

高出力 Yb 添加ファイバーレーザー研究の 最前線と展望

白川 晃・植田 憲一

Frontier and Future of High-Power Yb-Doped Fiber Lasers

Akira SHIRAKAWA and Ken-ichi UEDA

Yb-doped fiber laser has realized remarkable high power, high brightness light sources. In this paper, the advances and frontiers of the fiber laser research are reviewed. We overview the advantageous characteristics of fiber lasers, and discuss the power/energy limitations of the single-mode Yb-doped fiber laser/amplifier. For further power and energy scaling, various architectures of beam combining of many fiber lasers are examined. Some of the pioneering fiber lasers such as photonic-bandgap fiber lasers for artificial control of the gain spectra and double-clad fiber Raman lasers for brightness enhancement are also introduced.

Key words: high-power fiber laser, Yb-doped fiber, photonic-crystal fiber, beam combining, brightness enhancement

1990年代後半からのファイバーレーザーの高出力化の進展は目覚ましく、高平均出力レーザー分野においてはもはや他を凌駕した感がある。単体のファイバーレーザー出力の時系列を図1に示す。2008年に、IPG Photonics社はシングルモード (SM) 6 kW 出力を実現している¹⁾。導波路構造により横モードが完全に制御され、集光特性にすぐれたビーム品質およびファイバー伝送可能という特徴は、さまざまなレーザー応用において圧倒的に優位であり、さまざまな産業応用に用いられるようになった。

本稿では、高出力ファイバーレーザーの主役である Yb 添加ファイバーレーザーに焦点を絞り、顕著な高輝度高出力を実現しているその特徴を振り返る。そして、ファイバーレーザーのパワー・エネルギー限界について考察を行う。パワー・エネルギースケールリングのための複数ファイバーレーザーのビーム結合、導波特性を高度制御した最新ファイバーレーザーについて、最前線の研究を紹介する。

1. Yb 添加ファイバーレーザーの特徴

以下に、Yb 添加ファイバー²⁾の特徴を列記する。高出

力、高輝度、高効率レーザーとして、原理的に Yb 添加ファイバーレーザーが最適であることがわかる。

1.1 低熱負荷・高冷却能力

Yb³⁺イオンは量子効率がほぼ1で、準三準位系のため量子欠損も小さいことから、単位レーザー出力あたりの熱発生量が希土類イオンの中で最小に抑えられる。さらに、ファイバーという細線構造は、表面積/体積比を無限大にする極限であり、熱を長手方向に分散して放逸するため、冷却能力もきわめて高い。この両特性により、Yb 添加ファイバーは高平均出力レーザーに最も理想的な利得材料であり、自然空冷で数 kW 出力のレーザー動作が可能となった。従来、高出力レーザーに付随していた外部水冷装置などの付帯設備を不要にし、高い実用性を実現している。

1.2 導波路構造・輝度増強器

ファイバーレーザーは導波路構造により横モードが制御されているため、固体レーザーの高出力化で問題となる熱レンズ等によるビーム品質の低下を回避でき、高出力高ビーム品質、すなわち高輝度光を得ることが容易である。また、高出力ファイバーレーザーでは、励起光についても導

電気通信大学レーザー新世代研究センター (〒182-8585 調布市調布ヶ丘1-5-1) E-mail: akira@ils.uec.ac.jp

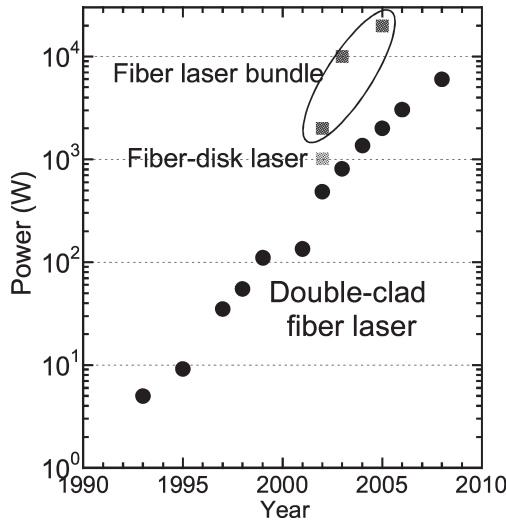


図1 ファイバーレーザーのパワー向上の歴史。

波路に閉じこめるダブルクラッドファイバー (DCF) 構造が一般に用いられる (図2)。ビーム品質が悪く集光特性にすぐれない高出力レーザーダイオード (LD) 光を比較的大きな断面積をもつ内部クラッド (以降単にクラッドとする) に注入・伝搬させ、希土類イオンを添加したコアで徐々に吸収させ、高輝度のコアモードでレーザー発振させる。空間輝度増強器であるといっている。また、さまざまなレーザー応用において、慣性質量の小さいファイバーで動作点まで全ファイバー伝送できるメリットは大きい。

1.3 低損失・高利得

光情報通信の基盤技術として高度に成熟したシリカファイバー技術は、超低損失な利得材料を実現し、Yb イオンを添加しても dB/km オーダーの損失に過ぎない。また、クラッドに閉じこめられた高強度励起光との長距離相互作用のため、従来の固体レーザーではありえない顕著な高利得特性をもつ。図3に、典型的な Yb 添加 DCF の小信号利得スペクトルを示す。このように数十 dB/m もの小信号利得を有し、1000~1200 nm の広い波長域にわたる利得を有することから、超短パルスレーザーや波長可変レーザーとしてもすぐれている²⁾。高出力動作のためには与えられた励起パワーに対してレーザー媒質から誘導放出パワー

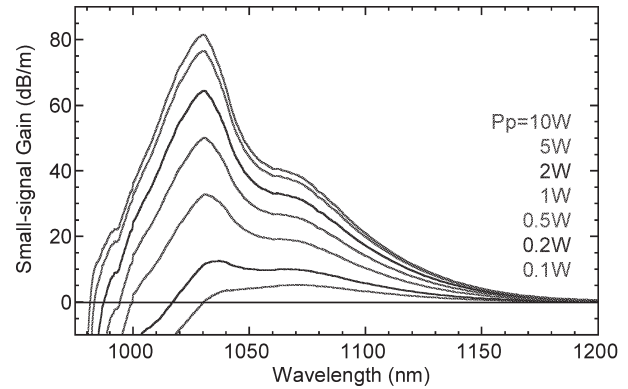


図3 典型的な Yb 添加ダブルクラッドファイバーの小信号利得スペクトル。Yb₂O₃ 濃度 14000 ppm wt, コア径 5 μm, クラッド径 126 μm。

を効率よく引き出すことが重要で、一般に利得/損失比が大きいほど最大引き出し効率が高い³⁾。さらに、小径コアに閉じこめられた高強度信号光は完全飽和増幅を実現し、その最大効率での動作を可能とする。したがって、光ファイバーは高効率レーザー媒質として最もすぐれているといえる。

1.4 高破壊閾値

熱膨張係数が小さく高品質で欠陥が少ないことから、シリカファイバーの光学的破壊閾値はきわめて高い。CW で 2~5 GW/cm² 程度といわれている⁴⁾。2 GW/cm² とすれば、10 μm コアで 1.5 kW のパワー伝送が可能となる。パルスの場合、バルクの破壊閾値は約 300 J/cm² (パルス幅 1 ns)⁵⁾ あるいは 4100 J/cm² (パルス幅 8 ns)⁶⁾ という大きな値をもつことが最近の精密な研究で明らかになってきており、シリカファイバーは光強度耐性の面からすぐれた材料であることがわかる。

2. 高出力化と限界

Yb ファイバーレーザーの出力限界を考察する。

2.1 大モード面積ファイバー

次節に示すように、コア径を拡大し大モード面積 (LMA) 化することが高出力化に有効である。では、SM 特性を保持しながら、どこまでコア径を大きくすることが

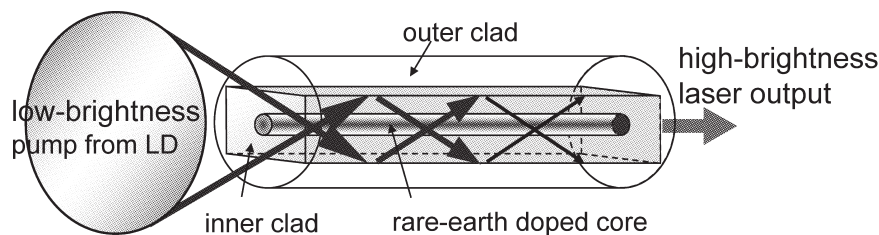


図2 ダブルクラッドファイバーレーザーの構成。

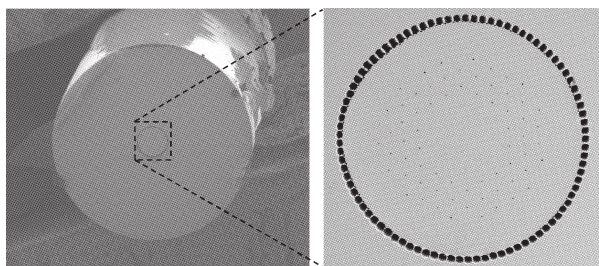


図4 Yb添加ロッド型フォトニック結晶ファイバーの断面写真。中央部の無空孔部分がコアでYbが添加されている。微小な空孔が配列している周囲部分が内部クラッドで、外部クラッドはエアクラッド構造による。コア径80 μm 、クラッド径200 μm 、外径1.5 mm、976 nmにおける実効吸収は30 dB/m。Limpert博士の好意による。

できるだろうか。従来型 step-index ファイバーの製造技術ではコアの開口数 (NA) を0.05以下にすることは難しく、20 μm を超えるコア径の SM ファイバーを実現することは困難である。空孔を周期配列したクラッドをもつフォトニック結晶ファイバー (PCF)⁷⁾ は LMA で完全 SM 動作を実現でき、これを利得ファイバーに用いた LMA-PCF レーザーが広く用いられるようになった^{8,9)}。非線形性が大幅に低減できることから、CW レーザーだけでなくナノ秒・フェムト秒のパルス光増幅にも大変有効である。しかし、低 NA のためファイバーの曲げに非常に敏感な点が LMA 化の障害であった。これを克服するために、外部に大きなバッファを施し径2 mm 程度のガラス棒としたロッド型 PCF が考案された¹⁰⁾。図4はコア径80 μm のもので¹¹⁾、空孔径がきわめて小さく NA は0.02以下であるが、曲げられないため曲げ損失が発生しない。コア・クラッドの断面積比 (アスペクト比) が小さく吸収が大きいため1 m以下の短尺で動作でき、システムサイズは固体レーザーと比べて遜色ない。これまで、最大コア径100 μm の SM 動作 Yb 添加 PCF が実現している¹²⁾。さらに最近、高次モードに大きな閉じこめ損失を与えた“leakage-channel”ファイバーにより、非添加ファイバーで170 μm コアでの SM 伝搬が報告されるなど¹³⁾、さらなる LMA 化の挑戦が続いている。

2.2 平均パワー限界

Yb 添加 DCFL の動作限界を考える。詳細は文献14, 15) を参照してほしい。ファイバー長 L は実効吸収係数の逆数程度が必要となり、アスペクト比 $(D/d)^2$ (コア径 d 、クラッド径 D) に比例して長尺になる。したがって、誘導ラマン散乱 (SRS) や誘導ブリュアン散乱 (SBS) などの非線形誘導散乱が高出力動作限界を与える。スペクトル幅が広い場合前者が支配的であり、ここではそれを考える。

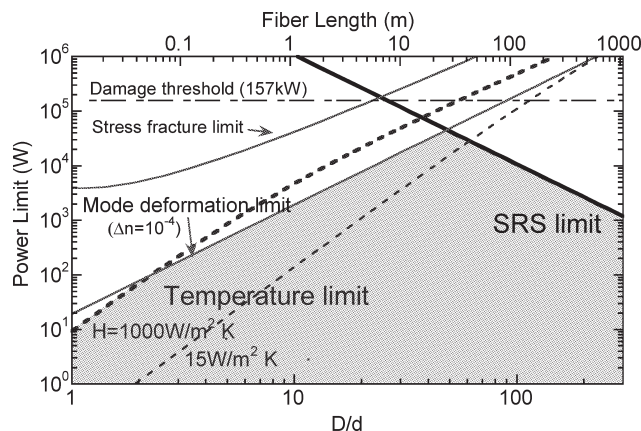


図5 Yb 添加ダブルクラッドファイバー (コア径100 μm) のパワー限界。Yb₂O₃ 濃度5000 ppm wt、最大温度600 Kとした。Hは熱伝達係数、 Δn は熱誘起屈折率分布の差。グレーの領域が動作可能範囲。

L が短いほど、コア径 d (あるいはモード面積 A_{eff}) が大きいほど限界パワーは大きくなり、高出力化には有利である。しかし、高濃度添加やアスペクト比減少により実効吸収係数を増加させて L を短くし過ぎると、単位長さあたり熱負荷が増すため温度上昇による動作限界を迎える。冷却を行えば10 μm コアより kW を超える出力が可能である^{14,15)}。しかし、そのような小径クラッドに空間品質の低い LD 光を端面励起で1 kW 以上導入するのは非常に難しい。現在の SM 利得ファイバーの最大コア径 $d=100 \mu\text{m}$ の場合を考えると、図5のようにクラッド径 $D \sim 50 d=5 \text{ mm}$ 、 $L \sim 25 \text{ m}$ で約45 kWの動作限界ピークをもつ。この場合、熱負荷による限界は温度上昇ではなく、温度勾配により誘起される屈折率分布による熱レンズ効果による。最近、Dawson らも同様に、コア径90 μm 以上では径によらず38.6 kWが限界であると報告している¹⁶⁾。細かな数値は Yb 濃度や条件式の因子によるが、よく一致している。しかし、コア径100 μm では曲げ損のため、またクラッド径5 mmでは破断限界のため曲げることは不可能である。25 m長のファイバーをまっすぐ置くことはナンセンスであろう。したがって、5~10 kW程度が実際上の SM ファイバーレーザーの平均パワー限界と考えられる。

2.3 エネルギー限界

ファイバーレーザーは固体レーザーに比肩する高平均出力動作を実現しているが、パルス動作では遠く及ばない。コア径が小さく、高いピーク強度により非線形性が誘起されやすいだけでなく、飽和エネルギーが小さいためである。現在の最大コア径 $d=100 \mu\text{m}$ の場合のさまざまなエネルギー限界を図6に示す。ロッド型 PCF 長は0.5~1 mの範囲で使われているため、実効ファイバー長 $L_{\text{eff}}=0.3$

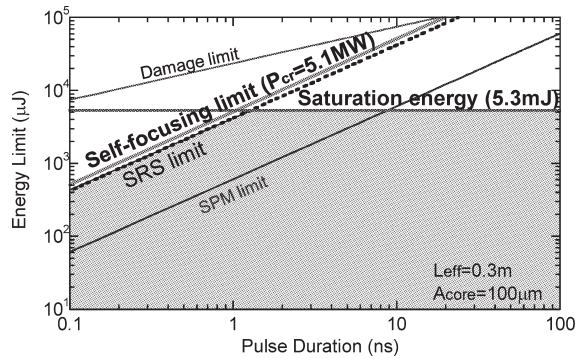


図6 Yb添加ファイバーにおけるパルスエネルギー限界. コア径100 μm , 実効ファイバー長0.3m, 波長1064nm. SBS, SPMが問題にならない場合の動作可能範囲をグレーの領域で示す.

mとした. このように, 動作限界を与えるのは, 破壊閾値 (300 J/cm² @ $\Delta t=1$ ns とし, $E_{\text{damage}} \propto \Delta t^{1/2}$ を仮定⁵⁾) ではない. 幅約 5 ns 以下のパルスを用いるか, スペクトル幅が広い場合 SBS は抑制されるため, SBS 限界は無視できる¹⁷⁾. 自己位相変調 (SPM) 限界は, 超短パルス光をチャープパルス増幅する場合を考え, ピーク非線形位相 $\phi_{\text{NL}} = \pi$ を与えるエネルギーとした. インコヒーレントなマルチ縦モード光を増幅する際にも, ビートスパイクが SPM によりスペクトル広がりを誘起するため, 波長変換応用等では $\phi_{\text{NL}} \sim 10$ 程度が限界となる¹⁸⁾. スペクトル広がりが問題にならない場合や, 単一周波数でビートがない場合には, SPM 限界は無視できる. したがって, $\Delta t < 1 \sim 2$ ns の領域では, 動作限界はやはり SRS で与えられる. SRS 限界は L_{eff} に反比例するため, コア吸収を向上し L_{eff} をさらに短くすれば向上できるが, 今度は自己収束効果が限界を与える. これは L_{eff} にも, コア径にもよらない. 自己収束パワー ($P_{\text{cr}} = 5.1$ MW @ 1064 nm) は定数のためである¹⁹⁾. したがって, 数 ns 以下の領域では LMA 化によるスケールアップは不可能で, $E \approx P_{\text{cr}} \Delta t$ がエネルギー限界となり, 1 ns で 5.1 mJ と決まる. 数 ns 以上では飽和エネルギーが限界を与える. 飽和フルエンス ($F_{\text{sat}} = 68$ J/cm² @ 1064 nm) より $E = F_{\text{sat}} A_{\text{eff}} \approx F_{\text{sat}} A_{\text{core}} = 5.3$ mJ となり, パルス幅によらない. しかし, LMA 化によるスケールアップは可能である.

この数年, 高エネルギーパルスファイバーレーザーの研究が盛んに行われてきた^{5,11,12,20)}. 重要なのが 2007 年の Di Teodoro らの報告で, 90 cm 長の 100 μm コアロッド型 PCF 増幅器によりパルス幅 1 ns で $E = 4.3$ mJ, ピークパワー 4.5 MW を達成し, ほぼ限界値に到達している¹²⁾. これを打ち破るには P_{cr} を増大するしかない. ごく最近, マルチモードファイバー中の LP_{0m} 高次モードは P_{cr} が大

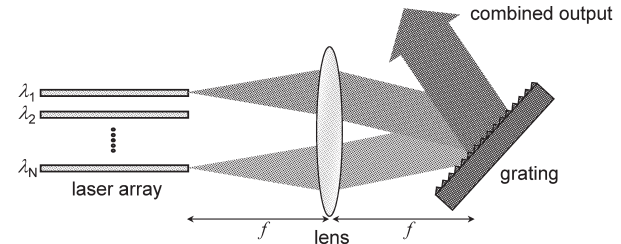


図7 波長ビーム結合の模式図.

きいという提案がなされ, 注目される²¹⁾. 高次モードは NA が大きく収束しにくいいためである. LP_{0m} モードは基本 LP₀₁ モードと相互に変換でき, 最近急速に研究が進んでいる²²⁾. P_{cr} の克服が実現できるか, 興味がつきない.

3. 複数ファイバーレーザーのビーム結合

熱負荷限界, 非線形限界, そして破壊閾値を超えたパワー・エネルギースケールアップのためには, ファイバーレーザーの並列化が唯一の方法である. 複数の SM ファイバーレーザーをビーム品質を維持したままビーム結合する研究が, 世界中で盛んに行われている.

3.1 スペクトルビーム結合

波長多重 (WDM) 通信のように, 複数の異なる波長でファイバーレーザーを発振させ, 回折格子やダイクロイックミラーで1つのビームにインコヒーレントに結合する方法である (図7)²³⁾. Yb の利得幅は約 100 nm なので, 十分狭いバンド幅のレーザーを 3 nm の波長間隔で並べれば 20~30 本のビーム結合が可能になる. 回折格子を用いて 3 個の Yb ファイバー増幅器出力 (1055, 1062.5, 1065 nm, 170~200 W) をビーム結合し, 522 W の加算出力が報告されている²⁴⁾. しかし, 回折格子では波長間隔を近づけるに従いビーム内での角度分散が問題になる. 反射型ポリュームブラッググレーティングを用いた角度分散のない高波長密度結合の研究が注目される. ごく最近 Andrusyak らは, 約 0.5 nm 間隔で発振している 160 W の Yb ファイバーレーザーを 5 個ビーム結合し, 加算出力 773 W, 効率 91.7% を達成している²⁵⁾. 高波長密度化により 200 本のビーム結合が可能になれば, 1 MW 出力も夢ではない. 空間輝度が向上する一方, スペクトル輝度は低下するため, 本手法が有効なのは加工, エネルギー応用などである.

3.2 コヒーレントビーム結合

コヒーレント結合はスペクトル輝度を落とすことなく 1 つのビームに結合できる. さらに各レーザーアレイの位相を制御することでビームの出力方向 (偏向) やビームパターンを制御することができ, 実現できれば多くの産業応用

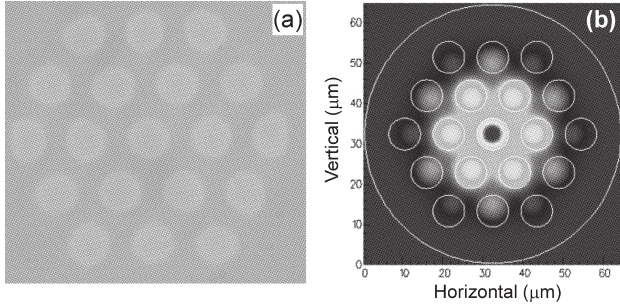


図8 (a) 19コア Yb 添加マルチコアファイバーの断面写真。コア径 $7.9\ \mu\text{m}$ ，ピッチ $11\ \mu\text{m}$ 。(b) in-phase スーパーモードの強度分布 (計算)。

を生み出すと期待されている。

コヒーレントビーム結合のひとつに複数のコアを配置したマルチコアファイバーレーザーがある。図8(a)に、筆者らが研究中の Yb 添加 19 コアファイバーを示す。各コアの電界が同位相である in-phase スーパーモード (図8(b)) は、遠視野像で回折限界のほぼ単一のビームパターンを形成できる。エバネセント結合²⁶⁾や Talbot 共振器^{27,28)}により、in-phase スーパーモードのみ励振させる位相同期ファイバーレーザーアレイが報告されている。しかし、他のスーパーモードに対し十分大きな損失差を与えることは容易ではなく、発振閾値を超えるに従い複数のスーパーモードが励振することが多く、限定的な位相同期にとどまっている。また、ファイバーとしては単一であり、熱負荷限界を向上することはできないため、平均出力ではなくモード面積拡大によるパルスエネルギー向上に有効であると考えている。

平均出力の向上のためには、別個の光源を加算するしかない。われわれは、ファイバーカップラーを用いた簡便な受動コヒーレントビーム結合法を提案した^{29,30)}。 N 個のファイバーレーザーを $N \times N$ 等分岐比ファイバーカップラーで近視野結合して複合共振器を構成することで、1つのポートから約 N 倍に加算された単一出力を得ることができる (図9(a))。ファイバー長が異なるために位相同期する波長が選択励振されるため、アレイ数 N が増えるに従いその密度は減少し、加算効率が低下する。線形理論に基づくスケール理論を構築し、加算効率を N ，共振器長，レーザー帯域の関数として求めた。その結果、 $N=8\sim 10$ 個がコヒーレント加算の限界であることを明らかにした (図9(b))^{30,31)}。この限界は、ファイバー長の異なるファイバーレーザーからなる受動コヒーレントビーム結合においては結合法によらない根源的なもので、これを打破するために共鳴によるモード引き込み、自己位相変調などの非線形モデルの模索が行われている。

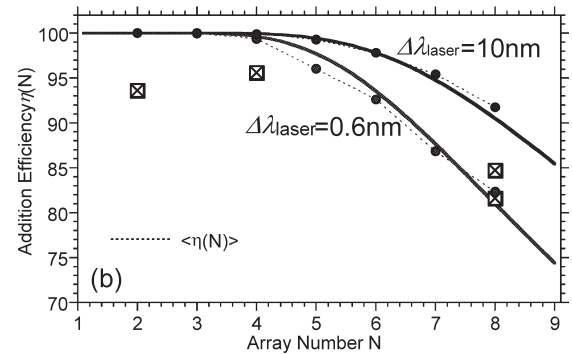
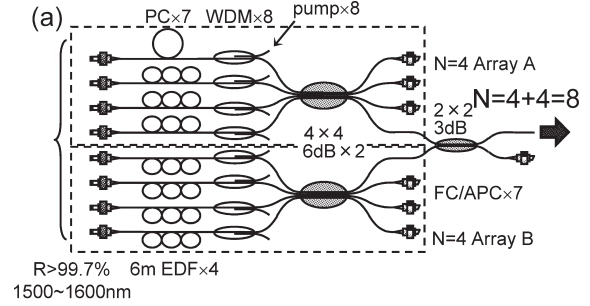


図9 複合共振器ファイバーレーザーコヒーレントアレイ。(a) $N=8$ アレイの実験配置図。(b) レーザー帯域 $0.6\ \text{nm}$ と $10\ \text{nm}$ の場合の加算効率のアレイ数依存性。期待値シミュレーション、線形スケール理論、実験結果をそれぞれ丸点、実線、四角で示す。

ファイバー長の帰還制御により位相同期を行う能動コヒーレントビーム結合は、手間はかかるが最も直接的で確実な方法である。MOPFA (master oscillator-power fiber amplifier) 構成において、マスター発振器出力を $(N+1)$ 個に分岐し1つを参照光に、 N 個を信号光として偏波保持ファイバー増幅する。各増幅器出力ビームを参照光と干渉させて位相検波し、各ファイバー長の変動を帰還制御された位相変調器で補償して位相同期させる。2006年に $N=4$ ファイバー増幅器アレイにより $470\ \text{W}$ の位相同期出力が報告されている³²⁾。注目されるのは、Shay らの参照光を用いないコヒーレントアレイの研究で³³⁾、各信号光に異なる周波数の位相変調を加え、増幅器アレイ出力の遠視野信号からアレイ間位相差情報を復調して帰還制御すると、各増幅器間の位相差が自己収束し、すべてが位相同期する。受動コヒーレントアレイの一面をもち、両者の特徴をどこまで生かすことができるか興味深い。 $N=9$ ファイバー増幅器アレイから $100\ \text{W}$ の位相同期出力が実証され、現在 $N=16$ ，加算出力 $3\ \text{kW}$ を目標に研究が進められている (図10)。

4. 新しいファイバーレーザー

ファイバーの導波路の特徴を生かし、輻射場を高度に制御した高品質・新機能性レーザーの研究が注目されてい

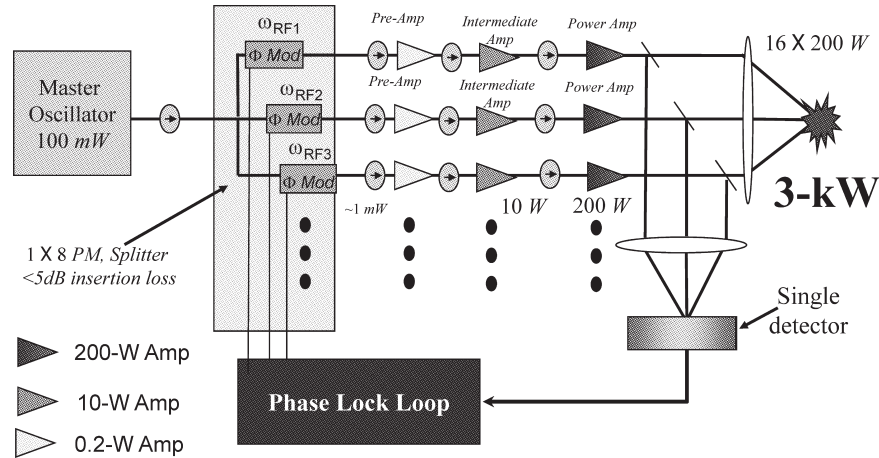


図10 自己位相同期ファイバーレーザーアレイ。Shay 博士の好意による。

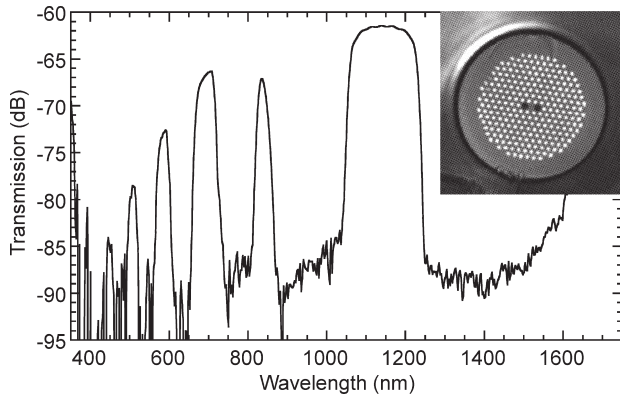


図11 Yb添加フォトニックバンドギャップファイバーの断面写真(右上)および白色光透過スペクトル。

る。ここでは、筆者がかかわる2つの研究を紹介したい。

4.1 利得スペクトル制御フォトニックバンドギャップファイバーレーザー

ファイバーレーザーは利得がきわめて大きく、高効率の飽和増幅が容易に実現できる一方で、増幅自然放光(ASE)や非線形誘導散乱が卓越し、高S/N比の高コヒーレンス光を生成するには不向きである。これらの雑音の指数関数的増大を抑制するには、波長依存損失を与えることが必要である。これを実現するフォトニックバンドギャップファイバー(PBGF)レーザーの研究が始まっている。図11に、筆者らが研究開発しているYb添加PBGFの断面および透過スペクトルを示す³⁴⁾。中央のYb添加コアのまわりにGe添加ロッドが周期配列されたクラッド部をもち、通常のファイバーとは異なり、クラッドの実効屈折率がコアよりも高く全反射伝搬できないが、特定の波長帯にのみフォトニックバンドギャップ(PBG)によるコアモードが形成され低損失伝搬できる⁷⁾。このシャープなバンド

パス特性を用いて希土類イオンの利得スペクトルを人工制御することができ、高利得帯のASEを抑制し利用の困難であった低利得帯で高出力レーザー動作が可能になった。はじめてのスペクトル制御PBGFレーザーは2008年のPureurらの977 nm三準位Yb添加PBGFレーザーで、出力130 mWが得られている³⁵⁾。われわれは最近、エアクラッドYb添加PBGF増幅器により、1156 nmで32 W、スロープ効率66%、1178 nmで30 W、スロープ効率58%を達成し、PBGFレーザーのパワー記録を飛躍的に更新した³⁴⁾。いずれも1030~1100 nm帯の伝搬を禁制し、所定の波長付近で利得ピークをもつように設計されている。第1ストークス波長で伝搬禁制とすればSRSも抑制でき、ファイバーレーザーのパワー・エネルギー限界の飛躍的な向上が期待される(2章参照)。PBGFの異常構造分散³⁶⁾や大モード面積³⁷⁾等の特徴も相まって、新波長光源、低雑音増幅器、高出力光源、超短パルスレーザーなど、今後急速に研究が進むと期待される。

4.2 輝度増強ファイバーラマンレーザー

2章で述べたように、非線形誘導散乱はファイバーレーザーの動作にさまざまな制限を与えるが、利用価値も高い。SRSを用いた波長変換は広く行われているが、ここでは今後進展が期待される輝度増強について紹介したい。マルチモードファイバー中の非線形誘導散乱の利得は、有効モード面積の小さい低次モードのほうが高次モードよりも大きくなるため、誘導散乱光は低次モードに集中し、空間輝度が向上する。SBS³⁸⁾、SRS³⁹⁻⁴¹⁾の双方について研究されている。図12(a)に、われわれが研究を行っているダブルクラッドラマンファイバーの断面を示す⁴¹⁾。全シリカ構造をもち、径20 μm 、NA 0.2のクラッドにマルチモード励起光を注入し、径9 μm のコアより高輝度なスト

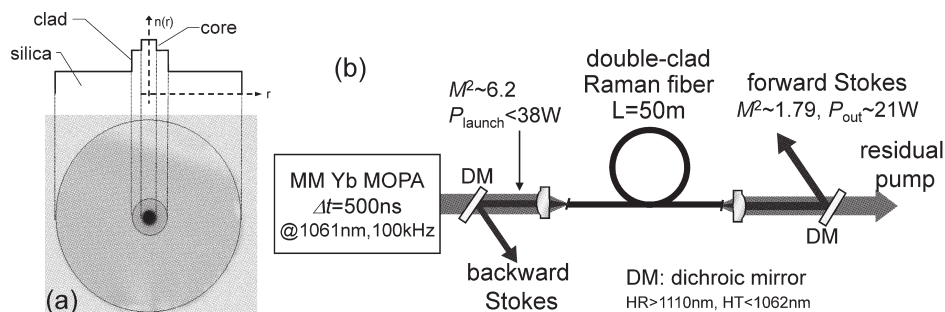


図 12 (a) ダブルクラッドラマンファイバーの断面図。コア、クラッドともに Ge 添加されており、コア部により高濃度添加されている。(b) 輝度増強実験配置図。

ークス光を得る。上述の利得差に加え、コアに Ge を高濃度添加することで、コアモードとクラッドモードの利得差をさらに増大している。50 m 長のファイバーを用いて、マルチモード Yb ファイバー MOPA の出力 (500 ns, 380 μ J, 38 W, $M^2=6.2@1061$ nm) がコアモード第 1 ストックス光 (210 μ J, 21 W, $M^2=1.79@1112$ nm) に変換され、変換効率 55%、輝度増強比 6.1 が得られた (図 12 (b))⁴¹⁾。輝度増強比を向上するためにはコア・クラッドのアスペクト比を大きくする必要があるが、コアモードは強度が高く容易に高次ストックス光に変換してしまうため、高変換効率のためにはアスペクト比約 5 が限界である。前節の PBGF 技術を導入し、第 2 ストックス光波長で伝搬を禁制することで、大きなアスペクト比をとることが可能になり、輝度増強比を飛躍的に向上できると期待される。もちろん、ファイバーの破壊閾値を超える出力を得ることはできないが、2 章で述べたように高いビーム品質を維持しながら高エネルギー増幅するのは容易ではなく、大きな飽和エネルギーを有する Yb 添加大口径コアマルチモードファイバー光源を最終段で高輝度光に変換できれば、システムが大幅に単純化でき有用性が高い。さらに、非線形誘導散乱はビーム結合にも用いることができ⁴²⁾、今後の展開が注目される。

以上のように、ファイバーレーザーの研究は高輝度・高出力だけでなく、導波特性を高度に制御することで、固体レーザーでは実現困難な新しいレーザーへと大きく展開している。ファイバーレーザーの有する高輝度性・熱制御性・アライメントフリー・軽量性・可搬性などの特性は、さまざまなレーザー応用のうえで大変重要な特徴であり、ファイバーレーザーは今後ますます発展してゆけよう。

Friedrich-Schiller 大学 Jena 校の Limpert 博士、および米 Air Force Research Laboratory の Shay 博士には図の使用を快諾・送付していただいた。米 Michigan 大学の

Galvanauskas 教授とはパルスエネルギー限界について有意義な議論をさせていただいた。輝度増強ファイバーラマンレーザーの研究は英 Southampton 大学の Nilsson 教授のもとで行った。以上、記して感謝したい。

文 献

- 1) D. Gapontsev: "6 kW CW single mode ytterbium fiber laser in all-fiber format," *Proc. DEPS SSDLTR* (Albuquerque, 2-5 June, 2008).
- 2) H. M. Pask, R. J. Carman, D. C. Hanna, A. C. Tropper, C. J. Mackechnie, P. R. Barber and J. M. Dawes: "Ytterbium-doped silica fiber lasers: Versatile sources for the 1-1.2 μ m region," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **1** (1995) 2-13.
- 3) 植田憲一: "ファイバレーザーの基礎と将来", *レーザー研究*, **29** (2001) 79-83.
- 4) V. P. Gapontsev, N. S. Platonov, O. Shkurihin and I. Zaitsev: "400 W low-noise single-mode cw ytterbium fiber laser with an integrated fiber delivery," *Conference on Lasers and Electro-Optics*, paper CThPDB9 (Baltimore, 2003).
- 5) W. Torruellas, Y. Chen, B. McIntosh, J. Farroni, K. Tankala, S. Webster, D. Hagan, M. J. Soileau, M. Messerly and J. Dawson: "High peak power ytterbium doped fiber amplifiers," *Proc. SPIE*, **6102** (2006) 61020N.
- 6) A. V. Smith and B. T. Do: "Bulk and surface laser damage of silica by picosecond and nanosecond pulses at 1064 nm," *Appl. Opt.*, **47** (2008) 4812-4832.
- 7) J. C. Knight: "Photonic crystal fibres," *Nature*, **424** (2003) 847-851.
- 8) J. Limpert, A. Liem, M. Reich, T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer, A. Tünnermann, J. Broeng, A. Petersson and C. Jakobsen: "Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier," *Opt. Express*, **12** (2004) 1313-1319.
- 9) A. Shirakawa, J. Ota, M. Musha, K. Nakagawa, K. Ueda, J. R. Folkenberg and J. Broeng: "Large-mode-area erbium-ytterbium-doped photonic-crystal fiber amplifier for high-energy femtosecond pulses at 1.55 μ m," *Opt. Express*, **13** (2005) 1221-1227.
- 10) J. Limpert, N. Deguil-Robin, I. Manek-Hönninger, F. Salin, F. Röser, A. Liem, T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer, A. Tünnermann, J. Broeng, A. Petersson and C. Jakobsen: "High-power rod-type photonic crystal fiber laser," *Opt. Express*, **13** (2005) 1055-1058.

- 11) F. Röser, T. Eidam, J. Rothhardt, O. Schmidt, D. N. Schimpf, J. Limpert and A. Tünnermann: "Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 3495-3497.
- 12) F. Di Teodoro and C. D. Brooks: "Multi-mJ energy, multi-MW peak-power photonic crystal fiber amplifiers with near-diffraction-limited output," *Conference on Lasers and Electro-Optics 2007*, paper CFI3 (Baltimore, 2007).
- 13) L. Dong, J. Li, H. McKay, A. Marcinkevicius, B. Thomas, M. Moore, L. Fu and M. E. Fermann: "Robust and practical optical fibers for single mode operation with core diameters up to 170 μm ," *Conference on Lasers and Electro-Optics 2008*, paper CPDB6 (San Jose, 2008).
- 14) 白川 晃, 植田憲一: "高輝度高出力ファイバーレーザー", *電気学会論文誌 (C)*, **124** (2004) 1367-1374.
- 15) 白川 晃, 植田憲一: "シングルモード Yb 系ファイバーレーザーの高出力化の現状と動向", *レーザー研究*, **33** (2005) 254-261.
- 16) J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach, M. Y. Shverdin, E. A. Stappaerts, A. K. Sridharan, P. H. Pax, J. E. Heebner, C. W. Siders and C. P. J. Barty: "Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power," *Opt. Express*, **16** (2008) 13240-13266.
- 17) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, New York, 1995).
- 18) Y. Jeong: private communication (2007).
- 19) G. Fibich and A. L. Gaeta: "Critical power for self-focusing in bulk media and in hollow waveguides," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 335-337.
- 20) A. Galvanauskas, M. Y. Cheng, K. C. Hou and K. H. Liao: "High peak power pulse amplification in large-core Yb-doped fiber amplifiers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (2007) 559-566.
- 21) G. R. Hadley: "High-power pulse propagation in optical fibers," *Optical Fiber Communication Conference 2008*, paper OTuB1 (San Diego, 2008).
- 22) S. Ramachandran, J. W. Nicholson, S. Ghalmi, M. F. Yan, P. Wisk, E. Monberg and F. V. Dimarcello: "Light propagation with ultralarge modal areas in optical fibers," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 1797-1799.
- 23) S. J. Augst, A. K. Goyal, R. L. Aggarwal, T.-Y. Fan and A. Sanchez: "Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 331-333.
- 24) T. H. Loftus, A. Liu, P. R. Hoffman, A. M. Thomas, M. Norsen, R. Royse and E. Honea: "522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 349-351.
- 25) O. Andrusyak, I. Ciapurin, V. Smirnov, G. Venus, N. Vorobiev and L. Glebov: "External and common-cavity high spectral density beam combining of high power fiber lasers," *Proc. SPIE*, **6873** (2008) 687314.
- 26) P. K. Cheo, A. Liu and G. G. King: "A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **13** (2001) 439-441.
- 27) M. Wrage, P. Glas and M. Leitner: "Combined phase locking and beam shaping of a multicore fiber laser by structured mirrors," *Opt. Lett.*, **26** (2001) 980-982.
- 28) L. Michaille, C. R. Bennett, D. M. Taylor, T. J. Shepherd, J. Broeng, H. R. Simonsen and A. Petersson: "Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 1668-1670.
- 29) A. Shirakawa, T. Saitou, T. Sekiguchi and K. Ueda: "Coherent addition of fiber lasers using a fiber coupler," *Opt. Express*, **10** (2002) 1167-1172.
- 30) A. Shirakawa, K. Matsuo and K. Ueda: "Fiber laser coherent array for power scaling, bandwidth narrowing, and coherent beam direction control," *Proc. SPIE*, **5709** (2005) 165-174.
- 31) D. Kouznetsov, J.-F. Bisson, A. Shirakawa and K. Ueda: "Limits of coherent addition of lasers: Simple estimate," *Opt. Rev.*, **12** (2005) 445-447.
- 32) J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung, P. Epp, D. Hammons, H. Komine, M. Weber and M. Wickham: "Coherently coupled high power fiber arrays," *Proc. SPIE*, **6102** (2006) 61020U.
- 33) T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker, A. D. Sanchez, D. Pilkington and C. A. Lu: "Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (2007) 480-486.
- 34) A. Shirakawa, H. Maruyama, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø and J. Broeng: "High-power Yb-doped photonic bandgap fiber amplifier at 1150-1200 nm," *Opt. Express*, submitted.
- 35) V. Pureur, L. Bigot, G. Bouwmans, Y. Quiquempois, M. Douay and Y. Jaouen: "Ytterbium-doped solid core photonic bandgap fiber for laser operation around 980 nm," *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 061113.
- 36) A. Isomäki and O. G. Okhotnikov: "Femtosecond soliton mode-locked laser based on ytterbium-doped photonic bandgap fiber," *Opt. Express*, **14** (2006) 9238-9243.
- 37) S. Février, D. D. Gaponov, P. Roy, M. E. Likhachev, S. L. Semjonov, M. M. Bubnov, E. M. Dianov, M. Y. Yashkov, V. F. Khopin, M. Y. Salganskii and A. N. Guryanov: "High-power photonic-bandgap fiber laser," *Opt. Lett.*, **33** (2008) 989-991.
- 38) L. Lombard, A. Brignon, J.-P. Huignard, E. Lallier and P. Georges: "Beam cleanup in a self-aligned gradient-index Brillouin cavity for high-power multimode fiber amplifiers," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 158-160.
- 39) S. H. Baek and W. B. Roh: "Single-mode Raman fiber laser based on a multimode fiber," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 153-155.
- 40) C. A. Codemard, P. Dupriez, Y. Jeong, J. K. Sahu, M. Ibsen and J. Nilsson: "High-power continuous-wave cladding-pumped Raman fiber laser," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 2290-2292.
- 41) A. Shirakawa, C. A. Codemard, J. Ji, K. K. Cheng, A. Malinowski, D. J. Richardson, J. K. Sahu and J. Nilsson: "High-brightness 210 μJ pulsed Raman fiber source," *Conference on Lasers and Electro-Optics 2008*, paper CTuL1 (San Jose, 2008).
- 42) K. C. Brown, T. H. Russell, T. G. Alley and W. B. Roh: "Passive combination of multiple beams in an optical fiber via stimulated Brillouin scattering," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1047-1049.

(2008年12月2日受理)