白川 晃研究室 森 俊介

#### 1 はじめに

ファイバーレーザーは効率や導波路構造や小型 化可能といった点から CW(Continuous Wave)発振に は非常に優れている.しかし,ファイバーはコアが小 さいことからパルスエネルギーが高くなると強い非 線形性を誘起してしまうことや,容易に破壊閾値を超 えてしまい高出力化に限界が生じてしまう.そのよう な中 PCF(Photonic Crystal Fiber)の登場により,コ アの大面積化が発展したが,シングルコアの大面積フ ァイバーによる超短パルスレーザーも出力がほぼ限 界に達している.更なるエネルギー・パワースケーリ ングのためにはモードの大面積化は有効な手法であ り,ファイバーレーザーアレイのコヒーレントビーム 結合(CBC)の必要性が高まっている.

マルチコアファイバーは一本のファイバーに複数 のコアを有することでモードフィールド径(MFD)を 拡大することができる. また、隣接するコアの距離が 近いことからビームのエバネッセント結合によりコ ヒーレントビーム結合が実現される[1]. マルチコア ファイバーにフォトニック結晶構造を取り入れるこ とで,各コアの大面積化も可能で,より大きなモード フィールド径(MFD)を得ることが可能となる. そのよ うな二つの特性を備えたファイバーが MC-PCF(Multi Core-Photonic Crystal Fiber)であり, 我々は 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. MCF 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 はコアと同数のモードを励振するが、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 はガウシアンに最も近い高品質な遠視野像を励振し, 輝度重畳が可能な唯一のモードである. そのため, 高 出力パルスの発生には in-phase モードの選択的励

振とモード同期の同時実現が必要である.

そこで本研究では、可飽和吸収体のみによる位相同期 モード同期を目指す. MC-PCF が融着の難しいファ イバーであることからリニアなファブリペロー型発 振器を作製した.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成功させた [2]. ANDi 発振器内は全て正の分散を示す光学素子で 構築され、正の分散が大きくなっている.非線形性が 小さいためスペクトルが広がっておらず高品質なモ ード同期は得られていない.そこで、発振器内に分散 補償素子を挿入し発振器内の総分散を 0 ps<sup>2</sup>に近づけ、 ストレッチドパルス状態を目指した.

## 2 原理

## 2.1 Yb 添加ファイバー

イッテルビウム添加ファイバーは非晶質の石英ガ ラスを母材として Yb<sup>3+</sup> イオンを添加した利得ファ イバーである. Yb 添加シリカガラス光ファイバーの 吸収断面積と誘導放出断面積を図1に示す[3].図1 に示すように、Yb 添加ファイバーには、非常に広い 吸収帯と発光帯を示し,吸収範囲は 800 nm から 1064 nm, 放出範囲は 900 nm から 1200 nm であ る. 波長 915nm および波長 976nm に 2 つの特徴 的な吸収ピークを持つ. モードロック発振による超短 パルス発生では、縦モードを持ったレーザー発振する 必要があり、レーザー媒質の蛍光スペクトル幅は広い 必要がある. 吸収, 誘導放出波長のピークは 975 nm と被っている. これにより波長が 975 nm で正の利得 を受けるためには超強励起が必要となるため,現実的 ではなくモードロック発振に優位な波長は 1030 nm である. また, イッテルビウムによる吸収が 915 nm より 975 nm のほうが 3 倍以上大きいため、ファイ

バーの長さを短縮し, 非線形効果をある程度抑制する ことができる.



2.2 MC-PCF  $\succeq$  in-phase  $\neq - \vDash$ 

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リングすることができる. 今回使 用した MC-PCF の断面図を図 2 に示す.



図2 MC-PCFの断面図

MC-PCF はスーパーモードと呼ばれる固有の横モ ードを励振する.各スーパーモードの近視野像及び遠 視野像の規格化強度分布を図 3 に示す. 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 ドは遠視野で高ビーム品質な横モードを形成するた め、その選択励振が求められる.



図3 規格化強度分布(上)近視野像,(下)遠視野像

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.7 コア MC-PCF のスーパーモードに対する可飽和吸収 体(SA)の飽和フルエンスの関係の概念図を図 4 に示 す.



可飽和吸収体による in-phase モードの選択には飽 和フルエンスを超える強度の光を入射する必要があ る. 遠視野領域では in-phase モードは最も高い強度 を中心に持つため, 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 よう飽和フルエンスを調整することで、選択励振が実 現される.

#### 2.3 受動モード同期

安定したモード同期を起こすには、利得あるいは損 失の変調周波数を共振器のパルス往復時間の逆数に 正確に合わせる必要がある.一方で,共振器内を周回 するパルス自身が利得あるいは損失に変調を与える ことができれば自動的に同期することになる.この方 法を受動モード同期と呼ぶ. 共振器内を1周するパル スが満たすべき時間微分方程式は以下の式で表され る.

$$\frac{4g(t)}{\omega_G^2}\frac{d^2}{dt^2}a(t) + (g(t) - l(t) - l_0)a(t) = 0$$
(1)

ただし、 $\omega_{G} \equiv 2\pi E_{g}/h$ (h は基底状態のエネルギー、  $E_{g}$ はプランク定数)、利得をg(t)、損失をl(t)、共振 器内の一定の損失を $l_{0}$ 、パルスの時間波形をa(t)とす る. ここで、利得g(t)は時間によらない一定値 $g_{0}$ と し、損失変調のみの場合を考える。時間に依存する損 失はパルスの強度に依存して変化する媒質を共振器 内に挿入することによって得る。l(t)は以下の式で表 すことができる。

$$l(t) = l' \left( 1 - \frac{|a(t)|^2}{P_A} \right)$$
(2)

このような性質を持つ媒質を可飽和吸収体と呼ぶ. パルスの強度が低い時,吸収損失を与えるが,パルス の強度が高い時,吸収が低下して透過率が高くなる媒 質である.式(20)はこのことをモデルとして表してい る式である.また,可飽和吸収とは別の要因による共 振器全体である一定の損失と式(20)を式(19)に代入す ると以下の式が得られる.

$$\frac{4g(t)}{\omega_G^2}\frac{d^2}{dt^2}a(t) + l'^{\frac{|a(t)|^2}{P_A}}a(t) + (g(t) - l' - l_0)a(t) = 0(3)$$

この方程式の解は以下の式で表すことができる.

$$a(t) = a_0 \operatorname{sech}\left(\frac{t}{t_p}\right) \tag{4}$$

ここでは、もっとも単純な条件でパルス波形の 解を示した.現実のパルスレーザーでは、チャープ により周回ごとのパルス幅が広がってしまうため、 共振器内でチャープの原因となる2次の分散を打 ち消すような機構が必要となる.また、可飽和吸収 以外に自己位相変調も同時に発生する. 2.4 半導体可飽和吸収体による受動モード同期

受動モード同期で使用される最も一般的な手法は 半導体可飽和吸収鏡(Semiconductor Saturable Absorber Mirror: SESAM)によるものであろう. SESAM は非常にコンパクトでありつつ,可視から 中赤外まで,作製方法により応答速度,飽和フルエン ス,変調深さなど多様なパラメータを設定できる点か ら非常に利便性の高い素子である.図5に典型的な SESAM の構造を示す.SESAM の典型的な構造は GaAs を基盤として,GaAs や AlAs を多層重ねる 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. ブラッグミラー層に関してはバンドギャップエネル ギーが大きいため,吸収は発生しない.





2.5 Q スイッチ不安定性

Q スイッチモード同期は受動モード同期における 動作の一種である. Q スイッチモード 同期は利得媒 質が飽和するよりも早く可飽和吸収体が飽和してし まうために生じる. Q スイッチモード同期では変調 が残ったジャイアントパルスの中に共振器長に応じ たパルス が生成されている. このジャイアントパル スの周波数は kHz オーダーで生成される. Q スイ ッチモード同期によるジャイアントパルスは高いピ ーク強度を持つため, SESAM や利得媒質に損傷を 与える可能性があり, 望ましい現象ではない. 図6に 変調が取れた CW モード同期と Q スイッチモード 同期の概略図を示す.



図6 Qスイッチ不安定性

可飽和吸収体が完全に飽和していると仮定して, CW モード同期を得るのに必要な状況は以下の式で 表される[4].

$$E_p > E_{P,C} = \sqrt{F_{sat,L}A_{eff,L}F_{sat,A}A_{eff,A}\Delta R}$$
(5)

$$E_p = \frac{P_{intra}}{f_{rep}}, F_{sat,L} = \frac{h\nu}{\sigma_{el}}$$
(6)

Pintra は共振器内パワー, Fsat,L は利得媒質上の飽和 フルエンス,  $F_{sat,A}$ は SESAM の飽和フルエンス, AeffAは SESAM 状のビームの断面積, AeffL は利得 媒質上のビーム断面積, ΔRは SESAM の変調深さ,  $\sigma_{ol}$ は誘導放出面積, hはプランク定数,  $\nu$ は周波数を 表す. 上式は $E_n > E_{PC}$ の時に Q スイッチモード同期 から CW モード同期に移行することを示している. 閾値付近では CW モード同期は変調の残った緩和 発振を起こすため、安定した CW モード同期には閾 値より強度の高い入射光が必要である.式(23)に各 値を代入した結果, CW モードを得るためにはより 強度の高い光を集光させる必要があることが分かっ た. そのため、平凸レンズにより SESAM 上に集光 することで Q スイッチモード同期が抑制される可 能性がある.しかし、光を集光させすぎることで SESAM が過度に飽和しマルチパルス化につながる ことや SESAM 自体が破壊してしまうといった問題 点がある.

2.6 ストレッチドパルス状態

本研究では、共振器内に負分散素子を入れることで、 より高品質なモード同期かつ高エネルギー化を目指 している. セルフシミラー動作では、常に正のチャー プを有し、高エネルギー化が期待されるが、モード同 期が達成される条件が非常にシビアであるため構築 しづらいという欠点がある. また、ファブリペロー共 振器と比べてリング型共振器のほうがセルフシミラ ー動作がしやすい点からも、本研究ではセルフシミラ ー動作はしないと考えた. 図 3.7 にストレッチドパ ルス状態のパルス幅,分散,チャープを示す.ストレ ッチドパルス動作では共振器内で正と負のチャープ を持つ領域が存在することで,総分散が負の分散であ るソリトンモード同期より圧倒的に高エネルギーな モード同期が得られる[5].ストレッチドパルス状態 はパルス幅が最も短くなる点が2つある.1つ目は正 の分散が与えられている中央の点,2つ目は負の分散 が与えられている中央の点である.実験配置図は後述 するが、本研究で構築したファブリペロー共振器では 出力を取り出す 0° クリーブしたファイバー端面が 正の分散の中央点, SESAM の位置が負の分散の中央 点にそれぞれ対応している. また, SESAM の位置 で最もパルス幅が短くなるため,可飽和吸収させやす く、ストレッチドパルス動作させやすいと考えた.そ こで本研究では、ストレッチドパルスを生成すること を目指した.



図 7 ストレッチドパルス状態のパルス幅(オレンジ 色),分散(緑色),チャープ(茶色)

3 実験

共振器内に分散補償素子を挿入した実験配置図を 図8に示す.



励起光源として中心波長 975 nm の高出力 LD を使用した.発振器内に回折格子対を挿入した.使用 した利得ファイバーは Yb 添加の 7 core MC-PCF である.また,ファイバーは励起光入射側を 0° にク リーブし,励起光出射側を寄生発振の抑制のために 9° にクリーブした.自由空間の外部共振器のエンド 側に半導体可飽和吸収鏡(SESAM)を挿入した. バン ドパスフィルター(BPF)と SESAM 前の集光レンズ の間に分散補償素子となる回折格子対を挿入した. こ れによって負の分散の中心でパルス幅が短くなり, ス トレッチドパルス状態が動作しやすいと考えた.

# 4 実験結果

4.1 回折格子対挿入前の特性

SESAM 前のレンズの焦点距離が 20 mm の時の時間 波形を図 6 に示す.



図 9 21.1 W 励起時の時間波形(200ns/div)

この時, Q スイッチモード同期発振を確認した. 最 大平均出力は 21.1 W 励起時に 4.2 W であった.  $A_{eff,L} \geq A_{eff,A}$ が 1:1 となり,得られた出力から計算し た結果,  $E_{p,c}$ は 160 nJ,  $E_p$ は 32 nJ となった. これで は $E_p > E_{P,C}$ にならない. CW モード同期に必要なフ ルエンスを得るため,SESAM前に焦点距離が 20 mm より小さい集光レンズを配置し最適化した.

4.2 SESAM 前の集光レンズの焦点距離を最適化した後の諸特性

SESAM 前の集光レンズの焦点距離を 20 mm から 8 mm に変更し同様の実験を行った. この時の時間波 形を図 10 に示す.



図 10 6.1 W 励起時の時間波形(左)400ns/div, (右)10 ns/div

安定な CW モード同期を確認した. 6.1 W 励起 時出力は 0.47 W であった. また,共振器長に応じ た繰り返し周波数 34.4 MHz が得られている. こ の結果からパルスエネルギーは 13.8 nJ であった. 発振閾値で最も出力が高くなるよう SESAM とレ ンズの位置を調節した時,上のような安定なモー ド同期が得られた. また, CW モード同期を得るた め 1/4 波長板(QWP), 1/2 波長板(HWP)を調整した.

4.3回折格子挿入後の諸特性

計算で求めた MC-PCF の in-phase モードの分 散値が 0.046  $ps^2/m$ であり, これまでの実験では 共振器全体の分散は 0.26  $ps^2$ と大きな正分散であ ったが, 負分散を持つ回折格子対(間隔 4.7 cm)で補 償し 0.00072  $ps^2$ と僅かな正の分散とした. この時 CW モード同期発振を確認し, in-phase モードの 選択励振は行えなかった. 図 11 に時間波形, 図 12 に近視野像及び遠視野像を示す.



図 11 時間波形(左)1 ms/div, (右)10 ns/div



図 12 19.2 W 励起時の(左)近視野像, (右)遠視野像

図 11 からわかるように長い時間スケールで非常に 安定な CW モード同期発振を確認した.しかし,Qス イッチモード同期発振も確認することがあることか ら,閾値付近であると推測される.in-phase モードは 得られなかった.19.2 W 励起時に最大平均出力 2.01 W であった.共振器長に応じた繰り返し周波数は 34.4 MHz であり,パルスエネルギーは 58 nJ であっ た. ここで, in-phase モードのフルエンスを計算した 結果, 5.6 mJ/cm<sup>2</sup> と SESAM の飽和フルエンスが 40μJ/cm<sup>2</sup> より大幅に大きくなった. このことから, 高次モードのフルエンスも SESAM の飽和フルエン スを大幅に上回り, 複数のスーパーモードが混じった 複雑なモードが得られ, in-phase モードの選択励振 ができなかったと考えている.

4.4 in-phase モードの選択励振と CW モード同期 の同時実現

本研究では、共振器内に分散補償素子を挿入し共 振器内の総分散を0に近づけ、非線形性が支配され る共振器を作製することで自己位相変調によってス ペクトルを広げ、パルス幅を短くし、高品質なモー ド同期を目指した.非線形が支配された CW モード 同期条件と非線形性が支配されていない CW モード 同期条件を比較した図を図 13 に示す.





図 13 に示すように CW モード同期条件の式(5)に 示される $E_{P,C}$ が非線形が支配していない共振器に比 べて非線形性が支配されている共振器のほうが約 1/4 程小さくなっている.このことから,非線形性が支配 する共振器を作製することで CW モード同期条件を 緩くできると考えた.また,利得媒質中のフルエンス が 38.6 mJ/cm<sup>2</sup> は,SESAM の可飽和フルエンスは 40  $\mu$ J/cm<sup>2</sup> に対して非常に高くなっている.CW モー ド同期条件も満たすため,SESAM 前の集光レンズを 最適化したが,これにより,in-phase モード及びほか の高次モードのフルエンスが SESAM の飽和フルエ ンスを大幅に上回ってしまうことが分かった.以上の ことから非線形が支配される共振器を作製し CW モ ード同期条件を緩くし, in-phase モードのフルエン スを小さくすることで, in-phase モードの選択励振 と CW モード同期の同時実現が可能であると考えて いる.

5 まとめと今後の展望

まず全正常分散型発振器を作製し, CW モード同 期を達成した. 6.1 W 励起時出力は 0.47 W であっ た. 共振器長に応じた繰り返し周波数 34.4 MHz が得られ, パルスエネルギーは 13.8 nJ であった. しかし, in-phase モードの選択励振は確認できな かった. 次に発振器内に分散補償素子を挿入した. CW モード同期発振を確認したが in-phase モード の選択励振は確認できなかった.

回折格子対間の距離を最適化しストレッチドパ ルス状態にし, in-phase モード選択励振させるた めにより飽和フルエンスの高い SESAM に置き換 えることが今後の課題となる.

## 参考文献

[1] L. Michaille et al, "Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area," Opt. Lett, **30**, No. 13, p. 1668, (2005).

[2] 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).

[3] 文全営, "Yb 添加マルチコアファイバー増幅の 研究",電気通信大学大学院,修士論文(2020).

[4] R. Paschotta, M. Moser, U. Keller, and C. Ho, "Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking," J. Opt. Soc. Am. B.16, No. 1, p. 46–56, (1999).

[5] Frank W. Wise, Andy Chong, and William H. Renninger. "High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion" Laser & Photon. Rev. **2**, No. 1–2, 58– 73 (2008).