

InGaN 半導体レーザ直接励起カーレンズモード同期 Ti:sapphire レーザ

A Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser directly pumped by InGaN-based laser diodes

杉山 直仁 (M1), 田中 裕樹 (D3)

Naoto Sugiyama, Hiroki Tanaka

Abstract

A Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser pumped by 478- and 520-nm laser diodes (LDs) is reported. This wavelength-multiplexed pumping scheme using longer wavelength LDs can prevent induction of near-infrared absorption loss observed at shorter wavelengths (~450 nm) pumping. At the maximum pump power of 3.15 W, the average output power of 280/360 mW with the pulse width of 42/48 fs were achieved at a repetition rate of 117 MHz.

1. はじめに

従来の Ti:sapphire レーザ発振器は、2 倍波 Nd レーザまたは 2 倍波光励起半導体レーザなど、主として緑色のレーザによって励起されてきた。近年、InGaN ベースの半導体レーザ(LD)の著しい高出力化により、LD による直接励起が Ti:sapphire レーザにも適用され始め、よりコンパクトで低価格な Ti:sapphire 発振器の普及が期待されている。

2009、2011 年に Roth らは、波長 452 nm の 1 W 青色 LD を 1 台用い、LD 直接励起 Ti:sapphire レーザの連続波発振および超短パルス発振を世界で初めて実現した^[1,2]。しかしながら従来の緑色励起と比較し、青色短波長励起はストークス効率および吸収効率が低く、さらには青色励起による共振器内損失の増加(励起誘起損失)^[3]の影響もあり、レーザ発振閾値は高く、低効率なものであった。我々も高出力 452 nm LD を用いた励起を試みたが、レーザ結晶の FOM 値とは無関係に、やはり短波長レーザ励起では励起誘起損失の影響が顕著で効率は著しく低いものであった。452 nm LD 励起の再生増幅器の構築例も報告されているが、我々のその特性に関

する結論は懐疑的である。

一方、2013 年に日亜化学工業が 1 W の緑色 LD を開発し、我々はこれを励起源とした Ti:sapphire レーザを実現した^[3]。また、2015 年に Gürel らは、この緑色 LD を 2 台を定格以上の電流でオーバードライブさせ両側励起とし、連続波(CW)で 650 mW を得る高出力化を達成し、また平均出力 350 mW、時間幅 39 fs のカーレンズモード同期(KLM)パルスを実現した^[4]。しかしながら、450 nm の青色 LD と比較し、緑色 LD の高出力化の進みは遅いのが現状である。更なる高出力化の方法として、我々は 520 nm と 478 nm の 2 波長 4 台励起 Ti:sapphire レーザを試み、最大入射パワー 3.15 W において、連続波出力 660 mW を達成した^[5]。また、半導体可飽和吸収ミラー(SESAM)を用いたモード同期パルス発振において、最大出力 315 mW、パルス幅 126 fs を達成した^[5]。

本研究では、モード同期動作におけるさらなる短パルス化と高出力化のために、カーレンズモード同期動作を試みた。

2. 実験セットアップ

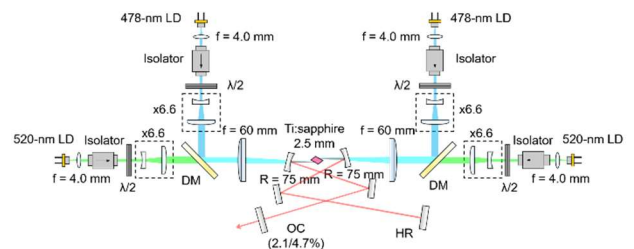


Fig. 1 Schematic view of Ti:sapphire laser pumped by 520- and 478-nm LDs.

Ti:sapphire レーザの励起源として、478-および

520-nm の LD を計 4 つ使用した(図 1)。sagittal×tangential 面におけるビームクオリティ(M^2)の計測値は、478 nm で場合 2.1×7.9 、520 nm で 2.2×7.5 であった。出力と波長を一定に保つために、LD ホルダの温度はペルチェ素子で 19 °C に制御した。各励起ビームは、焦点距離 4.0 mm の非球面レンズによってコリメートされ、対向する光による損傷を防ぐために光アイソレータを通過し、半波長板によって偏光方向を微調した。次いで、シリンドリカルレンズ対によって、tangential 平面でビーム径を 6.6 倍に拡大した。その後、ダイクロイックミラー(DM)によって波長多重化が達成された。多重ビームは、焦点距離 60 mm の球面集光レンズと、曲率半径 75 mm のダイクロイック凹面鏡を通過し、ブリュースターカット Ti:sapphire 結晶に到達した。478-および 520-nm の励起ビームの結晶中におけるビーム半径は、sagittal×tangential 平面で 16×32 および $18 \times 33 \mu\text{m}$ と計算された。ここでビーム径は、LD の発散角および、 M^2 の計測値から推定されるエミッタサイズを用いて、ABCD 行列により計算した。この計算方法は、他の光学系において、長い焦点距離を有するレンズで集光したビームの計測値とよく一致した。なお、励起ビーム半径の推定では、凹面鏡のおよそ 6.5°の傾きを無視した。合計入射励起パワーは 3.15 W であり、0.85 W の伝搬損失の 50%以上が光アイソレータによるものと確認された。利得媒質(GT Advanced Technologies)の長さは 2.5 mm であり、合計吸収励起パワーは 2.46 W であった。結晶は銅製ホルダで固定し、ホルダを通る循環水の温度を 15 °C に設定した。

KLM 実験での共振器構成を図 2 に示す。曲率半径 75 mm の 2 つのダイクロイック凹面鏡に対する入射角は 6.5°であり、長さ 2.5 mm のブリュースターカット結晶による非点収差を補償する。また、結晶の材料分散と自己位相変調を補償するために、2 つの GTI(Gires-Tournois Interferometer)ミラーによって、往復合計で $-540 \pm 160 \text{ fs}^2$ の群遅延分散(GDD)加

えられた。

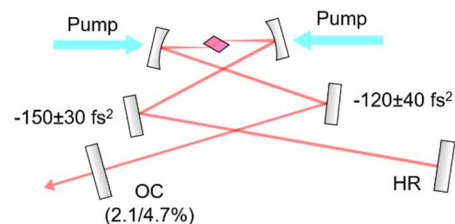


Fig. 2 Cavity design of Ti:sapphire laser in the Kerr-lens mode-locking operation..

初めに、透過率 2.1%の出力鏡(OC)を使用し、高い共振器内ピークパワーを目指した。共振器の腕の長さはともに 60 cm とした。共振器長は 128 cm であり、これは 117 MHz の繰返し率に対応する。2 つの凹面鏡間の距離は約 79.5 mm であり、共振器安定条件の 4 つの端のうちの 1 つにおおよそ対応する。KLM が達成されたら、抽出効率を高めるために OC 透過率を 4.7%に高めた。

3. 実験結果

透過率 2.1%の OC に意図的なミスアライメントを加えて CW 共振器モードを不安定にし、高反射(HR)ミラーを前後に振ってパルス動作を開始させ、平均出力 280 mW を得た。分光器(Ocean Optics USB 4000)で計測したスペクトル幅(半値全幅: FWHM)は 17.0 nm で、パルス幅は自己相関計測により 42 fs と求められた(図 3)。なお、パルス形状は sech^2 型を仮定した。時間帯域幅積は 0.335 であり、繰返し周波数は 117 MHz であった。OC 透過率を 4.7%にすると、平均出力 360 mW のパルス動作が得られ、これは入射励起パワーに対して 11.4%の変換効率に相当する。このときのスペクトル幅は 14.4 nm であり、パルス幅は 48 fs であった。

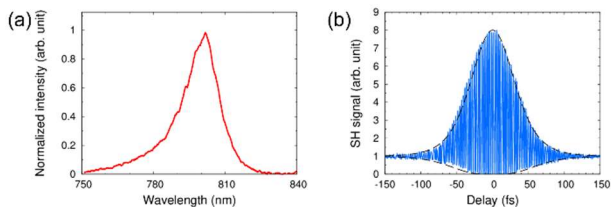


Fig. 3 Spectrum (a) and interferometric autocorrelation (b) of 42 fs pulses in the KLM operation.

4. 考察

図4は、共振器モード径がCWとKLMでどのように異なるのかを示す。ここで、共振器モード径はABCD行列を用いて計算され、特に結晶中でのカー効果は非線形ABCD行列で考慮した[6]。

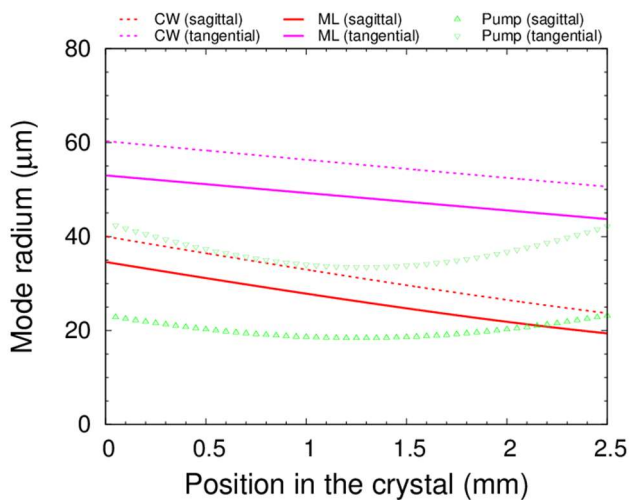


Fig. 4 Overlapping between pump and cavity modes in the crystal in the KLM configuration.

パルス発振時に共振器モードのサイズが小さくなると、安定したパルス動作が得られる。これは、励起と共振器モードの空間重なり改善により実効利得が増加するためである。しかしながら、LD励起では、特にtangential面でビーム品質が悪いので、結晶全体に渡って励起ビームを細く保つことが困難である。そのため、CWからKLMに移行する際に、励起と共振器モードの空間重なりはあまり改善せず、実効利得の大きな変化を得ることは困難で

ある。

しかしながら、今回の我々の共振器設計では、2つの凹面鏡の中心から結晶をわずかに(約1.8mmのオフセット)離すことによって、CWモード径を励起モード径よりもはるかに大きくし、これによりCWからKLMに移行する際のモード径変化を大きくした。この条件でモード整合効率と実効モード体積を計算し、KLMでより高い出力を得ることができを確認した。このような結晶の位置決定は、従来のKLM手法と変わらない。結晶の中心からのずれは、結晶中での励起ビーム径が小さくなるため、カー効果(自己位相変調)を減少させるが、このような僅かなオフセットはKLMを達成および維持するために不可欠であり、オフセット量は励起ビームのビームクオリティによって決定される。低ビーム品質のLD励起では、オフセットを大きくする必要があると考えられる。

5. まとめと展望

478および520nmの波長多重LD励起により、平均出力280/360mW、パルス幅42/48fsのKLM動作を達成した。LD励起でKLM動作を達成するには、従来以上に厳密な共振器設計が必要である。

近年、マルチモードファイバ結合緑色LD(>10W)が利用可能である。しかし、開口数(NA)が0.2で、直径100μmのファイバコアから10Wの緑色出力を仮定しても、モード整合効率が極めて悪いので、これを励起源としたTi:sapphireレーザを得ることは依然としてできていない。しかしながら、一つのファイバに集積される単一エミッタLDの数や、単一エミッタLDのパワーがさらに増加すれば、高出力高効率なTi:sapphire発振器または増幅器が期待される。

References

- [1] P. W. Roth, A. J. Maclean, D. Burns, and A. J. Kemp, "Directly diode-laser-pumped Ti: sapphire laser", *Opt. Lett.* **34**, 3334 (2009).
- [2] P. W. Roth, A. J. Maclean, D. Burns, and A. J. Kemp, "Direct diode-laser pumping of a mode-locked Ti:sapphire laser", *Opt. Lett.* **36**, 304–6 (2011).
- [3] S. Sawai, A. Hosaka, H. Kawauchi, K. Hirokawa, and F. Kannari, "Demonstration of a Ti:sapphire mode-locked laser pumped directly with a green diode laser", *Appl. Phys. Express* **7**, 022702 (2014).
- [4] K. Gürel, V. J. Wittwer, M. Hoffmann, C. J. Saraceno, S. Hakobyan, B. Resan, a. Rohrbacher, K. Weingarten, S. Schilt, and T. Südmeyer, "Green-diode-pumped femtosecond Ti:Sapphire laser with up to 450 mW average power", *Opt. Express* **23**, 30043 (2015).
- [5] 杉山直仁、田中裕樹、澤田亮太、「478-および 520-nm 半導体レーザー直接励起 Ti:sapphire レーザ」、神成研究室 2016 年度アニュアルレポート。
- [6] S. Yefet and A. Pe'er, "A Review of Cavity Design for Kerr Lens Mode-Locked Solid-State Lasers", *Appl. Sci.* **3**, 694 (2013).