

周波数安定化 420 nm 青色半導体レーザーの開発

中川研究室 学部 4 年 高瀬直美

1. 背景

私たちの研究室では Rb 原子のリドベルグ状態を利用した量子シミュレーションの開発が行われています。リドベルグ状態に原子を励起するために今までは 480 nm と 780 nm のレーザーによる二光子吸収を利用していました。しかし、今後励起する原子数を増やそうとする際に、原子を二次元に配列するためビーム径を太くする必要があり 480 nm のレーザーの 200 mW パワーでは不十分となることが懸念されます。そのため、1013 nm と 420 nm のレーザーによる光子吸収に切り替え、1013 nm のレーザーの 1 W 近いパワーを利用することでパワー不足の解消を試みています。

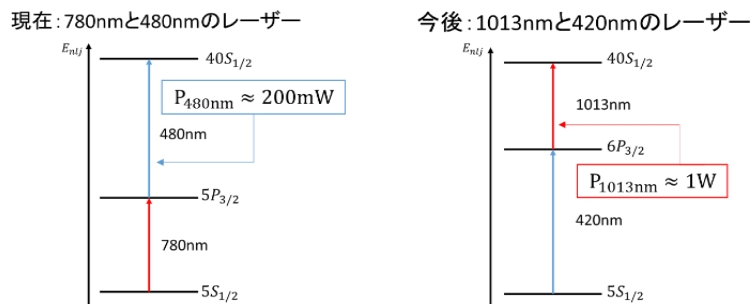


図 1. 二光子吸収

2. 研究の目的

本研究では量子シミュレーションで新たに用いられる 420 nm の周波数安定化レーザーの開発を行いました。420 nm のレーザーには Rb の $5S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$ の吸収線を基準としていること、量子シミュレーションで利用するリドベルグブロッケード効果を得るために周波数揺らぎ Δf が $\Delta f \leq 100$ kHz であることが要求されます。

3. 原理

3.1 飽和吸収分光法

Rb 原子の $5S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ の吸収線を観測するために飽和吸収分光法を用いました。飽和吸収分光法はドップラー広がりがない吸収線を観測できる手法です。

飽和吸収分光法はポンプ光とプローブ光を用います。運動している原子に対してポンプ光とプローブ光はそれぞれドップラー効果によって吸収されドップラー広がりを持ちます。しかし原子の運動速度が 0 に近いとき原子は共鳴周波数に近い光のみを吸収するため、プローブ光よりパワーの強いポンプ光によって原子が飽和されることでプローブ光は透過します。これによりプローブ光の透過光強度を観測するとドップラーフリーな吸収線を観測することが出来ます。

3.2 周波数安定化

周波数安定化のため、電流変調による周波数変調法を用いました。半導体レーザー (LD) に入力する電流源に電流変調をかけることでレーザーの周波数に変調をかけ、ロックインアンプを用いて誤差信号を検出し、制御回路を用いて電流源とピエゾ (PZT) にフィードバックさせることで、基準の周波数にレーザーの周波数を安定化させることができます。

誤差信号は基準の周波数とレーザーの周波数との差を表したものです。吸収線の信号をそのまま使用することは出来ないため、ロックインアンプを用いて吸収線の微分信号を求め誤差信号として使用しています。ロックインアンプは図の回路を持っており、微小信号の検出などに良く用いられます。

4. 実験装置

図 2 は本実験で用いた実験装置です。実験は PZT に三角波 (1.1Hz) を掃引して行いました。外部共振器型半導体レーザー (ECLD) から発せられた 420 nm のレーザー光は ISO によって戻り光が防がれ、PBS によって波長計に入射する光と飽和吸収分光に用いられる光に分かれます。飽和吸収分光の方へ分かれた光はビームスプリッター (BS) によってポンプ光 (1.45 mW) とプローブ光 (0.5 mW) に分けられ、ミラーによって反射したポンプ光が Rb セルへプローブ光とは反対方向から入射し飽和吸収分光が起こりました。透過したプローブ光をフォトダイオード (PD) に入射しオシロスコープでプローブ光の透過光強度を観測しました。PD からの信号と電流にかけている変調周波数の信号をロックインアンプに入力しえられて誤差信号をオシロスコープで観測しました。誤差信号は制御回路に入力し、電流利得を上げて LD の電流源と PZT にフィードバックをかけ周波数安定化を試みました。安定化の際は三角波の掃引はきりました。

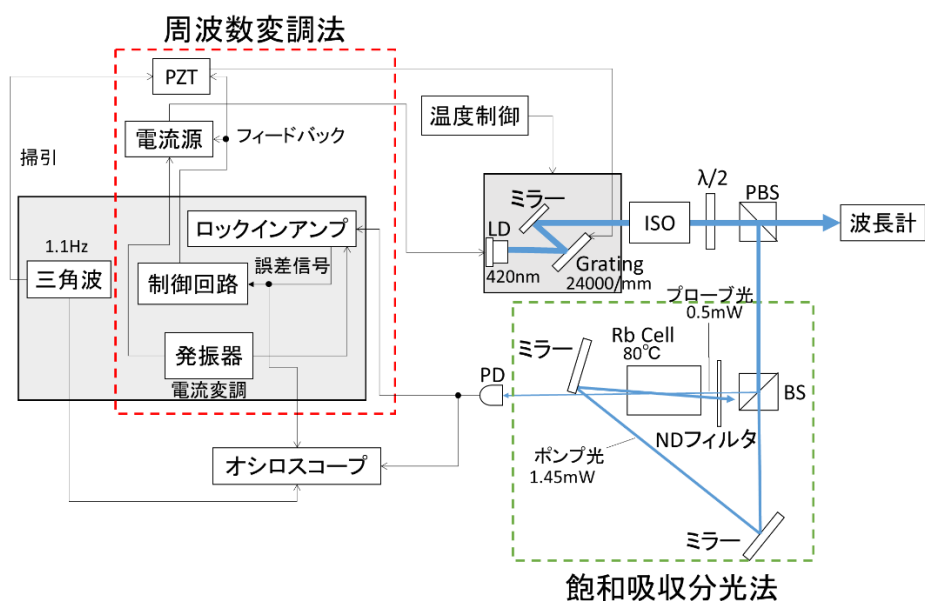


図 2. 実験系

5. 吸収線の測定

図4のように大きく分けて4つの吸収線が観測されました。各吸収線の観測された波長と各吸収線において見られるディップの位置関係から、Rb原子の $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ の各遷移の波長が図4のようになっていることが確認できました。

また、一つの吸収線の線幅は23.7 MHzでした。自然幅が1.45 MHzですので、線幅が広がっていると評価できます。広がりの原因としてはパワー広がり、圧力広がりなどが考えられます。

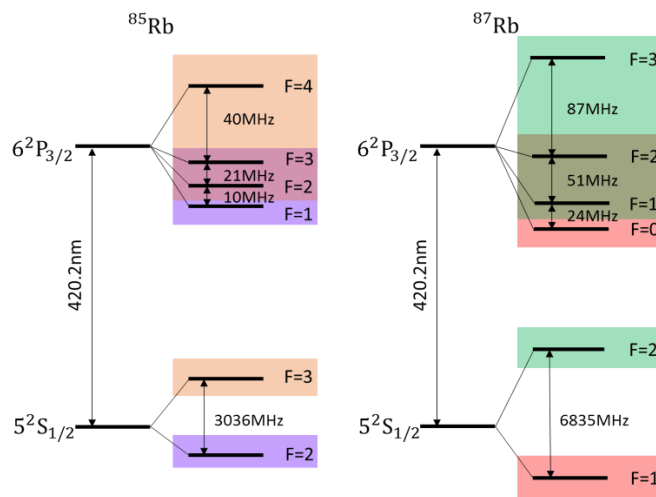


図3. Rb $5S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ の超微細構造[1]

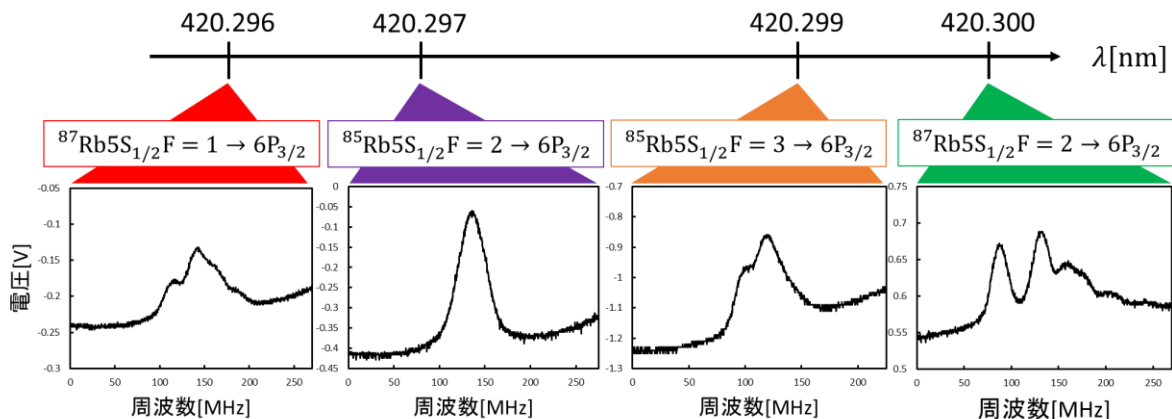


図4. 観測された吸収線とその波長と遷移

6. 周波数安定化の評価

周波数安定化を、誤差信号を用いて評価しました。周波数安定化はRb $5S_{1/2}F=2-6P_{3/2}$ の吸収線（線幅は33.3 MHz）を基準として行いました。図5は誤差信号です。この誤差信号の傾き α とすると

$$\alpha = 0.00234 \text{ V/MHz}$$

となりました。図6は周波数ロック時の誤差信号を記録したものです。誤差信号の振幅の変化が

ら 1.7 s から周波数がロックされていると評価できます。図 6b は周波数ロック後の誤差信号で、振幅の標準偏差 ΔV は $\Delta V = 0.622 \text{ mV}$ であることがわかりました。 α と ΔV から周波数揺らぎ Δf は

$$\begin{aligned}\Delta f &= 0.622/\alpha \\ &= 265 \text{ kHz}\end{aligned}$$

となりました。目標の周波数揺らぎは $\Delta f \leq 100 \text{ kHz}$ であるため目標の二倍以上の揺らぎを持っていることがわかります。

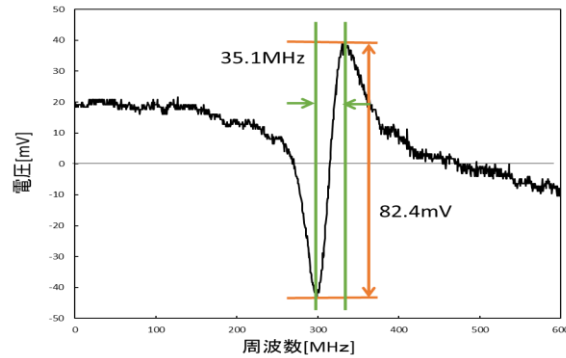


図 5. 誤差信号

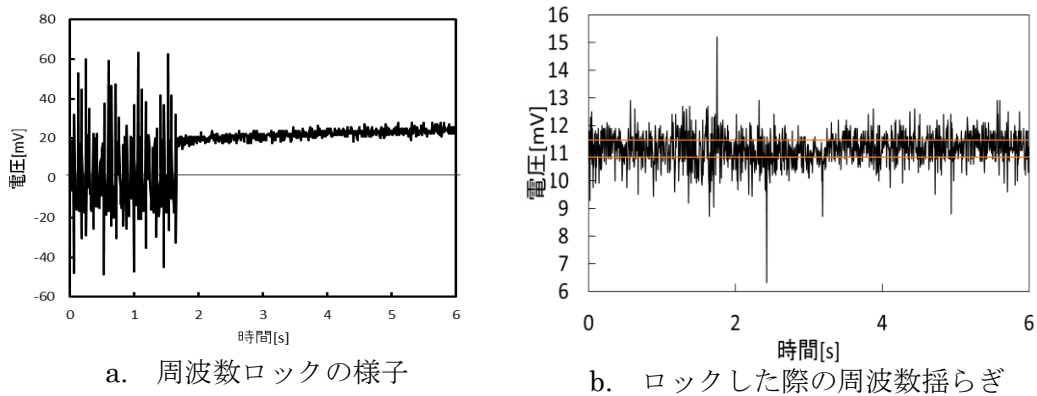


図 6. 周波数ロック

7. まとめ

今後の量子シミュレーションの研究で用いる 420 nm のレーザーの周波数安定化を行いました。周波数の基準となる吸収線の観測と、吸収線を基準とした周波数安定化に成功しました。周波数揺らぎが目標の値に届きませんでした。

今後は基準となる吸収線の線幅の狭窄化、周波数安定化に用いた回路の改善、長時間の安定化の評価を行いたいと考えています。

8. 参考文献

[1] Thomas Schmid(2014) 「High precision excitation, manipulation and detection of Rydberg atoms」、Masterarbeit、Stuttgart Universitdt