

透明媒質中の導波路直接加工に向けた繰り返し周波数可変

Yb ファイバレーザ CPA システムの開発

Development of a repetition-rate-tunable Yb-doped fiber laser CPA system

toward waveguide-direct-writing in transparent materials

田中 裕樹 (D1)

Hiroki Tanaka

Abstract

In this report, our recent work on the development of the Yb-fiber CPA system is presented. The laser system has the repetition rate tunability to optimize the heat accumulation effect during the processing of transparent materials. A mode-locked fiber oscillator, a pulse stretcher, a pulse picker, pre-amplifiers, and a double-clad amplifier are constructed.

1 はじめに

ガラスや結晶といった透明媒質中に超短パルスレーザを集光することによって、多光子吸収、トンネルイオン化及びアバランシュイオン化を介し、屈折率変化を誘起出来ることが知られている。この技術を用いれば、光導波路デバイスをバルク材料中に3次元的に作成することが可能であり、これまで多くの導波路、導波路レーザ、回折格子等が、作成、報告されている。この超短パルスレーザによる屈折率変化は、パルスの繰り返し周波数によって、およそ100 kHzを境に、大きく2つの領域が存在する。低繰り返し領域では、パルス間隔が十分長く、前パルスによって発生した媒質中の熱との相互作用を無視できるのに対し、高繰り返し領域では、集光点付近に熱蓄積を誘起出来、それによって、よりスムーズかつ対称な加工プロファイルを実現し、屈折率変化も大きくすることが可能であることが報告されている[1].

我々はこれまで繰り返し1 kHzのTi:sapphire CPA光源を用い、導波路加工に取り組んできたが、高繰り返し領域での加工は、より大きな屈折率変化誘起でき、伝搬損失の低い導波路を作成できると期待される。以下で、開発している繰り返し周波数可変 Yb ファイバ CPA システムの詳細について述べる。

2 繰り返し周波数可変 Yb ファイバ発振器及び増幅器

Figure 1に Yb ファイバレーザ CPA システムの構成を示す。構成要素は、モード同期ファイバ発振器、パルス伸張器、パルスピッカー、プリアンプ、主増幅器、及びパルス圧縮器である。

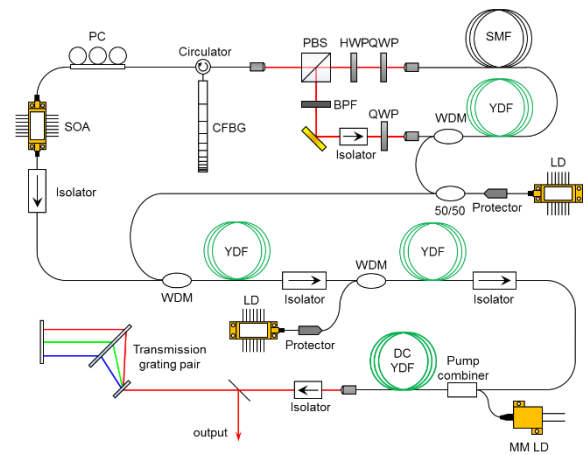


Fig. 1 Yb ファイバレーザ CPA システムの構成

発振器のモード同期動作は、非線形偏波回転 (Nonlinear polarization evolution)によって達成されている。共振器内に分散補償機構を有しない全正常分

散モード同期レーザである。利得媒質は Yb ドープファイバ (Liekki, 4- μm core) であり, 発振スペクトルの中心波長は 1030 nm であった。励起源には出力 600 mW のシングルモードファイバ結合型半導体レーザ (波長 976 nm) の半分を用い, 残りは初段プリアンプの励起光とした。繰り返し周波数は 40 MHz であり, パルスエネルギーは 1.75 nJ と見積もられた。フォトダイオード及びオシロスコープで取得したパルス列を Fig. 2 に示す。

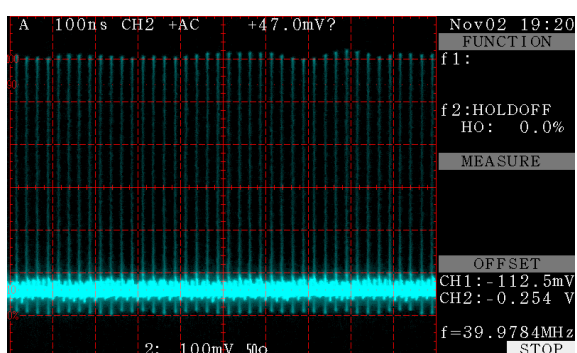


Fig. 2 Recorded output of the mode-locked oscillator.

偏光ビームスプリッタから取り出された出力を, CFBG (Chirped Fiber Bragg Grating) によって ~ 1 ns まで伸長した。用いた CFBG の二次分散量は -55.72 ps/nm であった。伸長後スペクトルを Fig. 2 に示す。

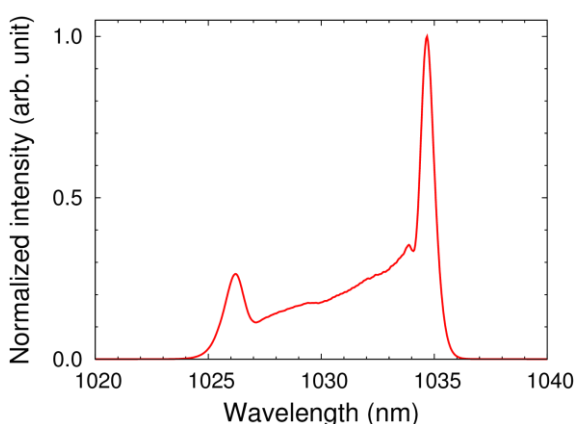


Fig. 2 Spectrum of the stretched pulses.

スペクトルの両端に高いピークが存在するのは, ファイバ伝搬中の自己位相変調による影響である。

Fig. 3 に 5 GHz フォトダイオード及び 2.5 GHz オシロスコープで計測した伸長前, 伸長後の時間波形を示した。この計測系の立ち上がり/下がり時間はその帯域幅から大まかに 140 ps と見積もられる。この図からわかるように, 波形は時間的に広がっており, また, 伸長後波形はスペクトルを反転させた形状となっていることが確認できる。

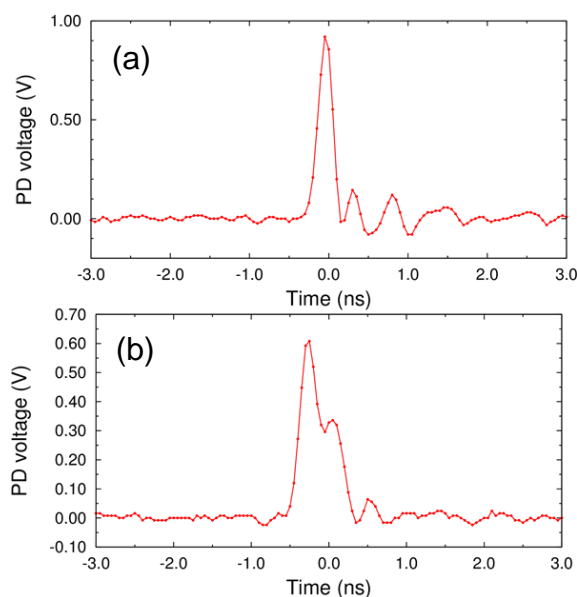


Fig. 3 Recorded waveform of the oscillator's pulse (a) and the stretched pulse (b).

パルスピッカーには, 半導体光増幅器 (Semiconductor optical amplifier, SOA) を使用した。SOA は, 電流を注入する間のみ増幅器として機能し, 他の時間は吸収体として働くため, 消光比の高いパルスピッカーとして用いることが出来る。一般的に, パルスピッカーには音響光変調器 (Acousto-optic modulator, AOM) や電気光変調器 (Electro-optic modulator) が用いられるのが一般的である, 前者は高周波発生源, 後者は高電圧電源を必要とする欠点がある。SOA は, これらの装置を必要とせず, 自由空間に光を取り出す必要がないという利点を持つ。用いた SOA は, 小信号利得 40 dB, 雑音指数 7 dB, 最大利得波長 1034 nm のものである。駆動には, 1

ns 程度のパルスが発生できるドライバ (PicoLAS, BFS-VRM-03-HP) を用いた。Fig. 4 にパルスピッカーの構成を示す。発振器の出力の一部をフォトダイオードで受光し、それをトリガー信号とし、分周した信号をファンクションジェネレータより発生させた。その信号 (100 kHz~10 MHz) でパルスドライバの駆動電流を変調することで、パルスピックを達成した。変調信号のタイミング同期は、ファンクションジェネレータの遅延時間を調整することで可能である。

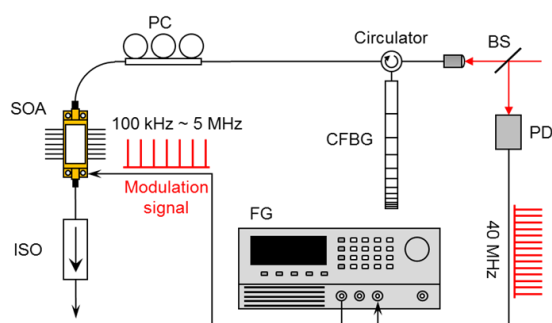


Fig. 4 Schematic view of the SOA-based pulse picker.

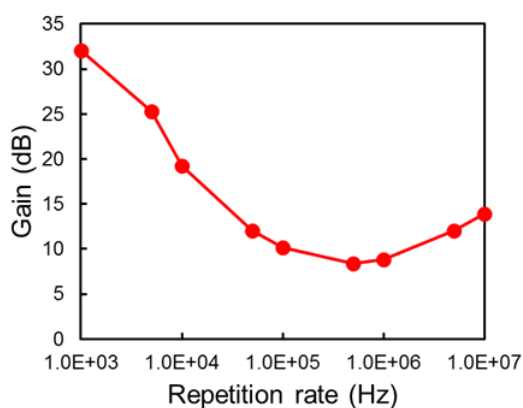


Fig. 5 Amplification gain of the SOA with respect to the operating repetition rate.

SOA による増幅特性を Fig. 5 に示した。SOA における増幅率は、SOA を駆動する電流の繰り返し周波数によって大きく変化した。パルス一つ一つに対する増幅過程が独立であれば、すべての繰り返し周波数において等しい増幅率が得られるはずだが、繰

り返し周波数を高くすると増幅特性の劣化が確認された。これは、繰返しを高くすることによって、SOA の温度が上昇したことが要因と考えられる。

1 MHz 以上では再び利得が上昇しているが、これは Fig. 6 に示すスペクトルから分かる通り、ASE (Amplified Spontaneous Emission) が顕著に発生していることが要因であり、実際の増幅特性は改善されていないことがわかる。

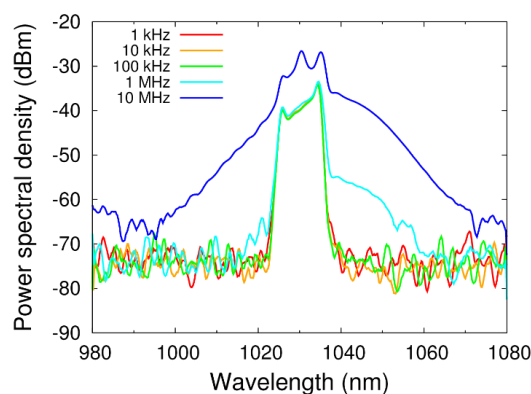


Fig. 6 Spectrum of the picked pulses for different repetition rates.

SOA によって間引かれたパルスの消光比 (非増幅パルスに対する増幅パルスのエネルギー比) は 10 dB と見積もられた。間引かれたパルスを 2 段のコア励起ファイバによって増幅した。発振器と同じコア径 4 μm の Yb ファイバを用いた。初段及び 2 段目のプリアンプの励起パワーはそれぞれ 250 mW, 600 mW であった。2 段目のプリアンプの入出力特性及び増幅後のスペクトルをそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。

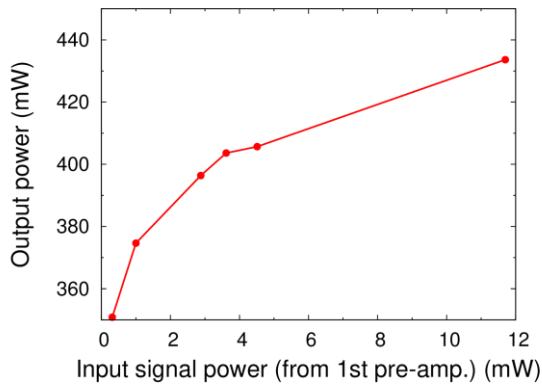


Fig. 7 Input-output characteristic of the second pre-amplifier.

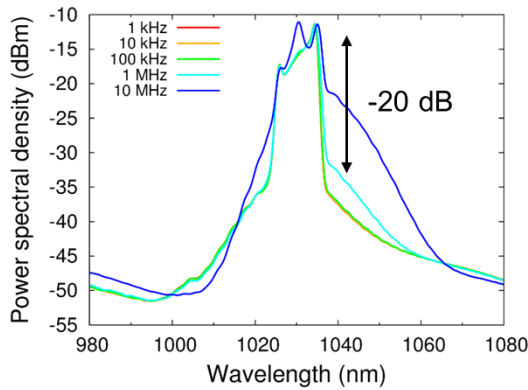


Fig. 8 Spectrum of the amplified pulses.

このスペクトル形状から、1 MHz 以下の駆動における信号光に対する ASE ノイズは 20 dB 以上小さく、十分抑制されていると読み取れる。

およそ 300 mW まで増幅されたパルスを用いて、ダブルクラッド型主増幅器によって ~5 W まで増幅した。励起にはマルチモードファイバ結合型半導体レーザー (BWT Beijing, 9W, 976 nm) を用い、マルチモードコンバイナによって信号光と励起光を結合した。およそ 3 m のダブルクラッド Yb 添加ファイバ (CorActive, 20- μm core, octagonal clad, core/clad NA 0.08/0.45) を用い、8 度カットした端面から取り出した出力を計測した。繰り返し周波数 100 kHz 時の主増幅器の入出力特性を Fig. 9 に示した。

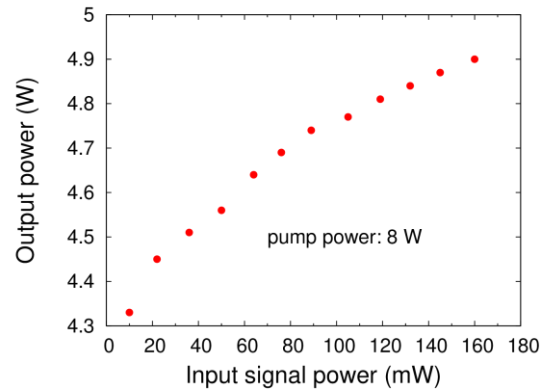


Fig. 9 Input-output characteristic of the double-clad fiber main amplifier at 100-kHz repetition rate.

入力信号光が最大時、4.9 W の平均出力が得られた。また、繰り返し周波数 100 kHz~1 MHz の範囲において、4.7 W 以上の出力が得られることを確認した。

3 まとめ

現在構築中の Yb ファイバレーザ及びチャープパルス増幅器の特性について報告した。繰り返し周波数 40 MHz の全正常分散型モード同期発振器より、1.75 nJ のパルスエネルギーが得られ、CFBG によって ~1 ns まで伸長した。繰り返し周波数の可変性は SOA パルスピッカーによって達成され、1 kHz から 10 MHz で駆動出来る。主増幅器より ~5 W の平均出力が得られた。パルス圧縮器には回折効率の高い透過型回折格子対を用いる予定であり、増幅後のスペクトル幅より ~250 fs のパルスが得られると見積もられる。

References

- [1] S. Eaton *et al.*, Opt. Express **13** (2005) 4708–4716.