

ファブリー・ペロー光共振器を用いた広帯域周波数基準の開発

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、他の種々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、レーザーの周波数ゆらぎを抑えることで測定精度の向上が実現できる。しかし、それぞれの応用分野での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。

そこで本研究では、Er 添加ファイバーを用いた 1.5 μm 帯モードロックレーザーを周波数基準に位相同期を行うことで周波数安定化を行い、周波数軸上で等間隔に並んだ複数の縦モードである光周波数コム(光コム)による広帯域周波数基準の開発を目標とする。このとき周波数基準としてファブリー・ペロー(F.P.)光共振器を用いた実験系を用い、周波数線幅 1 Hz 以下(周波数安定度 10^{-15} @1 sec)を実現する。

2 原理

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。

$$f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep} \quad (1)$$

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容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い、図 1 に広帯域周波数基準の実験系を示す。

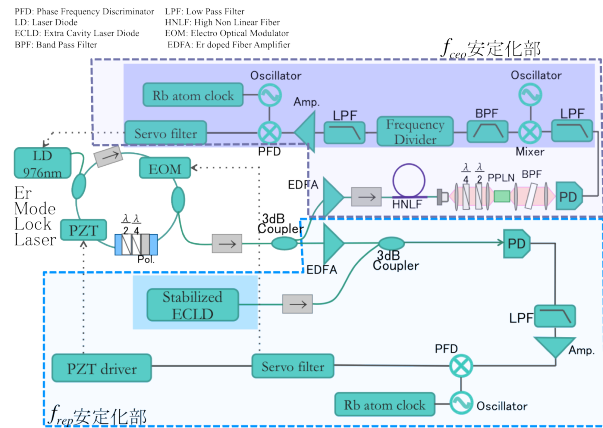


図 1 光周波数コムによる広帯域周波数基準

2.2 光周波数基準

外部共振器型半導体レーザー(ECLD)の発振周波数を Pound Drever Hall 法(PDH法)によって周波数を安定化し、光周波数基準として用いる。電気光学変調子(EOM)により位相変調を加え、レーザー光をキャリアとし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ー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 ECLD の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。

3 f_{ceo} の位相雑音圧縮

f_{ceo} は、図 1 の紫色点線枠で示した部分で安定化を行う。非線形光学効果を利用した $f - 2f$ 干渉計によって f_{ceo} を観測し、位相周波数弁別器(PFD:Phase Frequency Discriminator)を介してマイクロ波周波数基準との位相差情報を電圧情報に変換した後、サーボフィルタによってモードロックレーザーの励起用 LD へフィードバックを行う。

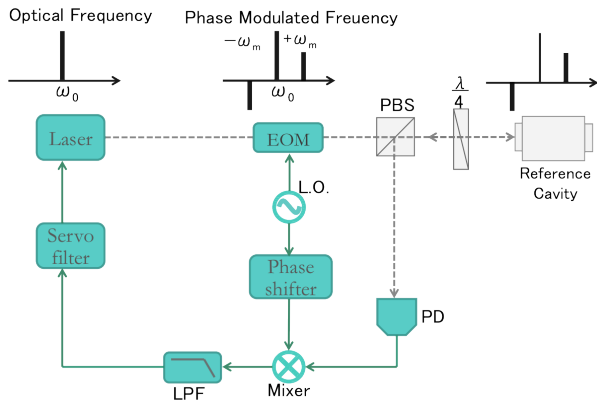


図2 Pound Drever Hall 法による周波数弁別概略図

しかし、この方法では PFD に入力される位相差信号が PFD によって検出可能な帯域 ($-\pi \text{ rad} < \phi < \pi \text{ rad}$) を超えていたため、出力電圧 ($-0.9 \text{ V} < V < 0.9 \text{ V}$) が飽和し、周波数引き込みは起こるのに対して f_{ceo} のスペクトルが狭窄化されない現象が生じた。このことから、分周という行程を挟み、PFD に入力される位相差を検出可能な範囲に圧縮して制御を行うことを試みた。分周とは周波数の割り算に相当し、 n 分周であれば周波数は $\frac{1}{n}$ になるため、周波数ゆらぎは $\frac{1}{n}$ になる。したがって、周波数ゆらぎの時間経過として表される位相雑音も $\frac{1}{n}$ になるので、PFD に入力される位相差は $\frac{1}{n}$ となることを利用した。

ここで、分周を用いた f_{ceo} の周波数安定化の流れを図 3 の概念図を用いて述べる。

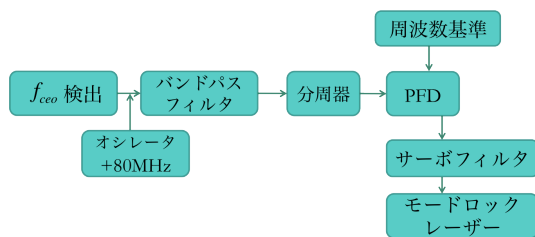
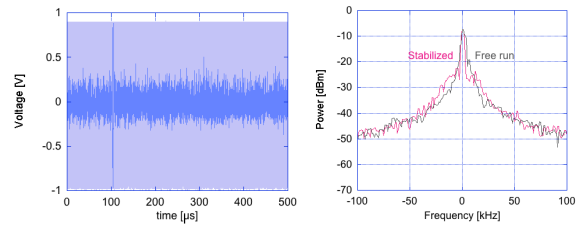


図3 分周を用いた f_{ceo} の周波数安定化

$f - 2f$ 干渉計によって検出された f_{ceo} に、オシレータからの 80 MHz の信号をミキサで加算し 100 MHz の信号を得る。これは、用いた分周器が 100 MHz 以上の周波数を持つ信号でないと分周ができないためである。その後、差周波や高調波などの必要ない周波数成分を、ローパスフィルタとハイパスフィルタによるバンドパスフィルタで切り落とし、100 MHz の信号のみを切り出す。その信号を分周器に入力し、今回は 8 分周した。また、On Semiconductor

社の MC12093 という素子を用いた分周器を使用した。

図 4 (i) は分周前後における PFD からの出力信号、図 4 (ii) は分周後に得られた f_{ceo} のペクトルである。



(i) PFD からの出力 (薄紫:0 分周, 青:8 分周) (ii) 8 分周後の f_{ceo} スペクトル (桃:制御時, 灰:無制御時)

図4 分周を用いた制御

図 4 (i) より、PFD に入力される信号を圧縮した事で出力される電圧信号を飽和させる事なくサーボフィルタに入力できている事がわかる。これにより、 f_{ceo} のスペクトルをサーボフィルタを用いた負帰還制御により狭窄化する事ができ、制御時の周波数線幅は 3 kHz 程度であった。しかし、広帯域周波数基準として用いるためには、 f_{ceo} のスペクトル線幅を 1 Hz 以下に抑える必要があるため、8 分周時の f_{ceo} スペクトル線幅は 125 mHz 以下まで狭窄化する必要があり、そのためにはサーボフィルタの最適化や、電圧源等の考え得る雑音源に対して雑音を抑制することが必要であると考えられる。

4 狭線幅光源の開発

図 5 に f_{rep} の周波数安定化に用いる周波数基準である狭線幅光源開発の実験系を示す。

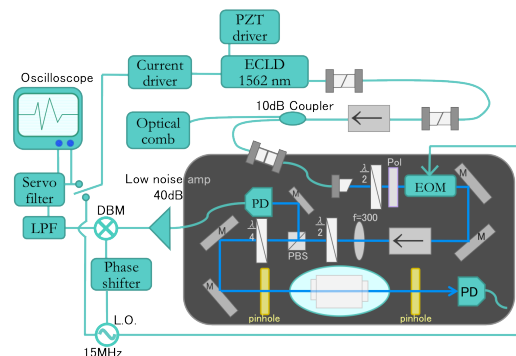


図5 狭線幅光源の実験系

周波数線幅の狭窄化を行うレーザーとして以前は発振波長 1550 nm の ECLD を用いていたが、今回

より周波数線幅が細い ECLD(発振波長 1562 nm, 周波数線幅 10 kHz 程度) に変更した。また、定盤の移動等に伴い、実験系の再アライメントを行う必要があったため、まず光学系のアライメントを行った。狭線幅光源の実験系に関して、最もアライメントが崩れやすいのは、真空チャンパー内に設置された F.P. 光共振器である。周波数基準として用いた F.P. 光共振器は、スパーサーに低熱膨張率かつ室温近傍において熱膨張率が 0 になる Ultra Low Expansion(ULE) ガラスを用いることで温度変化による共振器長の変化を抑制しており、また、バインドゴムとステンレス球を用い Airy Point で支持することで共振器長を変動させる要因となる縦振動を相殺させているが、軽微な振動で設置位置が変動しやすい。

この共振器の光軸中心にレーザー光を通すアライメントは、今までは真空チャンパーを開け、共振器の位置を動かすことで行っていたが、ベーキング作業が必要であるなど手間と時間がかかるため、真空チャンパーを開けずにアライメントを行うことを試みた。今回行ったアライメント方法は大きく分けて 2 種類であり、(1) 順方向からのガイド光とピンホールによる方法、(2) 逆方向からのガイド光とピンホールによる方法である。

(1) 順方向からのガイド光とピンホールによる方法概要図を図 6 に示す。

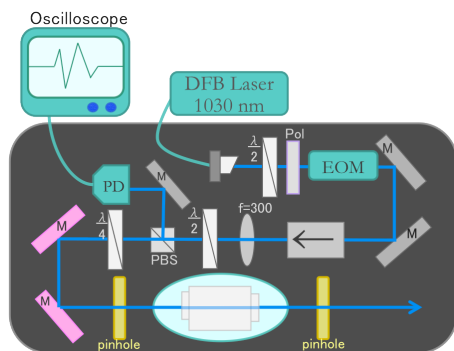


図 6 順方向アライメントの実験系概要図

F.P. 光共振器のレーザー光入射側のミラーをフロントミラー、出射側のミラーをリアミラーと呼ぶこととする。まず、共振器のリアミラー側から、チャンパー内の共振器の 2 つのミラーが同心円上に重なる位置をビデオカメラによって探し、2 つのミラーの中心と一致するように、共振器の前後にピンホールの中心を合わせて設置した。ビデオカメラを用いたピンホール設置概要図を図 7 図 8 に示す。図 8 の左上図が実際にビデオカメラによって撮影した 2 枚のミ

ラーである。

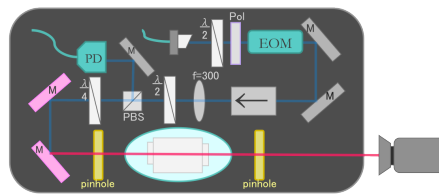


図 7 上から見たビデオカメラを用いたピンホール設置の概要図

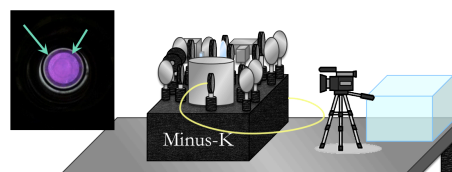


図 8 横から見たビデオカメラを用いたピンホール設置の概要図

次に、図 6 のようにガイド光を出射し、2 つのピンホールの中心を通るよう桃色で示した 2 枚のミラーを調整することでおよそのアライメントを行った。また、ガイド光には共振器のミラーを透過するような波長帯の光を用いる必要があるため、波長 1030 nm の DFB レーザーを用いた。その後、ガイド光から ECLD に切り替え、フロントミラーからの反射光を PD で検出し、オシロスコープでモニタしながら反射光のパワーが最大になるようアライメントを試みることを考えた。

しかし、この方法では、ファイバからレーザー光を空間に出射する際、ファイバの出射端面に 8° の傾斜がついているため、レーザー光の出射角度に波長依存性が生じ、レーザーを DFB レーザーから ECLD に変更した場合、光の出射角度が一致しないことで光路が一致せず、共振器のフロントミラーからの反射光を確認することができなかった。そのため、順方向からガイド光を入れる方法では適切なアライメントはできないといえる。

そこで、次は共振器のリアミラー側から光を入射する方法について検討を行った。

(2) 逆方向からのガイド光とピンホールによる方法系の概要図を 9 に示す。

ピンホールの位置を決定した後、共振器のリアミラーから DFB レーザーを入射させ、ピンホール及び共振器のミラー中心を通るよう、橙色で示したミラー 2 枚によってアライメントを行った。その後、桃色で

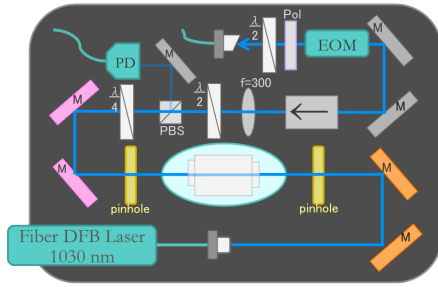


図 9 逆方向アライメントの実験系概要図

示したミラー 2 枚によって ECLD を空間に出射する位置まで青線で示した光軸に合わせた後、ECLD から光を出射し、フロントミラーからの反射光を PD で検出し、オシロスコープでモニタしながら反射光のパワーが最大になるようアライメントを行った。この方法によれば、真空チャンパー内の F.P. 共振器へのチャンパー外部からのレーザー光カップリングを行うことができるといえる。PD によって取得した反射光は図 10 に示す。

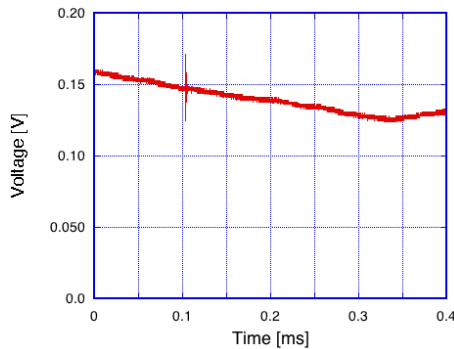
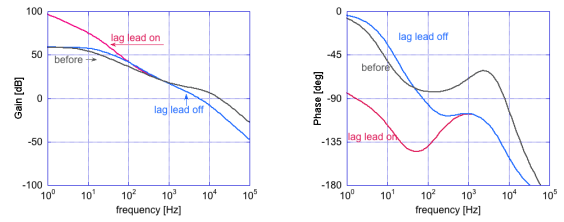


図 10 共振器からの反射光の検出

図 10 より反射光の DC オフセット及び、共振に伴うディップが観測できる。共振していない状態の強度が DC オフセットとして検出できるのに対し、共振した光はフロントミラーより直接反射してくる光とは位相の反転した光として出力されるため、このようにディップとして観測される。共振器へのカップリング効率は DC オフセットに対するディップの強度の高さに相当するため、このときのカップリング効率は 18 %程度であったといえる。この信号を用いて ECLD の周波数安定化制御を試みたが、10 数秒程度で制御が外れてしまった。信号の SNR は以前得られていたものと同程度であったため、サーボフィルタの最適化により長時間の制御が可能になると考えた。

図 11 に改良前後のサーボフィルタの位相及び利得

周波数特性を示す。



(i) サーボ利得周波数特性 (ii) サーボ位相周波数特性

図 11 改良前後のサーボフィルタ周波数特性

共振器のキャビティポール及び電流源のローパスフィルタのカットオフ周波数が 10 kHz 程度であることをふまえ、周波数帯域は 6 kHz 程度とした。サーボフィルタへのスイッチ付きラグリード回路導入に伴い、周波数帯域 1Hz における利得が 60 dB から最大で 95 dB まで向上した。またラグリード回路のスイッチを切った場合に得られる利得は 60 dB 程度である。

作成したサーボフィルタを用いて制御を試みる予定であったが、地震により実験系のアライメントが崩れたため、現在再アライメントを行っている。

5 まとめと展望

分周器を用いた制御で f_{ceo} の位相雑音を $\frac{1}{8}$ に圧縮し、Rb 原子時計との位相同期を行うことで周波数安定化を行った。このとき分周後の f_{ceo} のスペクトル線幅は 3kHz 程度であった。

f_{rep} の周波数安定化のための光周波数基準である F.P. 光共振器を用いた実験系の光源部を取り替え、定盤移動等に伴うアライメントを行った。また、光源変更に伴うサーボフィルタの最適化として、周波数帯域 6 kHz、1 Hz における最大利得 95 dB のサーボフィルタを作成した。

今後は f_{ceo} の制御のためのサーボフィルタの最適化により、 f_{ceo} のスペクトル線幅狭窄化を行う。また、狭線幅光源の地震に伴う再アライメントを行い、最適化したサーボフィルタを用いて長時間安定した制御を行う。

広帯域な光周波数基準の開発により、周波数が異なる光源同士での周波数安定度評価やレーザーの絶対周波数の精密測定を行うことが可能になる。また、開発した光周波数基準の光ファイバーによる長距離精密伝送システムが確立されれば、遠方の機関への周波数基準分配も可能となる。