

Yb 添加 7 コアマルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザーの位相同期特性

白川研究室 黒須 雄太

1. はじめに

ファイバーレーザーは低損失のシリカガラスによって作られているため高効率、導波路構造によって空間モードを完全に制御可能であるため高ビーム品質、優れた熱拡散特性を持つため高冷却性、コンパクト、メンテナンスフリー等の複数の優れた特徴を持つ高平均出力レーザーである。しかし、ファイバーレーザーは誘導ラマン散乱や誘導ブリルアン散乱等の非線形光学効果、パルス動作時に問題となる自己収束効果、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は制限されている。

これら全ての要因を解決する手法として、複数のファイバーレーザーを束ねて出力を加算するアレイ化がある。特にアレイ化の一つであるコヒーレントビーム結合(CBC)では、複数のコアから出射されるレーザーを位相同期して結合することにより、出力を増大させることが可能である。また、この手法では、アレイ数に応じた出力の増大ができ、アレイ数を増やすことで更なる出力の向上が可能である。

本研究室では、一つのファイバーに複数のコアを持つ Yb 添加マルチコアフォトニック結晶ファイバー(MCPCF)を用いて、上記の CBC によるファイバーレーザーの高尖頭出力化、高エネルギー化の研究を行ってきた。

本研究では、MCPCF の位相同期法として、エンドシール法を用いた。エンドシール法とは、MCPCF 終端の空孔を熔融消滅したエンドシール部とファイバー端面のフレネル反射により、Talbot 共振器を全ファイバーで取り扱う手法である。これによりスーパーモード、特に in-phase モードの選択励振が可能となる。本研究室では、この手法を用いて 6 コア MCPCF の位相同期特性を行ってきた。今回は新たに作製した 7 コア MCPCF を用いて、エンドシール法での in-phase モードの選択励振の実証を行った。

2. 原理

2.1 MCPCF

本研究で用いた Yb 添加 7 コア MCPCF の断面図を図 1、各種パラメータを表 1 にそれぞれ示す。コアの周りの周期的空孔構造によって、全反射による光閉じ込めを行い、シングルモードでの伝搬が可能である。また、それぞれのコアがエバネッセント結合により相互作用して位相同期しており、コアと同数の固有モード(スーパーモード)を励振する。

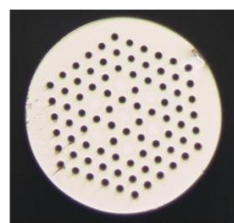


図1. Yb添加7コアMCPCFの断面

表1. Yb添加7コアMCPCFのパラメータ

空孔間隔 Λ	13.3 μm
空孔サイズ d	5.6 μm
d/Λ	0.42
コア径	21.2 μm
第1クラッド径	165 μm

2.2 スーパーモード

本研究で用いた 7 コア MCPCF で励振するスーパーモードの計算結果を図 2、図 3 に示す。計算には市販ソフト FIMMWAVE を使い、有限要素法により行った。図 2 は 7 つのスーパーモードの近視野電界分布、図 3 は遠視野強度分布を示している。特に、最もモード屈折率の大きい 1 番目のモードを in-phase モード、最もモード屈折率の小さい 7 番目のモードを out-of-phase モードと呼ぶ。遠視野強度分布で、この in-phase モードのみが中心に高いピークを持っており、高輝度且つ高ビーム品質な CBC となっている。本研究ではこの in-phase モードの選択励振を目標とする。

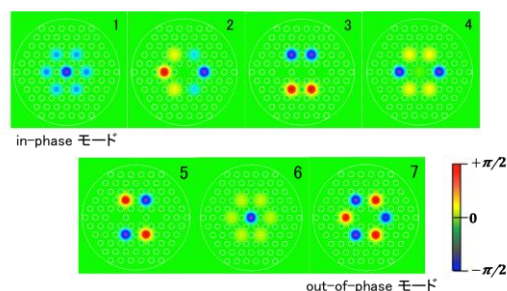


図 2. 近視野電界分布

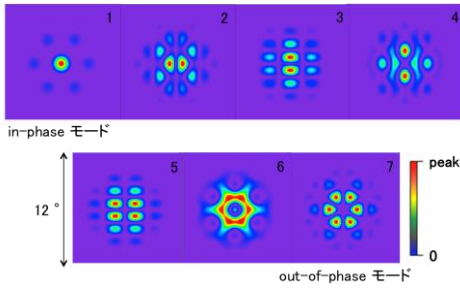


図 3. 遠視野強度分布

2.3 モードの選択励振

MCPCF のモード選択にあたり、特定のモードとそれ以外のモード間で損失差を与え、特定のモードのみを発振させる必要がある。このモード選択の手法の一つに Talbot 法がある。この手法では、MCPCF 出射端面での自己イメージングが一定距離で再構成される Talbot 効果を利用し、その半分の距離に鏡を置くことで、自己イメージングを MCPCF に戻すことができる。さらに、各スーパーモードは自己イメージングが再形成される距離が異なるため、鏡の位置を特定のモードに合わせることで損失差を与え、モードの選択励振を行うことが可能である。

本研究では、この Talbot 法の応用であるエンドシール法を用いる。図 4 に Talbot 共振器とエンドシール共振器の構成図を示す。エンドシール共振器では、自由空間をシリカロッドのエンドシール部、鏡をエンドシール部でのフレネル反射に置き換え、全ファイバーでの Talbot 共振器を構成している[1]。エンドシール長は端面研磨を行うことで調整し、再結合効率の高い特定モードを優先的に励振することで、モード選択を行う。

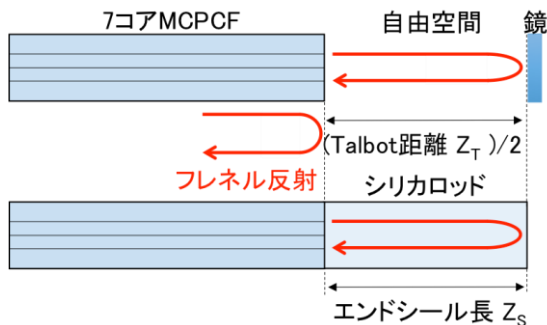


図 4. Talbot 共振器とエンドシール共振器

2.4 中心ローブ比

本研究では、遠視野強度分布で唯一、中心に一つだけ高いピークを持った in-phase モードの選択励振を目標として実証を行う。この in-phase モードの占有率の評価方法として、中心ローブ比 η_c を用いる。中心ローブ比 η_c とは、in-phase モードの全パワーのうち、中心ローブのパワーの割合のことである。この計算において、中心ローブの領域は直径 $d < 2.2 \text{ deg}$ と定義した (図 5)。これは遠視野像での in-phase モードが計算結果では、 $d = 2.2 \text{ deg}$ のときに中心ローブが最小値をとっていることから決定した。この理論値での中心ローブ比 η_c は 66% である。

ただし、今回用いるエンドシール共振器での in-phase モードの選択励振では、中心ローブの周りに存在したサイドローブが抑制され、その抑制された分が中心ローブに加えられる。これはエンドシール部の作製の際に発生するテーパ部、つまり空孔が徐々に潰れていく領域の影響である。中心ローブ比 η_c は、MCPCF の fill-factor を図 6 のように定義すると、この値が大きくなることで向上する。したがって、エンドシール共振器を用いた in-phase モードの選択励振では、サイドローブが抑制できることにより、中心ローブ比 η_c を向上することができる。

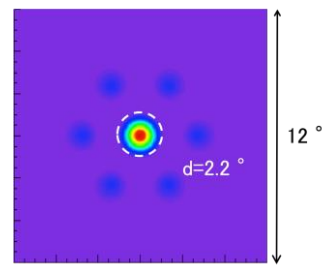
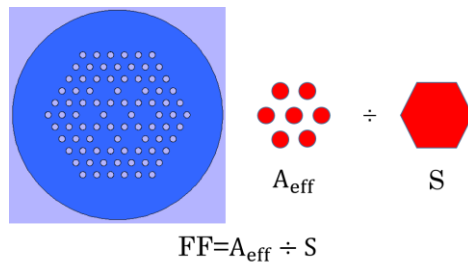


図 5. in-phase モードの中心ローブ比



FF: fill-factor, A_{eff} : 実効モード断面積, S : コアのある領域

図 6. Fill-factor の定義

3. 実験結果

3.1 7コア MCPCF の巻き径及びファイバー長依存性

7コア MCPCF を使用するにあたり、巻き径及びファイバー長の最適値を比較・検証した。ここで巻き径を D [cm]、ファイバー長を L [m]とする。実験系を図7、巻き径による出力の測定結果を図8、ファイバー長による出力の測定結果を図9に示す。巻き径による出力測定は7コア MCPCF の発振が確認できているファイバー長 $L=3.0$ m、ファイバー長による出力測定は巻き径の最適値 $D=30$ [cm]の7コア MCPCF を用いた。

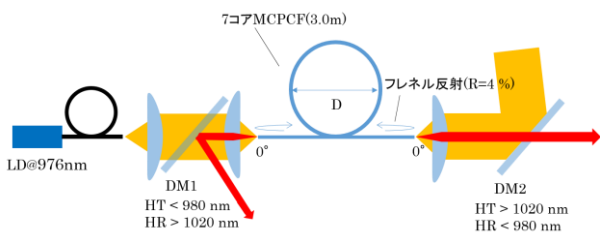


図7. 7コア MCPCF の巻き径及びファイバー長による出力依存性の実験系

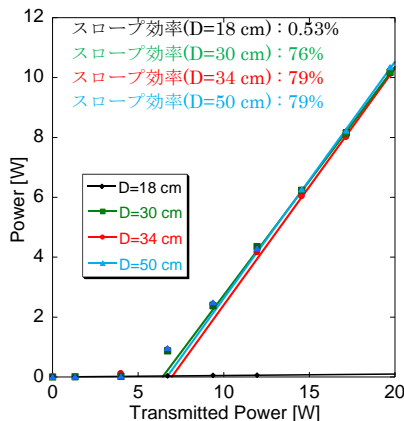


図8. 巻き径による出力の測定結果

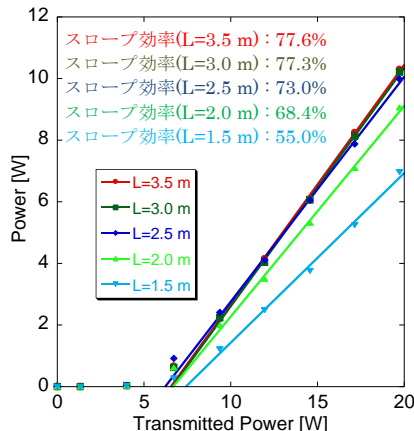


図9. ファイバー長による出力の測定結果

以上の結果より、7コア MCPCF では巻き径 $D=30$ cm、ファイバー長 $L=3.0$ m で効率が最大となった。

3.2 エンドシール共振器の作製

まず、セラミックヒーターによって融着を行うカプラー製造機を用いてエンドシール部を作製した。位相同期連続発振光学系を図10、作製の概要図と観測した遠視野ビーム形状を図11に示す。セラミックヒーターによって作製したエンドシール部では、どのエンドシール長でも図11のような遠視野ビーム形状となってしまった。そのため、in-phaseモードの選択励振を確認することはできなかった。原因として、溶けたMCPCFが重力の影響によって垂れ下がってしまうことで、空孔の潰れ方に不均一性が生じているためであると考えられる。

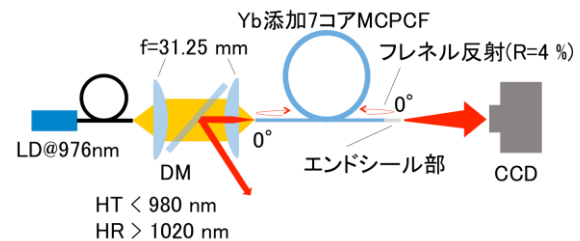
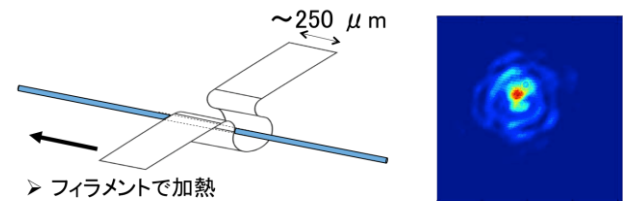


図10. 7コア MCPCF 位相同期連続発振光学系



図11. 作製方法と観測した遠視野ビーム形状 (セラミックヒーター)

次に、フィラメントタイプの融着機を用いて、エンドシール部を作製した。作製の概要図と観測した遠視野ビーム形状を図12に示す。この観測により、中心に高いピークを持った遠視野ビーム形状を観測することができた。よって、フィラメントタイプの融着機により作製したエンドシール部を用いて、エンドシール長を研磨により調整し、in-phaseモードの選択励振の実証を行った。



- フィラメントで加熱
- ファイバー長手方向に移動

図12. 作製方法と観測した遠視野ビーム形状 (フィラメントタイプの融着器)

3.2 エンドシール共振器による in-phase モードの選択励振

フィラメントタイプの融着機で作製したエンドシール共振器での、エンドシール長による中心ローブ比の変化を図 13 に示す。エンドシール長 6.0 mm~2.0 mm の範囲で研磨を行い、中心ローブ比が高い箇所では 100 μm ずつ細かく研磨を行った。その結果、エンドシール長 5.2 mm の時に中心ローブ比 $\eta_c = 0.98$ の安定した遠視野ビーム形状を観測した。よって、in-phase モードの選択励振はエンドシール長 5.2 mm 付近が最適値だと考えられる。

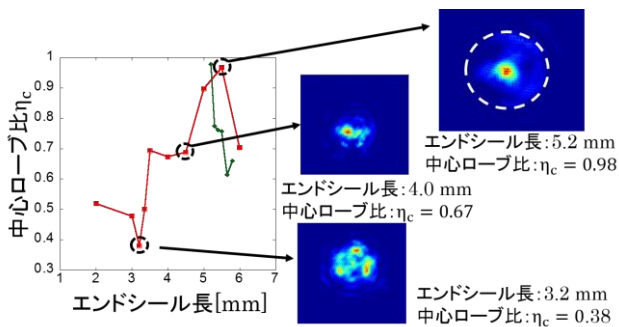


図 13. エンドシール長の最適化

最適長における出力の測定と、出力による中心ローブ比の変化を測定した。この結果を図 14、15 に示す。出力測定ではスロープ効率 92.4% という結果となった。出力による中心ローブ比の変化を測定したところ、5.32W 以降の出力では、出力を上げるにつれて中心ローブ比が低下することがわかった。これは低出力時には再結合効率の高い in-phase モードのみが発振するが、高出力時には再結合効率の低い他のモードも発振してしまうため、中心ローブ比が低下したものと考えられる。

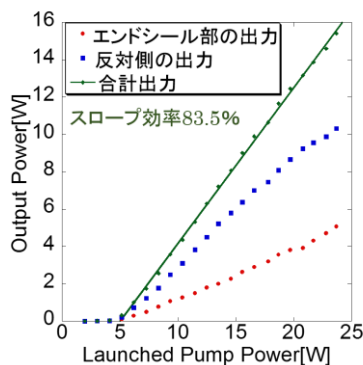


図 14. エンドシール共振器の出力特性

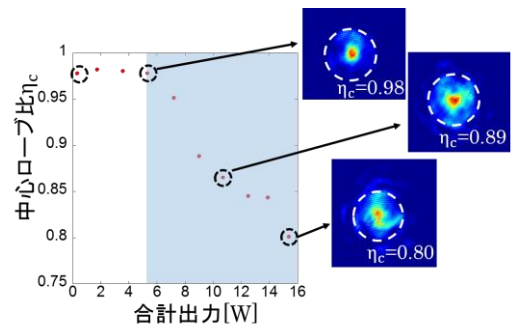


図 15. 出力による中心ローブ比の推移

4. 結論と今後の展望

7 コア MCPCF の位相同期に向けて最適な巻き径とファイバー長を確認した。7 コア MCPCF の CW では、巻き径 30 cm、ファイバー長 3.0 m で効率が最大となった。

7 コア MCPCF を用いたエンドシール共振器での in-phase モードの選択励振を行った。エンドシール部をセラミックヒーターにより作製したところ、空孔の潰れ方に不均一性が生じているため、in-phase モードの選択励振はできなかった。次に、フィラメントタイプの融着機を用いたところ、均一なエンドシール部の作製に成功した。このエンドシール部を用い、エンドシール長 6.0 mm~2.0 mm の範囲でエンドシール長を調整し、複数箇所遠視野ビーム形状を観測した。また、中心ローブ比で in-phase モードの占有率を評価した。その結果、エンドシール長 5.2 mm で中心ローブ比 $\eta_c = 0.98$ の安定した遠視野ビーム形状を観測できた。このエンドシール長で、出力測定と出力による中心ローブ比の変化の測定を行った。出力測定ではスロープ効率 83.5% という結果となった。また、出力による中心ローブ比の変化を測定したところ、5.32W 以上の出力では、再結合効率の低い他のモードも発振してしまうため、中心ローブ比が低下した。

今後の展望としては、in-phase モードの単一出力化を行う。また、6 コア MCPCF との比較を行っていく予定である。

参考文献

- [1] M. Matsumoto, T. Kobayashi, A. Shirakawa, and K. Ueda, "All-fiber phase-locked multi-core photonic crystal fiber laser," Advanced Solid-State Photonics 2011, paper AMC3.