

中赤外 Cr²⁺:ZnSe/ZnS 遷移金属レーザーの開発

戸倉川研究室 三井峻平

1. はじめに

近年、中赤外領域に発振波長をもつレーザーは様々な応用が期待されている。例えば、波長 2.1~2.3 μm には生体組織への透過率の高い透過窓があり光イメージング技術や光治療システムなどの医療応用 [1]、非酸化物系の非線形結晶を用いた 3~20 μm 帯への波長変換が可能であり分子分光応用[2]などの応用がある。

本研究では前者に含まれる生体顕微鏡応用にむけて、波長 1.9~3.4 μm 帯に利得を持つ Cr²⁺:ZnSe/ZnS 遷移金属レーザーの開発、ならびにその励起光源として波長 1611 nm Er:Yb ファイバー MOPA の開発を行った。

2. 原理

2.1 Cr²⁺:ZnSe/ZnS 利得媒質の特徴

今回実験で用いた Cr²⁺:ZnSe/ZnS は中赤外のチタンサファイアと呼ばれ、特に特徴的である幅広い蛍光スペクトルを図 1 に示す。

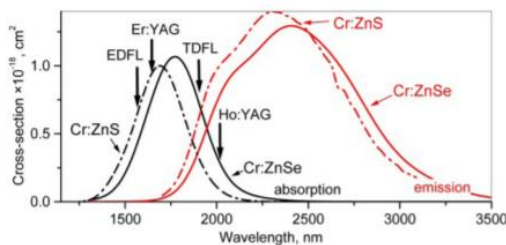


図 1 Cr²⁺:ZnSe/ZnS の吸収断面積および
蛍光断面積[3]

蛍光スペクトルの中心波長は 2400 nm 付近であり、1900~3400 nm に広く分布しており、超短パルス発振にも適していることがわかる。また、吸収断面積も 1500~2100 nm に存在し、比較的入手のしやすい Er

添加ファイバーや Tm 添加ファイバーによる励起が可能である。両媒質ともに非線形屈折率が高く非線形光学効果を起こしやすい、セラミック媒質であることからランダム疑似位相整合が可能である、などの特徴がある。Cr²⁺:ZnSe/ZnS の相違点として吸収スペクトルや蛍光スペクトルのピーク位置の違いのほか、Cr²⁺:ZnSe と比較して Cr²⁺:ZnS は二次透磁率が高い、バンドギャップが小さいなどの違いがある。

2.2 主発振器出力増幅器(MOPA)

今回の研究では励起用光源としてファイバー MOPA を作成した。主発振器出力増幅器(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。よって種光の高ビーム品質を維持したまま高出力を得ることができる。今回の構成を図 2 に示す。

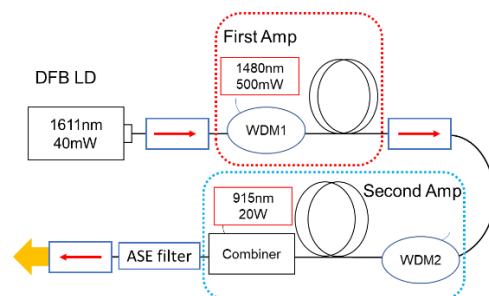


図 2 MOPA 構成図

本研究では 2 段階の増幅構成としておりそれぞれ Er ファイバー、Er:Yb 共添加ファイバーを用いた。前者は有名な遷移線として 1540 nm 帯に発振波長をもち、光通信の分野では多く使われているファイバーであり、今回の実験では一段階目の増幅に使用した。後者は Yb の励起準位からエネルギー伝達現象を利用して Er の準位間で反転分布を形成させ、誘導放

出を行う仕組みで信号光を増幅させる。これは Yb の 800~1100 nm の吸収帯を利用できるといった利点だけでなく、Er イオン濃度を増やしたときのイオン間同士での相互作用に起因する濃度消光による増幅効率低下を防ぐことが可能であり、より高出力が得られるといった利点もある。しかし欠点として誘導放出断面積(@1610 nm)が小さく、Er や Yb の増幅自然放出光(ASE)などを防ぐためには十分に高い種光を結合する必要がある、二段階目の増幅に使用している。以降の実験ではこれを励起光源に用いた。

2.3 共振器設計

2.3.1 自己無撞着法

共振器の安定な固有モードにおいて、光電磁界は共振器内を一周巡回したときに元の分布に回帰していなければならないという条件を課す。このような手法を自己無撞着法という。ある地点の定常複素ビームパラメータ q_s は

$$q_s = \frac{Aq_s + B}{Cq_s + D} \quad (1)$$

と表され[4]、これを満たさなければならない。これを解くと

$$\frac{1}{q_s} = \frac{(D - A) \pm \sqrt{(D - A)^2 + 4BC}}{2B} \quad (2)$$

ここでパラメータ A, B, C, D は光線行列から求められる値でユニモジュラー行列だから

$$\frac{1}{q_s} = \frac{D - A}{2B} + \frac{i \sin \theta}{B} \quad (3)$$

のように表せられる。ただし

$$\cos \theta = \frac{D + A}{2}, \theta = \pm |\cos^{-1}\left(\frac{D + A}{2}\right)|$$

である。また、複素ビームパラメータは

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi n w(z)^2} \quad (4)$$

と定義されるので、(3)と(4)の対応関係から

$$\left| \frac{D + A}{2} \right| < 1 \quad (5)$$

でなければならず、これが共振器の安定条件となる。また、ビーム径 w は

$$w(z) = \left(\frac{\lambda}{\pi n}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{([B])^{\frac{1}{2}}}{[1 - [(D + A)/2]^2]^{\frac{1}{4}}} \quad (6)$$

と求まる。

2.3.2 非点収差

レーザーが角度をもって、ミラーや物体に入射すると収差が発生する。この収差についても安定条件を満たすように共振器の設計を行わなければならない。まず、ミラーに角度をもって入射するときには光学台からの水平面と垂直面での収差 f_x と f_y は、入射角 θ として次のように起こる。[5]

$$f_x = f \cos \theta, f_y = \frac{f}{\cos \theta} \quad (7)$$

また、異なる屈折率を持つ物体に光がブルースター角入射するとき、屈折率比 n 、厚さ t の媒質に対する水平面と垂直面での有効光路長は、それぞれ d_x と d_y として

$$d_x = t \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^4}, d_y = t \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^2} \quad (8)$$

と表せる。[5]これらを考慮して共振器構成を行った。

3. 波長 1611nm Er:Yb ファイバー-MOPA 開発

MOPA は図 2 に示す全体図で先行研究を参考に作成した[6]。今回使用したファイバーは全て PM ファイバーである。

種光源として波長 1611 nm、出力 40 mW の DFB レーザーを用いた。第一増幅部は、Er 添加ファイバーを波長 1480 nm、出力 500 mW LD からの出力光で前方励起増幅を行った。使用した利得ファイバーは長さ 3.9 m、コア径 6.7 μm 、 $\text{NA} \approx 0.22$ である。第二増幅部は Er:Yb 共添加ダブルクラッドファイバーを波長 915 nm、出力 20 W LD からの出力光で後方励起増幅を行った。使用した利得ファイバーは長さ 15 m、コア径 6 μm 、 $\text{NA} \approx 0.2$ である。このときの第二増幅

LD の入力が 7 A のときのスペクトルを示す。

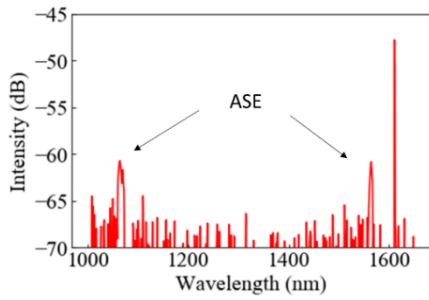


図 3 第二増幅後のスペクトル

図 3 が示すように ASE が発生した。これらの ASE を除去するためにバンドパスフィルターを ASE フィルターとして挿入した。これらを挿入した最終出力を図 4 に示す。

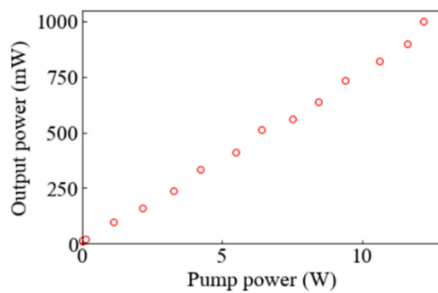


図 4 MOPA 出力特性

このときのスロープ効率は 8%であった。先行研究では同じ構成でスロープ効率が 20%であった。このようにスロープ効率が低下した原因として実験中に Er:Yb 共添加ファイバーにダメージが入ってしまったことが原因だと考えられる。ファイバーの交換を行えば先行研究同様のスロープ効率を得られると考えられる。

4. MOPA 励起 Cr²⁺:ZnSe レーザー開発

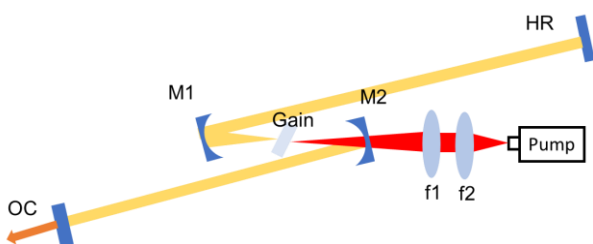


図 5 Cr²⁺:ZnSe レーザー実験構成図

実験構成を図 5 に示す。利得媒質は結晶厚さ $t=5$ mm で Cr²⁺濃度 $9.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の Cr²⁺:ZnSe 媒質をブルースター角で配置し、水冷で 15 °C に冷却した。Chirped Mirror(CM)、凹面鏡(M1、M2:曲率 100 mm) は高反射ミラー、励起光の集光用レンズはそれぞれ $f1=75$ mm、 $f2=18.4$ mm を用いた。出力特性と波長可変特性について透過率がそれぞれ 1,3,10,20,30% のアウトプットカプラ(OC)を使用し、測定を行った。その結果を図 6,7,8 に示す。OC 透過率 20%時に最大 146 mW@750 mW 励起、スロープ効率 39.7%、波長可変特性 2250~ 2550 nm となった。スロープ効率の取り出し依存性から共振器一周の損失は 11%程度と見積もられた。

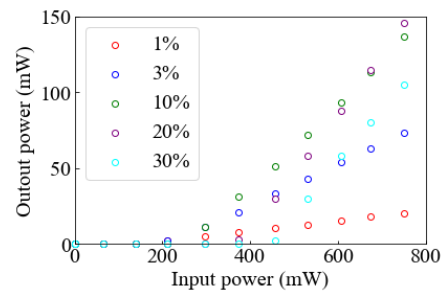


図 6 Cr²⁺:ZnSe レーザー出力特性比較

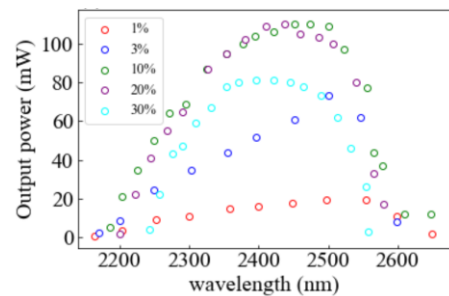


図 7 Cr²⁺:ZnSe レーザー波長可変特性比較

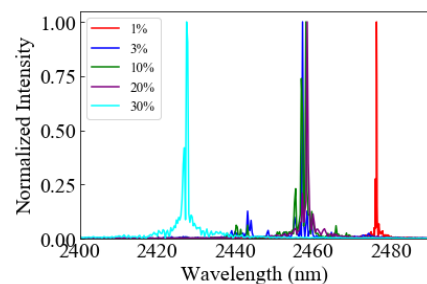


図 8 Cr²⁺:ZnSe レーザー中心波長比較

5. MOPA 励起 Cr²⁺:ZnSe レーザー開発

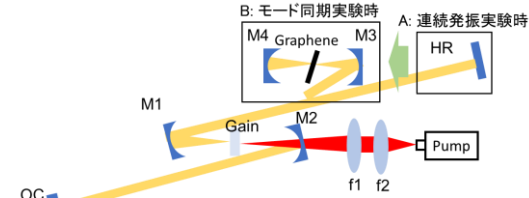


図9 Cr²⁺:ZnS レーザー実験構成図

実験構成を図8に示す。実験系はCr²⁺:ZnSeレーザーと同様の構成で一部を変更した。変更点として利得媒質は結晶厚さ $t=4\text{ mm}$ でCr²⁺濃度 $5.35 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ のARコートされたCr²⁺:ZnS媒質を励起光に対し垂直に配置し、ペルチエで温度制御を行い、OCには10%を用いた。また、連続発振実験(A)に加え共振器のCM部を図8のように凹面鏡(M3、M4:曲率200 mm)二枚とその集光部に単層グラフェンを設置する構成に変更し、単層グラフェンによるモード同期実験(B)を行った、このときグラフェンの有無で両方測定した。連続発振時(A)とモード同期実験(グラフェンなし)(B)、モード同期実験(グラフェンあり)(B)の出力特性の結果を図10に示し、連続発振時のスペクトルを図11に示す。

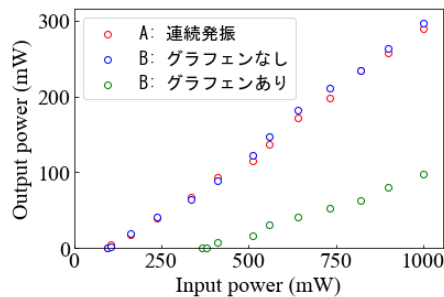


図10 Cr²⁺:ZnS レーザー出力特性比較

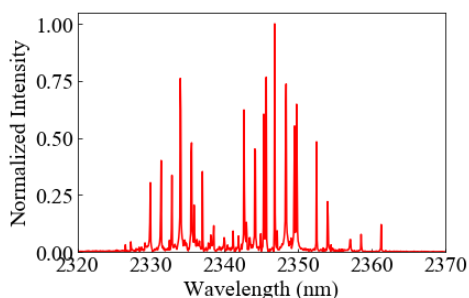


図11 連続発振Cr²⁺:ZnS レーザースペクトル

連続発振実験(A)では2340 nm付近で多波長発振し、スロープ効率33.0%、1 W励起時最大出力288 mW。モード同期実験(グラフェンなし)(B)ではスロープ効率34.0%、1 W励起時最大出力296 mW。モード同期実験(グラフェンあり)(B)でスロープ効率15.2%、1 W励起時最大出力97 mWを得られた。しかしモード同期発振は得られなかった。これは可飽和吸収体の飽和が十分でないことが考えられ、共振器内光強度を増やす必要があると考えられる。

6. まとめ

励起光源用波長1611 nm Er:Yb fiber MOPAで最大出力1 W@13 W励起時、スロープ効率8%を得た。

Cr²⁺:ZnSe レーザーでは、透過率20%時に最大出力146 mW@750 mW励起、スロープ効率39.7%、波長可変特性2250~2550 nmを得た。

Cr²⁺:ZnS レーザーでは、最大出力296 mW@1 W励起、中心波長2332 nmスロープ効率34.0%を得て、単層グラフェンでモード同期実験を行った。

今後は、応用に向けて実際に必要な波長である2100~2300 nmで発振するかについてCr²⁺:ZnSレーザーで波長可変特性を調べるとともに、単層グラフェンを可飽和吸収体に用いたモード同期を確認する。

参考文献

- [1] S Golovynskiy et al., Journal of Biophotonics, **11**, 1-12 (2018).
- [2] A. Schliesser et al., Nature photonics, **6**, 440-449 (2012).
- [3] S Vasiley et al., Optical Materials Express, **7**, 2636-2650 (2017).
- [4] A. Yariv, "光エレクトロニクス 基礎編 原書6版", 丸善 (2010).
- [5] H. Kogelnik et al., IEEE Journal of Quantum Electronics, **QE-8**, 373-379 (1972).
- [6] 藤田慧祐, 電気通信大学院 2017年度 修士論文.