

イッテルビウム添加ファイバーを挿入した モード同期 Er ファイバーレーザーの製作と評価

日大生産工 (学部) ○水原 啓介 小原 健太郎
日大生産工 石澤 淳 野邑 寿仁亜

1. 背景

光周波数コムとは周波数軸上に等間隔に並んだモードからできる楕型のスペクトルをもつ光信号であり、高精度な周波数計測などに使われている。モード同期レーザーを制御するには重要なパラメーターが繰り返し周波数 (f_{rep}) とオフセット周波数 (f_{CEO}) の二つある。一般的に、 f_{CEO} はレーザー共振器内に組み込まれたエルビウム添加光ファイバー(EDF)の励起光パワーを変化させることで制御される。一方で、 f_{rep} はモード同期レーザーの共振器長を変化させることで制御される。従来はピエゾアクチュエータ(PZT) や電気光学変調器 (EOM) が利用されてきた。EOMは結晶屈折率を、PZTは機械的な長さを電圧印加により制御する素子である。PZTはダイナミックレンジが大きい一方で制御帯域が狭く、環境耐性が低い。EOMは制御帯域が広い一方で、ダイナミックレンジが小さく、さらに高価かつ装置系が大型化する。そのため、EOMやPZTに代わる新たな f_{rep} の制御方法の開発が重要な研究課題である。

近年、レーザー共振器内にイッテルビウム添加光ファイバー (YDF) を挿入し、励起パワーを可変することによって f_{rep} を制御する方式が報告されている[1, 2]。先行研究 [1] では、非線形偏波回転を用いたモード同期レーザーの f_{rep} と f_{CEO} の制御の独立性が示され、[2]では同様の機構に対してさらに f_{rep} と f_{CEO} を制御することで実際に全光制御型の光周波数コムが実現された。

一方で、YDFを用いた f_{rep} の制御について、制御帯域やダイナミックレンジについては十分な知見が得られていない。さらに、YDFの励起条件を変化させると共振器分散の変動によりモード同期機構が変化する現象[2]も報告され、物理的なダイナミクスにも議論の余地が残っている。我々は先行研究と違い、非相反位相シフター(NPS)と偏波保持ファイバー(PMF)を用いることにより環境耐性がより高い全光制御型の光コムを製作し、全光制御技術に関する上記の課題を解決することを目指している。そこ

で今回、私たちはYDFを挿入したFigure-9型モード同期レーザーを製作し、 f_{rep} の測定・評価を実施した。

2. モード同期レーザーの設計・製作

製作したモード同期レーザーの装置図を図1に示す。今回我々は、非相反位相シフター(NPS)を用いた偏波保持ファイバー(PMF)で構成されるFigure-9型のモード同期レーザーを作成し、さらにYDFを挿入した。レーザーの共振器長はPMFとEDF(Er80-4/125-HD-PM)、分散補償ファイバー(DCF, TTN171092-S01)、波長分割多重(WDM)カプラー、50:50カプラー、低群遅延分散ミラー(UM05-45C)で構成されている。レーザー利得媒質であるEDFは波長1480 nm励起レーザーダイオード(LD, AF4B150FA75L)の光で励起される。一方で、YDFは波長980 nmLD(D1507103)で励起されている。モード同期レーザーの出力ポートに50:50カプラーと99:1カプラーを取り付けている。モード同期はNPSを構成する $\lambda/2$ 板の回転量を調整しながらファイバーを振動させることによって発生する。モード同期レーザーのパラメーターを表1に示す。表1のパラメーターはまず f_{rep} の値を50 MHzに定め、そこから共振器分散ができるだけ0に近づくように各ファイバーの長さを決めた。なおレーザー発振のために、利得媒質であるEDFは典型的に50 cm以上必要なことが多い。現在は調整用のPMFを入れているため、共振器分散が大きく負の値になり、 f_{rep} が38.23 MHzとなっており、共振器パラメーターは最適化の最中である。現在、典型的な繰り返し周波数が38.23 MHzであるソリトンパルスが得られている。これは、設計パラメーターから推測される特性と一致している。

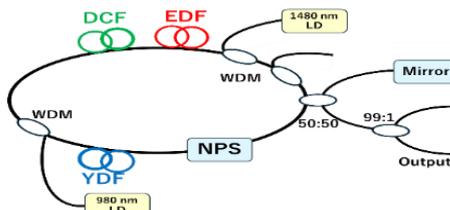


図1.モード同期レーザーの構成

Development and evaluation of mode-locked Er fiber laser with Yb doped fiber

Keisuke MIZUHARA, Kentarou KOHARA, Atsushi ISHIZAWA and Junia NOMURA

表1..共振器のパラメーター

| PMF(m) | DCF(m) | EDF(m) | YDF(m) | 共振器分散(ps ²) | Frep(MHz) |
|--------|--------|--------|--------|-------------------------|-----------|
| 3.90 | 0.39 | 0.63 | 0.12 | -26.9 | 38.23 |

3. 繰り返し周波数 f_{rep} の制御実験

作成したモード同期レーザーの繰り返し周波数 f_{rep} を計測および制御する実験装置図を図2に示す。出力ポートの99:1カプラーの片側に光検出器(PD, DET01CFC/M)を接続し、 f_{rep} を検出する。50Ω抵抗端を取り付けてインピーダンス整合させ、RF増幅器(ZFL-1000LN+)×2および(ZKL-1R5+)で信号パワーを増幅させつつ、ローパスフィルター(LPF:SLP-90)やバンドパスフィルター(BPF:SIF-40+)×2,(BPF:BBP-21.4+)×2を併用することで、 f_{rep} の高調波信号を除去する。最終的に f_{rep} のRF信号をSNRが0 dBmになるまで増幅したのち、周波数カウンターで検出する。ファンクションジェネレーター(FG:MokuGO)を電流コントローラー(LDC:220AC)に接続し、三角波の電圧信号を印加することで980 nm励起LDの駆動電流値と励起光パワーを変化させ、その際の f_{rep} の変動量を測定する。

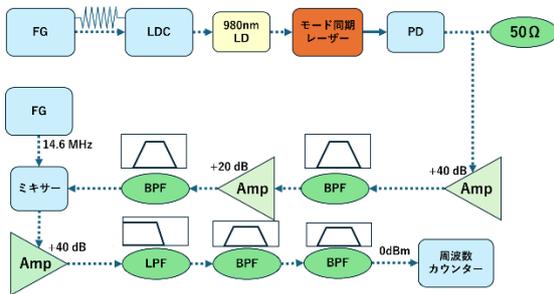


図2.実験装置図

(FG:ファンクションジェネレーター,LDC:電流コントローラー,PD:光検出器,Amp:RF増幅器,BPF:バンドパスフィルター,LPF:ローパスフィルター)

4. 実験結果および検討

電圧波形の周期が200 mHz、980 nmLDの出力が200 mWの時の測定結果を図3に示す。青線が980 nm励起LDの出力パワーを示し、橙線が f_{rep} の平均値からの変化量を示している。 f_{rep} は励起光パワーの変調振動波形に対して符号が反転して同期する様子が確認された。この現象は、変調周期が100 mHz~800 mHzの範囲で確認された。変調1周期(200 mHz)に対して平均的な f_{rep} の変動量は15 Hzであった。これは、YDFの屈

折率が 5.7×10^{-6} だけ変化したことに相当する。従来のPZTの典型的な収縮量が20 μm であることを踏まえると、現在の実験系における f_{rep} 制御のダイナミックレンジは、これに対して11 dB程度である。

一方で、この図からは f_{rep} の重心変動が非常に大きい様子も見て取れる。これは、レーザー共振器全体が安定な環境下に設置されておらず、大気擾乱や環境温度の変動により意図せず共振器長が変化して f_{rep} が変動しているためであると推測される。

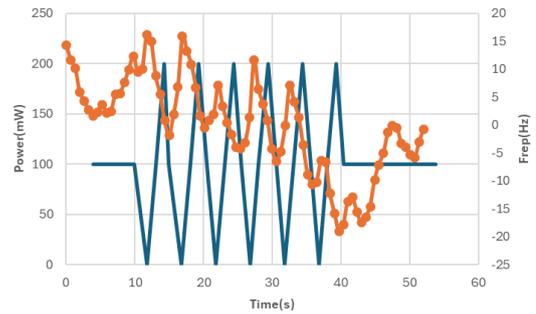


図3. f_{rep} の測定結果 (200 mHz,200 mW)

5. まとめ

今回の実験では、YDFを挿入したソリトンErモード同期レーザー($f_{rep}=38.23$ MHz)を製作した。さらに、モード同期レーザーの共振器内のYDFの励起パワーを100 mHz~800 mHzの範囲で変調することでそれに追従する形で f_{rep} が変化する様子を確認した。変動量は約15 Hzであり、これは従来のPZTを用いた制御と比較して約15%の変化量である。

現在我々は、より正確な f_{rep} の制御特性の解析に向け、2つの施策を実施している。まず、レーザー共振器を箱に詰め、ペルチェ素子で温度を安定化させ、より安定な環境下で f_{rep} の測定を実施する。そして、高速サンプリング可能な周波数カウンターを用いて、より高い変調周波数での測定を実現する。これにより、従来の研究で示されていないYDFによる f_{rep} 制御の特性を明らかにすることを目指す。結果を当日詳細報告する。

参考文献

- [1] T. Hellwig, et Al, Optics Letters. 39, 525, (2014).
- [2] S. Okubo, et Al, Applied Phy Express 8, 122701 (2015).
- [3] 朝比奈 優, 横浜国立大学修士論文, (2018).