

478-および 520-nm 半導体レーザー直接励起 Ti:sapphire レーザ

Ti:sapphire laser directly pumped by 478- and 520-nm laser diodes

杉山 直仁 (B4), 田中 裕樹 (D2), 澤田 亮太 (M2)

Naoto Sugiyama, Hiroki Tanaka, and Ryota Sawada

Abstract

We report that the 478-nm diode laser is a more useful pumping source than the 450-nm diode laser for power scaling of a Ti:sapphire laser. A maximum output power of 656 mW in continuous-wave operation is achieved, and 126-fs pulses with an average output power of 315 mW is obtained in SESAM mode-locking operation. We also demonstrate a Kerr-lens mode-locking experiment.

1. はじめに

Ti:sapphire 結晶は非常に広い利得スペクトル (650~1100 nm) を持ち、10 fs を下回るパルスを直接発生できる唯一の結晶である。また、吸収スペクトルも青から緑色(400~600 nm)にかけて広く、近年高出力化の進んでいる、可視波長域のレーザーダイオード(LD)で直接励起することで、コンパクトで安価、かつ高効率なレーザー光源を実現できる。2009 および 2011 年に Roth らは、波長 452 nm の 1 W 青色 LD を 1 台使い、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固体レーザー励起 (Nd:YVO₄ 共振器内第二高調波レーザーなど) と比較し、青色(450 nm)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)^[1]の影響もあり、その発振特性は高発振閾値および低効率となっていた。

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]。2015 年に Gürel らは、この緑色 LD を 2 台使い、連続波で 650 mW と高出力化を達成し、また平均 350 mW、幅 39 fs のパルスを得た^[4]。しか

し、450 nm の青色 LD と比較し、緑色 LD の高出力化の進みは遅い。更なる高出力化の方法として、励起源を波長多重化することが挙げられる。

本研究で我々は、従来の 520 および 450 nm の LD に加え、世界で初めて 478-nm の LD を使用する。各励起波長に対する Ti:sapphire レーザの連続波発振特性を評価し、478-nm 励起の有用性を示した。また、520-nm と 478-nm の 2 波長励起により、連続波およびモード同期発振の高出力化を実現した。

2. 各励起波長に対する Ti:sapphire レーザの連続波発振特性

まず、520、478 および 450 nm の LD で励起した場合の Ti:sapphire レーザの連続波発振特性を計測した。用いた Ti:sapphire 結晶は、長さ 2.5 mm、0.25 wt.% (GT Advanced Technology 社) のものである。計測した入出力特性を Figure 1 に示す。結晶への入射パワーはそれぞれ 1.47、1.61、2.63 W であり、モード整合効率はそれぞれ 90、91、82% と計算された。

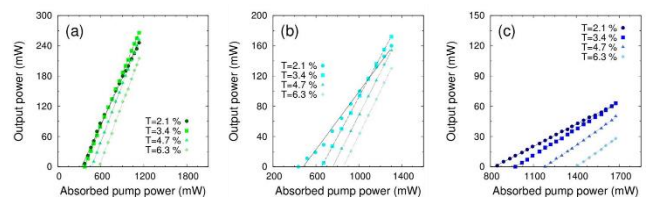


Fig. 1 Laser output performances of the Ti:sapphire laser pumped by 520- (a), 478- (b), and 450-nm (c) LD.

実験結果から、励起波長が短波長であるほど Ti:sapphire レーザの発振閾値が高く、かつスロープ効率が低いことが見て取れる。これらの結果は、Ar レーザを励起とした Roth らの実験結果^[1]と同様の傾向を示している。

Findlay-Clay 解析^[5]から、520、478、450-nm 励起時の共振器内損失はそれぞれ、3.2、3.8、4.1%と見積もられた。ゆえに、青色励起によって損失が誘起されると考えられる。また、450-nm 励起ではより大きな損失が誘起されるが、これは2波長励起においては出力の経時的変化として顕著に表れた (Figure 2 a)。すなわち、520-nm 励起に対してある時刻で 450-nm 励起を追加した際、出力が初めは 70 mW まで上昇し、その後 63 mW まで下降して定常状態に落ち着いた。またこれは 450-nm 励起の吸収パワーに依存することがわかった (Figure 2 b)。一方で、450-nm の代わりに 478-nm 励起とした場合はこのような現象は見られなかった。

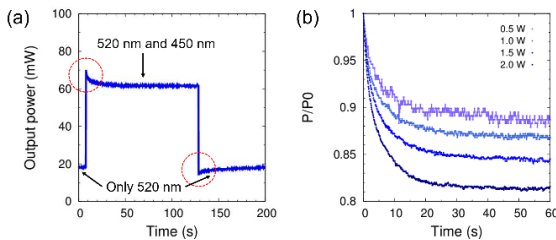


Fig. 2 (a) Transient output power of a Ti:sapphire laser pumped by a 520- and a 450-nm LD. (b) Normalized transient output power with different absorbed blue pump power.

損失の増加は、 Ti^{3+} の励起準位が青色の光を吸収し Ti^{4+} に変化し(charge transfer)、 Ti^{3+} と Ti^{4+} のペアが近赤外光をより吸収することに起因すると考えられている^[6]。なお、この charge transfer の逆反応は、今回用いる3つのいずれの励起波長でも生じる。

520-nm と 478-nm の2波長励起では出力の経時的変化が観測されなかったが、これは478-nmによる準反応が比較的遅いためであると考えられる。Fig. 1の実験のように、478-nmの単一波長励起ではゆるやかな損失の増加が引き起こされるが、Fig. 2の実験のように、520-nmと同時に励起される場合は、520-nmによる逆反応が同時に起こるため、数秒程度の短い時間スケールでは損失の増加を観察できなかったと考えられる。

3. 4台励起 Ti:sapphire レーザの連続波発振実験

Figure 3 に示す構成において、Ti:sapphire レーザの連続波発振実験をおこなった。波長 520-および 478-nm の励起光を、結晶の両側からダイクロイックミラーによって合波した。用いた出力鏡の透過率は 2.1、3.4、4.7、6.3%であり、4.7%において最も高い出力が得られた。

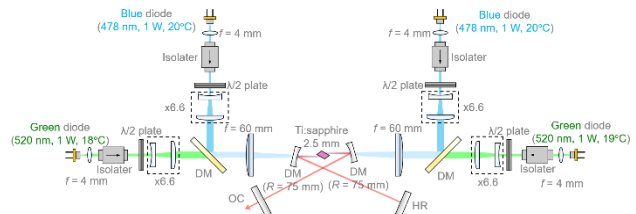


Fig. 3 Experimental setup in CW operation. OC: output coupler. HR: high reflectivity. DM: dichroic mirror.

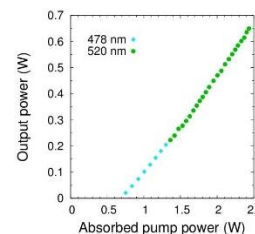


Fig.4 Input-output characteristics of the Ti:sapphire laser pumped by 520- and 478-nm LDs. Up to the absorbed pump power of 1.3 W, the laser was pumped by 478-nm LDs (shown as cyan symbols), and 520-nm pump beams were further added (shown as green symbols).

吸収パワーに対する出力特性を Figure 4 に示す。最大出力は 656 mW であった。吸収パワーに対するスロープ効率、478-nm 励起に対し 34%、520-nm 励起に対し 40%であった。また光-光変換効率は、最大入射パワー3.15 W に対して 21%、最大吸収パワー2.46 W に対して 27%であった。これは、緑色 LD のみを励起とした Gürel らの先行研究^[4](最大入射パワー3 W に対して最大出力 650 mW)と同等の高効率であった。以上より、478-nm の LD は高出力化に有用であることが示された。

4. SESAM モード同期実験

Figure 5 のように、共振器内に半導体可飽和吸収ミラー(SESAM)を挿入し、また GTI (Gire Tournois interferometer)ミラーを用い、往復で 480 fs^2 の負分散を加えた。用いる SESAM の非飽和損失が大きいため、出力鏡の透過率を高くし、6.3%とした。

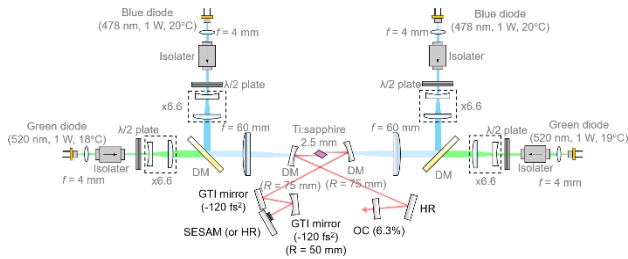


Fig. 5 Experimental setup of 520- and 478-nm-diode-pumped SESAM mode-locked Ti:sapphire laser.

得られたモード同期パルスのスペクトル幅は 5.4 nm であった。自己相関幅は 194 fs であり、 sech^2 のパルス形状を仮定した場合のパルス幅は 126 fs と見積もられた(Figure 6)。時間帯域積は 0.315 と計算され、フーリエ限界のパルスが得られたことがわかる。繰り返し周波数は 192 MHz であり、平均出力は 315 mW であった。前節の連続波発振時と比較し出力が低く留まっている原因は、用いた SESAM の挿入損失が高いためであると考えられる。スイスの研究グループは、非飽和損失が非常に低い SESAM を使用して、CW 出力 470 mW に対し ML 出力 460 mW を達成している^[7]。

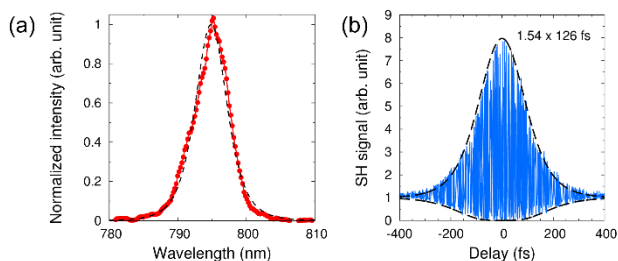


Fig. 6 Spectrum (a) and interferometric autocorrelation trace (b) of SESAM mode-locked pulses. The dashed lines are theoretical curves assuming pulse and spectrum shape of sech^2 .

5. カーレンズモード同期実験

Figure 7 に示す構成において、Ti:sapphire レーザのカーレンズモード同期動作を試みた。従来の緑固体レーザー励起では、共振器内に Ti:sapphire 結晶とは別に非線形媒質を追加することは稀である。しかし、LD 直接励起では励起光のビームクオリティが低く、共振器モードを大きくしなければ高いモード整合効率が得られない。そのため、Ti:sapphire 結晶のみでは十分なカー効果が得られないと考え、新たな非線形媒質として熔融石英を挿入した。用いた熔融石英の長さは 3 mm であり、その材料分散は $38 \text{ fs}^2/\text{mm}$ である。GTI ミラーによって往復で 840 fs^2 の負分散を加えた。共振器内の光強度を高め、より大きな非線形効果を誘起するため、透過率 2.1% の出力鏡を使用した。共振器長は約 192 cm とした。

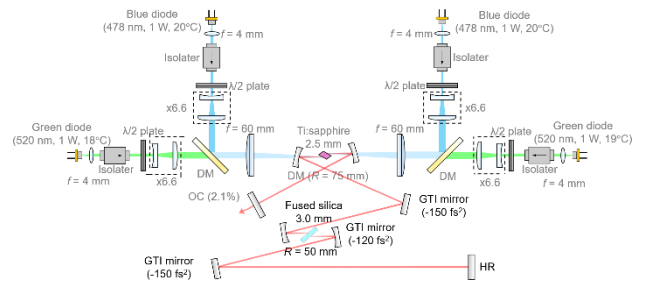


Fig. 7 Experimental setup of Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser pumped by 520- and 478-nm LDs.

連続波発振において、最大 446 mW の出力を得た。この状態から、熔融石英横の凹面鏡の距離を狭め、出力ビームがマルチモードになるよう調整した。エンドミラー(HR)からの漏れ光を CMOS カメラで観測しながら調整し、そのビーム形状が Figure 8 a に示すような形状となった状態で、エンドミラーを前後に動かすことによってモード同期を達成した。ビーム形状は Fig. 8 b に示すような Gauss ビームに変化し、Fig. 9 のようスペクトルの広がりを観測した。このスペクトル幅は 20 nm であり、算出されるフーリエ限界パルス幅は 35 fs である。モード同期前後の出力は、それぞれ 100 、 130 mW であった。

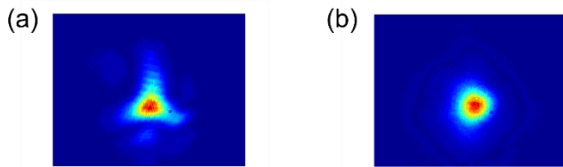


Fig. 8 Beam profile before initiation of Kerr-lens mode-locking (a) and that when mode-locked (b).

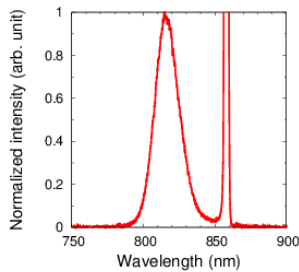


Fig. 9 Spectrum of Kerr-lens mode-locked pulse.

しかしながら、Figure 9 から見て取れるように、CW成分が混在しており、また、モード同期が持続する時間は最長でも30秒程度であった。この要因として、カー効果が弱いために、CWモードとKLMモードの差別化が不十分であることが考えられる。

我々の設計において、利得媒質中でのビームウエストサイズは、CWで $55\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ であり、KLMで $28\ \mu\text{m} \times 42\ \mu\text{m}$ であった。なお、励起光のビームウエストサイズは $12\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ であった。ゆえに、凹面鏡間の距離が設計どおりであったなら、大きな利得差が生じると考えられる。これは、ソフトアパーチャー効果である。

CW成分の存在は、利得差を打ち消してしまうほどの損失差が生じている可能性を示唆するが、Figure 8 から、KLMはCWより回折損失は少ないと考えられる。したがって、実際には利得差があまり生じておらず、CWを不安定にさせたことによる回折損失差によってモード同期が達成されたと考えることもできる。ゆえに、本実験がソフトアパーチャー効果によるKLMであるとは断定できない。

CW成分を含まないKLMの達成には、共振器の最適化、ハードアパーチャーの挿入等が期待される。

6. まとめ

本研究において、Ti:sapphireレーザーの特性を励起波長ごとに検討した。より長波長での励起が、低閾値、高効率につながることを確認できた。また、478-および450-nmの2波長励起によりTi:sapphireレーザーの高出力化を実現した。連続波発振実験において、最大出力656 mW、入射パワーに対する光-光変換効率21%を達成した。また、SESAMを用いたモード同期実験において、平均出力315 mW、幅126 fsのパルスを得た。また、共振器内に溶融石英を挿入したカーレンズモード同期実験においては、安定なパルスを得ることはできなかった。

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. Hirosawa, 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] D. Findlay, R.A. Clay, "The measurement of internal losses in 4-level lasers", *Phys. Lett.* 20, 277 (1966).
- [6] R. L. Aggarwal, A. Sanchez, M. M. Stuppi, R. E. Fahey, A. J. Strauss, W. R. Rapoport, and C. P. Khattak, "Residual Infrared Absorption in As-Grown and Annealed Crystals of Ti:Al₂O₃", *IEEE J. Quantum Electron.* 24(6), 1003-1008 (1988).