

マルチモードファイバーレーザーにおける

能動モード同期時間領域モード選択のリング型共振器の研究

白川研究室 大西志晶

1. はじめに

ファイバーレーザーは長大な利得を持ち、表面積が体積に対して大きいため排熱効率が高いため、高平均出力の安定動作に優れている。しかし、高尖頭出力においてはファイバーの耐久性や非線形光学効果により制限されてしまう[1]。そのため、高尖頭出力を得るためにコヒーレントビーム結合(CBC)などの手法が盛んに研究されている。

本研究室では、結合型マルチコアファイバー(MCF)によるCBCの研究を行ってきた。結合型マルチコアファイバーはスーパーモードと呼ばれる空間モードが存在し、特に in-phase モードは遠視野で回折限界まで光を集光するため高ビーム品質を期待できる。

本研究室は、この in-phase モードの選択励振について研究をしてきたが、高次のスーパーモードも自由自在に任意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を提案した。スーパーモードを自由自在に選択励振することで超短パルスレーザーの高エネルギー化やビーム制御の応用が期待される。

本研究では外部共振器に音響光学変調器(AOM)を挿入するため、自由空間に出射したビームを同じ向きでファイバーに再結合する必要がある。よって比較的カップリングが容易なファイバーを用いる方が望ましい。MCFの各スーパーモードとマルチモードファイバー(MMF)の各横モードは、それぞれ固有の有効屈折率を持つという共通点がある。MMFはコアが一つしかないためMCFと比較してカップリングが容易と考え、MMFを本研究では使用した。時間領域モード選択を実証することが本研究の目的である。

2. 原理

2.1. 時間領域モード選択

MMFの各横モードはそれぞれ異なる有効屈折率を持つため、それぞれの繰り返し周波数が異なる[2]。この特性を利用し、特定の横モードのみを能動モード同期によってモード同期発振することで選択励振する方法を提案し、我々はこれを時間領域モード選択と呼んでいる。図1に時間領域モード選択の概念図を示す。

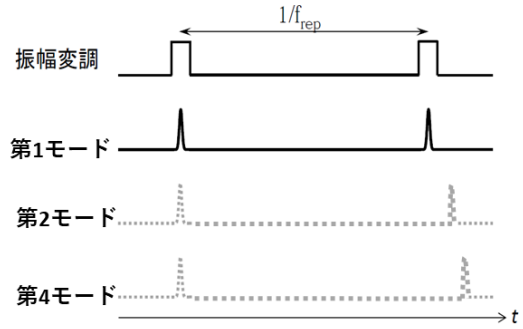


図1 時間領域モード選択の概念図

図1のようにある周期の振幅変調を与えると、周期の一致する横モードが選択励振され、その他の異なる周期を持つ横モードが励振されにくいことがわかる。この時間領域モード選択の利点は能動モード同期の変調周波数のみで選択励振が可能ということである。

2.2. ファイバー特性

本研究で使用したYb添加ダブルクラッド偏波保持ファイバー(DC-PM-MMF)は、コア径19 μm、クラッド径130 μm、クラッドの屈折率1.45、コアの屈折率1.4523とした。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。

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

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 = 2.405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。本研究で使用したファイバーのVパラメーターは4.66であり、励振するモードはLP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₀₂である。LP₁₁モードは縮退していると考え、LP₂₁モードは2つのモードがあるので励振できるのは、合計5つである。図2に使用し

た MMF の断面図、図 3 に Fimmwave で有限差分法を用いて計算した MMF の 6 つの横モードの近視野像を示す。

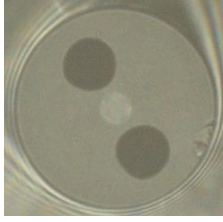


図 2 MMF のファイバー断面図

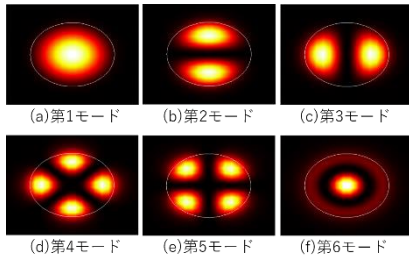


図 3 MMF の横モード(計算)

2.3. 曲げ損失

曲がった導波路において同じモードパターンを維持するためには、そのモードの波面は曲率の中心を軸として回転しなければならない。そして、ファイバーコアからある臨界距離を超えると、電磁波は放射モードと結合するようになる。こうしてモードエネルギーの一部が導波路から逃げていく。これによって伝搬減衰が起こる。曲げ損失は次の近似式で計算できる。

$$\alpha_0 = \frac{e^{2qa}}{\sqrt{\pi qa}} \left(\frac{ha}{n_2 V} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{Ra}} \exp \left(-\frac{2(qa)^3 R}{3(\beta a)^2 a} \right) \quad (2)$$

ここで、 R は曲がりの曲率半径、 a はファイバーのコアの半径、 V は式(2.4.1)、 β は伝搬定数、 q, h は下記の通りである。

$$q = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (3)$$

$$h = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (4)$$

図 4 に式(2)を用いて、使用したファイバーの曲率半径と曲げ損失を計算した図を示す。 $n_1 = 1.4523$ 、 $n_2 = 1.45$ 、 $a = 19 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 1065 \text{nm}$ である。一般的に曲げ損失は 0.1 dB/m 以下は損失が大きく発振しないと言われている。本研究で作製したリング型共振器の曲率半径は 20 cm であったので、 LP_{02} モードは励振できない。よって、リング型共振器で励振でき

る横モードは LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} であり、合計 4 つである。

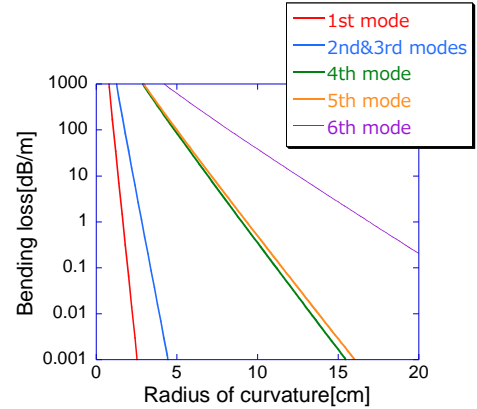


図 4 曲率半径に対する曲げ損失

3. 実験と結果

3.1. ファブリーペロー共振器

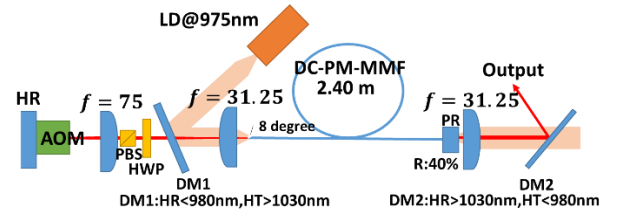


図 5 FP 共振器配置図

図 5 に作製したファブリーペロー(FP)共振器の配置図を示す。共振器は HR ミラーと部分反射鏡 (PR)(反射率 40%) で構成した。この外部共振器に音響光学変調器(AOM)を挿入し、信号発生器で矩形波の変調を印可し能動モード同期を行った。AOM の変調深さと回折効率を実測値で 79.9 % と 61 % であった。AOM の制御はファンクションジェネレーター (FG)(エヌエフ設計回路ブロック社、WF1967)を用いた。この FG で変調周波数を変化させ、時間領域モード選択を試みた。

3.2. FP 共振器の各横モードの繰り返し周波数

図 6 に Fimmwave の有限差分法で計算した、各横モードの波長に対する有効屈折率を示す。

低次の横モードほど有効屈折率が大きいこと、波長が大きくなるにつれて有効屈折率が小さくなるのがわかる。この得られた値で次式を用いると、群屈折率、繰り返し周波数を求めることができる。

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

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

ここで、 λ は波長、 n_{eff} は有効屈折率、 n_g は群屈折率、 f_{rep} は繰り返し周波数、 c は光速、 L はファイバー長、 L_{air} は自由空間長である。計算した波長に対する繰り返し周波数を図7に示す。

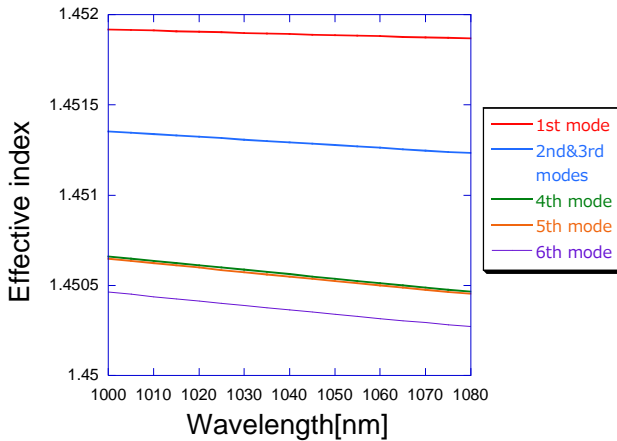


図6 波長に対する有効屈折率

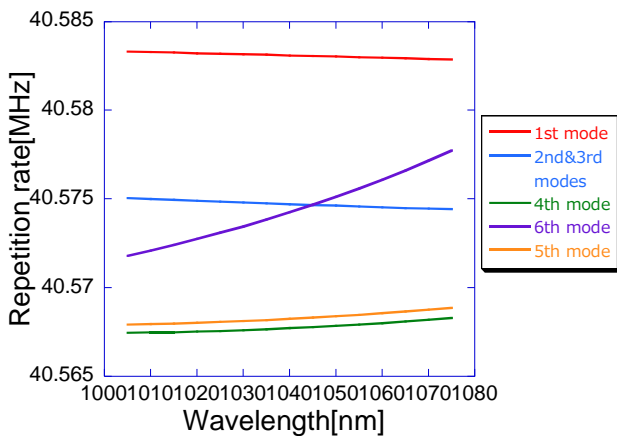


図7 波長に対する繰り返し周波数(FP共振器)

1065nmにおける第1モードと第4モードの繰り返し周波数差は約27kHzであった。つまり、この約27kHzの範囲において横モードが変化することを意味する。

3.3. FP共振器の結果

FP共振器において変調周波数を変化させたときの、近視野像と時間波形の変化を図8に示す。図8の上の図が近視野像、下の図が時間波形である。時間波形より、能動モード同期発振を確認することができた。また、変調周波数の変化による横モードの変化も確認することができた。しかし、近視

野像は計算された横モードの強度分布と一致しておらず、複数の横モードが励振している状態になっていると考えられる。また、能動モード同期の起きている周波数の範囲は約1.9MHzであり計算値の約27kHzと大きくずれていることがわかる。

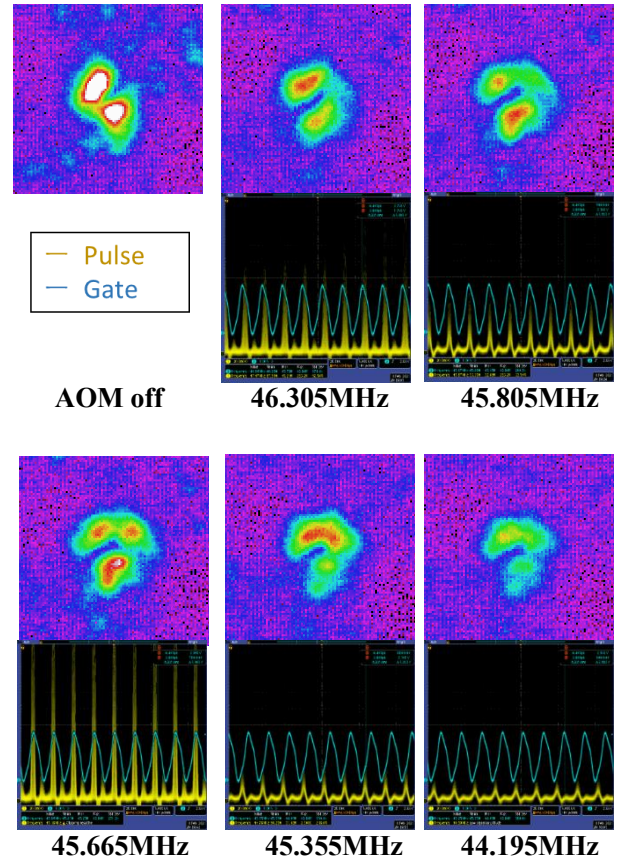


図8 変調周波数の変化による近視野像(上)と時間波形(下)

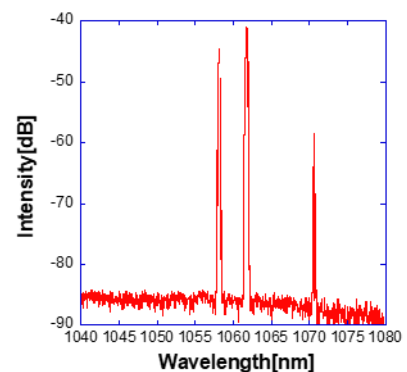


図9 スペクトル(1.5W励起)

図9に1.5W励起時のスペクトルを示す。モード同期の起きている周波数の範囲が計算値より大きい原因として、図9のように3つの波長でレーザー発振が起きていること、レンズの端面反射などによる影響と考えられる。波長が異なると横モードの群速度

が異なり、計算値より広い周波数の範囲で各横モードの繰り返し周波数が存在すると考えられる。また、レンズの反射等により複合共振器状態となり縦モード間隔が複数存在することもこれの原因と考えられる。よって、これを防ぐための手段として、BPFを共振器内部に挿入することで発振波長を抑制すること、リング型共振器にして縦モード間隔を1種類に制限することを本研究では実施した。

3.4. リング型共振器

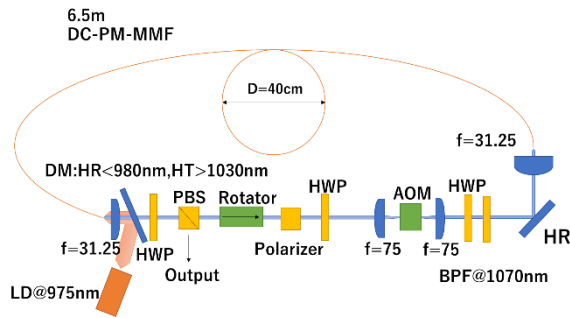


図 10 リング型共振器配置図

図 10 に作製したリング型共振器の配置図を示す。レンズの端面反射による寄生発振を抑制し 1 種類の縦モードでレーザー発振を行うために、PBS と Rotator と Polarizer を挿入し 1 方向で発振をするリング型共振器を構築した。共振器内に AOM を挿入し、能動モード同期発振を行った。ファイバー端面に対して研磨を行い、 8° に角度をつけることで端面によるフレネル反射を抑制し、偏波保持ファイバーの軸合わせを行った。AOM は水平方向で損失変調を与えるため、Polarizer を透過した光を水平偏光にするために半波長板(HWP)を挿入している。AOM を透過した光は HWP によって偏光を回転させ、PANDA ファイバーの軸に合うように入射させた。利得ファイバーを得て、ファイバーから射出した光は HWP と PBS を用いた可変アウトプットカップラによって出力する。

可変アウトプットカップラの出力特性を表 1 に示す。

表 1 HWP の角度と出力と偏光

HWPの角度	出力/mW	PBS透過前の偏光
228°	6.4	垂直
245°	148.6	
268°	43.0	水平
304°	151.4	
320°	7.3	垂直

HWP の角度を変化させると偏光が回転しそれに伴い、出力結合率も変化するので出力が変化している

ことがわかる。HWP の角度を変化させたときのスペクトルを図 11 に示す。

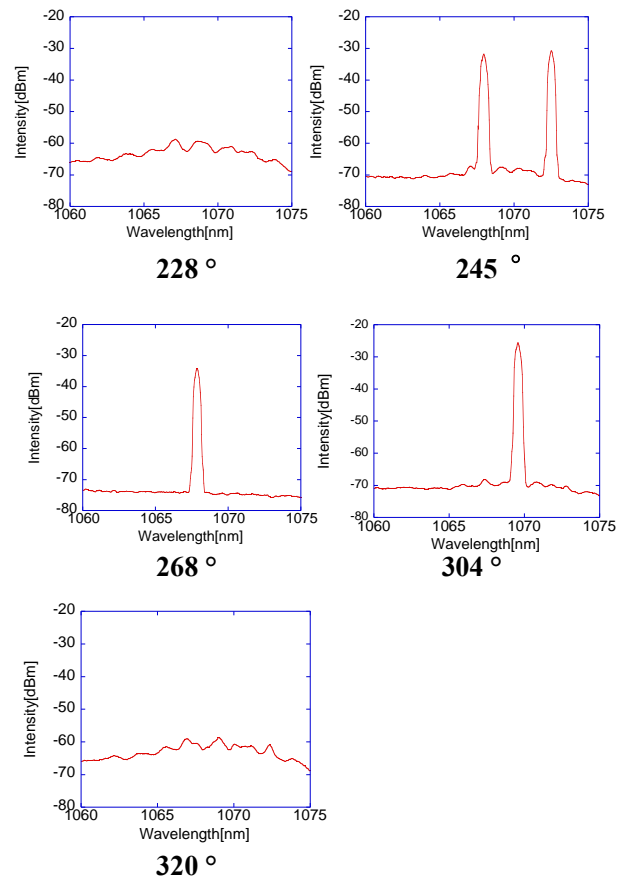


図 11 HWP の角度を変化させたときのスペクトル

HWP が 228° 、 320° のときは垂直偏光になっており、出力結合率が高い。閾値が高いため発振しておらず ASE のみ観測された。 268° のときは水平偏光になっており、出力結合率が小さくなるので出力はその周辺の偏光と比較して小さくなるが、レーザー発振をしていることを確認した。後述するが、出力結合率が小さいほどモード弁別性が良いことが知られているため、本研究ではパワーを犠牲にする出力結合率が小さい 268° のときを使用した。

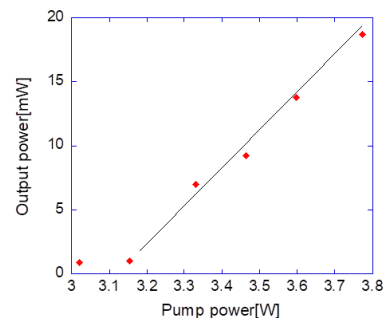


図 12 リング型共振器のパワー特性

図 12 にリング型共振器のパワー特性を示す。出力結合率が小さいので、出力は小さくスロープ効率は 2.8 % と効率が悪いことがわかる。

3.5. リング型共振器の各横モードの繰り返し周波数

図 13 にリング型共振器の各横モードの波長に対する繰り返し周波数の計算された図を示す。これはファイバー長と自由空間長 0.75 m で計算した。

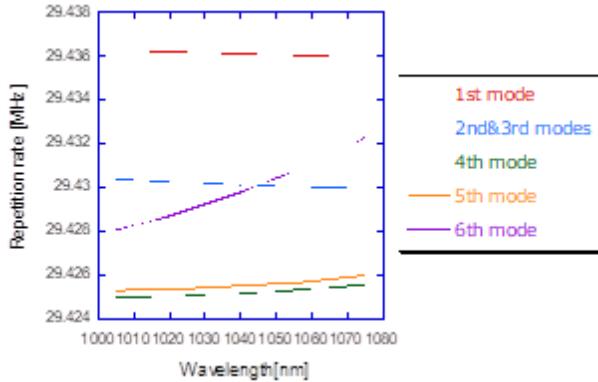


図 13 波長に対する繰り返し周波数 (リング型共振器)

波長 1070 nm における第 1 モードと第 4 モードの繰り返し周波数差は約 10 kHz であった。つまり、モード同期発振する範囲はこの約 10 kHz 以内で起きることを意味する。また、第 1 モードと第 2、3 モードの周波数差は約 6 kHz であった。

3.6. モード弁別性

能動モード同期は変調周波数と共振器を 1 周する周波数が一致したと際に、モード同期発振が起きる。しかし、変調周波数が必ずしも共振器を 1 周する周波数に一致する必要がないことが知られている [3]。引用した論文 [3] の規格化デチューニングは次式である。

$$\Delta = \frac{1}{2\sqrt{2}D_f M_s} \frac{T_d}{\tau_a} \quad (7)$$

ただし、 $T_d = T_M - T_R$ 、 $D_f = \frac{4g}{\omega_0^2}$ 、 $M_s = \frac{M\omega_M^2}{2}$ 、 $\tau_a = \sqrt{\frac{D_f}{M_s}}$

T_M は変調周期、 T_R は共振器の周期、 g は飽和利得、 ω_0 は半値全幅、 M は損失変調の深さ、 ω_M は変調周期の角周波数である。

$\Delta < 2$ となる場合は、異なる縦モード間隔をもつ空間モードが重なり横モード選択はできない。 $\Delta > 2$ となる場合は、ある縦モード間隔に対して発振する空間

モードは一つだけになる。これは任意の空間モードに対して単一励振できることを意味する。

ある n モードの周波数離調 f_d^n は次式で与えられる。

$$f_d^n = f_M - f_R^n \quad (9)$$

$\Delta^n = \Delta_c = 2$ を満たす周波数離調を臨界周波数 f_c と定義する。図 14 に各横モード縦モード位置と横モード選択の簡単な概念図を示す。

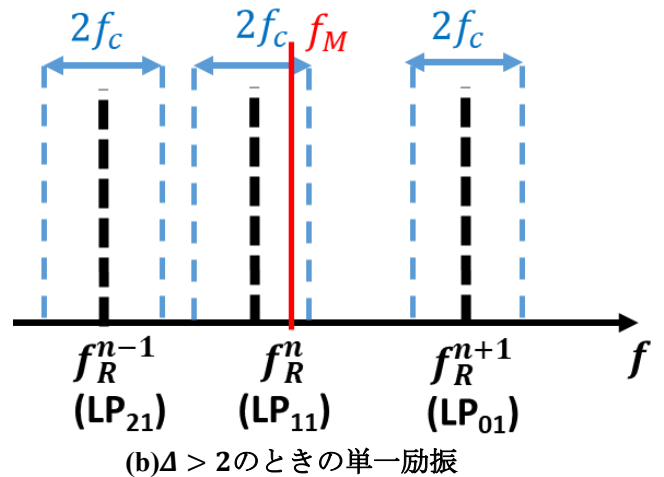
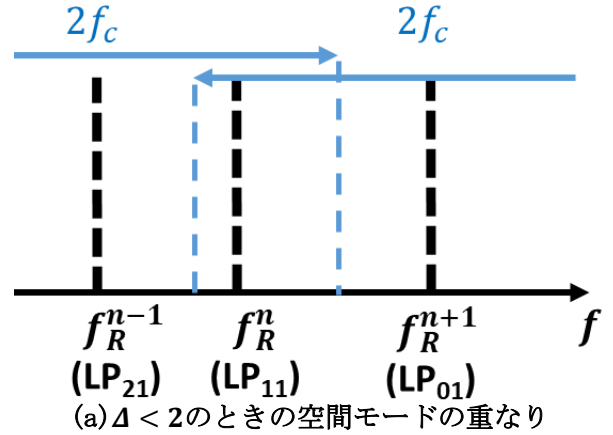


図 14 各横モードの縦モード位置と横モード選択の概念図

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 から臨界周波数 f_c 以内の範囲で繰り返し周波数 f_M の変調を与えてやればよい。ここで図 14(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 $f_R^{n+1} + 2f_c$ に第 n モードの繰り返し周波数 f_R^n が重なってしまうため、第 n モードと同時に第 $n+1$ モードもパルスとして出力されてしまう。したがって単一励振ができないのである。一方、図 14(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 より大きく、第 n モードと第 $n-1$ モードの繰り返し周波数の

差 $f_R^n - f_R^{n-1}$ が f_c より大きい場合を考える。第 n モードがパルス化する周波数範囲 $f_R^n \pm f_c$ に第 $n+1$ モード、第 $n-1$ モードの繰り返し周波数 f_R^{n+1} 、 f_R^{n-1} が重ならず、第 n モードのみをパルス化することができる。これより、単一励振が可能な条件は次式を満たすことである。

$$|f_R^{n+1} - f_R^n| > f_c \quad (n = 1, 2, 3, \dots, 6) \quad (10)$$

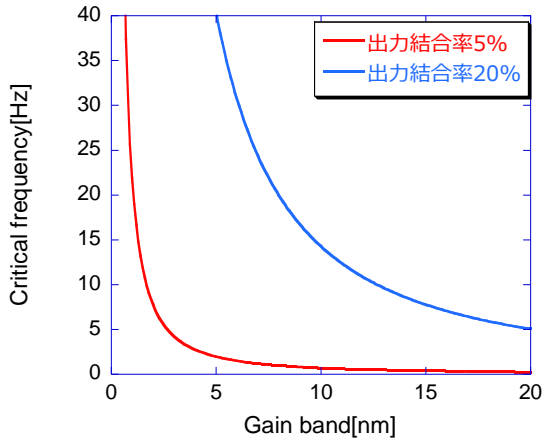


図 15 利得幅に対する臨界周波数

利得幅に対する臨界周波数の計算結果を図 15 に示す。利得幅が大きく、出力結合率が小さいほど臨界周波数が小さくなり、モード弁別性が向上することが分かる。出力結合率 5% の臨界周波数は利得幅 10 nm において 0.69 Hz であった。これは 1070 nm おけるすべての隣り合う横モードの周波数差より小さい値なので、時間領域モード選択は原理上可能であることを示す。

3.7. 時間領域モード選択の結果

図 16 に AOM の変調周波数の違いによる近視野像と時間波形を示す。変調周波数を掃引すると近視野像と時間波形ともに変化していくことがわかる。図 16(b) は LP₁₁ モード、図 16(c) は LP₀₁ モードで主に発振していると考えられる。能動モード同期時のパルス幅は約 5 ns であった。能動モード同期の起きている範囲は約 11 kHz であり、図 13 の計算値約 10 kHz とほぼ一致した。

図 17 はモード同期時の RF スペクトルである。狭い周波数で発振しておりモード同期発振していることがわかる。しかし、緩和発振成分が多いためモード同期が安定していないことがわかる。

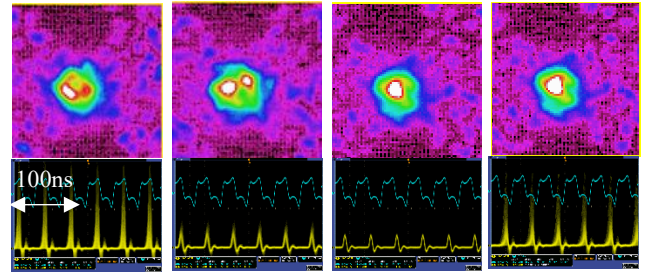


図 16 変調周波数の違いによる近視野像(上)と時間波形(下)(青:gate, 黄:pulse)

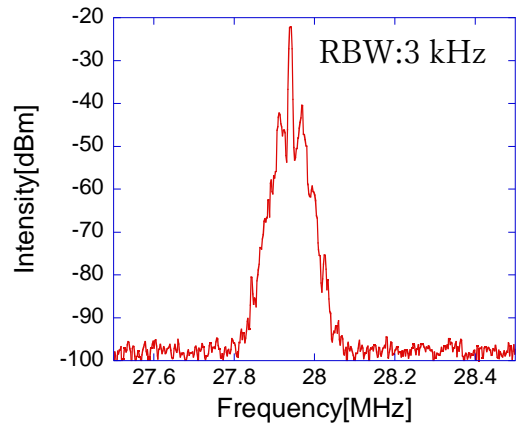


図 17 RF スペクトル

4. まとめ

リング型共振器を作製し、変調周波数を掃引することで横モードが変化することを確認した。またモード同期発振をする変調周波数の範囲が約 11 kHz であり、計算値約 10 kHz とほぼ一致した。この原因として PANDA ファイバーの向きが調整できていないことが考えられ、更なる最適化が必要である。また、モード解析を行うことで定量的な評価もできると考えられる。

参考文献

- [1] G. Fibich and A. L. Gaeta, *Opt. Lett* **25**(5), 335-337 (2000).
- [2] L. G. Wright, D. N. Christodoulides, F. W. Wise, *Science* **358**(6359), 94-97 (2017).
- [3] F.X. Kärtner, D.M. Zumbühl, and N. Matuschek, *Phys. Rev. Lett*, **82**(22), 4428-4431 (1999).