

可飽和吸収体を用いた Q スイッチ位相同期マルチコアファイバーレーザー

白川研究室 久保内 照雄

1 はじめに

ファイバーレーザーは導波路構造により空間モードを制御できるため高いビーム品質を有する。また、高冷却性、優れた可搬性、メンテナンスフリーなど多くの利点を有する。特に 1990 年代後半からの高出力化の発展はめざましく、高平均出力レーザー分野においては、他のレーザーよりも勢いが有る。現在シングルモード連続発振(CW)出力で 10 kW の出力が報告され、既に製品化されている。しかし、ファイバーレーザーは誘導ラマン散乱などの非線形効果により出力の上限が決定される。この問題を解決する 1 つの方法として、同一ファイバー内に複数のコアを配置した Yb 添加の MCF を用いる方法がある。ただし、コア数を増やしたところで輝度をスケールアップすることはできない。輝度をスケールアップするためには、コアを励振するレーザーの位相を合わせて重ね合わせるコヒーレントビーム結合(CBC)する必要がある。今回我々が用いた MCF はフォトニック結晶構造を有する MCPCF である。MCPCF では、それぞれのコアは固有モードを励振し、この固有モードがエバネッセント結合することによりスーパーモードを形成する。MCPCF を励振するスーパーモードの中で in-phase モードは、遠視野で単一ピークを持つことにより高いビーム品質を有し、強度をコア数分スケールアップできるスーパーモードであり、その選択が CBC に重要になる。そして、空孔径と空孔間隔を調整することによりシングルモード伝搬可能な大きなコアを設計できる。これによりレーザーの大モード面積化(LMA)を行うことも可能である。

この研究では、6 コアの MCPCF を使い、可飽

和吸収体を用いて受動 Q スイッチと in-phase モードの選択を同時に行った。

2 原理

2.1 マルチコアファイバー

マルチコアファイバー(MCF)は同一ファイバー内に複数のコアを配置したものである。MCF は、すべてのコアが共通の環境下におかれているため位相温度揺らぎに強く、隣り合うコアが近接していることにより各コアがエバネッセント光によって結合している。このことにより、MCF はスーパーモードの励振が可能である。スーパーモードはそれぞれのコアを伝搬するコアモードの線形結合から形成されており、これらのコア電界のどの 2 つをとっても、その間の相対位相差は常に変わらない。また、全コア共通の伝搬定数で伝搬する[2]。

図 1 に近視野での 6 コアの MCF のスーパーモードの電界分布の計算結果を、図 2 に遠視野での強度分布の計算結果を乗せる。

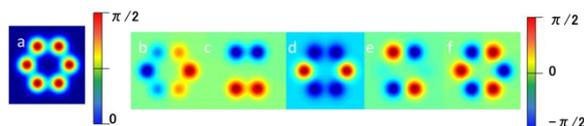


図 1. 近視野での電界分布

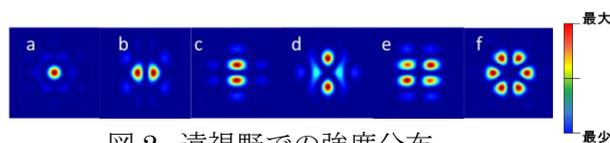


図 2. 遠視野での強度分布

図 1、図 2 の a は in-phase モードとよばれ、図 2 からわかるように遠視野で唯一 6 個のスーパーモードの中で単峰ピークを持つモードである。このことから in-phase モードは位相同期シパワー・輝度の両方をコア数分スケールアップする際に重要である。このため MCF では in-phase モードを選択する必要がある。

今回私たちが用いた 6 コアの Yb 添加のマルチコアフォトニック結晶ファイバー(MCPCF)の端面図を図 3 に、パラメータを表 1 に示す。

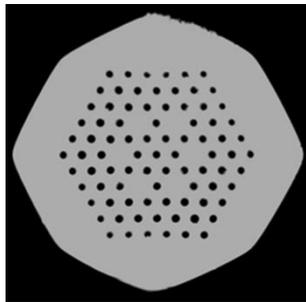


図 3. 6 コアの MCPCF 端面図

表 1. 6 コアの MCPCF のパラメータ

空孔間隔 Λ	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	Yb 添加濃度	d/Λ
180 μm	1300ppmwt	0.49

図 3 での小さな黒丸は空気の穴(空孔)であり、この空孔径と間隔を調整することによりコア径が 20.7 μm と大きくてもシングルモード伝搬条件を満たしている。

2.2 可飽和吸収体

可飽和吸収体とは、強度が低い光に対しては吸収体として働き損失を与える。しかし、強度が高い光に対しては吸収体が飽和し損失がなくなる。この性質を持っているので、可飽和吸収体は共振器内の強いピーク強度の光のみを伝搬するようになる。可飽和吸収体の緩和時間が、共振器内を光が往復する時間に比べ長い場合は Q 値が変化する。このため、可飽和吸収体は Q 値変調器として働く。また、スーパーモードの中でも in-phase モードのみが遠方で単峰の高い強度を持つことから、in-phase モードを他のモードから選択することができ、モード選択器としての役割をもつ。このよ

うな特性により、可飽和吸収体はモード選択器と Q 値変調器の働きを持つ。

今回の実験では可飽和吸収体としてクロム添加イットリウム・アルミニウム・ガーネット $\text{Cr}^{4+} : \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$)を用いた。

2.3 ストレール比

今回私たちは観測したビーム形状がどれほど in-phase モードを選択できているかの評価方法として、ストレール比を使用した。ストレール比は、規格化した in-phase モードの理論値のビーム形状の最大値と、実験結果のビーム形状の最大値の比で定義した(1)。これは、6つのスーパーモードの中で中心にピークが存在するのは in-phase モードのみであることから、ビームの中心の値を読み取ることで in-phase モードの占有率を評価できる。

$$S = \frac{\text{実測値の規格化したビーム形状の最大値}}{\text{理論値の規格化した in-phase モードのビーム形状の最大値}}$$

$$= \frac{I_{\text{max}} / \iint I(x,y) dx dy}{I_{\text{Max}}^{\text{in-phase}} / \iint I^{\text{in-phase}}(x,y) dx dy} \quad \text{---(1)}$$

3 位相同期 Q スイッチパルスレーザー

3.1 実験装置

図 4 に装置の概念図を示す。発振波長 975 nm のファイバー結合半導体レーザーを用い、MCPCF を励起した。MCPCF の入射側にダイクロミックミラー(DM1)を近接接合し、出射側は 8 度研磨しフレネル反射を抑えた。f=50 mm レンズ(L3)によるフーリエ変換により MCPCF からの出射光の遠視野像を形成した。その遠視野像を 2 つのレンズ(L4,L5)から成る縮小光学系を用いて像転送し、Cr:YAG 上で適度な吸収飽和をもつように遠視野像のビーム径を調整した。出力透過鏡(OC)は Cr:YAG と近接接合して配置し、DM1 と共振器を構成した。L5 の焦点距離を変えることで Cr:YAG 上のビーム径を変更していき in-phase モ

ードがよく選択励振される条件を探した。そして、出力・遠視野像・パルス波形を測定した。

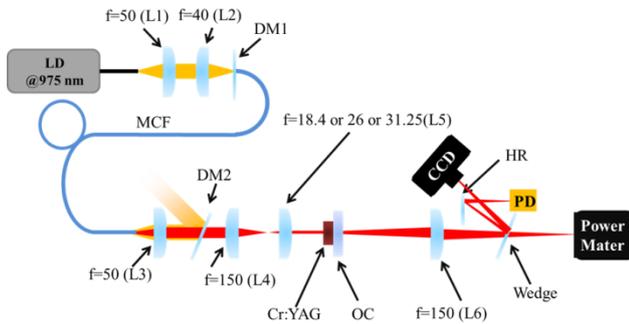


図 4. モード選択実験装置概念図

3.2 実験結果

L5 のレンズを $f=18.4 \text{ mm}$ と $f=26 \text{ mm}$ と $f=31.25 \text{ mm}$ の 3 通りを試した。中でもより良いストレーン比が観測された $f=31.25 \text{ mm}$ のビーム形状、パルス列は図 5、図 6 のようになった。図 5 の左側は緩和発振時のビーム形状である(ストレーン比 0.52)。中心付近以外に大きなピークを複数持つため、モード選択がよく行われていないことがわかる。図 5 右側の Q スイッチ発振時では中心以外のピークが小さくなっており(ストレーン比 0.81)、モード選択がよく行われていることがわかる。図 6 の左のパルス列はレーザー発振し始め付近のパルス列である。この図から分るように、レーザー発振はじめは Q スイッチがかかっておらず緩和発振である。そして、図 6、の右のパルス列はストレーン比が一番良いときのパルス列である。この図から分るように Q スイッチ発振を行っている。

表 2、図 7、図 8、図 9 は励起出力に対する各数値をまとめたものである。ストレーン比は、レーザー発振を始めたばかりは先に述べたように Q スイッチがかかっておらず緩和発振が混ざっている時は低い、Q スイッチがかかると緩和発振が除かれモード選択が優勢に行われているためストレーン比は向上する。しかし、励起出力を上げていくと他のモードも可飽和吸収体の飽和フルーエン

スを超えモード選択できなくなり、また Cr:YAG の熱レンズ効果により共振器内でモードミキシングが起きるためストレーン比は悪化していく。図 8、図 9 より励起出力を上げていくとパルス幅は短くなり尖頭出力は上昇した。これは Q スイッチ発振を行っているためパルスの立ち上がりが早くなりパルス幅が狭くなる。そして 1 パルスのエネルギーは変化しないためパルス幅が狭くなり、尖頭出力が大きくなったからだ。ビーム径が大きくなるにつれ強度が低くなるので飽和フルーエンスを超えるのに必要な励起出力が大きくなると考えた。そのため、 $f=31.25 \text{ mm}$ の時最高ストレーン比を達成する点がより高励起出力時になると考え実験を行ったが、結果が一番低励起出力時に本研究で一番よいストレーン比 0.81 を達成した。これはこの実験系がアライメントの精度に敏感なためアライメントがよくなりより低励起時に最大ストレーン比を達成したと考えた。

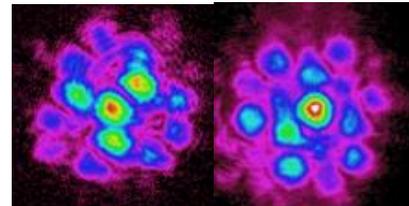


図 5. 3.01 W 励起時(緩和発振)(左)と 5.73 W 励起時(Q スイッチ発振)(右)のビーム形状

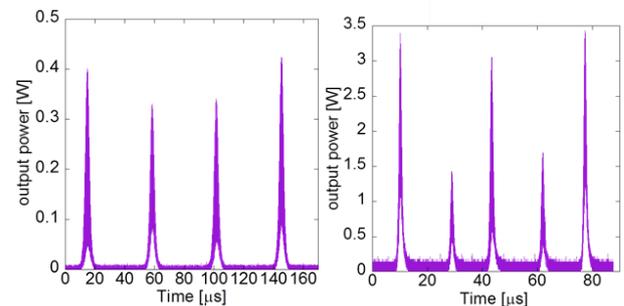


図 6. 3.01 W 励起時(緩和発振)(左)と 5.73 W 励起時(Q スイッチ発振)(右)のパルス列

表 2.スロープ効率と閾値

L5(mm)	スロープ効 率	レーザー 閾値	Qスイッ チ閾値
31.25	21%	4.6W	5.73 W
26	19.3	4.0 W	8.09 W
18.4	18.%	4.9 W	8.09 W

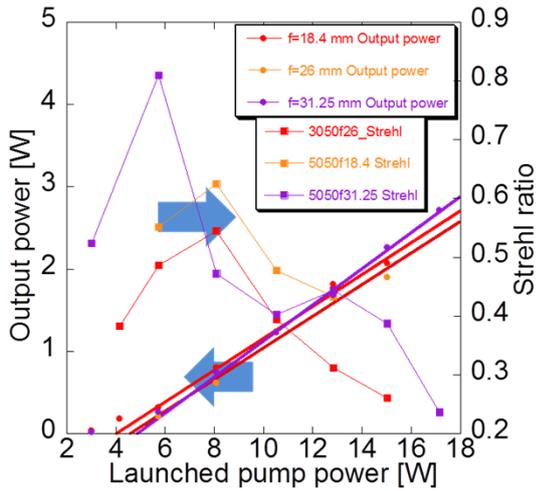


図 7. 平均出力とストレール比

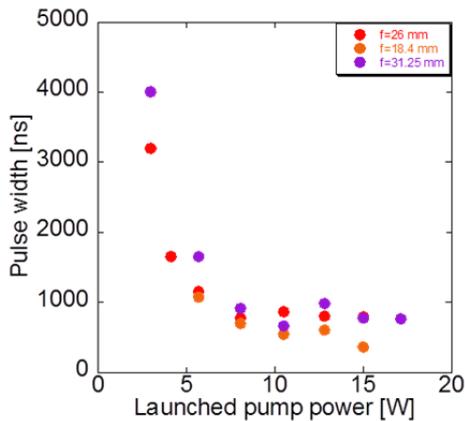


図 8. 励起出力に対するパルス幅

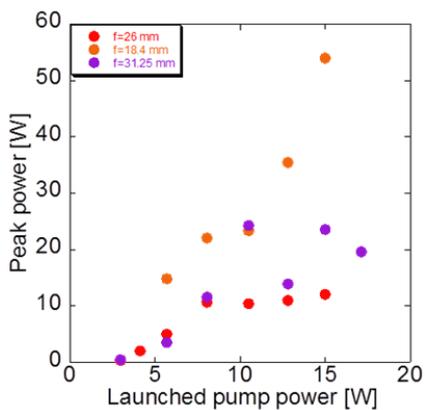


図 9. 励起出力に対する尖頭出力

4 まとめと今後の展望

今回、可飽和吸収体を用いた受動Qスイッチ位相同期マルチコアファイバーレーザーの研究を行った。そして、6 コアの MCPCF を使いQ値変調器とモード選択器として可飽和吸収体の Cr:YAG を用いて、スーパーモードの選択励振と受動Qスイッチパルス発振を同時に行った。Cr:YAG の初期透過率 50%、 $f=31.25$ の組み合わせの時、励起出力 5.73 W でQスイッチ発振を行い、本研究最高のストレール比 0.81 を実証した。しかし、励起パワーを増加させると、in-phase モード以外の高次モードが出力されストレール比が低下してしまった。また、アライメントによる依存度が大きいと分かった。

これからは、さらなる Cr:YAG 上のビーム径の最適化や、図 10 のように光学素子を減らした以下のような実験系で高出力でより良いストレール比を目指したい。

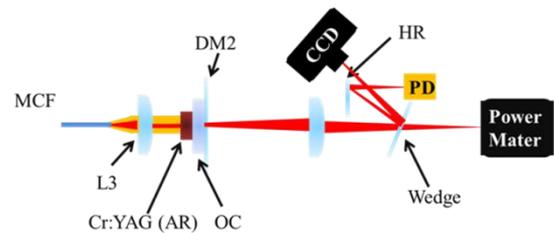


図 10. 今後の実験系

4 参考文献

- [1] 白川 晃, 電学論 C, 124, 7, 1367-1374, 2004
- [2] A.Yariv, “光エレクトロニクス基礎編” 原書 5 版, 丸善, 2000.