

# 波長 1610 nm 狭線幅単一偏光 Er:Yb 全ファイバー-MOPA の開発

戸倉川研究室 藤田慧祐

## 1. はじめに

長波長動作の狭線幅な Er ファイバーレーザーには様々な応用がある。例えば差周波発生や第二高調波発生などへの利用が考えられる。また Cr<sup>2+</sup>:ZnS や Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の励起光として用いることができる。Cr<sup>2+</sup>:ZnS は中赤外のチタンサファイアレーザーとも呼ばれ波長 2-3 μm 帯において発振可能であり中心波長~1.7 μm の吸収を有しているため、長波長動作の Er ファイバーレーザーが励起に用いられる。また波長 1.85-2.15 μm で高出力動作が可能な Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーも波長 1610 nm 付近に強い吸収を有している。こうした波長 2-3 μm 帯のレーザーは、加工や医療、ガス検知、4-12 μm 波長変換用励起光源などへの応用が可能であり大きな注目を集めている。上記のレーザーの応用、特にモード同期レーザーなどの開発を進める上で、狭線幅、単一偏光、高安定で高出力な励起光源が必要とされている。この波長帯の利得媒質である Er:Yb 共添加ファイバーは、波長 1.5 μm 帯において増幅動作が達成されているが[1,2]、1610 nm における蛍光断面積は 1540 nm に比べて非常に小さく、Er、Yb の増幅自然放出光(ASE)、寄生発振を抑制することが困難であり高出力動作は報告が少なかった。本研究では波長 1610 nm の DFB レーザーを種光源とし、狭線幅(<20 MHz)、単一偏光(~25 dB)、高出力(>2.69W)、安定な All-fiber MOPA を開発した。

## 2. 原理

### 2.1. Er 添加シリカガラスファイバー

エルビウム(以下 Er)は希土類元素であり、これを光ファイバーのコアに添加したものが Er 添加ファイバーである。今回は開発した MOPA の前置増幅器として使用した。図 1 にその吸収断面積と

放出断面積を示す[3]。波長 1610 nm における放出断面積は波長 1540 nm 付近に比べて、約 1/4~1/7 となっており(ガラスに依存)高効率、高出力動作が難しい。高出力を得るため Er ファイバーの利得係数を大きくするため Er<sup>3+</sup>イオンの添加量を増加し濃度を高めていくと濃度消光により励起効率が低下する。これを抑制した Er:Yb 共添加ファイバーが開発された。

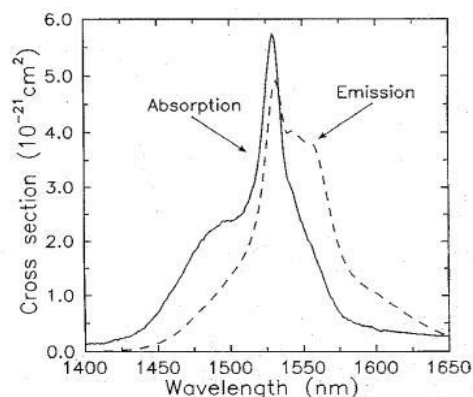


図 1. Er 添加シリカガラスファイバーの吸収断面と放出断面積

### 2.2. Er:Yb 共添加ファイバー

Er:Yb 共添加ファイバーは、Yb<sup>3+</sup>イオンを Er<sup>3+</sup>イオンと共に添加させ Yb<sup>3+</sup>イオンが Er<sup>3+</sup>イオンを囲むようなクラスターを形成し Er<sup>3+</sup>イオン同士を遠ざけることにより濃度消光に起因する Er 添加濃度限界を向上させることが可能である。Er:Yb ファイバーのエネルギー準位図を図 2 に示す。Yb<sup>3+</sup>イオンが 910~980nm 帯の励起光により <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> に励起される。その後 Yb<sup>3+</sup>イオンと Er<sup>3+</sup>イオンの <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> と <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> の準位が近いことによりエネルギー遷移が起こり Er<sup>3+</sup>イオンを <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> に励起し、Yb<sup>3+</sup>イオンは基底準位 <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> に遷移する。<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> に励起された Er<sup>3+</sup>イオンは <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> に非放射過程で緩和し <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>・<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 準位間に反転分布を形成しレーザー発振する。こ

うした Yb-Er のエネルギー遷移過程から高出力な波長 910~980 nm の LD によって励起することが可能である。Er:Yb 共添加ファイバーのレート方程式は次のように表せる [4]。

$$\frac{dN_2^{Yb}}{dt} = -\frac{dN_1^{Yb}}{dt} = R_{pa}N_1^{Yb} - R_{pe}N_2^{Yb} - \frac{N_2^{Yb}}{\tau^{Yb}} - k_{tr}N_2^{Yb}N_1^{Er} \quad (1)$$

$$\frac{dN_2^{Er}}{dt} = k_{tr}N_2^{Yb}N_1^{Er} - W_{21}N_2^{Er} + W_{12}N_1^{Er} - \frac{N_2^{Er}}{\tau^{Er}} - C(N_2^{Er})^2 \quad (2)$$

本実験ではこれを主増幅器として使用し、上式を解析的に解くことにより主増幅のシミュレーションを行い実験結果に示した。

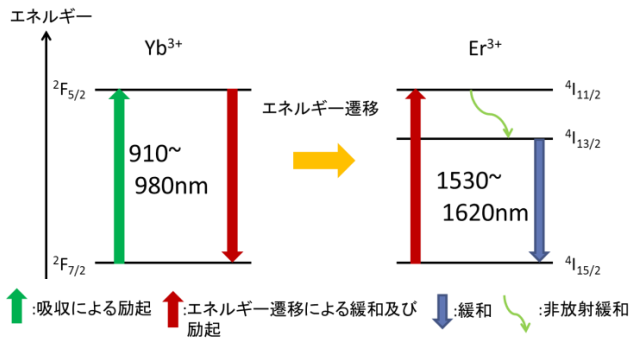


図 2. Yb<sup>3+</sup> と Er<sup>3+</sup> のイオン間のエネルギー図

### 2.3. 主発振器出力増幅器(MOPA)

主発振器出力増幅器(Master Oscillator Power Amplifier: MOPA)とは高安定な種光と高出力な光増幅器をそれぞれ独立に制御することが可能であり、種光の良好なビーム特性を保持したまま高出力が得られるのが特徴である。図 3 にファイバー-MOPA の構成例を示す。本研究ではこの構成を用いた。

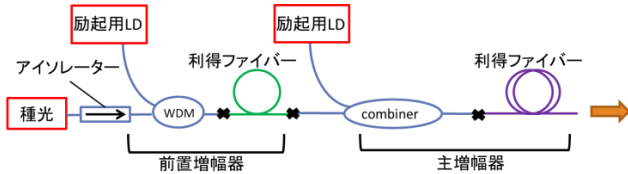


図 3. ファイバー-MOPA の構成例

### 2.4. 誘導ブリルアン散乱

光ファイバーは光を非常に狭い空間に閉じ込めるため電磁場のパワー密度が大きくなることにより光の強度が強くなることから物質と光の相互作用

用が強まり様々な非線形相互作用が現れる。今回はガラス中の光強度がある閾値を超えると発生する非線形散乱の誘導ブリルアン散乱(Stimulated Brillouin Scattering:SBS)について説明していく。光ファイバーに強いコヒーレント光が入射すると、その入射光により密度揺らぎによる音響フォノンが生じる。これがコアの屈折率の周期的な変調を作り出し回折格子として働くことによって入射光がブラッグ回折し後方散乱光(ストークス光)として戻る。その様子を図 3 に示す。入射光パワーがある特定の閾値を超えるとそのパワーがストークス光パワーに引き抜かれてしまい出射光の出力が制限されてしまう。その閾値の式は次式で表される [5]。

$$P_{th} \cong \frac{21A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (3)$$

ここで  $g_B$  はブリルアン利得係数、 $A_{eff}$  は有効コア面積、 $L_{eff}$  は有効相互作用長である。本実験で実際に計算した閾値の図を実験結果に示した。

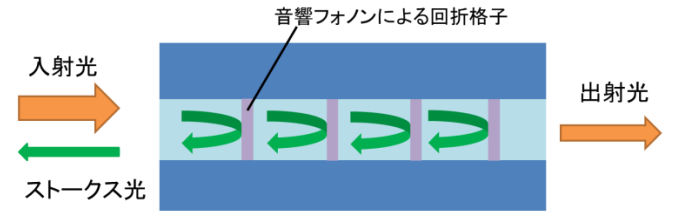


図 3. 誘導ブリルアン散乱の発生

## 3. 実験

### 3.1. 実験方法

本研究で用いた MOPA の実験系を図 4 に示す。種光源として出力 40 mW の波長 1610 nm 単一偏光 DFB レーザーを使用した。これを出力 500 mW の波長 1480 nm LD を用い WDM(1610 nm/1480 nm)を通して前方励起 Er 添加ファイバー増幅器によって前置増幅した。使用した Er ファイバーは、コア径 6.7 μm、NA≈0.22 である。Er の寄生発振から LD の破壊を防ぐために WDM と種光源の間にはアイソレーター(1550 nm)を挿入した。次に出力 20 W の波長 915 nm LD を用いポンプコンバイナーを通して後方励起 Er:Yb 共添加ダブルクラッドファイバー増幅器によって主増幅を行った。使

用した Er:Yb 共添加ファイバーは、コア径 10  $\mu\text{m}$ 、クラッド径 128  $\mu\text{m}$ 、 $\text{NA}\approx 0.2$  である。主増幅器と前置増幅器の間にはアイソレーター(1610 nm)と Yb の寄生発振から LD の破壊を防ぐために WDM(1610 nm/1064 nm)を挿入した。WDM の 1064 nm ポートの端を APC にすることにより Yb による寄生発振のフィードバックを防いでいる。主増幅器後にも同じ WDM(1610 nm/1064 nm)を挿入し、こちらの 1064 nm ポートも APC にした。最後にアイソレーター(1610 nm)から出力を得ることにより増幅実験を行った。単一偏光を得るために PM ファイバーを使用した。

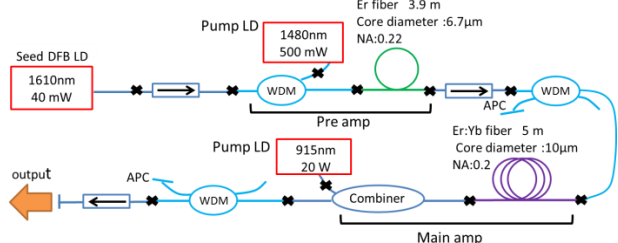


図 4. Er:Yb 共添加ファイバーを主増幅器とした MOPA 構成

## 3.2. 結果と考察

### 3.2.1. 前置増幅後の結果

まず前置増幅によって得られた WDM 後の出力特性とアイソレーター後のスペクトルを図 5 に示す。励起光出力 500 mW のとき種光は 227 mW まで増幅され、スロープ効率は 47%を示した。WDM とアイソレーターの損失があるため実際は約 300 mW まで増幅されている。主増幅を行うにあたってこの出力で充分と判断した。スペクトルを見ると波長 1610 nm において増幅されているのが確認できる。波長 1480 nm において励起光が確認できるがこれは主増幅器で吸収されるため問題ないと判断した。

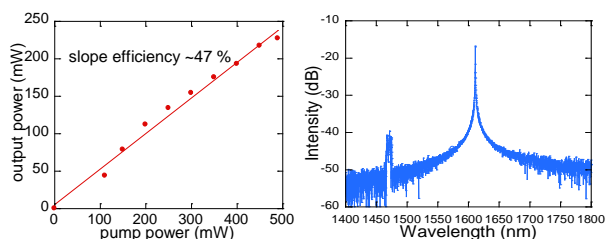


図 5. 前置増幅後の出力特性とスペクトル

### 3.2.2. 主増幅後の結果

主増幅実験によって得られた出力特性と偏波消光比を図 6 に示す。今回開発した波長 1610 nm 全ファイバー MOPA は最大出力 4 W、スロープ効率 20 %を示し、偏波消光比に大きな変化が無い為 PM ファイバーにより偏光が保たれた増幅が行われていることを確認できた。

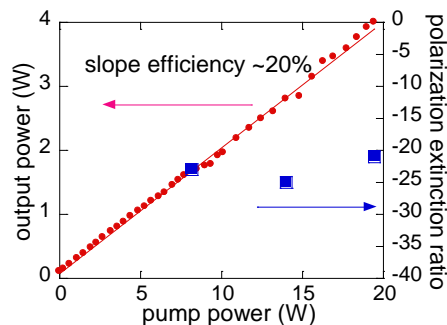


図 6. 出力特性と偏波消光比

また光スペクトルアナライザー(YOKOGAWA AQ6370C)によって測定したスペクトルを図 7 に示す。出力の上昇に伴い波長 1550 nm 周辺に Er による ASE の成長が確認された。

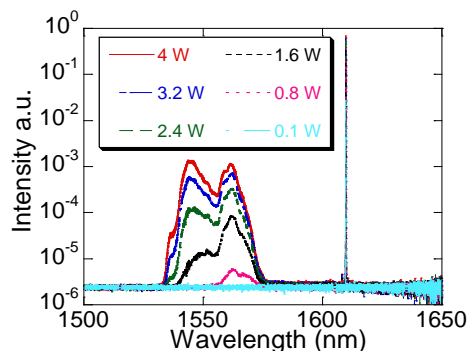


図 7. 出力上昇に伴うスペクトルの変化

このスペクトルの面積比から ASE の割合を計算した出力特性を図 8 に示した。

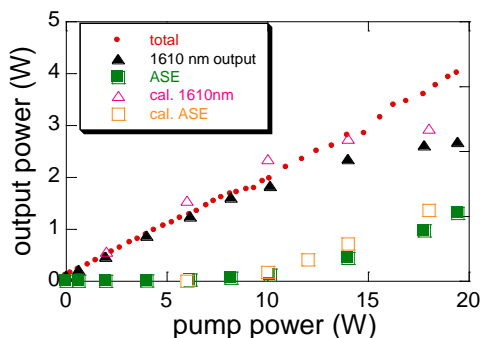


図 8. 増幅光と ASE の計算結果とシミュレーション

出力 2 W までは ASE の成長は見られなかったが 2 W 以降成長していきそれに伴い増幅光の出力が飽和した。最終的に増幅光の最大出力は 2.69 W、ASE は 1.31 W となった。この ASE はシミュレーションからも予想され、実測値との結果とはほぼ一致した。この ASE と共に誘導ブリルアン散乱によっても出力の制限が起きていないかを確認するために SBS 閾値を(3)式によって見積もった図を図 9 に示した。有効相互作用長 5 m、コア径を 10  $\mu\text{m}$  と仮定した時の SBS 閾値は約 6.6 W であったため SBS による出力の制限は起こっていないと考えられる。

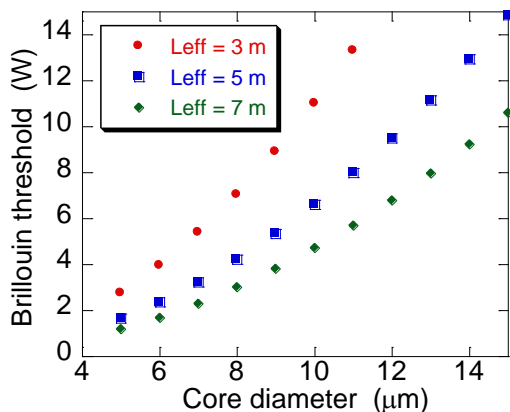


図 9. SBS 閾値の見積もり

また開発した光源の線幅を自己遅延ヘテロダイナミクス法によって測定した図を図 10 に示した。種光、前置増幅後、主増幅後の線幅は約 18 MHz が得られ、線幅の広がりが無い増幅動作が得られた。

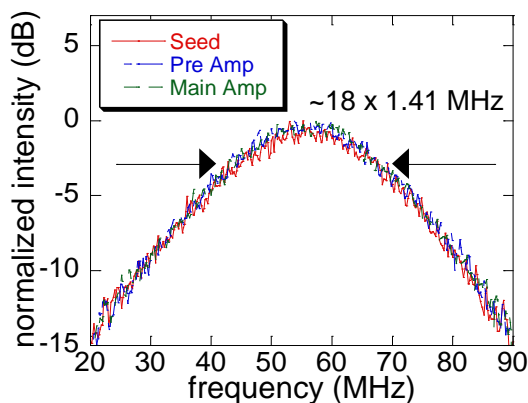


図 10. 線幅の測定結果

#### 4. まとめと今後の展望

本実験では最大出力 2.69 W、線幅 18 MHz、偏波消光比 21dB、安定な波長 1610 nm 全ファイバ MOPA 光源の開発に成功した。線幅の広がりがない増幅動作が得られたため、種光源である DFB レーザーを変えることによって Er シリカガラスの利得が存在する波長 1530-1627 nm において狭線幅で高出力な増幅動作が可能と考えられる。現在前置増幅器の増設、ASE 除去フィルタの挿入、主増幅器における励起 LD の出力増加により SBS 閾値の限界である 5~10 W までの増幅を目指している。

#### 参考文献

- [1] S, Grzegorz, et al. Optics Express **19**. 19104-19113. (2011)
- [2] J, Yoonchan, et al. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of **13**.573-579. (2007)
- [3] Thirstrup, Carsten, Yuan Shi, and Bera Palsdottir. Lightwave Technology, Journal of **14**.732-738.(1996)
- [4] 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
- [5] 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