

フォトリックバンドギャップファイバーを用いた

誘導ラマン散乱抑制高尖頭出力パルス増幅

白川（晃）研究室 有佐 傑

<目的・背景と学術的意義>

現在、レーザー技術は自動車部品や精密機器の加工、また医療分野などあらゆる用途で利用が高まっている。中でも、ファイバレーザーは高効率、高利得、高冷却性、高ビーム品質といった様々な利点によって、高輝度・高平均出力化が実現されている。一方で、パルスなどの高強度の光を伝搬させると、誘導ラマン散乱（SRS）や誘導ブリルアン散乱（SBS）といった非線形光学効果が起きてしまい、出力が制限されてしまうため、更なる高尖頭出力化を目指す上での障害となってしまっている。一般的に、パルス増幅において、発生閾値の低いSRSが高尖頭出力化の限界を決める。

卒業研究では、SRS抑制が期待されるフォトリックバンドギャップファイバ(PBGF)を用い、増幅実験を行う。そして、Yb-PBGFのSRS制御効果を検証する。

<原理>

1. 誘導ラマン散乱

入射した光が分子間の振動によって散乱され、ストークス光と呼ばれる周波数の変化した光を発生させる現象をラマン散乱と呼ぶ。発生原理として、Fig. 2 に示したようにストークス光は、基底準位にある電子が仮想準位を経て、振動準位に遷移することで発生する。このとき非常に強いポンプ光を用いると、ストークス光が媒質中で急

に成長し、ポンプエネルギーの大部分がその中に現れるようになる。この現象をSRSと呼ぶ。SRSの発生閾値 $P_{th,SRS}$ は式(1)で与えられる。

$$P_{th,SRS} = 16 \frac{A_{eff}}{f_p g_R L_{eff}} \quad (1)$$

ここで、 A_{eff} は有効コア面積、 f_p は偏向因子、 g_R はラマン利得、 L_{eff} は有効作用ファイバー長で与えられる。

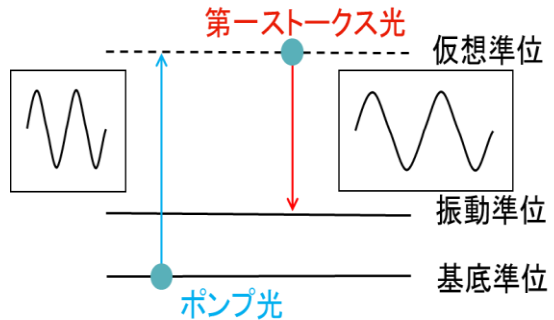


Fig. 1 ストークス光の発生原理

2. フォトリックバンドギャップファイバー (PBGF)

通常用いられているファイバーはコアとクラッドの屈折率の差によって、光を全反射させてコア内を伝搬させている。一方、PBGFはコアの周囲に高屈折率ロッドを周期的に配置し(Fig. 2)、フォトリックバンドギャップを生じさせる。そして、このフォトリックバンドギャップ構造により、ブラッグ反射条件に合う光を閉じ込めてコア内

を伝搬させている。さらに、高屈折率ロッドのピッチの間隔 Λ やファイバーの巻き径を調整する事により、コアを伝搬する光の波長を調整することができる。そのため、本研究では増幅させる波長帯をフォトニックバンドギャップ構造によって閉じ込めることにより低損失で透過させる (Fig. 3)。そして、ストークス光の波長をフォトニックバンドギャップ外とすることで、その波長帯に大きな損失を与え、SRS の抑制を行う。この損失を与える事による SRS の閾値は式 (1) に PBGF による損失項を加えて、以下の式 (2) で表す事ができる。

$$P_{th,SRS} = 16 \frac{A_{eff}}{f_P g_R L_{eff}} + \frac{\alpha_{PBGF}(\lambda) A_{eff}}{g_R} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_{PBGF}(\lambda)$ は PBGF による透過損失で与えられる。損失項が加わることにより、SRS 閾値をあげることができる。

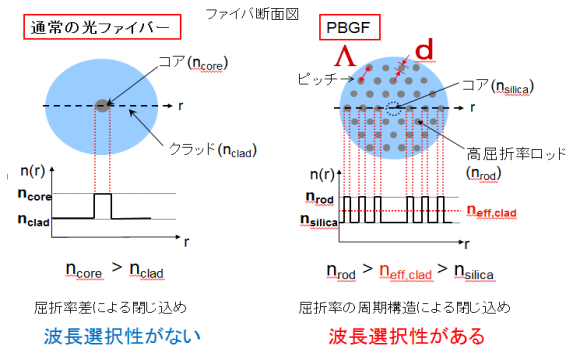


Fig. 2 ファイバーの構造

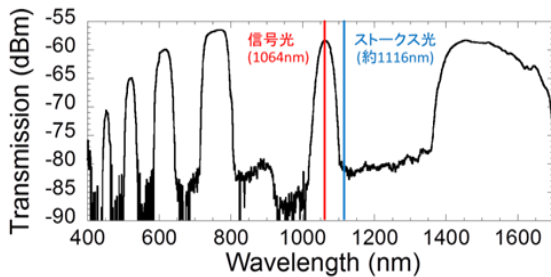


Fig. 3 Yb-PBGF の透過スペクトル

<実験>

1. Yb-PBGF の評価

今回用いたファイバーを Fig. 4 に示す。

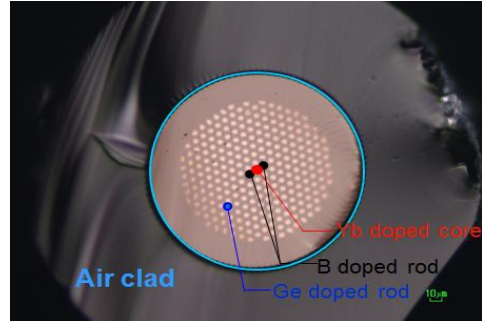


Fig. 4 Yb-PBGF の断面

中心には Yb を添加したコアが配置され、それを挟むような形で B が添加されたロッドが配置され、偏波保持の役割をしている。その周りに周期的に Ge を添加したロッドが並んでおり、この Ge 添加ロッドのピッチや径を変えることによって、伝搬する光に波長選択性を持たせることが可能になる。そして、その周りには第二クラッドとしてエアクラッドがある。エアクラッドの外側の領域はバッファ領域となっており、バッファの側面に平面を敷くことでねじれを防ぎ、B 添加ロッドの位置を保持することができる。

実験を行う前に Yb-PBGF について SRS 抑制に適したピッチおよび巻き径を評価した。評価方法としては白色光を Yb-PBGF にコア伝搬させ、透過光のスペクトルを測定した。ピッチは 8.3 μm 、8.5 μm のものを、巻き径は Straight, 32 cm, 26 cm, 20 cm, 16 cm, 13 cm としてそれぞれ透過スペクトルを測定した。

透過スペクトルの測定結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、ピッチ 8.3 cm の方がより Raman gain に対するカットオフが短波長側によるため、より SRS 抑制に適している

と判断できる。また、巻き径は短くしていくほどカットオフが短波長側に寄るため短い径を使う方がより SRS 抑制に適していると判断できる。しかし、今回の測定で径 13cm, 16cm には増幅すべき 1064 nm の波長帯での損失も見受けられたため、実験では巻き径 20 cm として実験を行った。

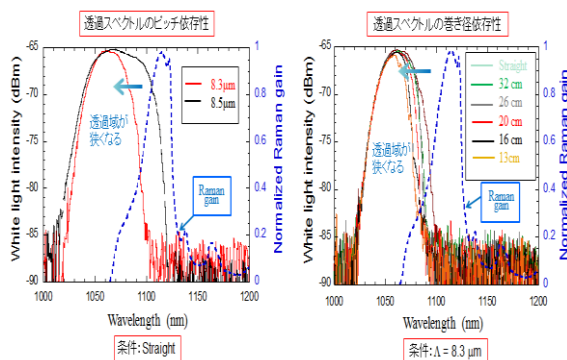


Fig. 5 Yb-PBGF のピッチ、巻径依存性

したがって、ピッチ 8.3 mm、巻き径 20 cm の Yb-PBGF の透過スペクトルより、Yb-PBGF の損失を求め、式 (1)、(2) を用いて SRS 閾値を計算したところ、PBGF を用いていないときは 7.7 kW で SRS が発生してしまうのに対して、PBGF を用いたときは 34.4 kW で SRS が発生することが予測される (Fig. 6)。なお、有効ファイバー長は 2.5 m、有効コア断面積 $1.8 \times 10^{-11} m^2$ として計算を行った。

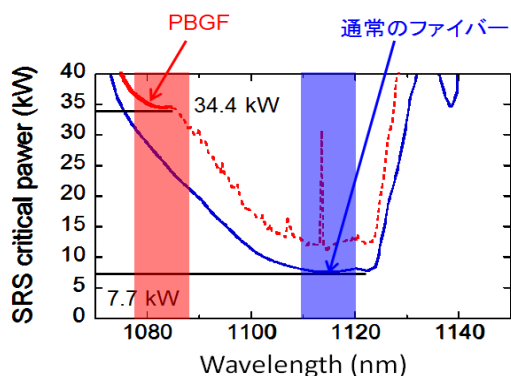


Fig. 6 SRS 発生閾値

2. 受動 Q スイッチレーザーの作製

増幅実験のシードとなるパルス光源として、受動 Q スイッチレーザーを自作した。パルス光源にはレーザー媒質として Yb:YAG を用い、過飽和吸収体には Cr^{4+} :YAG を用いることでマイクロチップレーザーを作成した。受動 Q スイッチレーザーの実験配置図を Fig. 7 に示す。

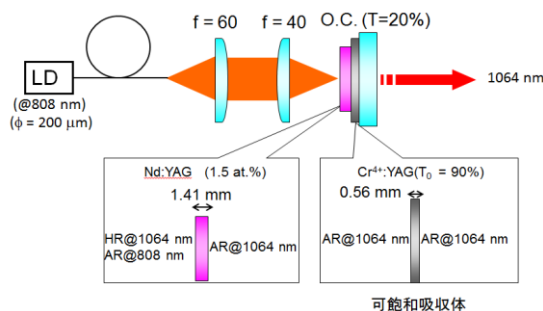


Fig. 7 受動 Q スイッチレーザー

また、受動 Q スイッチレーザーの透過スペクトル及びパルスの時間波形を Fig. 8 に示す。今回、受動 Q スイッチレーザーは安定したピークパワーを得るため単一縦モード動作を行った。また、パルス幅を 5 ns 以下にする事で音響フォノンとの相互作用を防ぎ、SBS の発生を防いでいる。さらに、繰り返し周波数を 20 kHz 以上とすることで増幅自然放射光 (ASE) の抑制も行っている。

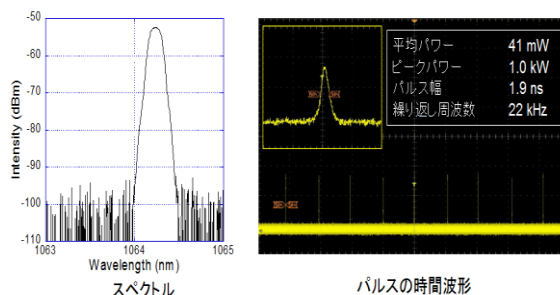


Fig. 8 スペクトル及びパルスの時間波形

3. 増幅実験

実験配置図を Fig. 9 に示す。

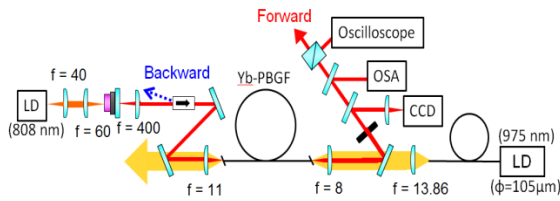
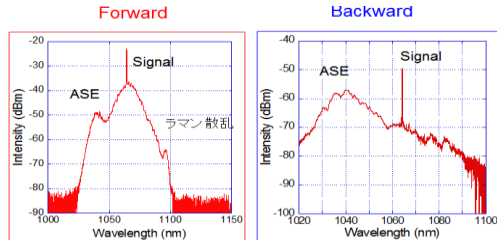
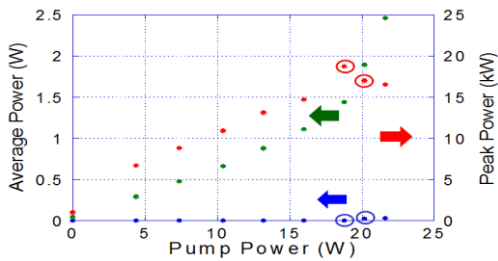


Fig. 9 実験配置図

励起光には 975 nm のファイバー結合型 LD を用い Yb-PBGF を後方励起することで増幅を行った。この時、Forward 光と Backward 光を同時に測定することで、SRS と SBS の両方を同時に測定した。

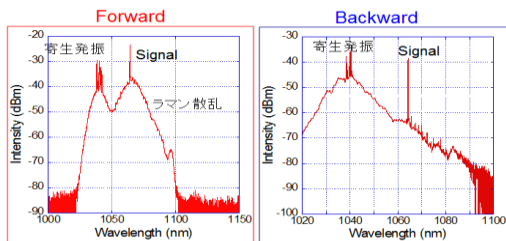
増幅結果を Fig. 10 に示す。



Pump Power 18.8 W でのスペクトル

SRSは起きていない

ピークパワー 18.7 kW ← 通常のファイバー
パルス幅 3.5 ns
繰り返し周波数 22 kHz



Pump Power 20.2 W でのスペクトル

ピークパワー 17.0 kW
パルス幅 3.3 ns
繰り返し周波数 22 kHz

SBSは起きていない

PBGF
SRS発生閾値 34.4kW

Fig. 10 増幅結果及び PumpPower18.8 W, 20.2 W の透過スペクトル

実験結果から最も高いピークパワーは 18.7kW であり、スペクトルからラマン散乱とピークパワーには 40 dbm 近い差があるため、SRS 起きていないと判断できる。計算結果から求めた通常のファイバーでの SRS 発生閾値 7.7 kW を上回るピークパワーを得ることが出来た。しかし、これよりさらに PumpPower を上げていくとピークパワー 17.0 kW と値が下がってしまう。これは発生した ASE が寄生発振し、Signal 光のエネルギーが奪われたためだと考えられる。計算による PBGF の SRS 発生閾値は 34.4 kW であり、今回の実験では実験による PBGF の SRS 発生閾値を求めることはできなかった。今後は ASE の寄生発振を抑制することで更なるピークパワーを出力し、実験による PBGF の SRS 発生閾値を求めていこうと考えている。

<今後の展望>

ASE の寄生発振を抑制するためシード光源のピークパワーを高い繰り返し周波数を維持したまま、上げていこうと考えている。また、PBG 構造を持たないファイバーとの比較実験を行い実験による通常の SRS 発生閾値を求めていきたい。

