

ファブリー・ペロー共振器を用いた広帯域光周波数基準の開発と評価

武者研究室 山口弥生

1 序論

レーザーは単色性・指向性に優れ、他の光源に比べて無制御時でも周波数安定度が高い。その特性から、分光や周波数測定、測距などの分野で応用されている。これらの分野においては、安定な周波数基準に対しレーザーの発振周波数を一致させ、レーザーの周波数揺らぎを抑えることで測定精度の向上が実現できる。このように、単色性を向上させる制御を施したレーザーである周波数安定化レーザーは、発振周波数の揺らぎが少なく、周波数軸上で非常に細い線幅を有する光源であることから、狭線幅光源とも呼ばれる。しかし、それぞれの応用分野において最適な周波数を持つ狭線幅光源を各々用意することは大変困難である。

周波数安定化レーザーの周波数基準には光共振器を用いる場合と原子または分子の電子遷移や振動遷移による吸収・蛍光の中心周波数が用いられる場合があり、原子や分子の電子遷移などによる吸収・蛍光の中心周波数を周波数基準として用いる場合の利点としては、原子分子の共鳴周波数を利用する場合、一般に原子や分子の気体を封入したセルが用いられるが、このセルが振動等を受けても原子や分子の周波数がゆらぐことはないため、外乱による影響を受けにくく、周波数が固定され

ているため長期安定度が良い点である。

また、光共振器の共振周波数を周波数基準として用いる場合、線幅が細いため信号のSNRが良く短期安定度がよいという利点がある。

そこで本研究では、周波数基準としてファブリーペロー (F.P.) 光共振器を用いた発振線幅 1Hz 以下 (周波数安定度 $10^{-15}@1\text{sec}$) の超狭線幅光源を開発する。そして、その超狭線幅光源の周波数安定度を、本研究室において開発が進められてきた光周波数コム of 全縦モード周波数に移乗することで、広い波長域において高い周波数安定度を有する光源の開発を行う。また、長距離伝送用位相補償光ファイバを用いた周波数基準分配システム構築による、遠方への広帯域光周波数基準の配信を目標とする。

1.1 超狭線幅光源

レーザーの周波数安定化は、レーザーの発振周波数を安定な周波数基準に対して一致させる電気的な負帰還制御によって行う。本研究にて用いた基準はファブリーペロー (F.P.) 光共振器の共振周波数であり、共振器長 $L = 100\text{mm}$ 、共振線幅 4.0Hz (実測値) である。F.P. 光共振器の共振周波数を f_R 、共振周波数の揺らぎを Δf_R とした時、共振器長の変動 ΔL との関係は以下の式で表される。

$$\frac{\Delta f_R}{f_R} = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

従って、共振周波数の揺らぎ Δf_R を抑えるためには、共振器長の変動 ΔL を抑制する必要がある。そこで、共振器のスペーサー素材として Ultra Low Expansion(ULE) ガラスを用い、Airy Point で共振器を支持することで縦振動による共振器長の変動を相殺している。また、二重の熱シールドで覆って温度制御を行い、真空槽に入れることで共振器長の変動を抑えている。

狭線幅光源の実験系を図 1 に示す。

光源には外部共振器型半導体レーザー (ECLD) を使用した。ECLD の発振周波数と F.P. 光共振器の共振周波数の差である誤差信号の取得は、Pound Drever Hall 法による周波数弁別で行い、制御回路を介して誤差信号を電流源へフィードバックすることで電流制御による ECLD の発振周波数安定化を行っている。

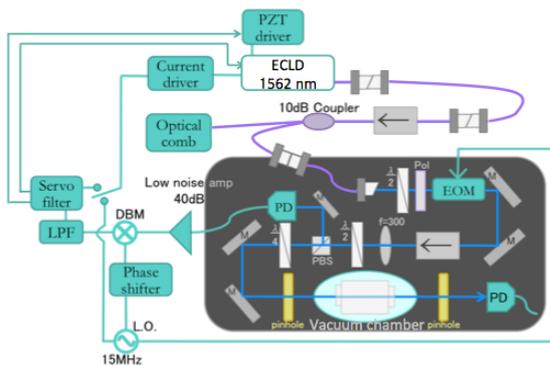


図 1 超狭線幅光源の実験系概略

レーザー光に対して電気光学変調子 (EOM) により位相変調を加えてサイドバン

ドを発生させる。その後、安定で高フィネスの光共振器に入射し、その反射光をフォトディテクタにより自乗検波を行うことで、共振時は周波数安定化されたキャリアとレーザーの周波数揺らぎを保持したサイドバンドとのビート信号を取得する。そのビート信号を復調し誤差信号としてサーボフィルタによってレーザーにフィードバックすることで発振周波数を光共振器の共振周波数に一致させて周波数安定化を行う方法が PDH 法である。

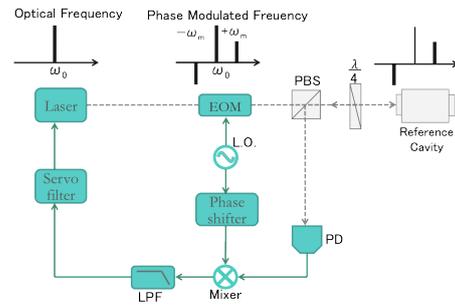


図 2 Pound Drever Hall 法による周波数弁別概略図

今回、音響雑音や地面振動などの外乱対策として、ECLD の防音対策を行い、また、サーボの高利得化や、電流源帰還及びゲインチップ直接帰還による並列電流制御による制御帯域の広帯域化を行った。加えて、ECLD 中の圧電素子への印加電圧を制御し、複数のアクチュエータを用いた発振周波数制御を行い、数時間の間安定した周波数制御を実現した。ECLD の発振周波数と光共振器の共振周波数の差が、時間とともにドリフトすることで系全体の周波数特性が変化し、周波数制御が

外れてしまう現象が確認されていた。そこで、電流源による ECLD の発振周波数制御に加え、ECLD 中の PZT に対しても負帰還制御を行うことで、周波数ドリフトを相殺し、電流値変化による系の周波数特性の変化を抑えることで長時間安定制御を試みた。図 3 に電流源及び PZT ドライバへの制御信号を示す。

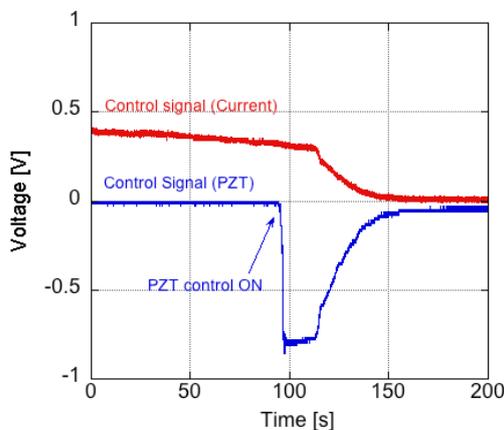


図 3 電流源及び PZT ドライバの制御信号

時間軸上 100 sec 付近で PZT の制御をかけ始めている。電流源による ECLD の発振周波数制御に加え、ECLD 中の PZT に対しても負帰還制御を行うことで、周波数ドリフトを相殺することが確認された。

サーボの利得周波数特性を図 4 に示す。灰色点線が改善前、赤実線が電流源帰還の低速回路、青実線がゲインチップ直接帰還の高速回路の利得周波数特性を表している。電流源は高周波数域でローパス特性を有するため、電流源を介さず、ゲインチップに直接帰還させる経路を設けることで、制御帯域の拡

大を図った。

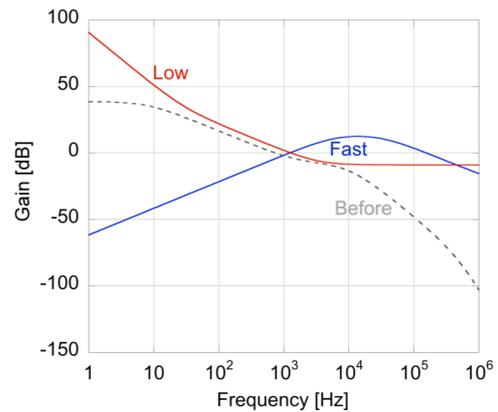


図 4 サーボの利得周波数特性

低速回路の改善、また、ゲインチップ直接帰還回路の併設により、1 Hz での利得が 45 dB 程度から 95 dB 程度に向上し、また、制御帯域は 1 kHz 程度から 200 kHz 程度に向上した。

また、この時の狭線幅光源の周波数雑音スペクトルを図 5 に示す。

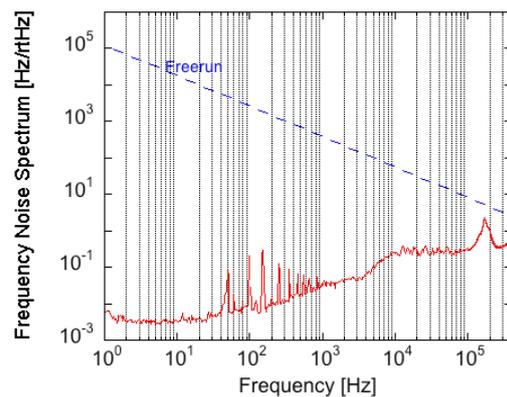


図 5 狭線幅光源の周波数雑音スペクトル

この系の制御帯域は 200 kHz 程度であることがわかる。

この時, 1 Hz での周波数安定度が 10^{-2} 程度であり, 目標値である 1 Hz/rtHz@1 sec を下回っていることが確認できた. しかし, この結果はあくまで ECLD の発振周波数の, 光共振器の共振周波数に対する追従度を表しているため, ECLD の発振周波数の絶対評価とは言えない. したがって今後同程度の周波数安定度を持つ周波数安定化レーザーを用いた周波数安定度評価などを行う必要がある.

1.2 広帯域光周波数基準

1.2.1 光周波数コム

モード同期レーザーから発生する光は周波数軸上において, 繰り返し周波数 f_{rep} により決定される間隔で立つ縦モード列となる. これらの縦モード列が櫛 (comb) の形状に見えることから, 光周波数コムと呼ばれている. この縦モードの間隔 f_{rep} はすべて等しく, f_{rep} に狭線幅光源を位相同期を行うことで, 広帯域な光周波数基準を実現することができる. 実際にはキャリアと包絡線の位相差によって生じる仮想的な周波数オフセット (Carrier Envelope Offset) f_{ceo} が存在し, 光周波数コムの n 番目の縦モードの周波数を f_n とすると, n 番目の縦モードは以下の式で表される.

従って, 光周波数コムは f_{ceo} 及び f_{rep} を Rb 原子時計などのマイクロ波領域周波数基準や光周波数基準と位相同期を行うことで, すべての縦モードが狭窄化された広帯域な光周波数基準となる.

$$f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep} \quad (2)$$

f_{ceo} はルビジウム原子時計などのマイクロ波領域周波数基準に対して, また, f_{rep} は狭線幅光源を基準として, 電気的な負帰還制御による周波数安定化を行い, すべての縦モードが狭窄化された広帯域な光周波数基準となる. f_{ceo} 及び f_{rep} は負帰還制御により周波数安定化を行う. また, 図 6 に広帯域周波数基準の実験系を示す.

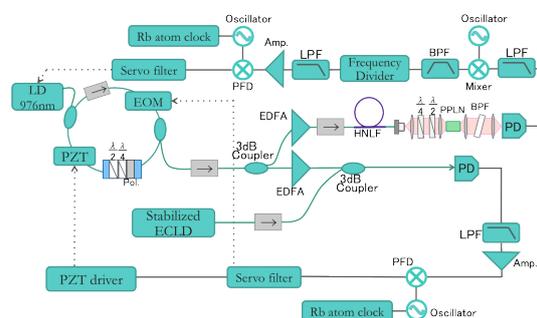


図 6 モード同期レーザーによる光周波数コムの実験図

1.2.2 f_{ceo} の周波数安定化

高非線形ファイバによりスペクトルが 1 オクターブ広がった光であるスーパーコンティニウム (SC) 光の $1 \mu\text{m}$ 及び $2 \mu\text{m}$ の第二高調波 $1 \mu\text{m}$ を用いた $f - 2f$ 干渉計を構築し, それらのビート信号を, 自己参照法を用いて f_{ceo} を検出している.

f_{ceo} は, ルビジウム原子時計に安定化されたシンセサイザからの信号を基準信号とし, 位相差を位相周波数弁別器 (PFD) により電圧差として出力される. その後, 制御回路を介してモード同期レーザーの励起 LD に接続された電流源のモジュレーション端子と LD のゲインチップに直接フィードバックすること

で周波数安定化制御を行っている。

この時得られていた f_{ceo} の周波数安定度は 10^{-14} 程度であり、これは検出される f_{ceo} の SNR が低いことが原因の一つであると考え、 f_{ceo} 検出系最適化により信号強度向上を図った。

図 7 に SNR 改善後の f_{ceo} を示す。

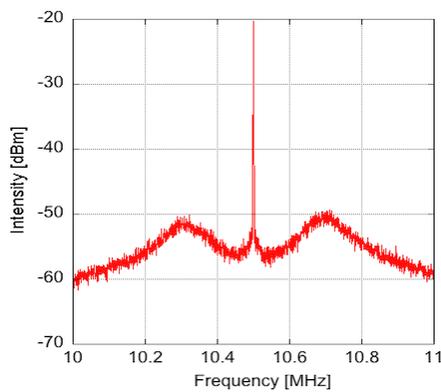


図 7 SNR 改善後の f_{ceo}

改善前は 20 dB 程度であった SNR が 30 dB まで向上した。また、図 8 は f_{ceo} 制御時のアラン分散である。

図 8 において、左側の縦軸はマイクロ波領域での周波数安定度、右側の縦軸は光領域に換算した場合の周波数安定度である。緑色がフリーランでの f_{ceo} 、青色が以前得られていた f_{ceo} 、赤色で示しているのが現在の f_{ceo} 、灰色で示しているのが同期に用いているシンセサイザのアラン分散である。光領域の周波数に換算した場合の安定度は 1 sec で 10^{-15} 台に達している。

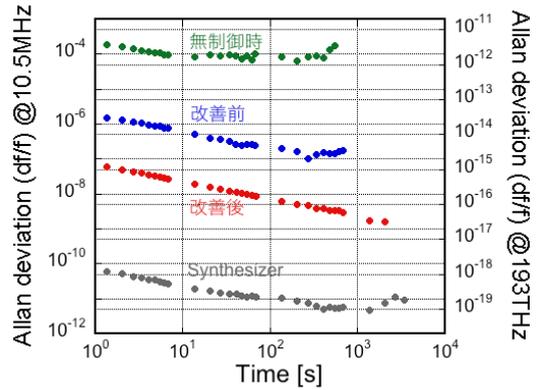


図 8 f_{ceo} のアラン分散

1.2.3 f_{rep} の周波数安定化

f_{rep} の周波数安定化には前述の狭線幅光源を用いて行う。狭線幅光源とその発振周波数近傍の光周波数コムの縦モードとのビート信号によるオフセット位相同期を行うため、まずビート信号の取得を行った。

図 9 に狭線幅光源と光周波数コムによるビート信号を示す。

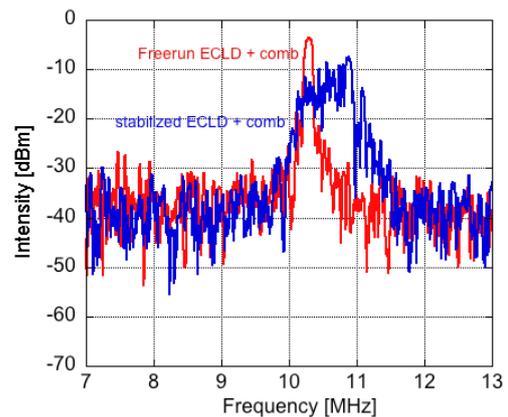


図 9 ECLD と光周波数コムのビート信号

図 9 のに置いて、赤色が無制御時の ECLD

とのビート信号、青色が狭線幅光源とのビート信号である。狭線幅光源の方が周波数線幅は狭いはずであるため、ビート信号はより狭窄化されると考えられたが、得られた信号は非常に太っていた。共振器長の安定度や誤差信号には問題がないと考えられるため、周波数雑音スペクトルでは評価することのできない狭線幅光源の絶対周波数が、電気的なモジュレーションなどの何らかの影響により揺らいでいると推測される。

2 まとめと展望

F.P. 光共振器を用いた発振線幅 1 Hz 以下 (周波数安定度 10^{-15} @1 sec) の超狭線幅光源を開発し、光周波数コムにその周波数安定度を移乗することで広帯域周波数基準の開発を目的とし実験を行った。

また、光源の変更に伴い、周波数安定化の制御が短時間しか持たず不安定であったため、低周波数帯域での利得がより高く得られるよう、周波数帯域 1 Hz で 40 dB であった利得を、最大で 95 dB 程度まで引き上げるような設計を行った。また、ECLD のゲインチップに直接帰還する経路を通るような回路による並列制御により制御帯域の向上を図った。ECLD の発振周波数制御のアクチュエータを増やし、長時間の安定制御を実現した。サーボの最大利得 95 dB 程度、制御帯域 200 kHz 程度であった。

広帯域周波数基準に関して、光周波数コムと狭線幅光源を位相同期させることで、光周波数コムの等間隔に並んだすべての縦モードに

狭線幅光源の周波数安定度を移乗し、広帯域な光周波数基準の開発を行うことを目的とした。 f_{ceo} のマイクロ波周波数基準を用いた位相同期は、光領域に換算した場合の周波数安定度が、 10^{-14} @1 sec 程度であった。そこで、 f_{ceo} の SNR を 20 dB から 30 dB に向上させることで、現状で 1.5×10^{-15} @1 sec 程度の周波数安定度を得られた。

しかし、光周波数コムと狭線幅光源とのビート信号取得を試みたところ、ビート信号が無制御時 ECLD と光周波数コムとのビート信号に対して周波数線幅が拡大してしまった。これは狭線幅光源への電気的なモジュレーションが原因であると考えているが、現在調査中である。

今後は、狭線幅光源に混入していると考えられるモジュレーションを抑え、光周波数コムと狭線幅光源とのビート信号狭窄化を行う。その後、 f_{rep} の周波数安定化を行うことで、 f_{rep} の周波数安定度 10^{-15} @1 sec を達成することで広帯域光周波数基準を完成する。また、この周波数基準の評価として、本研究室で用いられている 1 μ m ヨウ素安定化レーザーの周波数安定度評価を行う。

また、長距離伝送用位相補償光ファイバーによる遠方の機関への周波数基準分配システムの構築により、他機関との光源の周波数安定度の評価を行うことも可能となる。現段階では広帯域光周波数基準を本校レーザー棟内の各研究室へ高精度光伝送により分配するシステムを構築中である。