

フォトリックバンドギャップファイバーによる 誘導ラマン散乱抑制パルス増幅

白川研究室 鈴木 悠太

1. 背景・目的

ファイバーレーザーの出力限界は、非線形散乱やファイバーの破壊閾値、自己収束限界などによって決まる。Fig.1 にファイバーパルスレーザーの出力限界について示す。Fig.1 より、誘導ブリルアン散乱(SBS)が最初に出力限界を与えるが、SBS はパルス幅などに大きく依存しているため、多くの場合において、ファイバーレーザーの出力限界を決めるのは誘導ラマン散乱(SRS)によるものである。ファイバーの大モード面積化により、ファイバーの破壊閾値や非線形光学効果の発生閾値を向上させ、SRS の抑制が可能となる。したがって、高出力ファイバーレーザーへの有効な手段となる。しかし、ファイバーの大モード面積化による SRS 抑制はファイバーレーザー本来のもつ取り回しの良さや、冷却性能を損ねてしまう。一方で、信号光によって誘起されるラマン利得帯をフィルタリングによって抑制し、信号光のみを透過させることで、コア径を変えずに SRS を抑制することが可能である。

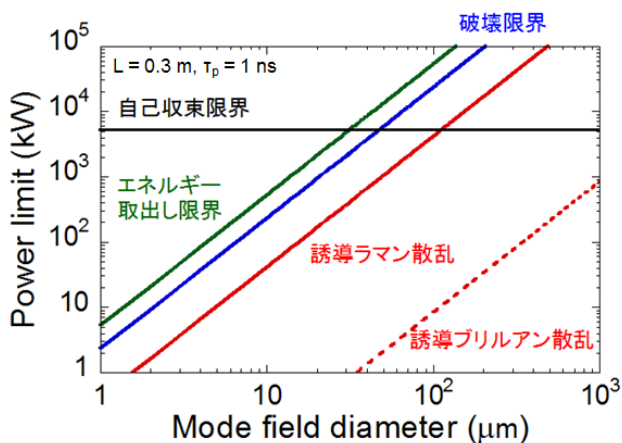


Fig. 1 ファイバーパルスレーザーの出力限界

フォトリックバンドギャップファイバー(PBGF)は、その周期的な屈折率構造によってコアを伝搬する光の波長をコントロールすることが可能である。すなわち、バンドパスフィルターとしてはたらく。このフィルタリングによる抑制は、信号光に対して高透過、ラマン利得帯に対して高損失、透過バンド帯端がシャープである必要がある。PBGF はこれらの条件を満たしており、近年パッシブファイバーでの報告がされてい

る[1][2]。しかし、報告例はまだ少なく、アクティブファイバーでの報告はされていない。

そこで、本研究では Yb³⁺添加 PBGF(Yb-PBGF)の透過特性を用いて、信号光を高透過、ラマン利得帯を高損失として SRS の抑制高尖頭出力パルス増幅を行った。また、SRS 臨界パワーはピークパワーにより決定されるため、パルス増幅を行うことにより Yb-PBGF の SRS 抑制効果の評価を行った。

2. 原理

2-1. 誘導ラマン散乱

ある周波数をもつ光ビームが非線形媒質を伝搬するとき、エネルギーの一部が異なった周波数にシフトした光に移される。この現象をラマン散乱といい、周波数のシフトした光をストークス光という。この現象は量子力学的に考えた場合、非線形媒質に入射した光子が媒質の分子によって周波数の小さな光子へ散乱されて、それと同時にエネルギーの大きい分子の振動状態に遷移する過程として説明できる。そのため、シフトする周波数はその媒質の分子の振動モードの持つ運動エネルギーによって決められる。そして、ある閾値を超える非常に強い信号光が入射したときに、その信号光がラマン散乱の励起光となり、ストークス光が媒質の中で非線形的に成長し、信号光のエネルギーの大部分がストークス光として現れるようになる。この現象を SRS という。一般に SRS 臨界パワーは(1)式で与えられる。

$$P_{SRS}^{CR}(\lambda) = 16 \frac{A_{eff}}{f_p g_R(\lambda) L_{eff}} \quad (1)$$

ここで、 P_{SRS}^{CR} は SRS 臨界パワー、 A_{eff} は有効コア断面積、 f_p は偏光因子、 g_R はラマン利得係数、 L_{eff} は有効ファイバー長である。 g_R は物質により大きく異なっており、一般にファイバーのコアの成分に依存している。励起波長 1064 nm におけるシリカのシングルモードファイバーで測定されたラマン利得スペクトルを Fig.2 に示す。

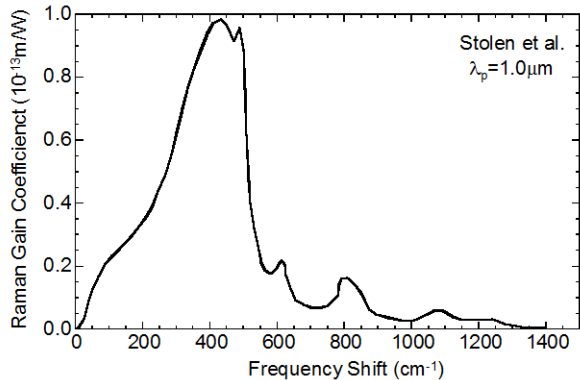


Fig. 2 ラマン利得スペクトル

2-2. Yb³⁺添加フォトニックバンドギャップファイバー

Fig.3 にステップインデックスファイバーとソリッドコア PBGF の断面構造と屈折率分布を示す。通常用いられるファイバーはコアの屈折率をクラッドの屈折率よりも大きくすることによって、全反射を用いて光の閉じ込めを行う。一方で PBGF のコアの屈折率は周りの屈折率と同じである。したがって、本来であればコアに光は閉じ込められない。逆に、高屈折率ロッドの屈折率は周りに比べ高いため光を良く閉じ込める。しかし、コアの周りに周期的に高屈折率ロッドを配置することにより、フォトニックバンドギャップ (PBG)が生じる。よって、コアを伝搬する光はブラッグ条件を満たす光のみが閉じ込められる。したがって、伝搬する光には波長依存性がある。PBG は高屈折率ロッドの径や大きさを変えることにより、調整することが可能である[3]。

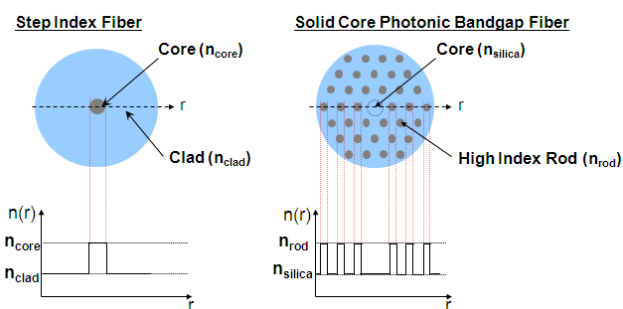


Fig. 3 ファイバーの屈折率分布

本研究で用いた PBGF の断面を Fig.4 に示す。コアに Yb³⁺が添加されており、アクティブファイバー、バンドパスフィルターとしてはたらく。高屈折率ロッドとして Ge を添加したロッドが周期的に配置されて

いる。偏波保持のためコアの左右2つのロッドには B を添加したロッドが配置されている。また、周囲にはエアクラッドが配置されており、ダブルクラッド構造となっている。

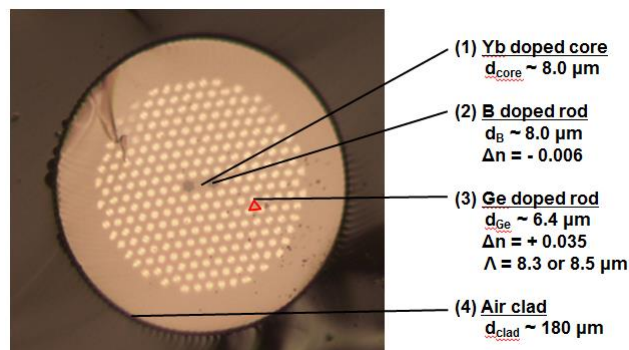


Fig. 4 Yb-PBGF の断面

この Yb-PBGF に白色光を伝搬させたときの透過スペクトルと波長 1064 nm によるシリカファイバーのラマン利得スペクトルを Fig.5 に示す。Fig.5 から分かるように PBGF は曲率によって透過帯を調整することが可能である。これは、曲げることによって応力が変化し、屈折率が変化するためである。したがって、この特性を利用して、信号光に対して高透過、ラマン利得帯に対して高損失となるように調整することが可能である。ここで、曲率を変えても短波長側に変化が見られないのは、Yb の吸収によってカットオフが決められているからである。

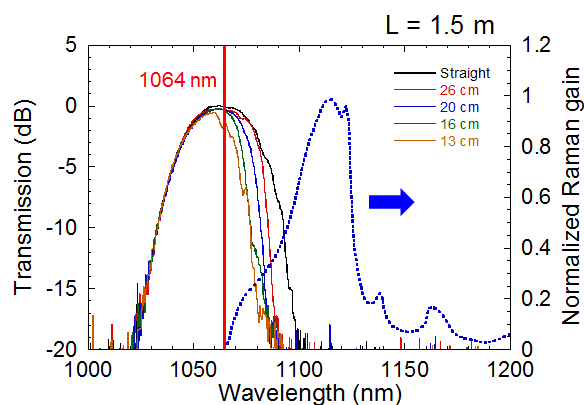


Fig. 5 Yb-PBGF の透過スペクトルと波長 1064 nm によって発生するシリカのラマン利得

Fig.5 に示したように Yb-PBGF を用いることでラマン利得帯に損失を与えることができる。したがって、(1)式で与えられていた SRS 臨界パワーに PBG による損失項を加えることができ、(2)式に示すように SRS

臨界パワーが向上する。

$$P_{SRS}^{CR}(\lambda) = 16 \frac{A_{eff}}{f_p g_R(\lambda) L_{eff}} + \frac{\alpha_{PBG}(\lambda) A_{eff}}{g_R(\lambda)} \quad (2)$$

したがって、Fig5 と(1)、(2)式よりファイバー長 7 m、前方励起時の SRS 臨界パワーを求めると、Fig.6 で表わされる。

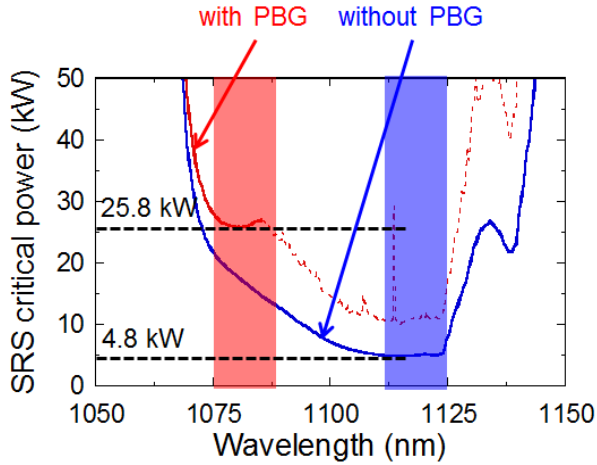


Fig. 6 前方励起時の SRS 臨界パワー ($L_{eff} = 4 \text{ m}$)

Fig.6 より、SRS 臨界パワーは PBG 構造を持たないファイバーで 4.8 kW、一方で Yb-PBGF は 25.8 kW であると見積もられる。したがって、約 7 dB の抑制効果が期待できると考えられる。また、ストークス波長は PBG 構造を持たないファイバーに比べ、短波長側へシフトする。この波長は PBG の長波長側のカットオフで決められる。

3. Q スイッチレーザーを用いた増幅

3-1. シード光源(1)

パルスシード光源としてマイクロチップ Q スイッチレーザーを作製し、それを増幅したものを用いた。受動マイクロチップ Q スイッチレーザーと増幅器をそれぞれ Fig.7 と Fig.8 に示す。

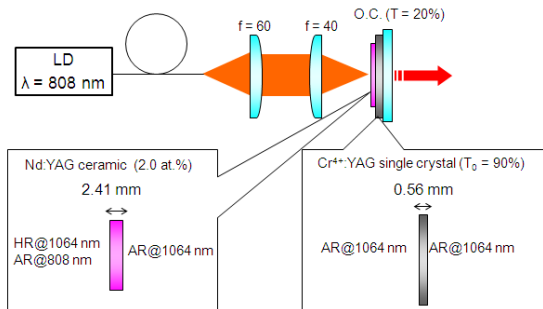


Fig. 7 マイクロチップ Q スイッチレーザー

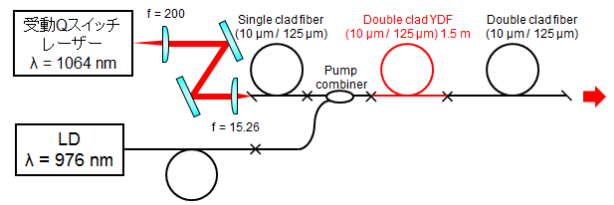


Fig. 8 前置増幅器

レーザー媒質として Nd:YAG を可飽和吸収体として Cr⁴⁺:YAG を用いて、マイクロチップ Q スイッチレーザーを構築した。パルスを安定させるために単一周波数動作となるように、共振器長を可能な限り短くすることで、縦モード間隔を広げ、パルス幅を音響フォノンの寿命である 10 ns よりも十分に短くした。これにより、単一周波数で動作しても SRS が発生しないようにした。この Q スイッチレーザーをシード光源として、Yb 添加ダブルクラッドファイバーを前方励起することで増幅した。このとき平均パワー 600 mW、ピークパワー 12.6 kW、パルス幅 1.9 ns、繰り返し周波数 25 kHz であった。スペクトルとパルスの時間波形をそれぞれ Fig.9 と Fig.10 に示す。

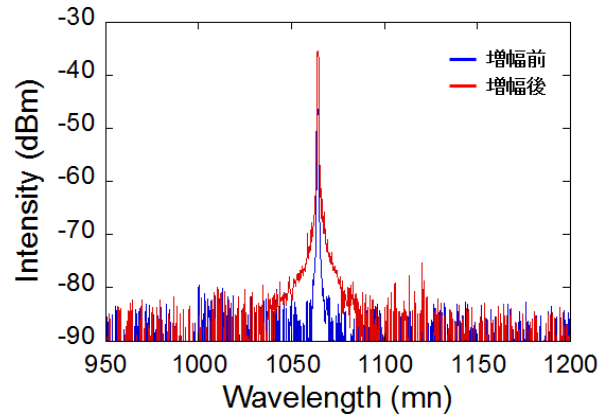


Fig. 9 シード光源のスペクトル(1)

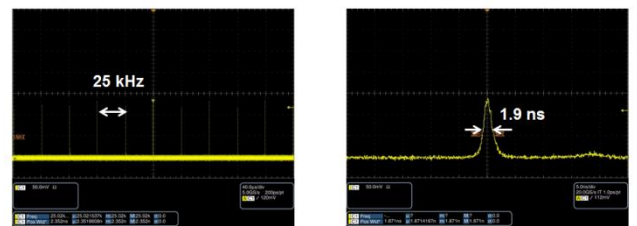


Fig. 10 シード光源のパルス時間波形(1)

3-2. PBGF 増幅器(1)

作製したシード光源を用いて増幅器を作製した。増幅器を Fig. 11 に示す。

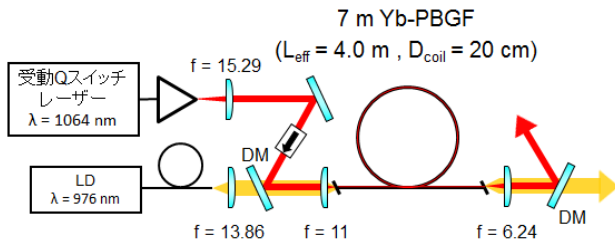


Fig. 11 Yb-PBGF 増幅器(1)

7 m の Yb-PBGF を波長 976 nm のファイバー結合型 LD で前方励起することによって増幅を行った。このときの増幅出力特性を Fig. 12 に示す。増幅の途中で寄生発振が発生してしまったため、出力に制限が与えられてしまった。寄生発振前後のスペクトルとパルスの時間波形をそれぞれ Fig.12 と Fig.13 に示す。ここで、増幅出力特性における信号光のピークパワーは、Fig.12 より ASE と寄生発振の割合を考慮した平均パワーとパルス幅、繰り返し周波数から算出している。

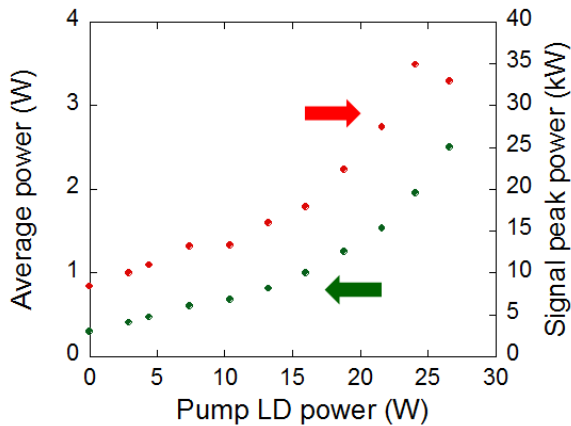


Fig. 11 増幅出力特性(1)

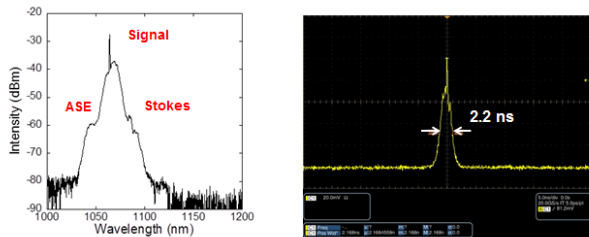


Fig. 12 寄生発振前のスペクトルとパルスの時間波形($P_{pump} = 24.1 \text{ W}$)

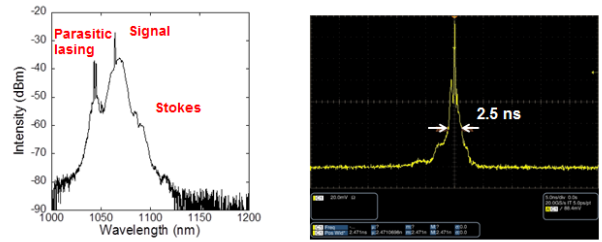


Fig. 13 寄生発振後のスペクトルとパルスの時間波形($P_{pump} = 26.6 \text{ W}$)

励起パワー24.1 W のとき、最大となるピークパワーが得られた。このときピークパワー34.9 kW、パルス幅 2.2 ns、繰り返し周波数 25 kHz であった。このとき、Fig.12 より SRS は発生していないことが分かる。計算値により求められた PBG 構造を持たないファイバーでの SRS 臨界パワーは 4.8 kW である。したがって、8.6 dB 以上の抑制効果があることが分かった。一方で、計算値によると Yb-PBGF の SRS 臨界パワーは 25.8 kW であると思われていた。しかし、今回得られたピークパワーはその値を上回る。これは、Fig.5 の透過スペクトルが白色光を透過させて得られたものであり、添加してある Yb により正確な損失が求められなかったためであると考えられる。また、今回の増幅において出力を制限したのは寄生発振によるものであるため、寄生発振を抑制すれば更なる高尖頭出力化が可能であると考えられる。

4. 高繰り返し周波数光源を用いた増幅

4-1. シード光源(2)

寄生発振が発生した原因として、パルスとパルス間で利得が増加し、それが寄生発振の発生閾値に達してしまったためであると考えられる。そのため、繰り返し周波数を向上させることにより寄生発振の抑制を行った。Fig.14 に新たに作製したシード光源を示す。

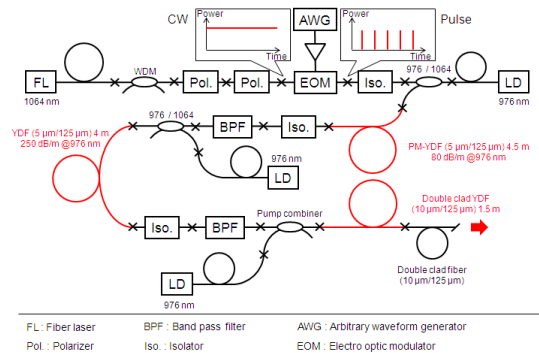


Fig. 14 高繰り返し周波数シード光源

シード光源として CW 発振のファイバーレーザーを用いた。インラインポライザによって単一偏光とした後に、電気光学変調器(EOM)によって強度変調させてパルス状に切り出した。印加信号として任意波形ジェネレータを用いて、パルス幅 2 ns、繰り返し周波数 500 kHz の矩形波の RF 信号を与えている。その後、3 段の増幅器を用いて増幅した。このとき、平均パワー 900 mW、ピークパワー 0.9 kW、パルス幅 2 ns、繰り返し周波数 500 kHz であった。スペクトルとパルスの時間波形を Fig.15 と Fig.16 にそれぞれ示す。

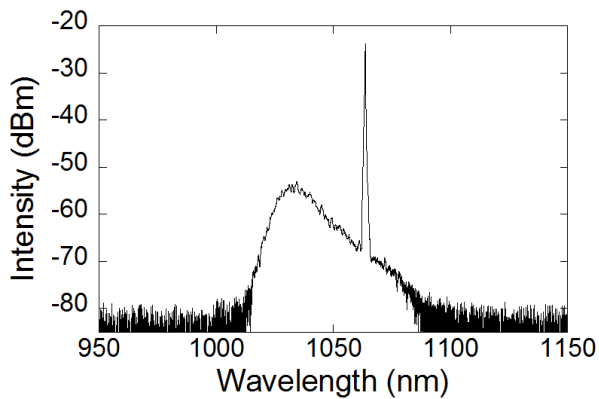


Fig. 15 シード光源のスペクトル(2)

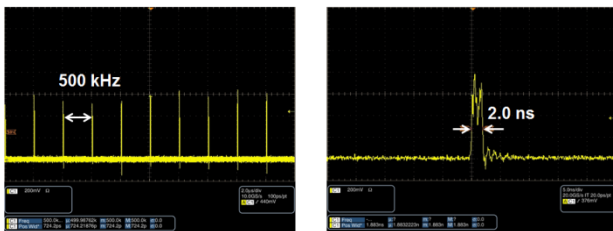


Fig. 16 シード光源のパルス時間波形(2)

Q スイッチレーザーと比較し、20 倍の繰り返し周波数を得ることができた。そのため、寄生発振の抑制が期待できる。

4-2. PBGF 増幅器(2)

作製したシード光源を用いて増幅器を作製した。増幅器を Fig. 17 に示す。Fig.15 に示したように、信号光の短波長側に ASE が発生したため、バンドパスフィルター(BPF)を用いて抑制している。BPF 透過後のシード光のスペクトルとパルスの時間波形を Fig.18 に示す。このときの平均パワーは 550 mW であった。

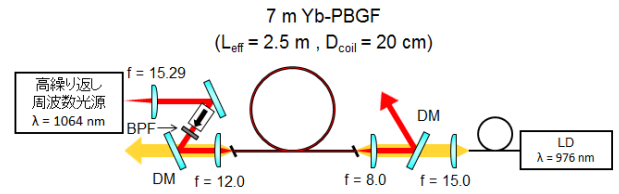


Fig. 17 Yb-PBGF 増幅器(2)

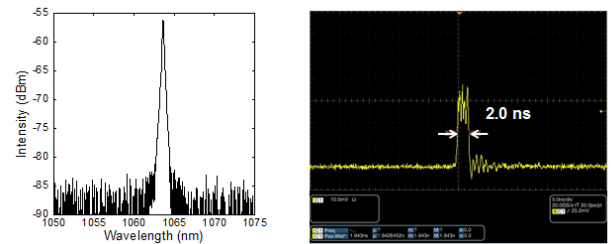


Fig. 18 バンドパスフィルタ透過後のスペクトルとパルスの時間波形

3-2 では前方励起により増幅を行ったが、励起光の熱により、シード光と Yb-PBGF のコアとの結合効率が低下してしまう問題が発生したため、今回は後方励起することで増幅を行った。また、励起光源として、最大出力 100 W のファイバー結合型 LD に変更した。このときの増幅出力特性と最大ピークパワー時のスペクトルとパルスの時間波形をそれぞれ Fig. 19 と Fig.20 に示す。

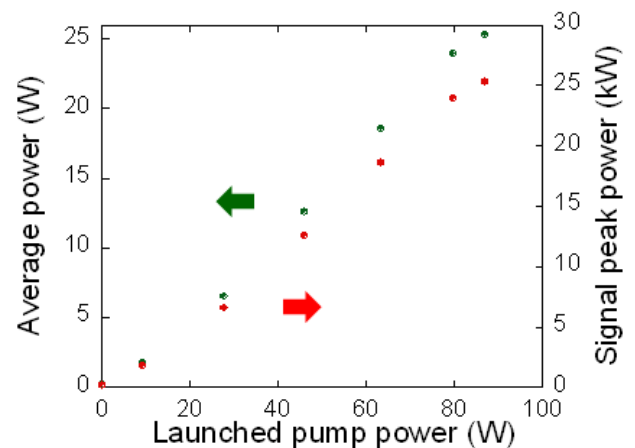


Fig. 19 増幅出力特性(2)

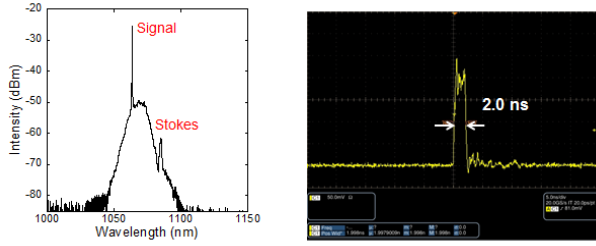


Fig. 20 最大ピークパワー時のスペクトルとパルスの時間波形

最大励起パワー時に最大ピークパワーが得られた。このとき平均パワー25.3 W、ピークパワー25.3 kW、パルス幅 2 ns、繰り返し周波数 500 kHz であった。Fig.20 より SRS も寄生発振も発生していない事が分かる。今回の増幅では、3-2 の増幅と比較し、8 倍以上の高平均出力化に成功した。

5. 変調不安定性

増幅の際に、変調不安定性によるサイドバンドが観測された。これは、本研究で用いた Yb-PBGF が波長 1064 nm に対して負の分散を持つためである。低励起パワー時のスペクトルを Fig.21 に示す。

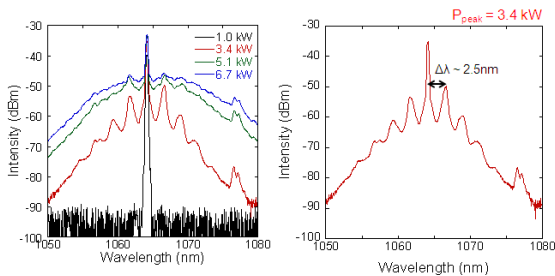


Fig. 21 低励起パワー時の増幅スペクトル

Fig.21 に示したピークパワー3.4 kW のときのスペクトルピーク間隔 $\Delta\lambda \sim 2.5$ nm から群速度分散 β_2 の値を求めることが可能である。 β_2 は(3)式で表される。

$$\beta_2 = -\frac{2\gamma P_{peak}}{(\Delta\omega)^2} \quad (3)$$

ここで、 P_{peak} はピークパワー、 $\Delta\omega$ はスペクトルのピークの周波数間隔、 γ は自己位相変調を引き起こす非線形パラメータであり、(4)式で与えられる。

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \approx 2.46 \text{ (kW}^{-1}\text{m}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

したがって、(3)、(4)式から β_2 の値を求めると約-970 ps²/km である。

一般に PBGF の分散は透過バンド帯の長波長側は負の分散、短波長側は正の分散をもつ[4]。今回の増幅において、SRS 抑制を行うために可能な限り信号光を透過帯の長波長側となるように調整しているため、このように変調不安定性が観測されたと考えられる。したがって、SRS 抑制と変調不安定性にはトレードオフの関係があることが分かる。変調不安定性は信号光に対して変調を与えるため、パルスエネルギーには影響を与えない。

6. まとめ・今後の展望

Yb-PBGF を用いて SRS を抑制したパルス増幅を行った。シード光源としてマイクロチップ Q スイッチレーザーを増幅させたものを用いた。前方励起で増幅し、最大ピークパワー34.9 kW が得られた。このとき SRS は発生しなかった。したがって、8.6 dB の SRS 抑制に成功した。しかし、寄生発振により出力が制限されてしまった。次に寄生発振抑制のため、EOM を用いて、繰り返し周波数 500 kHz のシード光源を作製した。後方励起で増幅し、最大励起パワーにおいても寄生発振は観測されず、SRS フリーで高尖頭出力増幅に成功した。このとき、平均パワー25.3 W であった。また、変調不安定性が観測された。

今後はシード光源とファイバー長の最適化を行うことで更なる高尖頭出力化や、Yb-PBGF の透過スペクトルの精密測定や、透過バンドにおける各波長帯の分散の評価を行い、これを定量的に評価したい。また、今回 SRS 抑制効果の比較対象が計算値であったため、正確な抑制効果の評価することが難しい。したがって、同様の有効コア断面積、有効ファイバー長をもつファイバーとの比較を行いたい。将来的には、大モード面積化により更なる高尖頭出力化、高エネルギー化を目指す。

参考文献

- [1] T. Taru, et. al., "Raman gain suppression in all-solid photonic bandgap fiber," in: European Conference and Exhibition on Optical Communication, (2007), Paper 7.1.1, Berlin, (2007).
- [2] S. Blin, et. al., "Design of all-solid photonic-bandgap fibers for Raman-free propagation," in: Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe, (2009), Paper CJ1.5, Munich, (2009).
- [3] A. Shirakawa, et. al., "High power ytterbium fiber lasers at extremely long wavelengths by photonic bandgap fiber technology," Opt. Fiber Tech. **16**, 449 (2010)
- [4] J. K. Lyngsø, et. al., "Stress induced birefringence in hybrid TIR/PBG guiding solid photonic crystal fibers," Opt. Express, **18**, 13 (2010)