

Tm:Lu₂O₃ 励起用 波長 1629 nm ラマンファイバーレーザーの開発

戸倉川研究室 鈴木杏奈

1. はじめに

本研究室では波長 2 μm 帯のレーザーの開発を中心に行っており、この波長帯はポリマーやプラスチック材料の加工や超広帯域光、高次高調波発生などさまざまな応用が期待されており、現在注目を集めている。特に、瞬間的に非常に高いピーク強度をもつ光を発生させることのできる超短パルスレーザーは、超広帯域光や高次高調波発生等への応用へ向けて研究が進められている。

Tm:Lu₂O₃ は波長 2 μm 帯レーザーの利得媒質の一つであり、他の Tm 添加媒質である Tm:YAG や Tm:YLF 等と比べて比較的広い利得スペクトルを有しており、また良好な熱機械特性を持つ[1]。このように、Tm:Lu₂O₃ は高出力な超短パルスレーザーの利得媒質として優れた性質を有している。しかし従来の波長 800 nm 帯 Ti:Sapphire レーザー励起では全体的な効率が強く制限されていた。Tm:Lu₂O₃ は 800nm 帯の他に 1629 nm にも強い吸収を有しているが、この波長帯は一般的な希土類添加の利得媒質では発振が困難である。そこで今回、誘導ラマン散乱による周波数シフトを利用したラマンファイバーレーザーによって、波長 1629 nm でのレーザー発振の実現を目指した。まず、励起光源として波長 1555 nm で動作する Er:Yb ファイバーレーザーを開発した。ラマン利得媒質にシリカガラスを用いて、波長 1629 nm で動作する FBG によって共振器を構成した。これにより最高出力>2.5 W、スペクトル幅<3 nm、出力変動<1%のスペックを満たしたラマンファイバーレーザーの開発を行った。

2. 原理

2-1. Er:Yb ファイバーレーザー

エルビウム (Er) は 0.550 nm、850 nm、980nm、1550 nm、1720 nm、2700 nm、3500 nm とい

う波長帯においてレーザー発振が可能である。中でも、1550 nm は有名な遷移線であり、この波長帯は石英ガラスの光ファイバーにおける最低損失波長帯である。また、500 nm、600 nm、800 nm、980 nm、1480 nm に励起波長帯を有しており、半導体レーザー (LD) での直接励起が可能である。

Er レーザーにおいて、利得媒質中の Er³⁺ の添加密度を増加させていくと、イオン間の距離が短くなることで協同アップコンバージョンという、実質的に励起されていた 2 つのイオンのうち 1 つが脱励起されて基底準位に緩和してしまうという現象が起こる。これにより利得効率が減少してしまう。このように添加密度を増加させても利得効率が落ちてしまう現象を濃度消光という。この濃度消光を解決するために、Er³⁺ に Yb³⁺ を共添加させたファイバーが開発された。Er³⁺ に Yb³⁺ を共添加させると、Er³⁺ のまわりを Yb³⁺ が取り囲むことで Er³⁺ 間の距離を遠ざけ、濃度消光を防ぐことができる。また、Er³⁺ と Yb³⁺ のイオン間相互作用により増感作用を得ることができる。増感作用の概念図を図 1 に示す[2]。

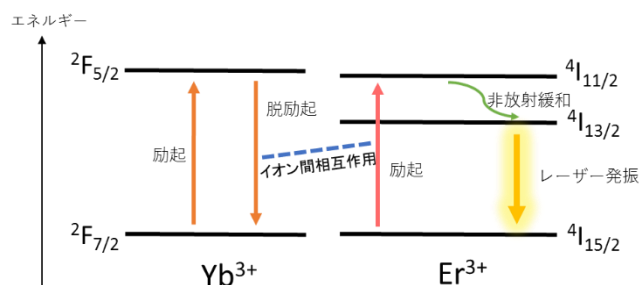


図 1. Er³⁺, Yb³⁺ 共添加による増感作用の概念図

増感作用とは、励起された Yb³⁺ と基底準位の Er³⁺ がイオン間相互作用によりエネルギーの受け渡しが起こり、Er³⁺ は 4I_{11/2} 準位に励起、Yb³⁺ は脱励起されて基底準位状態となる。励起された Er³⁺ は、多重フォノン放出により 4I_{13/2} 準位に

緩和された後、光増幅に関与する。レーザー動作において Er^{3+} の 980 nm の吸収線がよく励起に用いられるが、この波長帯は吸収断面積が小さくあまり吸収がないため、この増感作用を利用して Yb^{3+} の強い吸収を用いることでより高効率な励起を行うことができる。

2-2. ラマンファイバーレーザー

ラマン散乱とは、光が物質に入射した際に起こる非弾性散乱の一種であり、物質中の分子の固有振動数に依存する周波数シフトを起こした光が散乱される。シリカガラスのラマン利得スペクトルを図 2 に示す[3]。ラマン散乱は入射光の $\sim 10^{-6}$ 倍程度の非常に微弱な光であるが、入射光の強度がある閾値を超えるとストークス光が物質中で成長していく現象が起こる。これを誘導ラマン散乱と呼ぶ。ラマン利得媒質に光ファイバーを用いると、10 μm 程の非常に小さなコアの中に高強度の光を閉じ込めることができ、長距離伝搬が可能であり非常に長い相互作用長が得られるため非線形光学効果を得やすくなり、入射光の大部分をストークス光へ移すことが可能となる。この現象を用いて入射光と異なる波長のレーザー光を得る手法がラマンファイバーレーザーである。

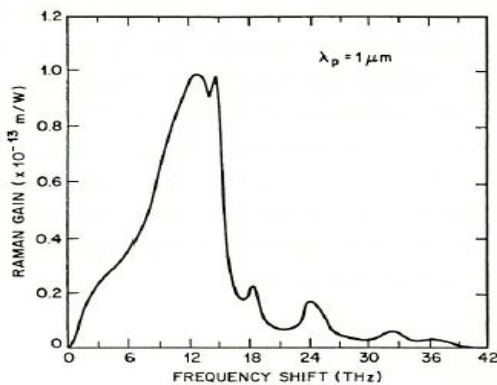


図 2. シリカガラスのラマン利得スペクトル

3. Er:Yb ファイバーレーザー

3-1. 実験構成

Er:Yb ファイバーレーザーの実験構成を図 2 に示す。

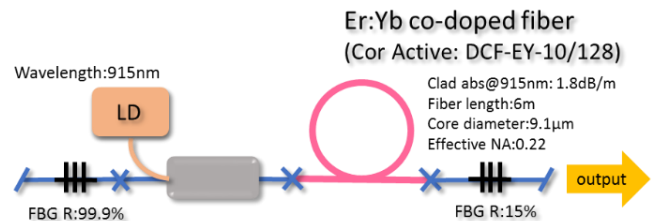


図 2. Er:Yb ファイバーレーザー実験構成

励起光源には波長 915 nm で動作する Laser Diode (最大出力 20W) を用いており、利得ファイバーには Er:Yb 共添加ダブルクラッドファイバーを用いた。波長 1555 nm で動作する FBG (反射率 99.9%、15%) によって共振器を構成した。また、Yb の 1 μm 帯の寄生発振を抑制するため、ファイバーの両端を APC コネクタに融着した。

3-2. 測定結果

得られた出力特性と最大出力時のスペクトルを図 3 に示す。

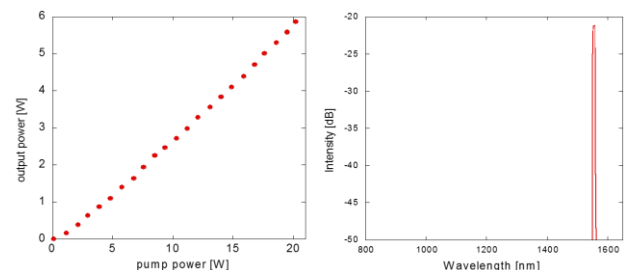


図 3.(左)出力特性 (右)最大出力時のスペクトル

以上より、最大出力 5.86 W、スロープ効率 30% が得られた。また Yb の 1 μm 帯の寄生発振を抑制することができ、安定した動作を得ることができた。

4. ラマンファイバーレーザー

4-1. 実験構成

ラマンファイバーレーザーの実験構成を図 4 に示す。

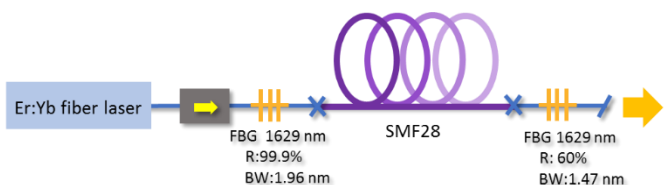


図 4. ラマンファイバーレーザー実験構成

励起光源には波長 1555 nm Er:Yb ファイバーレーザー (最大出力 5.86 W、スロープ効率 30%) を用いており、ラマン利得ファイバーにはシングルモードファイバー (SMF28) を 1300 m 使用した。ラマン利得ファイバーの両端に波長 1629 nm で動作する FBG を融着し、共振器を構成した。ラマン利得ファイバーの長さについては、入射励起パワーと共振器のパラメータからファイバー長を変化させたときの残存励起光とストークス光のパワーを計算し[4]、励起光を十分にストークス光へ変換できる長さを見積もった上、決定した。シミュレーション結果を図 5 に示す。

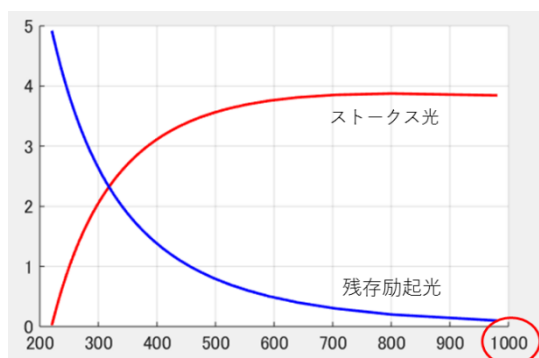


図 5. ファイバー長を変化させた時のストークス光と残存励起光のシミュレーション結果

4-2. 測定結果

測定したラマンファイバーレーザーの出力特性と最大励起時のスペクトルを図 6 に示す。

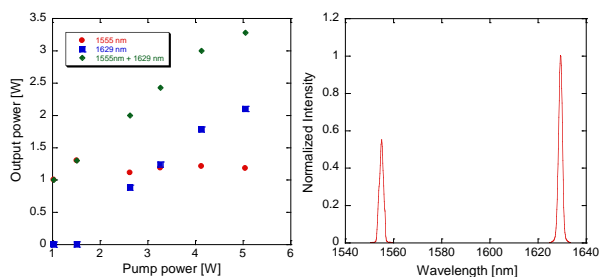


図 6.(左)出力特性 (右)最大出力時のスペクトル

ストークス光の最大出力は 2.06 W、残存励起光のパワーは 1.22 W であり、シミュレーションよりも変換効率が低い結果となってしまった。このときのストークス光のスペクトル幅は 2 nm であり FBG の有効帯域 (HR:1.96 nm, PR:1.47 nm) を超えてしまっていることが分かった。これによって実効的な反射率が 99.9%→70%、60%→34%と低下し、変換効率が

低下してしまっただと考えられる。これを補うため、ファイバー長を 2000 m に変更して相互作用長を増加させ再度測定を行った。

4-3. ファイバー長 2000 m の結果

測定したラマンファイバーレーザーの出力特性と最大励起時のスペクトルを図 7 に示す。

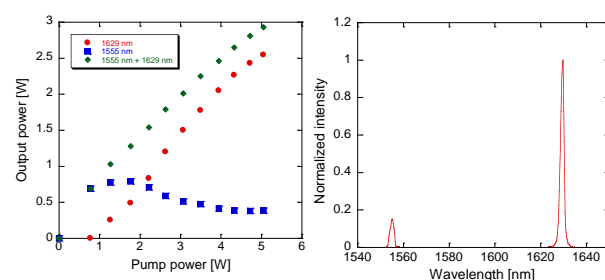


図 7.(左)出力特性 (右)最大出力時のスペクトル (ファイバー長 2000 m 時)

これよりストークス光の最大出力は 2.54 W、残存励起光のパワーは 0.38 W であり、変換効率を向上させることができた。またこのときのスペクトル幅は 1.75 nm であった。最大出力時の時間波形を図 8 に示す。

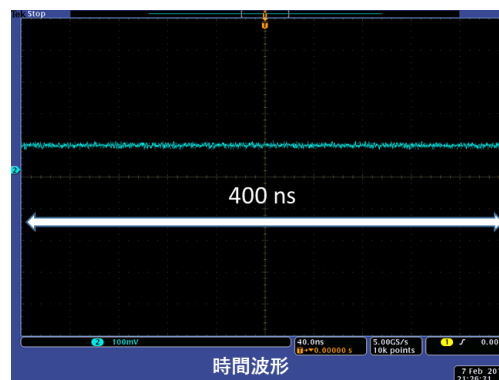


図 8. 最大出力時時間波形

図 8 の時間波形と動作時の出力の揺らぎを見ると、出力の変動は全体の 0.8%程であり非常に高安定な動作が得られていることが分かった。以上より、目標スペックを十分に満たした光源を開発することができた。

5. Tm:Lu₂O₃ を用いたレーザー発振実験

今回作成した波長 1629 nm ラマンファイバーレーザーと Tm:Lu₂O₃ セラミックを用いてレーザー発振実験を行った。実験構成を図 9 に示す。

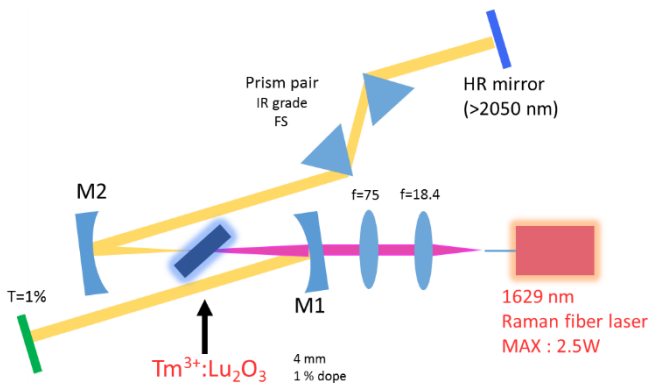


図 9. Tm:Lu₂O₃セラミックレーザー実験構成[5]

共振器は Z 型共振器を用いており、励起光は Tm:Lu₂O₃セラミック（長さ 4 mm、1%添加）にブリュースター角で入射させた。凹面鏡は曲率 100 mm、高反射コート 1850 nm-2200 nm のものを、エンドミラーは高反射コート>2050 nm のものを用いており、出力鏡は透過率 1%（2000 nm-2300 nm）を使用した。分散補償のため、IR 品質の石英プリズム対（距離 5 cm）を挿入している。この実験構成よりレーザー発振に成功した。得られた出力特性を図 10 に示す。

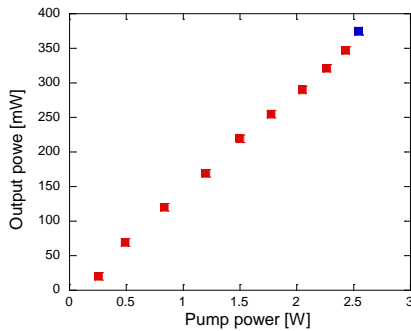


図 10. Tm:Lu₂O₃ レーザー出力特性

最大出力 374 mW 時にモード同期をかけることに成功した。そのときのパルストレインとスペクトルを図 11、12 に示す。



図 11. パルストレイン

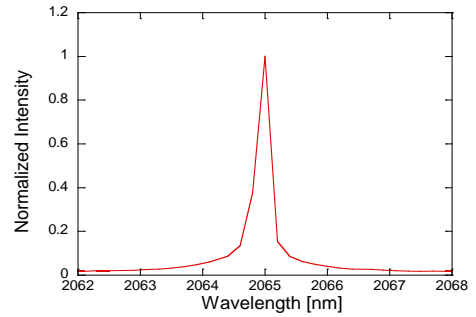


図 1. カーレンズモード同期時スペクトル

不安定であり、かつスペクトルが 0.5 nm 程度にしか広がっていないが、パルス幅がオシロスコープの分解能以下で~500 ps 程であったことから、Q スイッチやモードビートではなくカーレンズモード同期であると考えられる。

6. まとめ

本研究において、Tm:Lu₂O₃の励起光源として、波長 1629 nm で動作するラマンファイバーレーザーの開発を行った。Er:Yb ファイバーレーザー（最大出力 5.86 W、スロープ効率 30%）の励起により、スペクトル幅 1.75 nm、最大出力 2.54 W、出力変動~0.8%を達成することができた。また、作製した励起光源と Tm:Lu₂O₃を用いたレーザー発振実験において発振に成功し、カーレンズモード同期を得ることができた。今後は、Tm:Lu₂O₃ レーザーの共振器構成、アライメントの最適化により高出力化、短パルス化を目指していく。

7. 参考文献

- [1] P. Koopmann, Ph.D thesis, Uni. HH(2010)
- [2] 須藤昭一 編,"エルビウム添加光ファイバ増幅器 ~情報通信ネットワークに革命をもたらすキーデバイス~, オプトロニクス社
- [3] G.P. アグラワール著, 小田垣考, 山田興一訳, "非線形ファイバー光学", 吉岡書店
- [4] John AuYeung and Amnon Yariv, Journal of the Optical Society of America, Vol. 69, Issue6, pp. 803-807 (1979)
- [5] 藤田慧祐 "波長 1610 nm Er:Yb 全ファイバーMOPA の開発とそれを用いた in band 励起 Tm³⁺:Sc₂O₃ レーザー"

