

狭線幅な光共振器の安定化に向けた 光フィードバックによるレーザー線幅狭窄化

丹治研究室 山寄直樹

1 背景・目的

量子情報通信においては数光子レベルでの光学非線形性、すなわち光子間の相互作用が重要な役割を果たすと考えられる。しかしながら光と光は真空中では相互作用を起こさない。そこで光と物質の相互作用を用いることにより間接的に光同士を相互作用させることが可能となる。近年共振器量子電磁力学の発展に伴い高フィネスの共振器が作製可能になり、これを用いて数光子単位での実効的な光子同士の相互作用を起こすことが可能になりつつある。

我々の研究室では真空中にある共振器内の原子集団を利用して、上記のような光子間の実効的な相互作用を観測することを目指している。共振器中で原子と光子を相互作用させる系を考える際重要なパラメータとして協働パラメータ η がある。これは原子と光子の結びつきの強さを表し式(1)のように表される。

$$\eta = \frac{4g^2}{\kappa\gamma} \quad (1)$$

ただし g は真空ラビ周波数、 κ は共振器からの漏れ出しレート、 γ は自然放出レートである。 η は共振器モードの腹の位置で最大値 η_{max} となり式(2)のように表される。

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

ただし F はフィネス、 k は原子の遷移周波数に対応する波数、 w_c は共振器のモード径である。光子間相互作用観測のためには η_{max} を大きくする必要があるためそのためには F を大きく、 w_c を小さくすればよい。今回用いる実験共振器のフィネスは 50000 程度とした。ここで共振器の線幅は以下のような式で表される。

$$\Delta\nu = \frac{\kappa}{2\pi} = \frac{\nu_{FSR}}{F} \quad (3)$$

^{87}Rb 原子の超微細構造の 2 つの基底状態からの遷移に共振器が同時共鳴できるように $\nu_{FSR}=3.4 \text{ GHz}$ としたので実験共振器の線幅は約 68 kHz となった。実験共振器を ^{87}Rb の吸収遷移に対して安定化するため図 1 のような機構を作る。Doppler-free DAVLL 法とは、原子に磁場をかけた際ゼーマン効果により準位が分裂することを利用し、分裂した準位に共鳴する異なる偏光の光から誤差信号をつくりレーザーの周波数を安定化する方法である。Pound-Drever-Hall (PDH)法とは電気光学位相変調器(EOM)によりサイドバンドを立てた光を共振器に入射し、反射光から光ヘテロダイン法により誤差信号を得て共振器の共鳴周波数とレーザーの周波数を相対的に安定化させる方法である。ここで伝達共振器を介して実験共振器をロックするという方法を取っているのは、PDH 法でロックする際 780 nm の

光が実験共振器に入り原子の状態に影響を与えるのを防ぐためである。780 nm のレーザーを用いた PDH 法によるロックを伝達共振器に対して行う際、レーザーの線幅が伝達共振器の線幅に対して広過ぎるとロックを行うことが出来ないため、共振器の線幅とレーザーの

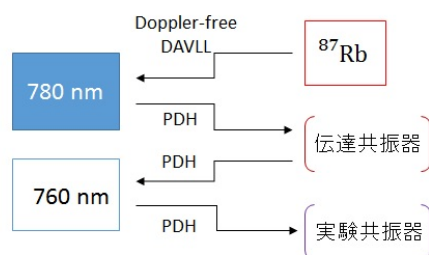


図 1 実験共振器のロック機構

線幅を同程度かそれ以下にしなければならない。しかし参照光として用いようとしている DBR (distributed Bragg reflector) レーザーの線幅は 1 MHz 程度と共振器の線幅に対して広い。そこで本実験では[1]を参考に、長い外部共振器を取り付け optical feedback を行うことにより DBR レーザーの線幅狭窄化を行った。

2 原理

実際に組んだ光学系を示す(図 2)。光フィードバックを行った際のレーザーの線幅 $\Delta\nu$ は光フィードバックを行っていない場合のレーザーの線幅 $\Delta\nu_0$ を用いて以下の式で表される[2]。

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

ここで、A は共振器ミラーの反射率で決まる値である。式(4)より外部共振器長が長いほどレーザーの線幅は細くなることが分かる。よって目標の線幅まで狭窄化するために 2 m のファイバーを用いて外部共振器長を伸ばした。DBR レーザーの光の一部をビームスプリッターで反射し、ピエゾの先に付けたミラーによってレーザー内部にフィードバックしている。[1]によるとフィードバック光のパワーによってレーザー発振の振る舞いが増えるので $1/4$ 波長板(QWP)と偏光ビームスプリッター(PBS)を用いて安定したシングルモード発振を維持できる領域にパワーを調整した。

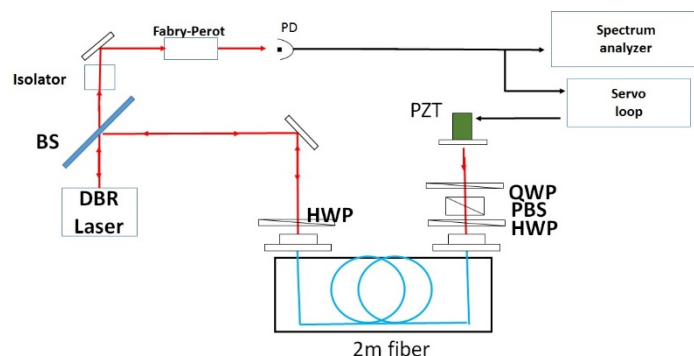


図 2 測定装置

3 実験

3.1 レーザー線幅評価

狭窄化を行った DBR レーザーの線幅を評価した。DBR レーザーと数百 kHz の線幅を持つ ECDL とをビームスプリッターを用いて重ね合わせ、そのビートをフォトディテクターで観測する(図 3)。

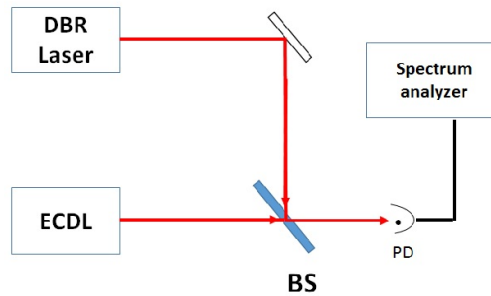


図 3 ビート観測のセットアップ

観測されるスペクトルの線幅は DBR レーザーの線幅と ECDL の線幅の和となっている。外部共振器からのフィードバック光を遮った場合のスペクトルは図 4、フィードバック光を遮らない場合のスペクトルは図 5 のようになった。フィッティングを図 4,5 に対して行ったところ線幅がフィードバックなしの時約 1.3 MHz、フィードバックありの時約 440 kHz であった。これにより線幅が 900 kHz 程度狭窄化されていることが分かる。また狭窄化した DBR レーザーの線幅は 440 kHz 以下である事が分かる。

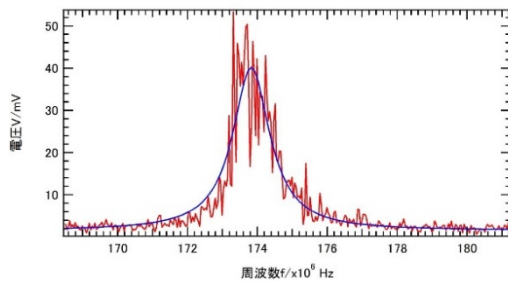


図 4 光フィードバックなしのスペクト

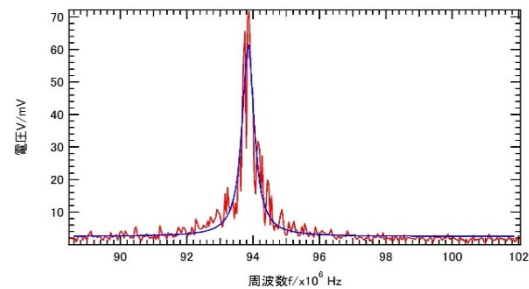


図 5 光フィードバックありのスペクト

3.2 温度安定化

本実験では外部共振器の長さをピエゾ素子により補正することでレーザー発振の中心周波数を安定化させる。温度による実効的な光路長変化 ΔL は次の式で求められる。

$$\Delta L = n_1 \Delta l_1 (\Delta t_{\max}) + l_1 \Delta n_1 (\Delta t_{\max}) + n_2 \Delta l_2 (\Delta t') + l_2 \Delta n_2 (\Delta t') \quad (5)$$

ただし n_1 は空気の屈折率、 n_2 は合成石英の屈折率、 l_1 はファイバー以外の光路長(0.25 m)、 l_2 はファイバーの光路長(2 m)、 Δt_{\max} は室温の最大変化、 $\Delta t'$ はファイバーの温度変化である。式(5)の右辺の第 1 項はアルミの熱膨張、第 2 項は温度による空気の屈折率変化、第 3 項は合成石英の熱膨張、第 4 項は温度による合成石英の屈折率変化を表している。実験室の最

大温度変化を測定したところ約 2°C であり、式(5)より $\Delta L = 53 \mu\text{m}$ となった。実験室にあるピエゾの最大可動幅は $17.4 \mu\text{m}$ でありそのままでは ΔL と比べ小さいため光路長を補正できない。より長いピエゾを使うと振動に対する安定性が低減してしまうのでファイバーに以下のような温度調整機構を取り付けファイバーに対して PI 制御を行うことで温度安定性を向上させた。温調機構を付けた状態で室温とファイバーの温度変化をそれぞれ測定したところ図 7 のグラフのようになった。

図 7 よりファイバーの温度変化は室温の変化に対して 10 分の 1 程度に低減されていることが確かめられる。式(5)より改めてこの時の光路長変化 ΔL を求めると $\Delta L = 15 \mu\text{m}$ となりピエゾにより補正できる範囲に収めることが出来た。つまりレーザーの中心周波数を温度に対し安定化することが出来た。

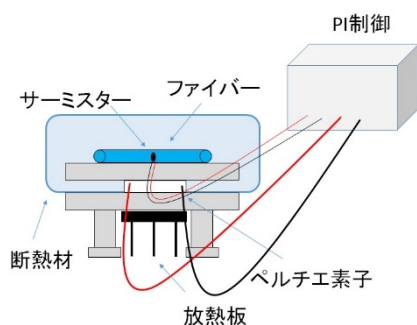


図 6 温調機構

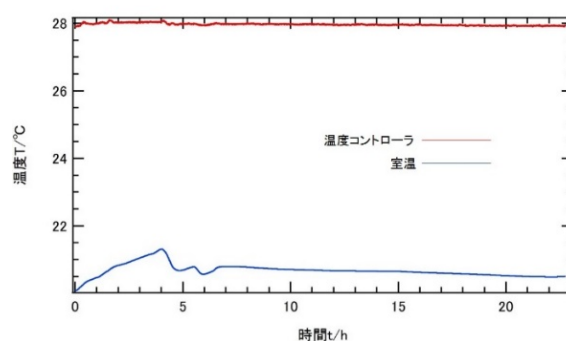


図 7 温度変化

4 まとめ・展望

実行的な光子間相互作用実現のために DBR レーザーの線幅を狭窄化する必要があり、長い外部共振器による optical feedback を行うことで線幅を狭窄化した。optical feedback によって別のレーザーとのビート信号の線幅が 1.3 MHz から 440 kHz 以下に狭窄化されていることが分かった。また温調機構をファイバーに取り付け温度に対する安定性を向上させることでレーザー発振の中心周波数を安定化させることが出来た。

展望としては狭窄化された線幅が共振器の線幅 68 kHz と同程度かそれ以下であることを定量的に確かめる。さらに、このレーザーを用いて共振器をロックする。

5 参考文献

- [1] Qian Lin, Mackenzie A. Van Camp, Hao Zhang, Branislav Jelenković, and Vladan Vuletić Long-external-cavity distributed Bragg reflector laser with subkilohertz intrinsic linewidth OPTICS LETTERS, vol37, No11, 1989-1991, (2012)
- [2] R. W. TKACH, MEMBER, IEEE, AND A. R. CHRAPLYVY Regimes of Feedback Effects in $1.5\text{-}\mu\text{m}$ Distributed Feedback Lasers JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. LT-4, NO. 11, NOVEMBER 1986