

超狭線幅光源を用いた光周波数コムでの周波数安定化

武者研究室 村井陵輔

1. 序論

レーザーは単一周波数を持つ位相が揃ったコヒーレントな光であるが故に、周波数揺らぎの少ない光源である。そのため、分光や測距など高い周波数安定度が要求される分野での応用が盛んである。これらの応用分野において、現在の水準よりも高い精度での測定が望まれるが、そのためにはより周波数揺らぎの少ないレーザー光源の開発が必要となる。具体的には、1 Hz 以下 (周波数安定度 $10^{-15}@1$ 秒) の線幅が要求されている。このような線幅の細いレーザー光を発生させるには、安定な周波数基準に対してレーザーの発振周波数を安定化させる必要がある。本研究では周波数基準として Fabry-Perot(F.P.)光共振器の共振周波数を用いて波長 1550 nm の外部共振器型半導体レーザー(External Cavity Laser Diode:ECLD)の線幅の狭窄化を行う。これにより極限まで線幅が狭窄化されたレーザー光源を超狭線幅光源と呼ぶ。超狭線幅光源は、その高い周波数安定度を利用して超高精度の分光や測距などに応用が期待されるが、超狭線幅光源と大きく異なる波長光源の評価や安定化には使用できない。この解決策として、我々は超狭線幅光源と光周波数コム(光コム)の縦モード 1 本を位相同期させることにより、光コム全ての縦モードに超狭線幅光源の周波数安定度を移乗した広帯域光周波数基準を開発することを目標とする。

広帯域光周波数基準は、超狭線幅光源の波長に依存せず、様々な波長光源の安定化及び評価を可能とする。例えば、DECIGO に用いる波長 1 μm のヨウ素安定化レーザーの周波数安定化や、周波数安定度の評価に使用する。また、光ファイバーによる長距離精密伝送システムが確立すれば、本研究室で開発した広帯域光周波数基準を他の研究機関でも使用することが可能となる。

2. 原理

2.1 超狭線幅光源

超狭線幅光源とは線幅を極限まで狭窄化したレーザー光源である。F.P.光共振器の共振周波数を f_r 、その変化量を Δf_r 、共振器長を L 、その変化量を ΔL とすると、

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

の関係が成り立つ。式(2.1)から、共振器長の変動が共振周波数の安定度を決定することがわかる。共振器長は様々な外乱の影響によって変動するため、その外乱の影響を抑制する工夫が必要である。

マクロな外乱には、スペーサーの熱膨張、地面振動がある。熱膨張対策として熱膨張率の低い Ultra-Low-Expansion(ULE)ガラスをスペーサー素材とした F.P.光共振器を用いた。ULE ガラスは、熱膨張率が温度に依存して変化する。熱膨張率の最も小さくなる温度に温度制御を施すことで共振器長

L の変動を抑制する。また、地面振動に対する工夫として、振動を相殺する支持点 (Airy-Point) で共振器を支えることで、共振器長変動に影響する縦振動を抑制している。

2.2 光周波数コム

光コムは光のものさしと呼ばれ、周波数軸上において櫛(comb)のように等間隔に縦モードが並んだ光源である(図 2.1)。光コムはモード同期レーザー(Mode Lock Laser : MLL)及び電気光学変調器(Electro Optical Modulator: EOM)による位相変調により発生が可能である。

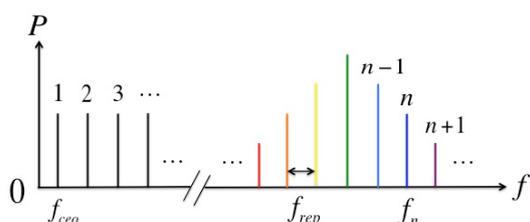


図 2.1 光周波数コム

図 2.1 に示すように縦モードと縦モードの間隔を繰り返し周波数 f_{rep} と呼ぶ。縦モードを仮想的に 0 まで拡張した際、0 周波数に最も近い縦モードをキャリアエンベロップ周波数(carrier envelope frequency) f_{ceo} と呼ぶ。ここで、 n 番目の縦モードの周波数を f_n とすると、周波数基準に同期した f_{rep} と f_{ceo} を用いると f_n は

$$f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep} \quad (2.2)$$

と表せる。従って、この f_{rep} と f_{ceo} を観測し、安定化させることによって全ての縦モードが定義され、広帯域の周波数基準となる。

3. 超狭線幅光源の開発

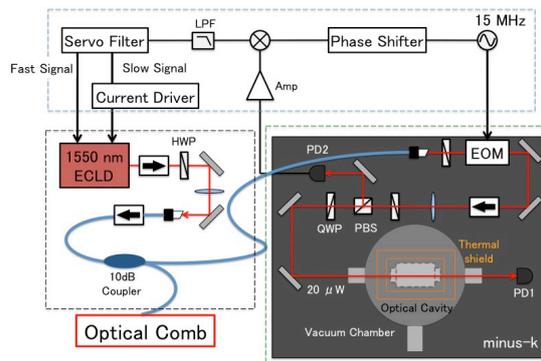


図 3.1 狭線幅光源実験系

超狭線幅光源開発実験系のセットアップを図 3.1 に示す。この系は光源部、周波数基準部、制御系で構成されている。光源部は狭窄化を行う波長 1550 nm の ECLD からの光を周波数基準部と光コムとの位相同期系へと分配する。周波数基準部では Pound-Drever-Hall(PDH)法を用いて周波数弁別曲線を取得するため、ECLD の光に EOM による 15 MHz の位相変調を加える。その後、F.P.光共振器の透過光と反射光を Photo Detector(PD)により電気信号に変換し制御部へと送られる。その後信号は、Local Oscillator(LO)の変調信号と Double Balanced Mixer(DBM)で乗算される。その後サーボフィルタへと入力され、最適化したのち、ECLD の電流源へと信号をフィードバックさせることにより ECLD の周波数を安定化させている。

図 3.2 にサーボフィルタの周波数応答シミュレーションを示す。また図 3.3 に実際にサーボフィルタを用いて周波数安定化を施した際の周波数雑音スペクトルの測定結果を示す。

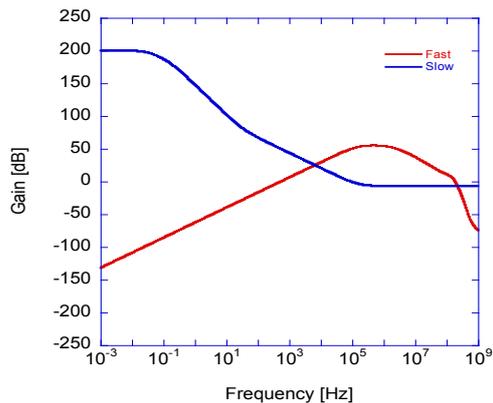


図 3.2 周波数応答シミュレーション

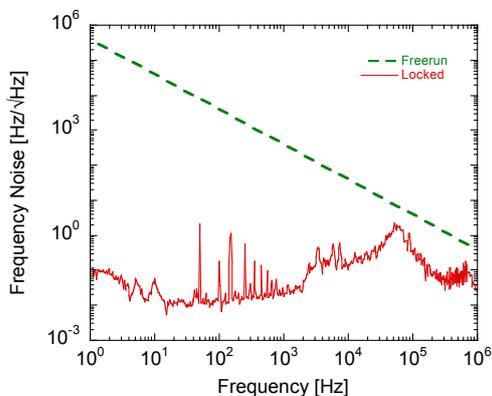


図 3.3 周波数雑音スペクトル

図 3.2 からシミュレーション上では低速制御回路に高速制御回路を付加することにより、制御帯域の広帯域化が成されている。実際に図 3.3 を見ると、1 Hz における周波数雑音は $10^{-1} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ を下回っており、目標の $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ を達成している。また、制御帯域は 1 MHz 以上得られている。この結果から、サーボフィルタは 1 MHz まで $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ を下回る性能を持つことが分かった。しかし、この結果は誤差信号評価であり、周波数基準への追従度の指標である。仮に周波数基準が揺らいでいれば、実際のレーザーの発振周波数はこの測定結果よりも周波数安定度が悪くなる可能性がある。超狭線幅光源の周波数安定度を実測するに

は、この光源と同程度以上の周波数安定度を持つ光源を用いて測定する必要がある。

4. 超狭線幅光源と光コムとの位相同期

前項において開発した超狭線幅光源と光コムとの f_{rep} を位相同期させることにより、光周波数コム全縦モードに超狭線幅光源の周波数安定度を移乗した広帯域光周波数基準を開発する。図 4.1 に位相同期実験系のセットアップを示す。

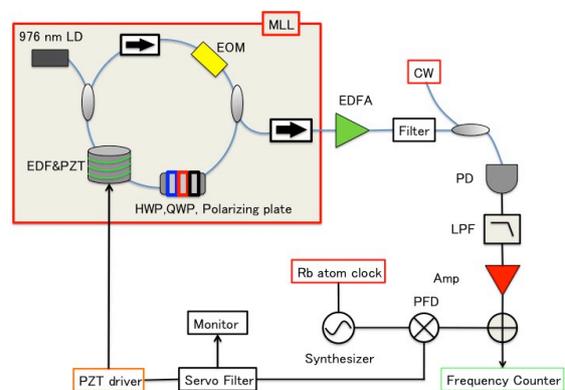


図 4.1 位相同期実験系

図 4.1 に沿って実験系の機構を追う。赤枠内は Mode Locked Laser (MLL) である。まず中心波長 976 nm の LD を励起光源として、リング型共振器内の Erbium Doped Fiber (EDF) を励起し、中心波長 1550 nm の光を発生させる。EDF は PZT に巻き付けられており、PZT に電圧を印加することにより共振器長の制御を行う。また、ここでの EOM は位相変調を加える目的ではなく、屈折率を変化させることにより光学長の制御を行う素子として用いる。PZT と EOM の制御により f_{rep} の制御帯域の拡大を図る。実際には EOM による制御は準備段階であり、本研究では PZT のみによる制御

である。光は偏光板、1/2 及び 1/4 波長板を通り、非線形偏光回転を用いた受動モード同期を行なう。MLL からのパルス光は Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) で増幅される。これは、超狭線幅光源と f_{rep} のビート信号の SN 比を向上させるためである。EDFA 後の光フィルタも同様の目的がある。増幅されたパルスは 3dB カプラを介し超狭線幅光源とのビート信号として PD で検出される。ビート信号の高周波成分は Low Path Filter で除去された後、40dB アンプにより増幅され、周波数カウンタ、Phase Frequency Discriminator(PFD)へと送られる。同時に、PFD には Rb 原子時計に位相同期されたシンセサイザから基準信号を挿入する。PFD から出力される位相差の信号はサーボフィルタを介し PZT へとフィードバックすることにより、位相同期を行う。図 4.2 に取得した超狭線幅光源と光コム縦モードのビート信号を示す。

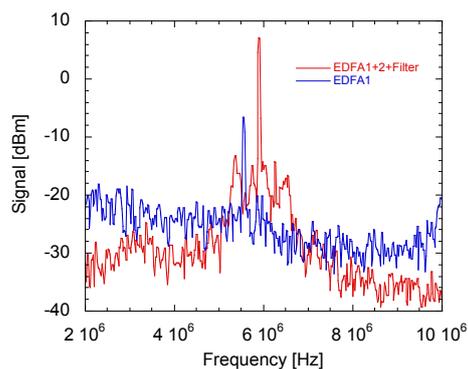


図 4.2 超狭線幅光源と光コム縦モードのビート信号
青線は EDFA1 段の場合の信号であり、赤線は EDFA を 2 段にし、光フィルタを挿入した場合の信号である。この結果から、赤線のビート信号の SN 比は 30 dB を越えていることが分かる。PFD の特性上、制御に

最低限必要な信号の SN 比は 30 dB であるが、現段階では 30 dB 以上の信号が安定的に得られていないため実際に位相同期を行うことはできなかった。

5. まとめと展望

5.1 まとめ

共振器の共振周波数と ECLD の発振周波数を一致させる電氣的負帰還制御を施し、超狭線幅光源を開発した。周波数雑音スペクトルを測定した結果、制御帯域は 1 MHz 以上で 1 Hz における目標値 1 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を下回る 0.1 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を達成した。

開発した超狭線幅光源と光コム縦モードの f_{rep} のビート信号を取得した。2 段の光アンプと光フィルタを用いることで 30 dB を上回る SN 比を得た。しかし、この値を安定的に得ることはできず実際に超狭線幅光源と光コム縦モードの位相同期を行うことはできなかった。

5.2 今後の展望

超狭線幅光源と光コム縦モードの位相同期を最終目標とし研究を行ってきたが、実際に位相同期を行うに至らなかった。原因はビート信号の SN 比 30 dB 以上を安定的に得られなかったためである。そのため今後の目標として、まず SN 比の向上を行う必要がある。具体的には、安定的に SN 比 35 dB 以上のビート信号を取得することを目標とする。次に実際に位相同期を行い、光コム縦モードの周波数安定度を測定する。位相同期を行い、広帯域光周波数基準を開発した後の展望として、超狭線幅光源の波長とは異なる波長を持つ光源の安定化及び評価を行う。