

トランスファー共振器を用いた

リドベルグ状態励起用 960 nm 半導体レーザーの周波数安定化

中川研究室 学部四年 金井大輔

【研究の背景】

近年、光や中性原子、イオンの量子状態を利用した量子情報の研究が世界中で進められている。これらの量子を用いて量子もつれ状態を生成することで、あらゆる可能性を同時並行に計算できる量子計算や、量子情報を遠隔地に伝達する量子テレポーテーションなど、今までにない特長を持った情報通信を行うことができる。

我々の研究室では中性原子のひとつである ^{87}Rb 原子を利用した量子情報についての研究を行っている。中性原子を利用する利点の一例として、内部状態が周囲の影響を受けにくいこと、量子力学的なコヒーレンス時間が長いことがある。しかし、その利点があるがゆえの欠点として、中性原子は相互作用が小さいことが挙げられる。相互作用が小さいため、中性原子は量子もつれ状態の作成難易度が高い。

この欠点を解消する方法として、リドベルグ準位に励起された電子を持つ原子を利用するというものがある。原子中の電子が主量子数の大きい原子軌道へと励起された状態のことを、リドベルグ状態(図1)という。リドベルグ状態の2原子間には、式(1)で表される相互作用 V が働く。

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\boldsymbol{\mu}_A \cdot \boldsymbol{\mu}_B}{R^3} - \frac{3(\boldsymbol{\mu}_A \cdot \mathbf{R})(\boldsymbol{\mu}_B \cdot \mathbf{R})}{R^5} \right] \quad (1)$$

式(1)において、原子間距離を R 、原子Aの双極子モーメントを $\boldsymbol{\mu}_A$ 、原子Aの近傍にある原子Bの双極子モーメントを $\boldsymbol{\mu}_B$ とした。

この相互作用により、例えば原子Aがリドベルグ状態に励起されたとき、原子Bのリドベルグ準位が相互作用の分だけシフトする。これにより、原子Bにリドベルグ準位への励起光を照射しても、励起されない。これを、リドベルグブロッケード(図2)という。この効果を用いることで、2つの原子の内部状態は式(2)の $|\psi\rangle$ で表される量子もつれ状態を生成することができる。

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|R\rangle_A \otimes |G\rangle_B + |G\rangle_A \otimes |R\rangle_B) \quad (2)$$

なお、 $|R\rangle$ がリドベルグ状態、 $|G\rangle$ が基底状態を表すものとし、それが原子A、Bどちらの内部状態であるかを添え字で示した。

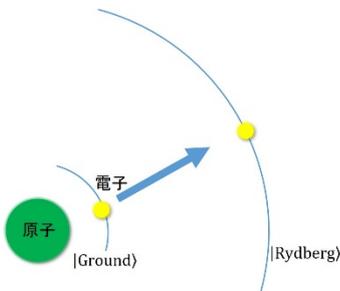


図1. リドベルグ状態にある原子

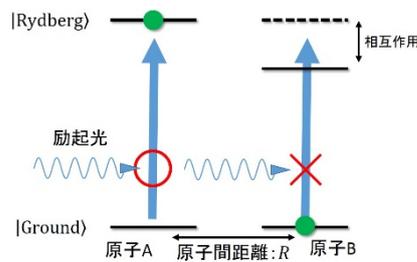


図2. リドベルグブロッケード

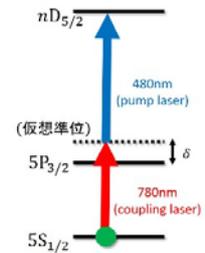


図3. 二光子吸収遷移

【研究の目的】

^{87}Rb 原子のリドベルグ状態への励起は、波長 480 nm と 780 nm の2つのレーザー光による二光子吸収遷移で行われる(図3)。波長 780 nm のレーザー光は、 ^{87}Rb 原子の吸収線に周波数安定化がなされている。

本研究は、周波数が安定化された波長 780 nm のレーザー光をリファレンスとし、トランスファー共振器を用いて波長 960 nm のレーザー光の周波数安定化を目的としている。

また、安定化の目標値について考える。まず ^{87}Rb 原子の励起時間が $1\ \mu\text{s}$ であるので、少なくともその間はコヒーレントな光でなければならない。コヒーレンス時間 τ_c を1桁余裕をもって $10\ \mu\text{s}$ とすると、線幅は τ_c の逆数なので $100\ \text{kHz}$ 以下であることが要求される。

次に、長期的な安定度について考える。図2で示したように、リドベルグブロッケードはリドベルグ準位が相互作用によりシフトすることで励起を阻止している。ここで、励起光が不安定であるがためにシフトした先の準位に励起される励起光を出してしまうと、式(2)で表される量子もつれ状態を生成することができなくなってしまう。これにより、周波数の時間的な変化は $100\ \text{kHz}$ 以下であることが要求される。

[原理その1 - トランスファー共振器]

2枚の鏡を向かい合せて固定した共振器のことを、ファブリー・ペロー共振器という。この共振器長を L 、共振器へ入射する光の波長を λ 、任意の整数を N とすると、まず入射光が共振する条件は、

$$L = \frac{1}{2}N\lambda$$

共振器へ入射する光の周波数を ν とすると、 $c = \nu\lambda$ より、

$$\nu = N \times \frac{c}{2L} \quad (3)$$

と式変形できる。この式(3)より、共振器は共振器長 L に固有の共振周波数 ν を持つことがわかる。

この共振器に ν_1 、 ν_2 二種類のレーザーを入射したとき、式(3)より、

$$\begin{cases} \nu_1 = N_1 \times \frac{c}{2L} \\ \nu_2 = N_2 \times \frac{c}{2L} \end{cases} \quad (4)$$

である。 ν_1 が安定化されていたとすると式(4)の第一式より共振器長 L が安定化される。共振器長が安定化されると、式(4)の第二式より周波数 ν_2 が安定化される。このように、共振器長 L を介してレーザーの周波数を安定化させる方法をトランスファー共振器という。式(4)より、トランスファー共振器を使って安定化されたレーザーの周波数 ν_2 は次のように表せる。

$$\nu_2 = \frac{N_2}{N_1}\nu_1$$

[原理その2 - Pound-Drever-Hall 法]

本研究ではフィードバック制御を用いて周波数の安定化を試みる。フィードバック信号を得るための誤差信号を Pound-Drever-Hall 法 (PDH 法) により取得する。実験系を図4に示す。

ECLD から出たレーザー光の電場を

$$E_{inc} = E_0 e^{i\omega t}$$

とする。電気光学変調器で角周波数 Ω の変調をかけることにより、電場は、

$$E_{inc}^{mod} = E_0 e^{i(\omega t + \beta \sin \Omega t)}$$

となる。この式をベッセル関数を用いて一次まで展開すると、

$$E_{inc}^{mod} = E_0 [J_0(\beta) e^{i\omega t} + J_1(\beta) e^{i(\omega + \Omega)t} - J_1(\beta) e^{i(\omega - \Omega)t}]$$

であり、サイドバンドが立っていることがわかる。搬送波の強度を P_C 、サイドバンドの強度を P_S 、振幅反射率を $F(\omega)$ とすると、共振器からの反射光の電場は、

$$E_{ref} = E_0 [F(\omega) J_0(\beta) e^{i\omega t} + F(\omega + \Omega) J_1(\beta) e^{i(\omega + \Omega)t} - F(\omega - \Omega) J_1(\beta) e^{i(\omega - \Omega)t}]$$

フォトディテクターが感じる反射光の強度は、

$$\begin{aligned} P_{ref} = |E_{ref}|^2 = & 2\sqrt{P_C P_S} \{ \text{Re}[F(\omega) F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega) F(\omega - \Omega)] \cos \Omega t \\ & + \text{Im}[F(\omega) F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega) F(\omega - \Omega)] \sin \Omega t \} + (\text{DC term}) + (2\Omega \text{ term}) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ファンクションジェネレータからミキサーへの入力を、フェイズシフターを用いて、

$$V_0 \cos(\Omega t + \theta_0) \quad (6)$$

であるとすると、式(5)で Ω の項虚部がDCとなり、他は消滅するか Ω 以上の項になる。ローパスフィルタを通すことにより、DCのみを誤差信号 ε として取り出す。

$$\varepsilon = 2\sqrt{P_C P_S} \{ \text{Im}[F(\omega)F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega)] \}$$

速い変調をかけていたとすると、搬送波が透過するときサイドバンドは全て反射される。ゆえに $F(\omega \pm \Omega) \approx -1$ であるので、

$$\varepsilon = -4\sqrt{P_C P_S} \text{Im}[F(\omega)]$$

誤差信号 ε を図にしたものを図5に示す。

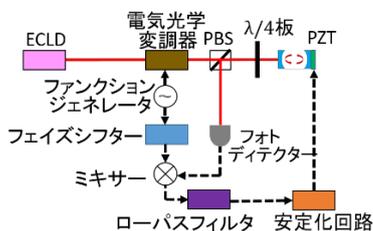


図4. PDH法を用いて共振器長をロックする系

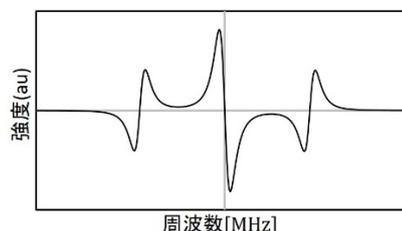


図5. PDH法の誤差信号

[実験と結果その1 - 基準レーザーによる共振器長の安定化]

780 nmのレーザー光をリファレンスとして共振器長をロックするために、図6に示す実験系を組んだ。変調周波数は7.4 MHzである。なお、この実験系で用いたフォトディテクターは変調周波数が拾える帯域の高速フォトディテクターを利用した。これは、ノイズを減らすためである。PZTドライバーには加算回路を利用することで、ファンクションジェネレータによる三角波とフィードバック信号を同時に入力できる。図4ではフェイズシフターを利用しているが、代用として同軸ケーブルの長さで式6の θ_0 を調節した。

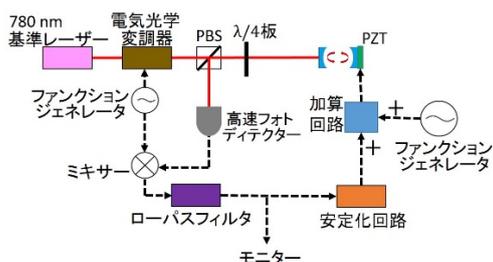


図6. 実験系

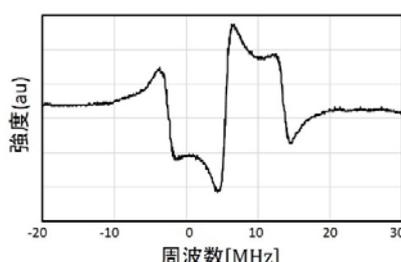


図7. 得られた誤差信号

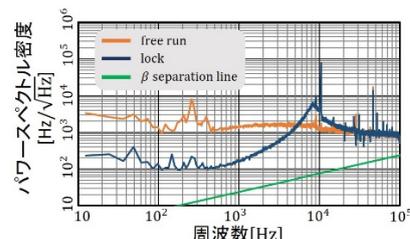
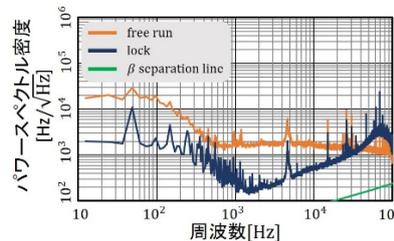
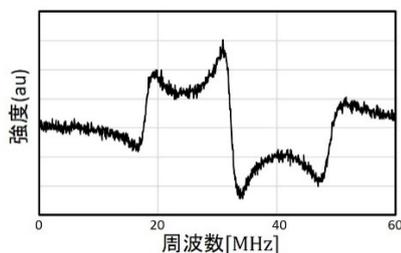
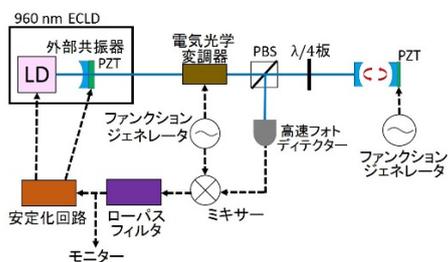


図8. 周波数ノイズのPSD

得られた誤差信号を図7、PI制御器によりロックしたときの周波数ノイズのパワースペクトル密度(PSD)を図8に示す。制御帯域8 kHzで周波数安定化に成功した。

[実験と結果その2 - 共振器長による960 nmレーザーの安定化]

共振器長をリファレンスとして960 nmレーザーの周波数をロックするために、図9に示す実験系を組んだ。変調周波数は15.4 MHzである。得られた誤差信号を図10、PID制御器を用いて前節と同様にロックしたときのPSDを図11に示す。制御帯域70 kHzで周波数安定化に成功した。



【実験と結果その 3 - トランスファー共振器を用いた 960 nm レーザーの周波数安定化】

上記 2 つの実験を同時に行った。つまり、780 nm レーザーを基準として共振器長をロックし、その共振器長を基準として 960 nm のレーザーをロックした。使用した器具、安定化回路、変調周波数は不変である。実験系を図 12、PSD を図 13、周波数揺らぎを図 14 に示す。

前節の実験結果である図 11 と図 13 に大きな違いは見られないが、それは同じレーザーを同じ安定化回路を用いてロックしているため、当然である。だが、長期的安定度の良い⁸⁷Rb原子にロックされている基準レーザーをリファレンスとしてロックされている共振器を使用しているため、960 nm のレーザーの長期的な安定度は改善すると見込まれる。

以上より、トランスファー共振器を用いた周波数安定化を行った。しかし、図 13 から線幅は 100 kHz を上回っており、図 14 からわかる通り、長期的な安定度として共鳴周波数からの時間的変化は 100 kHz を優に超えている。改善策は次節「まとめと今後の展望」にて述べる。

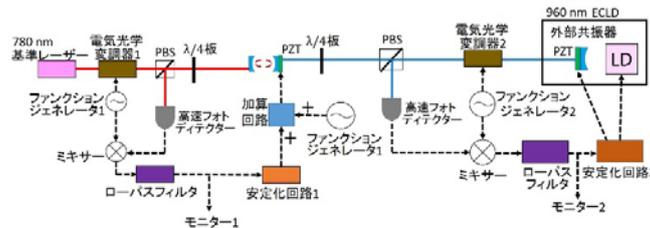


図 12. 実験系

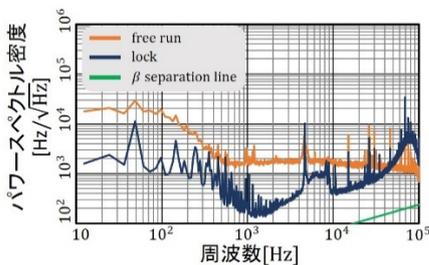


図 13. 周波数ノイズの PSD

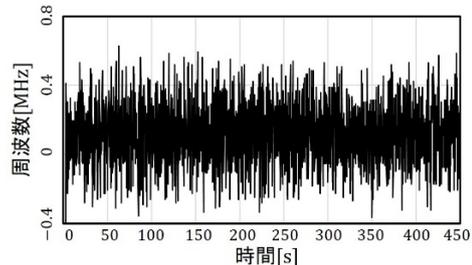


図 14. 周波数揺らぎ

【まとめと今後の展望】

本研究では、トランスファー共振器を用いて周波数が安定化された波長 960 nm の半導体レーザー光を作成することを目標にしている。現段階では、基準レーザーをリファレンスとして共振器長を安定化することができる安定化回路、共振器長をリファレンスとして 960 nm のレーザーの周波数を安定化するための安定化回路を作成することに成功し、各安定化回路を用いてトランスファー共振器による 960 nm レーザーの周波数安定化を試みた。

最終結果として前節より、目標の達成は果たされなかった。この結果を受けて我々が次にやるべきこととして、共振器の固定である。現在、共振器は凹の形をした金属の上に置かれているだけであり、この共振器をチャンバー内に固定することが必要である。また、ペルチェ素子を使い、温度を一定にすることで、周波数揺らぎを軽減することができる。

以上の工夫を施した後、EIT(Electromagnetically Induced Transparency ; 電磁誘導透過) の基準線に評価することで安定性を評価することを今後の予定とする。