

偏光結合を用いた 1.6 μm 帯 LD による 直接励起型 Cr:ZnS レーザーの高出力化

2233043 齊藤輝樹

主任指導教員：戸倉川正樹 指導教員：武者満

1. はじめに

2～3 μm 帯の中赤外領域におけるレーザー光は医療や加工、分光による環境測定などへの応用が期待されている。中赤外領域においてCr²⁺:ZnS/Seレーザーは中赤外領域におけるチタンサファイアレーザーと称されている。Cr²⁺:ZnSの特性として1.8～2.8 μm 帯で広帯域な誘導放出断面積[1]を有しており、水の吸収を避けた領域での安定した動作が可能である。また、非常に広帯域な吸収を有している。この特性は超短パルス動作に優れている。

本研究ではCr²⁺:ZnSの吸収が非常に広帯域なことから 1.6 μm 帯の broad-stripe laser diode(LD)を用いた励起が可能である。これより 1.6 μm 帯 LDを用いた、小型で高効率な直接励起型Cr²⁺:ZnSレーザーの開発を行った。

2. 原理

2.1 自己位相変調

光パルスが 3 次の非線形媒質に入射すると、非線形屈折率[2]によって時間に依存する屈折率変化が生じる。この屈折率変は光パルスの強度変化にほぼ比例して発生する。これより屈折率変化を誘起下光パルスの位相を変調し、その電場とスペクトル変化させる現象を自己位相変調という。屈折率の波長依存特性によって、長波長のパルスは短波長のパルスよりも光学材料をより速く通過する。そのため、フェムト秒パルスは、群速度分散(GVD)の結果としてパルス広がりの影響を受ける。以下の図は自己位相変調による正チャープの図である。

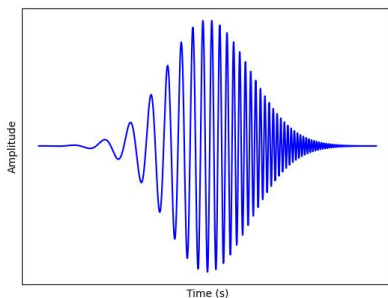


図 1 正のチャープ図

2.2 光ソリトン

光ソリトン[3]とは、非線形光学効果により発生する自己位相変調(SPM)と群遅延分散(GVD)が釣り合うことにより、パルスが変形を起こさずに形を保ち共振器を伝搬する現象である。

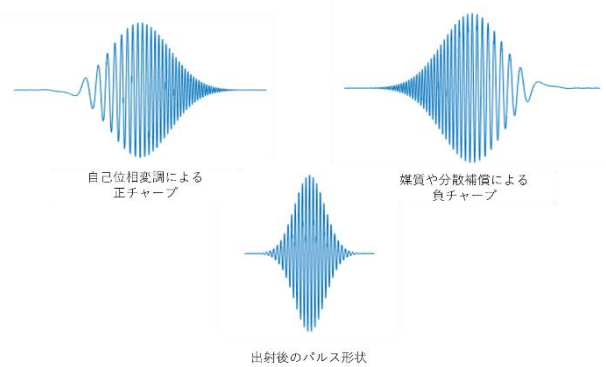


図 2 光ソリトンの概略図

光カー効果により、非線形媒質中を伝搬するパルスは自己位相変調を受ける。通常ソリトンパルスは sech^2 型のパルス形状をとる。以下の式はパルス幅を表す式であり、その式は

$$\tau_{\text{soliton}} = -\frac{1.76\lambda A_{\text{eff}} |D|^2}{\pi n_2 l E_p}$$

と表される。D は共振器 1 周の分散 GDD、 A_{eff} は媒質内の有効モード断面積、 l は媒質の長さ、 E_p はパルスエネルギーを表す。

2.3 分散と分散補償

分散は、光が光学媒質を透過する際、光学的周波数/波長といったパラメータに依存して光の位相速度もしくは位相遅延が変化する現象である。超短パルスレーザーの場合[4]、分散効果によってパルス幅の拡大やその他の望ましくないビーム特性の変化が生じるため、動作帯域幅にわたる低群遅延分散が非常に重要である。光電磁場の包絡線がパルス形状をとる構造をしており、パルスの搬送波は周波数を中心に広がった周波数スペクトルを有している。

レーザーパルスは様々な周波数成分が独立して、発振、伝搬している。これらを記述するために、位開する。

$$\varphi(\omega) = \varphi(\omega_0) + \frac{\partial \varphi}{\partial \omega}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 \omega}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial^3 \omega}(\omega - \omega_0)^3 \dots$$

第三項は群速度と呼ばれる周波数に対する位相の変化である。第三項は群速度分散(Group Delay Dispersion, GDD)とよばれる。周波数に対する群速度の変化である。パルスが材料やコーティングを通過する際に、成分はその周波数によって遅延する。波長ごとに屈折率が異なるため、パルス成分は異なる速度で伝わり、群遅延分散は 0 にならない。その結果、パルスが広がり、正チャープが発生する。

一方、分散補償では、自己位相変調によって生じた正の分散を補償するために逆の負の分散を生じさせる機構を共振器に挿入する。これを分散補償という。分散補償として、プリズムペアやグレーティングペア、誘電体多層膜チャープミラーを用いた方法が存在する。チャープミラーでの分散補償では、各層において反射する波長が異なり、長波長な光ほどより深い膜で反射される。これにより光に負の分散を与えることができる。

2.4 モード同期

モード同期[2]とは、超短パルス光を発生させる手法の一つとして知られている。モード同期では共振器内に存在する複数周波数光に対して、その重ね合わせをとることで短パルスを得る。モード同期により得られるパルスは超短パルスとも呼ばれ、ピコ秒、フェムト秒のパルス幅を持つパルスを得ることが可能になる。

受動モード同期と能動モード同期[5]の 2 種類が存在する。本研究では受動モード同期を用いたカーレンズモード同期実験を行う。受動モード同期では、共振器内に強い非線形性を有する光学素子を配置することで、光パルスがそれを通過する際にパルスの波形に応じて自発的に損失変調や位相変調が生じる。

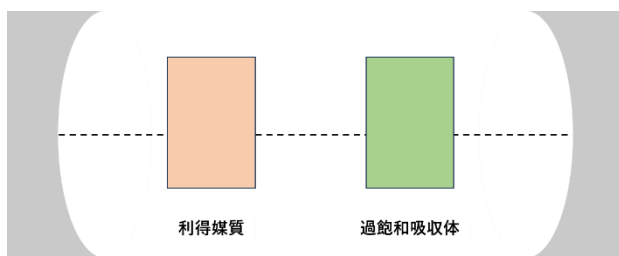


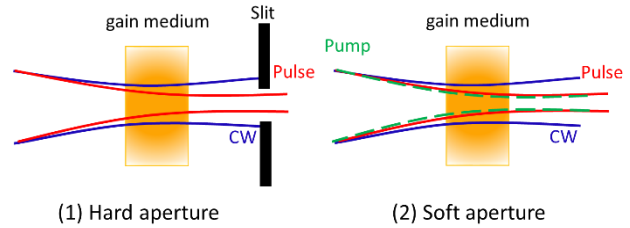
図3 過飽和吸収体

2.5 カーレンズモード同期

カーレンズモード同期 (KLM : Kerr Lens Mode lock) とは、非線形媒質中においてカーレンズ効果によって発生する光の自己収束効果を利用し、モード同期をする方法である。媒質中での屈折率は

$$n = n_0 + n_2 I$$

で表される。 n_2 は非線形屈折率を表し強度の高い光が入射した場合において、 $n_2 I$ の項が無視できなくなり、屈折率 n が光強度 I に比例して変化する。このような現象を光カー効果という。光カー効果



により媒質の屈折率がレンズ状になり、光は自己収束する。KLM には(a)Hard aperture KLM、(b)Soft aperture KLM がある。以下図には概念図を示す。

図4 カーレンズモード同期

Soft aperture KLM では、自己収束効果により発生するモードマッチの変化を利用し、光強度が高い際により大きな利得が得られるような利得変調をかけることでモード同期を実現している。Soft aperture KLM ではレーザーのモード半径が励起光におけるモード半径より CW において大きくなる。モード同期時には 2 つのモード半径が励起光のモード半径が CW の時と比べ近くなる。このことから Soft aperture KLM では、励起光のビーム径が重要である。

3. Cr²⁺:ZnS利得媒質の特徴

結晶やガラスなどの固体を利得媒質として用いたレーザーを固体レーザーと呼び、長期的な安定性や高い出力が可能であるという特性を持っている。本研究で用いる Cr:ZnS は遷移金属レーザーの 1 つである。Cr:ZnS は「中赤外のチタンサファイアレーザー」とも呼ばれ、1.8~3.4 μm の中赤外領域で広帯域な誘導放出断面積を有している。これにより Tm レーザーなどでしばしば課題とされていた水の吸収領域を避けた長波長側で、安定な動作を得ることができる。広帯域な蛍光はモード同期にも適しておりその活用が期待されている。

また、1.5~2.1 μm 帯に非常に大きく広帯域な吸収を有しており、一般的な Er ファイバーレ

ーザーや本研究室でも扱っている Tm ファイバーレーザーなどでの励起が可能であることが知られている。また、そのほかにも様々な性質がある。熱機械特性が高く、室温での動作が可能である点、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、など特徴がある。以下図 5 では本研究で用いた Cr:ZnS の利得媒質の吸収および誘導放出断面積を示す。

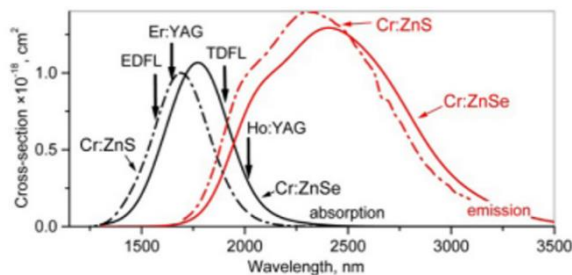


図 5 Cr:ZnS の吸収/誘導断面積[6]

4. 1.6 μm 帯高出力 LD の出力特性

4.1 実験構成

はじめに、励起光源の最適化を行った。2 台の LD を偏光結合させた励起光を構築した。LD はビームサイズは $1 \times 95 \mu\text{m}$ である。 $f = 7.5$ のレンズにより平行光にしたのち、2 枚のシリンドリカルレンズによりビームを円形に整形、偏光結合により 2 つのビームを結合した。その後、 $f = 75$ レンズにより、ビームを集光した。結合後のビーム形状を Pyrocam で観察後、LD の出力特性を測定した。図 6 は理論上での共振器内での励起光ビームサイズを表した図である。レーザー発振後、カーレンズモード同期実験を行うため、励起光ビームサイズを CW ビームサイズよりも小さくする必要がある。

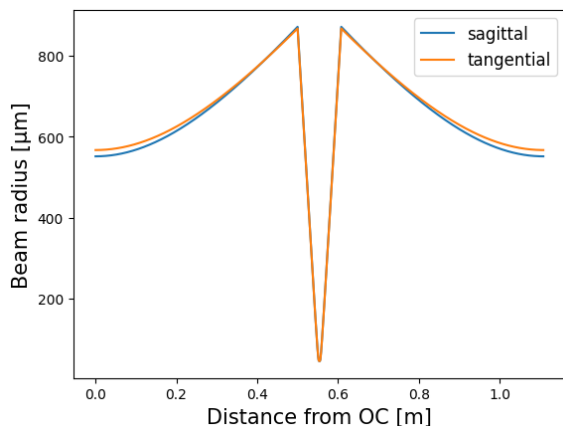


図 6 共振器内におけるビームサイズ

4.2 実験結果

2 台の LD を偏光結合した図を図 7 に示す。ビームサイズはそれぞれ LD1: $57 \times 62 \mu\text{m}$ 、LD2: $55 \times 61 \mu\text{m}$ 、結合後のビームサイズは約 $63 \times 72 \mu\text{m}$ であった。これは理論値 $64.1 \times 72.8 \mu\text{m}$ と比較しても十分な値といえる。

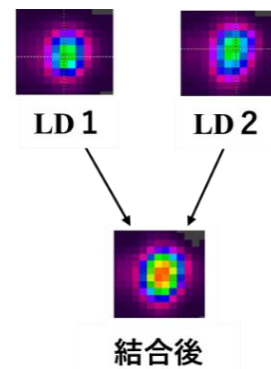


図 7 結合されたビームプロファイル

続いて、偏光結合後の LD の出力特性を図 8 に示す。出力は 9.5A まではほぼ線形に推移したのちに、10A で出力は頭打ちとなった。

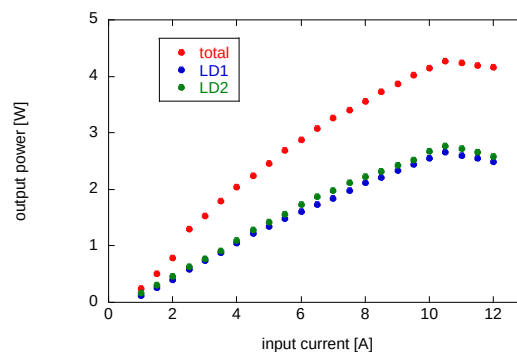


図 8 励起用 LD の出力特性

各 LD の波長可変特性も測定し、結果は以下のようなになった。

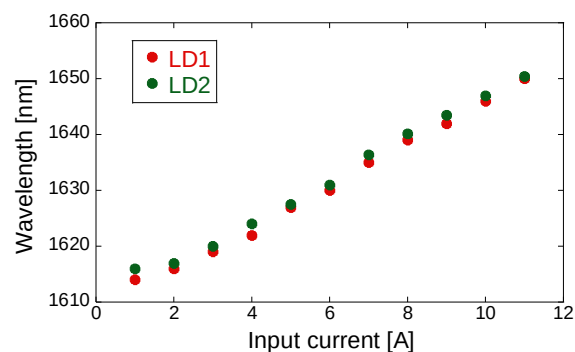


図 9 励起用 LD の波長特性
波長可変幅は 2039 nm～2304nm を得た。

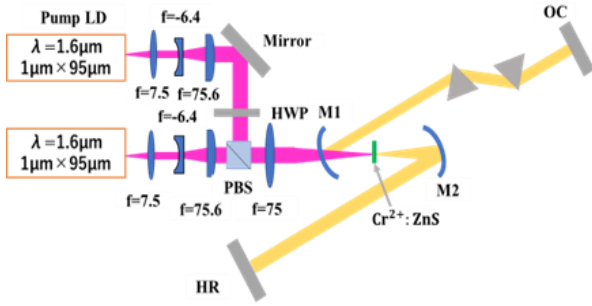


図 14 カーレンズモード同期実験構成図

6.2 実験結果

共振器内の分散値は下記の理論計算より、 950fs^2 と算定できる。 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 結晶の分散の波長依存性を示す TotallGDD はそれらを足し合わせて得られた共振器一周の GDD を表している。

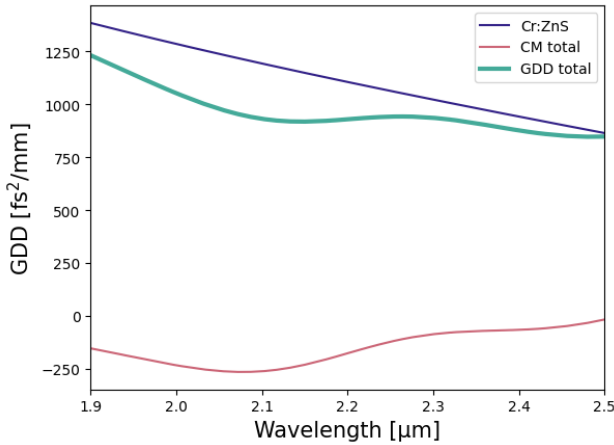


図 15 セルマイヤー方程式による理論計算

これより、

$$\beta_2 = \frac{d^2\phi}{d\omega^2} \approx -\frac{2\lambda}{\pi c^2} \left(\lambda \frac{dn}{d\lambda} \right)^2 l_0 + \frac{2\lambda}{\pi c^2} \lambda^2 \frac{n^2}{n^2 + 1} \frac{d^2sn}{d\lambda^2} x$$

また、セルマイヤー方程式より

$$n(\lambda)^2 = 1 + \sum_i \frac{B_i^2 \lambda}{\lambda^2 - C_i}$$

よりプリズムペアの負の分散は計算できる。中心波長は $\lambda = 2285 \text{ nm}$ 、石英のセルマイヤー方程式から屈折率 $n = 1.432$ とわかる。以上よりプリズムペアの距離 l_0 および、プリズムの挿入量 x がわかる。

$$\beta_2 = -14.3l_0 - 312xf s^2$$

と計算できる。

カーレンズにおける共振器内分散地はパルス幅 100fs と仮定すると、 -1250fs^2 程度であると算出

できた。共振器の1ラウンドトリップあたりの分散値は 950fs^2 程度であることから、プリズム間距離を 110 mm とすれば十分な負分散が得られると考えた。

この時、カーレンズを発生させる際にプリズムペアを挿入した。その際にカーレンズに十分な出力を得ているかどうか10%OCでのプリズムペア挿入時と、挿入する前の出力特性の比較を行った。以下はその結果である。

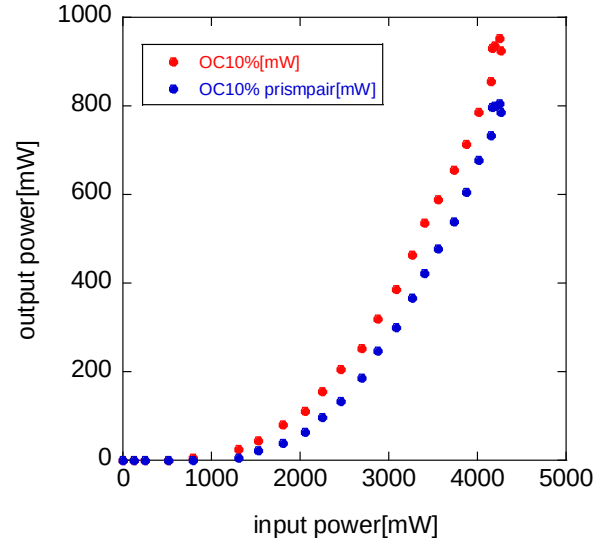


図 16 プリズムペアでの出力特性

プリズムペア挿入前と比較して、挿入後は 804 mW を記録した。これは、挿入前と比較して85%程度の出力を得た。

これより、モード同期実験を行ったが、モード同期動作は確認できなかった。これは共振器内のプリズムペアにおける分散補償が不十分であることが原因として挙げられる。

7. まとめ

本研究では、小型かつ高出力な波長 $1.6 \mu\text{m}$ 帯のLD励起 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ のモード同期レーザーの開発を目指して行った。

2台のbroad-stripe LDを偏光結合させ、強励起な励起光源を得た。最高励起出力は 4.3W の出力を得た。また2つのLDの結合効率は88%であった。利得媒質である $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ は非常に広帯域な吸収を有しているため、スペクトルの広い高出力 $1.6 \mu\text{m}$ 帯LDでの高効率な励起が可能であるため、本研究では2台のbroad-stripe LDを偏光結合させ、強励起な励起光源を用いた。

上記の LD を用いて、 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ レーザーの CW 実験を行った。取り出し効率 1~30% での出力特性を測定し、最高出力はそれぞれ 1%OC:289 mW、3%OC:730 mW、10%OC:955 mW、20%OC:815 mW、30%OC:730 mW を記録した。また、スロープ効率は 1%OC:10%、3%OC:25%、10%OC:33%、20%OC:27%、30%OC:19% を得た。OC10% 時に最高出力であった。また波長可変幅は 2039 nm~2304nm を得た。これより、共振器内パワーは 10 W 程度であり、また十分な波長可変幅を得たことから、OC10%でのモード同期が可能と考え、カーレンズモード同期実験を行った。モード同期実験ではカーレンズモード同期法を用い実験を行った。共振器の分散を補償するために、プリズムペアによる分散補償を行った。カーレンズにおける共振器内分散値はパルス幅を 100 fs と仮定した場合、 -1250 fs^2 程度と算出した。共振器内の 1 ラウンドトリップあたりの分散値は 950 fs^2 程度である。これより、プリズムペアによる分散補償ではプリズム間の距離は 110mm とすれば、共振器内の分散値を -1250 fs^2 にできると考え、プリズム間の距離を 110mm とした。共振器内にプリズムペアを挿入した場合の出力特性はプリズムペア挿入前と比較し、85% 程度であった。これによりモード同期実験を行った。プリズムペアの距離の調整により分散値の調整を行い、ミラーを動かすことで共振器内を不安定条件にし、モード同期動作を得られるようにしたが、モード同期動作には至らなかった。これは共振器の最適化ができていないことや、プリズムペアの調整不足による負分散が十分に調整できていないことが原因として考えられる。

参考文献

- [1] S.Vasilyev et.al., Opt.Mater.Express 7 2636-2650 (2017)
- [2] 三沢和彦・芦原聡 (2020)『工学系のためのレーザー物理入門』講談社
- [3] Kartner, F. X., I. D. Jung, and U. Keller. "Soliton mode-locking with saturable absorbers."IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 2.3 (1996): 540-556.
- [4] 多田邦雄・神谷武志 (2010)『ヤリーヴ-イエー光エレクトロニクス基礎編』丸善出版株式会社
- [5] Barh, Ajanta, et al. "Watt-level and sub-100-fs self-starting mode-locked 2.4- μm Cr: ZnS oscillator enabled by GaSb-SESAMs." Optics Express 29.4 (2021): 5934-594
- [6] S. Vasilyev, I. Moskalev, M. Mirov, V. Smolski, S. Mirov, and V. Gapontsev, " Ultrafast middle-IR Lasers and amplifiers based on polycrystalline Cr:ZnS and Cr:ZnSe ", Opt. Mater. Express 7, 2636–2650 (2017)