

# 全ファイバー位相同期 Yb 添加マルチコアファイバーレーザー

量子・物質工学科 植田研究室 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。よって、更なるファイバーレーザーの高出力化には、一本でなく複数のレーザーをコヒーレントに重ねるアレイ化が研究されている。

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でのコヒーレントビーム結合(CBC)について報告する。

マルチコアファイバー(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(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個配列したマルチコアフォトニック結晶ファイバー(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コヒーレントビーム結合に適している(Fig. 1)。

マルチコアファイバー(MCF)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回折限界光を結ぶことができるモードである。そこで本研究ではTalbot共振器を用い、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。

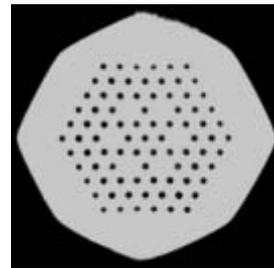


Fig.1 MC-PCF の断面写真

## 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 $\beta_m$ とすると以下のよう

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

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  $\kappa_{mp}$  は、

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

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界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。

**in-phase**

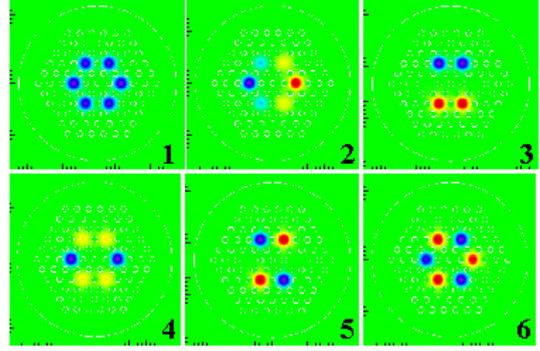


Fig.2 近視野におけるスーパーモードの電界分布

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

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

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (9)$$

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

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

$z_R$  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。

**in-phase**

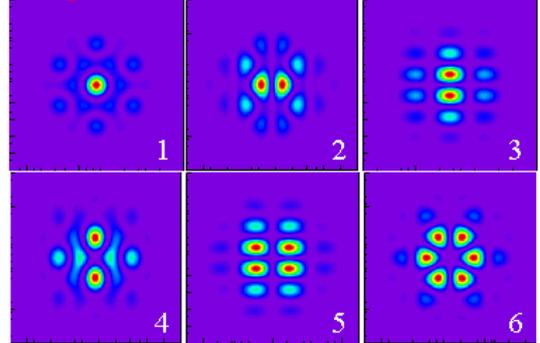


Fig.3 遠視野におけるスーパーモードの強度分布

この遠視野のから、in-phase モードのみが CBC を高ビーム品質にしているといえる。in-phase モードのビーム広がりを計算すると 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  $\theta$  を強度の  $1/e^2$  の地点で比較すると、in-phase モードは  $\theta=1.2$  [deg] となった。

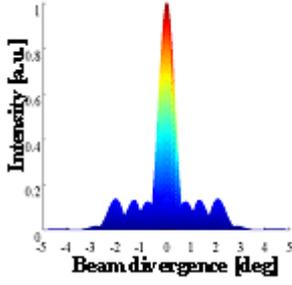


Fig.4 遠視野におけるビームプロファイルコヒーレント時 ( in-phase モード)

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  $\eta_c$

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

この方法により遠視野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け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なっていたが、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。環境変化に強いということが挙げられる。Talbot 共振器長における各スーパーモードの再結合効率を求めするために、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  $\eta_{jj}$  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)。シール長により各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  $\mu\text{m}$  ~ 3500  $\mu\text{m}$  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)。

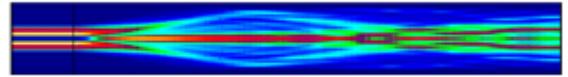


Fig.5 エンドシール共振器側面の光伝搬

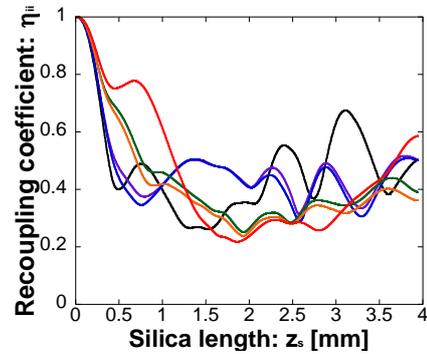


Fig.6 エンドシール共振器長による再結合効率依存性

## 3. 実験

### 3.1 全ファイバー位同期

#### マルチコアフォトニック結晶ファイバー (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.7)。

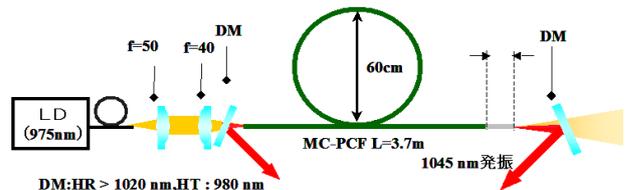


Fig.7 エンドシール共振器の連続発振

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.8 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。

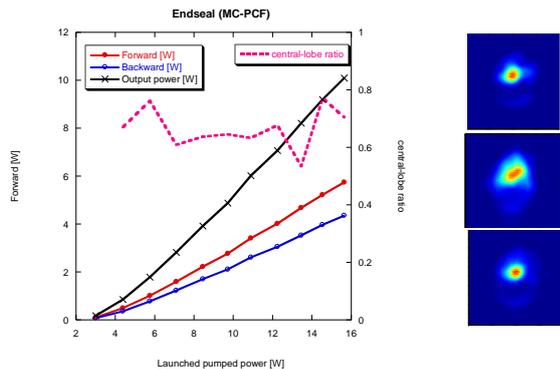


Fig.8 連続発振の出力特性とビームプロファイル

### 3.2 全ファイバー位相同期

#### マルチコアフォトニック結晶ファイバー (パルス発振)

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イ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.9)。

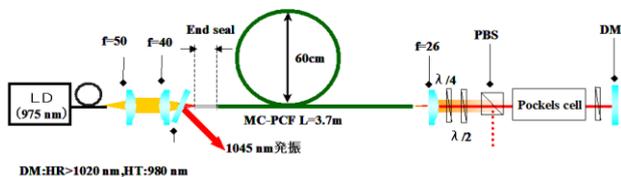


Fig.9 エンドシール共振器のパルス発振

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.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。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。

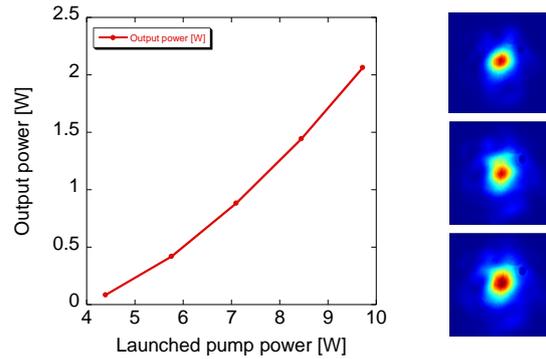


Fig.10 パルス発振の出力特性とビームプロファイル  
繰り返し周波数 10 kHz、パルス幅約 100 ns、先頭出力 3.21 kW でのパルス動作を得た(Fig.11)。

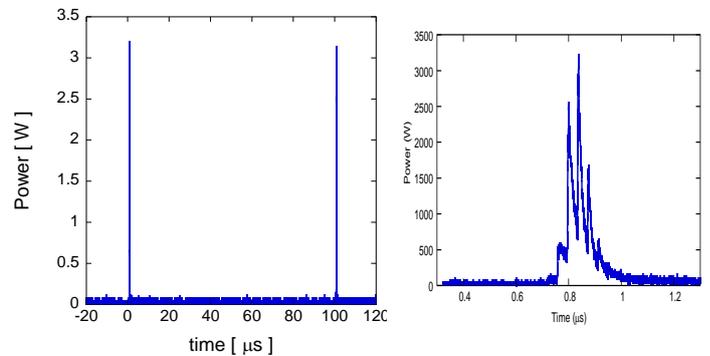


Fig.11 パルス発振の繰り返し周波数とパルス

## 4. 結論

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において、エンドシール共振器を構築し、in-phase モードを優勢に選択した。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。また、共振器内にポッケルスセル入れ、Q スイッチによるパルス動作をさせた。その時もまたエンドシール共振器で in-phase モードを優勢に選択した。スロープ効率 37.1%、繰り返し周波数 10 kHz のパルス幅約 100 ns 尖頭出力 3.21 kW を得た。

## 5. 展望

今後の課題としては、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。繰り返し周波数を変更して、最適な繰り返し周波数を見つける。コア数を増やしたファイバーで同様の実験を行い、今回のファイバーとの比較をする。