Yb添加大口径フォトリッククリスタルファイバを用いた 高ピーク、高平均出力MOPAレーザーシステムの開発

吉田 英次¹, 山村 健^{2,4}, 石川 正博^{2,4}, 椿本 孝治¹,
藤田 尚徳¹, 宮永 憲明¹, 塚本 雅裕³, 酒川 友一^{2,4}

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

²片岡製作所 (〒601-8203 京都市南区久世築山町140)

³大阪大学接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)

⁴ALPROT (〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-17-1 虎ノ門5 森ビル5F)

Development of High-Peak and High-Average-Power MOPA Laser System Using Yb-Doped Photonic Crystal Fiber

Hidetsugu YOSHIDA,¹ Takeshi YAMAMURA,^{2,4} Masahiro ISHIKAWA,^{2,4} Koji TSUBAKIMOTO,¹
Hisanori FUJITA,¹ Noriaki MIYANAGA,¹ Masahiro TSUKAMOTO,³ and Tomokazu SAKAGAWA^{2,4}

¹Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

²Kataoka Corp., 140 Tsukiyama-cho, Kuze, Minami-ku, Kyoto 601-8203

³Joining and Weiding Research Institute, Osaka University, 11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

⁴Advanced Laser and Process Technology Research Association (ALPROT)

5th Fl., Toranomon 5 Mori Bldg., 1-17-1 Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105-0001

(Received June 20, 2012)

Recent advances in LMA-PCF rod Yb-fiber with pulse operation and high power laser diode technologies have led to kilowatt-power lasers. We developed high-peak power and high-average-power polarization-maintained Yb doped PCF rod fiber laser system. The output power has been achieved to 186 W at a repetition rate of 250 kHz by a 40- μ m PCF-LMA fiber and a 100- μ m PCF-rod type fiber. We obtained the maximum pulse energy 1.1 mJ at a repetition rate of 167 kHz with a corresponding peak power of 114 kW.

Key Words: Yb fiber laser, High-peak-power, High-average-power, Large mode area (LMA), Photonic crystal fiber (PCF)

1. はじめに

連続発振の高出力Ybファイバレーザーの進捗状況は著しく、単一モード出力10 kW級、マルチモード出力100 kWも実現可能^{1,2)}となった。市販の100 W級レーザーは空冷ラック方式であり、水冷不要である。ファイバレーザー出力やビーム性能は、2010年頃までは国際会議や学術論文等で毎年ワールドレコードを塗り替えられてきたが、1ビーム当りのレーザー出力に限界が見えてきた。連続出力レーザーの出力数10 kW級は、現在の産業分野で必要なレーザー出力を十分に満たしている。

一方、パルスファイバレーザーは、2000年頃から高出力用に開発された2重クラッド構造のLMA (Large Mode Area)^{3,4)}により、高効率でのクラッド励起が可能となった。NA値が小さいため、大きな曲率を与えることで、高次モードを抑制した空間フィルタとして働く結果、単一空間モード出力が得られるようになった。従来のファイ

バ断面コアへの光導波技術は、屈折率分布制御の改善によって伝送効率は向上したが^{5,6)}、NA値約0.06が技術的限界である。このため、新しいファイバ技術として、2002年頃からフォトリック結晶ファイバPCF (Photonic crystal fiber) が急速に進展して、波長多重による1.1 kW⁷⁾やフェムト秒域で830 W⁸⁾が報告され、高出力化が盛んである⁹⁻¹⁶⁾。また、ファイバレーザーの高輝度、高出力化のため、100 μ m以上のコア径で高ビーム品質の達成可能なロッド型PCFファイバが出現し、パルス幅60 nsで26 mJ以上のレーザー出力が得られている¹⁷⁾。

本研究は、加工用レーザーシステムとして、目標平均出力1.5 kW以上を達成するためにNd:YAGコンポジットセラミック増幅器の採用を検討している。このため、増幅器のエネルギー取り出し効率を高めるために、注入平均パワー300 W以上のファイバによる前置増幅システムの開発を行っている。

市販品や報告されている高平均出力パルスファイバ

レーザーシステムは、低エネルギー数10 μ J動作の高い繰り返し数MHzオーダーか、パルス幅100 ns、高エネルギー数10 mJの低い繰り返し数kHzである。我々は、従来の市販レーザーでは対応できない10 ns以下のパルス幅で高パルスエネルギー2 mJ(ピークパワー200 kW)以上、高繰り返し数100 kHz以上の高い動作領域を目指し、前置増幅システムとして高平均出力ファイバレーザーを開発した。

本稿では、小型、高性能、高平均出力加工用レーザーの前置増幅システムとして、高ピーク、高平均出力偏波保持PCFファイバによるMOPAレーザーシステムの実験結果について述べる。

2. Yb添加PCFファイバ前置増幅システム

高平均出力PCFファイバの前置増幅システムの光学配置図をFig. 1に示す。本システムは、高平均出力ブースター増幅器(Nd:YAGコンポジットセラミック)へ前置増幅システムとして開発した。波長1064 nm動作のシード光は、シングルモードファイバ増幅器と15-20 μ mコア径のLMAファイバ増幅器で構成した発振器部によって増幅した。レーザー出力は、パルス幅5-30 ns、繰り返し数77-500 kHzで平均出力5 W以上である。増幅出力光は、前段増幅器として30から68 μ mコア径のLMAやPCFファイバによって出力50 W以上まで増幅した後、後段増幅器にはコア径100 μ mの偏波保持PCFロッド型ファイバによって出力150 W以上まで増幅した。レーザーシステムの最終出力性能は1ビーム出力150 W以上を2ビームで偏波合成し、最大平均出力300 W以上を達成する。

3. パルス幅可変シード光発生方法

ピコ秒からナノ秒パルス発生は、EO(電気光学素子)やAO(音響光学素子)によるモードロック発振やQスイッチによる方法が一般的手法であるが、パルス幅可変ナノ秒域(数100 psから数100 ns)のパルスレーザーとして、(1)LDレーザーの直接変調によるパルス発生法、(2)CW発振出力レーザーとLN強度変調器による任意のパルス波形発生法(分解能: 数100 ps)について検討した。これらの方法は、波形制御性、信頼性、長期安定性に優れ、小型でラック内収納が可能である。

Fig. 1 Optical layout of high-peak and high-average-power polarization maintained Yb PCF fiber laser system.

(a) LDレーザーの直接変調によるパルス発生¹⁸⁾

Ybの発光スペクトルと合致した波長域1030-1080 nmで連続発振するシングルエミッターの連続出力LD光が開発されている。連続出力LD光を直接パルス電流変調駆動によるパルスLD発振器として、Nd:YAGの発光スペクトルに合致した1064 nm発振のパルスレーザーについて検討した。LDの各電流パルス波形に対するレーザーパルス波形をFig. 2に示す。使用した1064 nm出力のシングルエミッターLDは、オプトエナジー社A64034230 M連続出力400 mWおよび3Sホトニクス社3CN01341DA連続出力400 mWをパルス動作した。パルス幅10 ns、繰り返し数100 kHz時の最大平均出力は約0.3 mWである。バタフライLD端子への直接配線と、発振しきい値付近での連続電流動作+任意パルス電流駆動にした結果、最小パルス幅約300 psの1064 nm光が得られた。最小パルス幅は電気信号のパルス幅によって制限されたが、周波数帯域10 GHz以上の電気パルスを用いれば、パルス幅約100 psの発生も可能である。長いパルス動作時は、LDの電流パルス幅に対応したレーザーパルス幅が自由自在に得られた。レーザー発振波長は、LDの温度制御により室温20 °Cから最大60 °Cまで変化した時、発振波長は1063 nmから1075 nm (0.3 nm/°C)まで変化した。よって、ブースター増幅器に採用したNd:YAGセラミックの温度上昇に伴う、蛍光ピーク波長のシフトに対応した発振波長の同調が可能となった。FBG(Fiber Bragg Grating)付きLDを用いれば、線幅0.1 nm以下のパルスレーザーも可能である。

本方式は、安価でパルス幅可変動作が容易であるため、ファイバレーザー増幅器のシード光として有益な方法である。本方式により発生したパルス幅5-10 ns光は、前置増幅システムのシード光に採用した。

(b) LN強度変調器による任意波形パルス発生法¹⁹⁾

単一縦モードファイバ発振器とLN強度変調器(周波数帯域10 GHz以上)構成のパルス発生結果について述べる。発振器にはFBGで構成されたファイバレーザーを用

Fig. 2 Laser pulse waveforms correspond to several current pulses for laser diode.

いた。本装置は単一縦モード連続発振であり、線幅約100 kHz程度で、共振器の温度制御により波長1064.1 nmから1064.8 nmまで可変可能であり、Nd:YAG増幅器の発光スペクトルと高精度の波長同調が可能である。ファイバ出力光は、任意電気パルス波形をLN変調器(パルス波形制御器)に印加することにより、電気パルス波形と同一なレーザーパルス波形を得ることができる。Fig. 3は、任意パルス発生器によって生成した電気パルス波形およびレーザーパルス波形を示す。(a)140 psパルス波形、(2)1 nsパルス波形、(3)10 ns台形波パルス波形、(4)5 nsノコギリパルス波形、(5)18 nsガウシアン波形、および(6)2パルス波形を示す。任意波形発生器で作成した波形とほぼ同等のレーザーパルス波形が得られた。LN変調器の周波数帯域で決まる最小立ち上がり時間は約70 psであり、パルス幅70–100 psパルス生成も可能である。生成パルスの時間ジッターは約20 ps程度あり、パルス振幅の変動度は±3%程度である。

従来のポッケルスセルを用いたレーザーパルス発生法は、自由自在にパルス波形を発生することが困難であり、高電圧であるため発生パルスの信頼性、安定性に問題があった。本方法は、任意波形器で作成した電気パルス波形とほぼ同等のレーザーパルス波形が得られた。しかしながら、LN変調器1台当りのSN比は約20–25dBであり、高SN比を得るには数段構成が必要である。2段構成時のSN比は約45dBである。

4. 中口径ファイバによる前段増幅器のレーザー特性²¹⁾

LDの直接変調によるレーザーパルス光は、6 μm コア径のシングルモードファイバと15–20 μm コア径のLMAファイバ増幅器で構成された発振器部によって、最大出力5 W(繰り返し数77–500 kHz)以上まで増幅した。誘導ラマン散乱、誘導ブリルアン散乱等の非線形現象は発生していない。

前段増幅器として、3種類のファイバ(a)LMA、(b)MMF(Multi Mode Fiber)、(c)PCF-LMAを用いて増幅特性の比較検討した。使用したファイバの主なパラメータと断面写真をTable 1に示す。コア径30 μm から68 μm 、クラッド径200 μm から590 μm 、ファイバ長は、1.5 mから6.4 mである。励起波長975 nmでのファイバ全吸収量

Fig. 3 Generation of several laser pulse waveforms using a LN intensity modulator.

Table 1 Optical characteristics for several types of large core fiber.

	A	B	C
	LMA PM	MMF Non-PM	PCF-LMA PM
Core diameter (μm)	30	68	40
Clad diameter (μm)	250	590	200
Core NA value	0.06	0.07–0.08	0.03
Fiber length (m)	2	6.4	1.5–2.5
Clad absorption coefficient(dB/m)@975nm	7	3.5	10
Clad NA	0.4	0.6	0.55

を約13dB以上となる様にファイバ長を決定した。波長975 nm励起用LDにはファイバカップル(コア径200 μm)型を用い、出力光はレンズ光学系によりファイバ射出端側より励起した。室温動作時の最大励起出力は、約250 Wである。増幅出力光はダイクロックミラー(975 nm透過、1064 nm反射)によって、取り出した。LMAファイバは高次モード除去のため、直径150 mm金属ボビンに螺旋上に固定し、MMFは曲げ直径250–280 mmとした。

Fig. 4に(a)PM-LMA、(b)MMFの励起LDパワーに対する増幅特性結果を示す。(a)偏波保持LMAファイバは、パルス幅100 ns、繰り返し数100 kHz動作時、最大平均出力104 W(パルスエネルギー0.34 mJ)が得られ、総合効率は約49%であった。また、出力ビーム品質 M^2 値は約1.3から1.5であった。(b)無偏波MMF(68/590 μm)は、パルス幅10 ns、繰り返し数500 kHz動作時、最大平均出力142 W(パルスエネルギー0.28 mJ)が得られたが、出力ビーム品質は M^2 値3から5となった。MMFのコアNA値は約0.08以上であり、ビーム品質は低下した。

次にNA値が小さく、高ビーム品質が期待できる(c)偏

Fig. 4 Laser output power depends on laser diode pumping power for a 68 μm -core MMF and a 30 μm -core LMA fiber.

波保持PCF-LMAのファイバ長に対する増幅特性結果をFig. 5に示す。励起波長975 nmに対する各ファイバ長1.5, 2.0, 2.5 mの吸収量は、それぞれ15, 20, 25dBである。ファイバ長1.5 mの場合、最大励起パワー210 W時最大出力50 Wが得られ、総合効率は約24%であった。一方、ファイバ長2.5 mの場合、最大励起入力90 W時最大出力58 W、総合効率65%が得られ、偏波保持ファイバにおいても高い出力効率が得られた。実験結果より、高効率動作可能なファイバ長は2.5 mとなったが、2.5 m長は励起パワー約150 W以上では寄生発振を観測した。このため、入出射端面や内部損傷を考慮し、励起強度に適したファイバ長を選択する必要がある。ファイバ長2 mでの出力ビーム品質の測定結果をFig. 6に示す。励起パワーに依存せず、各出力ビームの空間ビーム特性は優れた性能が得られた。出力ビーム口径は、ガウシアン分布でファイバのモードフィールド径約30 μm となった。繰り返し数100 kHzから500 kHzまで動作時、ほぼ同じ M^2

Fig. 5 Laser output power depends on several fiber lengths for a 40 μm -core PCF LMA fiber.

Fig. 6 Measurement results of near-field pattern depend on output power and M^2 value of laser beam quality.

値 = 1.15が得られ、繰り返し数に依存せず、優れたビーム品質が得られた。

Fig. 7にファイバコア径に対する空間モード数について、ファイバNA値依存性を示す。本実験で用いた3種類のファイバパラメータをプロットし、ビーム品質を示した。空間モード数 $N = (\pi d \text{NA} / \lambda)^2 / 4$ で表され²⁰⁾、コア径 d とNA値に依存する。コア径とNA値が小さいファイバは、シングルモード動作が可能である。68 μm コア径、NA値約0.08のMMFは、モード数20-30であり、曲げ応力による高次モード除去を行ってもビーム品質 M^2 値は3-5程度であった。一方、30 μm コア径、NA値約0.06のLMAファイバは、モード数7-8であり、曲げ応力による高次モード除去の結果、ビーム品質 M^2 値は約1.3まで向上した。コア径40 μm 、NA値約0.03のPCM-LMAファイバはモード数1-2であり、ビーム品質 M^2 値約1.15が得られた。PCF構造によりNA値0.03以下が可能となった結果、コア径40 μm でも高ビーム品質が得られた。

Fig. 8に各種パルス波形形状による増幅パルスの波形

Fig. 7 Mode number to fiber core diameter (NA value dependency), and output beam patterns.

Fig. 8 Amplified output waveforms depend on incident pulse shapes.

変化を示す。方形波パルスを入射した場合、ファイバ増幅器の利得飽和過程によりパルス波形の立ち上がり部の増幅が急峻となり、立ち上がりの早いノコギリ波となった。ピーク強度が増加するとレーザー損傷が発生するため、レーザー出力が制限された。一方、パルス波形変化を抑制する方法として、緩やかな立ち上がり波形による増幅を行った。入射パルスがガウシアンパルス波形(パルス幅68 ns)や立ち上がりを緩やかにしたノコギリ波形の場合、最大励起時パルス幅の変化は見られなかった。レーザー出力が増加すると、利得飽和によりパルス波形の前半でエネルギー抽出されるため、立ち上がりが早くなる事が知られている。このため、緩やかな立ち上がりパルスにより、パルスピーク強度を軽減しレーザー損傷等の非線形現象を抑制できる事を示した。

5. ロッド型大口径ファイバによる後段増幅器のレーザー特性²²⁾

後段増幅器である偏波保持大口径PCFロッド型ファイバ増幅器特性について述べる。実験に用いたファイバ寸法は、コア径100 μm 、モードフィールド径76 μm 、クラッド径280 μm 、長さ80 cmのPCF型である。モードフィールド面積4500 μm^2 と非常に大きく、コアNA値は0.02と非常に小さいのが特徴である。入射端面の表面損傷を抑制する方法としてファイバ出射端面にバルク石英を融着したエンドキャップが施されているため、石英ガラスのバルク耐力まで増加する。波長975 nm励起用LDにはファイバカップル(コア径200 μm)型を用い、出力光はレンズ光学系によりファイバ出射端側より励起した。室温動作時の最大出力は、約250 Wである。増幅出力光はダイクロイックミラー(975 nm透過、1064 nm反射)によって、取り出した。

励起入力パワーに対するレーザー出力をFig. 9に示

Fig. 9 Laser output power depends on laser diode pumping power for a 100 μm -core PCF rod fiber.

す。入射レーザー光はパルス幅10 ns、繰り返し数167, 250 kHzで20, 40 Wである。繰り返し数250 kHz、入力パワー40 W時、最大励起入力250 Wの場合、最大レーザー出力186 Wが得られた。この時、総合効率約74%、スロープ効率約61%を達成した。1パルス当たりの最大エネルギーは1.1 mJ(繰り返し数167 kHz)、ピークパワーは114 kWである。パルス幅10 ns時のバルク石英のレーザー損傷しきい値は約60 J/cm²でありモードフィールド面積4500 μm^2 から、出力限界は約2.7 mJであり、167 kHz動作で平均出力450 Wも可能である。Fig. 10にLD励起電流、励起パワー、レーザー出力に対するファイバ出力端面の近視野像を示す。破線円はクラッド外周を示し、偏波保持のための大きな空孔が対称にある。レーザー入射パワー32 Wから増幅出力93 Wでは、モード制御用空孔までビームの染みだしが見られたが、レーザー出力125 Wから155 WまではTEM₀₀モードフィールド径約75 μm の空間ガウシアン分布となった。これはファイバ径方向の温度分布による凸レンズ効果により、モード制御されたためであると考えられる。ビーム品質M²値は出力約100 Wでは1.5程度であったが、出力155 W以上では2-2.5まで増加したが、ブースター増幅器への前置増幅システムとしては、比較的良好なビーム品質は得られた。最大レーザー出力175 Wでは、コア径内でのモード移動が観測された。モード変動は冷却方法によるファイバ内の径方向および長さ方向の温度分布による屈折率変化等による影響が考えられる。出力ビームの偏波特性は偏光板による測定結果から、最大出力時偏光解消度約8-10%であった。漏れ光の発生は、熱複屈折効果と空間モード変動による影響が大きく、ファイバの径方向および伝搬方向の温度分布制御と排熱効果が重要である。

6. まとめおよび今後の展開

本稿ではYbファイバレーザーシステムに用いたシード光用短パルス光発振器の発生方法とPCFファイバを用いたMOPAシステムのレーザー特性について述べた。大口径PCFロッドファイバによる穴径と穴間隔の制御によりNA値0.03以下が製造可能となった。その結果、高ピーク、高平均出力ファイバレーザーによるLP₀₁モード高ピーク、高平均出力動作が実現した。パルス幅10 ns、繰り返し数250 kHz動作時、偏波保持で最大平均出力186 Wが得られ、総合効率約74%、スロープ効率約61%と高効率を達成した。1パルス当たりの最大エネルギーは1.1 mJ(繰り返し数167 kHz)、ピークパワーは114 kWである。

Fig. 10 Output beam patterns depend on laser diode pumping power and output power.

加工分野で使用されている連続発振の高出力数kW級LD励起Nd:YAGレーザーや炭酸ガスレーザーは、高効率、高ビーム品質のYb大口径ファイバレーザーに取って代わろうとしている。また、数10ビーム以上の多波長コンバイン技術やマルチコアPCFファイバにより、パルス動作数100 mJ級レーザーが実現可能である。近い将来、キースイッチONのパルスファイバレーザーが出現しているかもしれない。

謝 辞

本研究の一部は、NEDO「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト・次世代レーザー加工技術の研究開発」の委託により実施された。

参考文献

- 1) D. J. Richardson, J. Nilsson, and W. A. Clarkson: J. Opt. Soc. Am. B **27** (2010) B63.
- 2) M. O'Connor and B. Shiner: *High-Power Laser Handbook*: (McGraw-Hill, New York, 2011) Chapter 18, 517.
- 3) J. A. Alvarez-Chavez, H. L. Offerhaus, J. Nilsson, P. W. Turner, W. A. Clarkson, and D. J. Richardson: Opt. Lett. **25** (2000) 37.
- 4) J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, and L. Goldberg: Opt. Lett. **25** (2000) 442.
- 5) P. St. J. Russell: Science **299** (2003) 358.
- 6) J. C. Knight: Nature **424** (2003) 847.
- 7) O. Schmidt, C. Wirth, I. Tsybin, T. Schreiber, R. Eberhardt, J. Limpert, and A. Tunnermann: Opt. Lett. **34** (2009) 1567.
- 8) T. Eidam, S. Hanf, E. Seise, T. V. Andersen, T. Gabler, C. Wirth, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tunnermann: Opt. Lett. **35** (2010) 94.
- 9) F. Roser, J. Rothhardt, B. Ortac, A. Liem, O. Schmidt, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tunnermann: Opt. Lett. **30** (2005) 2754.
- 10) Q. Hao, W. Li, and H. Zeng: Opt. Express **17** (2009) 5815.
- 11) T. Eidam, S. Hadrich, F. Roser, E. Seise, T. Gottschall, J. Rothhardt, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tunnermann: IEEE Select top in Quant. Elect. **15** (2009) 187.
- 12) F. Roser, T. Eidam, J. Rothhardt, O. Schmidt, D. N. Schimpf, J. Limpert, and A. Tunnermann: Opt. Lett. **32** (2007) 3495.
- 13) J. Limpert, N. De Deguil-Robin, Guil-I. Manek-Honninger, F. Salin, T. Schreiber, A. Liem, F. Roser, H. Zellmerellmer, A. Tunnermann, A. Courjaud, *et al.*: Opt. Lett. **30** (2005) 716.
- 14) C. D. Brooks and F. D. Teodoroa: Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 111119.
- 15) W. Li, Q. Hao, M. Yan, and H. Zeng: Opt. Express **17** (2009) 10113.
- 16) J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer, A. Tunnermann, F. Iliew, F. Lederer, J. Broeng, G. Vienne, A. Peterson, *et al.*: Opt. Express **11** (2003) 818.
- 17) F. Stutzki, F. Jansen, A. Liem, G. Jauregui, J. Limpert, and A. Tunnermann: Opt. Lett. **37** (2012) 1073.
- 18) 吉田 英次, 椿本 孝治, 藤田 尚徳, 宮永 憲明: レーザー研究 **38** (2010) 849.
- 19) 吉田 英次, 住村 和彦, 椿本 孝治, 藤田 尚徳, 中塚 正大: レーザー研究 **34** (2006) 779.
- 20) G. P. Agrawal: *Nonlinear fiber optics, Second Edition* (Academic Press, 1995) p.34.
- 21) 吉田 英次, 山村 健, 石川 正博, 椿本 孝治, 藤田 尚徳, 宮永 憲明, 塚本 雅裕, 酒川 友一: レーザー学会学術講演会第32回年次大会講演会予稿集 (2012) 30pI-2.
- 22) 山村 健, 吉田 英次, 石川 正博, 椿本 孝治, 藤田 尚徳, 宮永 憲明, 塚本 雅裕, 酒川 友一: 第71回応用物理学学術講演会予稿集 (2012) 16p-E9-2.