

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

白川 晃研究室 川村 朋穂

1 序論

ファイバーレーザーは従来用いられていたバルク型の固体レーザーと比較して、排熱効率が優れており高出力化で問題となる熱の影響を受けづらい。さらに、作用長が非常に長いことから高利得・高効率である点、形状自由度が高くコンパクトに設計可能である点、横モードが導波路構造によって決められるため高ビーム品質である点、優れた冷却特性と光強度耐性により高平均出力に適している点など様々な利点がある。

しかし、ファイバーレーザーは特にパルス動作の際に生じる誘導ラマン散乱や、自己位相変調といった非線形光学効果により高尖頭出力化・高エネルギー化に限界が生じる。そのため本研究室では同一ファイバー内に複数のコアを配置したマルチコアフォトニック結晶ファイバー (MCPCF) を用いてエネルギー・パワー限界を向上を試みている。MCPCF はすべてのコアの電界位相が揃っている in-phase モードのみが輝度重畳が可能のため、in-phase モードの選択励振が重要となる。本研究室では、その選択励振を可飽和吸収体 (SA) として $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ を用いて in-phase モードの選択励振と Q スイッチ発振を同時に実現する手法を実証している [1]。また、展望としてより応答速度の速い半導体可飽和吸収鏡 (SESAM) を用いて、MCPCF を用いた in-phase モードの位相同期とモード同期を同時に実現しようとしている。MCPCF は Yb^{3+} が添加されており $1\ \mu\text{m}$ で動作するため正常分散を示す。通常、全正常分散領域でのモード同期にはリング型の共振器が使用されるが、SESAM を使用したいという都合からシンプルなファブリ-ペ

ロー型共振器である必要がある。そのため本研究では、単一コアのファイバーを用いてファブリ-ペロー型共振器での全正常分散モード同期の検証を行った。

2 MCPCF と in-phase モード選択励振

MCPCF は、ファイバーの断面方向にフォトニック結晶構造を持たせたフォトニック結晶ファイバー (PCF) の中で、周期的空孔構造を有し屈折率を下げることによって全反射伝搬を行う屈折率導波型 PCF と、同一ファイバーの中で複数のコアを有しコヒーレントビーム結合 (CBC) によってエネルギー・パワースケーリングが可能となるマルチコアファイバー (MCF) の二つの利点を有したファイバーである。図 1 に 6 コア MCPCF の断面図を、図 2 に 7 コア MCPCF の断面図を示す。

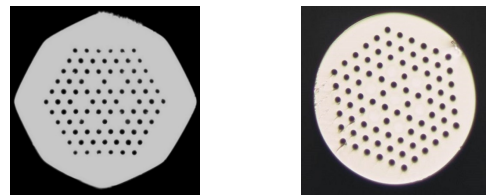


図 1. 6 コア MCPCF の断面図 図 2. 7 コア MCPCF の断面図

MCF は各コアの伝搬定数が等しく、エバネッセント光によって隣接するコア同士が結合するため、MCF のコアの数と同数の固有モード (スーパーモード) を励振する。このスーパーモードはそれぞれのコアを伝搬する導波路モードの線形結合からなっており、各コア間の相対位相差は一定である。実行屈折

率がスーパーモードの中で最も高いものを in-phase モードと呼ぶ。その他のスーパーモードは複数のピークを持つ遠視野像を形成する特徴を持つ。in-phase モードは各コアの位相が揃っておりスーパーモードの中で唯一中心に高いピークを持つ遠視野像を形成し高いビーム品質を持つため輝度重畳が可能となる。そのため、in-phase モードの選択励振が重要となる。in-phase モードの選択励振として SA を用いることができる。7 コア MCPCF のスーパーモードに対する SA の飽和フルエンスの寄与の概念図を図 3 に示す。

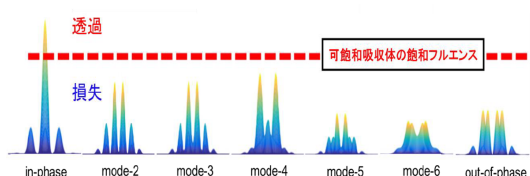


図 3. 7 コア MCPCF の各スーパーモードに対する SA の飽和フルエンスの寄与

このように遠視野で中心に高いピークを持つ in-phase モードのみが SA を飽和させ透過することで選択励振が可能となる。また、SA を用いるため位相同期と同時にパルス動作が起こる。本研究室では SESAM を用いての MCPCF の位相同期と Q スイッチモード同期は実証されている [3]。今後の展望として、位相同期とモード同期の同時実現をめざしている。

3 全正常分散モード同期

モード同期動作には様々な状態があり、通常のソリトンモード同期の他に、散逸ソリトン、シミラリトン、ストレッチパルス、などがありその中の一つが全正常分散 (ANDi) モード同期である。ANDi 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ため正チャープしたパルスが伝搬する。そのため非線形光学効果が抑制され高出力化が可能となる。正常分散領域では自己位相変調 (SPM) によってスペクトルが広がり続けるため、ANDi モード同期では通常、リング型共振器を用いて共振器内にパ

ンドパスフィルタ (BF) を挿入し、スペクトル広がり補償して周期的境界条件を満たすように設計される。リング型共振器内のスペクトルの形状変化の概念図を図 4 に示す [2]。

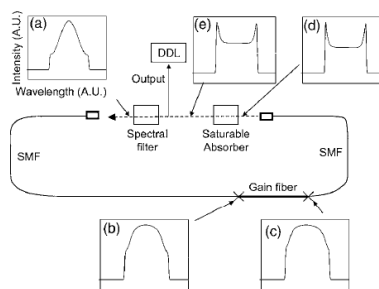


図 4. ANDi モード同期のスペクトル変化 [2]

このように ANDi モード同期では通常リング型共振器を用いるが、SA による MCPCF のモード選択を行うにはリング型共振器構成では難しく、ファブリペロー型共振器構成が適している。そのため、ファブリペロー型共振器で全正常分散領域でのモード同期の検証を MCPCF ではなく単一コアファイバーを用いて行った。

4 モード同期実験

4.1 共振器構成

図 5 に本研究で取り組んだモード同期実験系の共振器配置を示す。

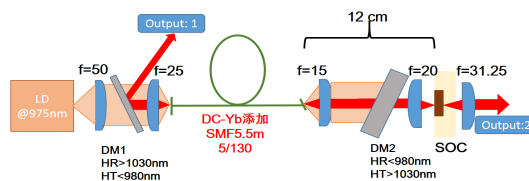


図 5. 共振器配置図

利得ファイバーとして Nufern 社製 Yb 添加ダブルクラッドシングルモードファイバーを使用している。励起側は 0° クリーブしておりフレネル反射により 3.4% の反射率を持つ。出射側は 8° クリーブ

をして寄生発振を抑えるようにしている。本研究では SESAM の一種として反射率 58%、透過率 19%、飽和フルエンス $40 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ の可飽和出力結合鏡 (SOC) を使用した。また、共振器長に応じて決まる繰り返し周波数は 18.5 MHz であった。ファイバー端面のフレネル反射と SOC による反射でファブリペロー型共振器を構成し、励起側 (Output1) と SOC 側 (Output2) でそれぞれの特性を測定した。

4.2 実験結果

図 6(a) に Output1 の入出力特性を、図 6(b) にモード同期時のスペクトルのパワー特性を示す。また図 7(a)、(b) にオシロスコープで撮影された時間波形を示す。

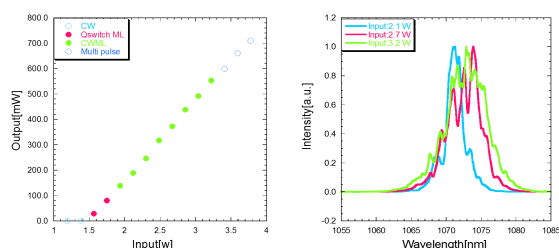


図 6(a). Output1 入出力特性 図 6(b). Output1 スペクトルパワー特性

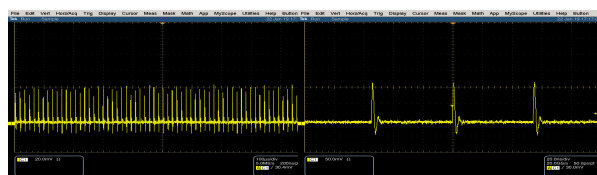


図 7(a). パルス列、100 $\mu\text{s}/\text{div}$ のとき 図 7(b). パルス列、20 ns/div のとき

得られた CW モード同期のうち、最大出力は励起パワー 3.2 W のとき 553 mW、パルスエネルギー 30 nJ であった。レーザーは励起パワー 1.2 W 付近から CW 発振を開始し、1.6 W 励起で Q スイッチモード同期に、1.9 W 励起で CW モード同期に移行した。CW モード同期へ移行した付近では緩和発振をしており、励起パワーを上げていくと安定した CW モー

ド同期となった。励起パワー 3.4 W でマルチパルスに移行している。スペクトルはマルチモードパッチファイバーで測定した励起パワー 1.9 W、2.7 W、3.2 W 時のスペクトルであり、中心波長は約 1072 nm であった。スペクトル幅 (FWHM) は 3.2 W 励起時に 5.7 nm となった。

図 8(a) に 2.4 W 励起時の SHG 自己相関計を用いて測定した自己相関波形、図 8(b) にシングルモードパッチファイバーで測定したスペクトルを示す。

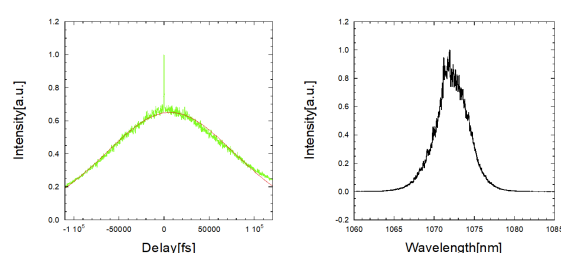


図 8(a). 自己相関波形 (2.4 W 励起時) 図 8(b). スペクトル (2.4 W 励起時)

自己相関波形は広い土台の中心にスパイクが立った形状をしている。土台部分およびスパイク部分のパルスを sech^2 と仮定すると、土台部分のパルス幅は 115 ps、スパイク部分は 344 fs であった。また、このスパイクはコヒーレントスパイクであると考えられ、位相がランダムな状態になってしまっていると考えられる。

次に Output2 の実験結果を示す。図 9(a) にの入出力特性を、図 9(b) にモード同期時のスペクトルのパワー特性を示す。

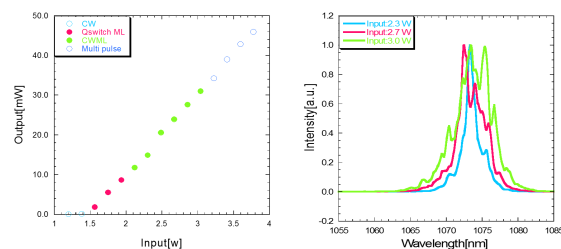


図 9(a). Output2 入出力特性 図 9(b). Output2 スペクトルパワー特性

得られた CW モード同期のうち、最大出力は励起

パワー 3.0 W のとき 31 mW、パルスエネルギー 1.8 nJ であった。レーザーは励起パワー 1.2 W 付近から CW 発振を開始し、1.6 W 励起で Q スイッチモード同期に、2.1 W 励起で CW モード同期に移行した。スペクトルは励起パワー 2.3 W、2.7 W、3.0 W 時のスペクトルであり、中心波長は約 1072 nm であった。スペクトル幅 (FWHM) は 3.0 W 励起時に 5.2 nm となった。

4.3 共振器構成 (BF 挿入時)

ANDi モード同期では BF がモード同期の定常発振に寄与しているため、本実験系においても同様に BF を挿入し特性を測定した。共振器配置を図 10 に示す。BF は Thorlab 社製、高透過でバンド幅 (FWHM) 10 nm のものを使用した。

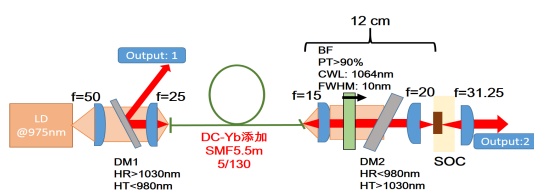


図 10. 共振器配置図 (BF 挿入時)

4.4 実験結果 (BF 挿入時)

図 11(a) に Output1 の入出力特性を、図 11(b) に Output2 の入出力特性を示す。

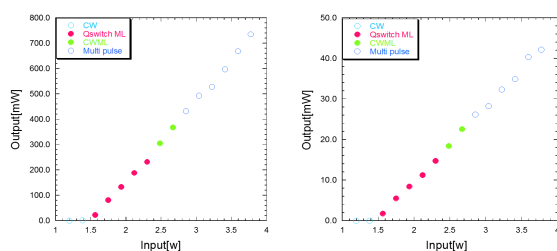


図 11(a). Output1 入出力特性 図 11(b). Output2 入出力特性

レーザーは励起パワー 1.2 W 付近から CW 発振を開始し、1.6 W 励起で Q スイッチモード同期に、2.5

W 励起で CW モード同期に移行した。励起パワー 2.9 W でマルチパルスに移行した。BF 挿入前と挿入後と比較するとモード同期がなかった範囲が狭くなっている。BF が共振器内パワーに損失を与えてしまったことでよりモード同期がかかりにくくなったと考えられる。

5 まとめ

本研究では、単一コアのファイバーを用いてファブリ-ペロー型共振器での全正常分散領域モード同期の検証、実現をした。共振器長に応じて決まる繰り返し周波数は 18.5 MHz であり、最大出力は励起パワー 3.2 W のとき 553 mW、パルスエネルギー 30 nJ であった。また、自己相関波形の測定の結果モード同期パルスの位相がランダムになっていることを確認した。ファブリ-ペロー型共振器での全正常分散領域モード同期においては BF の挿入が定常発振に寄与しないことを確認した。

今後の展望として、モード同期パルスのランダム性の除去や利得ファイバーを MCPCF に変え in-phase モード位相同期モード同期の実現を目指していく。

6 参考文献

- [1] 久保内 照雄, ”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”, 電気通信大学大学院, 修士論文 (2016).
- [2] A. Chong, W. H. Renninger, and F. W. Eise, ”Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers”, J. Opt. Soc. Am B **25**, 140 (2008).
- [3] 八木澤大希, ”フォトリック結晶ファイバーによる高出力パルスファイバーレーザーの研究”, 電気通信大学大学院, 修士論文 (2018)