

パルス幅可変の高ビーム品質・高ピークパワー パルスファイバレーザの開発

Development of High Beam Quality and High Peak Power Pulsed Fiber Laser with Flexible Tunability of Pulse Width

河原 亮*¹
Ryo Kawahara

橋本 博*¹
Hiroshi Hashimoto

Jeffrey W. Nicholson*²

大谷 栄介*¹
Eisuke Otani

松下 俊一*¹
Shunichi Matsushita

〈概要〉

レーザ加工分野において、加工対象物へ入射するレーザ光を時間的に制御できるパルスレーザは、マーキングや微細加工の用途で普及が進んでいる。このような用途では、加工条件の最適化や、加工速度の向上、および加工領域の拡大のためには、パルス幅や繰返し周波数の可変性や、ビーム品質を維持したまま高出力化することが求められる。当社ではこの要請を満たすために、直接変調型のパルス光源とその出力を増幅するファイバ型の光増幅器を用いた、MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 構成のパルスファイバレーザを開発した。本パルスファイバレーザは、光ファイバ中の非線形効果を抑制し高ピークパワーの光パルス出力を実現するために、光増幅器を構成する増幅用ファイバとしてOFS製の特殊ファイバを用い、パルス幅がサブナノ秒～数ナノ秒の時間領域において、100 kW超の高ピークパワー増幅と高ビーム品質出力を実現した。

1. はじめに

レーザ加工には、高速かつ高品質な加工が要求される。レーザ加工の多くはレーザ光が物質に吸収されて発生する熱エネルギーを加工に利用するが、加工対象に投入する熱量を増加させると、加工する物質の特性によっては加工断面に熱が残留することでHAZ (Heat Affected Zone) と呼ばれる熱影響層が形成され、加工品質の劣化要因となる。これを抑制するには、加工対象に投入する熱量を高精度に制御することが有効であるため、光エネルギーを時間的に制御できるパルスレーザが利用される。

光ファイバを用いたパルスファイバレーザでは、Qスイッチ方式を用いたパルス幅がサブマイクロ秒(数百ナノ秒)程度のもものが、主にマーキング用途に適用されている。また、金属やセラミックス、樹脂などの微細加工用途に、パルス幅が数ナノ秒～数十ナノ秒のもの適用が進んでいる。このようなパルスファイバレーザを用いたレーザ加工においては、加工条件の最適化や加工領域の拡大のために、パルス幅の短パルス化や、繰返し周波数の可変性が求められる。

こうした背景のもと我々は、ナノ秒領域でパルス幅および繰返し周波数が可変のパルスファイバレーザの開発を進めてきた¹⁾。

さらに、半導体レーザを直接変調させた光パルスを、特殊ファイバを用いたパルス増幅と併せることで、従来は難しかったパルス幅がサブナノ秒～数ナノ秒の時間領域で、高ビーム品質かつ高ピークパワーの光パルス出力を実現した。本論文では、そのシード光源および高出力光パルス増幅の技術紹介と、その特性について報告する。

2. パルスファイバレーザ

図1に、パルスファイバレーザの基本構成を示す。シード光源からの光パルス出力を、ファイバ型光増幅器により増幅する、MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 構成である。本構成の大きな特長は、シード光源の駆動を制御することで、パルス幅や繰返し周波数などのパルスレーザの出力特性を自由に制御できること、および光ファイバ増幅器を多段(図1では2段構成)に接続することで高出力化が可能となることである。また、高ビーム品質での光増幅の実現のために、ブースタアンプの励起光源には、基底モードで高パワー出力が可能なCRRL (Cascaded Resonator Raman Laser) を用いた²⁾。

*¹ 研究開発本部 コア技術融合研究所

*² OFS Laboratories

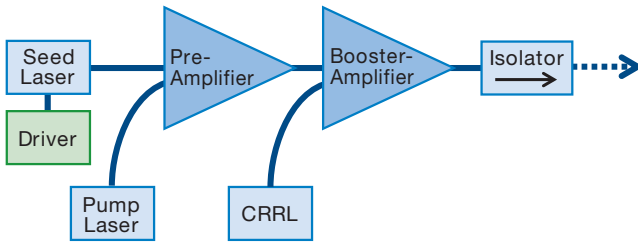


図1 パルスファイバレーザの基本構成
Configuration of pulsed fiber laser.

なお、高出力化に伴い光パルスのピークパワーが大きくなるため、光ファイバ中の非線形効果によるパルス形状の劣化やエネルギー拡散が生じる。その抑制のために、増幅用の光ファイバの有効コア断面積を拡大するなどの対策があるが、ピークパワーとビーム品質にトレードオフの関係が生じることが課題となる。

そこで、出力特性の自由度が高く、安定した光パルスを生成するシード光源と、非線形効果を抑制して高利得・高出力を実現するファイバ型光増幅器を新たに開発した。

3. パルス幅可変シード光源の開発

3.1 パルス発生方式

MOPA構成のパルスファイバレーザのシード光源において、パルス幅や繰返し周波数といった特性を制御可能な光パルスの発生方法として、光変調器などの光学シャッタを光共振機内に配置し、時間的に共振器のQ値を変化させて光パルスを発振させるQスイッチ方式、CWレーザからの出力をAOM (Acousto-Optic Modulator) やEOM (Electro-Optic Modulator) などの光強度変調器で光パルスを切り出す外部変調方式、シード光源の励起電流を直接変調して発振を時間的に制御する直接変調方式などがある。

表1にパルスファイバレーザのパルス発生方法と、その特長を示す。

表1 パルスファイバレーザのパルス発生方法
Pulse generation method of pulsed fiber laser.

方式	Qスイッチ	外部変調		直接変調
		AOM	EOM	
パルス幅	数10 ns ~ 数100 ns	数10 ns ~	数10 ps ~	数100 ps ~
繰返し周波数	数10 kHz ~ 50 kHz	kHz ~ 10 MHz		
長所	高パルスエネルギー	パルス幅、繰返し周波数 広範囲な可変性		
短所	可変範囲が狭い	高速応答が困難	高消光比化が困難	高出力化がやや困難

Qスイッチ方式は、比較的高いエネルギーの光パルスを発生できるが、パルス幅や繰返し周波数は共振器の特性に依存するため、その可変範囲が制限される。

AOMやEOMを用いた外部変調方式は、変調器に与える駆

動パルスを制御することでパルス幅や繰返し周波数といったパルス出力特性の広範囲な可変性を実現できるが、AOMを用いた外部変調はAOMの応答速度が制約となりパルス幅が数ナノ秒の光パルスの生成は困難である。また、EOMを用いた外部変調は、パルス幅が数十ピコ秒の光パルスを生成できるが、光パルスのON/OFF消光比が低いことが課題となる。

一方で直接変調方式は、半導体レーザの駆動電流を直接変調するため、外部変調と同等の特長を有しながら、パルス幅が数ナノ秒の光パルスの生成が可能である。また、Qスイッチ方式と比較すると、出力される光パルスのエネルギーがやや小さくなるが、MOPA構成を用いて後段の光増幅器で光パルスを増幅することで、レーザ加工に必要なパルスエネルギーを得ることができる。

3.2 直接変調型シード光源

図2に、直接変調型のシード光源の基本構成を示す。シード光源は、光パルスを発生する半導体レーザ、半導体レーザを駆動する駆動IC、およびそれらを制御するための制御部にて構成される。なお、今回の開発に用いた半導体レーザの発振波長は1550 nmである。制御部では、デジタル回路により駆動用の電気パルス信号を生成しており、上位装置からの指令に応じて、パルス幅や繰返し周波数の制御が可能な構成となっている。また、制御部からLDの制御温度を設定することにより、光パルスの中心波長を調整できる。

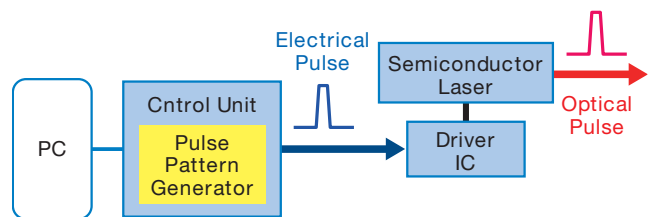


図2 直接変調型シード光源の基本構成
Configuration of direct modulated seed laser.

図3に、半導体レーザの直接変調による光パルスの時間波形を示す。1.6 ns ~ 200 nsの範囲のパルス幅において、安定した光パルスが出力していることが確認できる。なお、この時の光パルスのピークパワーは、およそ20 mWである。

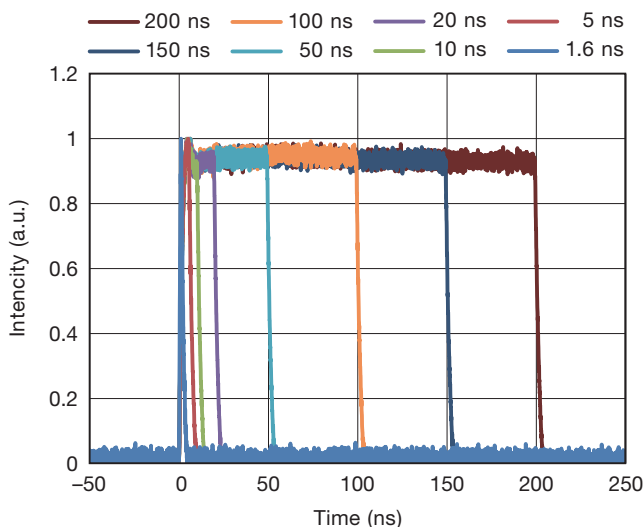


図3 直接変調型シード光源による光パルス波形 (パルス幅: 1.6 ns ~ 200 ns, 繰り返し周期: 100 kHz)
Optical pulse shape from direct modulated seed laser. (Pulse width: 1.6 ns - 200 ns, Repetition rate: 100 kHz)

4. 高出力光パルス増幅器の開発

4.1 高出力光増幅ファイバ

図1に示したように、シード光源で生成した光パルスを増幅する光増幅器は、プリアンプとブースタンプの2段構成とした。プリアンプには通常のSMF (Single Mode Fiber) を使用し、光パワーが増大するブースタンプには、高出力化に伴う非線形現象を抑制するために、高出力光増幅用の特殊ファイバを使用した。

図4に、各光ファイバの有効コア断面積 (A_{eff}) の比較を示す。通常のSMFは、有効コア断面積が数十 μm^2 で、基底モード (LP_{01}) の単一モードのみを伝播する。一方で、高出力光増幅用の特殊ファイバは、有効コア断面積をSMFよりも拡張することで、光ファイバ中の光エネルギー密度の上昇を抑え、非線形現象を抑制する構成である。

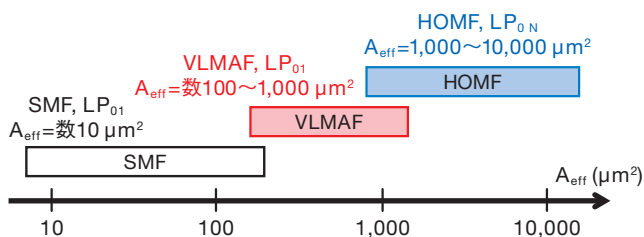


図4 光ファイバの波長1550 nmにおける有効コア断面積の比較
Comparison of A_{eff} of optical fiber at wavelength of 1550 nm.

高出力光増幅用の特殊ファイバの1つであるVLMAF (Very-Large Mode Area Fiber) は、有効コア断面積を数十 μm^2 に拡張した光ファイバである^{3),4)}。有効コア断面積の拡張により光ファイバ中での単一モード性が劣化するが、光ファイバの構造の最適化と、基底モードで出力するCRRLを励起光源に用いてコア励起することで、増幅ファイバ中での高次モード

の利得を抑制し、高効率な基底モードの出力が可能となる。

一方、もう1つの高出力光増幅用の特殊ファイバであるHOMF (Higher Order Mode Fiber) は、有効コア断面積が1000 ~ 10000 μm^2 と大きい光ファイバ中の高次モードの伝播を利用し、VLMAFよりもさらに非線形効果を抑制した光ファイバである^{5),6)}。光ファイバの構造を最適化することにより、光ファイバ中では単一的に選択された高次モードにて伝播することが特長である。

図5に、HOMFを用いた高出力光増幅器の基本構成を示す。入力側で、基底モードで入力する信号光と励起光を長周期回折格子 (LPG: Long Period Grating) にて高次モードに変換した後、HOMF中を伝播しながら高次モードの信号光が増幅される。この増幅された高次モードの信号光は、出力側で再びLPGにて基底モードに変換される。

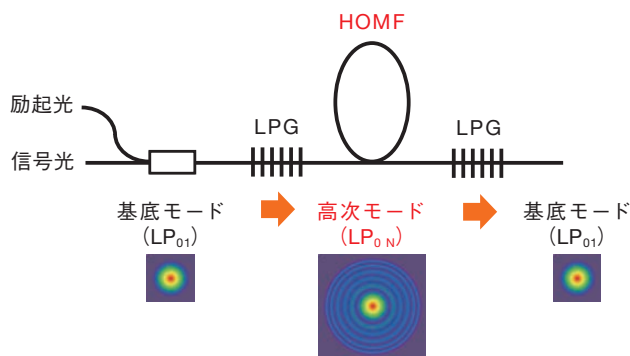


図5 HOMFを用いた高出力光増幅器の基本構成
Configuration of high power optical amplifier using HOMF.

4.2 HOM-EDFAによるパルス増幅

ブースタンプの増幅ファイバをエルビウム添加HOMFとし、励起光源には1480 nmのCRRLを用いて、光パルスの増幅実験を行った。なお、ブースタンプ (HOM-EDFA: Higher Order Mode-Erbium Doped Fiber Amplifier) への入力条件は、パルス幅: 1.5 ns, 平均パワー: 50 mW, 繰り返し周波数: 71.4 kHzである。

図6に、HOM-EDFAの励起パワーに対する出力パワー特性を示す。パルス増幅後の平均出力パワーは10 W以上を実現している。

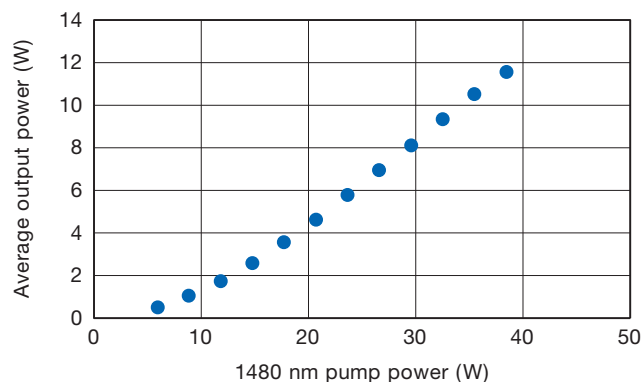


図6 HOM-EDFAの出力パワー特性
Output power from HOM-EDFA.

図7に、平均出力パワーが10 Wにおける、HOM-EDFAから出力される光パルス波形を示す。光パルスのパルス幅(FWHM: Full Width Half Maximum)は1.4 nsとなった。なお、この時のピークパワーの換算値は100 kWである。

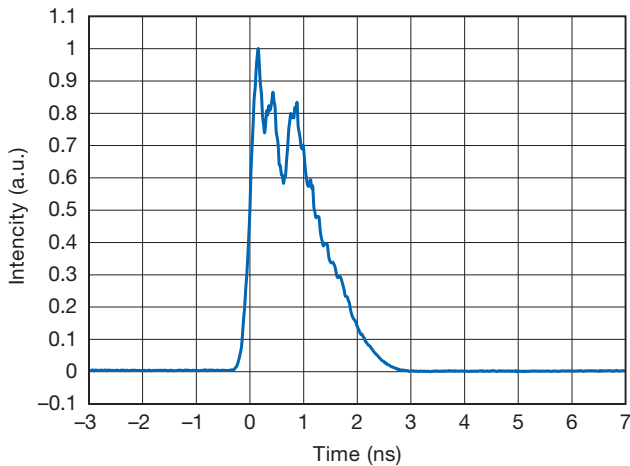


図7 HOM-EDFA 出力の光パルス波形
(繰返し周波数: 71.4 kHz, 平均出力パワー: 10 W)
Optical pulse waveform of HOM-EDFA output.
(Repetition rate: 71.4 kHz, Average output power: 10 W)

図8に、平均出力パワー 10 Wにおける、HOM-EDFA出力の光スペクトルを示す。スペクトル上における、ノイズレベルに対する信号レベルは25 dB以上と、良好なSNR (Signal-to-Noise Ratio) を実現している。

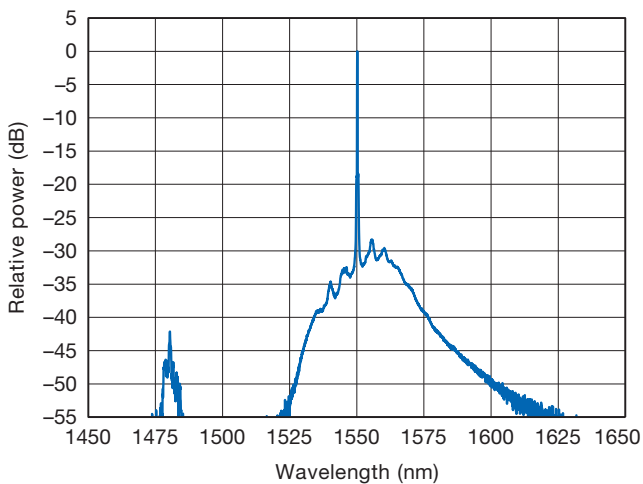


図8 HOM-EDFA 出力の光スペクトル
(繰返し周波数 71.4 kHz, 平均出力パワー 10 W)
Optical spectrum of HOM-EDFA output.
(Repetition rate: 71.4 kHz, Average output power: 10 W)

図9に、出力パルス光のビーム品質を示す特性指標である、 M^2 値の測定結果を示す。横軸はビーム伝搬方向の位置、縦軸はX方向、Y方向それぞれのビーム径であり、それぞれに対して曲線フィッティングを行い、その近似曲線から M^2 値を導出する⁷⁾。結果、X方向、Y方向ともに、 M^2 値は1.2以下であった。このことは、ビーム形状が理想的なガウシアン形状に近く、高いビーム品質を維持していることを示している。

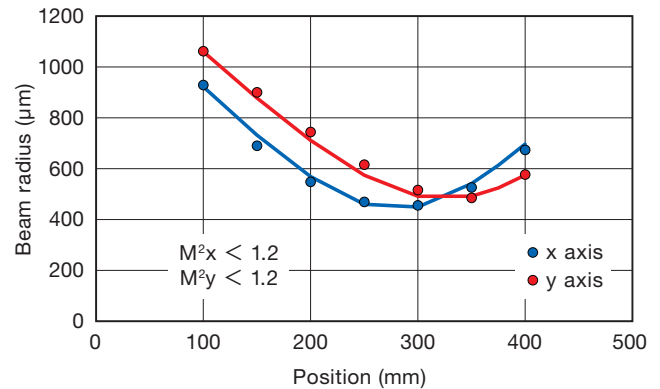


図9 HOM-EDFA 出力の M^2 測定結果
(繰返し周波数 71.4 kHz, 平均出力パワー 10 W)
 M^2 measurement of HOM-EDFA output.
(Repetition rate: 71.4 kHz, Average output power: 10 W)

4.3 VLMA-EDFAによるパルス増幅

次に、ブースタアンプの増幅ファイバをエルビウム添加VLMAFとした時の、光パルス増幅実験結果を示す。励起光源には1480 nmのCRRLを用いた。また、ブースタアンプ(VLMA-EDFA: Very Large Mode Area-Erbium Doped Fiber Amplifier)への入力条件は、パルス幅: 1.2 ns, 平均パワー: 32 mW, 繰返し周波数: 71.4 kHzである。

図10に、VLMA-EDFAの励起パワーに対する出力パワー特性を示す。パルス増幅後の平均出力パワーは最大12.7 Wであった。

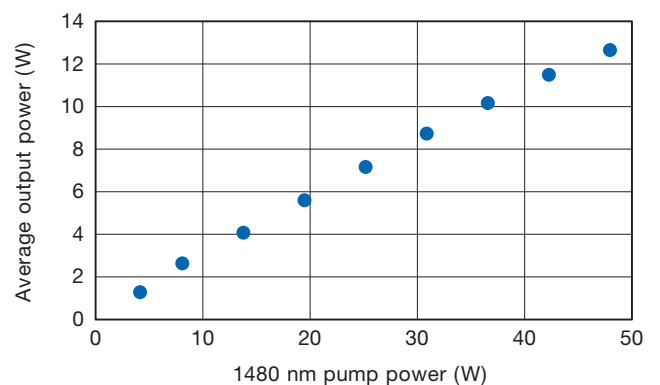


図10 VLMA-EDFAの出力パワー特性
Output power from VLMA-EDFA.

図11に、最大平均出力パワーにおける、VLMA-EDFAから出力される光パルス波形を示す。光パルスのパルス幅(FWHM)は0.8 nsとなった。また、この時のピークパワーの換算値は約220 kWと、高ピークパワー出力を実現した。

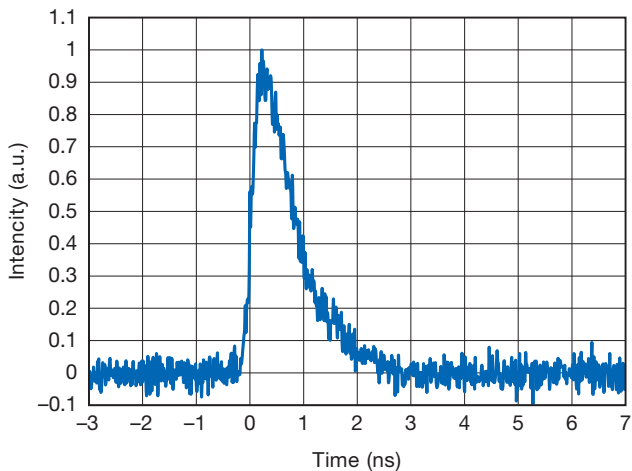


図11 VLMA-EDFA 出力の光パルス波形
(繰返し周波数: 71.4 kHz, 平均出力パワー: 12.7 W)
Optical pulse waveform of VLMA-EDFA output.
(Repetition rate: 71.4 kHz, Average output power: 12.7 W)

図12に、最大平均出力パワーにおける、VLMA-EDFA出力の光スペクトルを示す。スペクトル上における、ノイズレベルに対する信号レベルは30 dB以上と、良好なSNRを実現している。

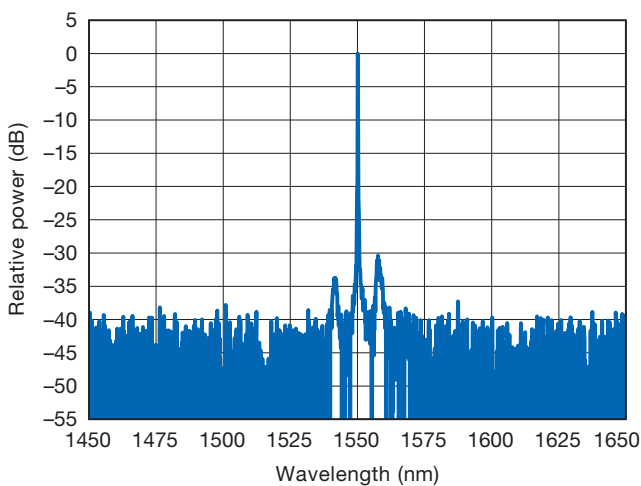


図12 VLMA-EDFA 出力の光スペクトル
(繰返し周波数: 71.4 kHz, 平均出力パワー: 12.7 W)
Optical spectrum of VLMA-EDFA output.
(Repetition rate: 71.4 kHz, Average output power: 12.7 W)

図13に、 M^2 値の測定結果を示す。X方向、Y方向ともに、 M^2 値は1.2以下であり、高いビーム品質であることが確認できた。

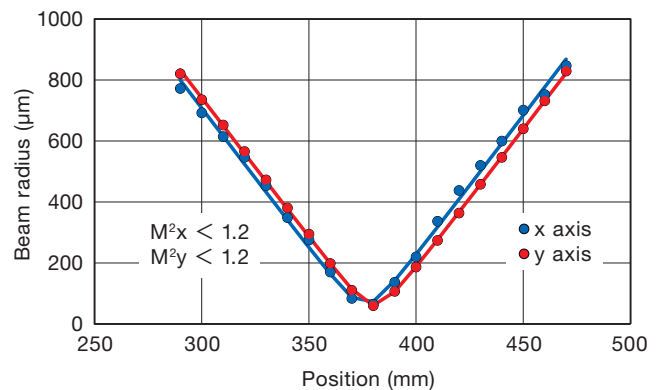


図13 VLMA-EDFA 出力の M^2 測定結果
(繰返し周波数 71.4 kHz, 平均出力パワー 12.7 W)
 M^2 measurement of VLMA-EDFA output.
(Repetition rate: 71.4 kHz, Average output power: 12.7 W)

5. おわりに

半導体直接変調による短パルス発生技術と、モードエリア拡大ファイバ(VLMAF)や高次モードファイバ(HOMF)などの特殊ファイバ技術により、パルス幅及び繰返し周波数が可変な世界最高レベルの高ピークパワーパルスファイバレーザを開発した。これまで難しかった、パルス幅がサブナノ秒～数ナノ秒の時間領域での光パルス発生、100 kW超の高いピークパワー増幅と高ビーム品質出力を実現した。

本技術により、高品質な加工と高速加工のバランスのとれた最適な加工条件の導出が可能となり、セラミックスなどの高速微細穴あけ、金属の表面改質、樹脂材料の高精細加工など、新たなレーザ加工への応用が期待できる。

参考文献

- 1) 松下俊一: “ナノ秒ファイバ型パルスレーザの開発” 古河電工時報 131号 (2013), 60.
- 2) “50 W出力1480 nmカスケードラマンレーザ” 古河電工時報 131号 (2013), 65.
- 3) J.W. Nicholson, et. al.: “FIBER AMPLIFIERS: Higher-order modes expand optical fiber amplifier performance”, Laser Focus World, September (2012), 59.
- 4) J.W. Nicholson, et. al.: “Single-frequency pulse amplification in a higher-order mode fiber amplifier with fundamental-mode output”. CLEO 2013 paper CW3M.3 (2013).
- 5) J.W. Nicholson, et. al.: “High average power, 10 GHz pulses from a very-large-mode-area, Er-doped fiber amplifier”, Journal of the Optical Society of America B, Vol.34, No.3, A1, (2017).
- 6) J.W. Nicholson, et. al.: “115 W, 10 GHz, Femtosecond Pulses From a Very-Large-Mode-Area Er-Doped Fiber Amplifier”, Photonics West 2017 paper 10083-56 (2017).
- 7) 平等拓範: “レーザビーム品質測定の基礎”, レーザ研究, 第26巻, 第10号 (1998), 723.