

2 波長バンドパスフィルタを用いた セルフスタートモード同期ファイバレーザー

Self-starting mode-locked fiber laser with dual-bandpass optical filter

○西浦 匡則^{1,2}, 塩田 達俊¹(¹埼玉大学, ²セブンスックス)

Masanori Nishiura^{1,2}, Tatsutoshi Shioda¹ (¹Saitama Univ., ²Sevensix)

1. はじめに

偏波保持(Polarization maintaining: PM)ファイバで構成した全正常分散モード同期 Yb ファイバレーザー(All normal dispersion Yb mode-locked fiber laser :ANDi PM-YbFL)[1] は, レーザー微細加工用超短パルスレーザーの種光源として実用化されている. 多くの超短パルスファイバレーザーは可飽和吸収体として半導体可飽和吸収ミラー(Semiconductor saturable absorber mirror : SESAM)[2]を採用している. SESAM は PM ファイバ構成で簡単にモード同期を実現できる利点がある一方で, 動作寿命やダメージ閾値などの特性に改善の余地がある. そこで近年, 可飽和吸収体として注目されているのが, 一般的な光ファイバ部品を組み合わせることで構成できる非線形増幅ループミラー(Nonlinear amplifying loop mirror: NALM)[3]である. NALM のダメージ閾値は各光学素子で決まるため, 発振器から直接的に高エネルギーパルスを生じることができるが, 自己始動モード同期が起こり難いという問題がある. 多くの場合, ANDi PM-YbFL ではモード同期の自己始動を確実にを行うために, レーザーの始動時に共振器へ過大な励起エネルギーを与える. 過大な励起エネルギーは, 安定なモード同期発振の前過程で発生する Q スイッチモード同期(Q-switched mode-locking: QS-ML)パルスのパルスエネルギーを高めることに繋がり, また, 自己始動時にはマルチパルスモード同期状態(Multi-pulse mode-locking: MP-ML)状態となってしまう. この場合, QS-ML パルス対策として, ANDi PM-YbFL には高エネルギーパルスに耐えられる高価で大型なアイソレータが必要となる. また, MP-ML 状態からシングルパルスモード同期(Single-pulse mode-locking: SP-ML)状態にするために, パルス出力をモニタリングし, 励起エネルギー供給源である励起用半導体レーザー(Laser diode: LD)をフィードバック制御しなければいけない.

我々は, 低励起エネルギーで, 高速に自己始動する ANDi PM-YbFL を実現するために, 共振器内に QS-ML を誘起するための光バンドパス窓(iQ 波長窓)と SP-ML を維持するための光バンドパス窓(oM 波長窓)の 2 波長 BPF を設けた. このようなフィルタを iQoM フィルタと名付け, この方式を iQoM 技術と名付けた. 通常

の 1 波長 BPF を用いた ANDi PM-YbFL では, QS-ML パルスがモード同期パルスに遷移するが, iQoM 技術では, QS-ML パルスが SP-ML パルスのトリガーとなるだけで, SP-ML に直接遷移しない. Fig. 1 は, iQoM 技術における iQ 波長窓と, oM 波長窓内の光の挙動を示している. iQ 波長窓内で発生した QS-ML パルスが, oM 窓内の強度雑音を誘起する. iQ 窓内で発生した QS-ML パルスは, 反転分布と共に消失する一方で, oM 波長窓内では光強度雑音が SP-ML に成長する.

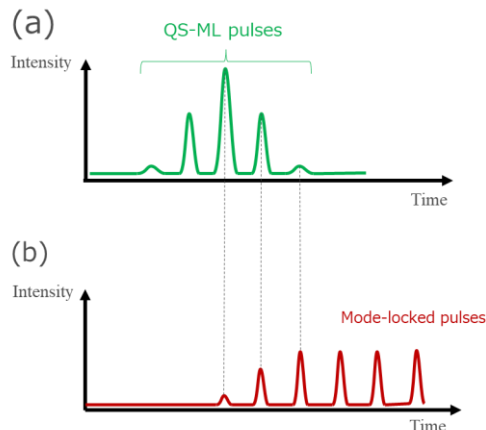


Fig. 1 Principal of iQoM technique.

2. レーザー構成

Fig. 2 に実験系を示す. レーザー構成は Figure-8 であり, NALM ループと Main ループの 2 つのループが 3 dB 分岐カップラで結合されている. II-VI 社の WaveShaper により 2 波長バンドパスフィルタを実現している. WaveShaper の挿入損失は約 5 dB のため, Main ループにも Yb ファイバ増幅器からなる増幅機構を設けている. WaveShaper と OC 間のアイソレータは, WaveShaper の入出力ポートに用いている FC/APC コネクタからの微弱な反射光が NALM ループに戻ることを防いでいる. 2 台のアイソレータは通常のファイバ部品と同程度のサイズの小型で安価なものを使用している. モード同期時パルス発生時のパルスの繰返し周波数は 6.09 MHz であった. フィルタ形状によるが, パルス幅は < 12 ps, 出力は < 2.5 mW であった.

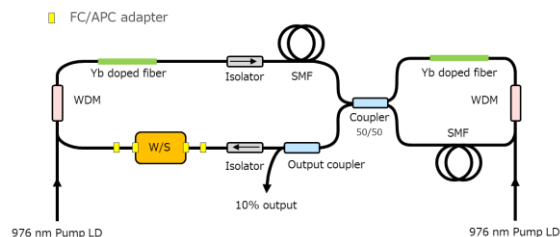


Fig.2 Experimental setup. A programmable amplitude and phase filter (II-VI, WaveShaper) produces iQoM filter. The laser generates single pulses at the repetition rate of 6.09 MHz, the pulse width of < 12 ps, the average power of < 2.5 mW.

3. 実験結果

Fig. 3は 1048 nm に oM 波長窓として -3 dB バンド幅 3.8 nm のガウス型フィルタのみを設けた場合と (Fig. 3(a)), 1030nm に iQ 波長窓として バンド幅 1 nm の矩形 (スロープ 500dB/nm) フィルタを追加して iQoM フィルタを適用した場合 (Fig. 3(b)) に得られたフィルタ形状と出力スペクトルを示している. oM 波長窓だけを用いた場合の出力は ASE (Amplified spontaneous emission) 光となっているが, iQ 波長窓と oM 波長窓の両方を用いた場合は, モード同期スペクトルが得られている.

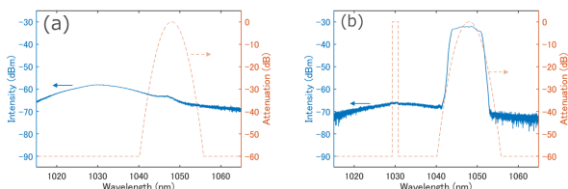


Fig. 3 Output spectrum and filter shape of the WaveShaper (iQoM filter)

iQ と oM 波長窓の様々な組み合わせを試すことで iQoM 技術が有効となる oM 波長窓の範囲を調べた. Fig. 4 の赤色米印は, oM 波長窓のみでモード同期 (SP-ML パルス) が発生した oM 波長窓の特性 (中心波長と -3 dB バンド幅) を示している. 青丸印は iQ 波長窓を -3 dB 幅 1.5 nm, 中心波長 1030 nm の矩形とした場合の oM 波長窓でモード同期パルスが発生した特性を示している. いずれも oM 波長窓の形状はガウス型であり, 励起 LD を起動してから 10 秒以内にモード同期が実現した点をプロットしている. iQ 波長窓の有効性と, oM 波長窓の適用可能範囲が非常に広いということが分かる. この他にも, oM 波長窓をバターワース型や Sech 型にした場合,

iQ 波長窓の特性を変えた場合の iQoM 技術の特性も評価したところ, iQoM 技術は幅広いフィルタ特性で適用可能であることが分かった. また, iQoM フィルタとして WaveShaper を用いず, Main ループの光増幅機構とアイソレータ 1 台を取除いた状態での iQoM 技術の有効性も確認している. 現在我々は, iQoM 技術を使った, 低価格・小型・高安定な ANDi PM-YbFL を開発している.

本講演では, iQoM 技術の原理の詳細と, 様々な iQoM フィルタ適用時のレーザーの特性を紹介する.

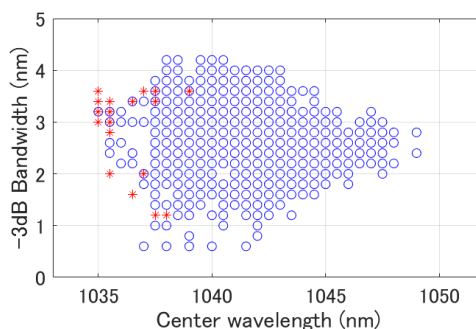


Fig. 4 Self-starting mode-locking points with only oM-windows, same as -60 dB iQ-window (red-star), and iQoM-windows (blue-circle). The symbols show the points which laser self-starts mode-locking within 10 seconds (typically several seconds) after launched pump LDs. iQ-windows of iQoM-windows are fixed at the center wavelength of 1030 nm, the 3dB-bandwidth of 1.5 nm. iQ-windows have flat-top window, oM-windows have Gaussian shape such as shown in Fig.3.

参考文献

- 1) W. H. Renninger, A. Chong, and F. W. Wise, Phys. Rev. A 77, 023814 (2008).
- 2) J. B. Lecourt, C. Duterte, F. Narbonneau, D. Kinet, Y. Hernandez, and D. Giannone, Opt. Express 20, 11918-11923 (2012).
- 3) J. W. Nicholson, S. Ramachandran, and S. Ghalmi, Opt. Express 15, 6623-6628 (2007).
- 4) M. Nishiura and T. Shioda, Proc. SPIE 11665, Fiber Lasers XVIII: Technology and Systems, 1166528 (2021).