

タイムストレッチ分光法による全正常分散モード同期 Yb ファイバ発振器の過度特性の観測

Observation of Excessive Characteristics of All-Normal Dispersion Mode-Locked Yb Fiber Oscillators by Time-Stretch Spectroscopy

吉澤 夢来 (B4), 石川 智啓 (D2)

Muku Yoshizawa, Tomohiro Ishikawa

Abstract

We investigated a gain-dependent transitional behaviour in build-up and turn-off processes of an ANDi mode-locked Yb fiber oscillator using a time-stretch dispersive Fourier transform scheme.

1. はじめに

超高速モード同期ファイバレーザは、小型化、信頼性、メンテナンスの容易さなど様々な利点があるため、広く利用されている。しかしながら、環境の変化によって突然不安定な発振モードに移行することは、応用において重大な問題となり得る。カオス的な発振をする不安定なモードは、次の増幅器段や光と物質の相互作用に大きな影響を与える。このため、様々な発振パラメータ（利得、損失、分散、非線形性）に対する過渡モード同期レーザの挙動をパラメトリックに研究し、理解を深める必要がある。最近では、時間伸張分散フーリエ変換(DFT)法[1]がモード同期ファイバレーザ発振器のソリトン現象の観測に積極的に適用されており、ソリトン爆発、ソリトン分子、ブリージングソリトンなど、いくつかのユニークな挙動が明らかにされている。また、多くのモード同期技術の立ち上がり過程についても研究している。パラメトリックな研究では、Y. Cuiらがキャビティ内の分散に依存した立ち上がり立ち下がり過程の異なる挙動を明らかにした[2]。しかし、利得の依存性についてはまだ報告されていない。

最近、主流になりつつあるファイバレーザ発振器は総分散量が正の条件になる、ANDi モード同期手

法である。そのため、この違いによる発振の立ち上がり・立ち下がりへの影響を明らかにすることは重要であると考えられる。また、温度変化で不安定化させる研究はなく、工学的な視点での新たな提案につながると考えられる。そのため、これらのデータを取得・整理し、そのメカニズムを検討していく。

本研究では、全常態分散(ANDi)モードロック型 Yb ファイバ発振器の過渡的なレーザ発振過程の実験結果を紹介する。本研究では、ポンプパワーを調整することにより、高低利得条件での DFT 法を用いて、モード同期の立ち上がりおよび立ち下がり過程の過渡的スペクトルを計測することを目的とする。

2. Yb ドープファイバ発振器

計測対象とする Yb ドープファイバレーザ発振器に関して説明する。Fig. 1 に本実験で使用する Yb ドープファイバレーザ発振器の構成を示す。非線形偏波回転とバンドパスフィルタを利用した全正常分散モード同期 Yb ドープファイバレーザ発振器であり、励起光には 976nm で発振するレーザダイオードを用いている。レーザダイオードの出力光を波長分割多重カプラ (Wavelength division multiplexer: WDM)により利得媒質である Yb ドープファイバに入射することで励起している。Yb ドープファイバにおいて増幅されたパルス光は、1/4 波長板(Quarter wave plate: QWP)と 1/2 波長板(Half wave plate)によって通過する偏光を制御し、偏光ビームスプリッター(Polarizing beam splitter: PBS)によって直線偏光成

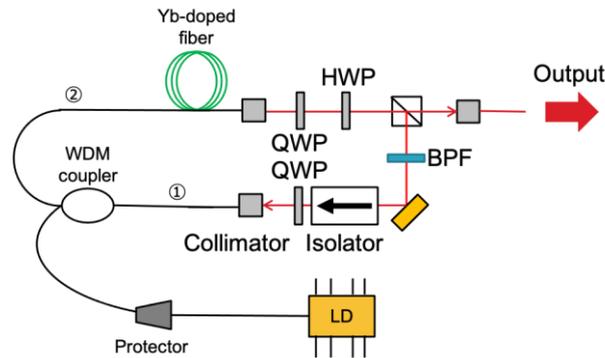


Fig. 1. Yb fiber laser system.

分を選択して、再び共振器に戻される。直交偏光成分は出力として取り出す。また、アイソレータにより発振光は Fig. 1 中の反時計回りに制限される。全正常分散モード同期を用いているため分散補償は行わず、PBS の後ろにバンドパスフィルターを配置している。ガウス型の透過特性を持ち、FWHM は 5 nm 程度である。Fig. 1 中の①、②ともにファイバ長さは、60 cm とした。

3. 実験系と結果

実験セットアップを Fig. 2 に示す。レーザ発振器は従来の ANDi モードロック発振器であり、100MHz の繰り返し周波数で最大出力 48mW のパルスを発生させた。広い利得のパラメータ範囲を得るために、2 つのレーザダイオードからのポンプレーザ光を偏光ビームスプリッタで結合し、波長分割マルチプレクサで共振器に結合した。PBS の後ろのチョッパーでポンプの ON/OFF を切り替えた。発振器出力の 99% は DFT システムに送られ、1% はパルス列と平均化されたスペクトルの測定に使用された。DFT のためのタイムストレッチは、チャープファイバブラッググレーティング (CFBG) と 1km のシングルモードファイバ (SMF) の組み合わせで行った。全分散は -103ps/nm と計算した。高速オシロスコープ (20GSA/s) を用いて、5MHz の帯域幅でフォトダイオード (PD) 信号を測定した。

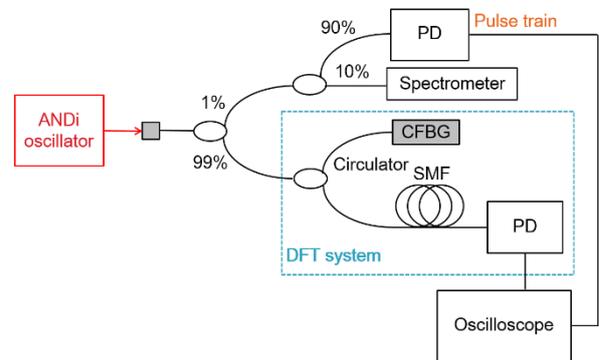


Fig. 2. Experimental setup.

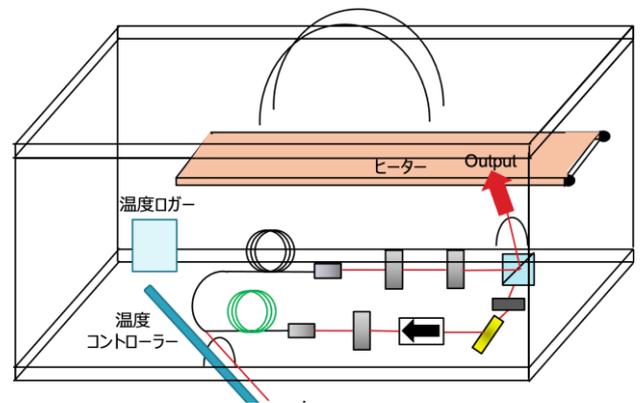


Fig. 3. Experimental setup of temperature control

Fig. 3 に温度変化させたセットアップを示す。ヒータで温度を 17.7 度から 18.5 度まで上げ、温度コントローラで温度を制御し、温度ロガーで温度を記録した。

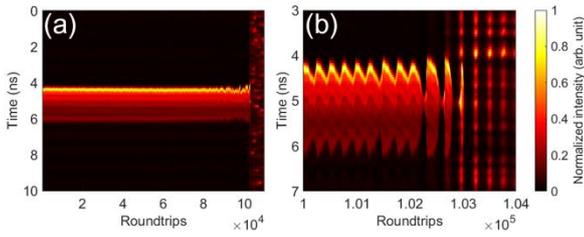


Fig. 4. (a) Total DFT result. (b) Expansion of (a) around the transition to termination of mode lock oscillation.

Fig. 4 は、励起出力が減少する中でのブリージングソリトンを計測しており、シミラリトンからブリージングソリトンに連続的に移行する過程および励起出力の減少に伴い振動間隔が徐々に伸びていく過程、そしてブリージングソリトンから立ち下がりに至る過程を捉えることができた。このようにブリージングソリトンの生成から消滅までの過程を全体にわたって観測した報告はなく、本研究によって初めて観測することに成功した。これらの結果から、全正常分散 Yb モード同期レーザ発振器における立ち上がり、立ち下がりでは、ゲインが十分である場合は安定的に振る舞うが、ゲインが不十分である場合はブリージングソリトンのような不安定な発振に陥る可能性があることがわかった。

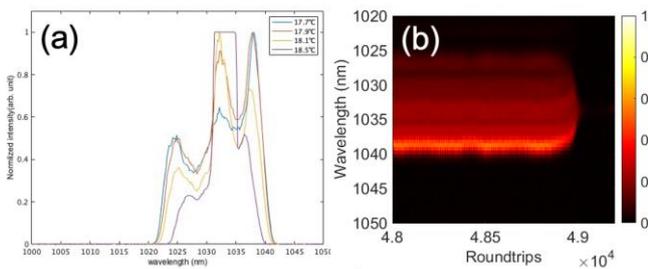


Fig. 4. (a) Spectral change. (b) DFT result of temperature control

Fig. 4 はモード同期が落ちた瞬間にトリガーをかけているものである。Fig. 4 のスペクトルは温度が上がるにつれて、モード同期がかかっている中心に CW が発振しているのが見えるが、温度変化に対し

てスペクトルゆらぎが生じるような不安定発振は起こらず (Fig. 4), 安定にモード同期が落ちることを確認した。

4. まとめ

ANDi モード同期 Yb ファイバレーザにおいて、温度、利得に依存する発振変化の過渡特性を DFT によって観測し、安定と言われる ANDi モード同期レーザでも、利得が低い条件では立ち下がりにおいて不安定発振(ブリージングソリトン)が生じることがわかった。温度制御においては、若干のゆらぎが見えるが、なめらかにモード同期が落ちることを確認した。

References

- [1] A. Mahjoubfar, *et al.* Nat. Photonics **11**, 341 (2017).
- [2] Y. Cui, *et al.* Photonics Res. **7**, 423 (2019).