

フォトニック結晶ファイバーによる高出力パルスファイバーレーザーの研究

白川研究室 八木澤 大希

1. 研究背景

ファイバーレーザーは高出力 CW 光源として、主に加工などの産業分野に応用されており、更なる高出力化を目指し日々研究されている。ファイバーレーザーは、[表面積/体積]比が非常に大きいことから、他のレーザー媒質の中でも排熱効率に優れており、高出力化で問題となる熱の影響を空冷下でもクリアできるため、高出力化に適したレーザー媒質と言える。更に、高効率、メンテナンスフリーといった扱いやすさは他のレーザーより優れた特徴である。

しかし、ファイバーレーザーは小径コアであることや長い有効相互作用長により非線形性が卓越しやすく、動作限界を迎えてしまう。パルスファイバーレーザーの高尖頭出力化に対しては、非線形光学効果の中でも特に誘導ラマン散乱(SRS)が最初に動作限界を与えるため、SRSの抑制が高尖頭出力化には不可欠である。SRS抑制のために、クラッド部に周期性を持つフォトニック結晶ファイバー(PCF)の研究は世界的になされている[1,2]。本研究で使用したPCFは、フォトニックバンドギャップファイバー(PBGF)と7コアマルチコアフォトニック結晶ファイバー(MCPCF)であり、それぞれの特徴は後述とする。これらPCFを用いた手法によりSRSなどの動作限界を与える要因を抑制し、パルスファイバーレーザーの高出力化を実証することが本研究の目的である。

2. PBGF 増幅用ナノ秒パルスファイバーシード光源の作製

本研究で作製したナノ秒パルスファイバーレーザーシード光源の構成を図2-1に示す。求めるパフォーマンスとして、高コントラスト、高ピークパワー(目標値2kW)とも目標を設定し作製を行った。ここで、コントラスト比の定義を、パルス1周期分の全エネルギーに対する主パルスエネルギーとする。

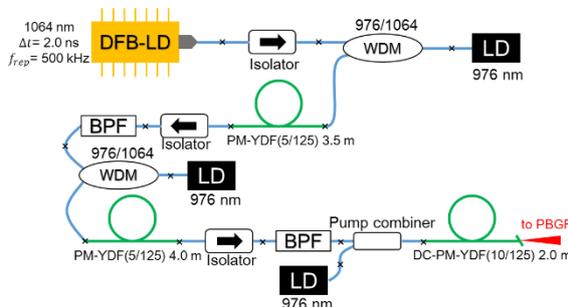


図 2-1 ナノ秒パルスシード光源

ピークパワーの高出力化のためにはコントラスト比の向上が重要であるため、シード光源として、パルス駆動型の分布帰還型半導体レーザー(DFB-LD)を用いた。DFB-LDのパルス波形と発振スペクトルを図2-2に示す。

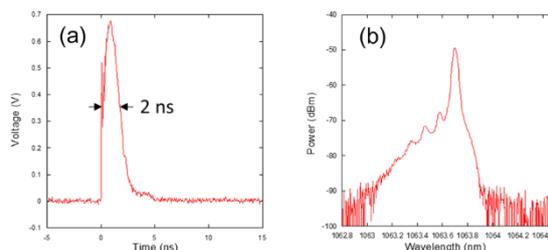


図 2-2 DFB-LD の(a)パルス波形、(b)スペクトル特性

図2-2に示すようにパルス幅2 ns、発振スペクトル1064 nm、繰り返し周波数は可変で高尖頭出力化のために500 kHzを採用した。このDFB-LDのシード光は、Yb添加ファイバー(YDF)3つによる3段階増幅器により増幅する。1段階目の増幅器として、波長976 nmのファイバー結合型LDによってPM-YDFを前方励起した。増幅時に発生するASEは、中心波長1064 nm、帯域幅2 nmのBPFにより除去した。2段階目の増幅器も、1段階目同様の構成である。3段階目のメイン増幅器では、ファイバー結合型LDによってダブルクラッドPM-YDFを前方励起し、メイン増幅を行った。

増幅後の、3段階励起LDの励起パワー

ごとのスペクトル特性を図 2-3 に示す。

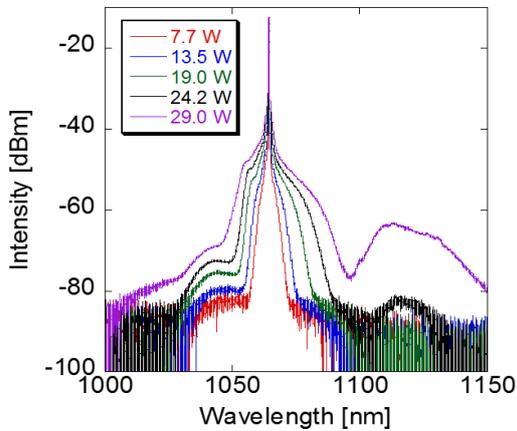


図 2-3 3 段階増幅後のスペクトル特性

励起パワーの上昇に伴いスペクトルの広がりが大きくなっている。信号光の波長 1064 nm を中心に、短波長側では ASE が、長波長側では自発ラマン散乱に起因する Stokes 光が、中心波長付近での膨らみは自己位相変調が支配的にそれぞれのスペクトルの広がりをもたらしている原因である。励起パワー 7.7、13.5 W のとき、ASE や Stokes 光の発生を抑えられ、ノイズの少ない出力スペクトルを得られていることが分かる。励起パワー 13.5 W のとき、出力は 2.2 W であった。出力 2.2 W のときの出力スペクトルと、パルス波形を図 2-4 に示す。図 2-4 のパルス波形より見積もったコントラスト比は、4/5 以上であった。このコントラスト比から見積もられるピークパワーは 2.0 kW であった。この光源を PBGF 増幅用のシード光源として用いる。

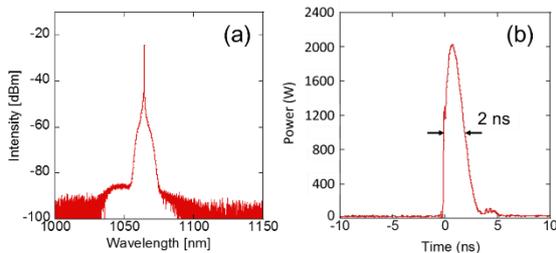


図 2-4 励起パワー 13.5 W 時の、(a) スペクトル特性、(b) パルス波形

3. SRS 抑制 PBGF 増幅器の開発

3.1. PBGF

本研究で使用した PBGF の断面図と各パラメータを図 2.1 に示す。クラッドの周期的に並ぶロッドには Ge が添加されており、母材のシリカより屈折率が高くなっている。この高屈折率ロッドの大きさや周期間隔を変えたり、曲げ径を変えたりすることで PBG による伝搬波長の制御が可能になる。PBGF の透過スペクトルを図 2-2 に示す。本研究では Yb をコアに添加したものを使用した。また、伝搬光の偏波保持のためにコアの両端には B 添加ロッドを配置している。

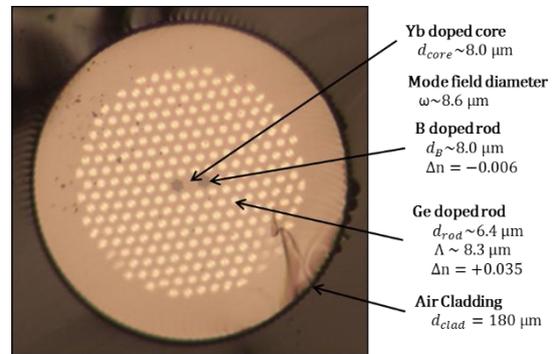


図 3-1 Yb 添加 PBGF

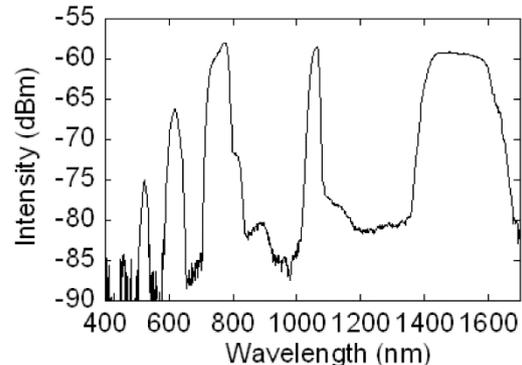


図 3-2 Yb-PBGF の透過スペクトル

3-2 Yb-PBGF による SRS 抑制パルス増幅

2 章で作製したパルスファイバーレーザーのシード光源を用いて、Yb-PBGF によるパルス増幅を行った。増幅器の構成を図 3-3 に示す。作製した波長 1064 nm のシード光源からのパルスシード光を、焦点距離 8 mm のレンズによりコリメートし、アイソレーターと $\lambda/2$ 板(Half Wave Plate:

HWP)を通過後、焦点距離 12 mm のレンズによって集光し、ファイバー長 7 m の Yb-PBGF に結合した。Yb-PBGF の励起には、波長 976 nm の LD を用いて後方励起した。増幅後のパルス光は、wedge や flipper によって分割され、近視野像、スペクトル特性、パルス波形、平均出力をそれぞれ測定するような構成となっている。

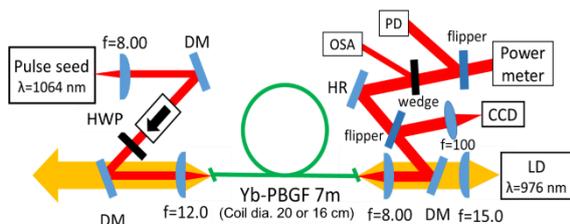


図 3-3 Yb-PBGF 増幅器

PBGF は曲げ径を調整することで曲げ損失により、透過スペクトルを狭帯化することが可能である。本研究で使用した Yb-PBGF における、曲げ径ごとの狭帯域の透過スペクトルとラマン利得スペクトルを重ねたグラフを図 3-4 に示す。曲げ径に依らず短波長側の透過スペクトル帯域の変化が少ないのは、Yb の吸収によるためである。

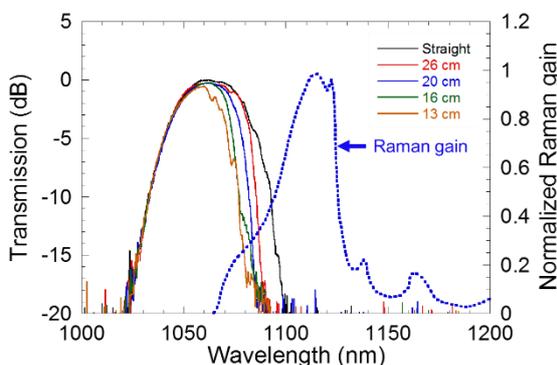


図 3-4 Yb-PBGF の透過スペクトル(実線) ラマン利得スペクトル(破線)

SRS は通常、信号光に対して長波長側で発生する。波長 1064 nm に対しては、ラマン利得のピークは 1120 nm 付近に持ち、広い波長帯域に利得スペクトルは分布している。SRS 抑制のための PBGF 増幅には曲げ径が 13 cm のとき、ラマン利得帯に対してより高い損失を与えることができ

る。しかし、PBGF は曲げに弱く折れてしまうため、本研究では PBGF の曲げ径は長波長側のカットオフを 1080 nm 付近に持つ 20 cm、16 cm を選択した。

3-3 実験結果

得られた出力特性を図 3-5、スペクトル特性を曲げ径 20 cm 時を図 3-6、曲げ径 16 cm 時を図 3-7、パルス波形を図 3-8 にそれぞれ示す。

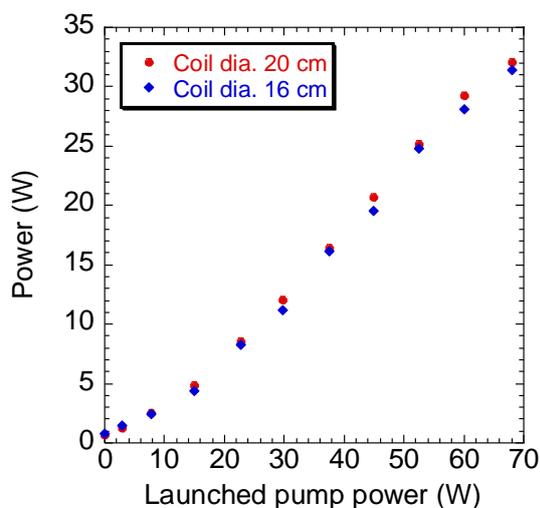


図 3-5 Yb-PBGF 増幅後の出力特性

励起 LD の最大励起出力 68.1 W まで増幅でき、最大平均出力は曲げ径 20 cm 時は 32.1 W、曲げ径 16 cm 時は 31.4 W であった。

図 3-6、3-7 に示すように、ラマン利得のピーク波長 1120 nm 付近に対して、PBGF のフィルタリング効果により SRS を十分に抑制できていることが分かる。また、シード光の波長 1064 nm を中心にスペクトルの広がりが見られる。短波長側は ASE、長波長側はストークス光、中心波長の広がりの変調不安定性が主要な原因である。図 3-6 におけるストークス光の発生量を直線偏光時とランダム偏光時で比較すると、直線偏光時の発生量が多く SRS を抑制し切れているとは言えない。

図 3-7 の結果を見ると、ストークス光の発生量を直線偏光時とランダム偏光時で比較すると、直線偏光時が発生量が多くなっているが、図 3-6 と比較すれば発生量を抑

制できていることが分かる。これは、前述したように PBGF の透過帯域を挟帯域化することでラマン利得に対して、より大きな損失を与えることができたためである。

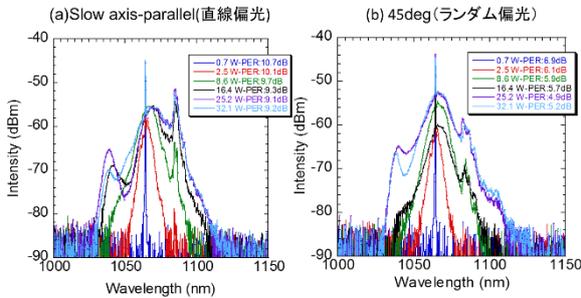


図 3-6 増幅後のスペクトル特性(曲げ径 20 cm) :
(a) 直線偏光時、(b)ランダム偏光時

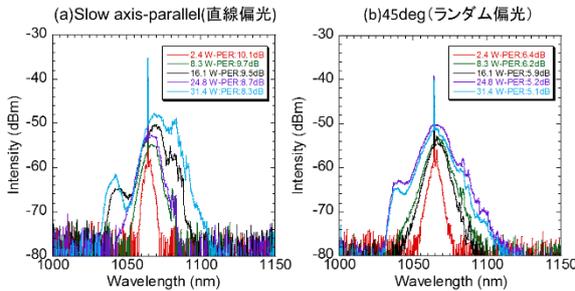


図 3-7 増幅後のスペクトル特性(曲げ径 16 cm) :
(a) 直線偏光時、(b)ランダム偏光時

図 3-8 に曲げ径 20 cm、16 cm の励起パワーごとの直線偏光時の増幅後のパルス波形を示す。

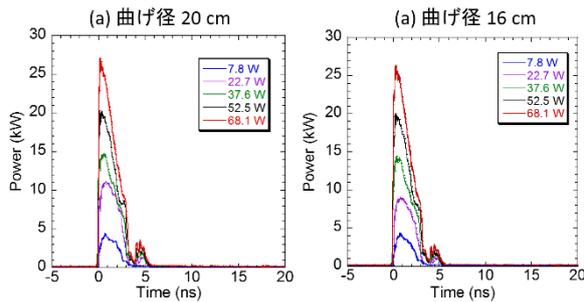


図 3-8 増幅後のパルス波形:
(a) 曲げ径 20 cm、(b)曲げ径 16 cm

最大励起時(68.1 W)のコントラスト比は、曲げ径 20 cm のとき 5.2/6.3(83.8%)であり、曲げ径 16 cm のとき 5.3/6.1(86.9%)であった。このコントラスト比から得られたパルスのピークパワーは曲げ径 20 cm、16 cm

のときそれぞれ 32.1 kW、31.4 kW であった。PBG 構造の持たない通常のファイバーでの SRS 臨界パワーを、用いた PBGF のパラメータを用いて見積もると、8.2 kW であった。曲げ径 20 cm では十分に SRS を抑制できているとは言えない。曲げ径 16 cm のとき 5.1dB の SRS 抑制を実現することができた。

4. 7 コア MCPCF による位相同期・モード同期

4-1 7 コア MCPCF

図 4.1 に使用した 7 コア MCPCF の断面図と各パラメータを示す。

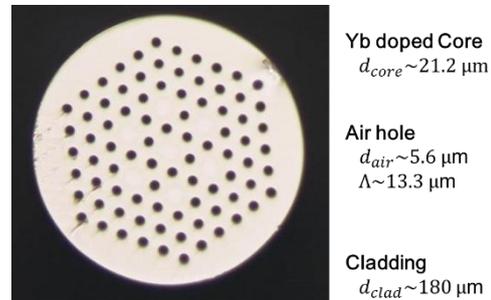


図 4-1 7 コア Yb 添加 MCPCF

この MCPCF では周期的空孔構造を調整することにより各コア径が 21.2 μm と大口径ながらもシングルモード動作するように設計されている。また、MCPCF では近接コアの光電場がエバネッセント結合により相互作用し、MCPCF 固有のスーパーモードをコアの数だけ形成する。各コア間のビームの位相が揃っているモードは in-phase モードと呼ばれ、遠視野でコヒーレントビーム結合によって中心に高い強度を持つ高ビーム品質光を形成する。

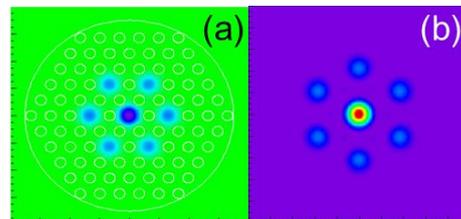


図 4-2 in-phase モードの
(a)近視野像(b)遠視野像

4-2 モード同期

モード同期とは超短パルス(ps~fs)を得るための手法である。超短パルスは、共振器長で決まる一定の縦モード間隔で並ぶマルチ縦モードの時間領域における位相が固定され干渉によって、エネルギーが特定時間内に集中されることで得られる。モード同期の具体的な方法は能動モード同期と受動モード同期に大別される。本研究では、可飽和吸収体(SA)を用いた受動モード同期により超短パルス生成に取り組んだ。

4-3 可飽和吸収体を用いた in-phase モード選択

SA は、強度が低い光には吸収体として損失を与え、強度が高い光には吸収が飽和し損失が低くなる特性を持つ。よって、遠視野に SA を置くことにより、他のスーパーモードより高い強度のピークを持つ in-phase モードのみを切り出すことが可能である。本研究室では、SA として Cr⁴⁺:YAG を用いて、in-phase モードの選択と Q スイッチ発振によるジャイアントパルスを同時に実現している。図 4-3 に結果を示す。

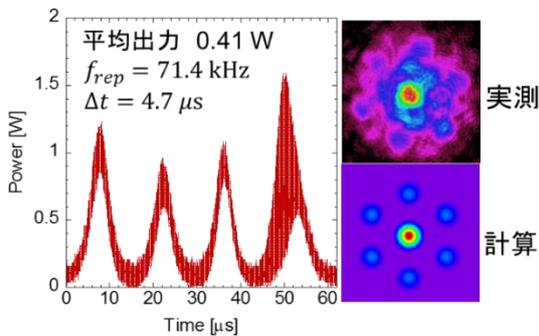


図 4-3 in-phase モード選択と Q スイッチパルス

本研究では、SA を Cr⁴⁺:YAG から半導体可飽和吸収体鏡 (SESAM) に変更し、in-phase モード選択とモード同期による超短パルスを同時に実現することを目的に研究を行った。共振器の実験構成図を図 4-4 に示す。

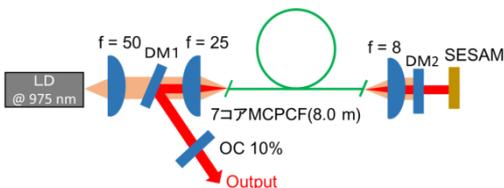


図 4-4 共振器構成図

7 コア MCPCF を、波長 976 nm の LD を用いて励起し、飽和フルエンス $25 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、変調深さ 17% の SESAM と透過率 10% のアウトプットカップラ (OC) による共振器構成となっている。

4-4 実験結果

CW モード同期が安定して得られる平均出力の算出を行った結果、664 mW を得たため、平均出力が 664 mW を超える出力になるように励起し、実験を行った。励起出力に対する、平均出力の特性を図 4-5 に示す。

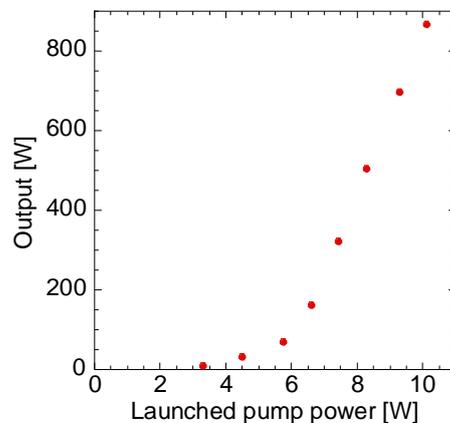


図 4-5 7 コア MCPCF 出力特性

9 W 以上の励起出力時、平均出力が 664 mW を超えることが分かった。励起出力 9.3 W 時の時間波形と遠視野ビームプロファイルを図 4-6 に、さらに短い時間スケールの時間波形を図 4-7 に示す。

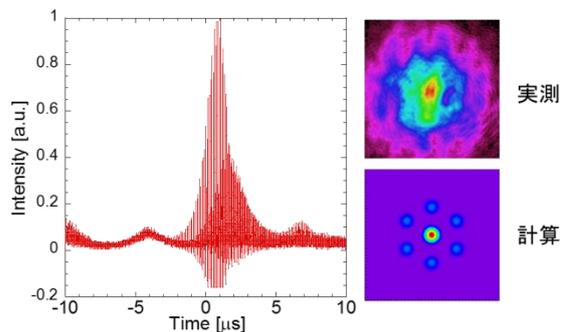


図 4-6 励起出力 9.3 W 時

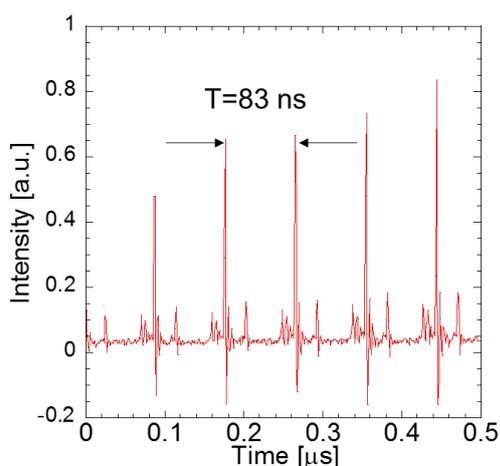


図 4-7 励起出力 9.3 W 時の時間波形

パルスの包絡線の内部構造が図 4-7 であり、パルスが等間隔で発生していることがわかる。この間隔は、83 ns であり、ここから算出した繰り返し周波数は 12.05 MHz となった。この算出結果は、計算値の 12.92 MHz と近い周波数でパルス発振しているため、Q スイッチモード同期発振と思われる。しかし、CW モード同期を実現することができなかった。7 コア MCPCF は、コアと同数の 7 つのスーパーモードを励振し、各スーパーモードはそれぞれが独立した縦モードで発振するため、in-phase モードのみを SESAM を使って切り出し、7 コア MCPCF にフィードバックしなければならない。しかし、得られた遠視野ビームプロファイルは、in-phase モードの計算値と比較すると、中心ピーク付近の強度が高くなっており高次のスーパーモードが励振していた。それによって、縦モードが完全に揃わずモード同期に到らなかったと考えられる。

CW モード同期の実現するためには、使用する SESAM の飽和フルエンスや変調深さなどの性能の再検討や、分散補償の光学系を組み込むなどの実験系の改良を行う必要がある。

5 結論と今後の展望

Yb-PBGF 増幅をするためのナノ秒パルスシード光源の開発を行い、平均出力 2.2 W、ピークパワー 2 kW 時が高コントラスト、高ピークパワーな光源を作製した。そ

の光源を PBGF 増幅用に用いて増幅実験を、PBGF の曲げ径は 20 cm、16 cm の条件で行った。また、SRS の臨界パワーはファイバー内での偏光状態により変動するため、PBGF 内で直線偏光とランダム偏光 2 つの状態を作り、2 つの条件で偏光特性を調べた。増幅の結果、曲げ径 16 cm、直線偏光状態のとき SRS を抑制しつつピークパワー 26.3 kW、パルス幅 2 ns、繰り返し周波数 500 kHz のパルスが得られた。フォトニックバンドギャップ構造を持たない従来のファイバーにおいては、SRS の臨界パワーは計算値で 8.2 kW であったため SRS を 5.1dB 以上の抑制することができた。今後は更なる高出力化のために、より大モード面積の PBGF を使用することを検討している。

Yb 添加 MCPCF を用いた位相同期・モード同期実験では、SA である SESAM を使用することで、in-phase モード選択と CW モード同期を同時に実現することを目的に研究を行った。結果は、Q スイッチモード同期と思われる波形は得られたが、CW モード同期の実現には到っていない。原因として考えられるのは、in-phase モード以外の高次のスーパーモードが励振してしまい、縦モードが完全に揃わなかったためである。そのため今後は、使用する SESAM の再検討や、共振器の改良などを行う必要があると考えている。

6. 参考文献

- [1] J. M. Fini, et. al., "Distributed suppression of stimulated Raman scattering in an Yb doped filter-fiber amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 31, pp. 2550-2552, Sep. 2006.
- [2] L. A. Zenteno, et. al., "Suppression of Raman gain in single-transverse-mode dual-hole-assisted fiber," *Opt. Express*, vol. 13, pp. 8921-8926, Oct. 2005.