

フォトリックバンドギャップファイバー増幅のための ナノ秒パルスファイバー光源の作製

白川研究室 八木澤大希

1. はじめに

ファイバーレーザーは、高冷却性、低損失伝搬、高利得などの多くの優れた特徴を有している。その特徴から、高平均出力を得るのに適しており、近年では、ファイバーレーザーの高平均出力化を目指す研究が盛んに行われている。しかし、ファイバーはコア径が小さいため、ファイバー内を伝搬する光の強度が高くなり、非線形光学効果が起こりやすく、出力限界を決定してしまう。パルスファイバーレーザーでは、多くの場合、最初に出力限界を決めてしまう非線形光学効果は、誘導ラマン散乱(SRS)であるため、パルスレーザーの高出力化では、SRSを抑制することが重要である。SRSとは、入射光が物質を構成する分子の格子振動と相互作用することで、その振動数の分だけ、低周波数の散乱光(ストークス光)が発生し、その散乱光が増幅する現象である。そのSRSを抑制が可能なファイバーに、フォトリックバンドギャップファイバー(PBGF)がある。PBGFの断面図を図1に示す。

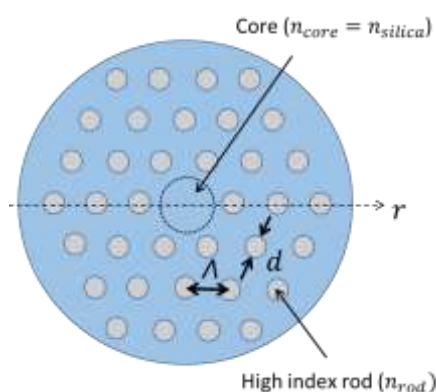


図1. PBGFの断面図

コアを中心に、コアよりも屈折率の高い材料を周期的に配置している。その周期的な屈折率分布から、コア内に閉じ込める波長の光を制御できる。SRSで発生するストークス光を損失、信号光を透過するよ

うにPBGFを設計し、コアに利得媒質を添加すれば、SRSを抑えながら、信号光を増幅することができる。

本研究では、PBGFのコアに希土類元素Ybを添加した、Yb添加PBGF増幅に使用する、ナノ秒パルスファイバー光源の作製を行ない、その性能の検討・評価を行った。

2. 先行研究のパルスシード光源

本研究の先行研究で作製された、パルスシード光源の構成を図2に示す。

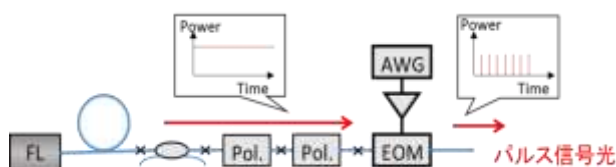


図2. パルスシード光源(先行研究)

このパルスシード光源は、波長1064 nmでCW発振するファイバーレーザーを、電気光学変調器(EOM)を介して振幅変調し、CW光をパルス状に切り出す構成となっている。このパルス信号光は、パルス幅2 ns、繰り返し周波数500 kHzであった。ファイバー増幅器を後段に組み、パルス信号光を増幅した結果、得られた平均出力は0.9 Wであった。しかし、増幅後のパルスには、パルス間にEOMで除去しきれなかったCW成分や、増幅時に発生した増幅自然放出(ASE)成分が残留していた。その結果、主パルスとパルス間成分のコントラスト比はおよそ1:1となり、平均出力のうち1/2ほどがパルス間の成分で、主パルスのピークパワーの低下を招いている問題があった。

3. パルスファイバーレーザー光源の作製

3.1. 本研究の目的

本研究では、パルス駆動型の分布帰還型半導体レ

ーザー(DFB-LD)をパルスシード光源に使用した。DFB-LDの発振波長は1064 nmで、パルス幅は2 nsで、繰り返し周波数は可変である。

偏波保持 Yb 添加ファイバー(PM-YDF)を利得媒質として用いて、3 段増幅のファイバー増幅器の構成でパルス信号光を増幅した。その構成を図 3.1.に示す。

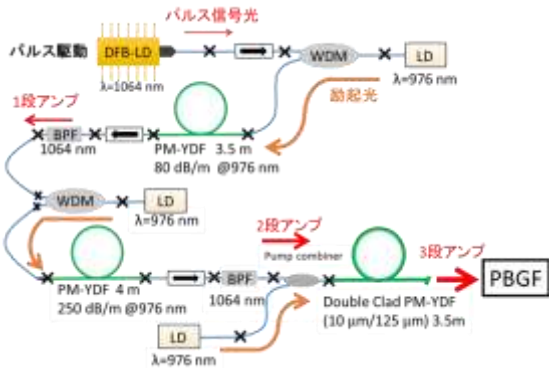


図 3.1. ファイバー増幅器の構成

ファイバーは全て PM ファイバーで、YDF の励起光には、波長 976 nm の LD を使用した。

本研究の目的は、シード光源をパルス駆動型 DFB-LD に替えて、ASE 成分を可能な限り抑制しながら信号光を増幅し、高コントラストなパルスファイバー光源を作製することである。増幅後の平均出力の目標値は 1 W、ピークパワーの目標値は 1 kW に設定した。

3.2. 1 段目ファイバー増幅器

1 段目ファイバー増幅器の構成を図 3.2.に示す。

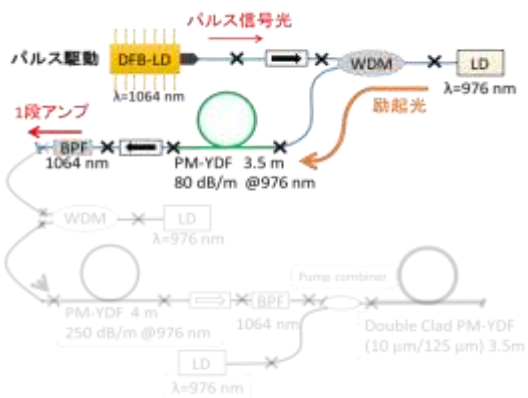


図 3.2. 1 段目ファイバー増幅器の構成

DFB-LD の平均出力は数 10 μ W と微力なため、1 段目では、ASE を極力発生させずに増幅する必要がある。発生した ASE は、波長 1064 nm の光のみを透過するバンドパスフィルター(BPF)を用いて除去した。

DFB-LD の繰り返し周波数 100、200、500 kHz、1 MHz と変えたときの、励起出力に対する波長 1064 nm での平均出力特性のグラフを図 3.3.に示す。

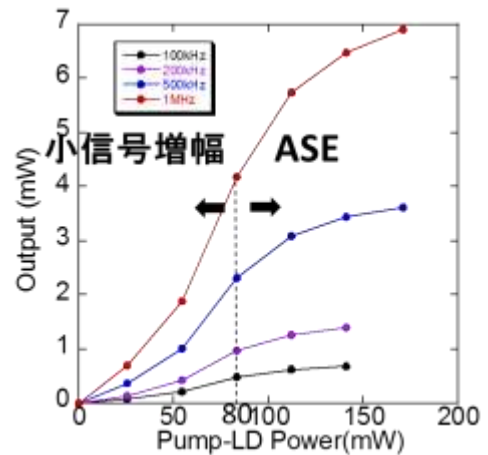


図 3.3. 波長 1064 nm での平均出力特性

図 3.3.に示すように、繰り返し周波数 500 kHz、1 MHz のとき、およそ励起出力 80 mW 以下では小信号増幅しているが、励起出力 80 mW 以上になると信号光の平均出力が飽和している。これは、ASE が支配的に増幅しているためである。そのため、励起出力 80 mW を最適な励起出力と評価した。そのときの平均出力の測定結果は、繰り返し周波数 500 kHz、1 MHz でそれぞれ、2.2 mW と 4.3 mW を得た。繰り返し周波数 100、200 kHz の場合、パルスの周期が長くなり、ASE が成長しやすかった。そのため後段の測定では、繰り返し周波数は 500 kHz、1 MHz に絞り、実験を行った。

3.3. 2 段目ファイバー増幅器

2 段目ファイバー増幅器の構成を図 3.4.に示す。

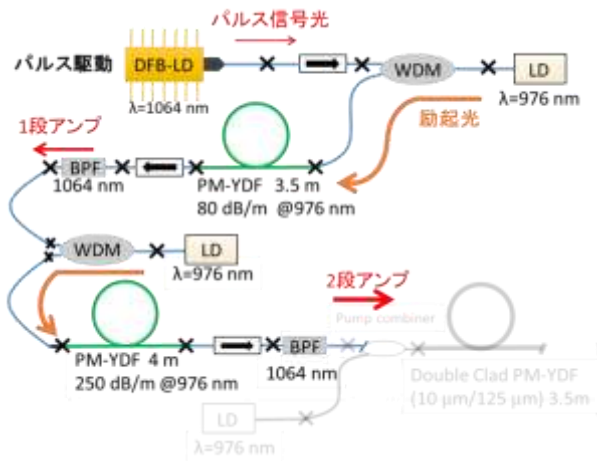


図 3.4. 2 段階目ファイバー増幅器の構成

DFB-LD の繰り返し周波数 500 kHz、1 MHz と変えたときの、2 段階目の励起 LD の励起出力に対する波長 1064 nm での平均出力特性のグラフを図 3.5. に示す。

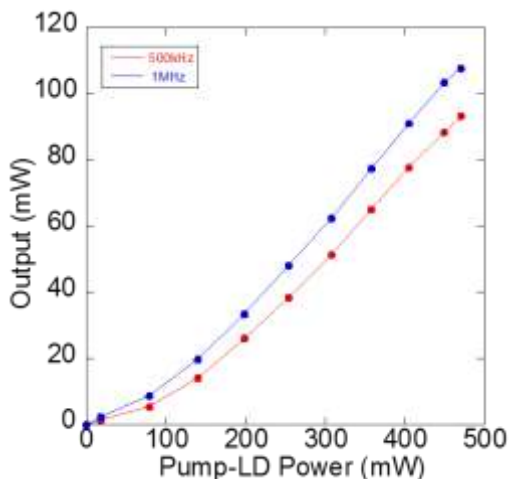


図 3.5. 波長 1064 nm での平均出力特性

図 3.5. に示すように、励起出力に対して信号光の平均出力は、線形となり、飽和増幅している。

最大励起出力 470 mW での平均出力は、繰り返し周波数 500 kHz のとき 93.5 mW、1 MHz のとき 107.7 mW を得た。

パルスのピークパワー p_{peak} は、平均出力 p_{av} をデューティー比 (DR) で割ることで求められる。

繰り返し周波数 500 kHz でのピークパワーは、

$$p_{peak} = \frac{93.5 \text{ mW}}{500 \text{ kHz} \times 2 \text{ ns}} = 93.5 \text{ W}$$

繰り返し周波数 1 MHz でのピークパワーは、

$$p_{peak} = \frac{107.7 \text{ mW}}{1 \text{ MHz} \times 2 \text{ ns}} = 53.8 \text{ W}$$

となった。この算出結果から、繰り返し周波数 500 kHz のとき、より高いピークパワーを得られたため、後段の増幅では、繰り返し周波数を 500 kHz、励起出力は 470 mW に固定し、実験を行なった。

3.4. 3 段階目ファイバー増幅器

3 段階目ファイバー増幅器の構成を図 3.6. に示す。

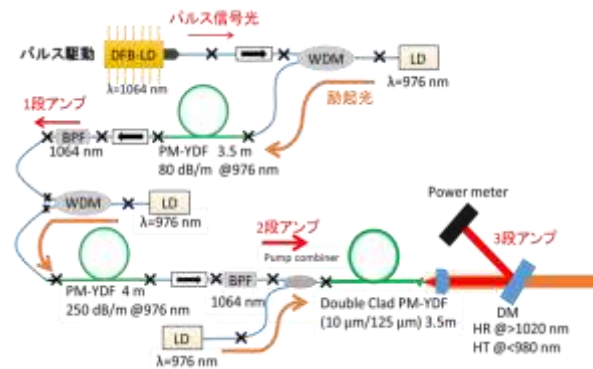


図 3.6. 3 段階目ファイバー増幅器の構成

最大励起出力 31 W の高出力 LD で、ダブルクラッド PM-YDF をクラッド励起し、信号光を主増幅した。信号光の平均出力は、波長 1020 nm 以上の波長の光を反射するダイクロイックミラー (DM) の反射光をパワーメーターで測定する手法を用いた。励起出力 4.7 W のとき、平均出力 1.1 W が得られ、目標値を達成した。このときのスペクトル特性を図 3.7.、パルス波形を図 3.8. に示す。

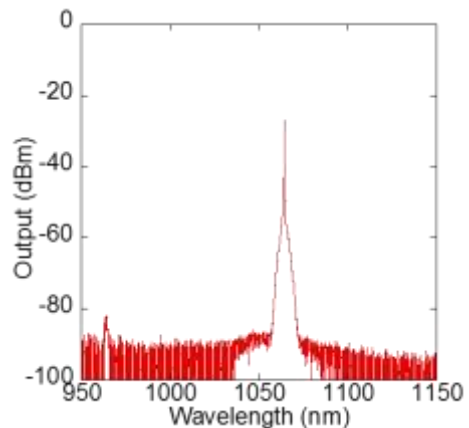


図 3.7. スペクトル特性 (励起出力 4.7 W)

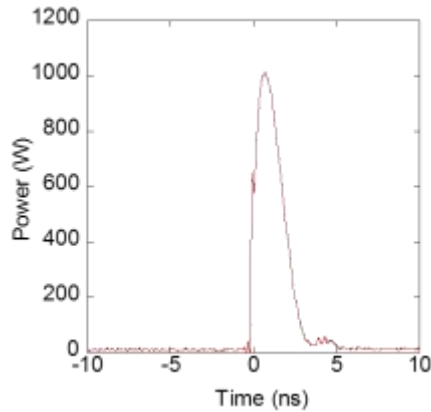


図 3.8. パルス波形(励起出力 4.7 W)

図 3.7.のスペクトルから、ASE をほとんど抑制できていることが分かる。中心波長 1064 nm のスペクトル広がり、非線形光学効果の自己位相変調 (SPM)によるものである。

図 3.8.パルス波形から、増幅後のピークパワーは 1 kW が得られ、目標値を達成した。パルス幅は 2 ns で、パルスシード光のパルス幅を保持しながら増幅できたことが分かる。また、主パルスとパルス間の ASE の割合は、1/4000 以下と見積もった。このことから、平均出力に占めている ASE の割合は、1/5 以下であると評価した。

先行研究で開発したパルスファイバー光源の平均出力に占めている ASE の割合は、1/2 ほどであった。よって、本研究のパルスファイバー光源は、先行研究と比較して、高コントラストな光源を作製することができた。

励起出力 4.7 W からさらに上げたときのスペクトル特性を図 3.9.に示す。

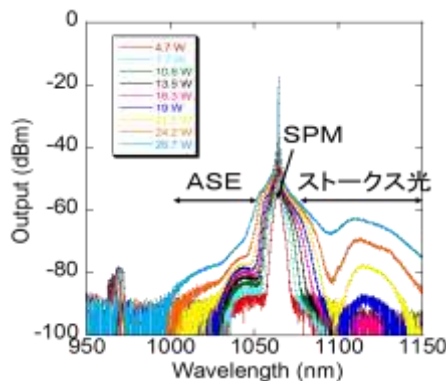


図 3.9. 励起出力ごとのスペクトル

図 3.8.に示すように、励起出力が上がるにつれて、スペクトルが広がり、雑音が増えることが分かる。励起出力 19 W 以上で、信号光よりも長波長側でスペクトルが広がっているが、これはラマン散乱が生じ、ストークス光が発生したためである。この結果から、励起出力を上げるほど、雑音が増え、コントラスト比が悪化することが分かる。

4. まとめ

Yb 添加 PBGF での増幅に使用する、ナノ秒パルスファイバー光源を作製した。先行研究で作製されていた光源は、増幅後の平均出力 0.9 W を得ていたが、その平均出力のうち 1/2 程度がパルス間の成分が占め、コントラスト比が悪く、ピークパワー低下を招いていた。そこで、本研究では高コントラストな光源を作製することを目的に実験を行なった。

作製したファイバー光源は、YDF を利得媒質にファイバー増幅器を 3 段組んで、パルス信号光を増幅する構成である。増幅後の平均出力は 1.1 W、ピークパワー 1 kW を得られ、平均出力に対する ASE の割合は 1/5 にまで抑制でき、先行研究に比べ、高コントラストな光源を作製することができた。

5. 参考文献

- [1] Headley, Clifford, et al. "Accurate Measurement of Pulse Power in Low Duty Cycle MOPA." Conference on Lasers and Electro-Optics. Optical Society of America, (2005).
- [2] 鈴木悠太, フォトニ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, 電気通信大学修士論文, (2013).
- [3] Taru, Toshiki, et al. "Raman gain suppression in all-solid photonic bandgap fiber." ECOC 2007 (2007).