

イッテルビウムドープファイバレーザの 高繰り返し周波数可変バーストモード化

High repetition-rate burst mode operation of an ytterbium-doped fiber laser

糸山 翔太 (B4), 鈴木 敬和 (D3),

Shota Itoyama, and Takakazu Suzuki

Abstract

We performed burst pulse generation with SE-free FACED to multiple the repetition-rate of an Ytterbium-doped fiber femtosecond laser. While demonstrating coupling of up to 2 pulses and repetition frequency variability, the conditions for coupling multiple pulses to a single-mode fiber was also clarified.

1. はじめに

材料の熱緩和時間よりも短い GHz 以上の繰り返し周波数をもつレーザパルスでの高繰り返し加工によって熱損傷のない高効率な(アブレーション冷却)加工が可能になるという報告が 2016 年に報告された[1]. 低繰り返し加工ではレーザー照射領域から周辺へ熱拡散が発生するのに対し, アブレーション冷却が発生するような GHz の高繰り返し加工では対象領域から周辺へ熱拡散が起きる前に次のアブレーションが発生し周辺の温度が上昇しにくくなり, 熱損傷を抑えた加工できるようになる.

アブレーション冷却過程における加工メカニズム(熱蓄積の様子や加工の様子)を実験的に観測し解明することは微細デバイスの実現やバイオ・医療分野における研究(例えばレーシック手術など)の発展に繋がる可能性が大いにある. 本研究では将来的にアブレーション冷却に代表される高繰り返し加工における高速ダイナミクスをその場計測するための光源開発を目標とし, SE-free FACED[2]を発振器後に加えた新規のファイバレーザ繰り返し

し周波数可変増加機構の開発に取り組んだ.

2. Yb-ファイバレーザシステム

本研究では, 中心波長 1030 nm の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[3]Yb ファイバー発振器を用いた. セットアップを Fig. 1 に示す.

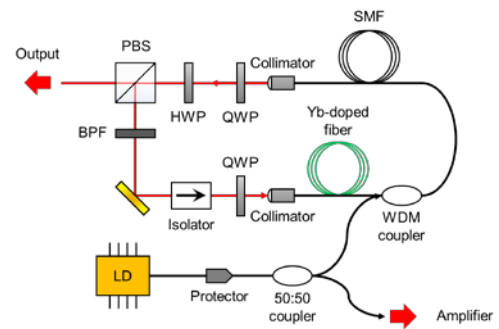


Fig.1 Schematic setup of Yb-fiber laser oscillator

発振器は繰り返し周波数 99.685 MHz, 平均パワー 93 mW で, 出力パルス幅は, SHG 自己相関計測 (Fig. 2) から約 2.55ps と見積もられた.

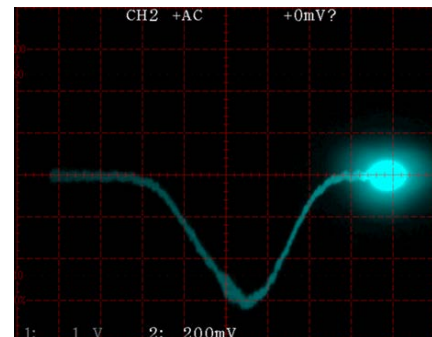


Fig. 2 Autocorrelation measurement of fiber laser oscillator output pulse.

Yb-ファイバー共振器をカットオフ周波数 100 MHz の PD(浜松フォトニクス製: S3399)と帯域幅 1 GHz のオシロスコープ(IWATSU 製: TS-81000)を用いて時間波形を計測した結果は Fig. 2 のようになった。

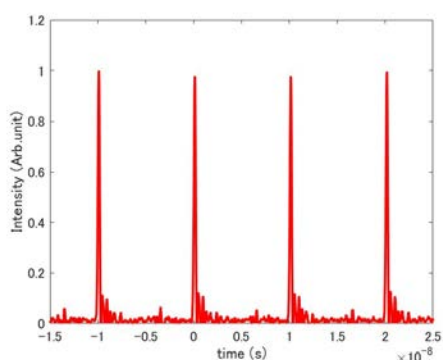


Fig. 2 Output waveform of Oscillator

発振レーザーパルスのバースト化は、SE-free FACED 光学系からバースト化したパルスをファイバーに再結合する際に生じるロスが大きいため、共振器の後にストレッチャー及び Fig. 2 のプレアンプを接続した上で SE-free FACED 光学系に入射させ、その後、後段でチャープパルス増幅器で増幅する光学系を採用した。

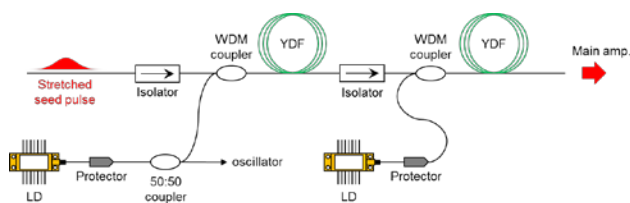


Fig. 3 Schematic setup of pre-amplifier

3. SE-free FACED 光学系

本研究では、SE-free FACED により 1 パルスから複数のパルスを分岐生成し、それぞれに時間遅延を付けることでバーストパルス化する方式を採用した。SE-free FACED では光パルスはシリンドリカルレンズによって集光されて 2 枚の非平行に対抗した鏡から成る FACED に入射する。その際、入

射角の違いによって FACED ミラー対の多重反射後に戻ってくるまでの反射回数が異なるため、出射する際に時間遅延が付けられたバーストパルスが生成される。この際、FACED ミラー対の角度ずれを調整することでパルス数、ミラー間隔を変えることでパルス時間遅延を可変にできる。Fig. 4 はこの SE-free FACED 光学系のセットアップである。

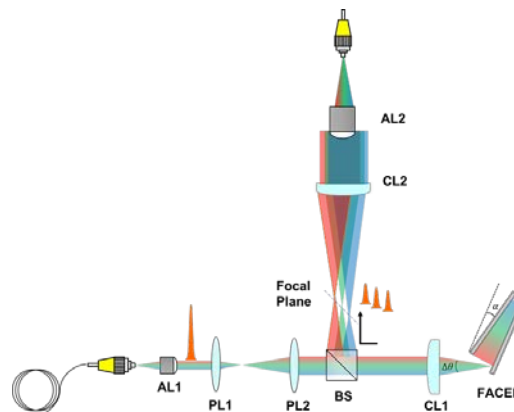


Fig. 4 Schematic setup of SE-free FACED

FACED 出射パルスは時間遅延ごとに空間的に分かれて出射されるが回折伝搬させることで空間的な重なりが生じる。その箇所を非球面レンズの瞳孔で切り取り集光することでファイバーコア上にガウシアン形状に近いビームプロファイルでカップリングすることを目指した。一方で、code-V による光線追跡結果では FACED 出射後のパルスを集光後 500 mm 伝搬させ非球面レンズ($f = 18.4$ mm)で集光したときのスポットは Fig. 5 のようになり空間的に分かれてしまうことが示唆された。

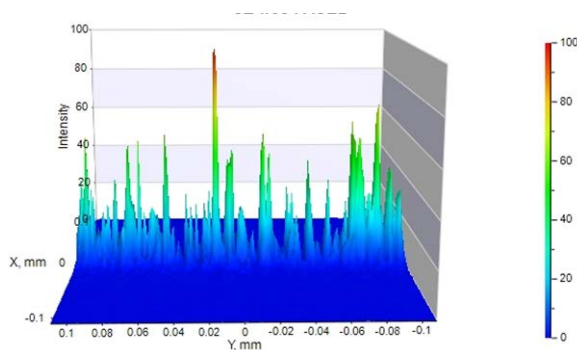


Fig. 5 Beam profile at the focal plane of an aspheric lens after diffraction propagation from SE-free FACED output.

これはFACEDからの波面が傾いているための影響で、集光点においてマルチパルスの強度分布が一致しないためである。以下、実際の実験ではその影響により結合効率が著しく低くなってしまふことを確認するに留まってしまった。

4. ファイバー結合実験

4.1. バーストパルス時間波形

SE-free FACED 光学系後に非球面レンズでシングルモードファイバーへ2パルス結合させた際に応答速度5GHzのPDと2.5GHzの高速オシロスコープで計測した時間波形はFig. 6のようになった。

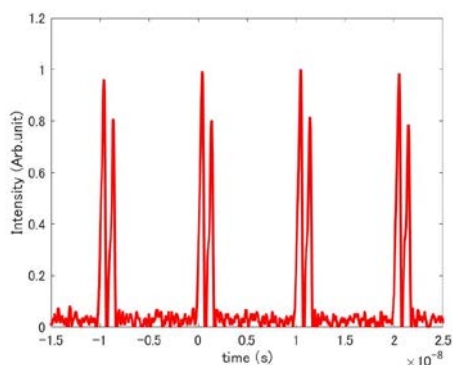


Fig. 6 Output waveform of laser pulses coupled to fiber after FACED (mirror spacing = 150 mm)

ミラー間隔150mmのときバーストパルスの繰り返し周波数は共振器と同様約100MHzである一方、バーストパルス内での時間遅延は約1nsとなった。またミラー間隔を75mmにした場合の結果はFig. 7のようになり、バーストパルス内の時間遅延が0.5nsとなった。このことからFACEDによるバーストパルス繰り返し周波数の可変性は示すことができた。

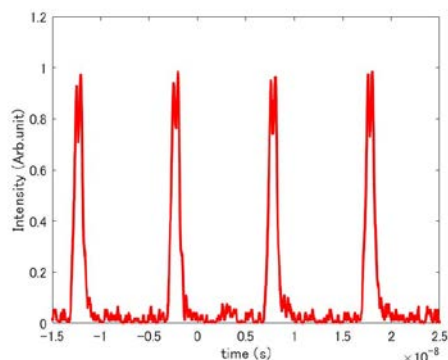


Fig. 7 Output waveform of laser pulses coupled to fiber after FACED (mirror spacing = 150 mm)

しかしファイバーに結合可能なパルス数はCode-Vによる解析通りパルスごとのスポットがコア面上で空間的にずれるため、ファイバーのコア径である6μm以下にスポット間隔が収まる場合のみ複数パルス結合でき、本研究では最大で2パルスの結合が最大であった。

4.2. バーストパルス増幅結果

ファイバーの接続を変えCFBGでパルスストレッチング後にSE-free FACEDを設置し、バースト2パルス状態をファイバーに結合してプレアンプ増幅した結果、Fig. 8のようなスペクトル形状になった。

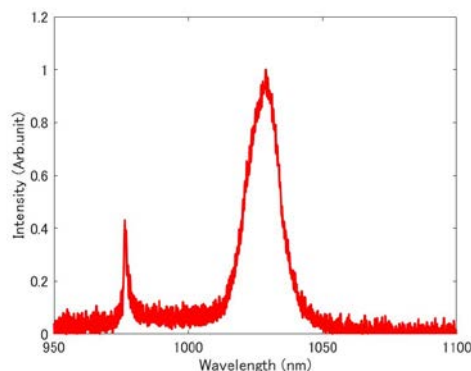


Fig. 8 Spectrum of burst pulse after pre-amplifier

増幅したものの、シードパルスのファイバー結合パワーが弱く、その結果誘導放出が ASE が支配的で飽和増幅が起きるほど効率よく起きない。そのため、誘導放出で基底準位に戻ったイオンを再度励起するような励起サイクルの効率が落ちてしまい、強いシード光が入った時に比べて励起光(中心波長 976 nm)が吸収されずに出射端に漏れてくるパワーが顕著になっていることがわかる。

SE-free FACED によるバーストパルス化にはこのようにファイバー結合損失が大きいという欠点があり、たとえ後段で増幅したとしても一定のシード強度には達していないと利用できない。前述のように SE-free FACED から出射したパルスの集光スポットが空間的にずれるのでファイバーコアに効率よく集光できない。本実験で 2 パルスの結合に成功したときには、全部で 28 パルスが生成していたので、結合できなかったパルスは全て損失となった。

まとめ

本研究では、SE-free FACED を利用した Yb ドープファイバレーザの高繰り返し周波数可変バーストモード化に着手し、最大で 2 パルスではあるもののバーストパルス内での繰り返し周波数可変性を確かめた。また code-V で解析したようにファイバーに結合させる際に集光スポットが空間的に異なる位置にできるため複数パルス結合は困難であることを実験的に確かめた。これは加工用光源として用いるにはシードパルス生成には損失が大きく適さない。

References

1. C. Kerse *et al.*, *Nature* **537**, 84-88 (2016).
2. J. L. Wu *et al.*, *Light Sci. Appl.* **6**, e16196 (2017).
3. A. Chong *et al.*, *Opt. Express* **14**, 10095-10100 (2006).