

スラブ型 $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックを用いたレーザー共振器の開発

戸倉川研究室 多田 涼太郎

1. はじめに

本研究室で開発している波長 2 μm 帯のレーザーは、水の吸収が強いことからレーザーメスなどの医療分野に利用され、またポリマーの吸収が強いためポリマー加工への応用も期待されている。

波長 2 μm 帯のレーザー光の発生に用いられる利得媒質の代表例に、 Tm^{3+} がある。 Tm^{3+} の強みとして高出力な LD を用いて直接励起できることが挙げられ、波長 800 nm で励起すると量子効率 2 に迫る高効率な動作が可能になる。また本研究で用いた $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ は、他の Tm^{3+} 添加媒質に比べ比較的広帯域な利得スペクトルを有しており、さらに優れた熱機械特性を持つため高出力なレーザー動作が可能になる。しかし本利得媒質は高融点であり大型の結晶成長が困難であるという欠点がある。[1]そのため本研究では大型の結晶が作成可能であるセラミックの $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ を用いて $\sim\text{mJ}$ 、 $\sim 10\text{ W}$ の高出力なレーザーの開発を目指した。

2. 原理

2.1 $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 利得媒質の特徴

図 2(a)に Tm^{3+} イオンのエネルギー準位図を示す。800 nm 帯のレーザーによって $^3\text{H}_6$ から $^3\text{H}_4$ に励起された後、 $^3\text{H}_4$ のイオンが $^3\text{F}_4$ へ非放射緩和される際に隣接する Tm^{3+} イオンへエネルギーが譲渡されることで基底状態にあるイオンが $^3\text{F}_4$ へ励起される。このクロス緩和と呼ばれる励起過程により 1つの光子の吸収で2つのイオンが励起され、量子効率が 2 に迫る高効率な動作が可能となる。

本研究で用いた Tm^{3+} 利得媒質は $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ であり、図 2(b)に示すように 2000~2100 nm の領域

に利得スペクトルを有していることから、1950 nm 以下の領域に存在する水蒸気の吸収に妨げられることのない安定したレーザー発振が可能である。また、他の Tm^{3+} 添加媒質である $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ や $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ 等と比べ比較的広帯域な利得スペクトルを有しており、さらに高い熱伝導率を持つなど高出力化に適した優れた熱機械特性も有している。

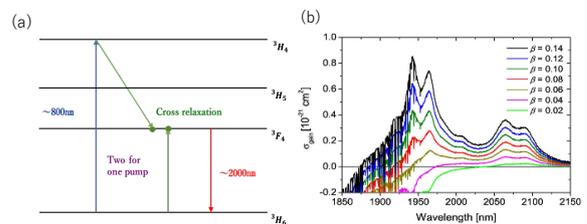
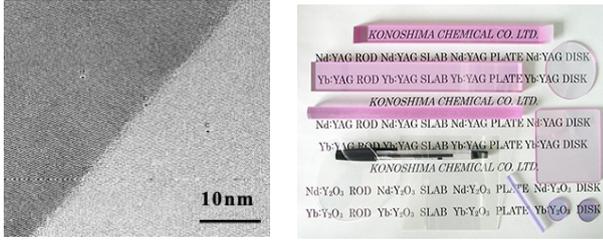


図 2(a) Tm^{3+} のエネルギー準位図

図 2(b) $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の利得スペクトル[2]

$\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の欠点としては、融点が高く大型の結晶成長が困難であることが挙げられる。しかし本研究では、 $\sim\text{mJ}$ 、 $\sim 10\text{ W}$ の高出力なレーザーの開発を目指しているため大型の結晶が必要となる。そこで、融点よりも低い焼結温度で大型の結晶が作成可能かつ機械的強度も高いセラミックの $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ を用いた。セラミックは多結晶体[3]だが、高温で焼成することで光の散乱源となるポアを排除し、また図 3(a)に示すように粒界層を極めて薄くすることで、図 3(b)のような高い透光性を有することが可能である。



(a) 粒界部の TEM 画像[3] (b) 外観[4]

図 3 透明セラミック

2.2 共振器設計

本研究では図 4 に示すような共振器を用いた。この共振器の設計に関して以下に説明する。

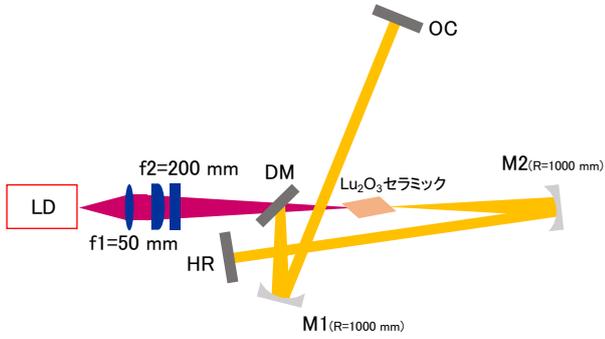


図 4 スラブ型 $\text{Tm}^{3+}\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックレーザー実験系

2.2.1 ガウシアンビームの伝搬とビーム品質

ガウシアンビームの伝搬を図 5 に示す。図 5 において位置 $z = 0$ をビームウェストと呼び、その時のスポットサイズが w_0 である。ビームは伝搬と共に拡がり、 $z = z_0$ でスポットサイズが $\sqrt{2}$ 倍になる。この時の z_0 をレイリー長と呼び、基本ガウシアンビームにおいては $z_0 = \frac{\pi w_0^2 n}{\lambda}$ で表される。

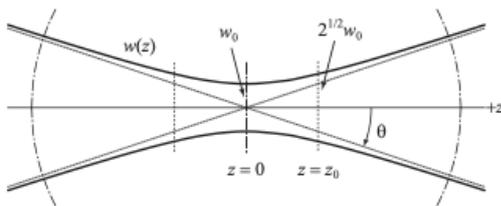


図 5 ガウシアンビーム進行波[5]

本研究で使用する LD はコア径が $105 \mu\text{m}$ 、 $NA:0.22$ のマルチモード出力であるため基本ガウシアンビームにならない。そこで、ビームの横モード品質を示す M^2 を導入する。光ファイバーの M^2 は、その開口数 NA およびコア径 a より

$$M^2 = \frac{\pi a}{2\lambda} \tan\{\sin^{-1}(NA)\} \approx \frac{\pi a(NA)}{2\lambda} \quad (1)$$

と表される。[6]このときビームスポット $w(z)$ は M^2 を用いて

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda z}{\pi w_0^2 n}\right)^2} \quad (2)$$

と書ける。

さらに本研究では結晶をブリュースター角で配置しているため、入射時の屈折の影響で sagittal(水平面)のビーム径が変化する。それを考慮すると sagittal, tangential(垂直面)方向でのビーム径、またレイリー長はそれぞれ

$$w_x(z) = n w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda z}{\pi w_0^2 n^3}\right)^2}, z_{x0} = \frac{\pi w_0^2 n^3}{M^2 \lambda} \quad (3)$$

$$w_y(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda z}{\pi w_0^2 n}\right)^2}, z_{y0} = \frac{\pi w_0^2 n}{M^2 \lambda} \quad (4)$$

で表される。[7]

2.2.2 自己無撞着法

共振器内のビーム径の計算には自己無撞着法[8]を用いた。共振器内の任意の位置での定常複素ビームパラメータを q_s と表し、かつ $ABCD$ 則を用いて、共振器を一周巡回する時に光電場が元の分布に回帰するという条件を課すと

$$q_s = \frac{Aq_s + B}{Cq_s + D} \quad (5)$$

と表される。これを q_s について解き、ビームパラメータ q とビーム半径 w および曲率半径 R の関係

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi w(z)^2 n} \quad (6)$$

を比較することによって w は

$$w = \left(\frac{\lambda}{\pi n}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{(|B|)^{\frac{1}{2}}}{[1 - \{(D + A)/2\}^2]^{\frac{1}{4}}} \quad (7)$$

と求まる.

2.2.3 非点収差

媒質にレーザー光が入射角 θ で入射すると, sagittal と tangential で媒質中を伝搬する実効的な距離が変化する非点収差が生じる. その実効的な距離は媒質の屈折率 n と厚み t を用いてそれぞれ

$$d_x = \frac{t}{(n^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}}, \quad d_y = \frac{tn^2 \sqrt{1 - \sin^2 \theta}}{(n^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{2}{3}}} \quad (8)$$

と表される. また, ミラーにレーザー光が斜入射した際も非点収差が生じ, 焦点 f のミラーに入射角 θ でレーザー光が入射するとそれぞれ

$$f_x = \frac{f}{\cos \theta}, \quad f_y = f \cdot \cos \theta \quad (9)$$

という実効的な焦点距離を持つ. [9]

本研究では, 媒質とミラーでの非点収差が打ち消し合うように

$$d_x - d_y = f_y - f_x \quad (10)$$

と条件を課すことで収差を補償した.

3. 共振器設計の結果

3.1 LD の集光光学系

本研究で使用した LD のビーム品質を考慮し, 結晶長 15 mm に対して, レイリー長が半分の 7.5 mm に収まるよう集光レンズ系を決定する必要がある. 今回結晶内において tangential 方向の方がレイリー長が短くなるため, 式(4)を用いて $z_{y0} = 7.5$ mm として計算すると $w_0 = 216 \mu\text{m}$ となる. そこで, この値と近い値を取るように図 6 のような集光レンズ系を用いた. このレンズ系を用いると集光点での w_0 は 210 μm となり, そのときのレイリ

一長は 7.3 mm と, 7.5 mm 内に収めることができた.

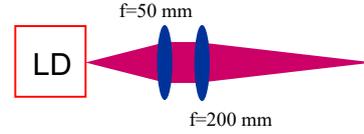


図 6 実験に用いた集光レンズ系

3.2 非点収差補償

前章の非点収差の計算結果を表 1 に示す.

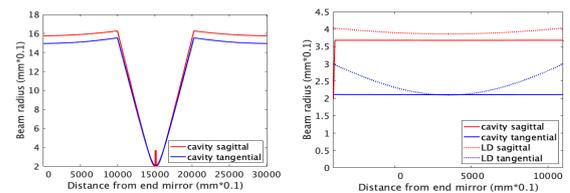
表 1 非点収差の計算結果

	DM/mm	結晶内/mm	合計/mm
励起光	2.4	3.3	5.7
レーザー光		3.3	3.3

計算結果より, 励起光に生じる非点収差は, ダイクロミックミラー(DM)通過による 2.4 mm, および結晶へのブリュースター角入射による 3.3 mm の合計 5.7 mm となった. そこで集光レンズをシリンドリカルレンズ 2 枚にし, その間を 5.7 mm とすることでこれを補償した. また共振器内のレーザー光も同様に結晶内の非点収差 3.3 mm を, 式(10)を用いて, ミラー($f = 500$ mm)へのレーザー光の入射角度を 3.3 °とすることで補償した.

3.3 ビーム径の計算結果

共振器内の sagittal, tangential 方向のビーム半径を図 7(a)に示す. また同様に結晶内での励起光とレーザー光のビーム半径を図 7(b)に示す.



(a) 共振器内のビーム半径 (b) 結晶内のビーム半径

図 7 計算したビーム半径

図 7(a)より共振器の端面ではビーム径が 1.5 mm 程度となった。また図 7(b)より結晶内において励起光とレーザー光のモードマッチが十分に取れていることを確認した。

4. 実験

4.1 LD の出力特性の測定

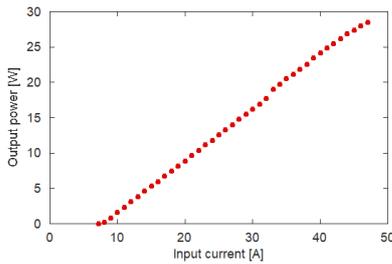


図 8 LD の出力特性

励起光源は波長 793 nm multi-mode LD を使用し、 $NA:0.22$, コア径:105 μm , 最大出力 30 W 程度である。図 8 は LD の 0~47 A までの出力特性を示しており、最大出力は約 30 W, また線形の関係があることから、熱の影響を受けずスペック値通りの値が出ることを確認できた。

4.2 $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックレーザー実験

本研究では図 4 に示した共振器を用いており、利得媒質は $2 \times 5 \times 15 \text{ mm}$, 屈折率:1.84, 1.25at.%添加の $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックを用いた。またクロスニコルで複屈折を測定したところ損失が0.032%と十分小さいことを確認した。この結晶を銅製のホルダーに入れブリュースター角で配置し、ペルチェで 18°C に冷却した。ミラー M1, M2 はいずれも曲率半径 1000 mm, 高反射コート 1850-2100 nm を有しているものを使用し、また取り出し鏡は透過率 1%のものを使用した。

16 W 励起(6.5 kW/cm^2)で発振を試みたが発振には至っていない。発振しない理由として、ブリュ

ースター角入射が最適化されておらず反射損失が存在していること、励起パワーが足りていないことが考えられる。今後はそれらを改善した発振実験を行い、それでも発振しない場合には小信号利得の測定を行うことも考えている。

5. 結論

本研究では、スラブ型 $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックを用いたレーザー共振器の開発を目指した。まず初めに、LD の集光特性の評価を行い、その結果、集光径を 420 μm とした時レイリー長は 7.3 mm となり 15 mm の結晶長内に収めることができた。また結晶内において励起光、レーザー光のモードマッチが十分に取れるような、非点収差補償を踏まえた共振器を設計した。16 W 励起(6.5 kW/cm^2)で発振実験を試みているが発振には至っていない。発振に至らない理由としてブリュースター角入射が最適化されておらず反射損失が存在していること等が考えられ、今後はそれらを改善した発振実験を行う。発振した後としてはポッケルスセルを導入し、再生増幅器への応用を考えている。

参考文献

- [1]S. Kitajima, 電気通信大学院 博士論文 (2019)
- [2]P. Koopmann, *et al.*, *Optics Letters*,**36**,948-950 (2011)
- [3]八木秀喜, 電気通信大学院 博士論文 (2006)
- [4]KONOSHIMA, ”透明セラミック”, <http://www.konoshima.co.jp/ceramics/product.html>,
- [5]近藤高志, ”情報・ナノマテリアル工学 II”, <http://www.castle.t.u-tokyo.ac.jp/lecture/2008/inmII/notes/inm2008.pdf>
- [6]平等拓範, レーザー学会誌,**26**,723-729 (1998)
- [7]Herwig W.Kogelnik *et al.* *Journal of quantum electronics*,**3**,373-379 (1972)
- [8]ヤリーヴ・イェー著, 多田邦雄, 神谷武志監訳, 石川卓上 *et al.*共訳, ”ヤリーヴ・イェー 光エレクトロニクス 基礎編”, 丸善株式会社 (2010)
- [9]David C.Hanna *et al.* *Journal of quantum electronics*,**10**,483-488 (1969)