

マルチコアファイバーレーザーの位相同期法の研究

白川(晃) 研究室

佐藤 慶吾

1. はじめに

昨今、高平均出力レーザーの代表格となっているファイバーレーザーは、高効率、高冷却性、コンパクト、メンテナンスフリー、高ビーム品質等の優れた特長を持つ。2002年には世界で初めて単一ファイバーレーザーからの1 kW 出力が報告され、2009年には10 kWの連続発振レーザーが、2013年には100 kWのマルチモードレーザーが製品化される等、目覚ましく進展しており、従来の固体レーザーや炭酸ガスレーザーに変わる産業用レーザーとして注目を浴びている。一方、誘導ラマン散乱や誘導ブリルアン散乱等の非線形光学効果、自己収束効果、ファイバーの母材であるシリカの破壊閾値等によりファイバーレーザーの出力限界が決まってしまう。

更なる高出力・高エネルギー化への手段は、複数のレーザーを位相同期させてビームを重ね合わせるコヒーレントビーム結合(CBC)以外に存在しない。我々は同一ファイバーに複数のコアを持つYb³⁺添加マルチコアフォトニック結晶ファイバー(MCPCF)を用いたCBCの研究を行ってきた。

コアの数と同数個だけ存在するMCPCFの固有モード(スーパーモード)の中には、in-phaseモードと呼ばれるスーパーモードが存在する。このモードは、各コアを伝搬してくる光の位相が全て一致し、遠方で唯一単一のピークにビームが結合されるためにCBCに適している。従ってCBCによるファイバーレーザーの高出力化には、このin-phaseモードを選択的に励振させる必要がある。

本研究は、MCPCFを位相同期させて、in-phaseモードを選択励振する方法(位相同期法)の考案、実証、及び評価を目的としており、今回はエンドシール法と可飽和吸収体を用いた方法の、2つの位相同期法の実証について述べる。

2. MCPCF

2.1. MCPCFの特徴

本研究で用いた6コア、7コアMCPCFの断面写真と各種パラメータを図1に示す。MCPCFはそれぞれのコアが大口径且つシングルモード伝搬可能であり、コア数を増やすことで出力・エネルギー限界を高めることも可能である。更に各コアが近接しており、コア間がエバネッセント結合しているため、位相同期の維持が可能であり、コア数と同数のスーパーモードが励振するといった特徴がある。

この2つの構造上の違いを挙げると、コア数は当然として、円形クラッドである7コアにはスキュー光に対する吸収もれが少々存在する可能性がある一方で、Yb添加濃度は6コアMCPCFの約2.5倍と高濃度とし、短ファイバーであっても励起光の吸収効率は大きい。

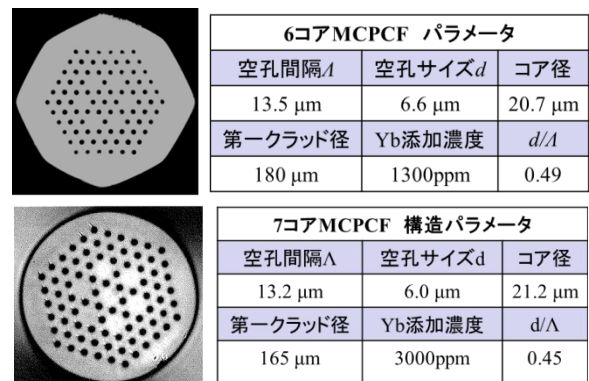


図 1. MCPCF の断面写真と各パラメータ

2.2. スーパーモード

MCPCFにはコアと同数のスーパーモードが励振する(図2)。ファイバー端面付近の電界分布を示したものが近視野像であり、それぞれが干渉しあい、遠方に形成するビーム形状が遠視野像となっている。前述の通り、本研究の目的は6,7コアMCPCFがそれぞれ一つずつ持つin-phaseモードを

優先的に励振させる位相同期法を確立することである。

6 コア MCPCF の in-phase モードは図 2 で示したとおり、近視野にて 6 コア全ての強度分布は等しい。対して 7 コア MCPCF では周りの 6 つのコアとエバネッセント結合する中心コアに光が集中してしまう。この特性により 6 コア MCPCF の in-phase モードの実効モード面積は $A_{eff}=1361 \mu\text{m}^2$ であるのに対して 7 コア MCPCF では $A_{eff}=1183 \mu\text{m}^2$ と、コアが多いにも関わらず 7 コア MCPCF の全モード面積は 6 コア MCPCF を下回る。

また均一な強度分布を有する 6 コア in-phase モードでは、コア数によって出力限界の向上が可能である一方で、7 コア in-phase モードでは電界の集中する中心コアによって出力限界が決まってしまう。更には中心コアの反転分布が早くに枯渇することで空間ホールバーニングが生じ、他のスーパーモードが優先的に励振する問題も生じてくる。このように 7 コアには、中心コアに光が集中することによって生じる欠点がある。しかし後述のエンドシール法を用いた in-phase モードの優勢励振性の計算では、7 コア MCPCF が 6 コアを上回っており、in-phase モード選択性では 7 コアに分がある。

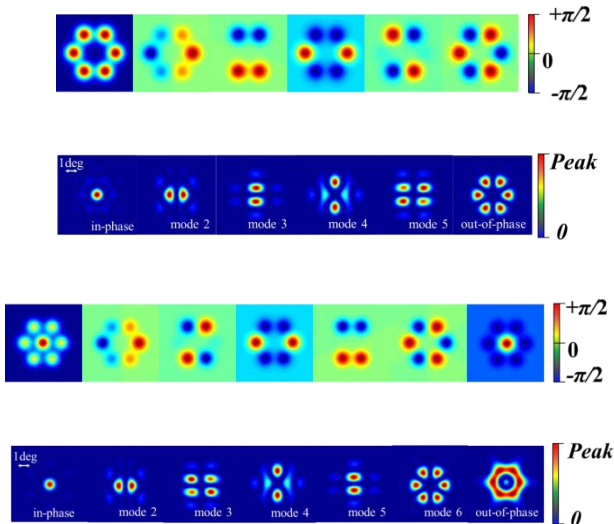


図 2. MCPCF のスーパーモードの計算値 (上から 6 コア近視野, 遠視野, 7 コア近視野, 遠視野)

3. エンドシール法を用いた位相同期

3.1. Talbot 法

位相同期法として広く知られている方法の一つに Talbot 共振器がある。アレイ状光源には、一定周期距離で出射直後の強度分布が再構築される自己イメージングと呼ばれる効果がある[1]。Talbot 共振器は自己イメージングされる距離の半分の距離にミラーを設置することで、自己イメージングを光源に戻すことが出来る(図 3 上)。

加えて、スーパーモードはそれぞれ自己イメージング距離が異なるため、ミラーの位置を調整することで、特定モードと他のモードとの間に損失差を与えることが出来るので、スーパーモードの選択励振を行える。

本研究で考案・実証を行ったエンドシール法(図 3 下)は、MCPCF の空孔構造を熔融消滅し、シールしたエンドシール部と、ファイバー端面のフレネル反射を用いたオールファイバー Talbot 共振器である[2]。

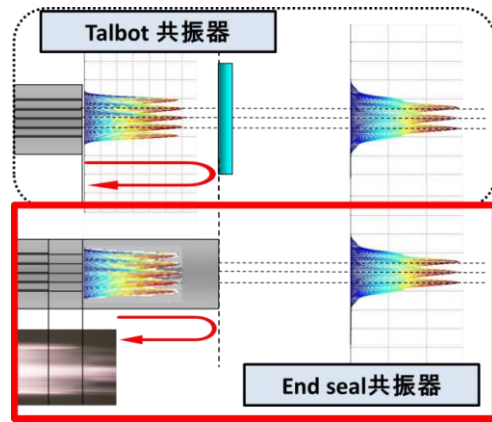


図 3. Talbot 共振器(上)とエンドシール共振器(下)

3.2. エンドシール法

エンドシール法も Talbot 法と同様に、シール長が変わることによって、各スーパーモードの自己イメージが端面で跳ね返され、再びファイバーへ結合される際の効率(再結合効率)が変わる(式 1)。

$$\eta_{ij} = \frac{\left| \iint E_i(x, y, 0) E_j^*(x, y, 2z) dx dy \right|}{\left| \iint E_i(x, y, 0) E_i^*(x, y, 0) dx dy \right|} \quad (1)$$

従って in-phase モードと他のモードに効率差を与えられるシール長に調整することで in-phase モードの選択励振が可能となる。図 4 に示した再結合効率の計算結果からも分かるように、7 コア MCPCF は 6 コア MCPCF よりも in-phase モードの再結合効率が大きく、より選択されやすいと考えられる。エンドシール長の最適化には、研磨を行ってエンドシール部を削り、調整した。

またセラミックヒーターを用いてエンドシール部を作製する際に、空孔が徐々に潰れていく領域が生じる。この領域の存在により、エンドシール法で得られる in-phase モードは、自由空間の理想的な in-phase モードよりもサイドローブが抑制され、更に中心ローブに光が集中するという特長を有する(図 5)。従って実測したビームプロファイル内の in-phase モード占有率は、中心ローブ内にどれだけ光が集中しているか(中心ローブ比)で評価した(図 6)。

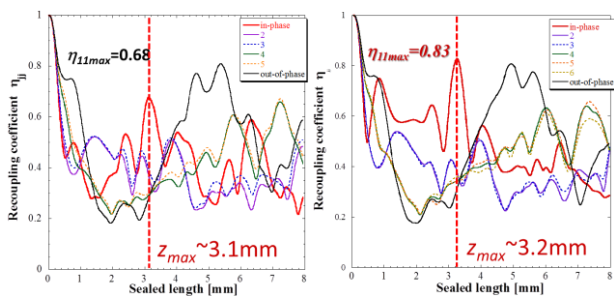


図 4. 再結合効率のエンドシール長依存性
6 コア MCPCF(左), 7 コア MCPCF(右)

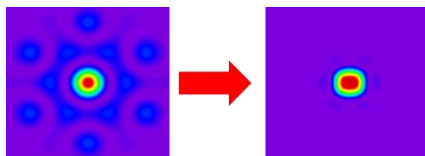


図 5. in-phase モードの遠視野像の計算値
一般の形状(左)と、エンドシール法での形状(右)

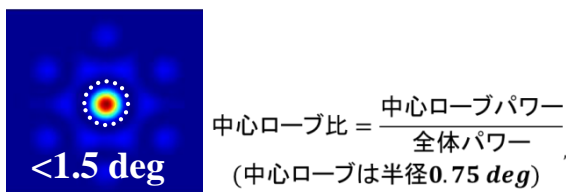


図 6. 中心ローブ比の定義

3.3. 位相同期 MCPCF レーザーの連続発振

発振光学系を図 7 に示す。エンドシール側端面と反対側自由空間に設置したダイクロイックミラー(DM)で共振器を構築した。当研究室の先行研究により MCPCF レーザーの出射光には幾つか問題があった。両端出射ではパワーが均一に出射されないことや、シールを施していない側からの出射がマルチモード化するなどである。これを片側出射とすることで解決した。しかし少々効率の減少も見られた。結果は表 1 にまとめた。図 5 の左図に示した直接出射における理想的な in-phase モードは、中心ローブ比で評価すると 0.37 程度となる。本研究で得られた結果はそれよりも 1.5 倍以上、中心に光が集まっていることを示している。なお 6 コアでの結果は MCPCF が揺れていたために、ビームプロファイルが一時的に良くはない形となった。

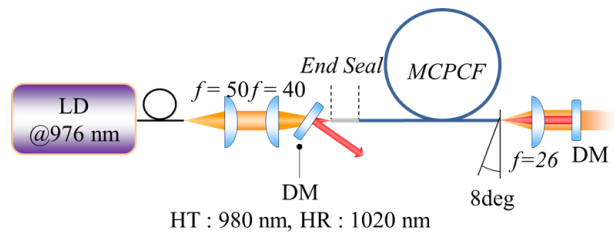


図 7. MCPCF の位相同期連続発振光学系

表 1. エンドシール MCPCF 連続発振の評価

位相同期連続発振	6コア	7コア
スロープ効率	67%	75%
最大励起時(15 W)中心ローブ比	0.62	0.70
最大励起時(15 W)ビームプロファイル		

3.4. 位相同期能動 Q スイッチ MCPCF レーザー

本研究ではエンドシール法がパルス動作時でも有効であるかの実証と、Q スイッチパルス発振に最適のファイバー長を得るための研究も行っており、以前から異なるファイバー長における位相同期能動 Q スイッチパルス発振の結果を報告してきた[3]。今回は更なる最適化を行った。

光学系を図 8 に示す。連続発振時の自由空間に偏光を利用した能動 Q スイッチ動作部を加えた形となっている。結果は図 9 にまとめる。中心ローブ比が 0.8 以上とこちらも大きく、連続発振、Q スイッチ動作の両方で、エンドシール法を用いた位相同期発振が可能であることが示された結果となった。

最後に本研究で報告してきた異なるファイバー長での結果を表 2 に示す。ファイバーレーザーをはじめとした長い共振器長における Q スイッチパルス発振では、Q 値の立ち上がりに対して、光の共振器内往復時間が十分に長くなると、パルス波形は本研究のようなマルチピークを持つことが報告されている[4]。従って、MCPCF パルスレーザーの高尖頭出力化にはファイバー長を短くすることが求められる。ファイバー長を短くすることにより、共振器寿命を減少させてマルチピークの間隔を狭めることで、全体のパルス幅を短くすることができるためである。

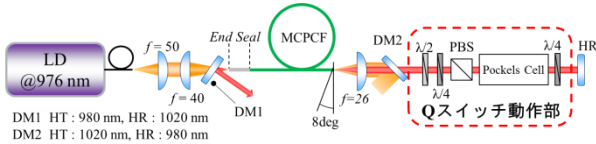


図 8.6 コア MCPCF の能動 Q スイッチ発振

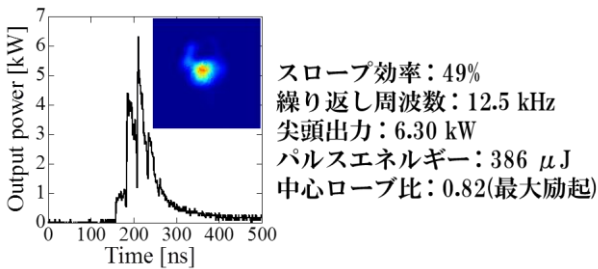


図 9. 位相同期能動 Q スイッチ発振の出力評価

表 2.6 コア MCPCF のファイバー長の最適化

ファイバー長[m]	3.6	2.4	2.0
繰り返し周波数[kHz]	20	12.5	25
スローブ効率	0.62	0.49	0.52
尖頭出力[kW]	5.50	6.30	7.40
パルスエネルギー[μJ]	276	386	227

4. 可飽和吸収体を用いた位相同期

4.1. 新たな位相同期法の提案

Q 値変調器として可飽和吸収体(SA)を用いた受動 Q スイッチパルス発振は広く知られている。本研究はこれに加えて、スーパーモードの遠視野における強度差と可飽和吸収特性を利用した in-phase モードの優勢励振を、SA 一つで同時に実現する方法を新たに提案した。

図 10 に示したイメージのように、可飽和吸収特性を利用することで、6 コア MCPCF のスーパーモードの遠視野の中で最も強度が大きい in-phase モードの透過率は大きくなる一方で、他のスーパーモードは吸収されて透過率が低くなる、一種のソフトアパーチャーとして SA を動作させることで、in-phase モードの優先的な出力が可能になると考えた。

前章で述べたエンドシール法は、高尖頭出力、高エネルギー、in-phase モードの強度依存性が小さいといったメリットがある一方で、スーパーモード選択部には複雑な加工が必要であり、また Q スイッチ動作部には Pockels cell を始めとする高コストの素子が必要となるデメリットが存在する。その点、ただ一つ結晶を設置するだけで in-phase モードの選択と Q スイッチ動作を行える可能性がある SA を用いた手法は、簡単且つ低コストであり大きなメリットとなると期待できる。

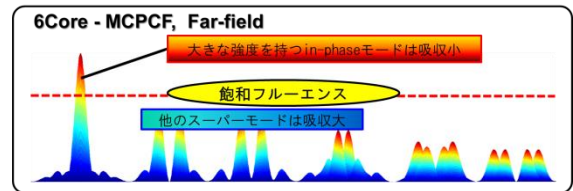


図 10. 可飽和吸収体を用いた位相同期のイメージ

4.2. スーパーモードの Cr:YAG 透過率の見積

SA を用いた in-phase モードの優勢励振は実際に可能なのか、計算による見積もりを行った結果を図 11 に示す。この計算は本研究で用いた SA である Cr⁴⁺:Y₃Al₅O₁₂(Cr:YAG)に、ガウシアンパルス(パルス幅 500 ns)が入射したと仮定した際の、各スー

パーモードの遠視野の Cr:YAG 透過率を示したものである[5-8]。低入射エネルギー時は in-phase モードの透過率が最も高くなるが、高入射エネルギーになるにつれ、他のスーパーモードの透過率も上昇し、in-phase モードの優勢励振性が失われることも示される結果となった。

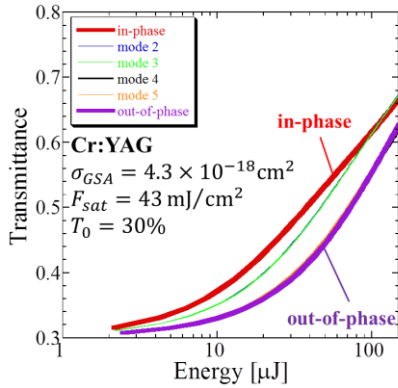


図 11. スーパーモードの Cr:YAG 透過率の
入射エネルギー依存性の例

4.3. 位相同期受動 Q スイッチ MCPCF レーザー

発振光学系を図 12 に示す。6 コア MCPCF 励起側端面に近接配置したダイクロイックミラー (DM1) と自由空間に設置した出力透過鏡 (OC) で共振器を構築した。MCPCF と OC の間の 3 枚のレンズを用いて Cr:YAG に入射する遠視野像の大きさの変更が可能な縮小光学系を構築した (図 13)。また、この光学系で得られるビームプロファイルはエンドシール法を用いていないため、図 5 で示したサイドローブを有する in-phase モードが出力されるために評価法も異なるものを用いた。今回はストレール比を用いて、ビームプロファイル内の in-phase モード占有率を評価した (図 14)[9]。結果を表 3 と図 15 にまとめる。3 枚目のレンズを $f=18$ mm とし、初期透過率 $T_0 = 30\%$ の無コートの Cr:YAG と透過率 $T_{OC} = 30\%$ の OC を用いた結果を青色で、同じく $T_0 = 50\%$ (AR 付), $T_{OC} = 50\%$ に変更した際の結果を赤色でそれぞれ記した。スロープ効率はそれぞれ 10%, 17% であった。ストレール比が減少したのは図 11 で示された通り、他のス

ーパーモードの透過率が上昇したことで熱レンズ効果によるものと考えられる。

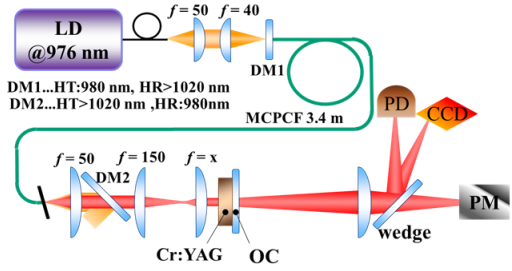


図 12. 位相同期受動 Q スイッチ MCPCF レーザー

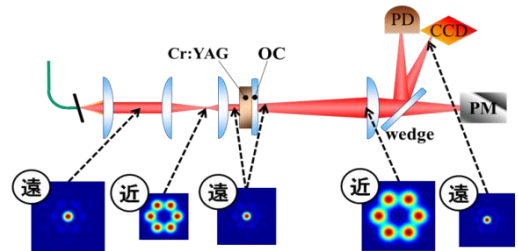


図 13. in-phase モードの近視野・遠視野の変遷

$$S = \frac{I_{Max}^{in-phase}}{I_{Max}^{in-phase} / \iint I dx dy} = \frac{\text{実測値のピークパワー} / \text{全体パワー}}{\text{計算値のピークパワー} / \text{全体パワー}}$$

図 14. ストレール比を用いた評価の定義

表 3. MCPCF の受動 Q スイッチ動作 ($f=18.4$ mm)

T_0 & T_{OC} (Pump power)	Peak power	Pulse pnergy	Pulse width	Rapetition rate
30% & 30% (19 W)	39.9 W	9.6 μJ	260 ns	145 kHz
30% & 30% (15 W)	17.4 W	7.5 μJ	310 ns	120 kHz
50% & 50% (15 W)	62.9 W	10.6 μJ	410 ns	180 kHz
50% & 50% (6.8 W)	20.5 W	6.9 μJ	790 ns	70 kHz

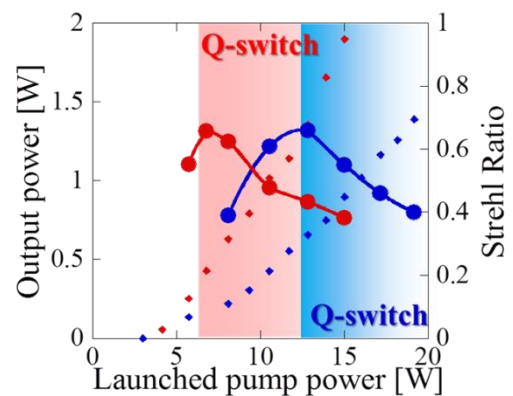


図 15. 出力特性とストレール比を用いた比較

4.4. パラメータ変更による光学系の最適化

前項の 50%&50%は 30%&30%に比べ、出力が上回った一方で、ストレール比の減少も早まった。そこで高出力時においても高いストレール比の動作が行われるよう、本研究の光学系の最適化を行った。Cr:YAG による損失の影響を知るため、 T_0 を変更した際の、出力とストレール比の変化の測定も行った。更に、その中で最も効率が良かった 50%&50%の組み合わせと、図 13 の 3 枚目のレンズに異なる焦点距離を持つレンズ $f=26, 31.25$ mm を用いて、Cr:YAG に入射するビーム径の変更を行った。結果を図 16 に示す。ビーム径が広がることでストレール比が極大点をむかえるために必要なエネルギーも増えると考えていたが、外部素子のアライメントの影響を受けたためか予想は外れた。一方、スーパーモード間の Cr:YAG の飽和フルエンス超えに必要なエネルギー差が広がったためか、 $f=31.25$ mm, 励起 5.7 W 前後で、本研究開始以来の最高値である 0.81 の in-phase モードの選択励振が得られた(図 17)。

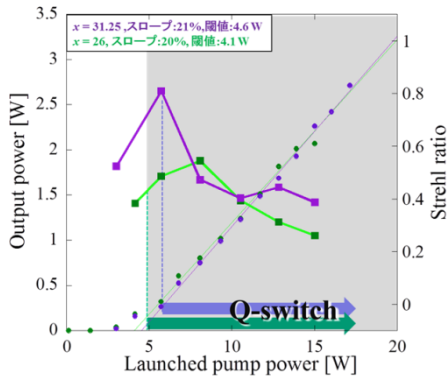


図 16. 異なるビーム径での出力とストレール比

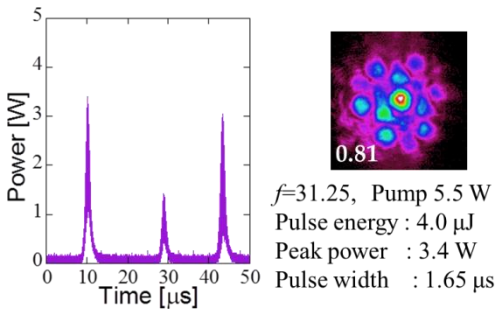


図 17. SA を用いた位相同期受動 Q スイッチ MCPCF レーザー

5. 纏め

5.1. 結論と今後の展望

MCPCF のスーパーモードの一つである in-phase モードを優勢励振するために、エンドシール共振器、及び可飽和吸収体 Cr:YAG を用いる 2 つの位相同期法を実証した。詳細は各項を参照していただきたい。最後に 2 つの位相同期法の比較を簡単に表 4 にまとめた。尤も、始めて間もない世界初の方法である SA を用いた方法は、多くの改善の余地がある。更に両方の方法で in-phase モード以外のスーパーモードの含有率を測定できてはいない。そこで新たに、位相フィルターにスーパーモードの近視野像を透過させることで、各スーパーモードの含有率を識別する評価法を構想中である。

表 4. 2 つの位相同期法の比較

	エンドシール法	可飽和吸収体
スーパーモード 選択部	ファイバーの加熱と 端面研磨が必要	設置するだけ
Qスイッチ 動作部	Pockels cellやPBS 複数の波長板も必要	設置するだけ
アライメント	アライメントフリー	難しい
in-phase モード選択	励起強度の上昇に依らず 安定して選択可能	励起強度の上昇に依り、 高次モードが励振
尖頭出力	均一	不均一
パルス間隔	制御可能だが 寄生発振も生じる	強度依存性有り

5.2. 参考文献

- [1] 神成文彦 他, レーザー研究 **28**, 4, pp.214, 2000.
- [2] M. Matsumoto, et al., in *Advances in Optical Materials*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper AMC3, 2011.
- [3] 山田英典, 電気通信大学 修士論文, 2013.
- [4] S. Adachi, *J. Lightwave Technol.* **20**, 8, pp.1506, 2002.
- [5] H. Ridderbusch, et al., *IEEE J. Quantum Electron.* **43**, 2, pp.168, 2007.
- [6] H. Sakai, et al. *IEICE*. **102**, 386, pp.31, 2002.
- [7] G. J. Spühler et al., *JOSA B*. **16**, 3, pp.376, 1999.
- [8] N. Pavel, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, pp.1253, 2001.
- [9] 小林哲也, 電気通信大学, 修士論文, 2009.