

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

先進理工学専攻 白川研究室 久保内照雄

1 はじめに

ファイバーレーザーは、単位体積あたりの表面積が他のレーザー媒質に比べ大きいこと、優れた冷却能力を持つこと、導波路構造により横モードの制御が容易であること、導波路全体が利得媒質であること等により高平均出力動作に優れている。また、共振器から出射部まで全て光ファイバーによって構成可能であるため産業分野で広く使われている。しかし、コア径が小さいことにより誘導ラマン散乱や誘導ブリリアン散乱のような非線形光学効果やファイバーの破壊閾値などにより出力限界が生じる。この問題は複数のビームの位相を同期させて合成させるコヒーレントビーム結合(CBC)により非線形効果の上限を上げ、パワーのスケールアップを行うことで解決できると期待されている[1]。ひとつのファイバー中に複数のコアを施したマルチコアファイバーを伝播するスーパーモードには、全てのコアから出射されるビームの位相が揃っている in-phase モードと呼ばれるモードが存在する。この in-phase モードを選択励振させることにより、機械的フィードバック制御を必要としない CBC が可能となる。我々は CBC の研究のため、 Yb^{3+} 添加マルチコアフォトニック結晶ファイバー(MCPCF)を用い可飽和吸収体(SA)により in-phase モードの選択と Q スイッチ発振を同時に実現する方法を考案・実証している[2,3]。本研究では、MCPCFのスーパーモードごとのSAに対する透過率を計算し、共振器の最適化を検討し、SA 中での遠視野像の拡大、サイドローブの抑制により SA による in-phase モードの選択率の向上、そして中心にコアを持たない 6 コア MCPCF と中心にコアを持つ 7 コア MCPCF の比較を行った。

2 Yb^{3+} 添加マルチコアフォトニック結晶ファイバー

図1と表1に今回使用した Yb^{3+} 添加 6 コア MCPCF と Yb^{3+} 添加 7 コア MCPCF の断面写真と各種パラメータを示す[3]。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 $20.7 \mu\text{m}$ 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、マルチコアファイバーではコア間のエバ

ネッセント結合により、コアの数だけスーパーモードが励振される。各コアから出射されるビームの位相がそろっているため CBC により遠視野で中心に強い強度分布を持つスーパーモードを in-phase モード(図2)といい、他のスーパーモード(高次モード)に比べピークの強度が高くなる。

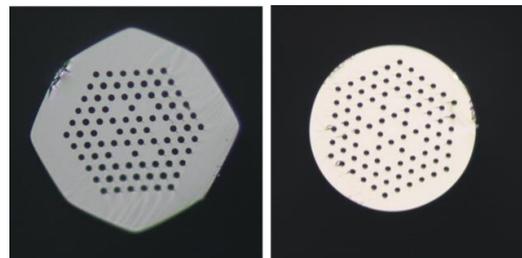


図 1.6 コア MCPCF(左)と 7 コア MCPCF(右)の断面写真

表 1.6 コア MCPCF と 7 コア MCPCF の各種パラメーター

	6 コア	7 コア
空孔間隔 Λ	$13.5 \mu\text{m}$	$13.3 \mu\text{m}$
空孔サイズ d	$6.6 \mu\text{m}$	$5.6 \mu\text{m}$
d/Λ	0.49	0.42
コア径	$20.7 \mu\text{m}$	$21.2 \mu\text{m}$
第 1 クラッド径	$180 \mu\text{m}$	$165 \mu\text{m}$
Yb 添加濃度	1300ppm	3000ppm

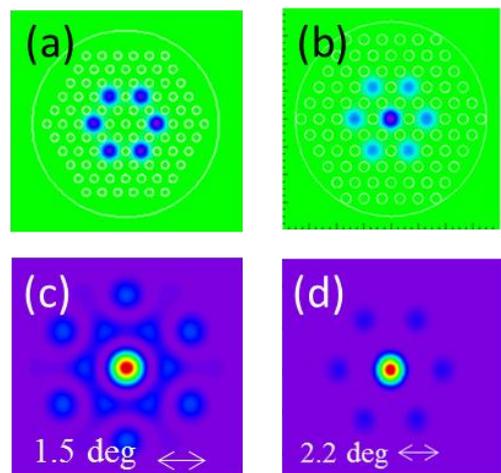


図 2.6 コア MCPCF の in-phase モードの近視野像(a), 遠視野像(c)と 7 コア MCPCF の in-phase モードの近視野像(b),遠視野像(d)

3 6 コア MCPCF の可飽和吸収体によるモード選択

in-phase モードを選択するにはタルボット法・エンドシール法・遠視野アパーチャー法等がある。今回用いる 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。よって、MCPCF の遠視野に 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 モードを選択励振する、ソフトアパーチャーとして SA を使用できる。このように SA はモード選択器と Q 値変調器の2つ働きを同時に持つ。本実験では SA として Cr⁴⁺:YAG を用いた。

図3に SA を用いることで、MCPCF の位相同期と受動 Q スイッチパルス発振を同時に実現する方法を初めて実証した先行研究の実験配置図を示す[2]。発振波長 975 nm のファイバー結合半導体レーザーを用い、MCPCF を励起した。MCPCF の入射側にダイクロミックミラー(DM1)を近接接合し、出射側は 8 度研磨を施し反射光がファイバーに戻らないようにしている。焦点距離 f=50 mm レンズによるフーリエ変換により MCPCF からの出射光の遠視野像を形成した。その遠視野像を2つのレンズによる縮小光学系を用いて像転送し、Cr⁴⁺:YAG 上で適度なフルエンスをもつように遠視野像のビーム径を調整した。そして DM1 及び Cr⁴⁺:YAG (初期透過率 30%) と近接接合した出力透過鏡(OC)(透過率 30%)により共振器を構築した。観測したビーム形状を評価する方法としてストレール比を用いた。ストレール比は以下のように定義される。

$$S = \frac{\text{規格化したビームプロファイル(実測値)の最大値}}{\text{規格化した in-phase モード(計算値)のビームプロファイルの最大値}}$$

$$= \frac{I_{Max} / \iint I(x, y) dx dy}{I_{Max}^{in-phase} / \iint I(x, y)^{in-phase} dx dy} \quad (1)$$

6 コア MCPCF のスーパーモードのうち中心に強度分布を持つのは in-phase モードのみであるため、計算値と実測値の尖頭出力を比較して導出したストレール比により in-phase モードの選択率を定量的に評価することができる。図4に Q スイッチパルス発振閾値付近の遠視野像とパルス列を示す。遠視野ビーム形状は中心に強いピークを持ちストレール比は 0.66 であり Q スイッチパルスを確認できる。これにより SA による MCPCF の位相同期と受動 Q スイッチパルス発振を同時に実現できたことを実証した。図5に最大平均パルス発振時の遠視野像と最大パルス波形を示す。このとき平均出力 1.4 W、繰り返し

周波数 145 kHz、平均パルスエネルギー 9.6 μJ、ストレール比 0.40 の受動 Q スイッチパルス発振を観測した。図6に横軸に入力パワー、縦軸に平均出力とストレール比を表したグラフを示す。このグラフからわかるようにストレール比が最高(0.66)になった時 Q スイッチ発振が始まり、最大パルスエネルギーを得られた 19 W 励起時にはストレール比が 0.40 に低下してしまった。また、ファイバー出射側に光学素子が複数あるためアライメントに影響されやすく、熱レンズの補正が複雑なこと等により高出力動作が困難であった。

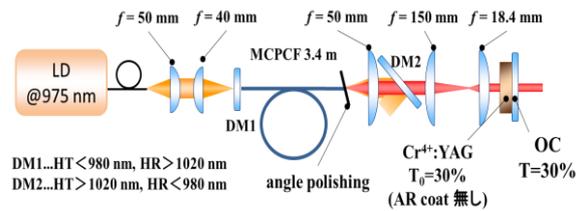


図3. 可飽和吸収体を用いた位相同期実証実験配置図

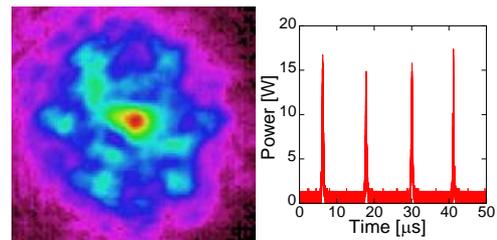


図4. Q スイッチパルス発振閾値付近(13 W 励起時)のビーム形状(左)とパルス列(右)

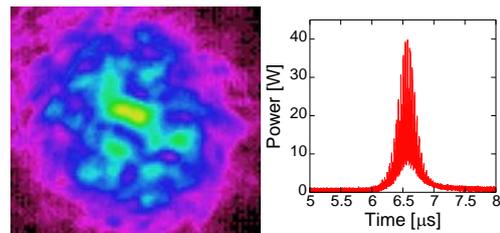


図5. 最大パルスエネルギー時(19 W 励起時)のビーム形状(左)とパルス波形(右)

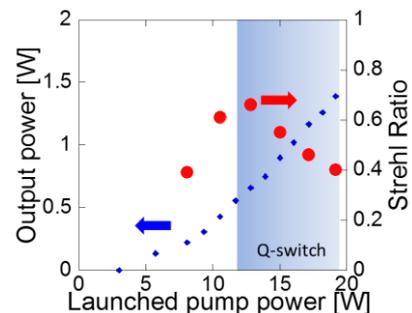


図6. 入出力特性とストレール比

4 可飽和吸収体に対する各スーパーモードの透過率計算

このため私は高出力動作時にモード選択率が低下したことを計算を用いて考察した。ガウシアンパルス(尖頭出力 P_p 、パルス幅 Δt)が $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ に入射した場合を考える。時刻 t での m 番目のスーパーモードの強度分布 $I_m(x,y,t)$ は m 番目のスーパーモードの規格化強度分布 $I_m(x,y)$ を使い

$$I_m(x,y,t) = I_m(x,y)P_p \exp\left(-\frac{t}{\Delta t}\right)^2 \cdot 4 \ln 2 \quad (2)$$

とおけ、 m 番目のスーパーモードの吸収係数 q_m は初期吸収係数 q_0 と飽和フルーエンス F_{sat} を使い

$$q_m(x,y,t) = q_0 \exp\left(-\frac{1}{F_{sat}} \int_{-\infty}^t I_m(x,y,t') dt'\right) \quad (3)$$

と書ける。この式によりパルスが入射してからの吸収係数の時間変化が求められる。SA上各点での透過率 $T_m(x,y,t)$ は

$$T_m(x,y,t) = \exp(-q_m(x,y,t)) \quad (4)$$

と表せるが、実際に CCD によって観測しているのは時間積分したものであるため、(2)式に時間積分を行い、 m 番目のスーパーモードの実効的な透過率 $T_{eff,m}$ は $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ に入射/透過したエネルギー $E_{in,m}/E_{out,m}$ を使い、

$$T_{eff,m} = \frac{E_{out,m}}{E_{in,m}} = \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} T_m(x,y,t) I_m(x,y,t) dt dx dy}{\int \int_{-\infty}^{\infty} I_m(x,y,t) dt dx dy} \quad (5)$$

とおける。今回計算条件として、尖頭出力 100 W、パルス幅 500 ns のガウシアンパルスを仮定し、 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ の吸収断面積 $\sigma_{SA} = 4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 、飽和フルーエンスを 44 mJ/cm²とした[4]。図 7 に 3 枚のレンズを用いて SA に遠視野像を像転送した条件での各スーパーモードの $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ に対する透過率を式(5)より計算したグラフを示す。入射するエネルギーが低い約 45 μJ 以下では in-phase モードの透過率が高いためモード選択が可能であるが、それ以上高いエネルギーが $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ に入射するとまず out-of-phase モードがそしてその他の高次モードも SA の飽和フルーエンスを超えるために透過率の逆転が生じた。これにより高出力動作時のモード選択に限界が生じる。また、3 枚のレンズを用いての実験では点線で示したように共振器内エネルギーが 45 μJ 以上であるため、ストレーン比が半分以下まで低下したと考

えた。

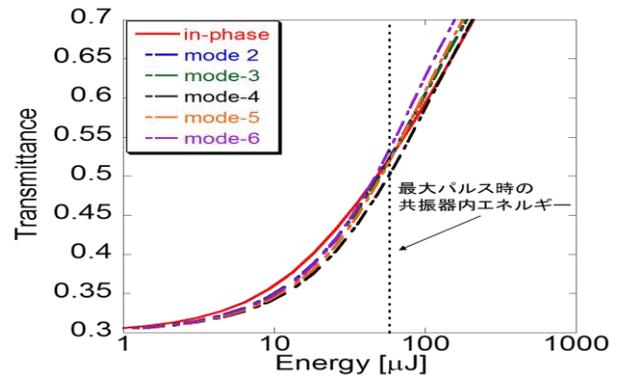


図 7. 入射エネルギーに対する各スーパーモードの可飽和吸収体透過率(図 3 実験条件時)

5 ビーム径拡大による高出力化

前章での考察により、SA 中でのビーム径の拡大により飽和フルーエンスを超えるのに必要なエネルギーを増加させ、より高エネルギー動作時での安定したモード選択を目指した。従来 MCPCF 出射後にフーリエ変換による遠視野像形成用のレンズと SA 中でのビーム径調整のための像転送用レンズを 2 枚の計 3 枚のレンズを用いていたが、アライメントに敏感であったため今回の実験では $f=15 \text{ mm}$ のレンズを用いて SA に直接遠視野像を形成した。また、共振器の最適化を図り SA の初期透過率を 50%のものを用いた。図 8 に本条件での各スーパーモードの $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ に対する透過率を計算したグラフを示す。SA 中の in-phase モードの有効面積が以前の $8.31 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ から $4.97 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ に拡大したことにより in-phase モードと他のスーパーモードの透過率が逆転するまでに必要なエネルギーが約 8 倍まで拡大できる。

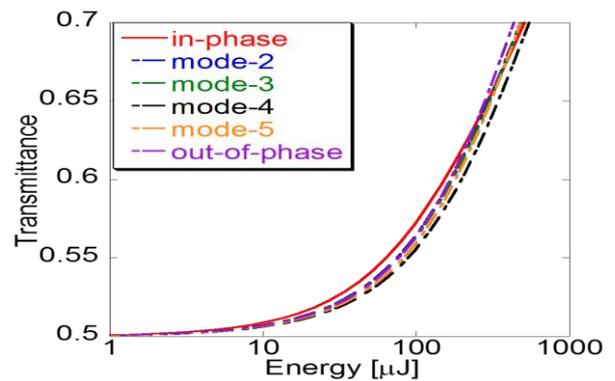


図 8. 入射エネルギーに対する各スーパーモードの可飽和吸収体透過率(図 9 実験条件時)

図 9 に実験配置図を示す。3 章の実験配置図との主な変更点は点線で囲われた部分である。 $f=15 \text{ mm}$ のレンズによるフーリエ変換により MCPCF からの

遠視野像を可飽和吸収体中に直接形成した。また、出力透過鏡の透過率 30%から 80%に、Cr⁴⁺:YAG を初期透過率 30%から 50%にし、Q スイッチパルスの高エネルギー化を図った。

図 10 に Q スイッチ閾値付近かつストレーリング比が最高(0.86)のときのビーム形状とパルス列を示す。また、図 11 に最大パルスエネルギー時の遠視野像とパルス波形を示す。このとき平均出力 3.26 W、繰り返し周波数 268 kHz、平均パルスエネルギー12 μJ、最大パルスエネルギー18 μJ、最大パルスの尖頭出力 26 W、最大パルスのパルス幅約 840 ns、ストレーリング比は 0.59 の Q スイッチパルス発振を観測した。このように 3 枚レンズの際に比べ 2 倍近いパルスエネルギーを得ることができた。しかし、これよりも励起パワーを大きくすると Q スイッチ動作が行われなくなり、ストレーリング比も低下した。このことを図 8 より考察する。今回得られた最大パルスエネルギーから共振器内のパルスエネルギーを計算すると 45 μJ と in-phase モードと他のスーパーモードの透過率が逆転するまではエネルギーが高くなってはいなかった。このことから、in-phase モードと他のスーパーモードの透過率が逆転することが原因ではないとわかる。そのため、今回の原因は in-phase モードと他のスーパーモードの透過率の差が 1 パーセントしかないため、高出力動作時には熱レンズなどにより、OC から MCPCF に再結合する際にモードのミキシングが起こりやすいからだと考えた。

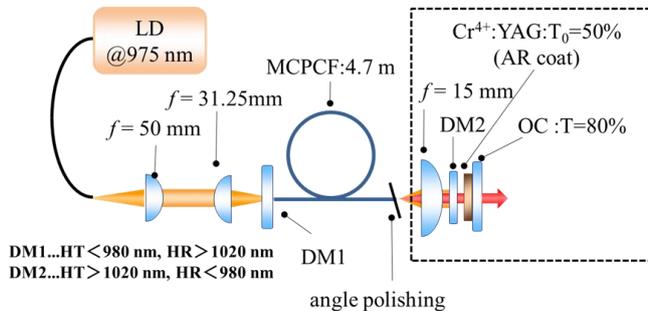


図 9. 可飽和吸収体中でのビーム径拡大位相同期実験配置図

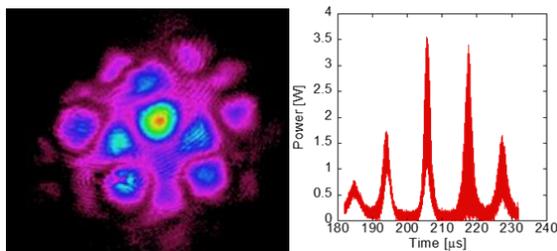


図 10. Q スイッチパルス閾値付近(7.7 W 励起時)のビーム形状(左)とパルス列(右)

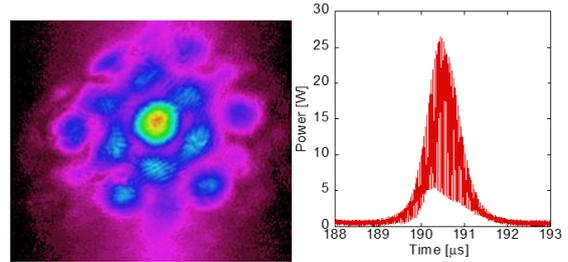


図 11. 最大パルスエネルギー時(16.6 W 励起時)のビーム形状(左)とパルス波形(右)

6 サイドローブ抑制

in-phase モードと他のスーパーモードの透過率差が 1 パーセントしか生じないのは、サイドローブの存在のためである。このサイドローブは強度が低く SA に対して損失となり、また空孔の存在により in-phase モードのサイドローブが大きいため、in-phase モード全体の透過率が低下し、他のスーパーモードとの透過率の差が小さくなってしまいうためである。我々はサイドローブを抑制するため、MCPCF 出射端面側の空孔を徐々に消滅させるエンドシール加工を施し、サイドローブの抑制(図 12)を行った。これにより SA 中での in-phase モードと他のスーパーモードの有効面積の差が大きくなった(表 2)。図 13 にサイドローブを抑制したファイバーの場合の各スーパーモードの Cr⁴⁺:YAG に対する透過率を計算したグラフを示す。何も加工していない MCPCF(空孔サイズ 6.6 μm)では共振器内エネルギーが 100 μJ のとき in-phase モードと 2 番目に透過率の高い 2nd mode(mode-2)の透過率差は約 1%であったが、空孔サイズを小さくしていくにつれこの差は広がり、空孔サイズ 1 μm では透過率の差が 7%となる。このため、サイドローブの抑制により高エネルギー時での安定した Q スイッチ動作とモード選択が可能であると考えられる。

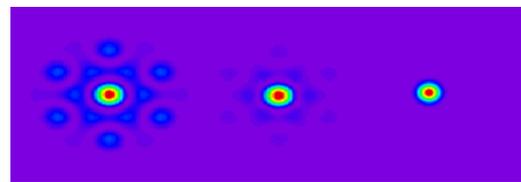


図 12. 空孔消滅によるサイドローブの抑制。左から空孔サイズ 6.6 μm(通常), 3 μm, 1 μm 時の遠視野像。

表 2. 空孔サイズと SA 中の遠視野像の有効面積(cm^2)の関係

	空孔サイズ		
	6.6 μm (通常)	3 μm	1 μm
in-phase モード	4.97×10^{-3}	1.49×10^{-3}	4.52×10^{-4}
2nd mode	6.06×10^{-3}	2.68×10^{-3}	8.17×10^{-4}

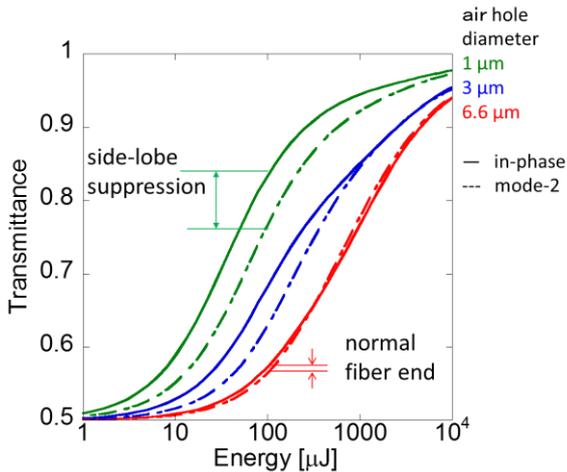


図 13. 入射エネルギーに対する各スーパーモードの可飽和吸収体透過率(図 14 実験条件時)

図 14 に実験配置図を示す。5 章の実験配置図からの主な変更点は MCPCF 出射側端面にエンドシールを施して空孔構造を消滅させることによりサイドローブを抑制した点である。また、エンドシール部には 8 度研磨を施した。その結果、平均出力 3.85 W、繰り返し周波数 182 kHz、平均パルスエネルギー 21 μJ 、最大パルスエネルギー 31 μJ 、最大パルスの尖頭出力 108 W、最大パルスのパルス幅 520 ns を得た。図 15 に最大パルス発振時の遠視野像とパルス波形を示す。図 15 のようにサイドローブを抑制した単峰のビームを観測することができた。また、 M^2 を測定したところ、最大パルス時は $M^2=4.5$ とサイドローブを抑制していないときの理論値 $M^2=5.5$ より低い値が観測でき、このことからサイドローブ抑制の効果が確認できる。

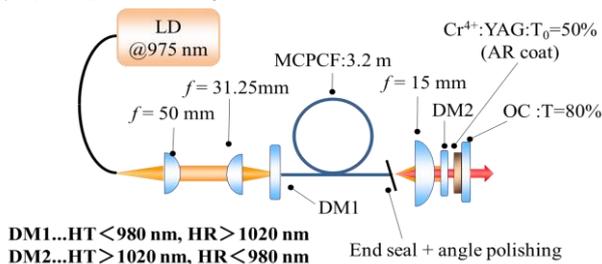


図 14. サイドローブ抑制位相同期実験配置図

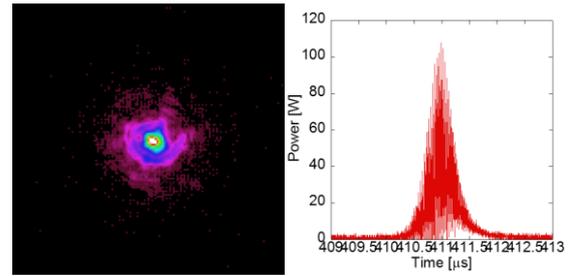


図 15. 最大パルスエネルギー時(12 W 励起時)のビーム形状(左)とパルス波形(右)

7 コア MCPCF の可飽和吸収体による位相同期

私たちの研究室では最近中心にコアを持つ 7 コア MCPCF を作製した。図 2 のように 7 コア MCPCF は 6 コア MCPCF に比べ近視野で電界の分布に偏りがあるが遠視野ではサイドローブが小さい。そのため、前章で SA を用いた位相同期法でサイドローブを抑制することは有用であると述べたように 7 コア MCPCF も 6 コア MCPCF に比べ有用であると考えた。図 16 に図 14 実験条件での 7 コア MCPCF の各スーパーモードの $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ に対する透過率を計算したグラフを示す。7 コア MCPCF は 6 コア MCPCF と異なり透過率の逆転は起きず、in-phase モードと他のモードの透過率差は数%まで広がる。

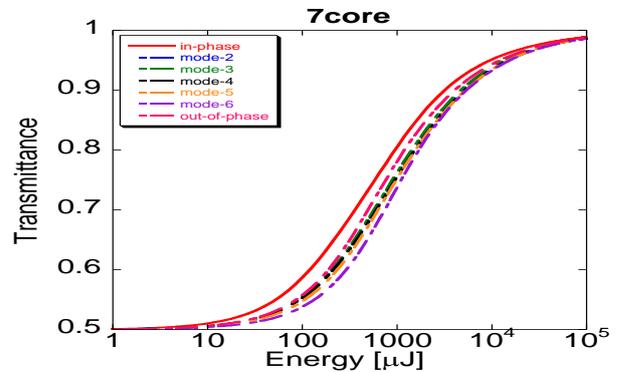


図 16. 7 コア MCPCF での入射エネルギーに対する各スーパーモードの可飽和吸収体透過率 (図 14 実験条件時)

このため 7 コア MCPCF での SA を用いた位相同期実証実験を行った。基本的な構成は図 14 実験配置図と同じだが、利得媒質に 7 コア MCPCF を用いている。また、図 14 の実験時とは違い 7 コア MCPCF を使い SA による位相同期実験の初めての実証であるため、サイドローブ抑制のためのエンドシール加工は施していない。また、 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ の初期透過率 70% のものを用いた。図 17 にストレーン比が最高 (0.55) のときのビーム形状とパルス列を示す。これに

より SA による 7 コア MCPCF の位相同期と受動 Q スイッチパルス発振を同時に実現できたことを実証した。また、図 18 に最大パルスエネルギー時の遠視野像とパルス波形を示す。このとき平均出力 3.68 W、繰り返し周波数 177 kHz、平均パルスエネルギー 21 μ J、最大パルスのパルスエネルギー 48 μ J、最大パルスの尖頭出力 58 W、最大パルスのパルス幅約 940 ns、ストレール比は 0.53 の Q スイッチパルス発振を観測した。平均パルスエネルギーはサイドローブ抑制を施した 6 コア MCPCF と同じであったが、最大パルスエネルギーはこれまでの SA による位相同期実験で最大であった。最大パルスエネルギーに関しては、中心にコアを持つ 7 コア MCPCF のほうが 6 コア MCPCF より可飽和吸収体を使った位相同期には向いていることが分かった。

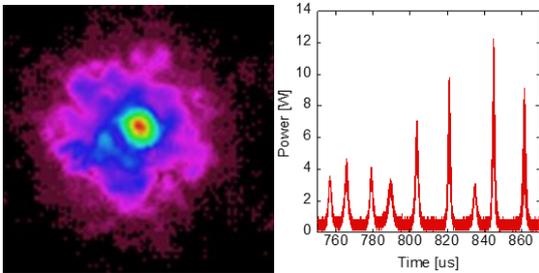


図 17. 最高ストレール比時(6.8 W 励起時)の
ビーム形状(左)とパルス列(右)

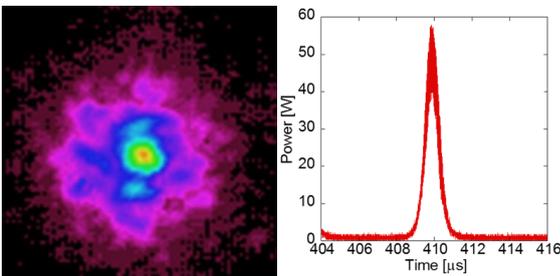


図 18. 最大パルスエネルギー時(10.8 W 励起時)の
ビーム形状(左)とパルス波形(右)

8 まとめ

これまで 6 コアマルチコアフォトニック結晶ファイバー(MCPCF)レーザーにおいて可飽和吸収体(SA)を用いて位相同期と受動 Q スイッチ動作を同時に行ってきた。図 3 の最初の SA による位相同期実証実験(先行研究)では最高ストレール比 0.66 の受動 Q スイッチを確認できたが、励起出力を高くするとストレール比が 0.5 以下に低下した。また、自由空間中の光学素子が多くアライメントに敏感であった。このため、私は SA のスーパーモードごとの透過率を

計算しモード選択性の検討を行った。ストレール比が低下したのは in-phase モードと高次モードの SA に対する透過率が逆転することによりモード選択に限界が生じているためであると計算から解明できた。そのため、SA 中でのビーム径を拡大し、また光学素子を減らしアライメントに影響しにくく熱レンズの補正が容易な実験系を構成した。この実験では最大パルス発振時にはストレール比 0.59 であり、平均出力 3.26 W、繰り返し周波数 268 kHz、平均パルスエネルギー 12 μ J、最大パルスのパルスエネルギー 18 μ J、最大パルスの尖頭出力 26 W、最大パルスのパルス幅約 840 ns であった。しかしこの実験においてもモード選択性に限界が生じた。この原因は遠視野でのサイドローブによりスーパーモードごとの透過率差が小さいことによるものだと考え、サイドローブを抑制することによりモード選択率が向上することを見出した。これにより、実際の MCPCF においてサイドローブを抑制するエンドシール加工を施すことにより、平均出力 3.85W、繰り返し周波数 182 kHz、平均パルスエネルギー 21 μ J、最大パルスエネルギー 31 μ J、最大パルスの尖頭出力 108 W、最大パルスのパルス幅 520ns を得た。これからサイドローブを抑制することが SA を用いた位相同期実験では有用であることが確認できた。

また、6 コア MCPCF と 7 コア MCPCF を比較し 7 コア MCPCF の遠視野での in-phase モードのサイドローブが小さいことに着目し、SA によるモード選択が 6 コア MCPCF に比べ優れていることを計算から導いた。そして実験を行い、7 コア MCPCF レーザーにおいて SA を用いて位相同期と受動 Q スイッチ動作を同時に実現した。このとき、平均出力 3.68W、繰り返し周波数 177 kHz、平均パルスエネルギー 21 μ J、最大パルスエネルギー 48 μ J、最大パルスの尖頭出力 58 W、最大パルスのパルス幅 940ns を得た。この実験により SA を用いた位相同期実験法において 6 コア MCPCF に比べ中心にコアを持つ 7 コア MCPCF のほうが有用であると判明した。しかし、6 コア MCPCF でもエンドシール加工を施しサイドローブを抑制すれば問題はない。

参考文献

- [1] 白川晃, 植田憲一, 光学 **38**, pp. 25(2009).
- [2] A. Shirakawa et al., Photonics West 2014, 8961-8.
- [3] 久保内照雄 他, レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会, B2-09p II-11 (2016).
- [4] N. Pavel, J et al., JPN. J. Appl. Phys. **40**, pp. 1253 (2001).