

2 kW出力シングルモードファイバレーザ

先端技術総合研究所 益子泰裕¹・NGUYEN Huy Khanh¹・柏木正浩²
北林和夫³・島研介⁴

2 kW Single-mode Fiber Laser

Y. Mashiko, H. K. Nguyen, M. Kashiwagi, T. Kitabayashi, and K. Shima

近年、高出力かつ優れたビーム品質をもつレーザ発振器としてファイバレーザが注目を集めている。シングルモードファイバレーザのさらなる高出力化のためには光ファイバの非線形光学効果の一つである誘導ラマン散乱（SRS）の発生を抑制することが重要である。ファイバのパラメータを適切に設計することで、20 mのデリバリファイバ長を有しながらも、2 kW出力時においてもSRSが十分に抑制され、かつビーム品質に優れたシングルモードファイバレーザを実現した。

Recently fiber lasers attract much attention as lasers having high power and excellent beam quality. It is very important for enhancement of the output power of a single-mode fiber laser to suppress generation of Stimulated Raman Scattering (SRS), which is a kind of nonlinear optical effects in an optical fiber. We have achieved 2-kW single-mode fiber laser that has well-suppressed SRS and excellent beam quality even with a 20-m long delivery fiber by designing properly the parameters of the fibers in the laser.

1. ま え が き

微細加工や長距離エネルギー伝送など様々な分野で高出力かつビーム品質の良いレーザが必要とされている。ファイバレーザは、発振するモードがファイバの伝搬可能な横モードに制限されるため、優れたビーム品質を実現するレーザとして注目を集めている。しかしながら、伝搬可能な横モードの数を制限するためにファイバのコア径を小さくした場合には、伝搬する光の実効断面積が小さくなりレーザ光のパワー密度が大きくなる。その結果、非線形光学効果の一つである誘導ラマン散乱（Stimulated Raman Scattering, 以下SRSと記す）が発生する。ファイバレーザにおいてSRSが発生すると、レーザ光パワーがストークス光に移り出力光が不安定になるなどの問題が生じる。また、SRSはレーザ加工などレーザ装置の実用場面において、被加工材料やビーム経路中の光学系からの反射光がある場合にも発生しやすくなる。

またレーザ装置の実用上、レーザ発振器からレーザ出射光学系に至るまでのレーザ光の伝送には、光学系の調整が不要であることからファイバを用いることが好まれている。そのときの伝送用のファイバ（以下、デリバリファイバと記す）長は、レーザを組み込んだシステムの

規模にもよるが10～20 mのものが多く用いられている。一方、デリバリファイバを長くすることはSRSの発生を増加させてしまう欠点もある。

以上でのべたようにビーム品質に優れたレーザ発振器をレーザ装置の実用性を損なうことなく高出力化するためには、ファイバコア径やファイバ長と、SRS発生とのトレードオフ関係を打破することが求められる。

これまでに当社は、光通信分野でつきかかってきた光ファイバ技術、光部品技術、光接続技術、高出力半導体レーザ技術などを用いて、シングルモード動作するファイバレーザユニットを組み合わせたkW級のマルチモードファイバレーザを製品化しており¹⁾、ファイバレーザユニット出力として1 kWまでを実用化している。われわれは、レーザ装置の実用性を考慮し20 mのデリバリファイバ長を有しながらも、2 kW出力時においてもSRSが十分に抑制され、かつビーム品質に優れたシングルモードファイバレーザを実現した。本報告ではその内容についてのべる。

2. ファイバ設計

ステップ型光ファイバを考慮した場合、伝搬可能な横モード数と密接な関係のあるV値は下記の式で与えられる²⁾。

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} NA \dots\dots\dots (1)$$

1 ファイバレーザ研究部
2 ファイバレーザ研究部（科学博士）
3 ファイバレーザ研究部 グループ長
4 ファイバレーザ研究部 次長

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。
YbDF	Ytterbium Doped Fiber	コアに希土類元素であるイッテルビウムを添加した光増幅用ファイバ。
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光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。
NA	Numerical Aperture	開口数。光ファイバへの入射光量を表す尺度として用いられる。

ここでNAは光ファイバの開口数 (Numerical Aperture) で、

$$NA \equiv \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} \dots\dots\dots (2)$$

と定義される。ここでλ₀は光ファイバの動作波長、aはファイバコアの半径、n_{core}とn_{clad}はそれぞれファイバのコアとクラッドの屈折率である。ファイバレーザでは、レーザ発振器内部においてファイバを配置、収納するときには円形に巻くことや固定を行う必要がある。そのため、ファイバの曲げ損失やマイクロベンド起因のモード結合によるビーム品質の悪化を考慮しなくてはならない。これらを守るためには大きなNAを有したファイバが有利であり、さらにファイバ製造時における屈折率制御の不安定性を避けるためにもNAはある一定値以上にするのが好ましい。一方で、NAを大きくすることはV値を増加させ、すなわち伝搬可能なモード数を増やすことになる。高次のモードは低次のモードに比べビーム品質が

悪い。ビーム品質を良く保つためにはV値を可能な限り小さくする必要がある。図1に示すのは、ステップインデックスファイバを仮定した場合の、さまざまなV値における基本モードの実効断面積と、ファイバのNAとの関係である。ここでλ₀はファイバレーザの発振波長である1080 nmを用いた。

続いて許容されるファイバ長を大まかに見積もるため、ラマン閾値パワーについての計算を行った。ファイバにおいてSRSのラマン閾値パワーP_{th}は出力光とストークス光のパワーが等しくなる時のファイバへの入力パワーとして定義され、式(3)の関係が知られている³⁾。

$$P_{th} \approx \frac{16 A_{eff}}{g_R L} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、A_{eff}は光の実効断面積、g_Rはファイバのラマン利得係数、Lはファイバ長である。

図2に閾値パワーが1 kW, 2 kW, 3 kWを満たすファイバ長とA_{eff}との関係を示す。ここで、石英ガラスのラ

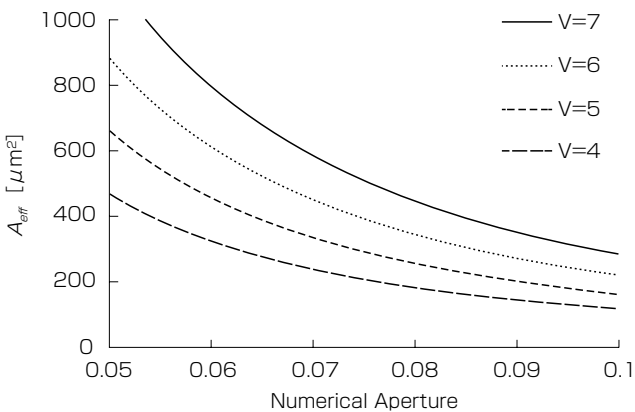


図1 ファイバのさまざまなV値における波長1080 nmの基本モードの実効断面積とNAの関係
Fig. 1. The relation between effective area of the fundamental mode and Numerical Aperture for various V parameters at 1080 nm.

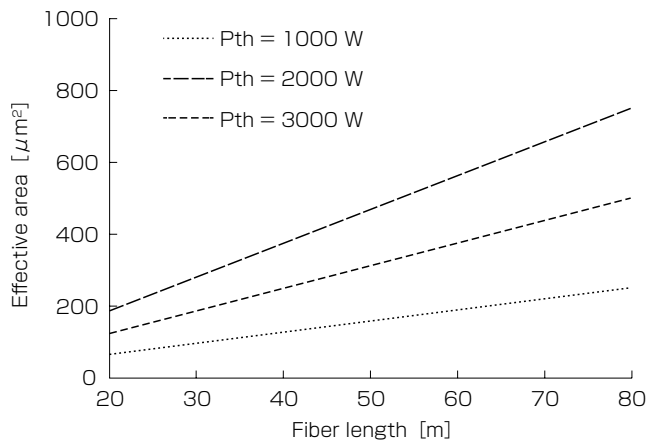


図2 SRS閾値が1, 2, 3 kWを満たすA_{eff}とファイバ長との関係
Fig. 2. Calculated value of the effective area of fundamental mode versus fiber length for the SRS threshold powers of 1, 2, and 3 kW.

マン利得係数 g_R は 1×10^{-13} [m/W] 程度であるが、この値は出力光とストークス光の偏光状態がファイバの中で一定に保たれている場合を仮定している。一方、作製するファイバレーザは偏光依存性のないファイバを使用することによりランダム偏光で発振する。ランダム偏光時には g_R の値は半分となることが知られており³⁾、ここでは g_R は 5×10^{-14} [m/W] として計算を行っている。

ファイバレーザの試作に用いる各種ファイバの屈折率構造、すなわちV値、 A_{eff} およびNAは図1および図2の関係を用いて、ファイバレーザ出力が2 kW以上においてもSRSが閾値を超えないことに加え、99%以上の励起光吸収率があること、デリバリファイバ長は20 m以上確保できること、高次モード発生が抑えられ、かつ基本モードの曲げ損失が生じないことなどを総合的に勘案して決定した。設計した屈折率構造ではレーザの発振波長において、ファイバはマルチモード領域であるが、基本モードが優勢にレーザ発振するようにイッテルビウム添加ファイバ (Ytterbium Doped Fiber, 以下YbDFと記す) のYb添加濃度分布を設計した。

3. 2 kW出力シングルモードファイバレーザの構成

図3に作製した2 kWシングルモードファイバレーザの光学部の構成、図4に装置外観を示す。ファイバレーザはレーザ発振に必要な励起用半導体レーザダイオードモジュール、ファイバグレーティング (Fiber Bragg Grating, 以下FBGと記す)、励起コンバイナ、YbDF、デリバリファイバ、レーザ光出射端から構成される。光共振器への励起光入力は双方向・端面励起方式を用いている。半導体レーザダイオードモジュールの中心波長は915 nmである。モジュール内の各半導体レーザダイオード (LD) はオプトエナジー社製である。搭載したLDは非対称DCH構造を用いることにより高出力においても高い光学損傷に対する耐性を持つ⁴⁾。励起コンバイナから光共振器に入力される励起光は前方と後方あわせて最大3 kWまで入力可能にした。レーザを発する光共振器はYbDF、高反射FBG (HR-FBG) と低反射FBG (OC-FBG) から構成されている。各FBGの反射中心波長は1080 nmでありHR-FBGとOC-FBGの反射率はそれぞれ99%、10%である。さらに、ファイバ接続部においては、精密にコア同士のアライメントを行ない、ファイバレーザ発振時の高次モードの発生を抑制している。

4. 製作したファイバレーザの特性

4.1 出力特性

図5に作製した2 kWシングルモードファイバレーザの励起光パワーに対する出力光パワーを示す。励起光パワーが2860 Wのときに出力光パワーは2000 Wを示した。励起光から出力光へのエネルギー変換におけるスロ

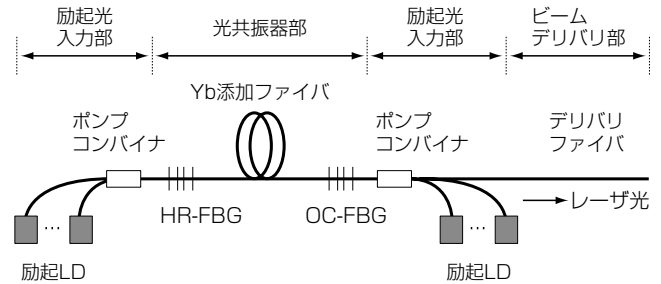


図3 2 kWシングルモードファイバレーザ構成図
Fig. 3. Schematic configuration of fabricated 2 kW single-mode fiber laser with a 20-m long delivery fiber.

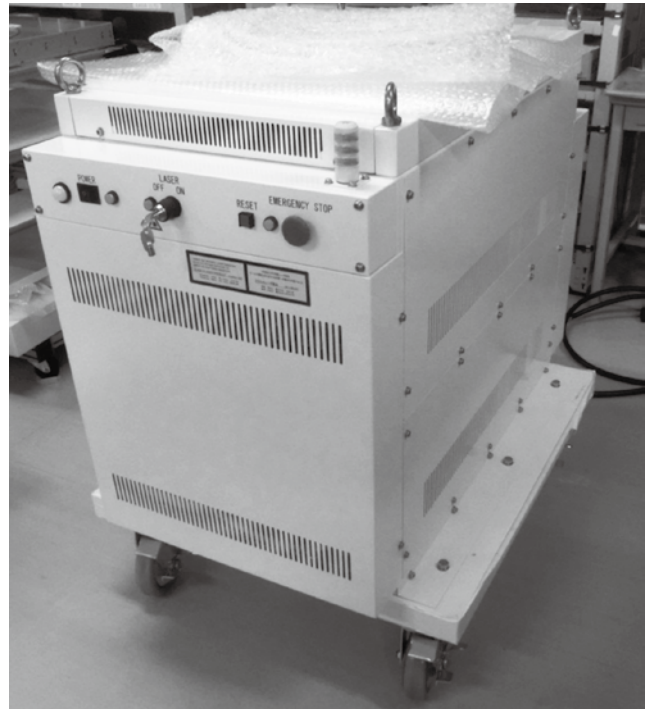


図4 製作したファイバレーザの外観
Fig. 4. Appearance of 2 kW single mode fiber laser.

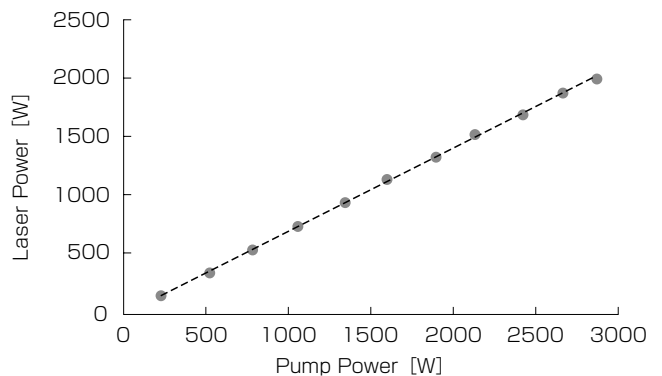


図5 製作した2kWシングルモードファイバレーザの出力特性
Fig. 5. Output characteristics of 2 kW-single mode fiber laser.

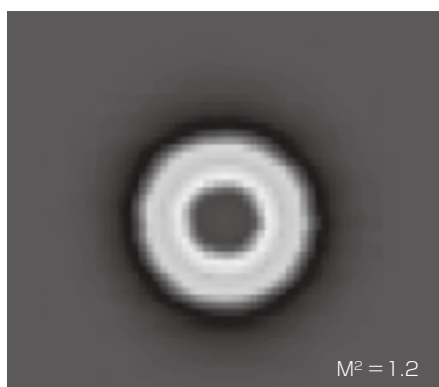


図6 焦点位置でのビームプロファイル
Fig. 6. Beam profile at focal point.

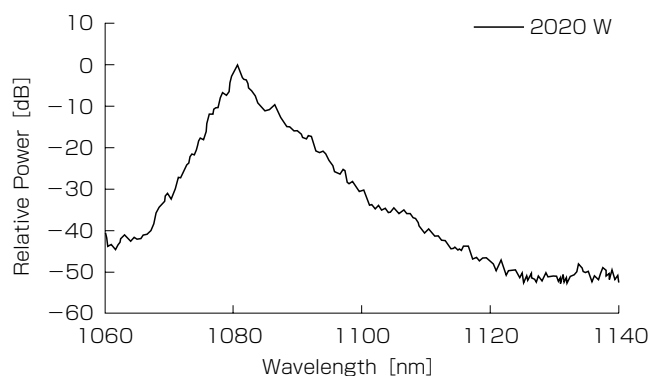


図7 出力光スペクトル
Fig. 7. Laser output spectra.

ープ効率は 70 %であった。図 6 に焦点位置における出力光のビームプロファイルを示す。出力光の断面強度分布はガウシアンに近い形状が得られている。また、ビームプロファイル測定から見積もられた M^2 値は 1.2 であり、出力光としてほぼ回折限界に近い良好なビーム品質を得られていることが確認された。

4. 2 出力光の波長スペクトル

図 7 に出力光パワーが 2020 W のときの出力光のスペクトルを示す。2020 W の出力時においてもストークス光は観測されず出力光とストークス光とのパワーの比率は 50 dB 以上であった。つまり、デリバリファイバ長を 20 m にした場合において 2020 W 出力時でも SRS が十分に抑制できていることが実験から確認できた。ストーク

ス光のレベルからファイバ中の SRS 利得も片道 40 dB 未満であると推測される。これはレーザ光とその -50 dB のレベルのストークス光それぞれが対象物で反射され、それらの 10 % がファイバレーザに戻ってきた場合でも、ファイバレーザの出力変動は 1 % (-20 dB) 未満であることを意味する。レーザ溶接などの金属加工において加工中に常時 10 % の反射光が光ファイバのコアに結合されることはないことから、今回製作した 2 kW シングルモードファイバレーザは加工応用においても十分に安定に動作するレーザ発振器であるといえる。

5. む す び

ファイバパラメータを適切に設計することで、デリバリファイバ長を 20 m まで長尺化した場合においても、2 kW 出力時に出力光と誘導ラマン散乱のストークス光とのパワーの比率が 50 dB 以上に抑制され、かつビーム品質の劣化も抑制されたファイバレーザを製作した。ビーム品質も M^2 が 1.2 でありほぼシングルモード発振していることも確認された。さらにこのファイバレーザを 5 ~ 6 台出力結合させることによる 10 kW 級のマルチモードファイバレーザの実現も視野に入っている。また、励起用半導体レーザダイオードモジュールの高出力化も進展しており、3 kW 以上のシングルモード出力も達成可能な見込みを得ている。今後さらなるシングルモードファイバレーザの高出力化に向けて SRS 抑制技術の開発を継続していく。

参 考 文 献

- 1) 杉本亮ほか：「4 kW 出力連続波ファイバレーザ」, フジクラ技法, Vol.1, No.126, 2014
- 2) 左貝潤一：導波光学, 共立出版, 2004
- 3) G. P. Agrawal : Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition, Academic Press, Cambridge, Massachusetts , pp.274-279, 2006
- 4) Y. Yamagata, et. al.: "915 nm High-power Broad Area Laser Diodes with Ultra-small Optical Confinement Based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH)," Proc. of SPIE, Vol.9348, pp.93480 F-1-93480 F-10, 2015