

高フィネス光共振器を用いた 半導体レーザーの周波数安定化

中川研究室 学部4年 海上智行

1. 序論

現在、量子を用いた情報理論に関する研究が世界中で進められている。量子を用いた情報処理は、Einstein らが提唱したEPR 相関を元に研究が進められ、現在の通信方式よりも大容量な通信を可能とする量子テレポーテーション、未知の基底状態の量子を複製することはできない事を利用した絶対に解読されない量子暗号通信、Shor のアルゴリズムを利用することで既存の古典的なコンピュータよりもはるかに早い時間で因数分解をとくことができる量子コンピュータなど、量子情報処理は多くの可能性を持った分野として注目されている。とくに、大きな数の因数分解をすばやく解くことができ、暗号をすばやく解読できる量子コンピュータの実現と、既存の暗号化技術と異なり理論上解読不可能な量子暗号通信の実現は、社会に大きな影響を与えると考えられる。

量子を用いた情報処理では量子ビットを用いて計算や通信を行う。量子ビットとは、二準位系の状態ベクトルで記述される量子であり、量子ビット同士をもつれさせることでエンタングル状態を作り出し様々な量子情報処理を行う。量子的にもつれた状態にある二つの量子AとBは、次の式のように記述することができる。

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B) \quad (1)$$

この式のように系の状態ベクトルが個々の量子の状態ベクトルのテンソル積で表せないとき、その系はエンタングル状態にあるといえる。量子コンピュータでは、この状態を00と11の重ね合わせと見ることで2bitの演算を同時に行うことができる。量子情報通信の場合、もつれた系では状態の変化が瞬時に伝わることを利用して通信を行う。ベル測定と呼ばれる重ね合わせを破壊しない測定を行うことで、二つの量子の間のエンタングル状態を保ったまま片方の状態を変化させることでもう片方の状態を変化させる。最後に基底状態を古典的な経路で伝えることで情報通信が行われる。こうすることで、さらに大容量な通信を行うことが可能になる。

我々の研究室では、中性原子を用いた量子情報処理の理論の実現を目指している。双極子光トラップを用いて、単一の原子をトラップすることで、その原子の内部状態を利用して量子ビットを生み出す。その後、原子をRydberg 状態

と呼ばれるエネルギーの高い状態に励起することで原子間の相互作用を大きくし、原子をもつれた状態にすることを目的として研究を行っている。現在、Rydberg状態に励起するために $1\mu\text{s}$ の励起光を当てている。そのため、光源にはそれよりも十分に長いコヒーレント時間が要求される。そこで、十分に長いコヒーレント時間として目標を $10\mu\text{s}$ 以上として、レーザーを安定化することが本研究の目的である。

2. 原理

周波数を安定化するために、以下の様な系を構築した。

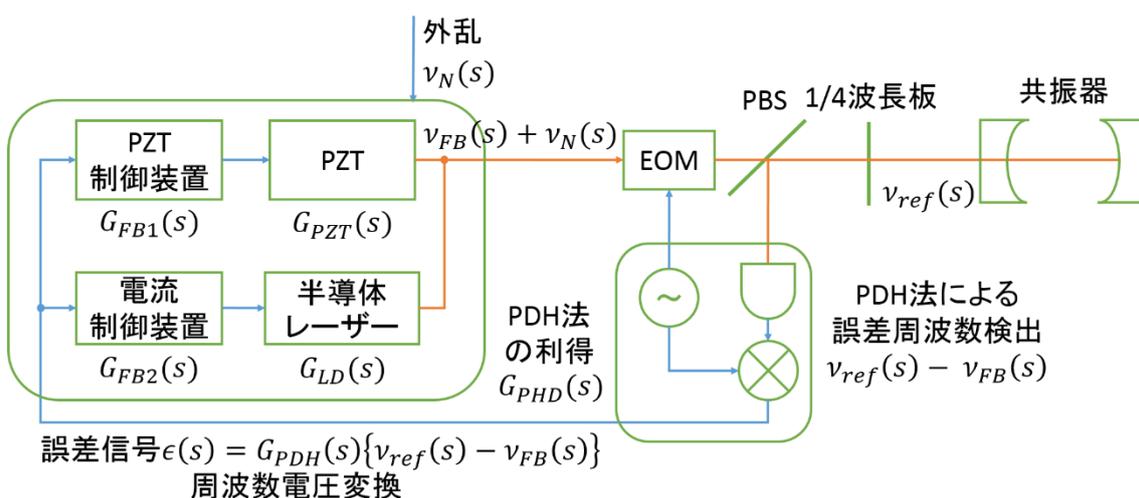


図1：フィードバック制御系の概略図

周波数を安定化するために、Pound-Drever-Hall法と呼ばれる方法を用いた。[1] この方法では、安定化したい周波数 v_{FB} と共振器からの反射光 v_{ref} の差を見ることで周波数の変化を検出する。そのため、共振器からの反射光を安定な基準として用いることで、誤差信号を検出することができる。

得られた基準からの偏差を用いてフィードバックを行った。この系では、信号が一巡するときの利得が、

$$G(s) = G_{PDH}(G_{FB1}G_{PZT} + G_{FB2}G_{LD}) \quad (2)$$

として与えられる。このときの外乱を含んだレーザーの周波数は、

$$v_{FB}(s) = \frac{G(s)v_{ref}(s) + v_N(s)}{1 + G(s)} \quad (3)$$

となる。そのため、系の利得が大きいほどノイズを抑えることができる。また、今回のノイズは $1/f$ ノイズなので[2]、帯域を広く取るほど安定度を上げることができる。今回の系では、PZTで低域の利得を大きく取ることドリフトを防ぎ、電流へのフィードバックで広帯域に利得を取れるように制御装置の設計を行った

3. 実験

図1に示したような装置によって測定を行った。EOMを用いて15.5MHzの変調をかけ、PDによって共振器からの反射光を検出した。検出された信号をミキサーにかけることで誤差信号の検出を行った。また、フィードバック制御を行った状態の誤差信号のパワースペクトル密度の測定を行った。

4. 実験

PZTに三角波を入力し、周波数を掃引して誤差信号の形を見た結果が図2である。また、このときのサイドバンドの間隔を用いて周波数の規格化を行った。掃引の間隔を変えずに測定レンジを拡大した結果が図3である。この結果から共振器の線幅が80kHz程度と見積もられた。

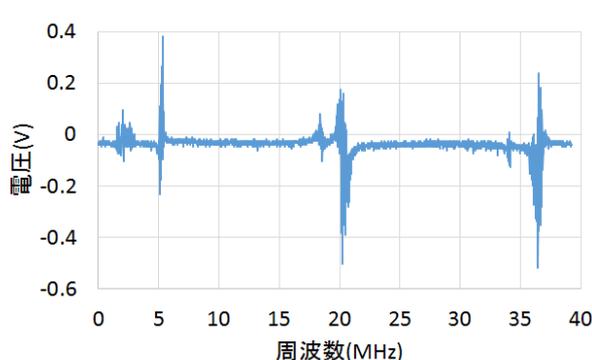


図1：誤差信号

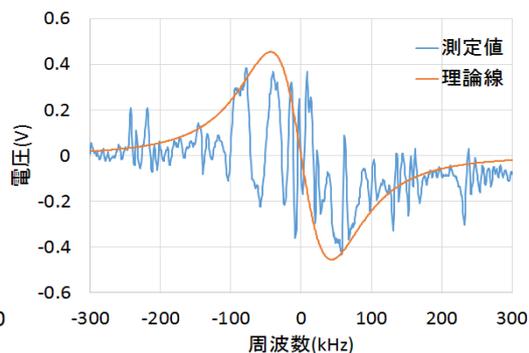


図2：誤差信号の中央

誤差信号を確認した後、フィードバック制御を行った。制御中の誤差信号のパワースペクトル密度が図4である。

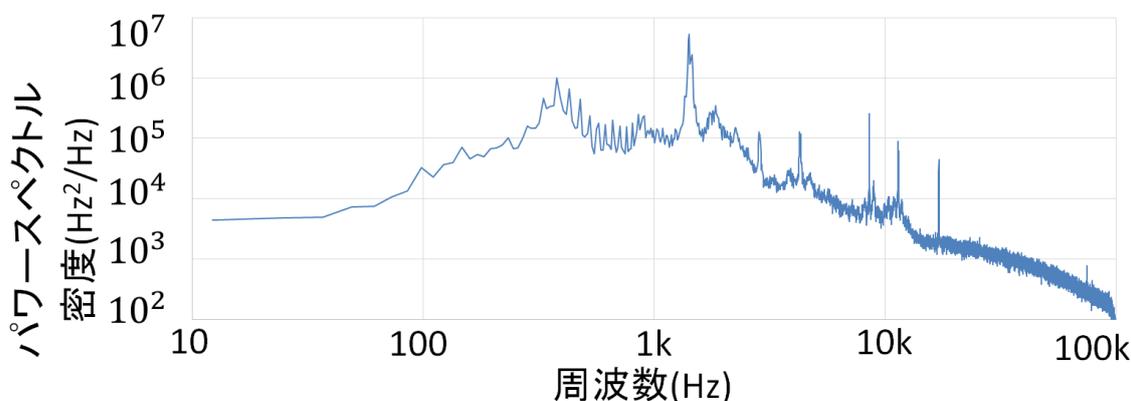


図4：誤差信号のパワースペクトル密度

この結果は、フィードバック制御中の誤差信号に対してFFTを行い、その後図2と図3から得られた線幅とピーク電圧を用いて規格化を行ったものである。2kHz付近からロックがかかり始めている。また、1.2kHzにPZTの共振によるピークが、500Hzに外乱によるノイズが存在している。この結果から線幅を見積もったところ300kHz程度だと分かった。

5. まとめと今後の予定

レーザーの周波数の変化を誤差信号として検出し、その信号を元に弱いロックを書けることに成功した。また、そのときの誤差信号のスペクトルノイズを測定することにも成功した。今回測定したデータによって電流の利得が足りないことが分かった。よって、現在の回路のパラメータの変更を行うことで、線幅を100kHz以下にできる回路の製作を行う。

今回は共振器の固有周波数にレーザーをロックしたが、最終的には今回安定化した光とのビートを見ることで1.5GHzのFSRの間の周波数にもロックできるようにすることで、自由な波長に安定にロックできるようにすることが最終的な目標となる。

6. 参考文献

[1] Eric D. Black, "An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization", *Am. J. Phys.*, Vol. **69**, No. 1, 79-87, January 2001.

[2] 保坂一元, 光格子時計のための線幅1Hz級レーザーの開発, 産総研計量標準報告 Vol. **7**, No. 1, 2008.