

Rb 原子と光子の強結合に向けた

DBR レーザーの線幅狭窄化

丹治研究室 川田春菜

1. 背景

量子電気力学分野において中心的な役割を果たす光子と原子の相互作用は前世紀から関心が持たれてきた。加えて近年の量子情報科学の発展に伴い、光子間相互作用の重要性が高まってきている。量子情報処理の技術として考えられているものの一例として、光子スイッチが挙げられる。光子スイッチとは、入力される光子数により透過光のオンオフを切り換えられるものである。我々は光子スイッチをはじめとする量子情報処理の要素技術にとって不可欠な光子間相互作用に注目し、研究を行っている。本研究では ^{87}Rb 原子を使用し、光子間相互作用を観測するために光共振器を用いて ^{87}Rb 原子と光子の結合を強化する。

2. 目的

本研究の目的は、上で述べた ^{87}Rb 原子と光子の結合の強化に用いる共振器を安定化させるためのレーザーの開発である。共振器の共振周波数は共振器の長さにより決定されるため、共振器長を常に安定化させる必要がある。しかし原子の共鳴に近い波長 780 nm のレーザー光を実験共振器の安定化に用いると、このレーザー光が ^{87}Rb 原子と相互作用してしまう。よって実験共振器を安定化させるためには、伝達共振器を介して ^{87}Rb の共鳴周波数から大きく離調したレーザーを用いる必要がある。一方、共振器を高い精度で安定化させるためには共振器ミラーの反射率が十分高い領域の波長を用いる必要がある。これらから波長 760 nm の DBR (distributed Bragg reflector) レーザーを使用することにした。実験共振器を安定化させるための機構の概略図を図 1 に示す。



図 1. 実験共振器をロックするための機構

共振器での光子と原子の結合の強さを示す単一原子協働パラメータ η は、式(1)で表せる。 F はフィネス、 w_c は共振器モードのウェスト、 k は原子の共鳴波長に対応する波数である。

$$\eta = \frac{24F}{\pi k^2 w_c^2} \quad (1)$$

また共振器の線幅は式(2)のように表せる。

$$\Delta\nu = \frac{c/2L}{F} \quad (2)$$

我々のグループでは $F \cong 50000$ 、 $\nu_{\text{FSR}} \cong 3.4 \text{ GHz}$ と決定した。よって共振器の線幅 $\Delta\nu$ は

$$\Delta\nu = \frac{3.4 \times 10^8 [\text{Hz}]}{50000} \cong 68000 [\text{Hz}]$$

となる。このように実験共振器の線幅は約 68 kHz であるのに対し、760 nm レーザーの線幅はおよそ 10 MHz と非常に広く、精度よく実験共振器をロックできない。そのため実験共振器の線幅と同程度まで 760 nm レーザーの線幅を狭窄化する必要があった。そこで我々は、線幅狭窄化の方法として optical feedback という方法を用いた。

3. Optical feedback による線幅狭窄化

Optical feedback とはレーザーダイオード(LD)から出射された光の一部を、外部共振器を利用して LD に戻すことで線幅を狭くする方法である。[1]によると optical feedback ありの線幅 $\Delta\nu$ は、optical feedback なしの線幅 $\Delta\nu_0$ を用いて以下のように表される。

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_0}{[1 + \sqrt{1 + \alpha^2 \kappa \tau_e \cos(\omega \tau_e + \tan^{-1} \alpha)}]^2} \quad (3)$$

ここで、 α は線幅増大因子、 κ はフィードバックの強度、 τ_e は外部共振器にて光が往復する時間、 ω は共振器の縦モード共鳴周波数を表す。 τ_e は共振器長 L と光速 c から $\tau_e = \frac{2L}{c}$ であるから式(3)を L について簡略化すると、 A を位相のずれの関数として式(4)のように表せる。

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_0}{[1 + AL]^2} \quad (4)$$

また戻り光のパワー p の大きさによってレーザーのふるまいが変化することが知られており、 $p = -31 \text{ dB}$ で最も線幅が狭くなったことが報告されている[2]。そこで最大 -31 dB のパワーが戻せるように図 2 のように光学系を組んだ。まず LD からの出射光をビームサンプリング(BS)で 9:1 に分け 10 % のレーザーを optical feedback に用いた。この光をピエゾに取り付けたミラーで反射しフィードバックした。また $\lambda/4$ 板と PBS を用いて戻り光の調節を行った。その結果、戻り光強度が $-52.2 \text{ dB} \leq p \leq -30.7 \text{ dB}$ の範囲で調整可能になった。

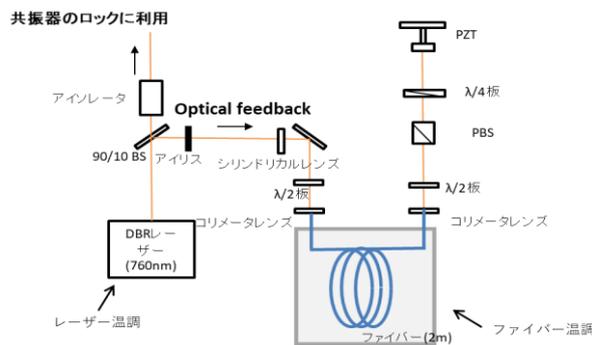


図 2. Optical feedback の光学系

式(4)は共振器長が長いほど線幅を狭窄化できることを示している。本研究では、先行研究[2]において線幅の狭窄化に成功した 2 m のファイバーを採用した。しかし共振器長を長

くすると温度変化の影響を受けやすくなる。温度による光路長変化は以下の式で表せる。

$$\Delta L = n_1 \Delta l_1 (\Delta t_{1max}) + l_1 \Delta n_1 (\Delta t_{1max}) + n_2 \Delta l_2 (\Delta t_{2max}) + l_2 \Delta n_2 (\Delta t_{2max}) \quad (5)$$

ここで共振器長を L 、空気の屈折率を n_1 、ファイバーの屈折率を n_2 、ファイバーを除いた共振器長を l_1 、ファイバー長を l_2 、 Δt_{1max} を室温の最大変化量、また Δt_{2max} をファイバーの最大温度変化量とした。第1項と第2項は空気中における光路長変化、第3項と第4項はファイバーでの光路長変化を表す。測定した結果、室温は最大で約 2°C 変化していた。これを式(5)に適用すると ΔL は約 $53.4 \mu\text{m}$ であった。一方、用いたピエゾの可動域は $17.4 \mu\text{m}$ であり、ピエゾにより光路長変化を補正することができない。そこで特に温度変化の影響を大きく受けるファイバーに対して温調をかけた。作製した温調機構を図3、またその温度変化を図4に示した。ここで、青線が室温の温度変化、赤線が断熱材内部の温度変化を表す。

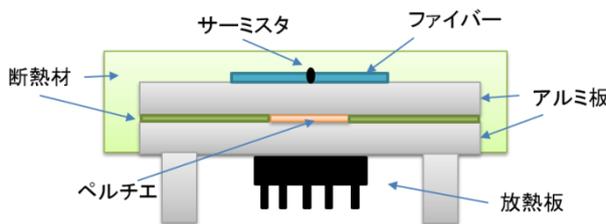


図 3. ファイバー温調模式図

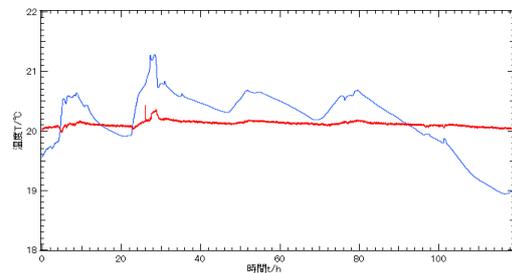


図 4. 温度変化のグラフ

図4より断熱材内部の温度変化を最大で約 0.2°C に低減できた。式(5)よりこのときの光路長変化 ΔL は約 $15.3 \mu\text{m}$ となった。これはピエゾの可動域 $17.4 \mu\text{m}$ より小さいため、ピエゾでの光路長補正が可能になったと言える。

4. 狭窄化した線幅についての評価

上述の optical feedback 法を用いて狭窄化したレーザーの線幅を、本実験では自己遅延ヘテロダイン法[3]を用いて測定した。このときに用いた実験系の概略図を図5に示す。

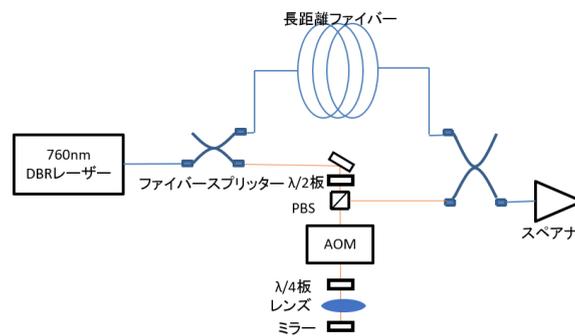


図 5. 自己遅延ヘテロダイン法の概略図

ファイバースプリッターを用いてレーザー光を2つに分け、片方を十分長い光ファイバーに通す。さらにもう一方を音響光学素子(AOM)を用いて周波数シフトさせることで、2

つの独立したレーザー光が得られる。この 2 つのレーザー光のビート信号からレーザーの線幅を求められる。本実験では、最小で約 52 kHz の線幅を測定することが可能である、約 4 km のファイバーを利用して測定を行った。得られたビート信号をそれぞれ図 6 と図 7 に示した。本実験では、ビート信号は自己遅延を利用した線幅が同一なレーザー光同士のものであるから、求めるレーザーの線幅はビート信号の 1/2 倍になる。よってレーザーの線幅は、狭窄化していない場合 13.4 ± 0.3 MHz、狭窄化した場合 440 ± 20 kHz となった。これらから optical feedback によってレーザーの線幅を約 1/30 倍に狭窄化することに成功した。

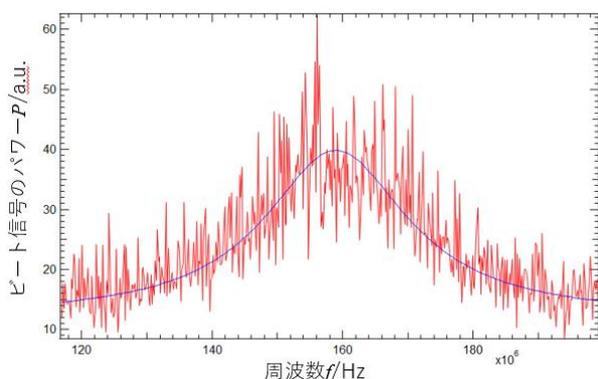


図 6. 狭窄化していない場合のビート信号

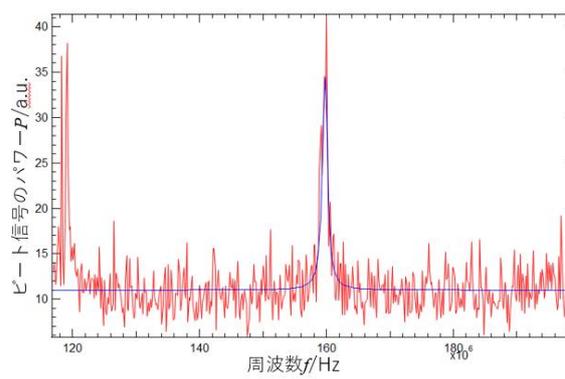


図 7. 狭窄化した場合のビート信号

5.まとめ・展望

本研究では、 ^{87}Rb 原子と光子の強結合に向けた、実験共振器安定化に用いる 760 nm DBR レーザーの線幅狭窄化を optical feedback 法を利用して行った。その結果、パワーを $-52.2 \text{ dB} \leq p \leq -30.7 \text{ dB}$ の範囲で調整可能になった。また自己遅延ヘテロダイン法による線幅測定で、レーザーの線幅を 13.4 ± 0.3 MHz から 440 ± 20 kHz に狭窄化出来たことが分かった。しかし実験共振器の線幅は 68 kHz であるため、レーザーの線幅をより狭窄化する必要がある。今後は、各レンズでの反射等による制御不能な戻り光や、電流源のノイズを削減することでレーザー線幅をより狭窄化していく予定である。その後、狭窄化したレーザーを用いて実験共振器の安定化を実行していくことになる。

参考文献

- [1] R. W. Tkach et.al. Regimes of Feedback Effects in 1.5- μm Distributed Feedback Lasers. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol.LT-4, No.11, pp.1655-1661, 1986.
- [2] Q. Lin et.al. Long-external-cavity distributed Bragg reflector laser with subkilohertz intrinsic linewidth. *OPTICS LETTERS*, vol.37, No.11, pp.1989-1991, 2012.
- [3] M. MORI et.al. Spectral Linewidth Measurement of Semiconductor Laser Diodes by Phase Modulation Technique, 愛知工業大学研究報告, 第 44 号, 2009.