

高出力パルスファイバレーザとその展開

新規事業推進センター ファイバレーザ事業推進室 寺田 佳弘¹・中居 道弘²・大庭 康弘²

High-power pulsed fiber lasers and their evolution at Fujikura

Y. Terada, M. Nakai, and Y. Oba

当社はパルス幅 100 nsクラスのQスイッチ動作パルスファイバレーザで世界に先駆けて出力 30 Wを達成した。その後、70 W出力まで製品化を果たした。本報告では、これまでのパルスファイバレーザ高出力化への取り組みについて記述し、70 W出力製品を紹介する。また、より高精度で複雑な加工アプリケーションに向けて、いくつかの特徴ある機能を搭載したパルスファイバレーザを紹介する。

Fujikura has achieved an output power of 30 W from a Q-switched pulsed fiber laser with a pulse width about 100 ns for the first time in the world and has commercialized a 70 W output pulsed fiber laser. In this report, we describe our activities on high-power pulsed fiber lasers, and introduce our 70 W output products. Fujikura's advanced and original functions on pulsed fiber lasers for more precise and complicated processing are also described.

1. ま え が き

高出力パルスファイバレーザは、従来の高出力ネオジウム添加 Yttrium-Aluminum-Garnet (Nd:YAG) レーザと比較して、①ビーム品質が高くビームを細く絞りやすい、②小型・軽量で空冷、③メンテナンスが不要であるという特徴がある。このため、レーザマーカによる加工（印字）の微細化・高速化および装置の小型化・保守性向上に大いに貢献している。レーザマーキングの分野では、高出力パルスファイバレーザがすでに主流となったと言ってよい。

当社は早くからQスイッチ動作パルスファイバレーザの開発に取り組んでおり、パルス幅 100 nsクラスのファイバレーザで、世界に先駆けて平均出力 30 Wを達成した¹⁾。その後はさらに平均出力の高出力化を図り、現在では世界最高レベルの 70 W出力機まで製品化している。

本稿では、これまでの当社のパルスファイバレーザの高出力化への取り組みについて述べる。また、より高精度あるいは複雑な加工アプリケーションに向けた当社パルスファイバレーザの特徴ある機能について紹介する。

2. パルス出力ファイバレーザの高出力化

当社はまず 30 W出力機を製品化し、続いて 50 W、70 Wへと高出力化を行った。70 W出力空冷パルスファイバレーザ製品の外観を図 1 に、諸元を表 1 に示す²⁾。



図1 70 W出力空冷パルスファイバレーザ外観
Fig. 1. Appearance of 70 W output air-cooled pulsed fiber laser product.

表1 70 W出力空冷パルスファイバレーザ諸元
Table 1. Typical specifications of 70 W output air-cooled pulsed fiber laser product.

項目	仕様 (標準値)
中心波長	1085 nm
定格出力	最大 70 W
ビーム品質 M ²	≤ 2.0
パルス周波数	50-100 kHz
パルス幅	100-200 ns
パルスエネルギー	最大 1 mJ
ピークパワー	5-10 kW
インターフェース	アナログ/デジタル, RS-232
寸法	幅 310 × 高さ 181 × 奥行 416 mm
質量	15 kg

1 技術部次長

2 技術部主席技術員

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
M ² (エム・スクエア)	M ²	レーザー光がどれだけシングルモードビーム (TEM ₀₀) に近いかを示す値であり、ビームの集光性を示す指標となる。完全なガウシアンビームの場合、M ² 値は「1」。高次モードが混入するに従い大きな値を示す。
非線形光学効果	Nonlinear optical effect	物質に強い光を入射したとき光の位相や周波数が変化する現象で、入射光の強度と出射光 (変化後の光) の強度が1次関数 (線形) の関係でないのが特徴。光の応用分野では問題となる場合が多いが、波長変換技術などで積極的に活用することもできる。
ASE	Amplified Spontaneous Emission	自然放出光が増幅され、放射される現象。特定の波長光のみが誘導放出により増幅されるレーザー発振と異なり、ブロードなスペクトルを有する。
MOPA構造	Master Oscillator Power Amplifier	高品質ビーム発生用の主発振器と高出力な光増幅器を分け、それぞれを独立に制御する方式。良好なビーム特性を維持したまま高出力が得られるという特徴を持つ。
ファブリペロー共振器	Fabry-Perot resonator	光が通過する経路の両端に2枚の反射面を対向させ光を増幅する共振器。ファイバレーザーでは反射面としてファイバグレーティングを用いることができ、長期安定性に優れた全ファイバ型レーザーを構成可能である。
リング共振器	Ring resonator	光を周回させる導波路構造を持ち、光が1周して元の位置に戻ったとき、最初と同位相になる条件で共振を起こす。リング共振器型レーザーでは、周回構造中に分岐コブラを設け、共振器からレーザー光を取り出す。
誘導ラマン散乱 (SRS)	Stimulate Raman scattering	物質に光が入射すると物質の格子振動によりその光が変調を受けることで格子振動の周波数成分だけ周波数がシフトした光の成分であるストークス光が生じ (ラマン散乱)、さらに非常に強い光を入射すると、ストークス光が光の強度に比例して増幅される現象。

本パルスファイバレーザーは主発振器で発生したパルス光を光増幅回路で増幅する Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) 構造を採用しており、光増幅回路はプリアンプとパワーアンプの2段階構成としている。主発振器においてパルス幅 100 ns 程度、繰り返し周波数 60 ~ 120 kHz のパルス光を発生させ、その後、高利得の増幅器で増幅することにより、良好なビーム品質を維持したまま高出力のパルスレーザー光発生を可能としている。

パルスファイバレーザーの光回路を構成する光コンバイナやファイバグレーティングといった光部品は自社製であり、励起光源にも自社製の高出力レーザーダイオードモジュールを採用している。また、光出力部の光アイソレータも自社製であり、自社開発の高品質ガーネット結晶を用いた高出力対応モデルである。当社が保有する光ファイバ技術、光部品技術をいかし、高い信頼性と低コスト性を両立したパルスファイバレーザーを実現している。

パルスファイバレーザー開発初期における出力 30 W までの高出力化では、①イッテルビウム (Yb) 添加コアファイバのフォトダークニング抑制、②反射光に対する耐性向上、③非線形光学効果による各種特性劣化の抑制が課題であった。課題それぞれに対しては、(1) フォトダークニング抑制技術の開発^{3), 4)}、(2) ラマンシフト^{3), 5)} および独自構造の励起光コンバイナ^{3), 6)} の開発、(3) パワーアンプ用光ファイバ構造のパラメータ最適化により解決した。その後の高出力化においても、②反射光に対する耐性向上と③非線形光学効果による各種特性劣化の抑制は、出力増加に応じて課題であり続けた。以下に、70 W までの高出力化への対策について述べる。

加工対象物からの反射光がファイバレーザーに戻ると、反射光はパワーアンプで増幅され、ファイバレーザーを構成する光部品を損傷する。特に、反射光を引き金としてパワーアンプが自己発振を起こし、尖頭値の高い光パルスが発生してコンバイナ等の光部品や励起用半導体レーザーを損傷する事象が大きな問題となる。この事象は一般的に光アンプの利得が大きくなる、すなわち MOPA 構造のファイバレーザーの出力が大きくなるにしたがい顕著となり、レーザー発振波長のみならず、反射光に含まれる自然放出光 (Amplified Spontaneous Emission, 以下 ASE と記す) 成分がパワーアンプに戻った際にも自己発振が起こる。

通常の加工用パルスファイバレーザーでは、反射光がパワーアンプに入射するのを防ぐために反射光を遮断する光アイソレータを搭載するが、ASE 光は波長スペクトルがブロードなため、一般的な偏波無依存型光アイソレータでは完全に遮断することはできない。そこで我々は、独自構成の ASE 光除去用の光フィルタを別途設け、反射光を抑制する構造とした。また、本パルスファイバレーザーはプリアンプとパワーアンプの二つの光増幅回路を備え、高出力化に有利な構成となっている。2つのアンプに用いる Yb 添加光ファイバの設計を見直すことで各アンプの利得を最適化し、反射光がパワーアンプに侵入した際の自己発振を抑制して反射耐性を向上させた。

光ファイバ中の非線形光学現象は、光ファイバ中を導波する光の空間的および時間的パワー密度が高くなるにしたがい顕著となるため、レーザーの高出力化を図るにあたり必ず問題となる事象である。レーザーのパルス時間幅

を拡大し、時間的パワー密度を下げることで非線形光学現象を抑制することができる。一方で、共振器長を単純に長くしていくと、共振器中の周回時間（回数）の異なるパルス光成分の重なりが粗くなり、時間スペクトルにリップルが生じる。これを回避するため、当社のパルスファイバレーザでは、主発振器に多重共振器構造を用いて共振器長を調整し、パルス時間幅を拡大している。

主発振器の概略を図 2 に示す。多重共振器には、2 つの共振器ミラーからなるファブリペロー共振器の内部にリング共振器を設けた二重共振器構造を用いた。リング共振器の構成には光カプラを用いたが、光カプラの分岐比、またリング共振器長により主発振器の発振特性が大きく左右されるため、主発振器から生成されるパルス光の時間波形や制御性を考慮し、これらのパラメータを最適化した。

3. 高精度・複雑加工 アプリケーションへの展開

これまで当社はレーザマーカ用途を中心にパルスファイバレーザ製品を展開してきたが、より高精度で複雑な加工アプリケーションへの適用を狙い、当社が保有する光ファイバ技術、光部品技術をいかした、特徴ある機能を備えるパルスファイバレーザを開発した。以下にレーザ光の直線偏光化と高速パルスピッキング機能について説明し、これらの機能を付与したパルスファイバレーザ

の特徴等について紹介する。

3. 1 直線偏光化

レーザ光の特性の一つとして、レーザ光の偏光状態があげられる。偏光とは電磁波としての光の電界および磁界が特定の方向のみに振動している状態を指し、偏光状態により光と物質の相互作用の度合いは大きく変わることがある。レーザ加工の分野では、加工対象材料によってはレーザの偏光状態により加工効率や加工品質が変化する。例えば結晶材料を切断する場合、切断対象物の結晶方位とレーザ光の偏光方向の関係により、切断速度や切断面の表面荒れの具合に差が生じる。より安定した高精度な加工を実現するには、レーザ光の偏光状態の制御が不可欠である。

また、レーザ光の波長によって加工対象材料の吸収率が異なるため、加工効率に変化する。たとえば高強度ガラス、シリコンをはじめとする半導体材料、銅などといった難加工材料は、紫外～可視光領域で加工効率が高いため、波長変換素子（非線形光学結晶）を用いてレーザ光の波長を変換して切断、穴開、パターンニングをおこなう。さらには短波長化することでビーム集光径を小さくでき、加工精度向上の効果も得られる。このとき波長変換素子の光変換効率は入射光の偏光方向に大きく依存するため、波長変換用のレーザでは単一の直線偏光で発振させることが必要となる。

開発した直線偏光パルスファイバレーザの構成概略を図 3 に示す。レーザ光の直線偏光化には Polarization-

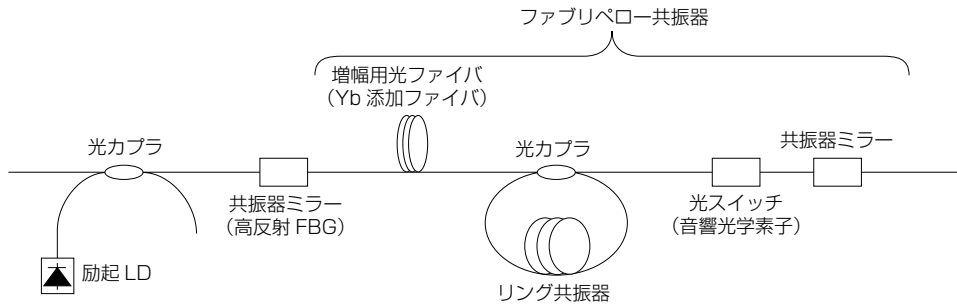


図2 主発振器概略
Fig. 2. Schematic configuration of master oscillator.

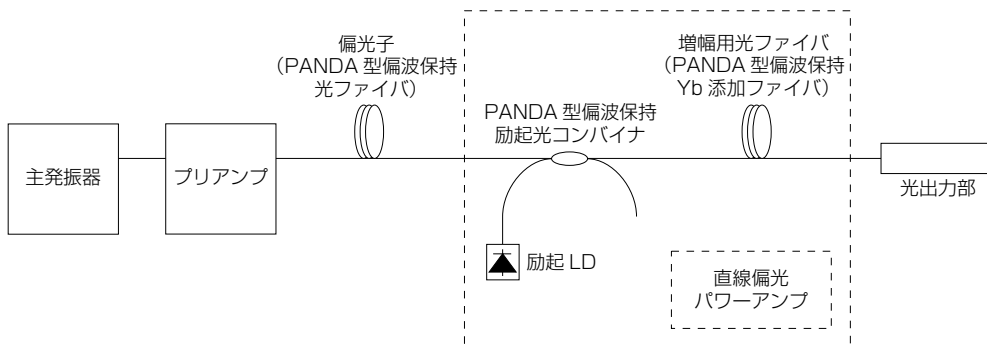


図3 直線偏光パルスファイバレーザ構成概略
Fig. 3. Schematic configuration of linearly polarized pulsed fiber laser.

maintaining and Absorption reducing (PANDA) 型偏波保持光ファイバを利用したファイバ型偏光子を用いている。偏光子をMOPA型ファイバレーザのパワーアンプの前段に配置し、直線偏光化したレーザ光をパワーアンプで増幅する構成とした。また、パワーアンプでも直線偏光が維持される必要があるため、光増幅用ファイバにはPANDA型偏波保持Yb添加コア光ファイバを用い、励起光コンバイナにもPANDA型偏波保持光コンバイナを用いている。

3. 2 高速パルスピッキング

パルスレーザで可能な微細加工においては、材料に対して単純な点や線での加工だけではなく、より複雑な加工もおこなわれている。このような加工では、数十~数百kHzで繰り返し出射されているパルスレーザ光を1パルス毎にON/OFF切り替え（パルスピッキング）したり、パルス出力強度調整をする機能が有用となる。パルスファイバレーザにおいては、励起光量を調整してパルス出力強度を調整することが可能であるが、一般的には図4に示すように、パルス出力強度が安定するまでには時間的な遅れが生じるため、安定した加工が実現できない。これを克服するため、当社はファイバレーザ外

部に高速光スイッチを設けることにより、1パルス毎のパルスピッキングを実現した。高速光スイッチには二酸化テルルを媒体とする音響光学素子を用いた。光ファイバから出力されるレーザパルス光をレンズを用いて音響光学素子に結合し、スイッチング後は再びレンズを用いて光ファイバに結合する構成とした。また、スイッチングの際の、音響光学素子に印加する高周波信号パワーを変化させることでレーザ光の回折効率を変化させ、信号光の強度変調もおこなえるようにした。

3. 3 構成および特徴

高速パルスピッキング機能を付与した直線偏光パルスファイバレーザを開発した。ラマンシフト³⁾と同様の構造である偏波保持波長変換部を、直線偏光パワーアンプの後段に加えた。すなわち、光ファイバ中での非線形光学効果の一つである誘導ラマン散乱を利用し、ストークス光を発生させて長波長側にシフトさせている。ここに波長合波カプラを組み合わせることで光アイソレータとしての機能を持たせ、反射光が前段の光回路に戻ることを抑制する。構成概略を図5に示す。

平均出力は7Wであり、また、偏波消光比は25dB以上が得られた。次に、レーザ光のパルス列を光電気変換素子で電気信号に変換し、オシロスコープで観測した結果を図6,7に示す。図6はON/OFF切り替え（0%出力→100%出力）を行った際の出力信号である。パルスの繰り返し周波数は200kHzに設定しており、10μsec以内のON/OFF切り替えを実現した。また図7は強度変調（50%出力→100%出力）を行った際の出力信号であり、同様に10μsec以内の強度変調を実現した。なお、これらの制御は音響光学素子に与える信号を変化させることで自在であり、1パルス毎にパルスピッキングが可能である。また、本体にはパルスピッキングスイッチを外部信号で制御するための入力端子が設けられており、複数台のパルスファイバレーザを外部から同期させてパルスピッキング制御することが可能である。これらの機能を有する直線偏光パルスファイバレーザは、より高精度で複雑なレーザ加工への適用が期待される。

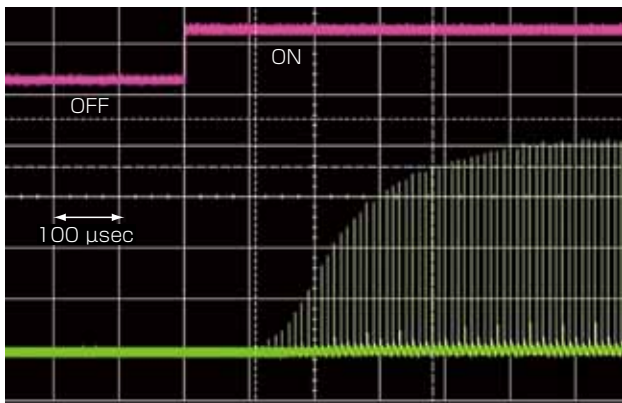


図4 ON/OFF時パルス出力時間変化
Fig. 4. Change of output signal during on-off switching.

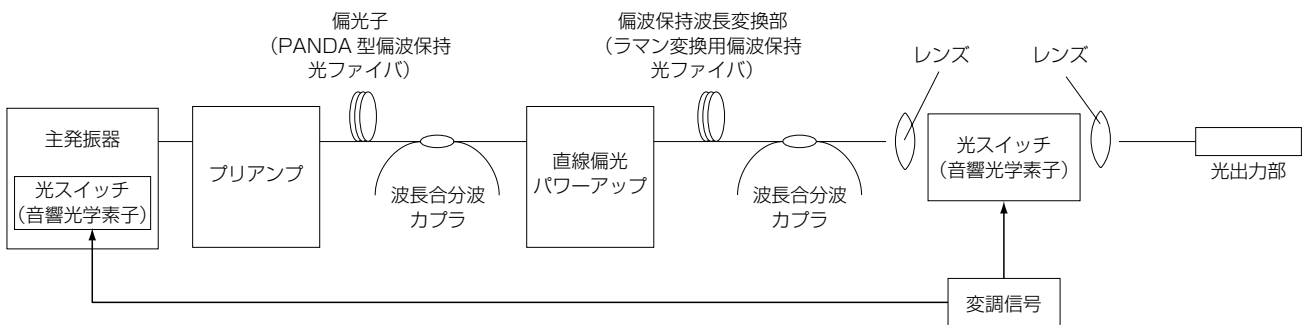


図5 パルスピッキング機能付き直線偏光パルスファイバレーザ構成概略
Fig. 5. Schematic configuration of linearly polarized pulsed fiber laser with high-speed pulse picker.

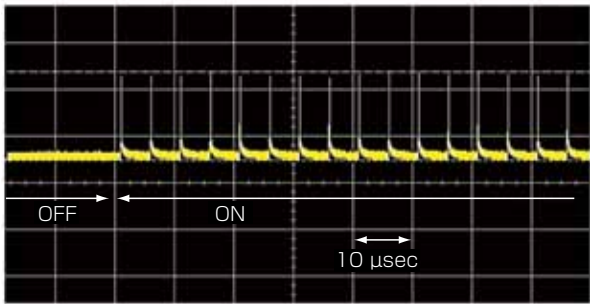


図6 ON/OFF切り替え時 (0 %出力→100 %出力) 波形信号

Fig. 6. Change of output signal during on-off switching.

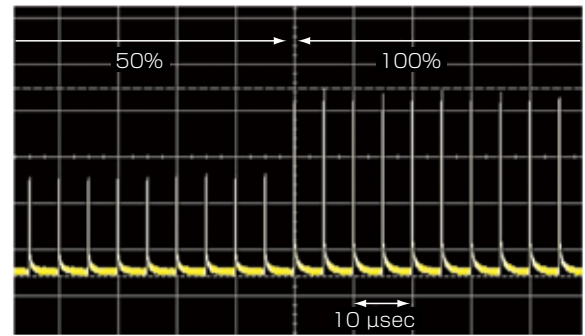


図7 強度変調時 (50 %出力→100 %出力) 波形信号
Fig. 7. Change of output signal during intensity modulation from 50 % to 100 % output.

4. む す び

レーザマーカ用パルスファイバレーザの高出力化に対する取り組みと、より高精度で複雑な加工アプリケーションに向けた、パルスレーザ光の直線偏光化と高速パルスピックアップ技術について報告した。フジクラが保有する光ファイバ技術、光部品技術をいかし、今後も特徴あるパルスファイバレーザの製品化に取り組んでいく。

参 考 文 献

- 1) M. Nakai, et. al.: "30W Q-SW fiber laser, PhotonicsWest2007," Proc. of SPIE Vol. 6453 645319-1, 2007.
- 2) フジクラ ファイバレーザホームページ <http://www.fiberlaser.fujikura.jp/>

- 3) 姫野邦治:「ファイバレーザと先進的光技術」, フジクラ技報, Vol.2, 第123号, 2012.
- 3) 柏木正浩ほか:「誘導ラマン散乱を用いたファイバレーザ用インラインアイソレータ」, レーザ学会学術講演会第30回年次大会講演予稿集, B84p-I 004, p.48, 2010.
- 4) T. Kitabayashi, et. al.: "Population inversion factor dependence of photodarkening of Yb-Doped fibers and its suppression by highly aluminum doping," OFC/NFOEC2005, OThC5, 2005.
- 5) 田中弘範ほか:「ファイバレーザにおける励起LDへの戻り光抑制構造」, レーザ学会学術講演会第27回年次大会講演予稿集, B5-18aVIII10, p.50, 2007.