

位相同期モード同期マルチコアファイバレーザの研究

白川 晃研究室 清水 総士郎

1 序論

ファイバレーザは導波路構造、エネルギー変換効率が高い、小型化可能という点で高平均出力動作に優れている。一方でコアが小さいことから強い非線形性やファイバーの破損といった問題が生じてしまう。PCF(Photonic Crystal Fiber)によってコアの面積化が進み高出力化が進んだが、面積化にも限界が生じたため更なるパワー・エネルギースケールアップのためにコアの拡大に加えてコアの加算によるビーム結合、コヒーレントビーム結合(CBC)が注目されている。

本研究室では一本のファイバーに複数のコアを持つマルチコアファイバー(MCF)とコア径を拡大してもシングルモード伝搬可能な PCF の特性を併せ持つマルチコアフォトニック結晶ファイバー(MC-PCF)を用いた空間的なビーム結合での CBC の研究を行っている。本論文では 7core-MC-PCF を用いる(図 1)。

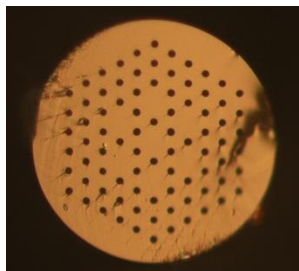


図 1 7core-MC-PCF 断面図

隣接したコア同士がエバネッセント結合を発生させ、位相同期が維持されることで CBC となる。MCF における固有モードであるスーパーモードはコアの数と同数のモードを励振し、その中でもコアを伝搬するビームの相対的位相差が 0 である in-phase モードは遠視野で単一ピークに結

合され輝度加算を実現するモードである。そのため、高出力パルスが発生において in-phase モードの選択励振と CW モード同期の同時実現が重要となる。

本研究の目的としては、近年本研究室で取り組まれてきた MC-PCF の研究を踏まえながら、位相同期マルチコアファイバーのさらなる高出力化を目指していくことである。本研究室では可飽和吸収体のみによって、全正常分散(ANDi)発振器構成において位相同期モード同期の同時実現を世界で初めて実現した[1]。しかし不安定な CW モード同期であったため外部共振器の構成を改めることで高品質なモード同期を目指す。

2.原理

2.1 Yb ファイバレーザ

本研究で用いられたイッテリビウム(Yb)添加ファイバーは Yb³⁺イオンをシリカガラスに添加した利得ファイバーである。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、そのため単位レーザ出力当たりの熱発生量が抑えられる。ファイバレーザは導波路構造により横モードが制御されているため、熱レンズ効果などのビーム品質の低下を抑えられる。Yb 添加ファイバーの吸収断面積と放出断面積を以下の図 2 に示す。Yb ファイバレーザは非常に広い吸収帯と発光帯を示し、吸収範囲は 800~1060nm、発光範囲は 900~1200nm である。このように幅広い吸収スペクトルを持つため、様々な波長の励起用 LD を用いることができる。吸収、誘導放出波長のピークはともに 975 nm となっている。加えて Yb³⁺レーザは励起波長と発振波長が近く、量子欠損が

少ないために高効率動作が可能である。一方、発振波長において吸収があるため再吸収が発生してしまう側面もある[2]。

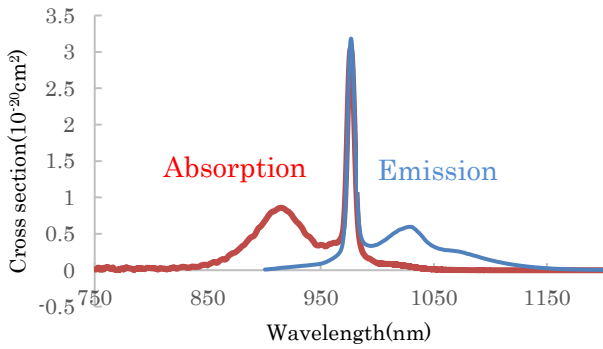


図2 吸収断面積と放出断面積

2.2 フォトニック結晶ファイバー

PCFは光の伝搬の仕方によって屈折率導波型とフォトニックバンドギャップ(Photonic Bandgap Fiber: PBF)型の2種類(図3)に分けられる[3]。屈折率導波型は従来のステップインデックスファイバ同様に、空孔とガラスの有効屈折率とガラス自体の屈折率差によってコアに光を閉じ込めることで伝搬させる。従来との違いはコアとクラッドの屈折率の差である。一方、PBFはブラッグ反射によって光をコアに閉じ込め伝搬させるものであり、コアが低屈折率領域であっても伝搬させることができる。

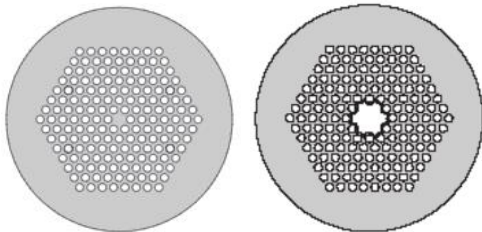


図3 PCF(屈折率導波型)(左), PBF(空孔型)(右)構造[4]

2.3 可飽和吸収体による in-phase モードの選択励振

MCFにおいて、各コアの伝搬光は共通の伝搬定数でコアを伝搬し、コアから染み出すエバネッセント光によって、隣のコアと結合する。この結合によりMCFのコアと同数の固有モード(スーパーモード)が励振する。スーパーモードの中で有効屈折率の最も高いものを in-phase モード、有効屈折率の最も低いモードを out-of-phase モードと呼ぶ。図4に、7core-MC-PCFのスーパーモードの遠視野領域、近視野領域それぞれにおける規格化強度分布を示す。

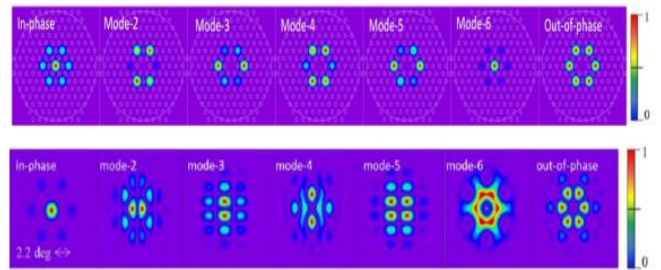


図4 (上)近視野規格化強度分布
(下)遠視野規格化強度分布[1]

本研究では図4における in-phase モードを選択励振するため可飽和吸収体を用いた。可飽和吸収体(SA:Saturable Absorber)は光の強度が低い入射光の場合には吸収体として働き、強度が高い入射光の場合には吸収が飽和することで吸収量が小さくなる媒質である。可飽和吸収体を用いた in-phase mode の選択励振の概念図を図5に示す。

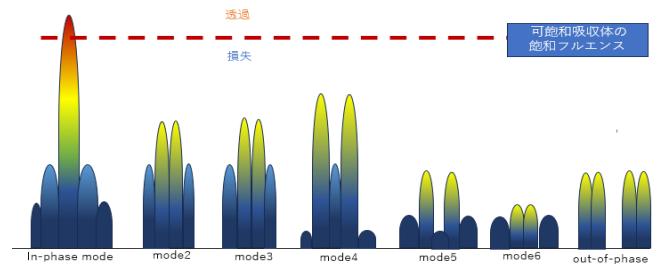


図5 各モードの可飽和吸収体の位相同期の概念図

図5のように可飽和吸収体の in-phase mode とその他のモードの間に可飽和吸収体の飽和フルエンスが存在するように調整することで、in-phase mode のピーク出力が優先的に透過する。そのため in-phase mode の選択励振を起こすことができる。

2.4 半導体可飽和吸収ミラー (SESAM)

半導体可飽和吸収体と特定の波長の光だけを反射するブラッグ反射鏡を組み合わせたものを半導体可飽和吸収ミラー (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)といい、受動モード同期にしばしば用いられる。SESAMの典型的な構造はGaAsを基盤として、GaAsやAlAsを重ねることで形成されるブラッグ反射層とInGaAsなどの単一量子井戸から形成される吸収層から構成される(図6)。

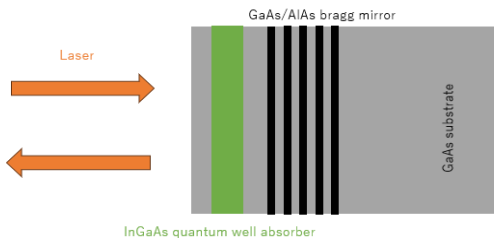


図 6 SESAM の概要図

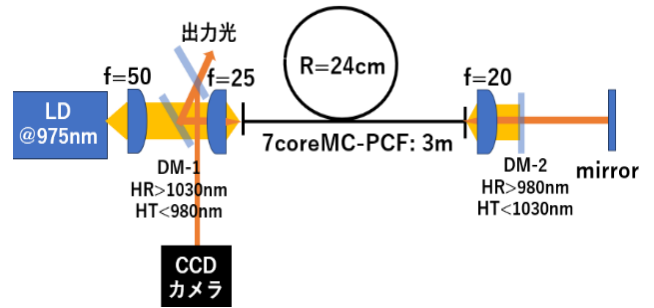


図 8 共振器構成(0° クリーブ)

3. 実験結果

本研究で用いた 7coreMC-PCF の特性を表 1 にまとめる。

表 1 7coreMC-PCF

コア径	21.2 μm
空孔間隔 Λ	13.3 μm
空孔径 d	5.6 μm
d/ Λ	0.42
第一クラッド径	165 μm
Yb 添加濃度	3000ppm

励起光源に用いた中心波長 975nm の LD の出力特性を調べ、7coreMC-PCF への注入効率を調べるために 30cm ほどのサンプルを用いて測定した。その結果を図 7 に示す。レーザー閾値は 4.67A であり、ファイバーへの注入効率は 61% だった。以降はこの注入効率を用いて測定の励起パワーとした。

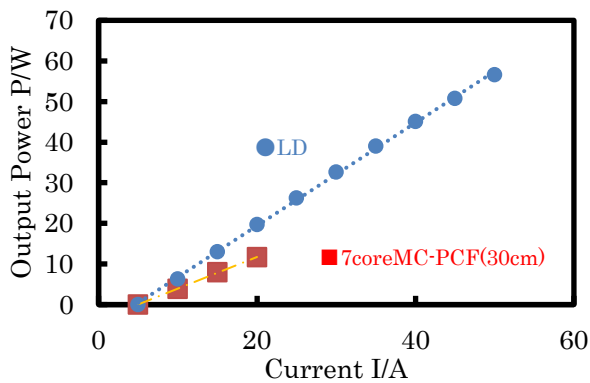


図 7 LD 及び 7coreMC-PCF 注入後の出力特性

3.1 0° クリーブ

7core MC-PCF を 3m に切り分け、両端を 0° クリーブシフトリペロー型共振器を組んで測定した。

この時の入出力特性を図 9 に示す。

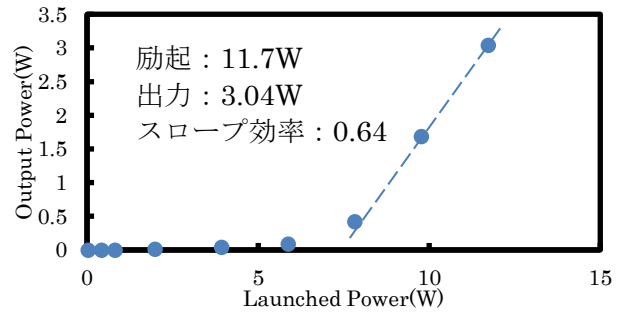


図 9 入出力特性(0° クリーブ)

また、発振後スペクトルと近・遠視野像を図 10・11 に示す。

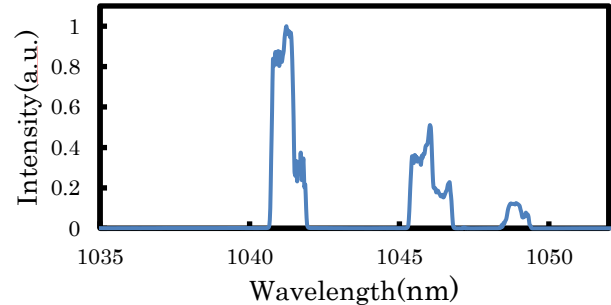


図 10 スペクトル発振後

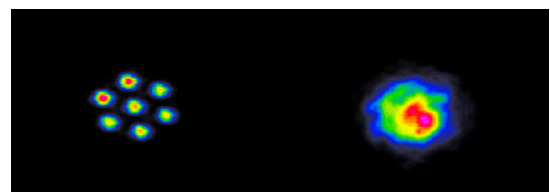


図 11 近・遠視野像

複数の波長が生じており、近・遠視野像から in-phase モードではないピークが見取れるため、波長および偏光選択を行うことで in-phase モードの選択励振と CW モード同期の獲得を目指した。

3.2 CW モード同期実験

励起光出射側を寄生発振の抑制のため 8° クリーブし、波長・偏光選択を偏光ビームスプリッター (Polarizing Beam Splitter:PBS) およびバンドパスフィルター (Band Pass Filter:BPF) を導入することで外部共振器を組んで測定した(図 12)。

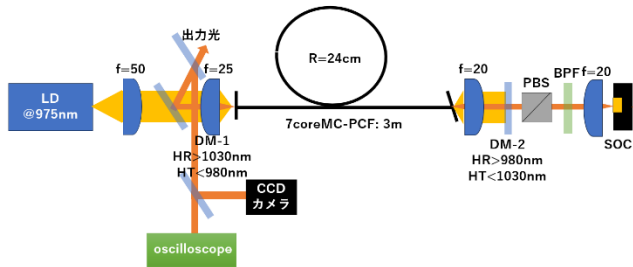


図 12 共振器構成(8° クリーブ)

用いた SOC の特性を表 2 に示す。

表 2 Saturable Output Coupler (SOC)特性

Transmittance	19%
Reflectance	58%
Absorptance	22%
Modulation Depth	9.5%
Non-Saturable Loss	9%
Saturation fluence	$40\mu\text{J}/\text{cm}^2$
Damage threshold	$5\text{mJ}/\text{cm}^2$
Relaxation time constant	15ps

測定結果は次の通りであった。

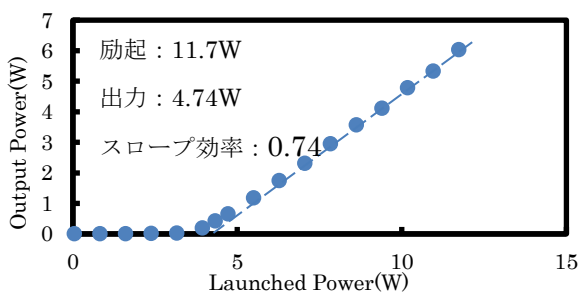


図 13 入出力特性(8° クリーブ)

また、発振後スペクトルと近・遠視野像を図 14・15 に示す。

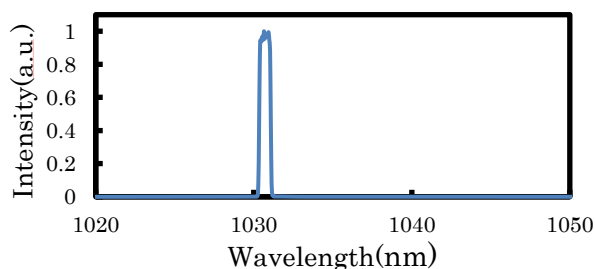


図 13 入出力特性(8° クリーブ)

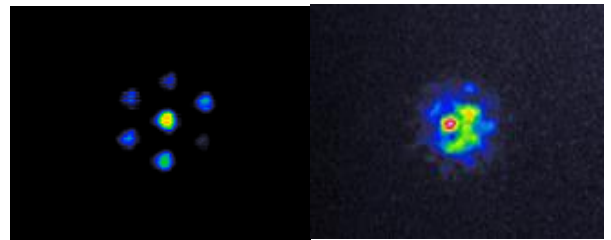


図 14 近・遠視野像

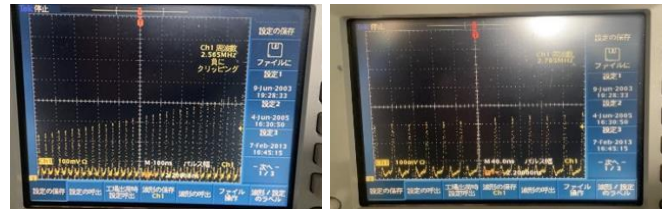


図 15 (右)100ns(左)40ns

近・遠視野像から in-phase モードを主体とした励振を確認できたが、時間波形は Q スイッチモード同期を示しており、CW モード同期を得ることはできなかった。

4. まとめと今後の展望

7coreMC-PCF を用いてファブリペロー型共振器を構築し、外部共振器、SESAM を取り入れ、Q スイッチモード同期を得た。in-phase モードに近い選択励振を確認した。

今後の展望としては CW モード同期を得られていないため、SESAM の変更や外部共振器のアライメントの見直しなど調整を行っていく。また、分散補償素子導入による高品質な CW モード同期の実証を目指す。

5. 参考文献

- [1] 川村 朋念, “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”, 電気通信大学大学院, 修士論文(2021).
- [2] T. C. Newell, P. Peterson, A. Gavrielides and M. P. Sharma, "Temperature effects on the emission properties of Yb-doped optical fibers", Optics Communications. 273(1), p.256-259 (2007).
- [3] 中沢正隆, “フォトニック結晶ファイバーの特性とその応用”, 応用物理学会誌, 73(11), p.1409-1417 (2004).
- [4] 藤田盛行, 田中正俊, 山取真也, 鈴木聡人, 小柳繁樹, 山本 哲也, “フォトニック結晶ファイバ (1)”, 三菱電線工業時報, 99, p.1-9 (2009).