

マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザーの 選択的モード励振およびモード解析

白川晃研究室 B4 梯 太郎

1. はじめに

ファイバーレーザーは高効率な出力特性、伝播モードの高い制御特性、高ビーム品質特性、高冷却特性、メンテナンスフリー等、複数の優れた特徴を持っているが、高いピークパワーを持つことによる非線形効果の誘起、母材であるシリカガラスの破壊閾値の存在により、動作限界が存在する。本研究室ではYb³⁺添加マルチコアフォトニック結晶ファイバー(MCPCF)を用いて、単一コアのファイバーレーザーの限界を超える高出力・高エネルギー化の研究を行ってきた。

Yb³⁺添加MCPCFはYb³⁺を添加した複数のコアと周期的空孔構造によって、コア内の全反射伝播を実現している。MCPCF レーザーは、コヒーレントビーム結合および、コアの数を増やすことによって高出力・高エネルギー化が可能となる。MCPCF 中の各コアを伝播する光はエバネッセント結合によって、コアの数と同数の固有モード(スーパーモード)を形成する。我々の研究室では動作時のMCPCF レーザーについてストレル比や中心ローブ比を用いて in-phase モードの占有率の評価を行ってきたが、その他のスーパーモードに関する評価は行うことができていなかった。本研究では、動作時のMCPCF レーザーにおいて、各スーパーモードがどれだけの割合で励振しているのかを、本研究室で考案された干渉計を用いた新規のモード解析法によって詳細な解析をすることを目標とした。

2. 6 コア MCPCF

本研究で用いた 6 コアマルチコアフォトニック結晶ファイバー (6 コア MCPCF)の構造パラメータと、断面図を以下の図 1 に示す。

空孔間隔 Λ [μm]	13.5
空孔サイズ d [μm]	6.6
コア径 [μm]	20.7
クラッド径 [μm]	180
Yb 添加濃度 [ppm]	1300
d/Λ	0.49

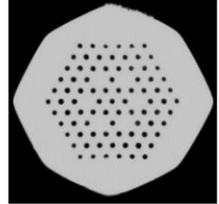


図 1 MCPCF のパラメータ(左)と断面図(右)

6 コア MCPCF の 6 つのコアには Yb³⁺イオンが添加されている。コアの周りに周期的に空孔が配置されている構造によって実行屈折率の制御がされている。この 6 コア MCPCF はシングルモード条件を満たすように設計されている。通常ファイバーは次式のシングルモード条件を満たしている時、コア内で伝搬する光はシングルモードで伝搬する。

$$V = \pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} \quad (V < 2.405) \quad (1)$$

これを PCF に拡張すると次のような条件となる。

$$V_{\text{pcf}} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{\text{silica}}^2 - n_{\text{eff}}^2} \quad (V_{\text{pcf}} < 4.1) \quad (2)$$

通常ファイバーでは波長が短くなるとシングルモード条件を満たせなくなるが、PCF ではクラッド部に空孔が存在するので、クラッドの実効屈折率に波長依存性が存在し、波長が小さくなるにつれて式 (2)の λ と $\sqrt{\quad}$ の値がともに小さくなり一定値に収束する。これにより波長によらずシングルモード条件を満たすことが可能である。

この 6 コア MCPCF はダブルクラッド構造でありなおかつ、第一クラッド層の六角形構造によって、励起光がコアに効率よく入射するようになっているので、高効率な励起が行える [1]。

6 コア MCPCF 中では図 2 のような 6 種類のスーパーモードが励振する。市販の導波路モードソルバーである FIMMWAVE によって計算された。

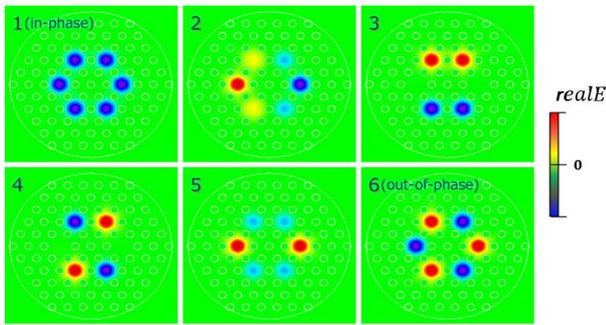


図 2 MCPCF のスーパーモード(近視野電界分布(上)・遠視野強度分布(下))

3. 干渉計を用いたモード解析法

マッハ・ツェンダー干渉計によって、周期的に明暗が現れる干渉縞を観測することができるので、フーリエ変換を用いることによって、干渉縞の持つ空間周波数スペクトルを取り出すことができる。取り出した空間周波数スペクトルは電界強度分布・位相情報を持っているので、この情報を取り出すことによって電界分布と位相を算出することができる。この手法をフーリエ変換法と呼び [2]、本研究ではこの手法を用いてモード解析を行った。

干渉縞はフーリエ変換を行うことによって、3つの分離した空間周波数スペクトルが得られる(図 3)。空間周波数スペクトルの中央部分には雑音や背景光の情報、その両側の2つの部分には干渉縞の情報が含まれる。干渉縞の空間周波数スペクトルのみを取り出し、空間周波数スペクトル上の原点にシフトさせることによって、干渉縞の明暗の間隔の情報である空間キャリア周波数を取り除くことができる。

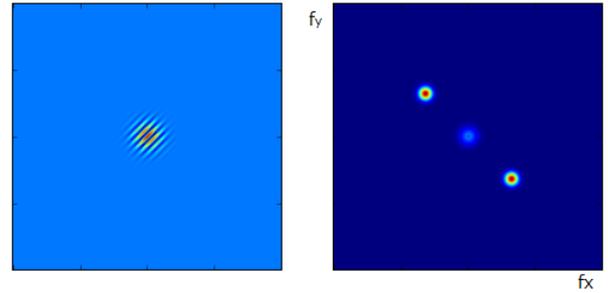


図 3 干渉縞(左)とフーリエ変換によって得られる空間周波数スペクトル(右)

そして逆フーリエ変換を行うことによって、縞のない電界分布の情報を取り出すことができ、電界分布を算出することができる。

得られた電界分布 E から、それぞれのスーパーモードの割合を解析する。MCPCF レーザーの電界分布は全てのスーパーモードの線形結合で表され電界分布 E は次のように表される。

$$E(x, y) = \sum_{n=1}^6 c_n \xi_n(x, y) \quad (3)$$

c_n は n 番目のスーパーモードの振幅、 ξ_n は n 番目のスーパーモードの電界分布を表している。全てのスーパーモードが規格化されているとすると、求めたいスーパーモードの ξ_n との内積を取ることで

$$\iint E(x, y) \cdot \xi_n^*(x, y) dx dy = c_n \quad (4)$$

となり、次のようにスーパーモードの割合を算出することができる。

$$C_n = \frac{|c_n|^2}{|c_1|^2 + |c_2|^2 + \dots + |c_n|^2} \quad (5)$$

4. エンドシール法

モード解析を行うにあたって、解析結果の指標を作るために位相同期法であるエンドシール法によって、特定のスーパーモードの選択励振を行った。これにより解析結果に関する評価をおこなうことができる。エンドシール法とは Talbot 効果を利用した位相同期法である [3]。周期的に配置されたピンホールに、ある程度波面の揃った光が入射されたとすると、ピンホールから出射後の光は

フレネル回折・干渉を繰り返し、出射直後の周期配置に対応した強度分布が、出射面から一定の距離を周期として再形成される自己イメージング現象が起きる。これを Talbot 効果と呼ぶ。Talbot 効果が繰り返される一定の距離のことを Talbot 距離と呼び、Talbot 距離 Z_T は次のように表される。

$$Z_T = m \frac{2nd^2}{\lambda} \quad (6)$$

m は整数、 n は媒質の屈折率、 d はアレイ周期距離である。伝播するモードごとに異なる Talbot 距離をも持ち、この各モードの Talbot 距離の違いを利用したモード選択法のことを Talbot 法と呼ぶ。エンドシール法は Talbot 法におけるミラーによる反射をシリカガラス端面におけるフレネル反射に置き換えたものとなっている(図 4)。

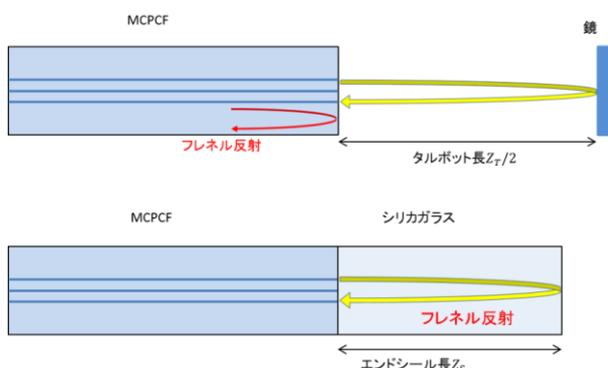


図 4 Talbot 共振器(上)とエンドシール共振器(下)

MCPCF の空孔をセラミックヒーターで溶融融着させることによってエンドキャップ部を作製することにより、融着点におけるフレネル反射をなくすることができる。このエンドキャップ部のことをエンドシール部として取り扱う。Talbot 法と同様に、MCPCF レーザーにおける各スーパーモードの Talbot 距離 Z_T の違いを利用して、特定のスーパーモードのみを選択的に励振させる。エンドシール法における、6 コア MCPCF レーザーが励振する各スーパーモードの再結合係数 η_{ii} は以下の図 5 のようになる。再結合係数 η_{ii} は、FIMMWAVE に搭載されている FIMMPROP によ

って固有モード展開(EME)で計算された

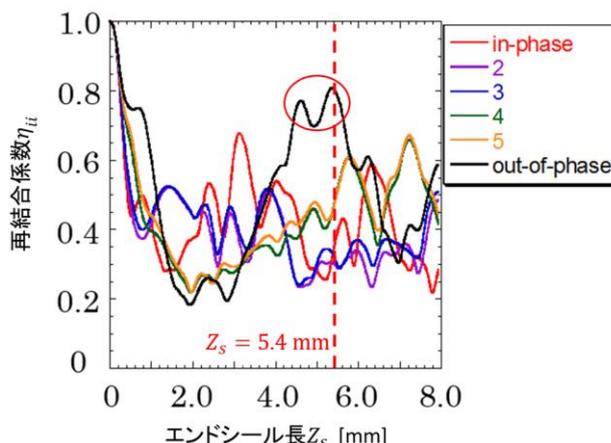


図 5 6 コア MCPCF の再結合係数

モード間で損失差を与えることで選択的モード励振が可能となる。本研究ではエンドシール長を 5.4 mm とすることで、out-of-phase モードの選択励振を行っている。

5. 干渉縞の観測およびモード解析

次のような実験系で干渉縞の観測を行った。

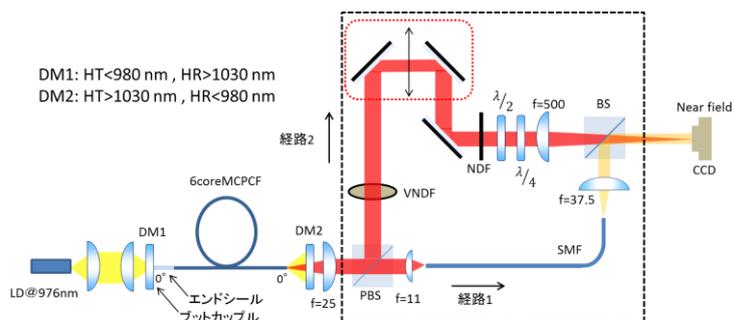


図 6 モード解析に用いた干渉計実験系

MCPCF の励起光源として 976 nm で波長ロックされた LD を用いた。MCPCF は波長 1035 nm~1045 nm の範囲で発振しており、図のようにダイクロイックミラー-1(DM1)が MCPCF の端面にブットカップルされているので、MCPCF レーザーは前方出力のみとなる。またダイクロイックミラー-2 によって干渉計エリア(図の黒点線内部)に励起光が伝搬しないようにしている。経路 1 ではシングルモードファイバーを通した光を、レンズを用いて平面波として CCD に転送している。経路 2 では MCPCF 端面における近視野像の像転

送を行っており、コーナーキューブミラーを図の赤点線内の2つのミラーとして用いることにより、2つのミラーの位置を同時に水平移動させることができる。これによって、経路1と経路2との間の光路長差を調整できる。経路1を伝搬した光と経路2を伝搬した光では強度が大きく異なっていたのでNDフィルター(NDF)によっておおよそ同じ強度に揃え、可変型NDフィルター(VNDF)によって、干渉縞が観測できるようにするための細かい強度調整ができる。ミラーの角度を調整することによって得られる干渉縞の間隔 Λ を変えることができる。経路1と経路2の分岐には変更ビームスプリッター(PBS)を用いており、結合にはビームスプリッター(BS)を用いている。また経路1と経路2で偏光に差が生じており、波長板を用いて偏光を揃えることによってより鮮明度の高い干渉縞の観測を行えるようにしている。

6. 実験結果

次のような干渉縞と解析結果が得られた。

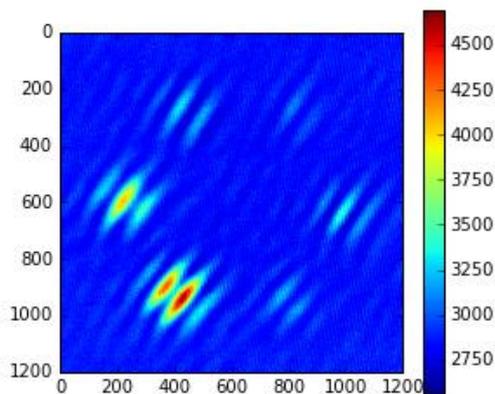


図 7 得られた干渉縞

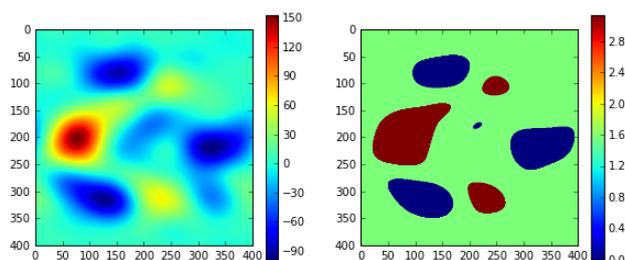


図 8 算出した電界分布(左)、位相情報(右)

各スーパーモードの割合は、

$$\begin{cases} C_1 = 2.693 \times 10^{-2} \\ C_2 = 0.1365 \\ C_3 = 3.168 \times 10^{-4} \\ C_4 = 8.656 \times 10^{-2} \\ C_5 = 2.516 \times 10^{-3} \\ C_6 = 0.7471 \end{cases}$$

となり、out-of-phase モードが約 75%と支配的となっていることが分かった。

7. 結果と今後の展望

動作時の MCPCF レーザーで励振している全スーパーモードの解析が可能なモード解析法として本研究室で考案されたモード解析法によって MCPCF レーザーのモード解析を行った。位相同期法であるエンドシール法によって、out-of-phase モードの選択的モード励振が見込まれる状態の MCPCF についてのモード解析を行った。MCPCF のエンドシール長が 5.4 mm の時のモード解析の結果、out-of-phase モードが約 75%と支配的になっており、エンドシール長の制御による out-of-phase モードの選択励振ができていると判断できる。しかしこの結果については、誤差が多分に含まれていると見込まれ、モード解析法の雑音除去の行程において、干渉縞の情報も一部除去してしまっていることによる誤差の影響の評価および、干渉計の構成による雑音除去の新たな手段を考える必要がある。

参考文献

- [1] 松本道生, “Yb 添加位同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー,” 電気通信大学修士論文, 2010.
- [2] 武田光夫, “フーリエ変換法によるしま画像解析とその応用,” 応用物理 第 62 巻 第 6 号, 1993.
- [3] 佐藤慶吾, “マルチコアファイバーレーザーの位同期法の研究,” 電気通信大学修士論文, 2014.