

Qスイッチ位相同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザーの高出力化

白川(晃) 研究室

佐藤 慶吾

1. 背景・目的

ファイバーレーザーには、高ビーム品質、高冷却性・高効率・メンテナンスフリー等の様々な利点がある。2009年にはCWで10kWのシングルモードファイバーレーザーが製品化されるなど、既に高平均出力レーザーとして実現されている。

しかし、更なる高出力化・高エネルギー化を目指す上で問題となる弊害も存在する。誘導ラマン散乱や(SRS)や誘導ブリルアン散乱(SBS)に代表される誘導非線形現象の発生、ファイバー端面の破壊、ファイバーを伝搬する光の自己収束効果等の問題により、単一ファイバーから発振できる出力には限界がある。

更なる高出力・高エネルギー化への手段の1つとして挙げられているのが、複数のレーザーを位相同期させ、ビームを重ね合わせるコヒーレントビーム結合(CBC)である。我々は同一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(MC-PCF)を用いた、ファイバーレーザーの CBC の研究を行ってきた。

複数存在する MC-PCF の固有モードから、遠視野にて単峰の強度加算出力が得られるモードを優勢的に選択励振させる方法として、エンドシール法を考案・実証した。エンドシール法を用いた CW 発振、及び Q スイッチパルス発振の研究を行っている [I, II]。

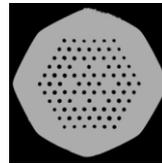
本実験では、エンドシール MC-PCF における Q スイッチパルス発振を実現させ、高尖頭出力・高エネルギーを最も得られるファイバー長の最適化を目的に、我々のグループが既に報告しているファイバー長とは異なるファイバー長での Q スイッチパルス発振を行った。

2. 原理

2-1. MC-PCF

マルチコアフォトニック結晶ファイバー(MC-PCF)の断面を Figure 1 に、構造パラメータを Table 1 に載せる。

本実験に用いた MC-PCF は 6 個の Yb 添加コアと周期的空孔構造を有する(Fig. 1)。MC-PCF の特徴として、それぞれのコアが大口径(Tab. 1)でシングルモード伝搬が可能であり、コア数を増やすことで出力・エネルギー限界を高めることも可能である。さらに各コアが近接しており、コア間がエバネッセント結合しているため、コア数と同数の固有モードが励振し、位相同期の維持が可能であるため CBC に適している。



Tab. 1. MC-PCF 構造パラメータ

空孔間隔 A	空孔サイズ d	コア径
13.5 μm	6.6 μm	20.7 μm
第一クラッド径	ファイバー外径	d/A
180 μm	280 μm	0.49

Fig. 1. MC-PCF 断面

2-2. 固有モード(スーパーモード)

本実験で用いる 6 コアの MC-PCF には、6 個のスーパーモードと呼ばれる固有モードが励振する。ファイバー端面(近視野)において、MC-PCF の各コアを伝搬してきた光の位相差は、スーパーモードごとに異なる(Fig. 2)。

それぞれの固有の位相差を有するスーパーモードは、CBC が行われ、遠方(遠視野)にて固有のビーム形状を有する(Fig. 3)。この 6 個のスーパーモードの 1 個に、近視野では 6 コア全ての光の位相が揃っており、唯一遠視野にて単一ピークを持つモード(Fig. 2, Fig. 3 共に左上のモード)が存在し、in-phase モードと呼ばれている。CBC による高尖

頭出力化・高エネルギー化のためには、単峰の強度加算出力を形成する in-phase モードの選択励振が必要となる。

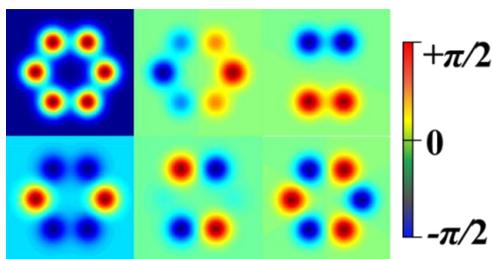


Fig. 2.各スーパーモードの近視野における位相関係

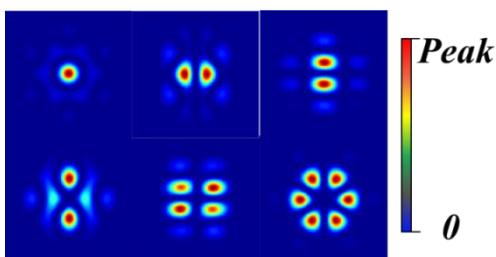


Fig. 3.各スーパーモードの遠視野における強度分布

2-3. モード選択法

スーパーモード選択法の一つに Talbot 共振器がある。アレイ状光源には、一定周期距離で出射直後の強度分布が再構築される自己イメージングと呼ばれる効果がある。Talbot 共振器は自己イメージングされる距離の半分の距離にミラーを設置することで、自己イメージングを光源に戻すことが出来る(Fig. 4 上)。

加えて、スーパーモードはそれぞれ自己イメージング距離が異なるため、ミラーの位置を調整することで、特定モードと他のモードとの間に損失差を与えることが出来るので、スーパーモードの選択励振を行える。

本実験ではモード選択法として、我々が考案・実証を行ったエンドシール法を用いている。

エンドシール法は、MC-PCF の空孔構造を溶融消滅し、シールしたエンドシール部と、ファイバー端面のフレネル反射を用いたオールファイバーのモード選択法である。

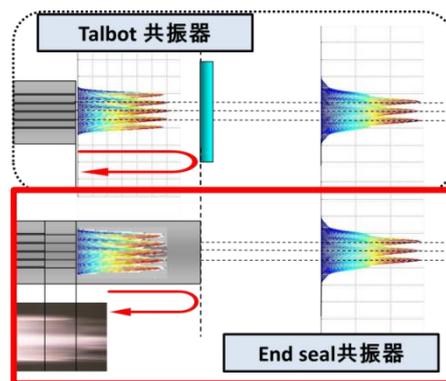


Fig. 4.モード選択法：Talbot 共振器と End seal 共振器

Talbot 共振器同様、エンドシール長を調整することで、モード選択が可能になっている(Fig. 4 下)。モードの再結合効率の計算より、in-phase が選択励振されるエンドシール長は 3.1mm であり(Fig. 5)、研磨により調整する必要がある。

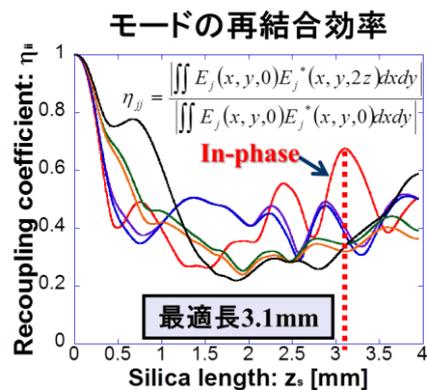


Fig. 5.スーパーモードの再結合効率の計算

また、in-phase モードがどれだけ優勢的に選択されているかを、中心ローブ比を以下の式で定義し、評価した。

$$\text{中心ローブ比} = \frac{\text{中心ローブパワー}}{\text{全体パワー}}$$

(中心ローブは半径 0.75 deg)

3. 実験・結果

3-1. 空孔の溶融消滅時の均一性の確認

MC-PCF のレーザー発振に際し、エンドシール法によるモード選択を行ったが、このエンドシール部は 1600 °C のセラミックヒーターで空孔を溶融消滅させて作成した(Fig. 6)。

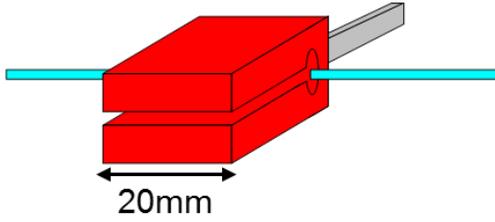


Fig. 6. セラミックヒーターに設置したファイバー

エンドシール部と MC-PCF の間に存在する、空孔が徐々に潰れていくテーパー領域では、空孔構造が均一に潰れていくことが求められる。そこで、熱の伝わり方の差や、重力の影響により、空孔が不均一に潰れてしまっている可能性を考慮し、確認することにした(Fig. 7)。

ファイバーを手で研磨し、テーパー領域約 100 μm ごとの端面を観測、空孔の大きさを測定した。(Fig. 8)



Fig. 7. エンドシール部のイメージ図

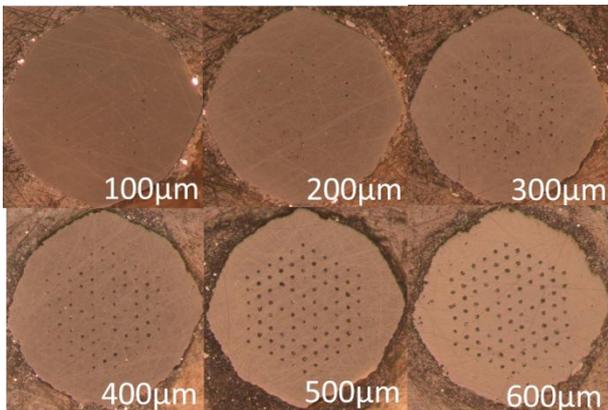


Fig. 8. テーパー領域 100 μm ごとの端面

光学顕微鏡で観察し、CCD で測定を行った。テーパー領域を 100 μm 研磨するごとに測定を行った。6 個存在するコアの、各コア間に存在している空孔の大きさを測定した。光学顕微鏡の分解能は数百 nm である一方、測定範囲での空孔サイズ

は 1~3 μm 程度であったため、分解能以下の大きさの細かい比較は出来なかった。

この前提の上で、CCD で測定した 100 μm ごとの空孔径の平均をとったところ、測定した 6 回全てで平均を上回る、または下回る大きさを持つ空孔は存在しなかった。加えて、各測定においての全ての空孔径が平均 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 程度であった。

以上のことから、光学顕微鏡を用いた測定においては、識別できない程度に空孔が均一に潰れていたと言える。

3-2. 連続発振

945nm ファイバー結合 LD を用いて 2.4m の MC-PCF を励起した。8°に研磨することでフレネル反射を抑えた端面側(8°研磨側)の自由空間にある HR と、エンドシール側端面で共振器を構築し、レーザー発振を行った(Fig. 9)。この連続発振下でエンドシール長を in-phase モードが選択励振される長さまで調整した結果、スロープ効率 0.67、遠方において中心ローブ比 0.73 の単一ピークを得た(Fig. 10)。

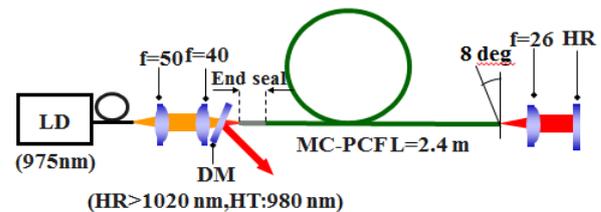


Fig. 9. 連続発振の実験系

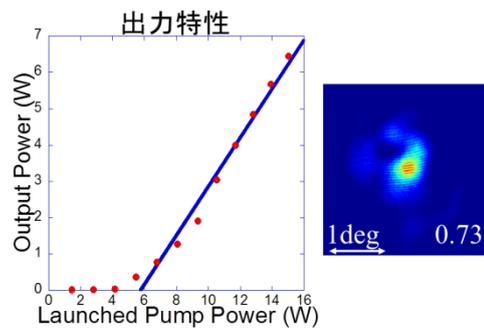


Fig. 10. 連続発振での出力特性と遠方ビーム形状

3-3. Q スイッチパルス発振

連続発振で in-phase モードが選択励振された後、8°研磨側の端面と自由空間の HR の間に偏光ビームスプリッター、3つの波長板とポッケルスセルを用いたアクティブ Q スイッチレーザーを構築し、発振を行った。(Fig. 11)

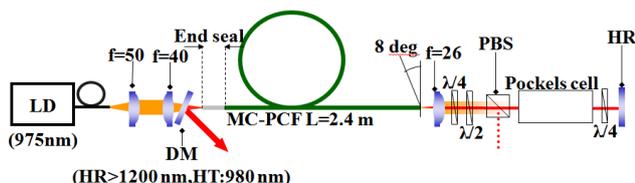


Fig. 11. Q スイッチパルス発振の実験系

複数の繰り返し周波数で Q スイッチパルス発振を行い、尖頭出力、パルスエネルギーを測定した。

共に最も高い数値を得られた 12.5 kHz での結果としてスロープ効率 0.49、励起パワー 15.0 W 時に尖頭出力 6.30 kW、パルスエネルギー 386 μJ を得た。

さらに Q スイッチパルス発振においても、遠方で単一ピークを確認することができ、中心ローブ比が全ての測定点において 0.80 以上であった。Q スイッチパルス発振においても in-phase モードが選択されていると言える(Fig. 12)。

既に我々が報告した、異なるファイバー長での結果と今回の結果を比較する(Tab. 2)。パルスエネルギーは他のファイバー長より多く得られた。尖頭出力はファイバー長が短い程高くなっている傾向がある。共にファイバー長が短ければ、パルス幅が短くなることが影響していると考えられる。

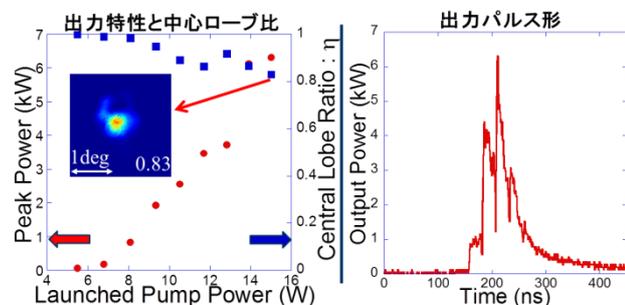


Fig. 12. Q スイッチパルス発振での出力特性、中心ローブ比と出力パルス形

Tab. 2.異なるファイバー長での測定結果

ファイバー長 [m]	3.5	2.4	2.0
繰り返し周波数 [kHz]	20.0	12.5	25.0
尖頭出力 [kW]	5.5	6.3	7.4
パルスエネルギー [μJ]	276	386	227

4. 結論

スーパーモード選択に用いるエンドシール部の作成時にできるテーパ領域の均一性を確認した。

エンドシール法により、in-phase モードの優勢励振する 2.4 m MC-PCF の Q スイッチパルス発振を行い、繰り返し周波数 12.5 kHz においてスロープ効率 0.49、励起パワー 15.0 W 時に尖頭出力 6.30 kW、パルスエネルギー 386 μJ を得た。加えて中心ローブ比 0.83 の in-phase モードを Q スイッチパルス発振においても得られた。

5. 展望

今後の展望として、異なるファイバー長での MC-PCF の Q スイッチパルス発振を行い、最も尖頭出力とパルスエネルギーが得られる、最適のファイバー長を探していく。

また、Q スイッチ動作部を過飽和吸収体に変更した、Q スイッチパルス発振を考えている。

6. 参考文献

- I. 松本 道生: 電気通信大学大学院 修士論文, (2011)
- II. 山田 英典: 第 72 回 応用物理学会学術講演会, (2011)