Tm³+:YLF レーザー励起 Cr²+:ZnSe レーザーの開発

2133069 多田 涼太郎

主任指導教員:戸倉川 正樹 准教授 指導教員:白川 晃 教授

1. はじめに

Cr²⁺:ZnSe[1]は、波長 1.9-3.4 μm に広帯域な蛍光スペク トルを有し、室温で高効率・低発振閾値のレーザー動作 が可能であり、機械的安定性にも優れたレーザー媒質で ある。また 1.5-2.1 μm に吸収を有し、Tm³⁺や Ho³⁺レーザ ーといった汎用的なレーザーでの励起が可能である。ま た Cr²⁺:ZnSe レーザーを励起光源とし ZnGeP₂(ZGP)結晶 を用いた光パラメトリック発振[2][3]により、分子の指紋 領域[4]が存在する 2-10 μm へ変換することもでき、その 中赤外光を用いた医療応用[5]や環境計測[6]、分光計測 [4]、加工応用などが注目を集めている。これら応用にお いて高エネルギー(μJ~mJ)で短パルス(~ns)な Cr²⁺:ZnSe レーザーが求められている。 我々の研究室では、Q スイ ッチ法 [7] を用いたパルス幅~ns の Tm³+レーザーの開 発を行ってきたが、Tm³+添加媒質(蛍光寿命~10 ms)と比 ベ Cr²⁺:ZnSe は蛍光寿命が 6 us と小さく、O スイッチ法 では高エネルギーな短パルス光は得難い。

本研究では、励起光源に Q スイッチ Tm レーザーを用いた、パルスエネルギー-mJ かつパルス幅-ns の利得スイッチ Cr^{2+} :ZnSe レーザーの開発を目指し、前段階の実験として将来的な Q スイッチ発振を考慮した共振器設計のもと、連続発振 Tm^{3+} :YLF、 Tm^{3+} :YAP レーザー、およびそれを用いた連続発振 Cr^{2+} :ZnSe レーザーの開発を行ったのでその結果を報告する。

2. 原理

2.1. Tm³⁺:YLF, Tm³⁺:YAP 利得媒質の特徴

 Tm^{3+} レーザーは波長 $2\mu m$ 帯で動作可能であり、その大きな利点として、高出力な波長 $0.8\mu m$ 帯 LD を用いて直接励起可能であることが挙げられる。 図 1 に Tm^{3+} イオンのエネルギー準位図を示す。 $0.8\mu m$ 帯のレーザーによって $^{3}H_{6}$ から $^{3}H_{4}$ に励起された後、 $^{3}F_{4}$ に非放射緩和する際に、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準位にあるイオンが $^{3}F_{4}$ に励起される。

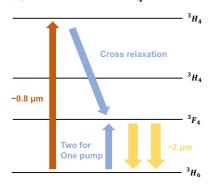


図 1. Tm3+のエネルギー準位図

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に迫る動作が可能である。また理論限界の効率についても80%と非常に高い値が得られる。

 Tm^{3+} :YLF(yttrium lithium fluoride)は、化学式 LiYF4で表される一軸性結晶であり、c 軸に対して並行な π 偏光および垂直な σ 偏光が存在する。表 1 に Tm^{3+} 添加媒質の物性を示す。表 1 に示すように Tm^{3+} :YLF は屈折率が小さく、熱光学定数が負で、その絶対値も小さい値を示すことから、熱レンズ効果を抑制し、高出力なレーザー動作に適している。また蛍光寿命についても他のホスト材料と比べ長いため、上準位に反転分布をある程度蓄える必要のある Q スイッチ発振などの動作に適している。さらに 1.8-2.0 μ m に広がる蛍光スペクトルを有し、後述する Cr^{2+} :ZnSe の励起光源として利用可能である。

 Tm^{3+} :YAP(yttrium aluminum perovskite)は、化学式 YAIO3 で表され、ペロブスカイト構造を持つ二軸性結晶であり、結晶軸として a 軸、b 軸、c 軸が存在する[9]。表 1 に示すように Tm^{3+} :YAP は熱伝導率に優れ、また 1.7-2.0 μ m に広がる蛍光スペクトルを有し Tm^{3+} :YLF 同様、 Cr^{2+} :ZnSe の励起光源として利用可能である。

表 1. Tm³+添加媒質の物性 [8][9][10][11][12][13][14]

母材	屈折率	発振波長	熱伝導率	熱光学定数	蛍光寿命
		[µm]	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	[ms]
YLF	~1.44	1.8-2.0	5.3lla 7.2llc	-4.6lla, -6.6llc	14
YAP	~1.92	1.9-2.0	14	8.5lla, 8.1llb, 12.8 llc	5
YAG	~1.81	2.0-2.1	10~14	9	10
Lu ₂ O ₃	~1.90	2.0-2.1	12.8	9.1	4

2.2. Cr²⁺:ZnSe 利得媒質の特徴

 Cr^{2+} :ZnS/ZnSe は、広帯域な蛍光スペクトルや優れた機械的安定性などから「中赤外の Ti:Sapphire」とも呼ばれている。図 2 に Cr^{2+} :ZnSe の吸収(黒実線)および誘導放出断面積を示す(赤実線)[1]。 Cr^{2+} :ZnSe は、1.8-3.4 μ m に広がる大きな誘導放出断面積を有し、また 1.5-2.1 μ m に広帯域な吸収を有することから、 Er^{3+} レーザーや先述した Tm^{3+} レーザーを励起光源としたモード同期レーザーによって数サイクルの超短パルス発生が可能である。しかし表 1 に示すとおり Tm^{3+} 添加媒質などと比較し、蛍光寿命が 6 μ s と非常に短いため、Q スイッチ法ではエネルギーを貯めにくく、高エネルギー(μ J~ μ J~ μ J)で短パルス(~ μ s)なレーザーは得難い。

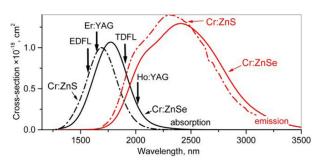


図 2. Cr2+:ZnSe の吸収および誘導放出断面積[10]

2.3. Q スイッチ法と利得スイッチ法

Q スイッチ法[7]とは、光共振器の Q 値を急激に変動させることでパルス光を得る手法である。図 3(a)に示されるように Q スイッチ法では、まず初めに共振器の損失を大きい状態(AB 区間)にし、非発振状態で反転分布を大きくする。その後共振器の損失を小さくすることで(BC 区間)、蓄えたエネルギーを短時間に放出させる(CD 区間)。このような動作によって高エネルギーな短パルス光を得ることができる[15]。しかし前述の Cr²+:ZnSe のように蛍光寿命が短い利得媒質でエネルギーが貯め難く得られるパルス光を制限してしまう。

これに対し利得スイッチ法とは、図 3(b)に示すように 利得媒質を Q スイッチ法などで得られたパルスレーザーで励起することで、短時間で反転分布量の急激な変化を生み出し、短パルス光を得る方法である。Q スイッチ法に比べ、蛍光寿命が短い利得媒質においても高エネルギーな短パルス光を得ることができる。

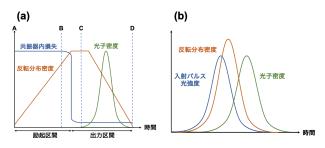


図 3. パルス発生法 (a)Q スイッチ法 (b)利得スイッチ法

本研究では、励起光源に Q スイッチ Tm³+レーザーを 用いた、利得スイッチ Cr²+:ZnSe レーザーの高パルスエ ネルギー(~mJ)かつ短パルス動作(~ns)を目的とした。

2.4. ガウシアンビームの伝搬

ガウシアンビームとは、断面の強度分布がガウス関数で表せるものを指す[16]。光の進行方向をz軸とおいたとき、進行方向と垂直なxy平面における光の強度分布I(x,y)は、定数 ω を用いて

$$I(x,y) \propto e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{\omega^2}} = e^{-\frac{2\rho^2}{\omega^2}}, \qquad \rho^2 = x^2 + y^2$$
 (1)

と表せる。この ω をビーム半径、 2ω をビーム径と定義し、スポットサイズと呼ぶ。 伝搬距離zに対するビーム半径 $\omega(z)$ および曲率半径R(z)は

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2 n}\right)^2}$$
 (2)

$$R(z) = z \sqrt{1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2 n}{\lambda z}\right)^2}$$
 (3)

と表せる。ここで λ は波長、nは屈折率、 ω_0 はビームウエストでのスポットサイズである。なおビームウエストとは、ビーム径が最小値をとる位置(z=0)を表す。また、ビームウエストのスポットサイズが $\sqrt{2}$ 倍、すなわち $\omega(z_0)=\sqrt{2}\omega_0$ を満たす z_0 をレイリー長と呼び、 $z_0=\frac{\pi\omega_0^2n}{\lambda z}$ で表せる。

2.5. ビーム品質(M²)

ビーム品質(M^2)とは、実際のビームがガウス分布、 TEM_{00} からどの程度離れているかを示す数値である[17]。 M^2 は式(4)で定義される。

$$M^2 = \frac{n\pi}{2\lambda}\omega_0\theta\tag{4}$$

シータは広がり角を示す。ファイバーの M^2 は、開口数 (NA)およびコアEaを用いて

$$M^{2} = \frac{n\pi}{2\lambda} \tan(\sin^{-1} NA) \approx \frac{n\pi(NA)}{2\lambda}$$
 (5)

と表せる。またM²を用いると高次横モードを含むレーザー光は、M倍のガウシアンビームとしてビーム伝搬を記述できる。つまり、式(2)はM²を用いて

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda z}{\pi \omega_0^2 n}\right)^2}$$
 (6)

と表すことができる。

2.6. スロープ効率と共振器内損失

レーザーの吸収励起パワーに対する出力パワーの割合を示すスロープ効率 η_{slope} は、励起量子効率 η_{stokes} 、励起吸収パワー η_{abs} 、原子量子効率 $\eta_{quantum}$ 、モードマッチング効率 η_{mode} 、および出力鏡や結合鏡の透過率による損失T、共振器内部での散乱や開設などに基づく残留損失 L_i を用いて

$$\eta_{slope} = \eta_{stokes} \cdot \eta_{abs} \cdot \eta_{quantum} \cdot \eta_{mode} \cdot \frac{T}{T + L_i}$$
 (7)

と表せる[18][19]。このとき左辺の全ての効率 $\eta < 1$ なので、式(7)は限界スロープ効率 η_0 を用いて

$$\eta_{slope} = \eta_0 \cdot \frac{T}{T + L_i} \tag{8}$$

と表せる。またこの式(8)を変形して

$$\frac{1}{\eta_{slone}} = \frac{L_i}{\eta_0} \cdot \frac{1}{T} + \frac{1}{\eta_0} \tag{9}$$

式(9)より、x軸に1/T、y軸に $1/\eta_{slope}$ を取ることで、傾きとy切片から共振器内の損失を見積もることができる。

3. Tm³⁺レーザー実験

3.1 Tm³⁺:YLF レーザー実験構成

はじめに Tm^{3+} :YLF レーザーの発振実験を行った。図 4 に Tm^{3+} :YLF レーザー実験構成を示す。共振器は 3 枚のミラーで構成される L 字型の共振器である。励起光源には波長 793 nm ファイバー結合 LD(最大出力:30 W、NA:0.22、コア径: $105\,\mu m$)を使用した。励起光の集光レンズ系には焦点距離が 50 mm と 200 mm の球面レンズ、M1 は曲率半径 200 mm の凹面鏡を使用し、励起光と共振器内レーザー光が利得媒質中でそれぞれ半径が 210 μm 、250 μm となるように設計した。このときの共振器内ビーム半径を図 5 に示す。利得媒質は結晶長が 8 mm と 20 mm の 2 種類の Tm^{3+} :YLF(c-cut、3 at.%添加、AR コート)を使用し、励起光に対して垂直に配置した。出力鏡(OC)は、透過率が 1.5%、5%、10%、20%、30%の 5 種類を用いて実験を行った。

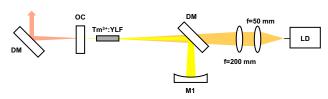


図 4. Tm³⁺:YLF レーザー実験構成

3.2 Tm³⁺:YLF レーザー実験結果

図 6 に 2 種類の Tm^{3+} :YLF レーザーの出力特性とスペクトルを示す。

結晶長 8 mm の Tm³⁺:YLF について、出力鏡の透過率が 1.5%、5%、10%、20%、30%のとき、中心波長はそれぞれ 1932 nm、1910 nm、1908 nm、1886 nm、1880 nm、最 大出力はそれぞれ 5.78 W、6.60 W、6.73 W、5.17 W、4.14 W を得た。また、スロープ効率はそれぞれ 20%、24%、24%、21%、19%を得た。

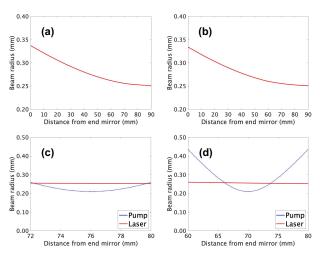
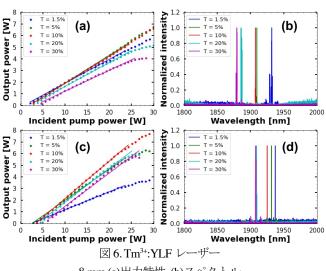


図 5. Tm³⁺:YLF レーザー実験のビーム半径 共振器内 (a)8 mm, (b)20 mm 利得媒質内 (c)8 mm, (d)20 mm

結晶長 20 mm の Tm³⁺:YLF についての同様に、中心波 長はそれぞれ 1937 nm、1930 nm、1925 nm、1909 nm、 1908 nm、最大出力はそれぞれ 3.7 W、6.3 W、7.7 W、6.0 W、5.7 W を得た。また、スロープ効率はそれぞれ 16%、 29%、33%、31%、31%を得た。



8 mm (a)出力特性, (b)スペクトル 20 mm (c)出力特性, (d)スペクトル

どちらの利得媒質もスロープ効率から、出力鏡の透過率10%のときが最適であると考えられる。また中心波長について、図6(c)と図6(d)を比較すると、結晶長20 mmの Tm³+:YLF の方が全体的に長波長側にシフトしていることが分かる。これは結晶長が長く、再吸収の影響が大きくなることで反転分布量が小さくなり、長波長側で発振が起きていると考えられる。

3.3 Tm³⁺:YAP レーザー実験構成

次に Tm^{3+} :YAP レーザーの発振実験を行った。共振器の構成は図4の Tm^{3+} :YLF レーザー実験時と同様であり、励起光と共振器内レーザー光が利得媒質中でそれぞれ半径 $210~\mu m$ 、 $250~\mu m$ となるように設計した。このときの共振器内ビーム半径を図 $7~\kappa$ で、利得媒質は Tm^{3+} :YAP(結晶長 12~m m、c-cut、 $4~\alpha$ t.%添加、AR コート)を使用し、励起光に対して垂直に配置した。出力鏡は、透過率が 1.5%、5%、10%の $3~\alpha$ 種類を用いて実験を行った。

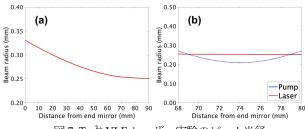


図 7. Tm³⁺:YLF レーザー実験のビーム半径 (a)共振器内, (b)利得媒質内

3.4 Tm³⁺:YAP レーザー実験結果

図8にTm³⁺:YAP レーザーの出力特性とスペクトルを示す。出力鏡の透過率が1.5%、5%、10%のとき、中心波長はそれぞれ1992 nm、1984 nm、1940 nm、最大出力はそれぞれ0.81 W、1.2 W、0.66 W を得た。また、スロープ効率はそれぞれ19%、25%、17%を得た。

また実験途中結晶の端面を確認したところ、亀裂が確認された。これは励起による熱の影響や、ホルダーによる結晶への圧による影響の可能性が考えられる。

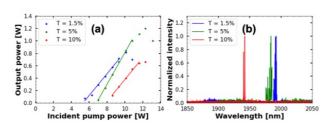


図 8. Tm³+:YAP レーザー (a)出力特性,(b)スペクトル

3.5 O-switcher 挿入用 Tm³+YLF レーザー実験構成

将来的なQスイッチ発振に向けてQ-switcherの挿入を考慮した共振器を設計した。図9に実験構成を示す。共振器構成は、Tm³+:YLF、Tm³+:YAPレーザー実験時とほぼ同様であるが、将来的なQスイッチ発振に向けてM1を曲率半径300mmの凹面鏡に変更し、Q-switcher挿入の空間を設けた。利得媒質付近のレーザー光のビーム半径は約315 μmであり、それに伴い励起光の集光レンズ系も50mmと300mmの球面レンズに変更し、励起光を利得媒質中で約315 μmに集光した。このときの共振器

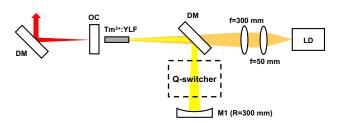


図 9. O-switcher 挿入用 Tm³⁺:YLF レーザー実験構成

内ビーム半径を図 10 に示す。また Q-switcher の端面の光強度は、 $200\,\mathrm{MW/cm^2}$ と計算され、これは Q-switcher の破壊閾値 $500\,\mathrm{MW/cm^2}$ のよりも小さい値としている。利得媒質は、前述の $\mathrm{Tm^{3+:}YLF}$ レーザー、 $\mathrm{Tm^{3+:}YAP}$ レーザーの実験結果およびレイリー長を考慮し、結晶長が $20\mathrm{mm}$ の $\mathrm{Tm^{3+:}YLF}$ のみを使用した。出力鏡は、透過率が1.5%、5%、10%、20%、30%の 5 種類を用いて実験を行った。

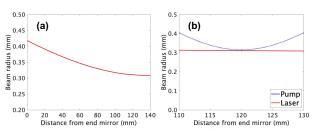


図 10. Q-switcher 挿入用 Tm³⁺:YLF レーザー実験のビーム半径 (a)共振器内, (b)利得媒質内

3.6 Q-switcher 挿入用 Tm³+YLF レーザー実験結果

図 11 に Q-switcher 挿入用 Tm³+:YLF レーザーの出力特性とスペクトルを示す。出力鏡の透過率が 1.5%、5%、10%、20%、30%のとき、中心波長はそれぞれ 1942 nm、1933 nm、1926 nm、1911 nm、1909 nm、最大出力はそれぞれ 3.83 W、4.45 W、5.15 W、3.86 W、3.05 W を得た。また、スロープ効率はそれぞれ 16%、22%、28%、25%、24%を得た。こちらも出力鏡の透過率 10%のときが最適であると考えられる。また、前述した Tm³+:YLF レーザー実験結果と比べて発振閾値の上昇が確認された。これは利得媒質での励起光の集光径が大きくなり、単位面積あたりの励起光強度が小さくなったためだと考えられる。

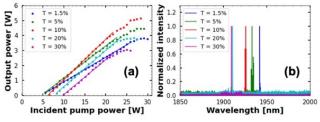
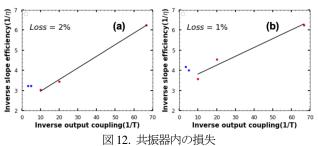


図 11. Q-switcher 挿入用 Tm³+:YLF レーザー (a) 出力特性、(b)スペクトル

次に、結晶長 20 mm の Tm³⁺:YLF における Tm³⁺:YLF レーザー実験系および Q-switcher 挿入用 Tm³⁺:YLF レーザー実験系の共振器内の損失を、式(6)を用いて計算した。 結果を図 12 に示す。ここで反転分布量の変化の割合が大きい透過率 20%、30%はフィッティングから除いた。



(a) Tm³⁺:YLF レーザー実験系

(b) Q-switcher 挿入用 Tm³⁺:YLF レーザー実験系

共振器内の損失は Tm³+:YLF レーザーおよび Q-switcher 挿入用 Tm³+:YLF レーザー実験系でそれぞれ 2%、1%となった。前者と比較して後者の方が損失が小さい理由としては、集光レンズ系を変更したことで、後者の方がレイリー長が長くなり、利得媒質内の散乱損失が減少したためだと考えられる。

4. Cr²⁺:ZnSe レーザー実験

4.1 実験構成

開発した Q-switcher 挿入用 Tm^{3+} :YLF レーザーを励起 光源に用いて Cr^{2+} :ZnSe レーザーの発振実験を行った。 図 13 に Cr^{2+} :ZnSe レーザー実験構成を示す。共振器は L 字型の共振器であり、励起光の集光レンズ系は 200 mm と 150 mm の球面レンズ、M1 は曲率半径 200 mm の凹面 鏡を使用し、励起光と共振器内レーザー光が利得媒質中 でそれぞれ半径 200 μ m、250 μ m となるように設計した。 このときの共振器内ビーム半径を図 14 に示す。利得媒 質は Cr^{2+} :ZnSe(Cr^{2+} 添加濃度 8.0×10^{18} cm $^{-3}$ 、長さ 5 mm、 AR コート)を使用し、励起光に対して垂直に配置した。 出力鏡は、透過率が 10%のものを用いて実験を行った。

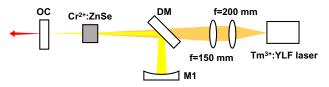


図 13. Cr²⁺:ZnSe レーザー実験構成

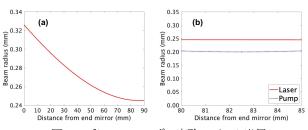
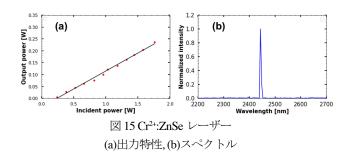


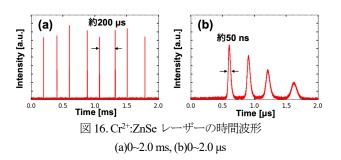
図 14. Cr²⁺:ZnSe レーザー実験のビーム半径 (a)共振器内, (b)利得媒質内

4.2 実験結果

図 15 に Cr^{2+} :ZnSe レーザーの出力特性とスペクトルを示す。



スロープ効率 15%、最大出力 240 mW(@1.8 W)、中心 波長 2443 nm で発振を確認した。しかし、出力において $\pm 20\%$ かつ数秒単位で揺れており、またスペクトルも測 定毎でスペクトル強度の揺れが確認された。図 16(a)に Cr^{2+} :ZnSe レーザーの時間波形、図 16(b)にそれを拡大したものを示す。



 Cr^{2+} :ZnSe レーザーにおいてパルシングが確認され、また1つのパルスを拡大すると大きさの違うパルス列が確認された。パルス出射間隔は約 200 μ s、パルス幅は 50 nsであった。次に励起光源である Tm^{3+} :YLF レーザーの時間波形を測定した。測定結果を図 17 に示す。

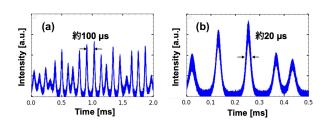


図 17. Tm³⁺:YLF レーザーの時間波形 (a)0~2.0 ms, (b)0~0.5 ms

図 17 に示すように、Tm³+:YLF レーザーにおいてもセルフパルシングが確認された。以下これらの現象について考察する。

 Cr^{2+} :ZnSe レーザーのパルシングについて、 Tm^{3+} :YLF レーザーのセルフパルシングによる、 Cr^{2+} :ZnSe レーザーの疑似的な利得スイッチ発振が生じたと考えられる。ま

た図 5 に示すように Tm³⁺:YLF レーザーのパルスの強度 に大小が存在していたため、励起された Cr²⁺:ZnSe レー ザーの出力が不安定であった可能性がある。

ここで、各レーザーのパルス出射間隔の違いは、Tm³⁺:YLF レーザーのパルスのピークパワーが小さい場合に Cr²⁺:ZnSe が発振できなかったことが原因であると考えられる。

6. まとめと展望

本研究では ZGP 結晶を用いた、OPO による 2-10 μ m の中赤外光発生に向け、ZGP 励起用 Cr^{2+} :ZnSe レーザーの開発を目指した。またそのための励起用光源として Tm^{3+} :YLF レーザーおよび Tm^{3+} :YAP レーザーの開発を行い、出力特性を評価した。次に共振器を変更し、将来的な Q スイッチ発振に向け、Q-switcher の挿入を考慮した Tm^{3+} :YLF レーザーを開発し、それを励起光源とした Cr^{2+} :ZnSe レーザーの開発を行った。

Tm³⁺:YLF レーザー実験において、結晶長 8 mm で c-cut の Tm³⁺:YLF では、出力鏡の透過率 10%のとき、最大出力 6.7 W(@30 W)、最大スロープ効率 24%、中心波長 1908 nm での発振を確認した。同様に結晶長 20 mm では、透過率 10%のとき、最大出力 7.7 W(@29 W)、最大スロープ効率 33%、中心波長 1925 nm での発振を確認した。

また同じ共振器構成で結晶長 12 mm の c-cut の Tm³⁺:YAP レーザー実験においては、出力鏡の透過率10% のとき、最大出力1.2 W(@12 W)、最大スロープ効率25%、中心波長1984 nm での発振を確認した。

次に、結晶長 20 mm の Tm³⁺:YLF を用いた Q-switcher 挿入用 Tm³⁺:YLF レーザー実験では、出力鏡の透過率 10%のとき、最大出力 5.2 W(@28 W)、最大スロープ効率 28%、中心波長 1926 nm での発振を確認した。

さらに、この Q-switcher 挿入用 Tm³+:YLF レーザーを励起光源として用いた Cr²+:ZnSe レーザー実験では、出力鏡の透過率 10%のとき、最大出力 240 mW(@1.8 W)、スロープ効率 15%、中心波長 2443 nm での発振を確認したが、出力、スペクトルともに不安定であった。Cr²+:ZnSe レーザーおよび、励起光源である Tm³+:YLF レーザーの時間波形について測定すると、ともにパルシングが生じていることがわかった。今後の展望としては、Tm³+:YLF レーザーに Q-switcher を挿入し、パルスを制御することで、パルスエネルギーが~mJ の安定した利得スイッチCr²+:ZnSe レーザーの開発に繋がると考えている。

参考文献

- [1] S.Vasilyev et.al., Opt.Express 7, 2636-2650 (2017).
- [2] I.T.McKinnie et.al., Conference on lasers and electro-optics. (2002).
- [3] K.L.Vodopyanov et.al., Opt.Lett. 25, 841-843 (2000).
- [4] A.Schliesser et.al., Nature photonics **6**, 440-449 (2012).
- [5] S.Golovynskyi et.al., Journal of Biophotonics 11, e201800141 (2018).
- [6] J.P.Cariou et.al. Comptes Rendus Physique 7, 213-223 (2006).
- [7] Q.Berthome et.al., Opt.Express 28, 5013 (2020).
- [8] S.Payne et.al., IEEE Journal of Quantum Electronics **28**, 2619-2630 (1992).
- [9] C.Krankel et.al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **21**, 250-262 (2015).
- [10] G.Li et.al., Appl.Opt. 53, 4987-4996 (2014).
- [11] C.D.Phelps, University of Dayton (2011).
- [12] H.Zhang et.al., Applied Physics A 127, 1-8 (2021).
- [13] B.Zhang et.al., Optics Laser Technology 100, 103-108 (2018).
- [14] G.Qin et.al., Solid State Commnications 132, 103-106 (2004).
- [15] 矢津田匠海, 電気通信大学 修士論文 (2022).
- [16] 三沢和彦, 芦原聡, "工学系のためのレーザー物理入門 講談社 (2020).
- [17] 平等拓範、レーザー研究 26,723-729 (1998).
- [18] 小林喬郎, "固体レーザー", 学会出版センター (1997).
- [19] J.Caird et.al., IEEE Journal of Quantum Electronics 24, 1077-1099 (1998).