

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

白川 晃研究室 成富 未夢人

1 初めに

近年、量子加速器の小型化や宇宙太陽光発電システムのために高出力のファイバーレーザーが求められている。ファイバーレーザーは排熱効率が高く、高平均出力の安定動作に優れているが、高尖塔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。ファイバーレーザーのさらなるパワースケーリングの一手法として結合型マルチコアファイバー (MCF) による空間多重の研究が行われている。結合型 MCF ではシングルモードのコア同士を隣接させることによってエバネッセント結合が起こり、スーパーモードを励振することができる。コア数の増加に応じてパワースケーリングをすることが可能であるが、モード数も増加するため有効的に活用するには選択的にスーパーモードの励振する必要がある。スーパーモードには高ビーム品質が期待できる in-phase mode が存在し、高出力化のために in-phase mode を選択励振する研究がされてきた。近年は in-phase mode 以外のモードにも着目されており、その他の高次モードを選択励振する方法が求められている。本研究では in-phase mode を含め、他のモードも自由に選択励振できる新しい選択方法として時間領域スーパーモード選択を考案し、実証することを目的としている。本研究では図 1 に示す Yb 添加 19-core ファイバーを用いて研究を行った。クラッド径 480 μm 、コア径 7.9 μm 、コア間隔 11 μm である。またコアの NA は 0.065、クラッドの NA は 0.46 である。

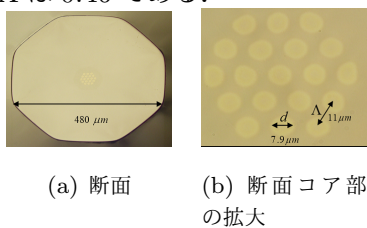


図 1: 19 コアファイバー

2 原理

2.1 スーパーモード

周期的に並んだ多数の導波路のアレイによる伝播モードはスーパーモード (アレイモード) と呼ばれる。スーパーモードは結合モード方程式によって表すことができるが、本研究では市販ソフトである FIMMWAVE を用いて有限要素法により 19-core ファイバーのスーパーモードを計算した。スーパーモードはクラッドへの浸み出し方の違いに

よりモードごとに異なる実効屈折率を持つ。そのためモードごとに伝播定数が異なるが、その差も有限要素法によって計算することが出来る。19CF の近視野と遠視野のスーパーモードを市販ソフトの Fimmwave を使い有限要素法で計算し、実効屈折率の高い順に並べた (図 2、3)。実効屈折率が最も高い最低次モードを in-phase モードと呼び、遠視野において CBC を行い回折限界まで集光が可能である。

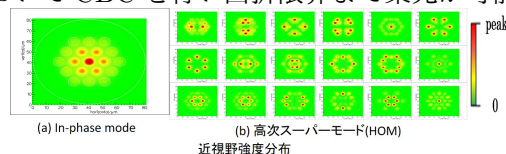


図 2: 19CF 近視野象

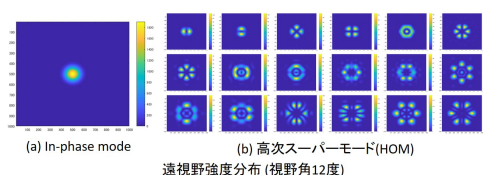


図 3: 19CF 遠視野像 (視野角 6 度)

2.2 時間領域スーパーモード選択

共振器に損失変調を与えることで縦モードを結合し、パルス化することを能動モード同期という。縦モード間隔はパルスのラウンドトリップタイムによって定まるが、MCF ではスーパーモードごとに伝播定数が異なるためスーパーモードごとに縦モード間隔が異なる。この特性を利用し、任意のモードだけをパルス発振させることによってモード選択を行う方法が時間領域スーパーモード選択である。通常、能動モード同期を行うにはパルスのラウンドトリップタイムと損失変調の周期が一致していなければならない。実際にはある程度の離調が存在しても定常パルスが生じるが、離調が大きくなると定常パルスが破壊されてしまう。そのため、能動モード同期の安定性は次式で定義される規格化デチューニング Δ で評価できる

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

ここで離調 Δ^{mode} は各スーパーモードのラウンドトリップ T_R^{mode} と変調周期 T_M の差、利得分散 D_g 、変調深さの曲率 M_s 、また $\tau_a = 4\sqrt{(D_g/M_s)}$ である。スーパーモードはそれぞれ固有の有効屈折率を持つことから、ラウンドトリップタイムもモードごとにそれぞれ異なる値を持つ。したがって、規格化デチューニングもモードごとに定義される。ここで先ほど述べた、定常パルスが生じるか、破壊されてしまうかの境目となる離調をクリティカルデチュー

ニング Δ_c と呼び、その値は約 2.0 である [1]. ここで時間領域スーパーモード選択にデチューニングを適用する. 第 n モードだけ $\Delta^n < 2.0$ 、他のモードは $\Delta^{other} > 2.0$ となるように変調を与えたとき、第 n モードだけ定常パルス発振の条件を満すことになる. したがって、第 n モードだけ光パルスとして発振し、他のモードを抑えることが可能である.

3 モード選択に必要な条件

時間領域を繰り返し周波数 f_R^n と変調繰り返し周波数 f_M に変換すると

$$f_M = \frac{1}{T_M} \quad (2)$$

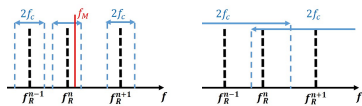
$$f_R^n = \frac{1}{T_R^{mode}} \quad (3)$$

したがって周波数離調 f_d^n は次式で与えられる.

$$f_d^n = f_M - f_R^n \quad (4)$$

ここで $\Delta^n = \Delta_c = 2$ を満たす周波数離調をクリティカル周波数 f_c として定義する. 図 4 に簡単な概念図を載せる. 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 以内の範囲で繰り返し周波数 T_M の変調を与えてやればよい. ここで図 4(a) のように第 n モードと第 $n+1$ モードの繰り返し周波数の差 $f_R^{n+1} - f_R^n$ が f_c より大きい場合を考える. 第 $n+1$ モードがパルス化する周波数範囲 $f_R^{n+1} \pm f_c$ に第 n 番目の繰り返し周波数 f_R^n が重ならないため、第 $n+1$ モードをパルス化させずに第 n モードだけをパルス化することができる. これが全てのモードで満たされる場合、第 n モードだけをパルス化し選択励振可能である. 一方で、図 4(b) のように第 n モードと第 $n+1$ モードの繰り返し周波数の差 $f_R^{n+1} - f_R^n$ が f_c より小さい場合を考える. 第 $n+1$ モードがパルス化する周波数範囲 $f_R^{n+1} \pm f_c$ に第 n 番目の繰り返し周波数 f_R^n が重なってしまうため、第 n モードをパルス化しようとするとき第 $n+1$ モードも同時にパルスとして出力されてしまう. したがって単一モード選択を行うための条件は

$$|f_R^{n+1} - f_R^n| > f_c \quad (n = 1, 2, 3, \dots, 19) \quad (5)$$



$$(a) \quad f_R^{n+1} - f_R^n > f_c \quad (b) \quad f_R^{n+1} - f_R^n < f_c$$

図 4: 時間領域スーパーモード選択法 の概念図

3.1 基本設計

本研究で使用した基本的な共振器設計を図 5(a) に示す. 使用するファイバーは前述したとおり 19CF で約 3.2m のものを使用する. ファイバー端面によるフレネル反射 (反射率 3.4%) と高反射レーザー用ミラーによって共振器を構成している. 外部共振器に AOM を設置しており損失変調を与えることで能動モード同期を行う. ここで AOM はファンクションジェネレータ (FG) で制御している. 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 を動作させている. また AOM がピンホールのような空間フィルターとして動作することを防ぐためにレンズで集光し、近視野象で AOM に入射している. また AOM は水平入射時に最大回折効率を発揮するため偏光ビームスプリッターは偏光を制御している. 共振器で得たレーザー出力は別に設計した観測システムに入射することで、近視野象 (NFP) と遠視野象 (FFP)、スペクトル、波形を観測することができる. 観測システムの設計を図 5(b) に示す. ここで OSC とはオシロスコープのことである.

励起光に対するレーザー出力のスロープ効率は 25% である. ただし、AOM は高出力を入射すると破壊されてしまうためパワー特性は AOM を取り除いて測定した.

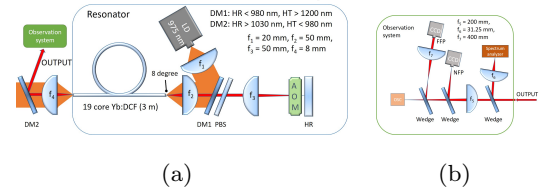


図 5: 実験配置図 (a:能動モード同期レーザー、b:観測システム)

3.2 バンドパスフィルターの設置

次に基本共振器設計にバンドパスフィルター (BPF) を挿入した場合の実験配置を図 6 に示す. BPF は中心波長 $1064 \text{ nm} \pm 0.6 \text{ nm}$ 、半値全幅 (FWHM) $3 \text{ nm} \pm 0.6 \text{ nm}$ で最大透過率は 55% である. 観測システムは変わらず図 5(b) と同じである. 励起光に対するレーザー出力のスロープ効率は 19% である. 先ほどよりも低下したが、これは BPF を設置したためである.

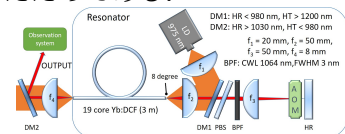


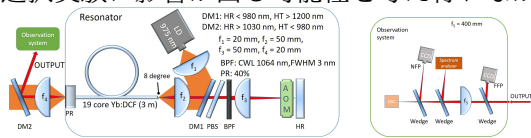
図 6: BPS を配置した能動モード同期レーザーの配置図

3.3 部分反射鏡の設置

さらに反射率が 40% の部分反射鏡 (PR) を設置した実験配置図を図 7(a) に示す. また、PR の設置に伴い $f = 8 \text{ mm}$ のレンズを $f = 20 \text{ mm}$ のものに変更し、同時に観測

システムも変更した。図 7(b) に示す。

励起光に対するレーザー出力のスロープ効率は 9.2% と大きく低下した。この原因は、後に行ったモード選択実験中に、部分反射鏡のホルダーとファイバーを固定するステージがぶつかったためカップリングが十分に行えていなかったためであるとわかった。モード選択実験ではすでに AOM を設置していたためパワー特性の測定は行えず、また AOM を取り除いて再測定をすることも状態が変わって選択実験に影響が出る可能性を考え行わなかった。



(a) (b)

図 7: 実験配置図 (a:PR,BPS を配置した能動モード同期レーザー、b:変更後の観測システムの配置図)

4 理論値計算

ここでこの共振器設計についてモードの単一選択励起が可能かどうか計算を行った。

初めに各スーパーモードの繰り返し周波数 f_R^n を導出した。FIMMWAVE の結果から計算した群屈折率と式 (3) を用いて、各モードの繰り返し周波数を計算し図 8 として示した。図から繰り返し周波数 f_R^n には波長依存性がないことが確認できる。in-phase モードから第 19 モードまでの繰り返し周波数の差は約 24 kHz であり、そのうち最小の繰り返し周波数差 $|f_R^{n+1} - f_R^n|_{min}$ は 900 Hz であった。モードの単一選択励起が可能なのは式 (5) を満たすことであるから、 $f_c < 900\text{Hz}$ となるような共振器設計でなければならない。ここで式 (1) から規格化デチューニング $\Delta^{mode} = \Delta_c = 2$ を満たすような変調周期 T_M を逆算することができる。図 9 に結果を示す。結果から、利得帯域が広いほどクリティカル周波数 f_c が下がるためモード選択が行いやすくなる。反射率の高さに関しても同様のことがいえる。ここで BPF がない場合、 Yb^{3+} の利得帯域は非常に広いととても低いクリティカル周波数 f_c であるため条件を満たすことがわかる。また $\text{FWHM} = 3\text{nm}$ の BPF を挿入した場合も、フレネル反射および 40% の PR を入れた場合どちらも条件を満たしている。

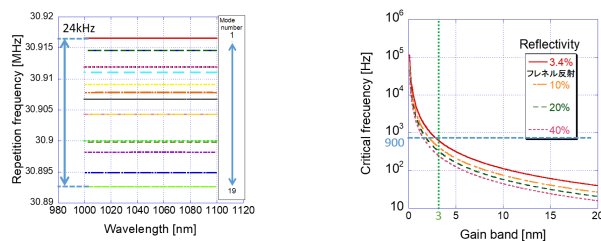


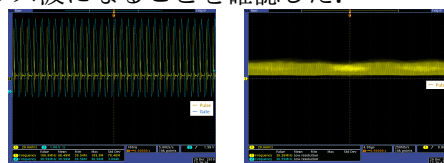
図 8: 波長に対する繰り返し周波数 f_R^n 図 9: 利得幅に対するクリティカル周波数 f_c

5 実験方法

6 基本設計 (BPF 無し、フレネル反射) による実験

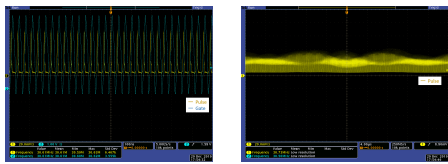
基本共振器設計である BPF 無し、フレネル反射の状態で行った。変調の繰り返し周波数 29 ~ 32 MHz の間でパルス波形が観測されたが、その範囲で変調周波数を 1 kHz ずつ変えたが期待されたモードの変化は確認できなかった。測定したデータの中から、パルス波形がとるピーク値が比較的安定していた変調繰り返し周波数 30.569 MHz の波形を図 10 に示す。また、対比用にパルス波形のピーク値に変調が確認された変調繰り返し周波数 30.610 MHz のパルス波形を図 11 に示す。

図 10、11 の (a) は時間スケールが 100 ns 時のパルス波形である。黄色のラインがパルス信号、青色のラインが AOM を駆動している FG の電圧信号 (ゲート信号) である。それに対し図 10、11 の (b) は時間スケールを 400 μs のパルス波形である。図 10、11(b) を見比べると、繰り返し周波数 30.610 MHz の時はパルスのピーク値に変調があることが確認できる。これは緩和発振しているためである。この変調は繰り返し周波数が 30.596 MHz から離れるほど強くなり、約 30 MHz から 32 MHz の間まで緩和発振状態のパルス波になることを確認した。



(a) 時間スケールが 100 ns のパルス波形 (b) 時間スケールが 4.0 μs のパルス波形

図 10: 基本設計における変調繰り返し周波数 30.596 MHz のパルス波形



(a) 時間スケールが 100 ns のパルス波形 (b) 時間スケールが 4.0 μ s のパルス波形

図 11: 基本設計における変調繰り返し周波数 30.610 MHz のパルス波形

それぞれのパルス特性は表 1 に示す。表 1 を見ると、変調繰り返し周波数 30.596 MHz のほうが、変調繰り返し周波数 30.610 MHz に比べて狭いパルス幅が得られている。

表 1: 基本設計によるパルス特性

繰り返し周波数 [MHz]	パルス幅 [ns]	平均出力 [W]	パルスエネルギー [nJ]	ピーク出力 [W]
30.596	3.4	0.25	8.2	2.4
30.610	5.3	0.28	9.2	1.7

次に各繰り返し周波数のスペクトルと、AOM を動作させない状態の連続発振のスペクトルを図 12 に示す。図 12 を見ると、連続発振とモード同期時によるスペクトルの変化が確認できなかつた。これも先ほど同様にフレネル反射のため、損失変調の影響が小さいためであると考えられる。これについても後ほど考察する。またこの共振器でモードの変化が確認できなかつた理由として、各波長で多モード発振しているためであると考えた。したがって、次は波長選択を行い単一波長による状態でモードの変化が起きるかどうかが実験した。

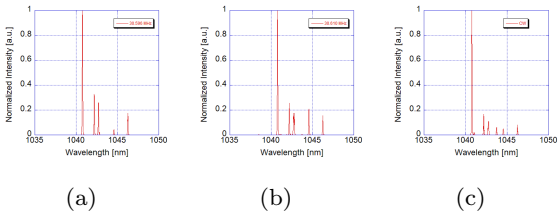


図 12: 基本設計におけるスペクトルの比較 (a:繰り返し周波数 30.596 MHz、b:繰り返し周波数 30.610 MHz、c:連続発振)

7 波長選択をした共振器 (BPF あり、フレネル反射) による実験

次に BPF を挿入し、波長選択を行った共振器によるモード選択の実験を行った。パルス波形は波長選択をしていない基本設計と同様に変調繰り返し周波数 30 ~ 32 MHz の間で確認した。また、今回は変調繰り返し周波数 30.570 ~ 30.600 MHz の間で遠視野像と近視野像が変化することを確認できた。遠視野像を図 13、近視野像を図 14 に示す。示す画像は 10 kHz 間隔ごとであるが、この間で目立った像の変化は確認できなかつた。また変調の繰り返し周波数をさらに増加、もしくは減少させてもモードに変化は確認

できず、この約 30 kHz の間のみで確認できた。遠視野像を見ると、変調繰り返し周波数が増加するとともに中心部の強度が増加している。中心部以外の強度は中心部ほど大きく変わっていないことから、全体出力が上がったわけではなくモードが変化しているといえる。しかし、図 3 のどのモードにも一致しないことから多モード発振の状態であるといえる。したがって、期待していた単モードの選択とはいかないが、発振しているモードの割合が変わったことは期待できる。次に近視野像を見ると、中心部の強度分布が変化していることが確認できる。近視野像も同様に図 2 に一致するモードがない。したがって、近視野像の結果からも発振しているモードの割合が変わっていると考えられる。また、図 8 を見ると第 1 モード (in-phase) から第 19 モードまでの繰り返し周波数 f_R^n の差は 24 kHz であるが、得られたモードの変化は約 30 kHz の間で起きているため一致しており信頼性が高い。なお、遠視野像と近視野像の強度分布は時間変動せず、損失変調の繰り返し周波数の変化のみによってモードの変化が起きる。また再現性があり、損失変調の繰り返し周波数を変えることで同様のモード変化が確認できた。

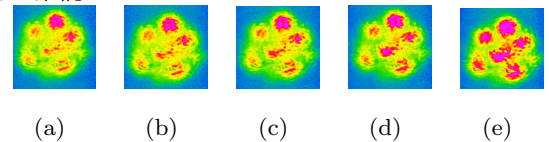


図 13: 波長選択をした共振器で観測した遠視野像 (a:30.570 MHz、b:30.580 MHz、c:30.590 MHz、d:30.600 MHz、e:連続発振)

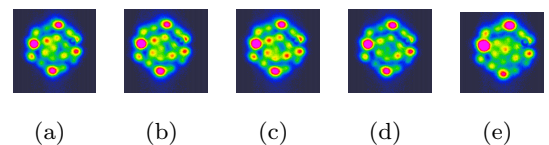
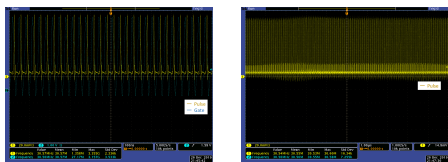


図 14: 波長選択をした共振器で観測した近視野像 (a:30.570 MHz、b:30.580 MHz、c:30.590 MHz、d:30.600 MHz、e:連続発振)

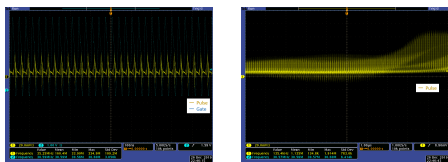
次に、モードの変化が確認された繰り返し周波数 30.570 MHz と繰り返し周波数 30.590 MHz のパルス波形を比較する。それぞれ図 15、16 に示す。(a) は時間スケールが 100 ns、(b) は時間スケールが 1.0 μ s である。それぞれ黄色のラインがパルス信号、青色のラインが AOM を駆動している FG の電圧信号 (ゲート信号) である。まず繰り返し周波数 30.570 MHz のパルス波形を見ると、図 15(a) では単パルスになっていることが確認できる。また図 15(b) ではパルスのピーク値が安定していることが確認できる。しかし、繰り返し周波数の値が 10 kHz ずつ増えていくとパルスはマルチパルス化してしまう。またパルスのピーク値にも変調が確認できる。マルチパルスになってしまう原

因としては、スーパーモードの同時励振が理由として考えられる。



(a) 時間スケールが 100 ns のパルス波形 (b) 時間スケールが 1.0 μ s のパルス波形

図 15: BPF を挿入した共振器における変調繰り返し周波数 30.570 MHz のパルス波形



(a) 時間スケールが 100 ns のパルス波形 (b) 時間スケールが 1.0 μ s のパルス波形

図 16: BPF を挿入した共振器における変調繰り返し周波数 30.590 MHz のパルス波形

また繰り返し周波数 30.570 MHz のパルス特性を表 2 に示す。

表 2: BPF を挿入した共振器によるパルス特性

繰り返し周波数 [MHz]	パルス幅 [ns]	平均出力 [W]	パルスエネルギー [nJ]	ピーク出力 [W]
30.570	3.9	0.2	6.5	1.7

次にスペクトルを示す。繰り返し周波数 30.596 MHz のスペクトルを図 17(a)、繰り返し周波数 30.600 MHz のスペクトルを図 17(b)、AOM を動作させず連続発振している状態のスペクトルを図 17(c) に示す。各スペクトルから単一波長発振していることがわかる。理論的には BPF を挿入せず利得帯域を広げたほうがクリティカル周波数が小さいはずであるが、この結果から BPF を挿入し単一波長発振であるほうがモードの変化が起きやすいことが確認できた。

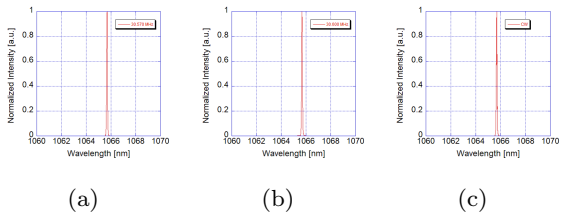


図 17: 基本設計におけるスペクトルの比較 (a:30.596 MHz、b: 30.610 MHz、c:連続発振)

8 反射率 40% の部分反射鏡を挿入した共振器による実験

最後に反射率 40% の部分反射鏡を挿入した共振器によってモード選択の実験を行ったところ、変調繰り返し周波数 30.200 ~ 30.700 MHz の範囲でモードの変化を観測

した。100 kHz 間隔の遠視野像を図 18、近視野像を図 19 に示す。また連続発振時のモードも同様に示す。遠視野像図 18 を見ると、上部に新しい強度分布が現れていることが確認できる。特に (d)30.500 MHz のときに強度が最大になっている。これは (g) 連続発振のときには確認できなかったものであるため、モード同期によってモードが変化したといえる。また近視野像図 19 を見ると、繰り返し周波数が 30.200 MHz から 30.500 MHz に近づくにつれ中心部分が強くなっていくことが確認できる。また 30.500 MHz から繰り返し周波数をさらに上げていくと中心部分の強度が下がっていく変化が確認できる。この変化は中心部分だけ強くなっているため、前回 (BPF あり、フレネル反射の共振器) の結果と同様に多モード発振しているモードの割合が変化したと考えてよい。また今回顕著に見られた変化として、遠視野像と近視野像の両方とも連続発振とモード同期時の強度分布が大きく異なるという点である。ここまでの変化はフレネル反射の時には見られず、特に基本設計 (BPF 無し、フレネル反射) では一切変わっていない。これは反射率が上がったため、損失変調を与えた時の影響が大きくなったからであると考えられる。

また今回においても強度分布が時間変動することは確認されず、損失変調の繰り返し周波数のみでモードの変化が起きる。またモード変化の再現性も確認した。ただし、この共振器は安定性に乏しく 20 ~ 30 分ほど動作させたままにするとモードがまったく別のものに変化してしまう。これは部分反射鏡とファイバー端面を接しているため振動に過敏なこと、コアの NA が小さいため応力に敏感なことが理由である。したがって、この共振器では 100 kHz ごとのデータ測定のみ行った。

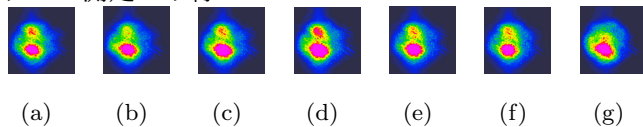


図 18: 波長選択をした共振器で観測した遠視野像 (a:30.200 MHz、b:30.300 MHz、c:30.400 MHz、d:30.500 MHz、e:30.600 MHz、f:30.700 MHz、g:連続発振)

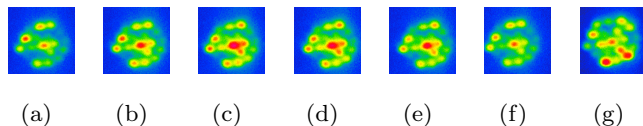
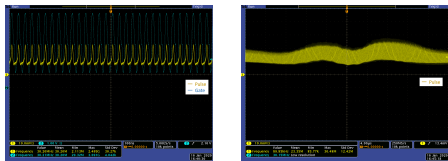


図 19: 波長選択をした共振器で観測した近視野像 (a:30.200 MHz、b:30.300 MHz、c:30.400 MHz、d:30.500 MHz、e:30.600 MHz、f:30.700 MHz、g:連続発振)

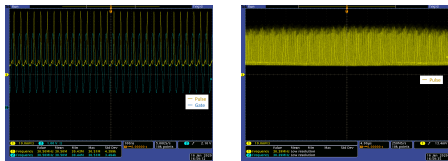
次に繰り返し周波数 30.200 MHz と 30.500 MHz のパルス波形をそれぞれ図 20 に示す。(a) は時間スケールが 100 ns の波形、(b) は 400 μ s の波形である。またそれぞれの

パルス特性を表 3 に示す．各パルス波形の (a) について比較すると、繰り返し周波数 30.500 MHz のパルスは 30.200 MHz のパルスに比べピーク出力が 2.5 倍ある．また各パルス波形の (b) を見ると、どちらも変調が存在し、緩和発振していることがわかる．この実験では繰り返し周波数の間隔を大きく測定したため、ピーク値が安定した波形が測定できなかった．しかし、繰り返し周波数 30.500 MHz のパルス波形が 30.200 MHz よりも変調が小さいことが確認できるため、30.500 MHz 付近に安定するポイントがあることが予想できる．繰り返し周波数 30.200 MHz のパルス波形は 30.500 MHz のパルス波形と大きく形が異なりピーク値が非常に小さいためモード同期からずれた状態であると予測される．



(a) 時間スケールが 100 ns のパルス波形 (b) 時間スケールが 4.0 μ s のパルス波形

図 20: 40% の部分反射鏡を挿入した共振器における変調繰り返し周波数 30.200 MHz のパルス波形



(a) 時間スケールが 100 ns のパルス波形 (b) 時間スケールが 4.0 μ s のパルス波形

図 21: 40% の部分反射鏡を挿入した共振器における変調繰り返し周波数 30.500 MHz のパルス波形

表 3: 反射率 40% の部分反射鏡を挿入した共振器によるパルス特性

繰り返し周波数 [MHz]	パルス幅 [ns]	平均出力 [W]	パルスエネルギー [nJ]	ピーク出力 [W]
30.2	11.3	0.07	2.2	0.072
30.5	6.4	0.07	2.4	0.18

次に繰り返し周波数 30.200 MHz と 30.500 MHz および連続発振時のスペクトルを図 22 に示す．各スペクトルを見比べると、連続発振のスペクトルは波長 1065.4 nm と 1065.8 nm に大きい発振ピークを持ち、また 1065.6 nm にも中程度の発振ピークを持つ．しかし、モード同期を行っている繰り返し周波数 30.200 MHz と繰り返し周波数 30.500 MHz では 1065.8 nm に大きい発振ピークを持つが、他の発振は抑えられている．BPF 無し、フレネル反射の基本設計ではスペクトルに変化が確認できなかったことを考えると、反射率が上がったことで変調の影響が大きく受けるためであると考えられる．

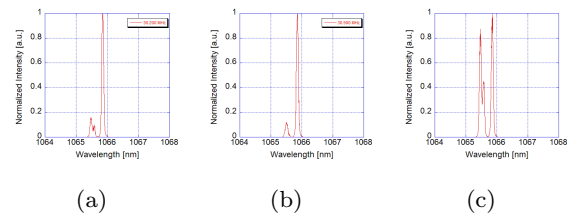


図 22: 基本設計におけるスペクトルの比較 (a:繰り返し周波数 30.200 MHz、b; 繰り返し周波数 30.500 MHz、c:連続発振)

9 まとめ

本研究では能動モード同期を用いた新しいスーパーモード選択法である時間領域スーパーモード選択について検討を行った．結果として、波長選択を行った共振器によってモードの変化を確認することができた．図 9 を見るとクリティカル周波数 f_c が可能な限り小さくなるように利得帯域を広げるべきである．しかし、本研究結果から発振波長が多数ある場合、モードの変化が起きないことが分かった．その確認として、BPF を挿入し波長選択を行った場合にはモードの変化が確認された．ただし、現状ではスーパーモードの単一選択励振にはいたっておらず、多モード発振している状態でモードの割合が変わることが確認できたまでである．

10 今後の展望

現状抱えている問題点としては、結合型マルチコアファイバーによるカップリングが難しいことである．本研究で使用した 19 コアファイバーは各コアのビームを自由空間に出射した後、全てのビームを同じコアに戻さなければならない．このカップリングがシングルコアに比べると格段に難しく、また戻せている評価をすることも難しい．したがって、以降の研究ではマルチモードファイバーを使用することを提案する．MCF と同様にマルチモードファイバーの横モードは有効屈折率がそれぞれ固有の値を持つため、原理的には時間領域スーパーモード選択が可能である．またシングルコアであるためカップリングが MCF に比べ容易である．また MCF による能動モード同期を行った先行研究は調べた限りでは確認できず、未知数なことが多い．したがって、まずは時間領域モード選択の実証を目的としたマルチモードファイバーによる研究を行うべきである．

参考文献

- [1] F.X. Kärtner, D.M. Zumbühl, and N. Matuschek, “Turbulence in Mode-locked Lasers”, PHYSICAL REVIEW LETTERS, **82**, 4428 (1999).