

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

先進理工学専攻 白川 晃 研究室 山田 英典

1. 序論

ファイバーレーザーは、高ビーム品質・高冷却性・高効率と様々な利点がある。これにより、高出力化が実現されており様々な分野で利用されている。しかし、一本のファイバーレーザーの高出力・高エネルギー化には、誘導ラマン散乱・誘導ブリルアン散乱といった非線形現象、ファイバーの破壊 自己収束効果等の様々な問題がある。この中の、非線形現象ファイバーの破壊については、コアを大モード面積にすることでその閾値を高め抑制をすることができるが、自己収束効果は大モード化では抑制できない。これらすべての限界の閾値を高めるには、一本でなく複数のレーザーをコヒーレントに重ねるコヒーレントビーム結合(CBC)が有効である。

本論文では、Yb添加マルチコアフォトニック結晶ファイバー(MC-PCF)でのCBCについて報告する。MC-PCFは、単一のファイバーに周期的空孔構造によって、コアとクラッドを持ち、複数のコアを有する、アレイを構築したファイバーである。本研究では、第一クラッド径 $180\ \mu\text{m}$ 、空孔サイズ $6.59\ \mu\text{m}$ 、空孔間隔 $13.5\ \mu\text{m}$ 、空孔の充填率 0.488 のフォトニック結晶構造(準シングルモード条件)を持ち、Yb添加コアを $27\ \mu\text{m}$ の間隔で等間隔に6個配列したMC-PCFを用いレーザー発振を行った。MC-PCFはパワー限界、エネルギー限界がコア数、コア径でスケールリングでき、高出力、高エネルギー化が可能なファイバーである。また、外乱に対し各コアへの相対変化が少ないため堅牢であり、

コアモード間のエバネッセント結合により位相同期が維持できCBCに適している(Fig.1)。

マルチコアファイバーは、コア同士を隣接させることでエバネッセント結合が起こり、複数の固有モード(スーパーモード)が存在するため、位相同期出力を得ることができる。最低次モード(in-phaseモード)は、複数あるモードの中で遠視野に1つの強いピークを持つCBCを達成するモードである。そこで本研究ではTalbot共振器を用いたエンドシール法と可飽和吸収体を用いたモード選択法を用いることで、すべてのコア間の位相差が0であるin-phaseモードを選択励振させることを目的とした。

Talbot共振器とは回折および干渉により、形成される自己イメージで位相同期をかける共振器のことで、モードに損失を与える事によって in-phase を選択する事ができる。

従来方法として自由空間でモード選択を行っていたが、本研究では、空孔をつぶしたエンドシール領域で行う事によって、共振器を一体化させる。これにより、回折損失を失くし、環境変化に強くする。

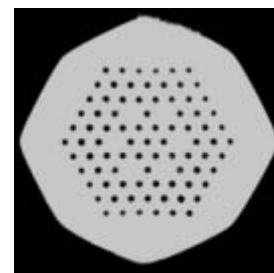


Fig.1 MC-PCF の断面写真

2. 原理

2.1 スーパーモード

N 個のコアを有する MCF の全電界 $\mathbf{E}(x,y,z)$ は、
m 番目のコアのモード振幅 $A_m(x,y)$ 、伝搬定数 β_m
とすると以下のように書ける。

$$E(z) \equiv \begin{pmatrix} E_1(z) \\ E_2(z) \\ \vdots \\ E_N(z) \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} A_1 \exp(-i\beta_1 z) \\ A_2 \exp(-i\beta_2 z) \\ \vdots \\ A_N \exp(-i\beta_N z) \end{pmatrix} \quad (1)$$

コア同士が非常に隣接する場合、隣接コア間でエ
バネッセント結合が起こる。m 番目のコアに隣接
するコアを p とすると、コア間の結合の強さを示
す結合定数 κ_{mp} は、

$$\kappa_{mp} = \frac{k^2}{\beta_m + \beta_p} \iint_{-\infty}^{\infty} (n^2 - n_p^2) A_m^* A_p d \quad (2)$$

と表す事ができる。k:空気中での波数 n:屈折率分
布 n_p :コア p のみの屈折率分布:コア p のみの屈折
率分布である。

各コアモードが隣接導波路のみと結合すると仮定
すると、結合モード方程式により伝搬モードは次
式のように表せる。

$$\frac{dE_m}{dz} = -i\beta_m A_m e^{-i\beta_m z} - i \sum_n \kappa_{mn} A_n e^{-i\beta_n z} \quad (3)$$

コア径、コア間隔が等しいと仮定すると、

$$\beta_m = \beta \quad \kappa_{mn} = \kappa$$

結合モード方程式をベクトル表記すると

$$\frac{d\mathbf{E}}{dz} = \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{E}$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = \begin{pmatrix} -i\beta & -i\kappa & \cdots & 0 \\ -i\kappa & -i\beta & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -i\beta \end{pmatrix} \quad (4)$$

導波するスーパーモードは伝搬方向に伝搬する以
外は z に依存しないので、

$$\frac{d\mathbf{E}}{dz} = -i\gamma\mathbf{E} \quad (5)$$

$$(\tilde{\mathbf{C}} + i\gamma\tilde{\mathbf{I}})\mathbf{E} = 0 \quad (6)$$

をとき、固有値、固有ベクトルを解くことでスー
パーモードを計算した。以上(1)~(6)よりコア数、
ビーム半径、各コアの電界分布を定義することで
スーパーモードを算出できる。但し、本研究で用
いた MC-PCF はフォトニック結晶構造を持つため、
市販ソフトの FIMMWAVE を使用し、有限要素法
によりスーパーモードの電界分布を計算した
(Fig.2)。位置 z におけるスーパーモードの電解分布
は以下のように書けるので、遠視野におけるビー
ム広がり求められる。

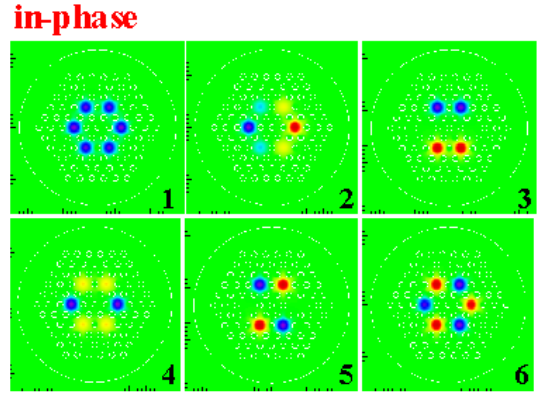


Fig.2 近視野におけるスーパーモードの電界分布

$$E^\gamma(r, z) = \sum_m E_m^\gamma \exp\left(-\frac{r^2}{w(z)^2}\right) e^{-i\varphi(r, z)} \quad (7)$$

$$\varphi(r, z) = \gamma z - \arctan \frac{z}{z_R} + \frac{kr^2}{2R(z)} \quad (8)$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

(9)

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (10)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2 \right] \quad (11)$$

z_R はレイリー長、 $w(z)$ は位置 z におけるビーム半径、

$R(z)$ は波面の曲率半径である。遠視野像測定した $z=40$ mm の地点での強度分布を計算した。

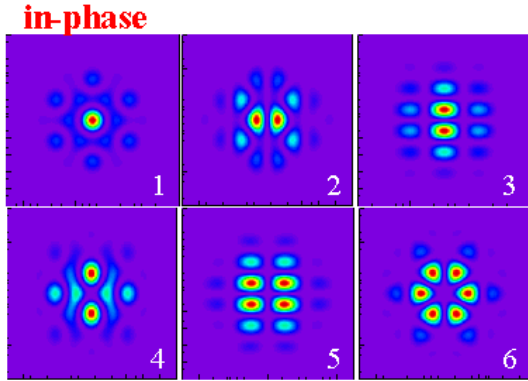


Fig.3 遠視野におけるスーパーモードの強度分布
この遠視野のから、in-phase モードのみが高輝度の CBC を達成している。in-phase モードのビーム広がり角を計算すると Fig.3 のようになった。遠視野における in-phase モードのビーム広がり角 θ を強度の $1/e^2$ の地点で比較すると、in-phase モードは $\theta = 1.25$ deg となった。

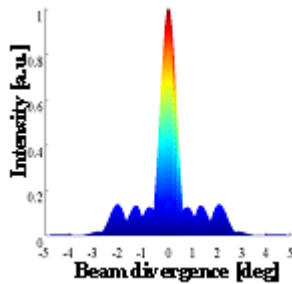


Fig.4 遠視野におけるビームプロファイルコヒーレント時 (in-phase モード)

MCF のビーム品質評価方法は、遠視野におけるビーム広がり角を評価するのが一般的である。よって、ピーク値周辺である 1.5 度の範囲の中に全体の何%の出力があるかで評価をした。中心ローブ比 η_c は以下のように決めた。

$$\eta_c = \frac{\text{central lobe power}}{\text{Total power}} \quad (12)$$

CBC によってできる遠視野のなかで中心にパワーを持つのは in-phase モードのみなので、理想的な in-phase モードが励振されていれば中心ローブ比は高くなる。

2.2 Talbot 共振器

周期的に配列されたレーザーアレイは伝搬に伴い、回折、干渉によりある距離ごとに自己イメージングが形成される。このような現象を Talbot 効果といい、その周期を示す Talbot 距離 Z_T は、アレイ間隔 d 、伝搬空間中の屈折率 n とすると以下のように書ける。

$$Z_T = \frac{2nd^2}{\lambda} \quad (13)$$

Talbot 共振器は、ミラー等で共振器長を Talbot 距離の 1/2 あるいは 1/4 の整数倍に選択することで、最低次モード、あるいは最高次モードを選択的に位相同期させることができる外部共振器である。今回は in-phase モード以外のモードに損失差を与える事によって in-phase モードを選択している。

従来の方法として自由空間で行っていたが、本研究では、空孔をつぶしたエンドシール領域で行う事によって、共振器を一体化した。これによる利点は、回折損失を失くせる。モノリシックにしたため環境変化に強いということが挙げられる。エンドシール内での Talbot 共振器長は自由空間 Talbot 共振器とは異なるため、各スーパーモードの再結合効率を求めた。共振器長 z 、ミラーで折り返して伝搬した時のモード j の振幅再結合効率 η_{jj} とし下式より算出した

$$\eta_{jj} = \frac{\left| \iint E_j(x, y, 0) E_j^*(x, y, 2z) dx dy \right|}{\left| \iint E_j(x, y, 0) E_j^*(x, y, 0) dx dy \right|} \quad (14)$$

自由空間 Talbot 共振器に比べ、シールファイバー中ではすべてのモードが全反射条件を満たすため、再結合効率は一様に増加した (Fig.5)。シール長によりスーパーモード間に損失差を与えることは可能で、特にシール長 3000 μm ~ 3500 μm の位置では in-phase モードが優先的に再結合することが分かる (Fig.6)。Fig.6 の黒線が in-phase モードの再結合効率を示したもので、その他の線が高次モードである。

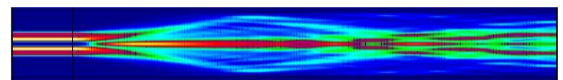


Fig.5 エンドシール共振器側面の光伝搬

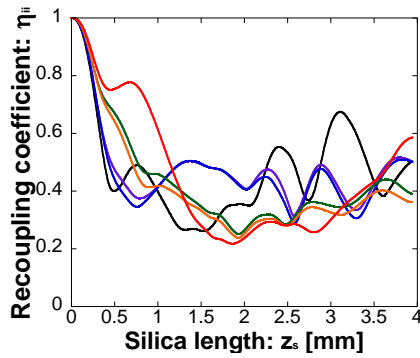


Fig.6 エンドシール長による再結合効率依存性

2.3 可飽和吸収体を用いたモード選択法

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受動的な Q 値の変調器として働く。MC-PCF は各スーパーモードの遠視野の強度分布が異なっているために、可飽和吸収体を用いることで各モードの透過率が変化する(Fig.7)。可飽和吸収体をパルスが通過したあとの透過率を、初期透過率 30% で計算した(Fig.8)。横軸の値は可飽和吸収体の飽和強度に対して、in-phase モードの最大ピークの強度となっている。このように in-phase モードと高次モードでの透過率に差があることがわかる。よってより透過率の高い in-phase モードが励振されやすくなる。

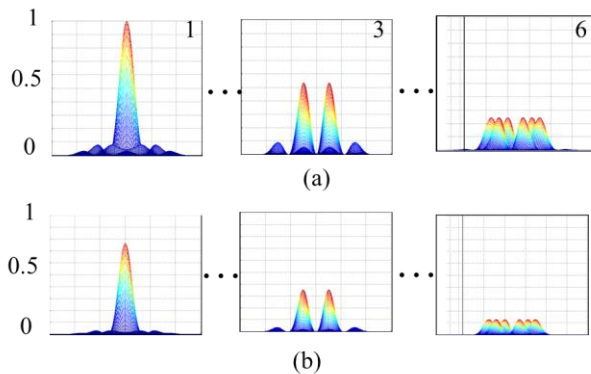


Fig.7 可飽和吸収体を透過後の強度変化

(a) ファイバー出射後の強度分布

(b) 可飽和吸収体透過後の強度分布

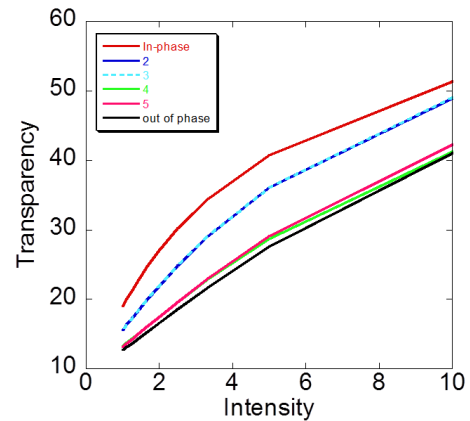


Fig.8 可飽和吸収体の透過率の強度依存性

3. 実験

3.1 全ファイバー

位相同期 MC-PCF レーザー (連続発振)

波長 975 nm のファイバー結合レーザーダイオード(LD)を用いてファイバー長 3.7 m の MC-PCF をクラッド励起した。励起側の端面を劈開し、反対側にエンドシール共振器を構築し、ファイバー端面のフレネル反射によってレーザー発振を行った。エンドシール側の出力とビームプロファイルの測定を行った。in-phase モードを自己イメージング条件で再結合できるシール長 3.1mm 付近まで研磨し、共振器長を最適化した(Fig.9)。

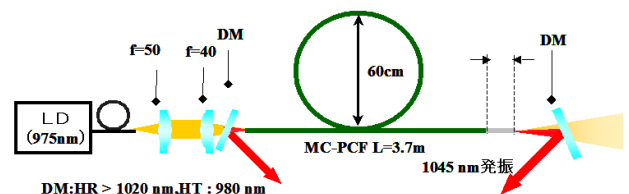


Fig.9 エンドシール法の実験配置図

CCD によって端面から 20 cm 離れたところでビームプロファイルを取った所 Fig.10 の様にピークが一つで中心ローブ比の高いビームプロファイルが取れた。上から、励起パワーが 5.76 W、10.9 W、15.6 W となっている。どこの励起パワーにおいても中心ローブ比が高く維持しており、in-phase モードを優勢に選択できているといえる。スロープ効率 79.8 %、最大出力 10.1 W の高効率を得る事ができた。

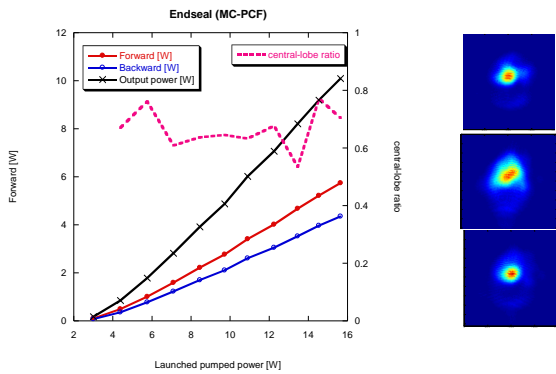


Fig.10 連続発振の出力特性とビーム形状

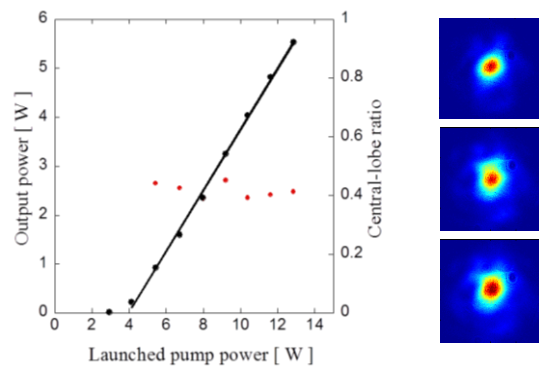


Fig.12 パルス発振の出力特性とビーム形状

3.2 エンドシール法による能動

Q スイッチ位相同期 MC-PCF レーザー

連続発振時に最適化したエンドシール共振器を使用した。パルス化にはポッケルスセルを使って Q スイッチすることによって行なった。波長 975 nm のファイバー結合 LD を用いてファイバー長 3.7 m の MC-PCF をクラッド励起した。励起側にエンドシール共振器を構築し、エンドシール側のフレネル反射とダイクロミックミラーとの反射でレーザー発振を行った。その際ファイバーの反対側の端面を劈開し、8 度に研磨する事で複合共振器を組まないようにした。ポッケルスセルに電圧をかけて偏向を $\lambda/4$ 回す時に共振器がくまれるようにした(Fig.11)。

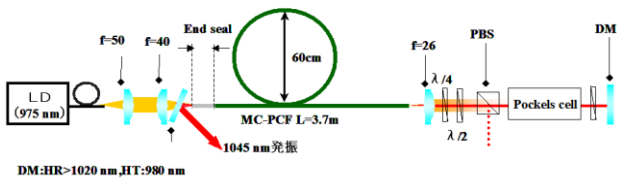


Fig.11 エンドシール法 Q スイッチパルス発振

エンドシール側の出力とビームプロファイルの測定を行った。CCD でビームプロファイルを取った所 Fig.12 の様にピークが一つで中心ローブ比の高いビームプロファイルが取れた。上から、励起パワーが 5.76 W、10.9 W、15.6 W となっている。パルス発振時においても連続発振の時と同様に、in-phase モードを優勢に選択できているといえる。

スロープ効率 62%、繰り返し周波数 20 kHz、パルス幅約 100 ns、尖頭出力 5.5 kW でパルスエネルギー 276 μJ のパルス動作を得た(Fig.12,13)。

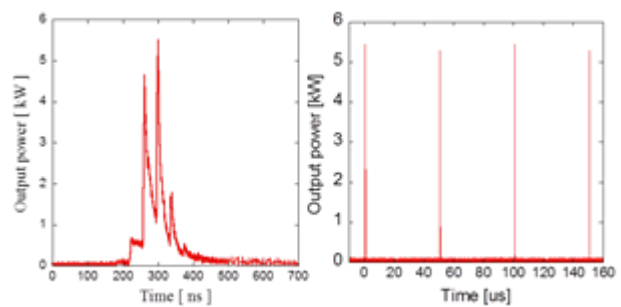


Fig.13 パルス発振の繰り返し周波数とパルス

さらなる高出力化を目指すために、ファイバー長を短くすることで共振器長を短くした。共振器長を短くすることで、パルス幅が狭くなりピークパワーをより高くした。ファイバー長を 2.0 m にして同様の実験を行った。in-phase モードを優勢に選択できているといえる。

スロープ効率 52%、繰り返し周波数 25 kHz、パルス幅約 70 ns、尖頭出力 7.4 kW でパルスエネルギー 227 μJ のパルス動作を得た(Fig.14)。ここでスロープ効率が下がったのは、ファイバー長を短くしたことによる利得が減ったためである。

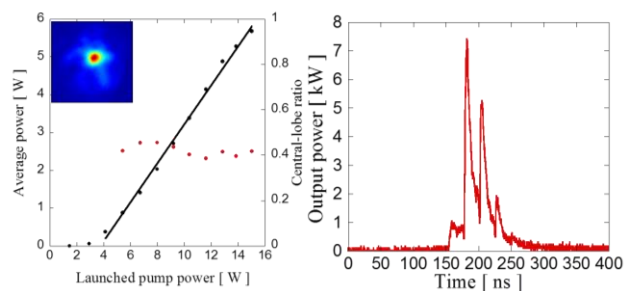


Fig.14 出力特性 (ファイバー長 2.0 m)

3.3 可飽和吸収体モード選択法を用いた受動

Q スイッチ位相同期 MC-PCF レーザー

可飽和吸収体を用いることでモード選択受動的 Q スイッチパルスレーザーを構築した。Fig.15 はその実験図であり、ファイバーの励起側端面に HR ミラーを近接接合し、OC と共振器を組むようにした。f=11 mm のレンズを用いてファイバーの光をコリメートした。その遠視野像を f=18.4 mm のレンズを用いて像転送することにより遠視野像を OC に集光するようにしている。2 枚のレンズはファイバーから出た後の遠視野を OC に集光するようにしている。OC の手前側に Cr:YAG を配置し、ここで Q スイッチとモード選択を行う。その際 Cr:YAG の飽和フルエンスを超えることができるように遠視野を約 1/7 に縮小して像転送を行っている。反対側を 8 度に研磨し複合共振器を組まないようにした。励起光源として 975nm のファイバー結合 LD を用い、レーザーの出力光のパルス波形と、CCD で遠視野像を測定した。

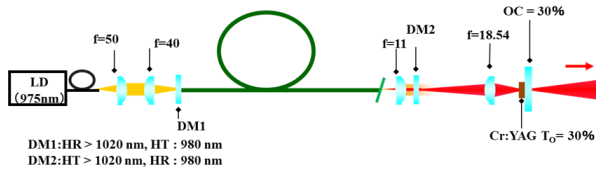


Fig.15 可飽和吸収体モード選択法の実験配置図

結果として、繰り返し周波数 5.9 kHz で、パルスエネルギーが 12.9 μJ のパルス幅約 400 ns、尖頭出力 9.02 W、スロープ効率 6.4% のパルス発振を得た。また、遠視野で中心に 1 つの強いピークを持つ、in-phase モードが選択励振されていることを確認した (Fig.16)。励起パワーを 5.33 W 以上になるとビームプロファイルのピークを複数持つようになった。スーパーモードの高次モードのパワーが飽和パワーを超えたために複数のモード励振したためである。励起パワーが 7.36 W を超えると熱レンズの影響により共振器の状態が悪くなり、出力の効率が悪くなった。しかし、共振器の状態が悪くなったことにより一番利得の高い in-phase モードが再度選択励振されるようになった (Fig.17)。

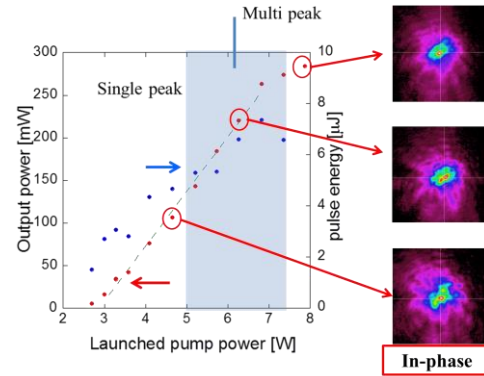


Fig.16 可飽和吸収体モード選択法の実験配置図とビーム形状

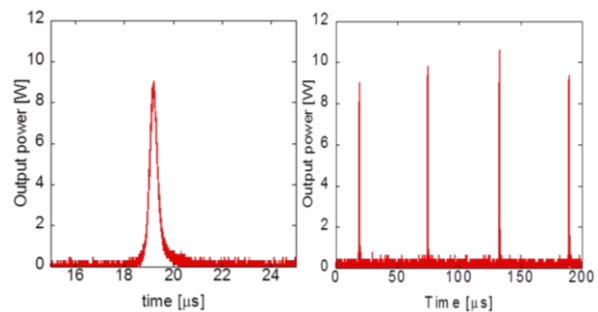


Fig.17 可飽和吸収体モード選択法のパルス波形

4. 結論

本研究では、モード選択法として二つの手法を試みた。エンドシール法では、スロープ効率 52%、繰り返し周波数 25 kHz、パルス幅約 70 ns、尖頭出力 7.4 kW でパルスエネルギー 227 μJ のパルス動作を得た。可飽和吸収体モード選択法では、スロープ効率 6.4%、繰り返し周波数 5.9 kHz、パルス幅約 400 ns、尖頭出力 9.02 W でパルスエネルギー 12.9 μJ のパルス動作を得た。我々は、高出力・高エネルギー化のために CBC を行っているため、高出力時に in-phase モードが選択励振されていることが重要である。よって、可飽和吸収体モード選択法よりも、エンドシール法の方がモード選択法に適している。

5. 展望

今後の課題としては、エンドシール法を用いた能動的 Q スイッチ MC-PCF レーザーのパルス発振時における共振器の最適化、また高尖頭出力化。7 コア MC-PCF で同様の実験を行い、今回のファイバーとの比較をする事で、出力スケールアップをしていく。