

EOM を用いたファイバ光コムの制御帯域拡大

武者研究室 松丸直也

1. 序論

光の速度は 2999792458 m/s として定義されている。従って光の周波数帯域において時間の逆数である周波数の絶対値測定が可能となることで、長さ標準、時間標準、その他様々な応用が可能である。しかし光周波数は数百 THz と非常に高く、直接計測は大変困難であった。John L. Hall 博士らが実証した光周波数コムにより光周波数の測定が容易となった。

光周波数コムとは縦モードが櫛(comb)のように並んだ光である。繰り返し周波数を f_{rep} 、仮想的に縦モードを 0 まで拡大していったときに 0 と交わらない周波数を f_{ceo} とする。この時、0 から数えて n 番目の周波数を f_n とすると、 f_n は、

$$f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep}$$

と表現できる。光周波数である f_n はマイクロ波である f_{ceo} と f_{rep} で決定できる。光周波数コムを周波数測定に用いる場合、 f_n と未知の周波数 f_L のレーザとの差周波を測定する事により、未知の周波数 f_L を決定する。

この時、 f_{ceo} と f_{rep} をいかにマイクロは基準に同期するかが測定精度を高めることにつながるため、制御が重要になってくる。また、光周波数コムにはいくつかの応用方法があり、その一つに周波数安定度の移乗がある。ある基準となるレーザに光コムを位相同期すると、光周波数コムの全ての縦モードに周波数安定度が移乗される。そして光周波数コムのある縦モードを用い、別の

レーザに周波数安定度を移乗できる。これにより、基準となるレーザの周波数安定度を光周波数コムを介することで別のレーザに移乗できる。周波数安定度の移乗の場合もいかに周波数安定度を移乗するかが安定化するレーザの周波数安定度を決めるため、制御が重要になってくる。どちらの応用例でも制御が重要であり、高制御利得と高制御帯域が求められる。そこで我々の研究では EOM と PZT を併用することにより、制御帯域の拡大と高制御利得を目指した。

2. 原理

2.1. 非線形偏波回転を用いたモード同期

光周波数コムは縦モードが等間隔に並んだ光であり、モード同期レーザによって実現できる。モード同期発振とは強度依存の損失を与えることによって起こすことができる。共振器内で弱い強度の光に対して損失を与え、強い強度のみを選択的に共振させることでモード同期発振を起こす。我々の開発した光周波数コムはリング型の共振器で、ファイバとインラインの光学素子で構成されている。ファイバ中をパルスが伝搬するとき、伝搬する光は非線形効果により自己位相変調(Self Phase Modulation)と相互位相変調(Cross Phase Modulation)を受け、非線形屈折率が変化する。これによりパルスに位相変化が生じ偏光が変化し非線形偏波回転(Nonlinear Polarization Rotation)を起こすことにより偏光の回転

に強度の依存性ができる。従って、共振器内に特定の偏光のみを選択することで、ある偏光の回転をする光、つまりある強度の光のみを共振させ、他の強度の光には損失を与えることになる。これが擬似的な過飽和吸収体として働き、モード同期発振をさせる。本研究では特定の偏光のみを切り出すための2つの偏光板と偏光状態を操作するための $\lambda/4$ 波長板、 $\lambda/2$ 波長板を挿入することで、特定の偏光のみを共振させることが可能となる。

2.2. f_{rep} の制御

繰り返し周波数 f_{rep} は、

$$f_{rep} = \frac{c}{nL}$$

で決定する。つまり共振器の物理長 L もしくは、屈折率 n を制御することにより、共振器の光学長を制御することにより f_{rep} を制御することができる。

3. 実験

3.1. モード同期発振

光周波数コムモード同期部を図1に示す。ファイバとインラインの光学素子で構成されており、利得媒質には中心波長1550nmのLiekki社製のEr添加ファイバ(ER30-4/125)を用い励起光源として、古河電工製のファイバブラッググレーティング(FBG: Fiber Bragg Grating)付きの中心波長975nmのファイバカップル型のLDを用いる。

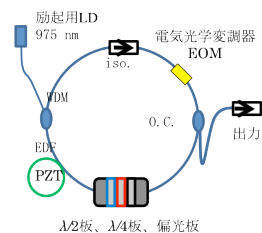


図1 モード同期部

共振器内にオプトクエスト社製のインラインモジュールを挿入した。このインラインモジュールは偏光板、 $\lambda/4$ 波長板、 $\lambda/2$ 波長板が1つとなっており、それぞれを回転させることで偏光状態を選択することができる。またアイソレーターには偏波依存型アイソレーター(Polarization Sensitive isolator)を用いた。偏光板と波長版を調整することでモード同期発振させたときのスペクトルと時間波形を図2,3に示す。繰り返し周波数は40.9 MHzとなった。

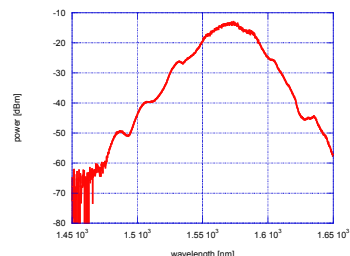


図2 モード同期発振時のスペクトル

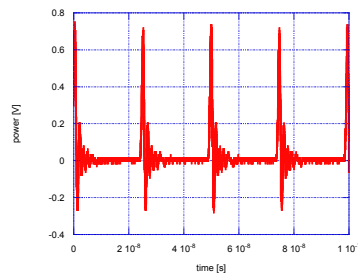


図3 モード同期発振時の時間波形

3.2. PZT による f_{rep} の制御

f_{rep} 制御のために図 4 のような実験系を組んだ。PhotoDiode により f_{rep} を検出、位相周波数弁別器(PFD)により、Rb 原子時計に同期されたシンセサイザの信号との差周波を検出し PZT を制御することで位相同期を行う。PZT には EDF が巻き付けられており、PZT に電圧をかけることによって共振器の物理長を制御し、 f_{rep} を制御する。

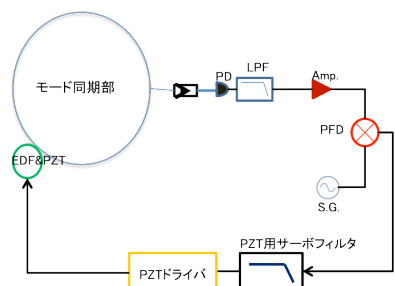


図 4 PZT のみでの f_{rep} 制御実験系概要

制御したときの周波数ゆらぎと長期安定度を示すアラン分散を図 5,6 に示す。無制御時は約 2 時間で 330 Hz の周波数ゆらぎがあったのに対し PZT により 2 時間以上の制御を行なったときの周波数ゆらぎは 3 mHz 程度であった。またアラン分散は平均時間 1000 秒で 10^{-13} 程度の安定度を得ることができた。さらに位相雑音スペクトルを図 7 に示す。制御帯域は 700Hz 程度となった。

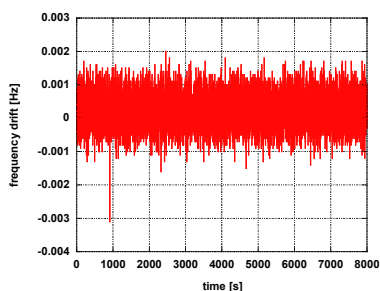


図 5 制御時の周波数ゆらぎ

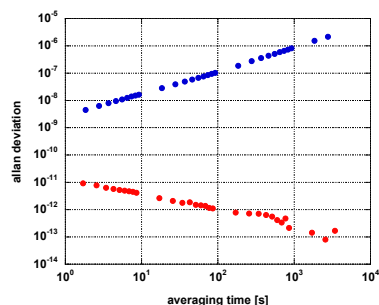


図 6 アラン分散

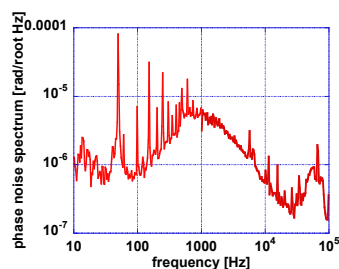


図 7 位相雑音スペクトル

3.3. EOM 併用による f_{rep} の制御

PZT のみで f_{rep} を制御した場合、制御帯域は PZT の機械共振 (数 kHz) で制限されてしまう。従って我々の研究では EOM を併用することにより、制御帯域の拡大を行った。

3.3.1. EOM の伝特性の測定

PZT を制御した上で EOM に電圧変調を加え、EOM の伝達特性を測定した。EOM の伝達特性は図 8 のようになっており、積分形となっている。この伝達特性をもとに EOM の等価回路の設計と制御回路の再設計を行った。

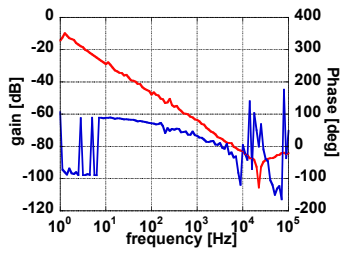


図 8 EOM の伝達関数

3.3.2. EOM 併用による制御帯域拡大

EOM 制御用の回路を設計し、図 9 のような実験系を組んだ。PZT のときと同様に Rb 原子時計と同期されたシンセサイザから発振された信号と位相同期を PZT、EOM を併用することにより行った。

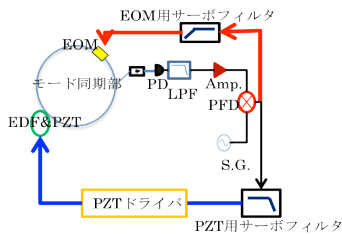


図 9 EOM 併用での f_{rep} 制御の実験系概要

EOM を併用し位相同期した際の位相雑音スペクトルとオープンループ伝達関数を図 10,11 に示す。また比較のため、PZT のみで位相同期した際の位相雑音スペクトルとオープンループ伝達関数も載せる。赤は PZT のみで制御した場合、青は EOM を併用した場合である。またオープンループ伝達関数の実線は利得、破線は位相を表している。

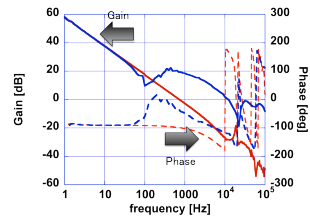


図 10 オープンループ伝達関数

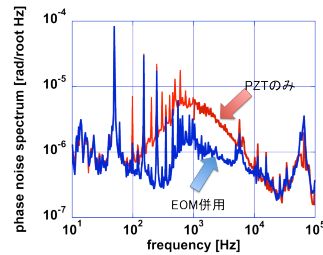


図 11 位相雑音スペクトル

オープンループ伝達関数を見ると EOM を用いることで制御帯域を 12 kHz まで拡大した。また位相雑音スペクトルも低減することに成功した。しかし PZT のみの場合、EOM を併用した場合ともに 20~100 kHz に雑音がある。今後更なる制御帯域の拡大を行う場合、この雑音を消す必要が出てくる。また 50 Hz の整数倍にある雑音はグラウンドラインの雑音であり、これも改善する必要が出てくる。

4. まとめ

EOM を用いることで PZT の機械共振によって制限されていた制御帯域を 12 kHz まで拡大した。これは PZT の機械共振である数 kHz よりも広く、PZT によって制限される制御帯域よりも広がっている。今後 1 MHz 程度まで制御帯域を広帯域化するために回路の最適化や電気周りの雑音を低減する必要がある。