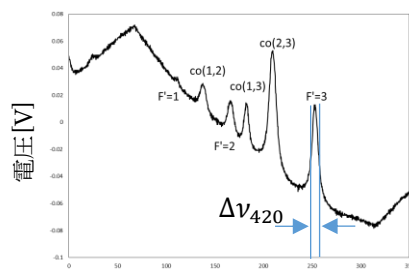
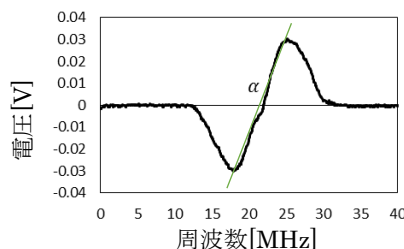


図 3. 変調移行分光法の実験系

以下は  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} F=2 - 6P_{3/2} F'=3$  の遷移 (波長 420.300 nm) の吸収線と誤差信号である。



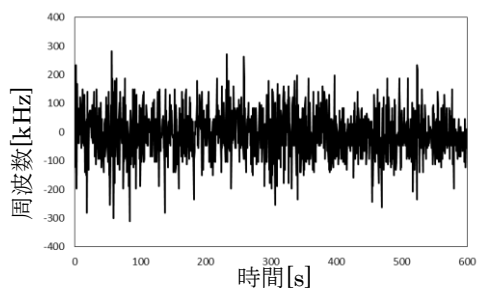
a.  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} F=2 - 6P_{3/2} F'=3$  の吸収線



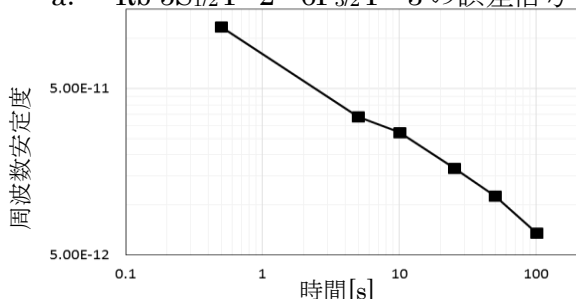
b.  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} F=2 - 6P_{3/2} F'=3$  の誤差信号

図 4. 変調移行分光の測定結果

Rb のエネルギー準位図の  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} F=2 - 6P_{3/2} F'=3$  の吸収線の間隔から横軸を周波数に校正している。吸収スペクトルより  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} F=2 - 6P_{3/2} F'=3$  の線幅  $\Delta\nu_{420}$  は 7.05 MHz であった。誤差信号は  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} F=2 - 6P_{3/2} F'=3$  の吸収線を基準としている。そのため誤差信号の傾き  $\alpha$  は  $\alpha = 117 \text{ MHz/V}$  である。



a.  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} F=2 - 6P_{3/2} F'=3$  の誤差信号



b. アラン分散による周波数安定度

図 5. 周波数安定度の測定結果

グラフは周波数安定化を行った際の誤差信号であり、b のグラフは a のグラフを元に求めた周波数安定度である。a の縦軸は傾き  $\alpha$  から電圧から周波数へ校正を行っている。また周波数安定度は  $\Delta\nu/\nu$  で定義されている。アラン分散から周波数ゆらぎは  $\Delta\nu = 4.85 \text{ kHz}$  となった。また周波数安定度は  $6.80 \times 10^{-12}$  となった。

目標値が  $\Delta\nu < 100 \text{ kHz}$  であるので、変調移行分光法による周波数安定化は長期周波数安定化の条件を十分満たしているといえる。

### 3.2 光帰還法による短期周波数安定化

短期周波数安定化は光帰還法により行った。光帰還法とは ECLD から射出された光を一

度共振器に入射させ、その共振器からの反射光を ECLD にフィードバックする手法である。これにより ECLD から共振器までを大きな共振器のように見なすことができ、射出されるレーザー光の線幅の狭窄化が期待できる。

共焦点共振器による光帰還の実験系を下図に示した。

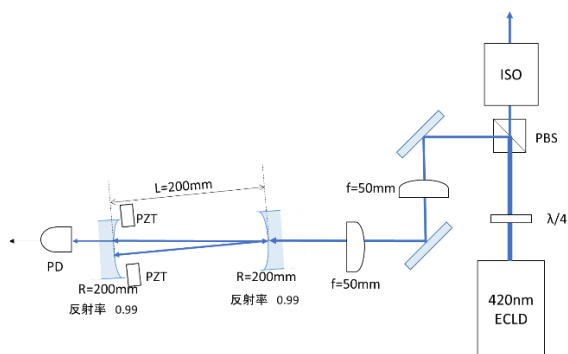
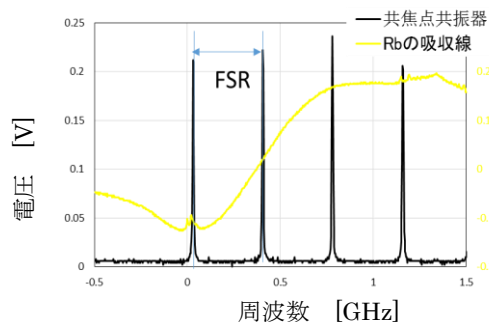
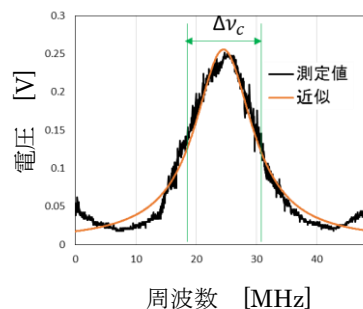


図 6. 共焦点共振器による光帰還の実験系

共焦点共振器の透過光を観測した結果を下に示す。このとき光帰還は行っていない。



a. 共焦点共振器の FSR



b. 共焦点共振器の線幅  $\Delta\nu_c$

図 7. 共焦点共振器の測定結果

共振器の FSR の横軸は同時に計測した吸収線  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} F=2 - 6P_{3/2} F'=3$  と  $^{85}\text{Rb } 5S_{1/2} F=3 -$

6P<sub>3/2</sub> F<sup>v</sup>=4 の周波数差 1.15 GHz[4]を基準に校正した。FSR の計算値は式より 375 MHz に対して、計測した FSR は 375 MHz となり一致した。また線幅Δv<sub>c</sub>は 5.84 MHz であった。よってフィネスは 64.2 である。ミラーの反射確率 99%より設計値はおおよそ 300 であるため、設計値の 1/5 程度のフィネスとなった。

次に光帰還による locking range Δv<sub>lock</sub>を下に示す。

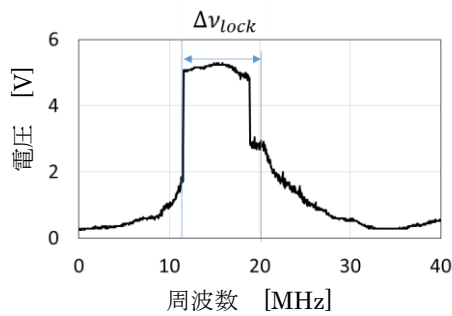


図 8. 光帰還法の locking range Δv<sub>lock</sub>は 11.7 MHz であった。周波数雑音

の抑圧比は

$$\frac{S_v^{lock}(f)}{S_v^{free}(f)} = \left(\frac{\Delta v_c}{\Delta v_{lock}}\right)^2 = 0.246$$

となる。これは短期周波数安定化の条件を満たしていないが、約-6 dB の雑音抑制が期待できる値である。そこで、周波数雑音を測定した結果以下ようになった。

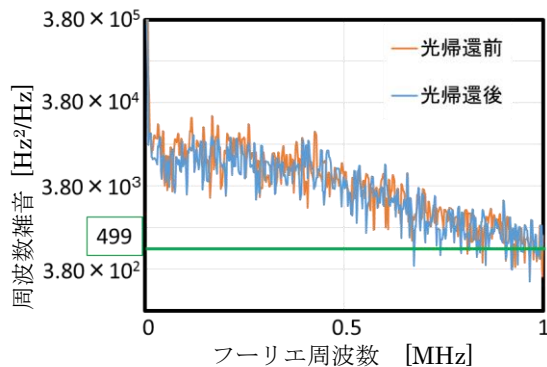


図 9. 周波数雑音の測定結果

グラフは光帰還前と後の周波数雑音を比較したグラフである。前と後で値がほぼ一致しており周波数雑音抑制された様子は観測できな

かった。locking range が見えているのに、周波数雑音が抑制されなかった理由としては、共振器長を掃引していたことが挙げられる。グラフの locking range は安定せず測定後すぐ形が崩れてしまった。そのため、実際の locking range は観測したものよりも小さい可能性がある。また、実験系の共焦点共振器内の V 字の反射が実際には 8 の字になっておりフィードバックの光路を外れてしまっている可能性もある。その場合は、フィードバックができていないのだから周波数雑音の抑制はされない。

#### 4. Rydberg 励起光源の周波数安定化

##### 4.1 トランスファー共振器

本研究ではトランスファー共振器によって 420 nm と 1013 nm のレーザーを同じ安定度で周波数安定化を行う。

トランスファー共振器とは、すでに周波数安定化されたレーザーを基準として他のレーザーの安定化を行う共振器である。

共振器長はすでに周波数安定化されたレーザーとトランスファー共振器をもって安定化されるレーザーの両方の波長と共振するよう設計する必要があるため、入射光の周波数に対して以下の式を満たす必要がある。

$$\omega_1 = N_1 \frac{c}{2n_1L} \quad (2)$$

$$\omega_2 = N_2 \frac{c}{2n_2L} \quad (3)$$

L は共振器長、c は光速、n<sub>1</sub>、n<sub>2</sub> は屈折率である。トランスファー共振器は最終的に真空チャンバー内に設置する予定である。真空では屈折率は 1 となるため、屈折率の変動は起こらない。

本研究で用いられる共振器は波長 420 nm と 1013 nm が共振するよう設計を行った。共

振器長  $L=20$  cm、曲率半径  $R=20$  cm、ミラーの反射率  $R=99.95\%$  のファブリーペロー共振器を作成した。よって  $\nu_{FSR}=749$  MHz フィネス  $\mathcal{F}\sim 6300$  で設計された。以前この共振器を波長  $1013$  nm で評価した際にはフィネス  $\mathcal{F}\sim 1000$  となったと報告されている[5]。

トランスファー共振器の性能評価を行ったところ、線幅は  $\Delta\nu_T=400$  kHz となった。よってフィネスは  $\mathcal{F}\sim 1800$  となった。波長  $1013$  nm に対するフィネスも  $1000$  程度と高い値を示しているため、本共振器はトランスファー共振器として適しているといえる。以下の実験では本トランスファー共振器を用いた。

PDH 法による誤差信号の観測を行った実験系を下図に示した。

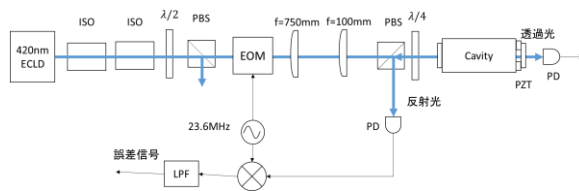
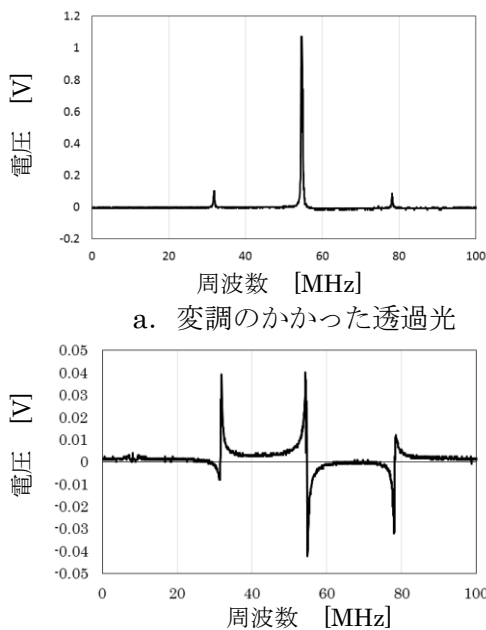


図 10. PDH 法の実験系

以下は反射光から得た誤差信号と、同時に観測した透過光の信号である。



a. 変調のかかった透過光

b. 反射光による誤差信号

図 11. PDH 法の誤差信号

上図の中心の Dip が共鳴周波数、両脇にある小さい信号がサイドバンドである。下の図は誤差信号を DC で観測した結果である。上下の図を比較したとき、サイドバンドと中心周波数の位置が同じであることが確認できる。また、誤差信号の形状から、PDH 法の理論のよって周波数の偏差に比例した信号になっているように見える。

#### 4.2 電磁誘導透過 (EIT) の観測

Rydberg 励起をする周波数の観測のため EIT の観測を行った。

EIT とは三準位系をもつ原子に対して異なる共鳴周波数のレーザー光を対向に入射したとき、光が原子に吸収されず原子を透過したように見える現象である。

下記に EIT の実験系を示した。また初めは波長  $1013$  nm のレーザーの波長を  $1017.837$  nm に調節し主量子数  $N=40$  の Rydberg 励起準位を測定したが、EIT の信号が小さかった。先行研究[4]よりラビ周波数  $\Omega_R$  と主量子数  $n$  の関係式  $\Omega_R \propto 1/N^{1.5}$  より信号強度  $I \propto 1/N^3$  となるため、主量子数  $N$  が減少させ信号強度  $I$  を大きくするようにしました。その結果  $N=30$  で波長  $1024.1128$  nm のときの測定結果を書き示す。

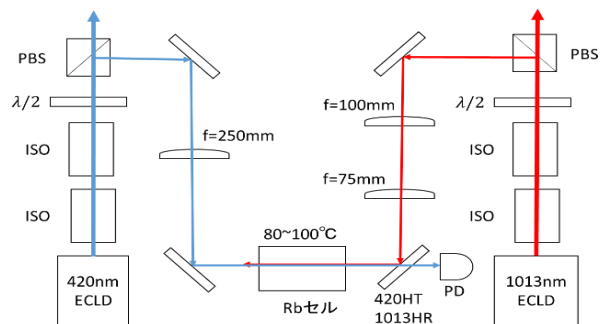
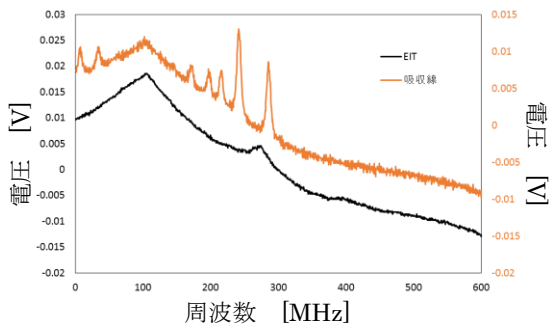
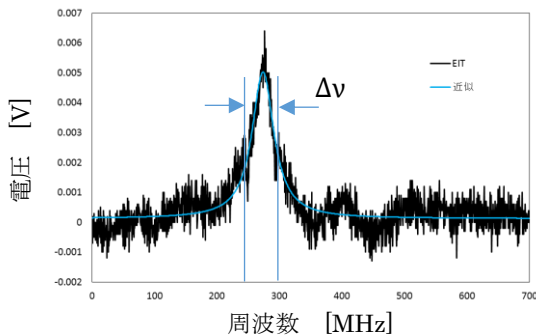


図 12. EIT の実験系

以下は観測された EIT 信号である。



a.  $^{87}\text{Rb}5\text{S}_{1/2}\text{F}=2-6\text{P}_{3/2}\text{F}'=3$  の吸収線と EIT



b. ドップラーフリーな EIT 信号

図 13.  $^{87}\text{Rb}5\text{S}_{1/2}\text{F}=2-6\text{P}_{3/2}\text{F}'=3$  における

EIT の測定結果

上図は  $^{87}\text{Rb}5\text{S}_{1/2}\text{F}=2-6\text{P}_{3/2}\text{F}'=3$  (波長 420.300 nm) に対して  $^{87}\text{Rb}6\text{P}_{3/2}\text{F}'=3-30\text{D}_{5/2}$  (波長 1024.1128 nm) のレーザー光を入射した際に見えた EIT 信号である。上図から EIT 信号が波長 420 nm の吸収線より広がってしまっていることがわかる。また、下図は同時に観測したドップラー吸収の信号を EIT 信号から引くことでドップラーフリーな EIT 信号を計測した結果である。波長 420 nm の吸収線を基準に横軸周波数に校正している。下図の近似から線幅は  $\Delta\nu = 42.46$  MHz であった。本来ならば数 MHz の線幅になるはずなので、拡がりの原因の究明が課題である。

## 5. まとめ・今後の展望

波長 420 nm の長期周波数安定化は変調移行分光法により周波数ゆらぎを 4.85 kHz に抑制することで条件を満たすことができた。短期

周波数安定化では光帰還法では周波数雑音の抑制ができなかった。また、トランスファー共振器は波長 420 nm においてフィネス 1800 という高いフィネスを持っていることが測定され、波長 1013 nm のフィネス 1000 であることから、本共振器はトランスファー共振器として十分な性能を持っているといえる。EIT では観測はできたが、信号の強度が見積を大きく異なる。線幅がかなり広がってしまっていることから、線幅を広げている原因究明が求められる。

今後は波長 420 nm で共振器長を安定化させたトランスファー共振器による 1013 nm の周波数安定化を行い、周波数測定[13]や実際の量子シミュレーションに組み込みシミュレーションの改善がなされたかの確認をしていく予定である。

## 6. 参考文献

- [1] 田村 光, 「光マイクロトラップアレー中の冷却リユードベリ原子を用いた量子シミュレータ, 博士論文, 電気通信大学(2018)
- [2] H. Bernein et.al., "Probing many-body dynamics on a 51 atom quantum simulator", Nature 551, 579(2017)
- [3] Sylvain de Léséleuc, et.al, "Analysis of imperfections in the coherent optical excitation of single atoms to Rydberg states", PHYSICAL REVIEW A 97, 053803(2018)
- [4] Thomas Schmid, "High precision excitatio nmanipulation and detection of Rydberg atoms", Masterarbeit, Stuttgart Universitdt(2014)
- [5] 豊沢 一海, 「Rbのリドベルグ状態励起用周波数安定化レーザーの開発」, 修士論文, 電気通信大学, (2018)