

可飽和吸収体による位相同期モード同期

マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー

白川晃研究室 川村朋稔

はじめに

ファイバーレーザーは高ビーム品質であること、高利得・高効率であること、排熱性が高いといった特徴を有し高出力 CW 光源として多様な産業で応用されている。しかし、ファイバーレーザーは、特にパルス動作時に非線形効果やファイバーの破壊の影響で高出力化に限界が生じる。そのため、更なるエネルギー/パワースケーリングのためにコヒーレントビーム結合(CBC)による出力の向上が世界的な課題となっている。

本研究室では、空間的ビーム結合による出力向上の方法として同一ファイバー内に複数のコアを配置するマルチコアフォトニック結晶ファイバー Multicore Photonic Crystal Fiber(MC-PCF)を用いた研究を行っている[1]。MC-PCFはフォトニック結晶構造により、一つ一つのコアが大面積化しつつもシングルモード伝搬させることが可能かつ、複数のコアを配置することにより複数のレーザー光を空間的に結合することでき、出力をコア数でスケールアップすることができる。また、MC-PCFはスーパーモードと呼ばれる固有のモードを励振する。スーパーモードはコア数と同数励振され、中でも特に各コアから出力されるビームの位相差が0である in-phase モードは高ビーム品質なモードを形成するため、その選択励振が求められる。また、モード同期法によ

り実現される超短パルスレーザーは極めて短いパルス幅と高いピークパワーを持つため、高尖頭出力化のためには in-phase モードの選択励振とモード同期の同時実現が求められる。

本研究室では、これまで Cr^{4+} :YAG を可飽和吸収体として用い in phase モードの選択励振と Q スイッチ発振を同時実現する方法を考案・実証している[2]。本研究では、可飽和吸収体としてより応答速度の速い半導体可飽和吸収鏡：Semiconductor Saturable Absorber Mirror (SESAM) を使用することで、in-phase モード選択(位相同期)とモード同期の同時実現を初めて達成した。結果として、シングルパルス動作で 129 nJ、繰り返し周波数 42.4 MHz、パルス幅 43 ps のパルスの生成に世界で初めて成功した。

MC-PCF のスーパーモード

MC-PCF の各コアの伝搬光はコア間の距離が近いことからエバネッセント光によって、近接するコアの伝搬光と結合する。この結合により MC-PCF はスーパーモードと呼ばれる固有のモードを励振する。スーパーモードは各コアの伝搬モードの線形結合から形成されているため、伝搬モード間の相対位相差は常に一定となる。中でも全ての伝搬モードが同位相である in-phase モードは遠視野領域で唯一中心に高いピークを

持ち、輝度の重ね合わせが可能である。図1, 2に本研究で使用した7コアMC-PCFの、計算されたスーパーモードの近視野強度分布及び遠視野強度分布を示す。

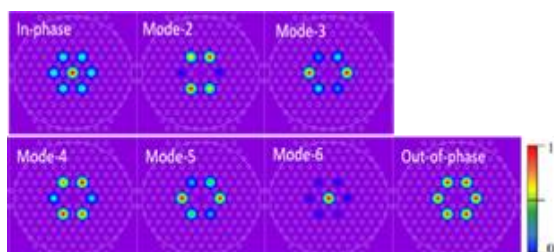


図 1. 7 コア規格化近視野強度分布

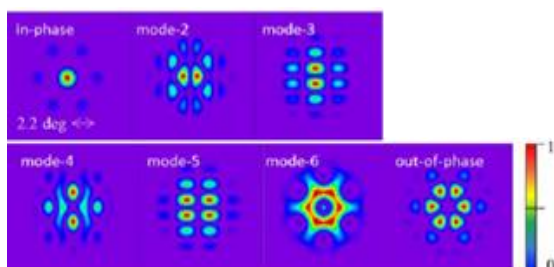


図 2. 7 コア規格化遠視野強度分布

本研究で使用している Yb 添加 7 コア MC-PCF の断面を図 3(a)に示す。また、図 3(b)に 6 コア MC-PCF の断面を参考に示す。7 コア MC-PCF のクラッド径は $16\ \mu\text{m}$ 、コア径は $21.2\ \mu\text{m}$ であり、通常のシングルモードファイバーではマルチモード伝搬するコア径である。しかし、空孔径 $6.0\ \text{mm}$ 、空孔間隔 $13.2\ \text{mm}$ の PCF 構造を持ち、空孔間隔と空孔の比は 0.45 となることからシングルモード伝搬条件を満たす[3]。また Yb 添加濃度は $3000\ \text{ppm}$ である。

7 コア MC-PCF は中心コアを伝搬するビームは他の 6 個のコアとエバネッセント結合する。そのため、電界は中心のコアに集中し、中心コアの反転分布が他のコアにくべて早く枯渇してしまうなどの理由から出力に制限がかかる。対して 6 コア MC-PCF は

各コアに均等に電界が分布するため、そのような欠点は存在しない。しかし、in-phase モードの遠視野強度分布を比較すると 6 コア MC-PCF の in-phase モードには強いサイドローブが存在するのに対して、7 コア MC-PCF はサイドローブが抑制されるといった特徴を有する。

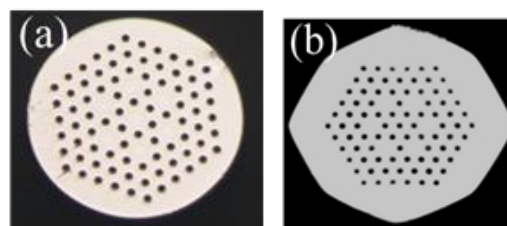


図 3. (a)7 コア MC-PCF, (b)6 コア MC-PCF の断面図

In-phase モード選択

in-phase モードの選択励振は高出力化において重要であるため、これまで Talbot 効果や空間フィルタリングや自己フーリエイメージングなどを用いた研究が行われてきた[4,5]。本研究室では、可飽和吸収体を遠視野領域に配置することで選択励振を実現している。7 コア MC-PCF における可飽和吸収体による in-phase モード選択の概念図を図 4 に示す。

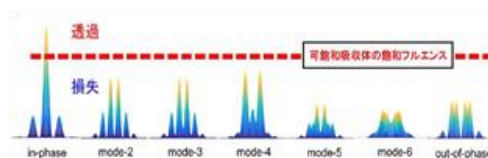


図 4. 各スーパーモードの透過特性

可飽和吸収体による in-phase モードの選択には飽和フルエンスによる各モードへの損失差を利用する。遠視野領域では in-phase モードは中心にピークを持つが、他の

スーパーモードは複数のピークを持つ。この強度分布の差を利用し、in-phase モードが優先的に透過し、他のスーパーモードに対して損失として機能することで選択励振が実現される。また、可飽和吸収体のモード同期素子としての働きを利用することで、in-phase モードの選択励振とモード同期の同時実現が可飽和吸収体のみによって実現される。

全正常分散 SESAM モード同期ファイバーレーザー

全正常分散モード同期は全て正の分散を示す光学素子で共振器を構成することで、正チャープしたパルスが伝搬し非線形光学効果を抑えることができ、高パルスエネルギーを取り出すことができる。そのため、この手法は高出力化に有効であるが、全正常分散モード同期の報告の多くはリング型共振器を用いた非線形偏波回転によるもので、SESAM を使用した全正常分散モード同期ファイバーレーザーの報告は少ない。そこで、本研究では前段階として MCPCF ではなく単一コアファイバーを使用し、全正常分散 SESAM モード同期ファイバーレーザーの開発を行っている[6]。単一コアでの実

験を経て、利得ファイバーを MCPCF に置き換え位相同期モード同期実験を行った。本研究の共振器配置図を図 5 に示す。7 コア MCPCF のファイバー長は 2.3 m である。MCPCF は曲げ損失や、偏光の回転をなるべく防ぐために直径 48 cm のポビンに 1 周で巻かれている。励起光源には中心波長 975 nm の半導体レーザー(LD)を使用し、2 枚のレンズによって MCPCF に空間結合した。ファイバーは励起光入射側では角度をつけずに、もう片側は寄生発振を防ぐために 8° にアングルクリーブした。残留励起光を弾くためにダイクロイックミラーを挿入した。偏光を単一にするために共振器内部に偏光ビームスプリッター:Polarizing Beam Splitter(PBS)を挿入した。また、波長選択を行うための複屈折フィルタとして 5 mm 厚の水晶位相板を PBS の後ろに配置した。本研究では SESAM の一種でアウトプットカップラーを兼ねた可飽和出力結合鏡:Saturable Output Coupler(SOC)を使用した。SOC は飽和フルエンス $40 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、反射率 58%、透過率 19%、変調深さ 9.5% のものを使用した。飽和フルエンスを超えやすくするために、レンズによってビームを SOC に集光した。共振器はファイバー端面

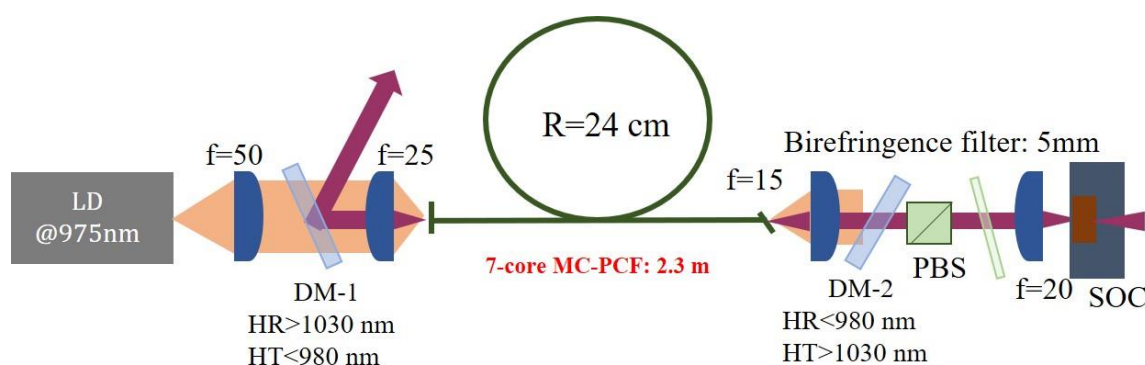


図 5. 7 コア MCPCF モード同期実験共振器配置図

と SOC により構成され、出力の大部分が後方出力に集中しているため、後方出力側の結果を報告する。

実験結果

24 W 励起時に最大平均出力 14.1 W のモード同期レーザーが得られた。共振器長に応じた繰り返し周波数が 42.4 MHz であるため、333 nJ という高エネルギーパルスを取り出すことに成功した。図 6 にパルストレインと入出力特性を示す。15 W 付近から Q スイッチモード同期から CW モード同期へと移行した。

また、可飽和吸収体(SA)によって位相同期が行われていることを確認するために、SOC を高反射(HR)ミラーに置き換えた実験を行った。図 7 は SOC を使用した場合の 24 W 励起時の近視や強度分布と遠視野強度分布、そして HR ミラーを用いて連続波(CW)動作を行った時の近視野強度分布と遠視野強度分布を示す。

図 7 より、HR ミラー時には複数のモードが混ざった複雑な様態を示し、SOC の時は遠視野像近視野像ともに中心に強度分布を持っており、in-phase モードが優先的に選択されていることが分かる。このことから SA による位相同期が実現された。また、

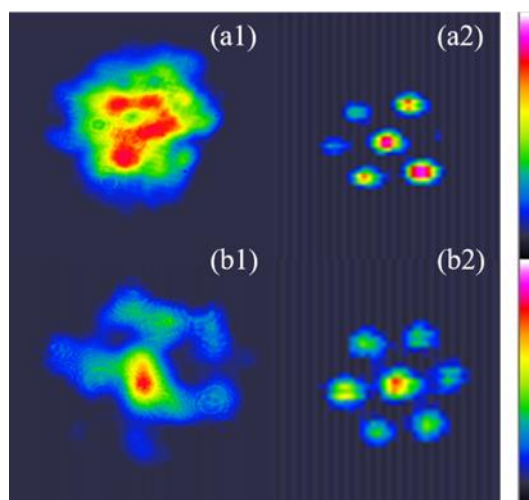


図 7. (a)HR ミラー時の遠視野像および近視野像 (b)SOC 時の遠視野像および近視野像

横モード特性の評価を行うために in-phase モードの占有率をストレール比を用いて算出した。ストレール比は規格化された in-phase モードの遠視野強度分布の計算値の最大値で、規格化された遠視野強度分布の実測の最大値を割った値で算出される。ストレール比を測定したところ 21 W 励起時に最大 34% を観測し、24 W 励起時には 24% であった。

本研究ではビームを SOC へ集光することで近視野領域での位相同期を達成している。しかし、これまで遠視野領域でのモード選択が実現されると考えられていた。現状、

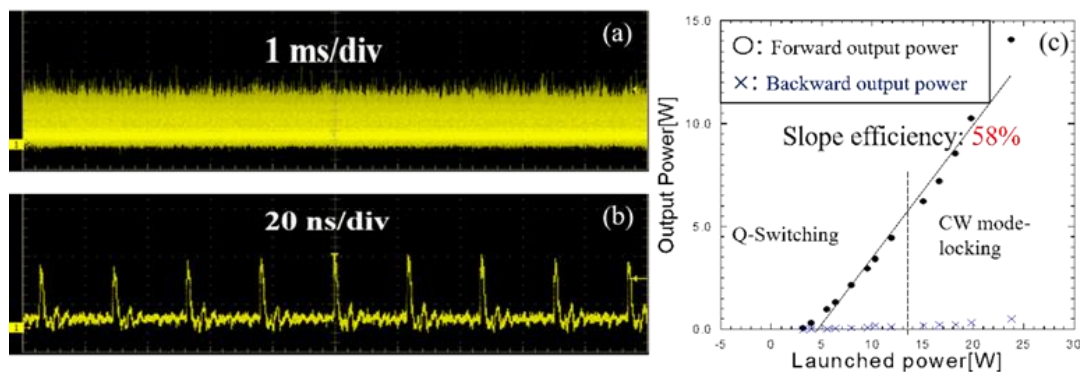


図 6. 時間波形および入出力特性

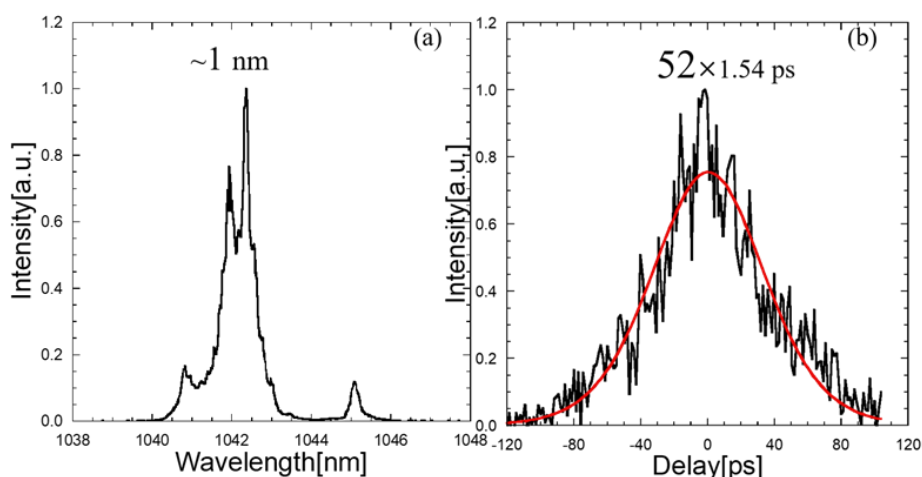


図 8. (左)発振スペクトル(右)自己相関波形

近視野領域での位相同期の原理は解明できていない。今後そのメカニズムを解明する必要があると考えている。図 8 に発振スペクトルと自己相関波形を示す。発振スペクトルは 0.1 nm の分解能で測定された。スペクトルに構造は存在するが、中心波長は約 1042 nm、スペクトル幅は約 1 nm の広がりのあるスペクトルが観測された。スペクトルと同時に自己相関波形を取得し、パルス幅は sech^2 の波形を仮定してフィッティングしたときに 52 ps であった。このことからピークパワーは 6.4 kW と見積もられる。また、自己相関波形には構造が存在しているが、これはモード同期の不安定性に起因していると考えられる。

自己相関波形にはコヒーレントスパイクが表れておらず、シングルパルス用の波形を取得した。しかし、共振器外部で圧縮を試みたところパルス幅に変化が見られなかった。この結果から、ノイズライクパルス動作をしていると考えられる。全正常分散モード同期ファイバーレーザーにおいて、共振器内部に広がり続けるスペクトルとパルスを補償するためにスペクトルフィルター(SF)が挿入される。この SF のバンド

形状およびバンド幅によってこのモード同期の状態が依存する[7]。基本的にバンド幅が広いほどよりパルスの分裂が抑えられシングルパルス動作を達成しやすくなる。本研究では波長選択素子として水晶位相版を用いて複屈折フィルタを使用した。複屈折フィルタは板厚がより薄くなればそのバンド幅は短くなる。そこで、5 mm 厚の位相版から 2 mm 厚の位相版に変えることで、モード同期実験を行った。

図 10 に位相版を変更したときの遠視野発振スペクトル自己相関波形を示す。スペクトルは構造を有しているが中心波長約 1036.3 nm、広がりのあるスペクトルが観測された。スペクトルは約 0.1 nm の幅の広がりを持っていた。をスペクトルと同時に自己相関波形を取得し、パルス幅は sech^2 の波形を仮定しフィッティングをしたときに半値全幅で 42 ps であった。自己相関波形は 500 fs ごとに測定された。スペクトル幅から見積もられるフーリエ限界パルスは 11 ps であり、ノイズライクパルスに見られるフーリエ限界パルスと同程度の幅を持つピークであるコヒーレントスパイクは見られていない。そのためシングルパ

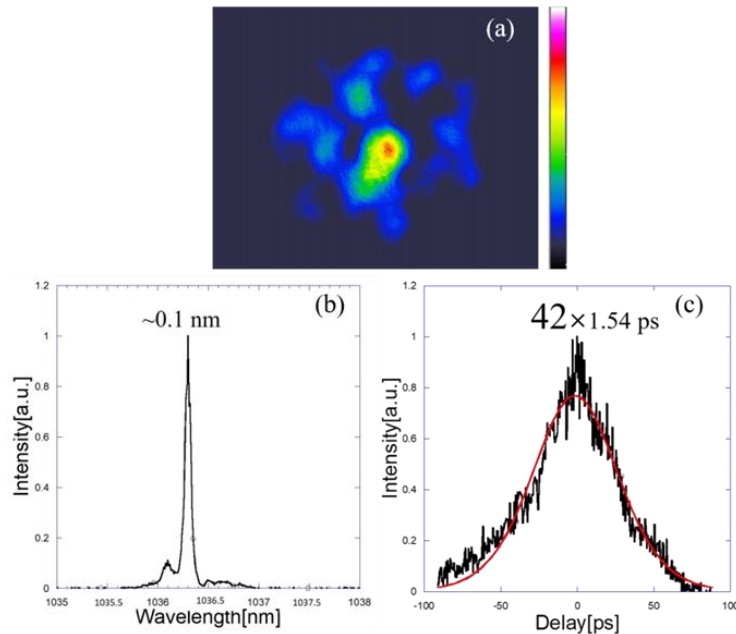


図 10. (a)遠視野像 (b)発振スペクトル (c)自己相関波形

ルス動作を達成していると考えられる。現在のピークパワーは 3.4 kW であるが圧縮することによって更なる高尖頭出力化が見込まれる。共振器外部で分散補償したところパルス幅に変動がみられ、今後最適化を行い限界までの圧縮を試みる。また、遠視野像のストレール比は 28% であり、in-phase モードの選択が行われていた。

まとめ

本研究では半導体可飽和吸収体のみによる MCPCF の位相同期モード同期に初めて成功した。これにより、ファイバーレーザーから高ピークパワーパルスを取り出す手法として、レーザーアレイのコヒーレントビーム結合が有用な手段の一つである可能性が示された。

参考文献

[1] Philip St.J. Russell, "Photonic-Crystal Fibers", Journal of Lightwave Technology, 24, 12, 4729-4749 (2006)
 [2] 佐藤慶吾, "マルチコアファイバーレーザーの位相同

期法の研究", 電気通信大学大学院, 修士論文(2013)
 [3] T. A. Birks, J. C. Knight, P. St.J. Russell, "Endlessly single mode photonic crystal fiber," Opt. Lett. 22, 13, 961(1997)
 [4] M. Wragge, P. Glas, M. Leitner, "Combined phase locking and beam shaping of a multicore fiber laser by structured mirrors", Optics Letters, 26, 13, 980-982(2001)
 [5] L. Michaille, D. M. Taylor, C. R. Bennett, T. J. Shepherd, B. G. Ward, "Characteristics of a Q switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area", Optics Letters, 33, 1, 71-73(2008)
 [6] 川村朋稔, "可飽和吸収可体によるマルチコアファイバーレーザーの位相同期に向けたモード同期ファイバーレーザーの研究", 電気通信大学大学院, 卒業論文(2019)
 [7] R. Xu, F. Xu, Y. Song, L. Duan, Y. Song, S. Tan, and Z. Liu., "Impact of spectral filtering on pulse breaking-up and noise-like pulse generation in all-normal dispersion fiber lasers," Opt. Express, 28(15), p. 21348-21358, (2020)