1. 序論

現在、レーザーは加工や通信など様々な 分野で利用されている。その中でも周波数 安定度の高いレーザーは絶対周波数の測 定やレーザーの評価などに用いられる。し かし、通常の周波数安定化レーザーは単一 周波数であるため、広い範囲にわたって光 の周波数安定度の高いレーザー が必要とされる。そこで、1 台で広い範囲 にわたって光の周波数測定を行うことが できる装置として光周波数コムがある。

2. 光周波数コム

光周波数コムとは光領域において周波 数軸上に等間隔の縦モードがコヒーレン トに並んだ光である(図 1)。光周波数コム のn番目の縦モード周波数fnは、オフセッ ト周波数fceoと繰り返し周波数frepを用いて 次のように表される。

 $f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep}$ 現在では、光の物差しとして精密測距、周波数測定など様々な精密計測に応用されている。



図 1. 光周波数コムの概念図

光周波数コムはモード同期レーザーの 周波数を安定化することによって作製で きる。モード同期レーザーからの出力は、 周波数軸上に等間隔の縦モードが並んで いるとは言え、オフセット周波数や繰り返 し周波数が揺らいでしまう。これらを基準 であるマイクロ波などに同期できるよう に制御し安定化することにより光周波数

コムとなり、光の0.物差しとしての真価を 発揮する。具体的には、fcenはモード同期レ ーザーの励起用 LD の電流、 f_{rep} はモード同 期レーザーの共振器長を制御することで 安定化できる。ここで光周波数コムの周波 数安定度をさらに上げるには、位相を広帯 域にロックするための高速の制御が必要 である。その高速制御を実現する手段とし て、電気光学素子(EOM)とドラム型 PZT を併用させる方法を武者研究室では用い てきた。EOM は高速制御、ドラム型 PZT はダイナミックレンジ拡大を担っている。 しかし、EOM はモード同期レーザーを構 成する共振器内に取り付けなければなら ないため、共振器内に損失を与えてしまう ことや高次の分散の影響が大きいことと いった欠点がある。そこで、本研究ではド ラム型 PZT より機械共振周波数が高く、 共振器に後付け可能というメリットを持 つ小型の圧電素子(PZT)を用いることで、 高速で繰り返し周波数を制御することの できる光周波数コムの開発を目指した。こ れに加え、ファイバーに銅板を介して能動 的な温度調節を行うことにより、長期安定 性を向上させることも目指した。

3. モード同期レーザーの作製

まず非線形偏波回転を用いた 1.5µm 帯 のモードロックレーザーの作製を行った。 モードフィールド径が 6.5µm、1530nm で の吸収が 30.0 dB/m のエルビウム添加フ ァイバー(EDF: ER30-4/125 (LIEKKI))を 用いてリング型共振器を構築し、そのほと んどをファイバーで構成することで長期 安定動作が可能なモードロックレーザー を作製した(図 2)。



図 2. モード同期レーザーの実験系 共振器長は約 3.3m であり、モードロッ クレーザーからの平均出力は、励起用 LD の電流値が 800mA のとき 7.7mW であり、 繰り返し周波数は約 60MHz であった。こ のときの発振スペクトルは図 3 のようにな った。



図 3. モード同期レーザーのスペクトル

4. *f_{rep}*制御

4.1. 小型 PZT の性能評価

今回用いた PZT はサイズが 2.0 mm × 2.0 mm × 2.0 mm で、機械共振が 560kHz であった。この PZT にファイバーを取り付ける際、電流を流した時の PZT の変動にファイバーの長さの変動が追従するか、 PZT 付近のファイバーが揺れることによる寄生共振が生じていないかを考慮する 必要がある。前者は PZT とファイバーを 接着する接着剤の種類、後者は PZT に取り付けた部分の近くのファイバーを固定 する方法によると考えられた。そのため、 一辺に PZT を取り付けたマッハツェンダ 一干渉計を構築し、PZT に電流を周波数走 引した際のファイバーの長さの変動をへ





図 4. 小型 PZT の性能評価の実験系 その結果、接着剤にはエポキシ、ファイバ ーの固定方法にはシリコンゴムを用いた 場合が最も寄生共振が少なく、機械共振が 約 20kHz となった(図 5)。



4.2. 小型 PZT を用いた frep 制御

前節の結果より、小型の PZT をエポキ シで共振器に接着し、PZT 付近のファイバ ーをシリコンゴムで固定した状態で *f*_{rep} 制 御を行った(図 6)。



図 6. f_{rep} 制御(小型 PZT)の実験系 このとき、 f_{rep} は $10 \times f_{rep}$ に近い値である 610MHz に同期させた。これは高次の f_{rep}

に同期することにより、PZT での位相感度 が10倍になるためである。*frep*を制御した 結果、オープンループ特性は図7、位相雑 音スペクトルは図8のようになった。図7,8 より、この時の制御帯域は約1.2kHz であ ったことが分かる。



図 7. オープンループ特性



図 8. 位相雑音スペクトル

また、図7の結果から制御回路の特性を引いた f_{rep} 制御器としての伝達特性は図9のようになった。これより、 f_{rep} 制御器は1次の積分特性を持ち、機械共振が20MHzであることがわかった。



図7より、雑音の多いオープンループ特性

になっている上、制御帯域が低いことから、 今回作製した制御回路では利得が足りて いないことがわかった。このことから、よ り高次の*frep*である CW レーザーとコムの ビートを安定化することで、制御帯域を拡 大しようと考えた。この方法で*frep*を制御 した結果、オープンループ特性は図 10 の ようになった。



図 10. オープンループ特性(CW) 図 7,10 より、マイクロ波に同期していた 時と比較して、CW レーザーとコムのビー トを安定化した時の方が綺麗に特性を測 れている。しかし、短時間であっても安定 動作ができなかった上、制御回路の特性を 変化させても低域の特性の変化が少なか ったので、今後は低域の特性を変化させら れる機構を追加する必要がある。

4.3. 銅板を介した温度制御の特性

前節で述べたように、制御を行った際、 小型 PZT だけではダイナミックレンジが 小さいのですぐにマイクロ波との同期が 外れてしまう。それを防ぐために、PZT へ の制御信号が0になるように、ペルチェを 接着した銅板を介してファイバーに温度 調節を行うことを考えた(図 11)。



まず、温度での制御が可能であるかを確認するために、無制御時の f_{rep} の変動(図 12) と、銅板と接着させたペルチェに流す電流 をステップ状に変化させた時の f_{rep} の変動 (図 13)を測定した。



図 13. 電流を変化させた際の f_{rep} の変動 それぞれの場合での周波数変動は、図 12 より無制御時は 0.0852Hz/s、図 13 よりペ ルチェに流す電流を変化させた際は 1.02Hz/s となった。ペルチェに流す電流を 変化させた時の方が無制御時を1桁以上上 回る周波数変動を示したことから、温度に より、PZT への制御信号がダイナミックレ ンジに達する前に f_{rep} の変動を制御するこ とが可能であることが確認できた。

5. まとめ

高速制御可能な光周波数コムを開発す るために、まず非線形偏波回転を用いた 1.5µm 帯のモードロックレーザーの作製 を行った。このとき共振器長は約 3.3m で あり、モードロックレーザーからの平均出 力は励起用 LD の電流値が 800mA のとき 7.7mW であり、繰り返し周波数は約 60MHz であった。 次に、小型 PZT の性能評価を行い、フ アイバーと PZT を接着する接着剤にはエ ポキシ、ファイバーの固定方法にはシリコ ンゴムを用いた場合が最も寄生共振が少 ない上、機械共振が約 20kHz となってい ることが分かった。この接着剤及び固定法 を用いて共振器に PZT を固定し、*frep* を高 次の *frep*に同期することにより、*frep*の安定 化を行った。しかし、短時間であっても安 定動作ができなかったので、今後改良が必 要である。

また、長期安定動作をさせる手段として、 銅板を介してのファイバーの温度調節が 可能であることが確認できた。

6. 展望

 f_{rep} の低域での変動を制御する機構を追加し、 f_{rep} の制御回路の最適化を行う。また、 小型 PZT と温度調節の併用による f_{rep} の安定化を行う。