戸倉川研究室 高貫 広翔

1. はじめに

Tm ファイバーレーザーは高効率・高出力な波長 2 μm 帯光源として注目を集めているが,非放射緩和過 程によって高温時に消光が顕著に表れてしまい,効率が 低下する[1].しかし,Tm ファイバーレーザーの動作の 温度依存性の報告は少なく,特に 0°C以下の報告は非常 に少ない[2].

本研究ではペルチェ素子を用いた温度制御システム を作成し,-10℃から 30℃の範囲で温度を変化させた際 の Tm ファイバーレーザーおよび増幅自然放出光 (ASE)光源の温度依存性について測定を行った.ASE 光 源は縦モードや緩和発振が存在せず,また線幅が広く時 間コヒーレンスが低いなどの特徴を有しているが,共振 器構成を持たないために波長の制御が困難であり,一般 的に利得ファイバーの長さ(光学濃度)を変えることで 波長を変化させていた[3].そこで,本研究では温度を変 化させることで中心波長の制御を試みた.

2. 原理

2.1 Tm レーザー

Tm³⁺の 2 μm 帯レーザー動作でのエネルギー準位を 図1に示す.



図1 Tm³⁺のエネルギー準位と遷移過程

波長 0.8 μm のレーザーダイオードで励起された Tm イ オンは,交差緩和過程によって隣接する基底準位の Tm イオンを励起する.この過程により量子効率2に迫る動

作が可能となり,最大スロープ効率は0.8に近づく[4].

2.2 交差緩和過程

交差緩和過程は,励起状態にあるイオンがそのエネル ギーの一部を周囲のイオンに移動させる非放射緩和過 程である.この遷移過程によって一つの励起光子に対し て二つの励起 Tm イオンを得ることが可能である.交差 緩和過程が発生する確率はイオン間距離Rの-6 乗に比 例した次式(1)のように表される[5].

$$P \propto \frac{K}{R^6} \tag{1}$$

Kは交差緩和過程が発生するエネルギー準位 H₆,³F₄,³H₄ での発光スペクトルと吸収スペクトルの重なり合いで ある.これよりこの緩和過程はイオン間距離が近いこと で発生確率が高くなり,シリカガラスでは少なくとも 2 wt%以上の添加濃度が望ましいとされている.

2.3 多フォノン緩和

多フォノン緩和とは,準位間のバンドギャップに相当 する励起エネルギーをホスト媒質の格子振動のエネル ギーという形で放出する非放射緩和過程である.希土類 イオンの 4f 準位間のエネルギー差は通常数千 cm⁻¹[6] であり,ファイバーのホスト材料である SiO₂の基準振 動エネルギーは数千百 cm⁻¹[6]であるため,多フォノン 緩和のためには複数のフォノンが必要となる.多フォノ ン緩和が起こる速度は次式(2)で表される[7].

 $W_{p}(T) = W_{0}(0) \exp(-\alpha \Delta E) \cdot (n+1)^{p}$ (2) $\alpha = \{\ln(p/g) - 1\}/(\hbar\omega)$ $p = \Delta E/\hbar\omega$ $n = 1/\{\exp(\hbar\omega/kT) - 1\}$ ここで \Delta E はエネルギー準位間のギャップ, W₀ は \Delta E =

0,T = 0(K)における緩和速度,nは温度Tにおけるエネ ルギー $\hbar\omega$ のフォノンの占有率を与える Planck 分布関 数,gは電子とフォノンの結合強度, ω は調和振動子の周 波数である.式(2)から,7 + J > 2数がpが少ないほど,ま た電子とフォノンの結合強度gが大きいほど多フォノ ン緩和の速度 $W_p(T)$ が上昇する.さらに,温度Tが高いほ ど多フォノン緩和速度が大きくなることがわかる.ま た,利得媒質に Tm を用いた場合,波長 1 μ m 帯の Yb レ ーザー等と比較するとエネルギー準位間のギャップΔE が小さいため,多フォノン緩和の速度W_p(T)が大きくな る.これより,利得媒質の温度上昇による効率低下の影 響を受けやすいことがわかる.

3. 温度制御システムの作成

高出力なレーザーを用いる際に発生する熱損失を抑 えるために,0°C以下の冷却かつ 180 W 以上の排熱が可 能な温度制御システムの作成を行った.図 2 に作成した 温度制御システムを示す.



図2 作成した温度制御システム

一次冷却として Tm ファイバーは Al 板(300×300×6 mm)に接しており,二次冷却として15 V,8 A のペルチェ 素子を 3 つ直列接続した.三次冷却として銅製水冷ヒー トシンクをペルチェ素子の放熱面に設置しており,加え て Tm ファイバーが Al 板に効率よく接すること,冷却 効率を高めることの二点を目的として CPU の冷却に使 用される導熱性シートで Tm ファイバーを覆った.実際 には-20°Cから 100°Cまでの温度で操作が可能だが,Al 板の面積が広く,放熱が起こるため 0°C以下の冷却が困 難であった.そのため,温度制御システム全体に断熱材 を被せることで-5°C以下の操作が可能となった.

4. Tm ファイバーレーザーの温度依存性の評価 4.1 実験構成

実験構成を図3に示す.利得ファイバーとしてTm添加ダブルクラッドファイバー(Nuhern, SM-TDF-10P/130-HE,ファイバー長1.7m,コア径10 μm,NA=0.15,クラッド径130μm)を用いており,これを pump combiner を介して波長793 nm,最大出力4.3 W のファイバー結合レーザーダイオードで励起した.Tm ファイバーは作成した温度制御システムで冷却および加熱され,-10℃から30℃までの範囲で温度を変化させた.レーザー共振器はファイバー端面のフレネル反射で 構成されており,レーザー出力はOutput1,2のファイバ ー両端面に出射される.ファイバー内でのスキューモー ドに起因して発生する励起光の通り抜けによる効率低 下を防ぐため,ファイバーを少し曲げAl板に取り付けた プラスチックビスで固定した.





4.2 実験結果

4.2.1 出力の温度依存性

-10℃から 30℃の範囲で温度を変化させた際に得ら れた吸収励起パワーに対する Tm ファイバーレーザー の出力を図4に,各温度の発振閾値およびスロープ効率 を図5に示す.-10℃から 30℃の範囲で実際には5℃刻 みで測定しているが,簡略化のため出力特性の図におい ては10℃刻みの結果を示す.



温度の低下ともに最大出力およびスロープ効率は上が り,レーザー発振閾値は低下した.-10℃において,最大出 力 1.5 W,発振閾値 1.3 W,スロープ効率 $\eta_s = 0.53$ が得ら れた.-10°Cと 30°Cの発振閾値およびスロープ効率を比 較すると,発振閾値は約 35%低下し,スロープ効率は約 8%の上昇を確認できた.

4.2.2 スペクトルの温度依存性

温度を変化させた際に測定した発振直後のスペクト ルを図6に示す. 温度の低下につれ発振波長が短波長 側にシフトしていることが確認できる.-10℃および 30℃において,発振波長はそれぞれ 1970 nm,1984 nm が得られた.



レーザーのスペクトル

以上の結果は,Maxwell-Boltzmann 分布に従い,温度の 低下とともにシュタルク準位内の原子の分布の変化が 発生し,これにより,再吸収の減少及び非放射緩和過程 の減少による発振閾値の低下およびスロープ効率の上 昇,また利得スペクトルのピークの短波長化による発振 波長の変化が発生したと考えられる.

5. ASE 光源の作成及び温度依存性の評価

5.1 実験構成

将来的に100Wを超える高出力化を行うために,ファ イバー増幅システムを構築することを考慮する際,狭線 幅な種光源を用いると誘導ブリルアン散乱による出力 の制限が予想される.そのため,線幅が広いために誘導 ブリルアン散乱の起こりづらく,また安定性の高い ASE 光源を種光源として採用することを検討し,ASE 光源の 作成を行った.また,作成した温度制御システムを用い て ASE 光源の温度特性の評価を行った.実験構成を図7 に示す.Output2に8°にアングルされている APC ファ イバーを融着することで,フィードバックを抑制した構 成となっている.



5.2 実験結果

5.2.1 出力の温度依存性

温度を変化させた際の出力を図8に示す.レーザー発 振を抑制していたが,励起出力を上げると残存反射によ り発振した.同様に温度を下げるにつれレーザー発振光 の最大出力,スロープ効率は増加し,発振閾値は低下し た.フレネル反射を用いたレーザー発振器構成と比較し てより大きな温度依存性がみられた.



本研究で目的としていた増幅自然放出光の範囲での出 力を図9に示す.



励起出力を上げるにつれ,出力が指数関数的に増加して

いることが確認できた.また,-10℃と 30℃の結果を比較 すると,温度に大きな依存性をもつことが確認された.

5.2.2 中心波長の温度依存性

測定した各温度における出力に対する中心波長を図 10 に示す.



温度の低下とともに短波長側へのシフトが確認でき,-10℃と 30℃と比較するとそれぞれ出力 55m W, 41 mW において中心波長 1951 nm, 1962 nm であった.これよ り,温度の変化によって中心波長を約 10 nm 変化させる ことができた.

5.2.3 スペクトル幅の温度依存性

例として室温 20℃における励起出力を変化させた際 のスペクトルのフィッティングの結果を図 11 に示す. 励起出力によってスペクトル幅が変化することが確認 できた.



図11 20°Cにおける励起出力に対するスペクトル幅 各温度における出力に対する半値幅から求めたスペク トル幅を図 12 に示す. 温度を変化させてもスペクトル 幅の大きな変化は見られず,励起出力の増加につれ,ス

ペクトル幅が狭まったことがわかる.励起出力が上がる と残存反射によりレーザー発振に近づき,スペクトル幅 が狭まると考えられる.これより,スペクトル幅の温度 依存性は小さく,主に励起出力に依存することが確認で きた.



図12 各温度における出力に対するスペクトル幅

6. まとめ

本研究では高出力な Tm ファイバーレーザーの作成 を目的とし、0°C以下に冷却が可能な温度制御システム の作成を行った.また作成した温度制御システムを用い て,-10°Cから 30°Cの範囲で Tm ファイバーレーザーお よび作成したASE光源の温度依存性の評価を行った.両 者の発振閾値およびスロープ効率,中心波長は温度によ って変化し、低温化につれそれぞれ低下,上昇,短波長化 した.ASE 光源はスペクトル幅の温度依存性は小さく, 主に励起出力に依存することが確認できた.出力はより 強い温度依存性を示し,温度によって中心波長を約 10 nm 変化させることができた.

参考文献

[1] Stuart D Jackson, Optics Communications, 230, 197-203 (2004)

[2] Chongyuan Huang, Yulong Tang, *et al.* Journal of lightwave technology, **32**, 421-428 (2014)

[3] J. Aubrecht, P. Peterla, P. Honzátko, O. Moravec, M. Kamrádek,

- and I. Kašík, Opt.Lett. ,45, 2164-2167 (2020)
- [4] K. Dalfsen, Opt. Lett., 39 (2014)
- [5] Stuart D. Jackson, Laser & Photon, 3, 466-482(2009)
- [6]河本洋二,光学,32, 300-307 (2003)
- [7] Setsuhisa Tanabe, *et al.*, Jouenal of the Ceramic Society of Japan, **101**, 78-83(1993)