

SRSを抑制した高効率10 kWシングルモードファイバレーザ

光応用技術R&Dセンター 益子 泰裕¹・清山 航²・白倉 勇紀¹・小林 拓矢¹
田久保 勇也¹・山本 達也¹・藤田 智之³・中山 通雄⁴・寺田 佳弘⁵

10 kW Single Mode Fiber Laser with High Efficiency and SRS Suppression

Y. Mashiko, W. Kiyoyama, Y. Shirakura, T. Kobayashi,
Y. Takubo, T. Yamamoto, T. Fujita, M. Nakayama, and Y. Terada

ファイバレーザは加工分野において普及が進んでいる。近年では、加工対象の拡大やエネルギー伝送分野などの新規分野への適用の可能性から、高出力かつ高ビーム品質を両立したシングルモードファイバレーザへの期待が高まっている。これまでに、当社は出力8 kWのシングルモードファイバレーザを報告してきた。本報告ではさらなる高出力化を目指し、誘導ラマン散乱（SRS）を抑制しつつも高効率であり、かつ高ビーム品質を有する10 kWシングルモードファイバレーザを実現した。

Fiber laser is becoming more popular in the processing field. In recent years, expectations for single mode fiber lasers with both high output and high beam quality have increased due to the possibility such as the expansion of processing targets and the energy transmission field. So far, we reported a single-mode fiber laser with an output of 8 kW. In this report, aiming for even higher output, we realized a 10 kW single-mode fiber laser with suppression of stimulated Raman scattering (SRS), high efficient and high beam quality.

1. ま え が き

ファイバレーザは固体レーザや炭酸ガスレーザと比較して集光性が良く、高効率なことから、金属の切断や溶接などの分野において実用化が進んでいる。例えば金属の加工では高出力化が容易なマルチモードファイバレーザが主に市場に導入されている。その一方で、シングルモードファイバレーザはマルチモードファイバレーザと比較してさらにビーム品質が良いことから、CFRPなどの難加工材料の加工や、ガルバノスキャナを用いた新規加工方法などが実現できる魅力的なレーザとして期待されている。また加工分野以外では長距離エネルギー伝送分野でも注目されており、例えば宇宙太陽光発電システム（Space Solar Power Systems；SSPS）が考案されている¹⁾。SSPSではレーザ光で遠隔地にエネルギーを効率的に供給するレーザ無線給電技術が必要となり、kWクラスのパワーを数kmの距離で伝送するという検討がJAXAやESA、NASAにおいて進んでいる。したがって近年ではシングルモードファイバレーザ

は様々な分野での利用が期待されており、高効率・高出力・高ビーム品質といったファイバレーザに対する要求や要望も増えつつある。

ファイバレーザの高出力化における課題として、誘導ラマン散乱（Stimulated Raman Scattering；SRS）の抑制があげられる。SRSはレーザ光が伝搬するファイバ（ガラス）との相互作用で発生する現象である。SRSによってレーザ光のパワーの一部が不要な光（ストークス光）へと変換され、出力不安定性による加工不良や、レーザ装置の故障を引き起こす原因となる。

これまで当社では、SRS抑制のため様々な技術開発に取り組んでおり、例えば製造現場への導入を考慮した長いデリバリファイバ長を持つシングルモードファイバレーザや、高反射材に対する加工性能を持つシングルモードファイバレーザの開発を行ってきている^{2) 3)}。レーザ出力においては8 kW出力、ビーム品質の指標であるM²値⁴⁾が1.3であるシングルモードファイバレーザを実現しており、様々な応用用途に使用可能なレーザ開発技術を保有している⁵⁾。また実際に、開発したシングルモードファイバレーザと市販のガルバノスキャナを組み合わせてCFRPの切断加工や穴あけ加工の検証を行っており、高速かつ高品質なCFRPの加工がシングルモードファイバレーザで可能であることを

1 レーザフォトリクス研究部
2 レーザフォトリクス研究部 主査
3 レーザフォトリクス研究部 グループ長
4 レーザフォトリクス研究部 上級スペシャリスト
5 レーザフォトリクス研究部 部長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
FBG	Fiber Bragg Grating	光ファイバのコアに回折格子を作製することで特定の波長の光を反射するようにしたファイバ型光部品。ファイバレーザにおいては共振器を構成するために用いられる。
M ² (エム・スクエア)	M ²	レーザ光がどれだけガウシアンビーム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。
誘導ラマン散乱(SRS)	Stimulated 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。
MOPA	Master Oscillator Power Amplifier	主発振器（または種光）で生成したレーザ光を、光増幅部で増幅してレーザを出力する方式。

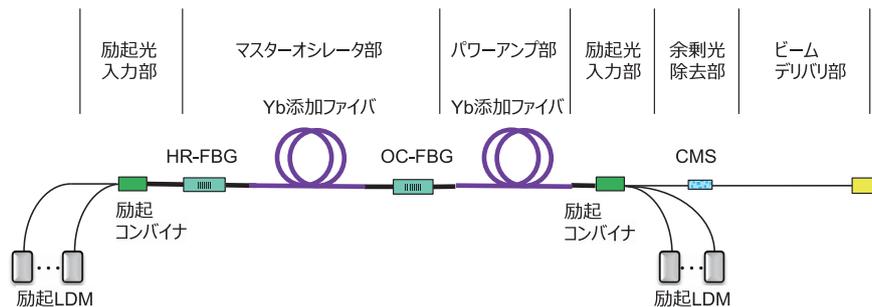


図1 10 kWシングルモードファイバレーザの構成図

Fig. 1. Schematic diagram of the 10 kW single-mode fiber laser.

実証している⁶⁾。そして今回はさらなる高出力化を目指し、SRSを抑制しながらも10 kW超の出力が可能なシングルモードファイバレーザの開発を行ったので報告する。

2. 10 kWシングルモードファイバレーザの構成

図1に作製した10 kWシングルモードファイバレーザの構成図を示す。本ファイバレーザは、マスターオシレータ(MO)部とパワーアンプ(PA)部からなるMOPA構成となる。MO部はイッテルビウム添加ファイバ(YbDF)、高反射FBG(HR-FBG)および低反射FBG(OC-FBG)からなる共振器から構成されている。MO部では複数の励起レーザダイオードモジュール(LDM)から出射された励起光を励起コンバイナで束ね、MO側の励起光入力部から

共振器に供給することで信号光を生成する。PA部にはYbDFが配置されており、PA側の励起光入力部から励起光を供給することでMO部から入力された信号光を増幅させる。PA部により増幅された信号光はクラッドモードストリッパ(CMS)からなる余剰光処理部、そしてビームデリバリ部を通じて出射端から出力する。

MOPA構造におけるSRS抑制方法として、OC-FBGを通じてMOとPAへの励起光が行き来する構造(貫通型MOPA構造)を採用している。そして、MO部のYbDFとPA部のYbDFのYb添加濃度とファイバ長を最適化することにより、通常MOPA構成と比較してファイバレーザ全体のファイバ長を短尺化している。LDMは半導体直接励起方式を採用しており、平均出力300 W、DC電力-光変換効率が50%である。また、YbDFへの吸収効率の観点か

ら励起波長は976 nmを採用しており、高い電気-光変換効率（Wall Plug Efficiency；WPE）が実現可能なレーザ構成となっている。

SRSの抑制のため、コア径を拡大したファイバの設計を行った。一般に、ファイバレーザ中を伝搬するストークス光のパワーは式（1）で表される。

$$dP_s(z) = \left[\frac{g_R P_p(z) P_s(z)}{A_{eff}} - a_s P_s(z) + g_{SR} P_p(z) \right] dz \quad (1)$$

ここで P_s はストークス光のパワー、 P_p は信号光のパワー、 z はファイバの長手位置、 g_R はラマンゲイン係数、 A_{eff} はファイバの実効断面積、 a_s はストークス光の損失、 g_{SR} は自然ラマン散乱係数である。式（1）から、コア径を拡大することにより A_{eff} を拡大するとストークス光のパワー増加が抑制されることがわかる。そして式（1）を用いて A_{eff} を変化させた場合のストークス光のパワーの計算を行った結果、 A_{eff} を1000 μm^2 とすることで貫通型MOPA構造におけるファイバ短尺化の効果とあわせて10 kW以上の出力が可能で見積もりを得た。

一方でコア径を大きくするとファイバ中を伝搬可能なモード数が増加するため、マルチモード化によるビーム品質の悪化が生じる。ファイバのパラメータを適切に設計するとともに、装置作製時にはファイバ同士の融着接続方法の改良を行うことにより M^2 値の悪化を抑制している。

図2に今回作製したレーザ装置の外観を示す。寸法はそれぞれ幅（W）710 mm × 奥行（D）1100 mm × 高さ（H）1200 mmとなっており、加工用マルチモードファイバレーザと同程度の大きさとなっている。また、筐体外からのビームデリバリ長は3.4 mとしており、加工時に必要な長さを確保している。



図2 作製したファイバレーザの外観

Fig. 2. Appearance of the 10 kW single-mode fiber laser.

3. 10 kWシングルモードファイバレーザの諸特性

図3に作製したレーザ装置の出力特性を示す。MO部およびPA部への合計投入励起光量12.2 kWのときに光出力は10.7 kWであり10 kW超の高出力を達成している。さらに、励起光-信号光の変換効率の指標であるスロープ効率 η_{sp} は87.4%、出力10.7 kW時のWPEは44.5%と見積もられ高効率なレーザが実現できている。

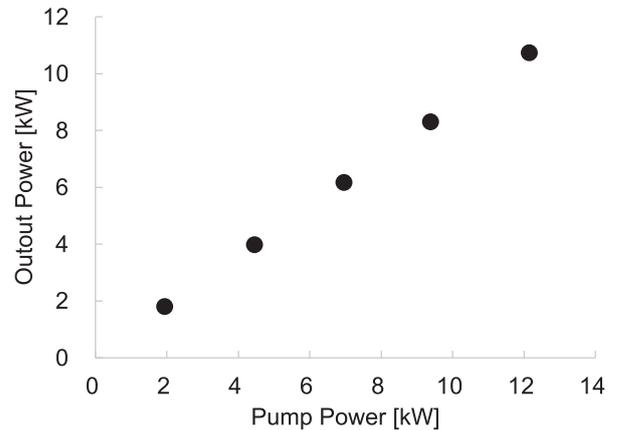


図3 作製したレーザ装置の出力特性

Fig. 3. Output characteristics of the fabricated fiber laser device.

図4に作製したレーザ装置のビーム品質特性を示す。最高出力時の M^2 値は2.25と低 M^2 値を有していることが確認でき、様々な応用に使用可能な高ビーム品質を実現している。一方で出力の増加に伴い M^2 値が上昇しており、ビーム品質が悪化していることがわかる。ビーム品質の悪化はコア径拡大による伝搬モード数の増加が原因と考えられ、今後はファイバ設計の最適化等を行いさらなるビーム品質の向上を検討する。

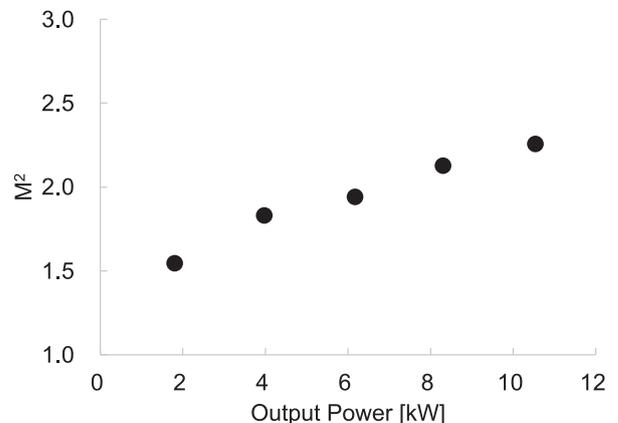


図4 作製したレーザ装置のビーム品質

Fig. 4. Beam quality of the fabricated fiber laser device.

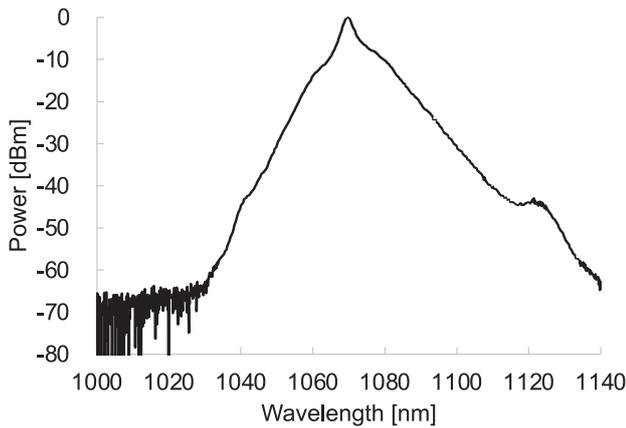


図5 光出力10.7 kWでの光出力スペクトル

Fig. 5. Output spectra at the laser output power of 10.7 kW.

図5に作製したレーザ装置の光出力スペクトルを示す。発振波長1070 nmの信号光に対して、ストークス光は波長1125 nm付近で生じる。光出力スペクトルから信号光に対するストークス光のパワーの比率を算出したところ40 dB以上であり、10 kW超の光出力においてもSRSを十分に抑制できていることを確認できた。

次に作製したレーザ装置において連続動作試験を行った。図6に平均出力11.0 kW、10分間の連続運転を行い、出力安定性を評価した結果を示す。パワー測定系が安定する35秒以降の出力変動率（ばらつき）は0.14%であり、高出力でありながら極めて安定した連続動作が実現できていることが確認できた。今回作製したレーザ装置は安定した加工応用が実現可能なレーザであるといえる。

4. むすび

本報告では光回路構成とファイバパラメータを設計することで、SRSを抑制しながら高出力10 kW超および高ビーム品質を達成した。今後、当社の技術によりシングルモードファイバレーザの更なる高出力化、高ビーム品質を実現することで、様々な産業分野への社会貢献が可能であると考えている。

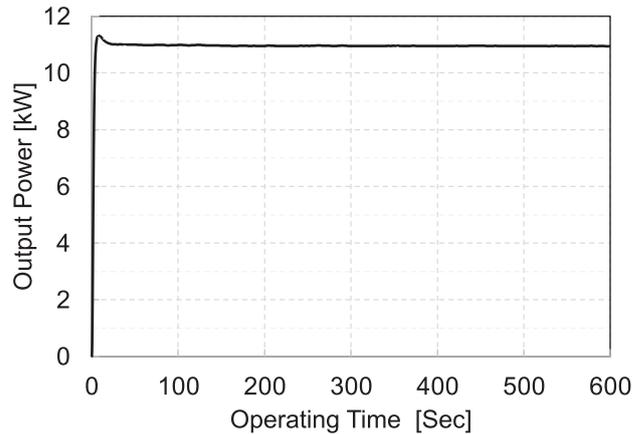


図6 10分間連続運転の出力

Fig. 6. Output power at 10 minutes of continuous operation.

参考文献

- 1) <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-lssps.html> (2024.1.23 現在)
- 2) 生駒ほか：「3 kWシングルモードYbファイバレーザの特性と加工実証」、フジクラ技報、第130号、pp.19-21、2017
- 3) 田久保ほか：「5 kWシングルモードファイバレーザ」、フジクラ技報、第131号、pp.32-34、2018
- 4) A. E. Siegman, "Defining, measuring, and optimizing laser beam quality," Proc. SPIE 1868, Laser Resonators and Coherent Optics: Modeling, Technology, and Applications, (13 August 1993)
- 5) Y. Wang, et. al., "8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad," Proc. SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems, 1126022 (21 February 2020)
- 6) Y. Takubo, et. al., "Drilling of CFRP with Reduced and Non-Directional Heat-Affected Zone by Using 3-kW CW Single-Mode Fiber Laser" J. Laser Micro/Nanoen. Vol. 15, No. 3, pp.191-194, 2020