

マルチモードファイバーレーザーにおける 能動モード同期によるモード選択の研究

白川 晃 研究室

大西 志晶

1 序論

ファイバーレーザーは、表面積が大きいことによる高い冷却性能や、長距離相互作用による高利得性から高平均出力動作に優れている。しかし、尖頭出力に関してはファイバーの耐久性や非線形光学効果により限界が生じる。

本研究室では高尖頭出力ファイバーレーザーを実現するために、結合型マルチコアファイバー(MCF)によるコヒーレントビーム結合の研究が行われている[1]。結合型MCFにはスーパーモードと呼ばれる横モードが存在し、特に in-phase モードは各コアの位相がそろっているため高ビーム品質を期待できる。そのため in-phase mode の選択励振が研究されてきたが、最近任意のモードを自由自在に選択励振する方法として時間領域スーパーモード選択が提案された。実現すれば、ビーム形状の制御などの新しい応用が可能と期待される。しかしMCFではコアから自由空間に出射したビームを全て同じコアに戻す必要がある。これが非常に困難であり、時間領域スーパーモード選択を実証することが困難であった[2]。よって、MCFと比較してカップリングが容易なマルチモードファイバー(MMF)を使用する。MMFは横モードがモードごとに固有の群速度を持つので、時間領域モード選択が可能であり、これを検証することが本研究の目的である。

2 原理

2.1 MMF レーザーの横モード

ステップインデックス円形ファイバーのVパラメーターは次式で表される[3]。

$$V = \frac{k_0 d}{2} (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \\ = \frac{\pi d}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{k_0 d}{2} \sqrt{2\Delta} = \frac{\pi d NA}{\lambda} \quad (1)$$

ただし、 d はコア径、 n_1 はコアの屈折率、 n_2 はクラッドの屈折率、 NA は開口数、 k_0 は波数、 λ は波長である。このVパラメーターの値で閉じ込めモードの数が決定される。LP₀₁モードは、Vパラメーターに関わらず、常に存在する。VがV = 2.405[3]を超えると、LP₁₁モードが現れる。よって、MMFのVパラメーターはV > 2.405である。本研究で使用したYb添加偏波保持ダブルクラッドファイバーは、コア径、19μm、クラッド径、130μm、クラッドの屈折率1.45、コアの屈折率1.4523とした。その時のVパラメーターはV = 4.66であり、励振するモードはLP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₀₂であり、LP₁₁、LP₂₁はそれぞれ2つのモードがあるので合計で6つである。

MMFの横モードはそれぞれモードごとに固有の有効屈折率、群速度を持っている。市販のソフトであるFimmwaveを用いて有限差分法によりMMFの横モードを計算した。図1に使用したMMFの断面図、図2に計算されたMMFの横モードを示す。

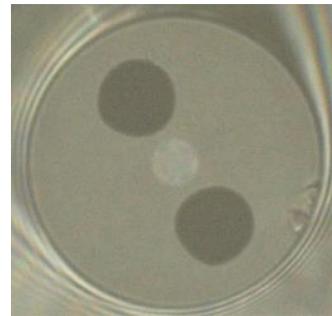


図1 MMFの断面図

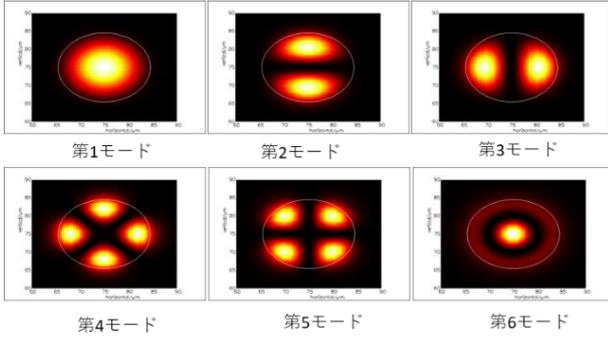


図 2 MMF の横モードの近視野像(計算)

2.2 時間領域モード選択

時間領域モード選択は、MMF の横モードの群速度の違いを利用して行う。MMF の横モードは、高次のモードほど有効屈折率は小さくなる。したがって、モードごとの繰り返し周波数も異なる。

MMF では、モードごとに規格化デチューニング Δ^{mode} が定義でき、次式に示す[4]。

$$\Delta^{mode} = \frac{1}{2\sqrt{2D_f M_s}} \frac{T_d^{mode}}{\tau_a} \quad (2)$$

ただし、 D_f は利得分散、 M_s は変調深さの曲率、 T_d^{mode} は各モードのラウンドトリップタイム、 $\tau_a = \sqrt[4]{\frac{D_f}{M_s}}$ である。

離調が存在する場合、規格化デチューニング Δ^{mode} によってパルス発振の様子が変化する。規格化デチューニング $\Delta^{mode} < 2$ であるモードは、いくつかのモードが発振したマルチパルス状態になると考えられる。規格化デチューニング $\Delta^{mode} > 2$ となる場合、発振するモードは一つだけになるためこのモードのみ励振することができる。これは任意のモードに対して単一励振ができ、モードを選択する方法は変調周期を変更するだけであることを意味する。周波数離調 f_d^n は次式で与えられる。

$$f_d^n = f_M - f_R^n \quad (3)$$

ただし、 f_M は変調周波数、 f_R^n は第 n モードの繰り返し周波数である。 $\Delta^{mode} = \Delta_c = 2$ を満たす周波数離調をクリティカル周波数 f_c と定義する。図 3 に簡単な概念図を示す。

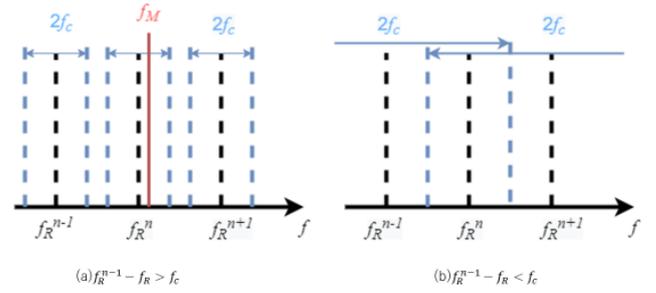


図 3 時間領域モード選択の概念図[1]

第 n モードを選択したい場合、第 n モードの繰り返し周波数 f_R^n からクリティカル周波数 f_c 以内の範囲で変調周波数 f_M の変調を与えればよい。従って、モード選択を行うための条件は次式になる。

$$|f_R^{n+1} - f_R^n| > f_c \quad (n = 1, 2, 3, \dots, 6) \quad (4)$$

3 共振器設計

3.1 バンドパスフィルタ(BPF), 半波長板(HWP)有

使用する Yb 添加ダブルクラッドファイバーは約 2.4m のものを使用した。共振器は図 4 に示すように HR ミラーとファイバー端面によるフレネル反射を用いて構成した。この外部共振器に音響光学変調器(AOM)を設置して損失変調を与えることで能動モード同期を行った。AOM の制御はファンクションジェネレーター(FG)を用いた。FG で発生させた矩形波電圧を、AOM 付属のドライバーによって超音波に変換することで AOM を動作させた。また、この FG を用いることで変調周波数を変化させ、モード選択を試みた。

波長選択により能動モード同期を行いやすくするために BPF、ファイバーの軸に偏光を合わせるために HWP を共振器の中に挿入した。そのときの共振器配置図を図 4 に示す。

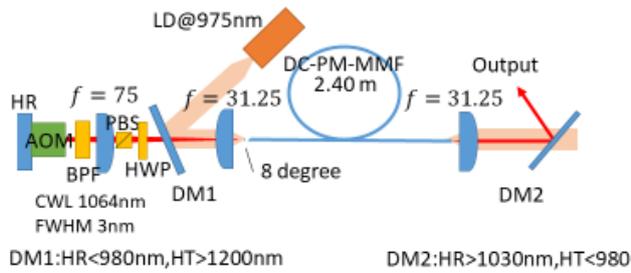


図 4 BPF,HWP 有の共振器配置図

3.2 BPF 無,部分反射鏡(PR)有

先行研究によって、MCF では利得帯域を大きくすること、モード出力結合率を低くすることでモード弁別性が上がることが分かっている [2]。よって、BPF を撤去し、反射率 40% の PR を挿入した。PR は前方出力側のファイバー端面に設置した。

4 モード選択実験

4.1 理論計算

市販ソフト Fimwave で計算されたモードごとの波長に対する有効屈折率 n_{eff} を用いて、群屈折率 n_g 、モード同期時の繰り返し周波数 f_{rep} を下記の式で求めることができる。

$$n_g = n_{eff}(\lambda) + \frac{dn_{eff}}{d\lambda} \quad (5)$$

$$f_{rep} = \frac{c}{2(n_g L + L_{air})} \quad (6)$$

求めたモードごとの波長に対する繰り返し周波数を図 5 に示す。

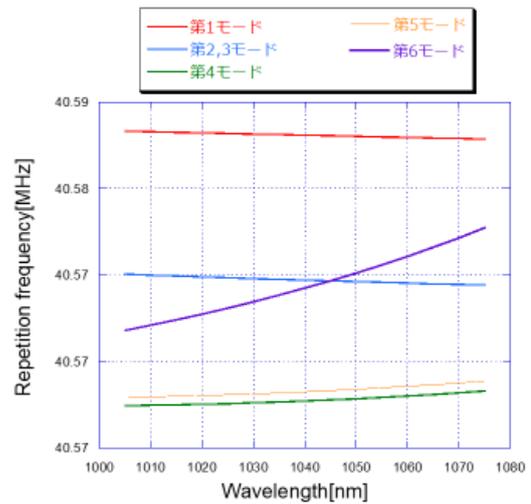


図 5 波長に対する繰り返し周波数

波長 1050nm において繰り返し周波数の最大差は約 15kHz であった。

4.2 BPF,HWP 有

BPF,HWP を挿入した際の変調周波数を変化させたときの近視野像と時間波形の結果を図 6 に示す。

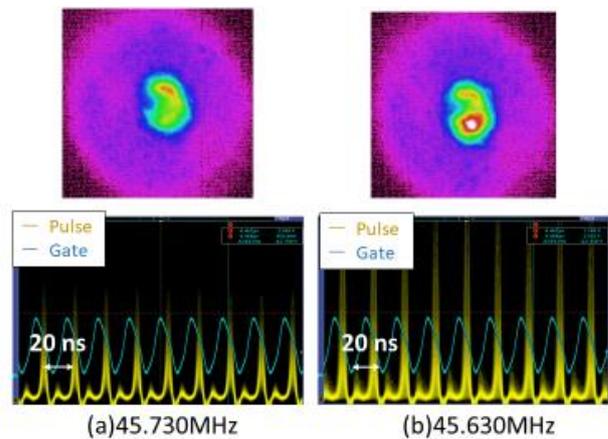


図 6 BPF,HWP 有の近視野像と時間波形

時間波形の結果より、能動モード同期を行うことができた。変調周波数の変化によりモードの変化も確認することができた。しかし、モードの変化は時間的にも変化しており、変調周波数の変化だけによるものではないと考えた。フレネル反射により共振器を設計しているため、出力結合率が非常に高い。これが原因でモード

の弁別性が高く、モード選択が行えていないと考えた。

4.3 BPF 無,PR 有

BPF 無,PR 有の共振器で変調周波数を変化させたときの近視野像と時間波形の結果を図 7 に示す。

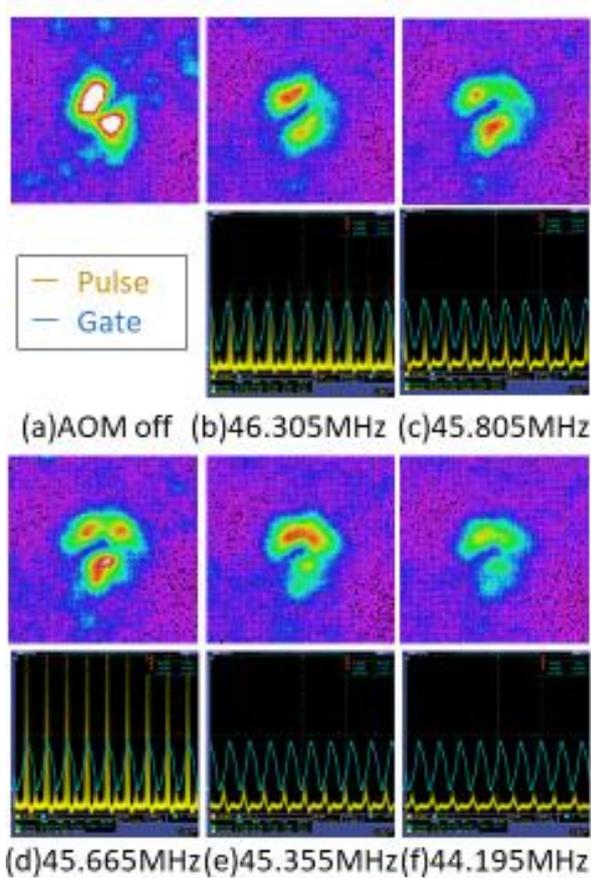


図 7 BPF 無,PR 有の近視野像と時間波形

時間波形より、能動モード同期を確認することができた。また、変調周波数を変化させることによるモードの変化も確認することができた。しかし、理論の計算よりも変調周波数の変化の値がかなり大きかった。また、モードの強度分布が計算のモードと一致するものがなく、モード選択が行えていないことも分かる。また、近視野像より複数のモードが励振されていることも分かる。よって、モードミキシングが起きてしまっていると考えられる。

5 まとめ

本研究では、マルチモードの Yb 添加偏波保持ダブルクラッドファイバーを使用して、モード選択の検証を行った。設計した共振器で能動モード同期を行うことができた。また、変調周波数を変化させることでモードの変化を確認することができた。また、BPF や PR の設置の有無によりモードの弁別性が変化し、モードの変化のしやすさを確認することができた。しかし、モードの強度分布が計算のモードと一致するものがなく、モードミキシングが起きていると考える。

今後の展望として、モードの割合の定量的に評価やモード弁別性の計算をし、共振器の PR などの最適化を行う必要がある。

6 参考文献

- [1] K Saitoh, S Matsuo, "Multicore Fiber Technology," *Journal of Lightwave Technology*, **34**, 55-65 (2016)
- [2] 成富未夢人, "マルチコアファイバーの能動モード同期によるスーパーモード選択の検討," 電気通信大学修士論文, (2020).
- [3] A. Yariv, "光エレクトロニクス 基礎編 原書 6 版," 丸善(2010).
- [4] F.X. Kärtner, D.M. Zumbühl, and N. Matuschek, "Turbulence in Mode-locked Lasers," *Physical Review Letters*, **82**, 4428-4431 (1999).