パルス動作Yb添加大口径ファイバレーザーの高ピーク、高平均出力化のための主技術と近年の進展

吉田 英次, 椿本 孝治, 藤田 尚徳, 宮永 憲明

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)

Key Technology for High-Peak and High-Average Power and Recent Progress in Large Core Yb-Fiber Laser System with Pulse Operation

Hidetsugu YOSHIDA, Koji TSUBAKIMOTO, Hisanori FUJITA, and Noriaki MIYANAGA

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

(Received June 21, 2010)

Recent advances in large core Yb-fiber with pulse operation and high power laser diode technologies have led to kilowatt-power lasers with excellent beam quality. In this paper, we review and give design parameters for high-peak power and high-average-power LMA (Large Mode Area) and PCF (Photonic Crystal Fiber) Yb fiber laser system. The peak power limitation of Yb-doped LMA fiber laser is discussed about the nonlinear and thermal effects. We are reviewed some elements of key technology for high-peak and high-average power system such as pulse generation and bending of LMA fiber amplifier.

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

1. はじめに

近年の高出力ファイバレーザーの進捗状況は著しく、CW発振では単一横モード出力6 kW以上、マルチモード出力50 kW以上が実現可能^{1,2)}となり、バンドル化により数100 kW級も夢ではない。ファイバレーザー出力やビーム品質は、国際会議や学術論文等で毎年報告される毎に、塗り替えられているのが現状である。現在の産業分野で必要なレーザー出力は十分に満たしたと言える。ファイバレーザーの急激な出力変遷をFig. 1に示した様に³⁾、2002年から2003年にかけて大口径ファイバ(LMA: Large Mode Area)の開発により劇的な出力増加が見られた。高出力化競争は、ドイツIPG社、Friedrich Schiller-Jena大学、イギリスSouthampton大学およびSPI社がレーザー出力データを毎年塗り替えている。一方、2002年頃からはフォトニック結晶ファイバ(PCF: Photonic Crystal Fiber)の出現^{4,5)}により機能性かつ高出力化が可能となり、急速な進展が見られた。今やファイバレーザーは様々なレーザー応用において優位性がみられ、固体レーザーの代表選手となった。

日本の優れた通信技術で培ったファイバ技術の高出力ファイバレーザーへの展開例として、植田らのグループは世界に先駆けてファイバディスクレーザーを開発し、

2002年にはCWファイバ出力として当時最高値1 kWを達成した⁶⁾。しかしながら、当時の日本の大学や企業における高平均出力レーザーの開発はLD励起Nd:YAGレーザーが中心であった。残念ながら著者の知る限り、ファイバレーザー開発では世界に遅れをとっているのが現状である。このため、本稿では高出力パルスファイバ

Fig. 1 A brief history of CW LMA and PCF fiber lasers.

ザーの進展を意図し、高出力ファイバの出力制限要素、と著者らが実施した実験結果と世界の研究状況を中心に紹介する。

2. 大口径ファイバの進展

2.1 LMAファイバの原理⁷⁾

ファイバレーザーは、コア励起からダブルクラッド励起ファイバレーザーの開発により、出力は飛躍的に増加した。従来のファイバレーザーは通信用として、Er添加石英ファイバが使用され、単一モード動作のためコア径は10 μm 前後が使用され、コア径数100 μm マルチモードファイバは主にレーザーパワー伝送用として使用されていた。高出力用に開発された2重クラッド構造のLMAファイバは、効率良くクラッドからの励起が可能となった。また、NAが非常に小さいため、大きな曲げ応力を与えることで、高次モードが抑制されたモードフィルターとして働く結果、単一横モード、高出力が得られる。Fig. 2はファイバの伝搬モードについて、ファイバの曲げ半径と伝送損失の関係を示す。LP₀₁モードが伝搬するには、大きな曲率でファイバを曲げる必要がある⁸⁾。曲率損失により基本モードの損失は避けられないが、利得が損失を大幅に上回るため、エネルギー取り出し効率は非常に高い。曲げ半径100 mmの時、20 μm コア径ではLP₀₁とLP₁₁モード間の伝搬損失に2桁以上あるため、LP₀₁モードを得ることは容易であるが、80 μm コア径では2種類のモード間の伝搬損失差が1桁程度であり、モード分離が難しくなる。5.2の実験結果からも、容易にLP₀₁モードを得られるLMAファイバ(NA値0.06)のコア径の限界は20–30 μm 程度である。

2.2 PCF(フォトニッククリスタルファイバ)^{9,10)}

従来のファイバコア中での光導波技術は、屈折率分布

Fig. 2 Mode filtering effect in LMA fibers (Bending loss can very effectively induce loss for higher order mode.).

制御の改善によって伝送効率を向上したが、技術的限界がある。そこで、新しいファイバ技術として、ホーリーファイバ(Holey Fiber: HF)が注目されている。HFは大きく2つに分類され、1つは石英ガラスコアの周囲のクラッド部に複数の空孔を配置した全反射型導波原理からなるフォトニッククリスタルファイバ(Photonic Crystal Fiber: PCF)であり、もう1つは空孔クラッド部のブラッグ反射を用いて光閉じ込め導波原理を持つフォトニックバンドギャップファイバ(Photonic Bandgap Fiber: PBF)である。PCFは広帯域の単一モード動作や分散制御に使われ、PBFは波長による伝送特性の制御に利用されている。これらの光ファイバは、具体的には蓮根のように規則性をもった数個から数十個の穴が並んだ断面である。

ファイバレーザーは単一モード動作CW発振で数kWレベルが実現した。しかしながら、短パルス動作ではファイバ端のレーザー損傷や非線形過程により、ピーク出力が制限された。LMAファイバはNA値0.06程度が限界であるが、PCFはNA値0.02~0.03も製造可能となった。この結果、LMAファイバでは困難であった、高ビーム品質で大口径(約100 μm)の直線配置ロッドPCFが開発された。パルスレーザーはPCFのマルチコア化により、さらなる高出力化も可能である。

3. 高出力パルスファイバの非線形現象による出力制限

3.1 レーザー損傷しきい値

ファイバ母材となる石英ガラスは高品質で欠陥等が少ないため、他の光学ガラスに比べ耐レーザー損傷性は高い。一般的なバルク石英ガラスのレーザー耐力DTは、パルス幅 t_p の0.4乗に比例するため $DT = (22-25)t_p^{0.4}$ で示される。波長1 μm 、パルス幅1 ns時、22–25 J/cm² (22–25 GW/cm²)、パルス幅10 nsでは55–63 J/cm² (5.5–6.3 GW/cm²)である¹¹⁾。Fig. 3はコア径に対する

Fig. 3 Bulk damage threshold depends on fiber core diameter.

レーザー損傷限界の出力エネルギーについて、入射パルス幅依存性を示す。ファイバ増幅器動作時の可能な最大出力エネルギーは、パルス幅1 nsの場合、コア径30 μm では約0.2 mJに対しコア径200 μm では約8 mJとなる。また、長いパルス幅100 nsの場合、コア径200 μm では最大約80 mJとなる。報告例として、パルス幅500 nsの時、最大出力83 mJが得られている¹²⁾。

しかしながら、ファイバレーザー損傷のほとんどは、ファイバ端面で発生する。レーザー損傷はファイバ端面の表面状態に依存するが、バルク耐力の約1/2程度まで低下する。端面の表面損傷を抑制する方法としてファイバ射出端面にバルク石英を融着するエンドキャップ技術があり、端面での耐力をバルク耐力まで増加する可能性がある。エンドキャップ技術法は、高出力化には必要な技術であり、炭酸ガスレーザーによる融着法が有力であるが、詳細な製造方法は明らかではない。また、レーザー耐力は出力ビーム品質にも大きく依存するため、LP₀₁空間モード出力が必要不可欠である。大口径ファイバでの空間マルチモード化による端面の電界集中で、レーザー耐力は理論値より大幅に低下する。無添加石英ファイバでのCW光伝送の損傷しきい値を約2 GW/cm²とすると、40 μm コア径の最大平均出力は約25 kWとなる。しかしながら、プリフォーム製造過程や希土類添加材料により、しきい値の低下が予想され、Yb添加40 μm コア径ファイバの出力パワー限界は約9 kWである³⁾。

3.2 誘導ラマンと誘導ブリルアン散乱発生

非線形散乱は、媒質中の光強度があるしきい値を越えると発生する散乱で、石英ガラス中に発生する音波(量子状態ではフォノン)と光との相互作用が原因で発生する。また、高強度レーザー光をファイバ中に入射させると、SiO₂分子の振動が発生し、フォノンが伝搬する。SiO₂のような2原子分子の振動はそれぞれの原子が同方向に振動するものと逆方向に振動するものに分けられ、前者は音響的振動(音響フォノン)、後者は光学的振動(光学フォノン)として扱われる。音響フォノンによる散乱は誘導ブリルアン散乱(SBS: Stimulated Brillouin Scattering)、光学フォノンによる散乱は誘導ラマン散乱(SRS: Stimulated Raman Scattering)として知られている¹³⁾、これらの非線形散乱は線形散乱であるレイリー散乱とは異なり、散乱光の波長がシフトする。ストークス光(散乱光)波長は、入射波1064 nmに対して、SBSでは約0.06 nm (17.5 GHz)、SRSでは約51 nm (13.5 THz)、長波長側にシフトする¹³⁾。パルス幅fs-ps領域の高ピーク強度レーザーの場合にはSRSが支配的であり、数ns以上の領域の高平均出力レーザー増幅器の場合にはSBSが顕著になる。石英ファイバの場合、SBS緩和時間約4 nsより短パルス(広帯域)はSRS、長パルス(狭帯域)はSBSの発生により出力が制限される。

誘導ブリルアン散乱の発生しきい値パワー P_{th}^{SBS} は、 $P_{th}^{SBS} = 21A/(g_B L)$ で与えられる。ここでAは有効モード断面積、Lはファイバ長、 g_B はSBS利得係数であり、石英ガラスの場合約 3×10^{-11} m/Wである¹⁴⁾。ファイバ長

9.4 mを用いた場合の実験結果から、単一モード5 μm ファイバ(NA値0.15)のSBSしきい値39 Wに対し、30 μm LMAファイバは700 W以上である。ファイバ長の短尺化とレーザーバンド幅の増大によって、SBS発生の抑制は可能である¹⁵⁾。誘導ラマン散乱の発生しきい値パワー P_{th}^{SRS} は、 $P_{th}^{SRS} = 16A/(K g_R L)$ で与えられる。Kは偏光依存係数0.5から1、 g_R はSRS利得係数 6.5×10^{-14} m/Wである。波長1064 nm、パルス幅2 ns時、単一モード6 μm でファイバ長さ7 mのSRSしきい値約500 Wに対し、20 μm LMAファイバは20 kW以上である¹⁶⁾。

3.3 自己収束発生および自己位相変調効果

ファイバ内の伝搬強度が増加すると、非線形屈折率による自己収束が発生する結果、ファイバ内に糸状の損傷が発生する。一般的に石英ガラスは、薄肉の窓材やレンズなどに使用されるため問題とならないが、ファイバのようにレーザー光を長距離伝搬させる場合には自己収束効果が発生する。レーザー光の自己収束臨界パワー P_{cr} は、 $P_{cr} = 3.77 c \lambda^2 / (32 \pi^2 n_2)$ で表わされる¹⁷⁾。ここで、cは光速、 λ は入射波長、 n_2 は非線形屈折率(esu)である。石英ガラスの非線形屈折率 $n_2 = 1 \times 10^{-13}$ esuと波長 $\lambda = 1064$ nmの時、臨界パワー P_{cr} は3.7 MWとなり、数MW以上のピークパワーが限界となる。例えば、fsパルスのCPA(Chirped-Pulse Amplifier)増幅時、パルス幅1 nsの自己収束臨界エネルギーは約3.7 mJ程度であり、レーザー耐力からコア径100 μm 以上が必要である。

また、短パルスレーザーによるYbファイバ増幅やモードロックレーザーの場合、自己位相変調(SPM: Self Phase Modulation)¹⁸⁾を考慮しなければならない。非線形屈折率がレーザー強度に依存して変化することにより発生するSPMにより、レーザーパルスのスペクトル広がりを引き起こす。SPMは時間的自己集束(光カー効果)によるチャープ効果である。1 nsパルスによる50 μm コア径ファイバ伝搬時、ファイバ長1 mでの入射エネルギー限界は約0.4 mJである。

4. 高出力ファイバ熱負荷による出力制限

高出力動作時のファイバでの熱的影響は、励起光吸収によるファイバ内の温度上昇と温度分布により、レーザー出力制限やビーム品質の低下を引き起こす。ファイバ型は他のロッド型、スラブ型、薄板型に比べアスペクト比(表面積/体積)が大きいので、排熱効果は大きい。しかしながら、高平均出力動作による温度上昇は、ファイバの溶解や焼け、発光および吸収スペクトル変化、光学特性や機械特性の変化を引き起こす。また、表面冷却による温度分布は、熱レンズ効果や熱応力効果が発生する。

ダブルクラッドファイバの端面励起時の温度モデル¹⁹⁾から、コア径25から30 μm の樹脂第2クラッドの励起入射端面の熱負荷限界は、自然空冷の場合の熱伝達係数を10 W/m²K、水冷の場合の熱伝達係数を1000 W/m²Kとすると、それぞれ約30 W/m、1000 W/mまでのファイバへ

の熱負荷可能である。しかしながら、第2クラッドの樹脂コーティングの溶融温度は約150–180 °Cであるため、熱負荷限界値は約200–300 W/mまで低下する。

希土類添加ファイバの熱レンズ効果は、励起光を照射することにより発生する局所的な温度上昇によりファイバ径方向に屈折率分布が生じる現象であり、バルク型固体レーザー媒質と同様にファイバにおいても熱レンズ効果は発生する。石英ファイバの熱レンズ効果は、温度による屈折率変化 dn/dT が正の値であるため、凸レンズ効果となる。このため、伝搬するレーザー光は集束するため、ビーム品質の劣化やレーザー損傷の原因となる。一方、リン酸系ガラスの一部やフッ化物系ガラスの dn/dT は負の値を示したため、凹レンズ効果が発生する。

熱レンズ効果の発生しきい値は熱体積密度 P_{th} で表すことができ²⁰⁾、 $P_{th} = 2K\lambda^2(\ln V)^2/(\pi r^2 ndn/dT)$ となる。モード $V=2.4$ 、 $n=1.45$ 、 $K=1 \text{ W/mK}$ 、 $dn/dT=11.9 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、 $\lambda=1064 \text{ nm}$ とすると、コア径が30 μm のときは140 W/m、コア径が100 μm のときは12.6 W/mとなる。コア径が小さいほど熱勾配が少ないため、熱レンズ効果は重要な問題にはならないが、大口径かつ短小ファイバではロッド型固体レーザーと同様に、より顕著な問題となる。

熱応力の評価は熱衝撃係数によって決まる。熱衝撃係数は、レーザー媒質形状がロッド型である限り半径には依存しないため、ファイバ型、バルク型に関係なく媒質で決まる。実際、石英ガラスの場合は、熱伝導率 $K=1.38 \text{ W/mK}$ 、 $E=72 \text{ GPa}$ であり、熱衝撃係数は $R=4 \text{ kW/m}$ となる²¹⁾。他のバルク型結晶やバルク型ガラスの熱衝撃係数(YAG結晶：1100 W/m、サファイア結晶：3400 W/m、リン酸ガラス：100 W/m)と比較すると、シリカガラスは熱衝撃係数が大きく、優れた熱耐力を持っていることが分かる。

5. 各種大口径ファイバの高出力動作特性

5.1 近年の進展

高出力CW出力ファイバレーザーは、IPG社の方式(数10個LD光をマルチモードファイバに入射し、ファイバからのLD光を合成しクラッドから励起する方法)が群を抜いているが、QスイッチMOPA(Master Oscillator and Power Amplifier)やfsモードロックパルスレーザーの発生やCPA増幅システムにおいても、コア径の大きいLMAファイバやPCFロッドファイバを用いて優れたレーザー性能が達成されている。近年開発された代表的な高ピーク、高平均出力レーザーの一覧をTable 1^{22–35)}、^{†1–†4)}に、年代と代表的なパルスレーザー出力Fig. 4に示す。近年、報告されたシステムの最終段に用いたファイバ形状は、ほとんどPCF化された結果、パルスレーザーの高出力化技術は飛躍的に進展した。

Fig. 4 A brief history of fiber laser output power from femto to nano second pulse.

代表的なフェムト秒レーザーであるチタンサファイアレーザーに代わるLMAファイバを用いた数100 W級CPA増幅システムが開発された。モードロックパルス(パルス幅150 fs, 75 MHz)は300 mのSMファイバによって250 psまで伸長した後、SMファイバ増幅器とPCFファイバ増幅器(コア40 μm , NA値0.03)による増幅後、透過回折格子によって圧縮された。励起入力180 W時、最大CPA出力140 Wを達成し、スロープ効率80 %、ビーム品質 $M^2=1.2$ が得られた。圧縮後の平均出力は131 W、パルス幅220 fsである²³⁾。その後、PCFによる増幅システムの開発により年々出力は増加し、中心波長1040 nm、繰り返し数78 MHz、パルス幅640 fs時、平均出力830 Wを達成した²⁶⁾。

ナノ秒の高出力動作例では、200 μm コア径LMAを用いた増幅実験において、最大出力82 mJ(パルス幅500 ns)を達成している¹²⁾。また、大口径ファイバによるレーザー共振器で平均出力300 W(パルス幅15 ns、繰り返し数100 kHz)が市販されている^{†1)}。パルスファイバレーザーの高出力化記録は、PCFを用いた多波長増幅法による4ビーム結合実験において、繰り返し数500 kHz、最大出力300 μJ (パルス幅5 ns)、平均出力1.1–1.5 kWを達成した^{34,35)}。本方式は、パルスレーザーによる高出力化を図る上で、有益な方法であることを実証した。

本章では我々が開発したファイバレーザーシステムについて述べる。

5.2 フェムト秒パルス発振器と増幅特性

ファイバレーザーのフェムト秒パルス発生には、主にSESAM(Semiconductor Saturable Absorbed Mirror)や近年活発なカーボンナノチューブ等による過飽和吸収素子による方法と、非線形偏波回転を用いた方法がある。我々

^{†1)} URL: <http://eolite.com/Boreas.htmlwpid/>

^{†2)} URL: <http://spilasers.com/>

^{†3)} URL: <http://powerlase.com/>

^{†4)} URL: <http://ipgphotonics.com/>

Table 1 High power pulse fiber laser in the world.

Pulse width (ns)	Pulse energy (mJ)	Repetition rate (kHz)	Output power (W)	Beam quality M2	Final amplifier Configuration	Ref.
27 fs	0.73 μ J	78MHz	57		PCF-30/200 μ m	22
220 fs	1.8 μ J	73MHz	131	1.2	PCF-40/170 μ m	23
240 fs	3.3 μ J	79.5MHz	262		PCF-rod 40/200 μ m	24
375 fs	8.2 μ J	40MHz	325	1.3	PCF-30/500 μ m-7.5m	25
640 fs	10.6 μ J	78MHz	830	1.4	PCF-27/500 μ m-8m	26
800 fs	1.75 μ J	200kHz	over 100	1.2	PCF-rod-80/200 μ m-1.2m	27
10ps	2 μ J	47MHz	97		PCF-40/170 μ m-1.5m	28
1	4.3	9.6	42	1.3	PCF-rod 100/290 μ m	29
4.5	4.5	20	90	1.5 - 2.0	LMA-100/200/600 μ m	30
3	0.147	1900	280		PCF-rod 41/170 μ m-1m 2stage	31
12	2.5	100	80	1.2	Rod-PCF21/450 μ m-2.3m	32
150	24	2	48		LMA-90/120/400 μ m	33
4-500	9.6-83	25Hz	2	6.5 - 7.0	LMA-100/200/600 μ m	12
5	0.3	500	1200-1500	1.5 - 4.0	4-beam combined	34,35
15	3	100	300	1.5	Commercial laser	†1
100-1 μ s	0.38	100	38	3.5	Commercial laser	†2
20	0.8	100	80	2.5	Commercial laser	†3
200	10	20	200	10	Commercial laser	†4

が開発したモードロック発振器は、3つの波長板を用いた非線形偏波回転を利用する方式を採用した(Fig. 5)。非線形偏波回転とは、直線偏光の光がファイバ中を伝搬する際に、ガラスの屈折率の異方性によって楕円偏光に変化し、さらに光カー効果によって楕円偏光が、光強度とファイバ長に依存して回転する現象である³⁶⁾。波長板を用いることによって光強度の強い中心部分のみを通過するように調整することで短パルス化を起こすことができる。また、ファイバで生じた群速度分散を補償するため、回折格子対600本/mmを用いた。CPAパルス幅約1.3 psの透過回折格子による圧縮で、パルス幅約33-41 fsが得られた。最大平均出力78 mWが得られ、短期出力安定度 $\pm 0.5\%$ 、長期安定度1% (3時間運転)と非常に安定である。

フェムト秒パルス光は回折格子により約500 psまで伸

Fig. 5 Optical arrangement of fiber oscillator of CW femto second. PBS: Polarizing Beam Splitter; HWP: Half Wave Plate; QWP: Quarter Wave Plate; ISO: Isolator ; WDM: Wavelength Division Multiplexing.

長した後、Yb添加のSMF(Single Mode Fiber)2段と30 μ mLMAファイバにより、増幅した。Ybファイバの発光スペクトルは980 nmから1100 nmと非常に広いスペクトル幅をもつため、短パルス広帯域増幅に適している。繰り返し数60 MHz時、SMF2段増幅後80 mW、30 μ mLMAファイバ増幅後8.1 W(パルスエネルギー130 μ J)が得られた。入射スペクトル幅15 nmに対し、増幅後のスペクトル幅は僅かに狭帯化し約13 nmとなった³⁸⁾。

5.3 ナノ秒パルス発振器と増幅特性

ナノ秒パルス発生は、EO-QスイッチやAO-Qスイッチによる方法が一般的手法であるが、我々が開発した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)CW発振出力レーザーとLN強度変調器による約300 psステップ任意波形パルス発生法と(2)LDの直接変調によるパルス発生法および、LMAファイバ増幅器時の(3)ビーム品質、(4)増幅特性について述べる。

(1)任意波形パルス発生法

3種類のfiber Bragg grating (FBG)で構成された共振器と長さ30 cmのファイバ増幅器でCW出力光を得る。このCW光に、LN変調器でパルス強度変調を加え、さらに長さ2 mの偏波保持Yb光ファイバ増幅器3段(最大励起パワー900 mW)を用いて増幅を行った。Fig. 6は、パソコン画面上での生成した電気パルス波形および2段増幅後のファイバ出力時のレーザーパルス波形を示す。波形観測は、ファイバ増幅器の線形増幅時に測定した。(I)6 ns台形波パルス波形、(II)立ち上がりとしち下がりの異なる2パルス波形、(III)テイラードパルス波形結果を示す³⁸⁾。パソコン上で作成した波形とはほぼ同等の電気信号波形およびレーザーパルス波形が得られた。レーザーパルス波形生成後のパルス立ち上がり時間は、約500 psで

Fig. 6 Laser pulse waveform corresponds to several electrical pulses applied to a LN modulator.

あった。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。本方法により、パソコン上で作成した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事は、画期的である。しかしながら、LN変調器1台当りのSN比は約20-25 dBであり、高SN比を得るには多段構成が必要である。

(2) LDの直接変調によるパルス発生³⁹⁾

シングルエミッター出力LD光はシングルモードファイバによって結合され、Ybの発光スペクトルと合致した波長域(1030-1080 nm)が開発されている。我々は直接パルス電流変調駆動による1062 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. 7に示す。バタフライLD端子に直接回路を配線する事で、LD内のLCR成分を最小限にした結果、パルス幅1.2 nsの1064 nm光が得られた。約5 ns以上のパルス動作時、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。パルス幅

Fig. 8 Mode number to fiber core diameter (NA value dependency).

200 ns, 繰り返し数500 kHzを用いたSMFによる増幅特性において、最大出力90 mWが得られた。パルス幅20 ns, 繰り返し数100 kHz動作時、最大エネルギー500 nJ(ピーク出力20 W)が得られている。本増幅システムは、安価でパルス幅可変動作が可能であるため、有益な方法である。

(3) 各種コア径ファイバの出力ビーム品質

(1)で得られたパルス発生光をYb添加のSMF増幅器によって前段増幅した後、各種コア径、クラッド径、NA値のファイバ増幅器で増幅した時のビーム品質特性について測定した。Fig. 8は、NA値によるファイバコア径に対する空間モード数と、測定した各種ファイバコア径とNA値での近視野像を示す。ファイバのコア径に対する空間モード数Nの関係は $N = (\pi d NA / \lambda)^2 / 4$ で示され⁴⁰⁾、ここで、dはコア径、NAはNA値、λは入射波長である。波長1064 nm時、LMAファイバ製造上の最小NA値0.06の場合、コア径20 μmではモード数3、30 μmではモード数6、50 μmではモード数19である。曲げ応力による高次モード除去により、コア径30 μmまではLP₀₁モード動作が可能であるが、それ以上の口径ではLP₁₁モードかそれ以上の高次モードとなる。近視野像の測定結果より、NA値0.12-0.14のファイバは高次の空間モードパターンであるが、NA値0.06、コア径30 μmファイバはLP₀₁モードであった。一方、NA値0.06でもコア径が大きくなると空

Fig. 7 Laser pulse waveforms corresponds to several current pulses for laser diode.

間モードは劣化した。近年、PCFではNA値を0.02～0.03の制御可能となり、コア径50～70 μm でもLP₀₁モード動作が可能である。

次に、LMAファイバの曲げ応力(曲げ半径)とビーム品質 M^2 値の関係をFig. 9に示す。コア径20 μm では曲げ半径に依存せず、 M^2 値1.1と優れたビーム品質が得られている¹⁵⁾。コア径30 μm では曲げ半径30–40 mmでは M^2 値1.3程度であるが、曲げ半径50 mm以上では M^2 値は約1.8まで増加した。また、コア径50 μm では曲げ半径約38 mmでは M^2 値1.8から2.4であるが、曲げ半径50 mm以上では M^2 値は2.5から3まで増加した。コア径100/200 μm 、曲げ半径140 mmでは、 M^2 値6.5が得られている¹²⁾。曲げ応力により高次モード除去は可能であるが、曲げ直径に対する損失特性において、30 μm ではLP₀₁とLP₁₁モード間の特性差が見られるため、LP₀₁モード選択が可能である。しかしながら、50 μm 以上ではモード間の特性差が小さいため、モード分離が難しい⁴¹⁾。

(4) 各種コア径ファイバのレーザー増幅特性

各種コア径、クラッド径、NA値のファイバについて、ビーム出力特性について測定した。曲げ応力による伝搬損失に伴う出力変化を測定した。コア径30 μm 、クラッド径400 μm 、NA値0.06の偏波保持LMAファイバ4 mを用い、ファイバを固定したボビン直径に依存した入出力特性結果をFig. 10に示す。ボビン半径75、100 mmの入出力特性は、25 W励起時出力6 Wと6.5 Wが得られたが、

Fig. 9 Laser beam quality depends on bending diameter.

Fig. 10 Laser output power depends on bending diameter.

半径50 mmの場合、22.5 W励起時出力2 Wまで低下した。出力ビーム品質 M^2 値は、半径50 mmおよび75 mmの場合1.3程度であり、出力特性を考慮した結果ボビン半径を75 mm前後とした。増幅出力ビームの偏光度は、20 dB以上であった。また、スペクトル強度のSN比をFig. 11に示す。YbファイバのASEスペクトル特性と出力パルスのコントラスト比は約37 dBである。1035 nm付近のASEスペクトルピークと比較するとSN比は約13 dBであるが、後段のNd:YAG主増幅器(全12段増幅)は狭帯域なスペクトル幅(約0.45 nm)であり、増幅時の影響は少ない。しかしながら、CW動作LD励起時の低繰り返しパルス動作は、ASE光成分が支配的となるため、LD光のパルス動作化やAOおよびEO素子挿入によるASE除去が必要である。また、入射レーザー強度の増加による利得飽和増幅特性により、CW発振で可能となった90 %以上の高効率動作が可能となればASE光は問題とされない。

同一LMAファイバによるパルス幅10 ns高出力増幅特性について、入射レーザー波長依存性をFig. 12に示す。最大出力は入射波長1053 nmの場合であり、最大励起入力90 W時、最大出力30 W(300 μJ , 100 kHz)が得られた。波長による出力特性の違いは、Ybファイバの利得波長依存性による。その他、コア径50、70、90、100 μm 等で、NA値の異なる各種LMAファイバによる高出力動作を実施し、報告例と同様に効率70 %以上、マルチモード動作で最大出力120 W以上の高出力動作が可能であることも確認した^{42,43)}。

しかしながら、高出力を得るには、2、3章で述べた出力制限要素以外に、以下の事に注意を要する。励起強度を増加した時、ファイバ端面間の寄生パルス発振による両端面損傷や、出射端面からの戻り光と入射光の干渉効果によるファイバ長中心付近の損傷を観測した。ファイバ端面の斜めカットや反射防止膜処理、ファイバ増幅器間のアイソレーション素子の挿入は必要不可欠である。また、高濃度ファイバでは励起光ファイバ端面付近の急激な温度上昇により、第2クラッド樹脂の燃焼によるファイバヒューズ現象を観測した。励起光のクラッド内への高効率伝送化や励起端面の冷却により、ファイバ端面の温度上昇を抑制する事が重要である。

Fig. 11 Spectral property of amplification laser beam.

Fig. 12 Laser output power depends on wavelength of incident laser.

6. まとめ

高ピーク、高出力ファイバレーザーは、コア径100 μm のLMAやPCFファイバの出現で、LP₀₁モード動作の高パルスエネルギー動作が可能となった。LMAファイバはNA値約0.06が製造上限界であるのに対し、PCFは穴径と穴間隔の制御によりNA値0.02が製造可能となり、大口径PCFロッドファイバによるLP₀₁モード高出力動作の数10 nsで数100 Wパルスレーザーが実現した。また、ファイバCPA法によるパルス幅640 fs、繰り返し数78 MHz動作において、平均出力830 Wを達成した。しかしながら、1本のファイバコア径から得られるパルス出力は非線形現象やレーザー耐力等により制限されるため、コヒーレントおよびインコヒーレントによるビーム結合技術が開発されている。4波長インコヒーレントビーム結合技術では、パルス幅5 ns、繰り返し数500 kHz、最大出力1.1–1.5 kWを達成した。

CW発振高出力数kW級Nd:YAG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バトンタッチしようとしている。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級レーザーが実現できると、全てのレーザーがファイバレーザーに置き換わるのも夢ではないかもしれない。

謝 辞

詳細にわたる御指導、御助言を賜りました大阪大学レーザーエネルギー学研究センター中塚 正大名誉教授、井澤 靖和元センター長に深く感謝致します。

参考文献

- 1) D. Gapontsev: *The Solid State Diode Laser Technol. Rev.*, Albuquerque, NM (2008).
- 2) M. O'Connor: *Proc. Conf. On Lasers and Electro-Optics 2009*, Baltimore, CThA3 (2009).

- 3) A. Tunnermann: *Workshop on Fiber laser* (2006).
- 4) P. St. J. Russell: *Science* **299** (2003) 358.
- 5) J. C. Knight: *Nature* **424** (2003) 847.
- 6) K. Ueda, H. Sekiguchi, and H. Kan: *Proc. Conf. On Lasers and Electro-Optics 2002*, Long Beach (2002) Postdeadline paper CPDC3.
- 7) J. A. Alvarez-Chavez, H. L. Offerhaus, J. Nilsson, P. W. Turner, W. A. Clarkson, and D. J. Richardson: *Opt. Lett.* **25** (2000) 37.
- 8) J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, and L. Goldberg: *Opt. Lett.* **25** (2000) 442.
- 9) T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell: *Opt. Lett.* **22** (1997) 961.
- 10) N. A. Mortensen, M. D. Nielsen, J. R. Folkenberg, A. Petersson, and H. R. Simonsen: *Opt. Lett.* **28** (2003) 393.
- 11) W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering*, 2nd ed. (Springer Series 1, 1988) 540.
- 12) M. Y. Cheng, Y. C. Chang, A. Galvanauskas, P. Mamidipudi, R. Changkakori, and P. Gatchell: *Opt. Lett.* **30** (2005) 358.
- 13) G. P. Agrawal: *Nonlinear fiber optics, Second Ed.* (Academic Press 1995) p.316.
- 14) G. W. Fairs, L. E. Jusinski, and A. P. Hickman: *J. Opt. Soc. Am. B* **10** (1993) 587.
- 15) D. Machewirth, V. Khitrov, U. Manyam, K. Tankala, A. Carter, J. Abramczyk, J. Farroni, D. Guertin, and N. Jacobson: *Photonics West 2004*, San Jose, CA, 5335-24 (2004).
- 16) Y. Jaouën, G. Canat, S. Grot, and S. Bordaïs: *C. R. Physique* **7** (2006) 163.
- 17) S. A. Akhmanov, R. V. Khokhlov, and A. P. Sukhorukov: *Self-focusing and self-modulation of laser beams, in Laser Handbook*, ed. By F. T. Arecchi, E. O. Schulz-DuBois (North-Holland, Amsterdam 1972) p.1151.
- 18) A. Galvanauskas: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **7** (2001) 504.
- 19) L. Kuznetsova and F. W. Wise: *Opt. Lett.* **32** (2007) 2671.
- 20) A. W. Snyder and J. D. Love: *Optical Waveguide Theory* (Kulwer Academic Publishers, 2000).
- 21) D. C. Brown and H. J. Hoffman: *IEEE J. Quantum Electron.* **37** (2001) 207.
- 22) T. Eidam, F. Röser, O. Schmidt, J. Limpert, and A. Tunnermann: *Appl. Phys. B* **92** (2008) 9.
- 23) F. Röser, J. Rothhardt, B. Ortac, A. Liem, O. Schmidt, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tunnermann: *Opt. Lett.* **30** (2005) 2754.
- 24) Q. Hao, W. Li, and H. Zeng: *Opt. Express* **17** (2009) 5815.
- 25) T. Eidam, S. Hadrich, F. Roser, E. Seise, T. Gottschall, J. Rothhardt, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tunnermann: *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.* **15** (2009) 187.
- 26) 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.
- 27) F. Roser, T. Eidam, J. Rothhardt, O. Schmidt, D. N. Schimpf, J. Limpert, and A. Tunnermann: *Opt. Lett.* **32** (2007) 3495.
- 28) J. Limpert, N. De Deguil-Robin, guil-I. Manek-Honninger, F. Salin, T. Schreiber, A. Liem, F. Roser, H. Zellmerellmer, A. Tunnermann, A. Courjaud, C. Honninger, and E. Mottay: *Opt. Lett.* **30** (2005) 716.
- 29) C. D. Brooks and F. D. Teodoroa: *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 111119.
- 30) K. C. Hou, S. A. George, A. G. Mordovanakis, K. Takenoshita, J. Nees, M. Richardson2, and A. Galvanauskas: *2007 International EUVL Symposium SO-P34* (2007).
- 31) W. Li, Q. Hao, M. Yan, and H. Zeng: *Opt. Exp.* **17** (2009) 10113.
- 32) J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer, A. Tunnermann, F. Iliew, F. Lederer, J. Broeng, G. Vienne, A. Peterson, and C. Jackobsen: *Opt. Express* **11** (2003) 818.
- 33) 古田 啓介, 今野 進, 岡本 達樹: *レーザー研究* **36** (2008) 286.
- 34) C. Wirth, O. Schmidt, I. Tsybin, T. Schreiber, S. Bohme, T. Peschel, T. Clausnitzer, F. Roser, J. Limpert, J. Rothhardt, and A. Tunnermann: *Advanced Solid State Photonics 2009*, TuB14 (2009).
- 35) O. Schmidt, C. Wirth, I. Tsybin, T. Schreiber, R. Eberhardt, J. Limpert, and A. Tunnermann: *Opt. Lett.* **34** (2009) 1567.

- 36) F. Röser, J. Rothhard, B. Ortac, A. Liem, O. Schmidt, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tünnermann: Opt. Lett. **30** (2005) 2754.
- 37) G. P. Agrawal: *Nonlinear fiber optics, Second Ed.* (Academic Press 1995) p.550.
- 38) 吉田 英次, 古瀬 裕章, 椿本 孝治, 藤田 尚徳, 河仲 準二, 宮永 憲明, 永田 豊, 木下 博雄: 第57回応用物理学関係連合講演会予稿集 18a-F-9 (2010).
- 39) 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.
- 40) G. P. Agrawal: *Nonlinear fiber optics, Second Ed.* (Academic Press 1995) p.34.
- 41) D. Gloge: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **MTT-23** (1975) 106.
- 42) 吉田 英次, 椿本 孝治, 藤田 尚徳, 宮永 憲明, 中塚 正大, 井澤 靖和: 第56回応用物理学関係連合講演会予稿集 1p-ZN-6 (2009).
- 43) 吉田 英次, 椿本 孝治, 藤田 尚徳, 宮永 憲明, 永田 豊, 木下 博雄: レーザー学会学術講演会第30回年次大会講演会予稿集 4p-I-2 (2010).

レーザーワード

ダブルクラッドファイバ(double clad fiber)

ダブルクラッドファイバは、字の通り、奇土類コアの外周部にクラッドが2重構造(近年は3重構造も開発)となったファイバであり、クラッド内に励起光を閉じ込め、高効率に奇土類コアを励起するため開発された。近年の高出力LDの低価格化により、高出力ダブルクラッドファイバの開発が活発である。ダブルクラッドファイバの代表的な大口径(Large Mode Area: LMA)ファイバは、通信用のシングルモードファイバ(SMF)によるコア

励起増幅に比べ、ダブルクラッド構造であるため、クラッド励起による高効率化が可能である。特徴として、NA値が0.06以下と非常に小さく、大きな曲げ損失を与える事で高次モードを抑制した空間フィルタースとして働くため、単一横モード且つ高出力が得られる。また、大口径、短ファイバ長により、非線形現象(SRS, SBS等)の抑制が可能である。

(吉田 英次)