

可飽和吸収体による受動 Q スイッチ位相同期

マルチコアファイバーレーザー

白川 晃 研究室 内部 優花

1、研究背景と目的

ファイバーレーザーは導波路構造により空間モードが制御できることに加え、高冷却性、メンテナンスフリー等多くの利点を持つ。一方で、誘導ラマン散乱等の非線形光学効果や、ファイバーの材料であるシリカの破壊閾値等により、出力が制限される。我々はマルチコアフォトニック結晶ファイバー (MCPCF) を用いたレーザーの高出力化を研究している。さらに、可飽和吸収体 (SA) を用いた in-phase モードの選択と受動 Q スイッチ発振の同時動作を実証している[1]。今回は、SA とは逆方向に発振器出力を取ることで、出力の向上を図った。

2、原理

今回使用した 7 コア MCPCF のコアには Yb^{3+} が添加されており、コア径 d は $21.2 \mu\text{m}$ 、空孔間隔 Λ は $13.3 \mu\text{m}$ である (図 1(a))。クラッドは空孔構造を有しており、実効屈折率を調整できるため、大口径化でのシングルモード伝搬の条件 $d/\Lambda < 0.45$ を満たしている[2]。また、各コア内を伝搬したコアモードが、隣接コア間でエバネッセント結合することで、コア数分のスーパーモードを励振する。特に各コアモードの位相が揃っている in-phase モードは、遠視野で単一の高ピーク強度を形成する (図 1(b)(c))。そのため、in-phase モードを選択することが高ビーム品質・高出力には重要である。

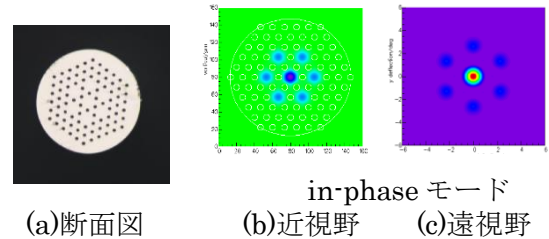


図 1 7 コア MCPCF

今回は、SA により in-phase モード選択を行った。SA は、高強度の光に対しては吸収が飽和し透過体として、低強度の光には吸収体としてはたらく。SA の飽和フルーエンスのイメージ図を図 2 に示す。入射強度に対する透過率差により、in-phase モード選択ができる。今回は SA として $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ を用いた。SA の飽和フルーエンス F_{sat} は、レーザー光のエネルギー $h\nu_g$ と吸収断面積 σ_{SA} より

$$F_{\text{sat}} = \frac{h\nu_g}{\sigma_{\text{SA}}} = 44.4 \text{ [mJ]} \quad \dots (1)$$

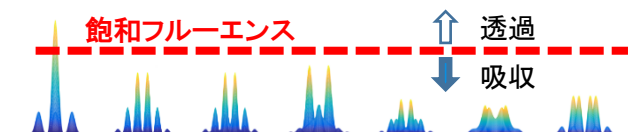


図 2 SA の飽和フルーエンス

6 コアに比べて 7 コア MCPCF ではサイドローブが抑制され、中心ピーク強度が高くなり、他スーパーモードとの透過率差が大きくなる[1]。透過率差が大きいほど in-phase モードのみが優先的に SA を透過しやすくなるため、今回は 7 コア MCPCF を使用した。

3、実験

図 3 に SA を用いた 7 コア MCPCF レーザ

一の実験配置図を示す。これを前方出力系とする。LD (発振波長 975 nm) で 3.15 m の 7 コア MCPCF を励起した。励起側ファイバー端面は 0° クリーブして DM1 を butt couple させ、共振器ミラーとしている。SA 側端面は 8° 研磨し、ファイバー端面での反射を防止している。DM2 で残留励起光をカットし、 $f=15$ mm のレンズで SA 上に遠視野像を形成するように像転送している。アウトプットカップラー (OC) の透過率 T_c は 80% で、SA と一体となっている。SA 上の遠視野像をさらにレンズで像転送し、CCD で出力測定した。

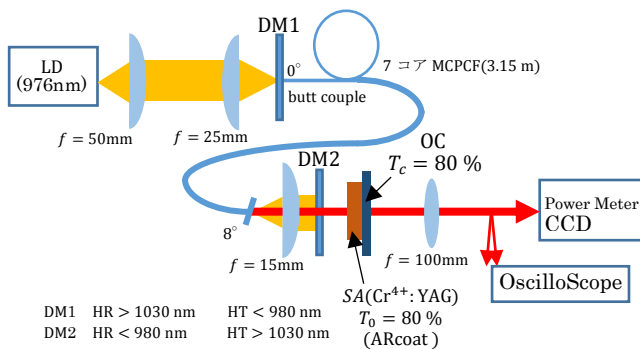


図 3 実験配置図 (前方出力系)

観測したビームプロファイルとパルス波形を図 4 に示す。入力パワー 10.2 W のとき、平均出力 2.33 W、尖頭出力 13.0 W、パルスエネルギー 13.8 μ J、パルス幅 0.9 μ s を得た。このときスロープ効率は 38.0% であった。

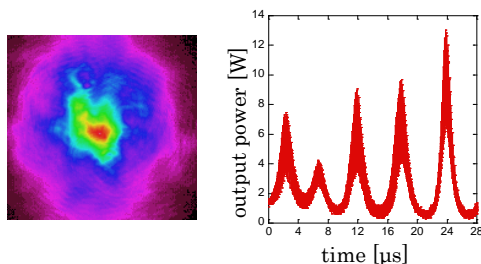


図 4 ビームプロファイルとパルス波形 (前方出力系)

使用した 7 コア MCPCF の遠視野 in-phase モー

ドの有効面積 A_{eff} は $5.03 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ である。パルスエネルギー E と A_{eff} より、実測フルーエンス $F = \frac{E}{A_{eff}}$. . . (2)

を算出できる。

初期吸収係数 q_0 と 1 パルス通過後の吸収係数 $q(t_1)$ の関係式

$$q(t_1) = q_0 \times \exp\left(-\frac{F}{F_{sat}}\right) \quad \dots (3)$$

$$T_1 = e^{-q(t_1)} \quad \dots (4)$$

$$T_0 = e^{-q_0} \quad \dots (5)$$

(1)~(5) から、SA の初期透過率 T_0 と時間 t_1 後の透過率 T_1 が求められる。10.2 W のとき、 $T_1 = 81.1\%$ であった。

前方出力系では、SA の非飽和吸収によりビーム形状が変形し、出力も十分に得られなかった。出力パワーの下落を改善するため、SA 透過後にファイバーで再増幅をする後方出力系という仕組みで再度実験を行った。後方出力系の実験配置図を図 5 に示す。

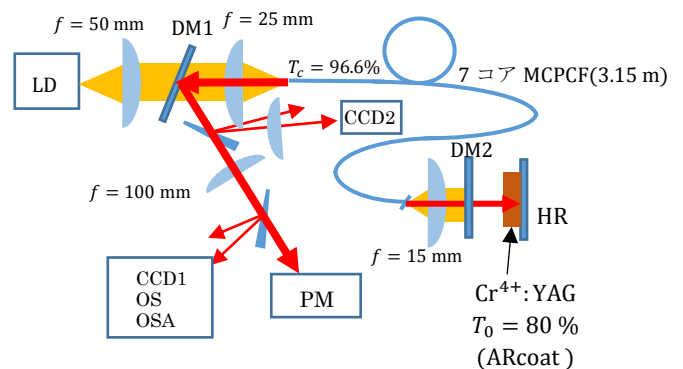


図 5 実験配置図 (後方出力系)

後方出力系では、SA 透過後に高反射鏡 (HR) を配置してレーザー光をファイバーに戻している。励起側端面を OC ($T_c=96.6\%$) とし、出射した光をレンズで像転送し、CCD1 で遠視野像、CCD2 で近視野像を観測した。

観測したビームプロファイルとパルス波形を図 6 に示す。入力パワー 10.2 W のとき、平

均出力 2.89 W、尖頭出力 23.4 W、パルスエネルギー 19.6 μJ 、パルス幅 1 μs を得た。前方出力系と比較すると、in-phase モードの特徴である、中心単一ピークと 6 つのサイドローブが鮮明になった。10.2 W のとき、 $T_1 = 81.9\%$ であり、前方出力系に比べて入射強度が高くなったことにより透過率も上昇したと考えられる。

ここで、in-phase モードの占有率として、ストレール比を用いてビーム形状の評価を行った。ストレール比の計算方法を式(6)に示す。

規格化した実測ビームプロファイルの最大値
 規格化した in-phase モード(計算値)ビームプロファイルの最大値

$$= \frac{\frac{I_{max}}{\iint I(x,y)dx dy}}{\frac{I_{c,max}}{\iint I_c(x_c,y_c)dx_c dy_c}} \dots (6)$$

前方出力系では、SA の非飽和吸収によりビーム形状が変形していたため、この方法を用いることができなかった。後方出力系では、ファイバーでの再増幅により in-phase モードの評価が可能となった。

スロープ効率と、ストレール比を図 7 に示す。スロープ効率は 53.3% に向上し、出力パワーも上昇した。これは、SA に非飽和吸収されていた成分がファイバーによって再増幅されたためだと考えられる。さらに、OC の

透過率が 80% から 96.6% に上昇したためだと考えられる。以上より、後方出力ではビーム形状の改善と出力向上が可能であることを確認した。

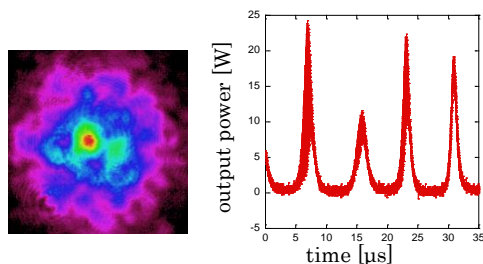


図 6 ビームプロファイルとパルス波形 (後方出力系)

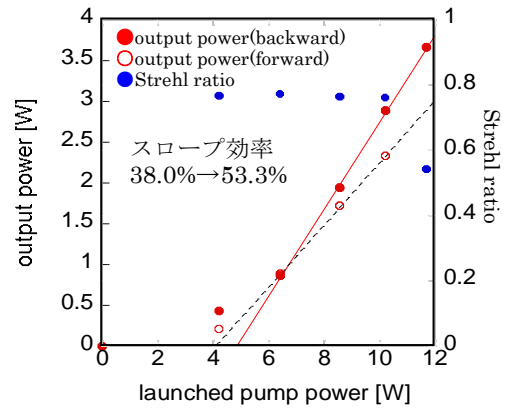
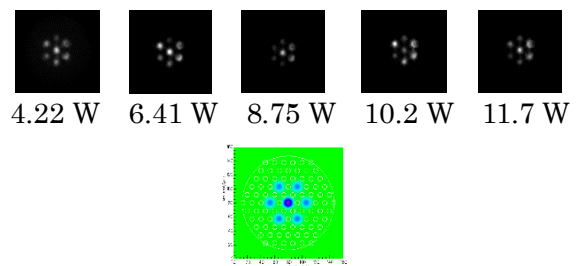


図 7 入出力特性

しかし、入力パワーを上げていくとストレール比の低下が見られた。これは、ビームの全体強度が高くなり、in-phase モード以外のスーパーモードも SA を透過したことが原因だと考えられる。さらに、SA 中の熱の分布により屈折率分布が生じる熱レンズが発生した。これにより、in-phase モードの再結合率が低下して他のスーパーモードが励振し、ビーム形状が変形したことも原因であると考えられる。

次に、近視野像を図 8 に示す。近視野では 7 つのコアを同位相で伝搬しており、中心の強度が一番高くなっている。実測の近視野像でも同じビーム形状を得られており、in-phase モードが選択されていることが確認できた。しかし、出力が高い場合は、周りのコアの強度も高くなっていた。これは、高出力時に他のスーパーモードが励振しているためだと考えられ、遠視野像で議論したときと同様の傾向が見られた。



計算 in-phase モード

図 8 近視野ビームプロファイル

次に、観測したパルス内部の構造を図 9 に示す。図 9 は 4.22 W 励起の場合だが、測定した励起パワーにおいて構造周期は $\Delta t = 30 \text{ ns}$ であった。本研究で使用した共振器はファイバー長 $L = 3.15 \text{ m}$ 、共振器内屈折率はシリカガラスの屈折率 $n = 1.45$ 、光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ とすると、

$$\Delta v = \frac{c}{2nL} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1.45 \cdot 3.15} = 3.28 \cdot 10^7 \text{ [Hz]} \quad \dots (7)$$

$$\Delta t_c = \frac{1}{\Delta v} = 30.4 \text{ [ns]} \quad \dots (8)$$

共振器内の周回時間 $\Delta t_c = 30.4 \text{ ns}$ と、パルス内構造周期 $\Delta t = 30 \text{ ns}$ がほぼ一致していることから、パルス内の周期的構造は、共振器内を周回する縦モード間のビートが原因であることがわかる。

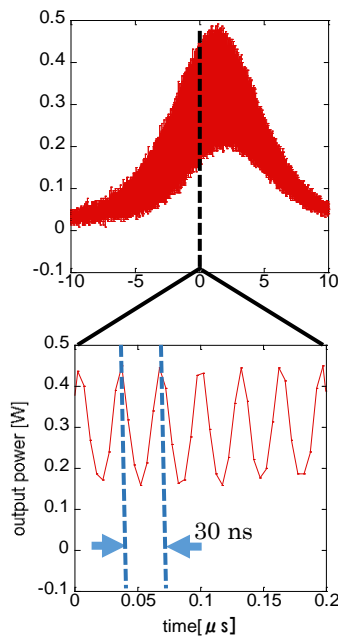


図 9 パルス内構造

4、まとめと今後の課題

7 コア MCPCF における、可飽和吸収体による受動 Q スイッチ発振と位相同期の同時動作実験を行った。平均出力に関しては、前方出力系 2.33 W に対して、後方出力系では 2.89 W が得られた。尖頭出力では、前方出力系 13.0 W、後方出力系 23.4 W、パルスエネルギーでは、

前方出力系 13.8 μJ 、後方出力系 19.6 μJ であった。このとき、後方出力系においてストレーラ比 0.762 を達成した。

この結果より、SA 側と逆方向に出力をとった場合、SA 通過の際に下落したパワーが再度ファイバーで増幅することにより、出力向上が可能であることがわかった。さらに、OC ($T_c = 80\%$) をファイバー端面 ($T_c = 96.6\%$) に変えることで透過率が上がったことも、出力が向上した理由である。

しかし、入力パワーを上げていくとストレーラ比は低下してしまった。これは、SA において in-phase モード以外のスーパーモードが飽和フルーエンスを超えたことで透過し、励振しているためである。加えて、SA に入射する光の強度が高くなったことで熱レンズが生じ、in-phase モードの再結合効率が低下し、他のスーパーモードが励振したことも原因であると考えられる。高品質な単一ピークのビームを得るためには、in-phase モードのみを励振させることが重要となる。

高出力時の in-phase モードの選択率を向上するため、様々な透過率の SA での検証や、非飽和吸収が小さく熱レンズを抑制できる SA を使用することなどが必要である。

参考文献

- [1] 久保内 照雄, “可飽和吸収体を用いた位相同期マルチコアファイバーレーザー” 電気通信大学, 修士論文, 2016
- [2] 白川 晃, 植田 憲一, “高輝度高出力ファイバーレーザー,” 電学論 C, 124, 7, pp.1367, 2004.