

Tb 添加光ファイバーを用いた連続発振グリーンレーザー

大石 泰 丈

Tb-Doped CW Green Fiber Laser

Yasutake OHISHI

The $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ transition of Tb^{3+} acts as the four-level laser transition in the green band. In the 1960s, the pulsed green laser operation was demonstrated with Tb^{3+} chelate in liquid solution using Xe flush pumping at room temperature. However, to the best of our knowledge, the continuous-wave (CW) laser action of Tb^{3+} has not been demonstrated. A photodarkening effect which potentially degrades the gain performance has been observed in Tb^{3+} -doped germanosilicate and aluminosilicate glass fibers. We clarified that the pump excited absorption can be largely suppressed by using fluoride fiber as a host of Tb^{3+} . We successfully demonstrated CW laser operation using Tb^{3+} -doped fluoride fiber for the first time.

Key words: Tb-doped fiber laser, green laser, CW operation

可視領域における高品質・高効率なレーザー光源や光増幅素子は、計測、加工、車載用通信分野等における応用が期待される。 Tb^{3+} を使ったグリーンレーザーは1970年前後に2、3例パルスレーザー発振が報告されているが、連続発振 (continuous wave: CW 発振) は報告されていない¹⁻³⁾。 Tb^{3+} 添加石英ファイバーの光学特性も調べられているが、レーザー光を入射するとフォトダークニングが起これり、損失特性が劣化することが知られている⁴⁾。われわれは、0.54 μm 帯に輻射遷移を有する Tb^{3+} イオンに注目し、種々のガラス導波路材料中での Tb^{3+} の光増幅およびレーザー媒質としての可能性を研究し、緑色の波長領域である0.54 μm 帯において世界ではじめて Tb^{3+} を用いた光信号増幅およびCWレーザー発振に成功した。ここでは、その概要を紹介する。

1. Tb^{3+} の光学特性

表1に、ガラス中の Tb^{3+} の Judd-Ofelt (J-O) 解析および発光特性測定により求めたグリーンの遷移である $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ 遷移の特性をまとめた⁵⁾。また、図1にフッ化物ガラス中の Tb^{3+} イオンの発光寿命の濃度依存性を示すように、5 wt% まで寿命の低下はみられず Tb^{3+} のグリーンの発光は濃度消光の起きにくい遷移といえる⁶⁾。また、どの

ガラス中においても 5D_4 準位の理論的な蛍光寿命と測定値とほぼ一致し、90%以上の量子効率をもち、 5D_4 準位の非輻射緩和はほとんど起こらないことがわかった。増幅媒体の性能指標となる $\sigma_{em}\tau_{meas}$ 値もフッ化物ガラスで $2.8 \times 10^{-24} \text{ cm}^2\text{s}$ であり、他の希土類イオン (Tm^{3+} , Pr^{3+} 等) のレーザー遷移と遜色ない値を示していることがわかった。この事情は、他のガラスについても同様である。このように、 $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ 遷移自体は、レーザー発振遷移として適した遷移といえる。

2. Tb^{3+} 添加光ファイバーの光増幅およびレーザー発振特性

図2に Tb^{3+} イオンのエネルギー準位図を示す⁷⁾。光増幅やレーザー発振には、光増幅を起こす誘導放出遷移だけでなく、他の遷移が特性に大きく関与することがある。 Tb^{3+} の場合、光増幅特性を理解するには励起状態吸収を考慮する必要がある。これは、 Tb^{3+} の 5d 準位が比較的低エネルギーに位置していると考えられているためである。たとえば、488 nm の光で 5D_4 準位を直接励起すると、 5D_4 準位から 5d 準位への励起状態吸収が起こる可能性がある。また、540 nm 帯の信号光やレーザー発振光による励起状態吸収も起こりえる。

5d 準位は、フッ化物等のハライド物質中では、酸化物

表1 希土類添加ガラスの $\sigma_{em}\tau_{meas}$ 積の比較.

Rare-earth doped glass	Emission wavelength (nm)	Radiative lifetime τ_{meas} (ms)	Emission cross section σ_{em} (10^{-21} cm ²)	$\sigma_{em}\tau_{meas}$ (10^{-24} cm ² s)
Er-doped silica glass	1532	11	5	30
Nd-doped fluoride glass	1300	0.45	8	3.6
Tb-doped fluoride glass	541	3.95	0.72	2.8
Tb-doped SBNACZ glass	542	2.61	0.81	2.1
Tm-doped fluoride glass	480	1.6	1.12	0.8
Pr-doped fluoride glass	1300	0.11	3.5	0.4

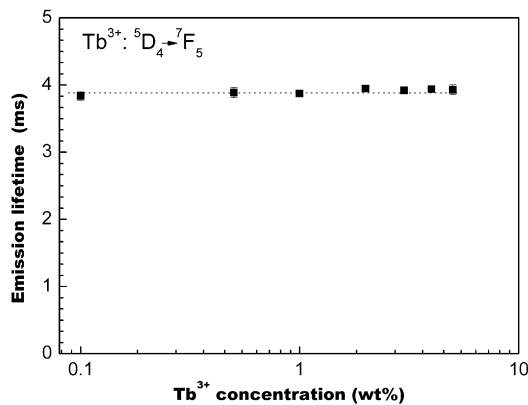


図1 ZBLAN 中 Tb³⁺ の発光寿命の濃度依存性.

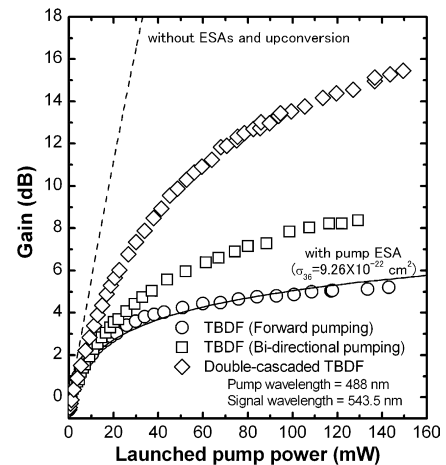


図3 Tb³⁺添加フッ化物ファイバーの 0.54 μm の利得の励起光強度依存性 (実線は計算値).

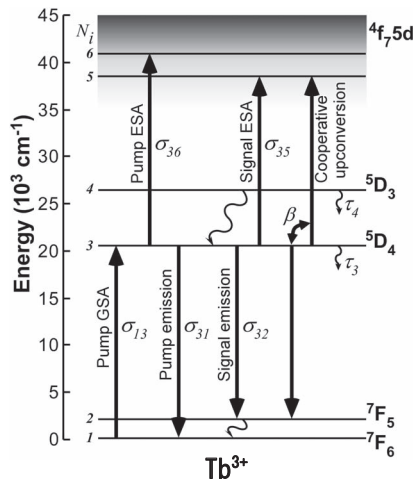


図2 Tb³⁺ のエネルギー準位図と遷移.

中より 5d 単位が上位に位置していることが知られている。これを考慮し、Tb³⁺ のホストとしてフッ化物ファイバー (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF (ZBLAN)) を用いた。

光増幅実験は、Tb³⁺ 添加フッ化物ファイバー ($\Delta n = 0.54\%$, コア径 = 2.3 μm , カットオフ波長 = 0.47 μm , 損失 = 0.05 dB/m (波長 0.54 μm), 長さ 10 m) を Ar⁺ レーザー (励起波長: 488 nm) で励起し、He-Ne レーザー (信号光波長: 543.5 nm, 信号強度 -30 dBm) からの光を信号光として行った。また、同ファイバーの両端にファイバー・ブラック・グレーティング (反射率 99% と 19%,

反射波長 542.8 nm) を接続してファイバーレーザーを構成し、レーザー発振実験を行った。

図3に光増幅実験の結果を示す⁷⁾。信号光と励起光とを同一方向から入射した前方励起の場合、励起光量が 115 mW のとき、5.2 dB の信号利得を確認でき、実際に Tb³⁺ の 5D₄ → 7F₅ 遷移による利得が生じることをはじめて明らかにした。しかし、励起光量の増加に対して信号利得は飽和する傾向を示すこともわかった。前方励起の場合における Tb³⁺ 添加フッ化物ファイバーの利得特性シミュレーションを、励起光および信号光の励起状態吸収および Tb³⁺ イオン間の無輻射によるエネルギー移動により起こる協同アップコンバージョンを考慮して行った。結果は図3中の実線に示すように、励起準位である 5D₄ 準位からの励起光の励起状態吸収を考慮した場合に、実験結果の利得飽和特性をよく再現する結果が得られた。このシミュレーションにより、励起状態吸収の吸収断面積は 7F₆ → 5D₄ 遷移に対する吸収断面積の約 9 倍もの大きさであることがわかった。また信号光の励起状態吸収や共同エネルギー移動による利得特性の劣化は問題にならないと考えられる。

励起光の励起状態吸収の遷移確率は励起光パワーの 2 乗に比例するため、前方励起よりも励起光パワー密度が低くなっている双方向励起と双方向励起されたファイバーを

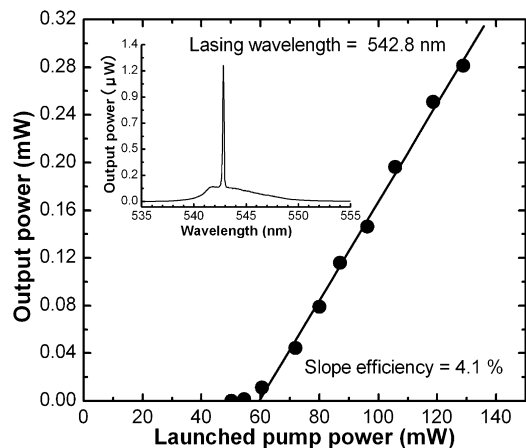


図4 Tb³⁺添加フッ化物ファイバーレーザーの発振特性 (挿入図は発振スペクトル).

2段にシリーズに接続した2段カスケード双方向励起の場合には、この励起状態吸収が抑制されて、信号利得が増加すると考えられる。そこで、双方向励起および2段カスケード双方向励起実験を行った。図3でわかるように、光ファイバーの両端から励起光を入射した双方向励起の場合には、励起光量が130 mWのとき8.3 dBの利得が得られ、前方励起の場合よりも信号利得が向上することがわかった。また、2段カスケード双方向励起の場合、最大で15.5 dBの利得が得られ、さらに信号利得が向上することがわかった。これらの結果から、488 nm励起の場合、励起光の励起状態吸収が⁵D₄→⁷F₅遷移の利得を低下させる大きな要因となっていると結論できる。

図4にTb³⁺添加フッ化物ファイバーによるファイバーレーザーの出力特性を示す^{7,8)}。Tb³⁺イオンによる波長542.8 nmの連続レーザー発振をすることに初めて成功した。488 nm励起で発振閾値が60 mW、スロープ効率は4.1%であった。レーザー出力特性は、ファイバー長等のパラメーターの最適化や励起法の改善により、さらなる向上が期待できると考えられる。

Tb³⁺の⁵D₄→⁷F₅遷移による0.54 μm帯の光増幅およびCWレーザー発振に、世界で初めて成功した。⁵D₄準位励起を用いたTb³⁺の⁵D₄→⁷F₅遷移による光増幅およびCWレーザー発振を制限している要因は、励起光の励起状態吸収であることを解明した。この励起状態吸収による特性劣化は、ホスト材料の選定、具体的にはTb³⁺が高い5d準位を取るホスト、励起光分布を空間的により均一励起に近づけることにより抑えられることを示した。

本研究を中心となって推進した山下達弥氏の努力に感謝するとともに、研究遂行に関して貴重な助言をいただいた鈴木健伸准教授に深謝します。

文 献

- 1) S. I. Andreyev, M. R. Bedilov, G. O. Karapetyan and V. M. Likhachev: "The stimulated emission of terbium-activated glass," *Sov. J. Opt. Technol.*, **34** (1967) 819.
- 2) S. Bjorklund, G. Kellermeyer, C. R. Hurt, N. McAvoy and N. Filipescu: "Laser action from terbium trifluoroacetylacetonate in p-dioxane and acetonitrile at room temperature," *Appl. Phys. Lett.*, **10** (1967) 160-162.
- 3) H. P. Jenssen, D. Castleberry, D. Gabbe and A. Linz: "Stimulated emission at 5445Å in Tb³⁺:YLF," *IEEE J. Quantum Electron.*, **9** (1973) 665.
- 4) G. R. Atkins and A. L. G. Carter: "Photodarkening in Tb³⁺-doped phosphosilicate and germanosilicate optical fibers," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 874-876.
- 5) T. Yamashita and Y. Ohishi: "Cooperative energy transfer between Tb³⁺ and Yb³⁺ ions co-doped in borosilicate glass," *J. Non-Cryst. Solids*, **354** (2008) 1883-1890.
- 6) T. Yamashita and Y. Ohishi: "Optical amplification at 0.54 μm by Tb³⁺-doped fluoride fiber," *Electron. Lett.*, **43** (2007) 88-89.
- 7) T. Yamashita and Y. Ohishi: "Amplification and lasing characteristics of Tb³⁺-doped fluoride fiber in the 0.54 μm band," *Jpn. J. Appl. Phys. Express Lett.*, **46** (2007) L991-L993.
- 8) T. Yamashita and Y. Ohishi: "A new green fiber laser using terbium-doped fluoride fiber," *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC NFOEC 2008)*, JWA18 (2008).

(2013年6月6日受理)