

モード同期Cr²⁺:ZnSレーザー発振器の開発

戸倉川研究室 昆野 愛夕

1. はじめに

本研究室で開発を行っている波長 2 μm 帯の中赤外光源は、分子の指紋領域を含むことから中赤外分光光源としての応用、大気の透過の窓領域を含むことから LiDAR などの環境計測への応用などで近年注目を集めている。本研究で用いたCr²⁺:ZnSレーザーは、波長 2~3 μm 帯にブロードで大きい誘導放出断面積を持ち、機械的安定性や励起光源の扱いやすさなどからも、沖積外の超短パルス発生に適した光源である。

本研究室では、波長 2~3 μm 帯の広帯域な光を非線形増幅器で増幅し、波長変換を行うことで波長 2~20 μm の光を取り出すことが可能である超広帯域な中赤外光源の開発を目指しています。本研究では、超広帯域な中赤外光源の発振器部分にあたる、モード同期Cr²⁺:ZnSレーザー発振器の開発を行いました。

2. 原理

2.1. Cr²⁺:ZnS 利得媒質の特徴

本研究でモード同期レーザー発振器の利得媒質として用いた、Cr²⁺:ZnS/ZnSe のクロスセクションを図 1 に示す。図に示すように、Cr²⁺:ZnS/ZnSe は中赤外領域の波長 2~3 μm にブロードで大きい誘導放出断面積を持ち、Er レーザーや Tm レーザーなどの扱いやすい励起光源での励起が可能である。また、超短パルス光源としてよく知られるチタンサファイアと同程度に大きいバンド幅を持ち、機械的安定性に優れ室温

での動作が可能であるなど、超短パルス発生に非常に優れた特徴を持っている。以上のように超短パルス発生に適した特徴を持つことから、Cr²⁺:ZnS/ZnSe は中赤外のチタンサファイアと呼ばれている。本研究では、超短パルス光源としてCr²⁺:ZnSのセラミクス結晶を用いた。Cr²⁺:ZnS/ZnSeのセラミクス結晶を用いたモード同期実験では、ランダム疑似位相整合による第二高調波の発生も確認されている[1]。

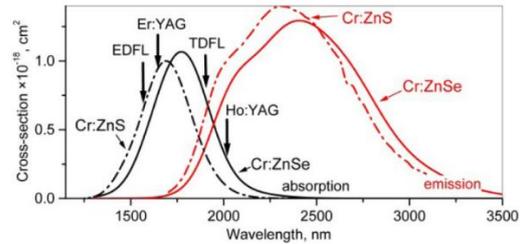


図 1. Cr²⁺:ZnS/ZnSe cross-section [2]
(赤：誘導放出断面積 黒：吸収断面積)

2.2. モード同期

モード同期とは、超短パルスを発生させる手法である。ある共振器内に存在できる光の波長は以下の式によって決定される。

$$2L = m \lambda_m, \quad \omega_m = \frac{\pi c}{L} \quad \dots (1)$$

L は共振器の長さであり、この条件を満たす等間隔の波長 λ_m 及び角周波数 ω_m の光が共振器内に存在することが出来る。これらのスペクトル線を、共振器内モードと呼ぶ。これらを重ね合わせると図 2 に示すような合成波となり、超短パルス波形が形成される。

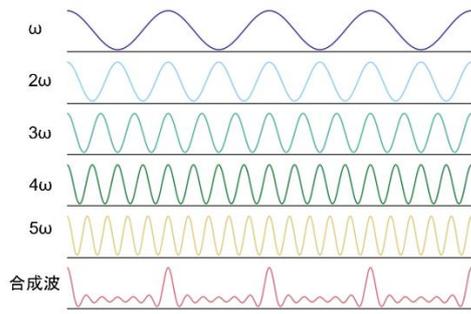


図 2. 共振器内モードの波の重ね合わせ

2.3. 可飽和吸収体

モード同期を発生させる方法として、可飽和吸収体を用いたモード同期発生方法がある。可飽和吸収体は、特定の帯域の光を吸収して吸収飽和を起こすことで、可飽和吸収体の透過率または反射率が変化する特徴を持つ。飽和前の初期透過率を T_0 、飽和後の透過率を T_{sat} 、飽和による透過率の変化量を ΔT とすると、以下の式が成り立つ。

$$T_{sat} = T_0 + \Delta T \quad \dots (2)$$

式(2)より、光強度が大きく吸収が飽和するパルス発振状態の透過率 T_{sat} は、光強度の小さく吸収が飽和しない連続発振状態の透過率 T_0 と比べて大きくなる。このことから、透過率の変化による共振器内の損失変動が発生し、損失がより少ないパルス発振が発生しやすくなる。以上が可飽和吸収体を用いたパルス発振の原理である。

可飽和吸収体において、吸収が飽和した際の透過率と、初期透過率の差 ΔT は変調深さと呼ばれ、可飽和吸収体を用いたモード同期発生の重要なパラメータである。

今日主に使用されている可飽和吸収体には、吸収の飽和で特定の波長の反射率が変化する反射型の可飽和吸収体である半導体可飽和吸収鏡(SESAM)や、飽和で透過率

が変化する透過型の可飽和吸収体のグラフェン、カーボンナノチューブ(CNT)などが挙げられる。

2.4. 共振器設計

共振器内の光が共振器内を周回し続けるためには、共振器内を光が1周した後に元の形状に戻るといった条件を満たす必要がある。この条件を自己無撞着条件と呼び、この条件のもと光が安定して周回できる共振器を設計する方法を、自己無撞着法と呼ぶ。ガウスビームが共振器を1周した後の定常複素ビームパラメータは

$$q_s = \frac{Aq_s + B}{Cq_s + D} \quad \dots (3)$$

で表される。ここで、ABCDは共振器内の素子が持つ光線行列から求められる、共振器1周分の光線行列の要素である。式(3)を複素定常ビームパラメータ q_s について解くと、(4)式となる。

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

また、光線行列がユニモジュラー行列であることから、(4)式は以下ようになる。

$$\frac{1}{q} = \frac{(D-A)}{2B} + i \frac{\sin\theta}{B}, \theta = \cos^{-1} \left| \frac{D+A}{2} \right| \quad \dots (5)$$

また、定常複素ビームパラメータは、ビームの曲率半径 $R(z)$ とビーム径 $\omega(z)$ を用いて以下の形でも定義される。

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

(5)(6)式の関係から、自己無撞着条件を満たすには以下の式が成り立つ必要がある。

$$\left| \frac{D+A}{2} \right| < 1 \quad \dots (6)$$

共振器がこの条件を満たすよう設計した。

3. レーザー発振器開発実験

3.1. 本研究室の先行研究

本研究室で行われたモード同期 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ レーザー開発の先行研究を紹介する[3]。

先行研究では、初期反射率 $R_0=98.5\%$ 、変調深さ $\Delta R = 0.9\%$ の SESAM を用いたモード同期発振実験が行われた。実験結果として、共振器長に一致するパルスレインが得られたが、スペクトルの大きな広がりには得られなかった($\Delta\lambda = 0.71 \text{ nm}$)。この理由として、変調深さが $\Delta R = 0.9\%$ と小さかったためではないかと考察されていた。そこで本研究では、より変調深さの大きい単層カーボンナノチューブ(SWCNT)を用いて、モード同期発振実験を行った。

3.2. 連続発振実験

本研究では、初めに $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ レーザー発振器を再構成し、連続発振実験を行った。図3に再構成したレーザー発振器を示す。

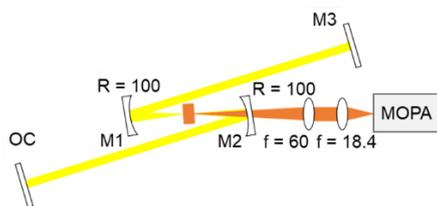


図3. 連続発振実験で用いた発振器

利得媒質には添加濃度 $5.35 \times 10^{-19} \text{ cm}^3$ 、結晶長 4 mm の AR コートのなされた $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ セラミクス結晶を用いた。励起光源には、発振波長 1611 nm の Er:Yb 共添加ファイバー-MOPA を用いた。ホルディングミラーM1,M2としてR=100の高反射凹面鏡、エンドミラーとして高反射の平面鏡を用いた。それぞれ後に行うモード同期実験のため、分散補償がなされている。

この系で連続発振実験を行い、出力鏡の反射率 T_{OC} を1%, 3%, 10%, 20%, 30%, 40%と変化させた際の出力特性及び発振スペクトルをそれぞれ確認した。

各出力鏡における出力特性を、図4に示す。出力鏡の透過率が40%の際に、最大スロープ効率 $\eta_{slope} = 40\%$ が得られた。最大出力として、励起パワー1.93 Wの際に $P_{out}=0.68 \text{ W}$ の出力が得られた。

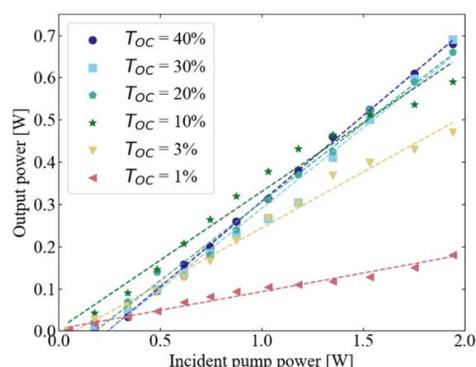


図4. 各出力鏡透過率での出力特性

次に、各出力鏡における発振スペクトルを図5に示す。図より、透過率の増加で発振スペクトルは短波長側にシフトしている。透過率の増減は、共振器内の損失を変化させる。この共振器損失の変化で反転分布量が変わり、利得スペクトルの短波長シフトが発生したと考察した。各透過率での発振スペクトルは、全て分散補償鏡の帯域内であることも確認した。

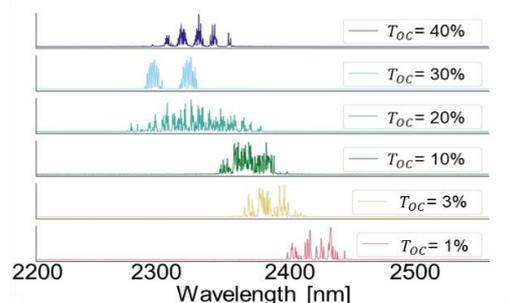


図5. 各出力鏡透過率での発振スペクトル

3.3. モード同期発振実験

続いて、モード同期発振実験を行った。実験に用いた発振器を図6に示す。

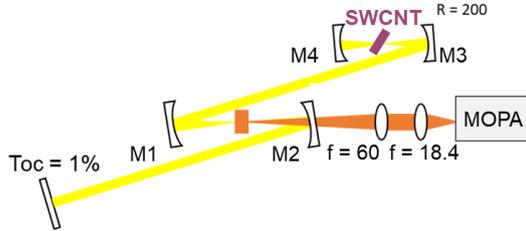


図6. モード同期実験で用いた発振器

利得媒質及び励起光源、ホルディングミラーM1,M2は連続発振実験と同じものを用いている。凹面鏡M3,M4(R=200, R=100)を使って可飽和吸収体を挿入するための集光点を設けた。先行研究の考察より、変調深さの大きい可飽和吸収体として初期透過率 $T_0=86\%$, 変調深さ $\Delta T=9.8\%$ の単層カーボンナノチューブ(SWCNT)を用いた。

出力特性を図7、発振スペクトルを図8に示す。青色の範囲では、パルスストレインにQ-switch不安定性による包絡線が見られ、低励起のためQ-switchモード同期が得られていたと考えられる。強励起の緑色の範囲では、共振器長に一致するパルスストレインと、ソリトン形状のスペクトルが得られたことから、シングルパルスのモード同期発振が得られたと考えられる。

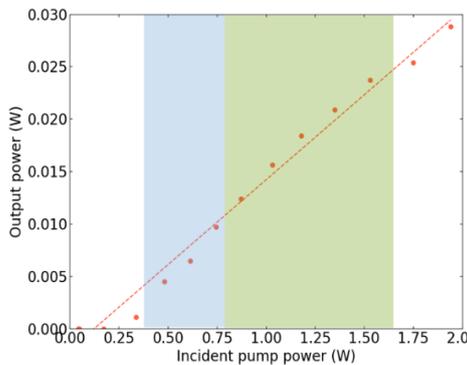


図7. 出力特性 ($T_{OC} = 1\%$, $\eta_{stop} = 1.6\%$)

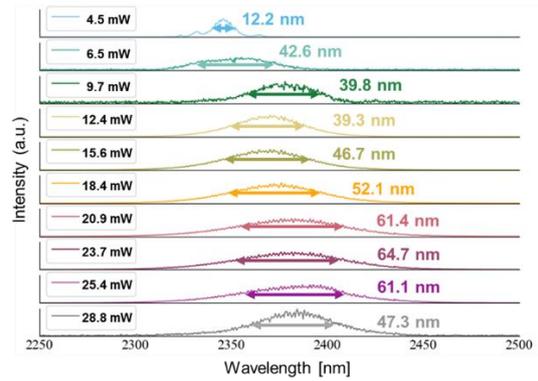


図8. 発振スペクトル

励起パワーが1.64 Wの際に、最大スペクトル広がり幅 $\Delta\lambda=64$ nm, フーリエ限界パルス幅 $\Delta\tau=92.7$ fsが得られた。緑色の範囲より高い励起強度の範囲では、マルチパルスによりスペクトルの広がり幅が狭くなってしまっていた。

また、緑色の領域では、発振波長の半波長1200 nmを中心に、ランダム疑似位相整合による第二高調波発生(SHG)が観測された。これは他の研究でも報告されており、本研究でも同様に確認できた[1]。

4. まとめと今後の展望

本研究では、モード同期 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ レーザー発振器の開発を行い、最大スペクトル幅 $\Delta\lambda=64$ nm, フーリエ限界パルス幅 $\Delta\tau=92.7$ fsのモード同期が得られた。今後はより高出力な発振器にするため、カーレンズによるモード同期発生を目指す。

参考文献

- [1] Sergey Vasilyev *et. al*, Proc. of SPIE Vol. 9731 97310B-1
- [2] Optical Materials 26, (ISLNOM-3), 395–412 (2004)
- [3] 三井峻平 *et. al*, レーザー学会学術講演会 第42回年次大会 B05-13a-II-04 2022/01/13