

InGaN 緑色半導体レーザ直接励起チタン・サファイアレーザ

A Ti:sapphire laser pumped directly with a green diode laser

澤井 翔太 (M2), 保坂 有杜 (B4)

Shota Sawai, Aruto Hosaka

Abstract

We report mode-locked a Ti:sapphire laser pumped directly with a 1 W, 518 nm GaN diode laser. Pulse durations as short as 62 fs and average output powers of up to 23.5 mW are obtained with chirped-mirror-based dispersion compensation and a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). To the best of our knowledge, this is the first demonstration of a Ti:sapphire laser directly pumped with a green diode laser.

1. はじめに

チタンサファイア($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$)結晶は広い波長帯域 650~1050 nm を持ち、熱伝導性にも優れる[1]。そのため、波長可変レーザあるいは超短パルスレーザとして広く用いられている。しかし、その短い蛍光寿命と比較的高い寄生損失により発振閾値は高い。このことに加え、チタンサファイアの吸収係数はピークの~490 nm より短波長側では急峻に落ち込む。それ故、アルゴンイオンレーザや半導体レーザ励起 Nd:YVO₄ レーザ 2 倍高調波のようなビーム品質に優れた高出力緑色レーザが一般的に励起光源として用いられる。そのため、装置はコンパクトになりやすく、また安価にもならない。

一方で Cr:LiSAF、Cr:LiCAF 結晶や Yb ドープ媒質を使った半導体レーザ直接励起超短パルスレーザは効率の良い入出力特性が実現でき魅力的である。とは言え、これらの媒質はチタンサファイア

が持つ超広帯域な利得幅および高い熱伝導性といった生まれながらにして備わった特性を凌駕することはなく、依然として波長可変・超短パルスチタンサファイアレーザが果たす役割は大きい。

近年 InGaN 青色半導体レーザの高出力化に伴い [2]、半導体レーザ直接励起チタンサファイアレーザが実現されている [3-5]。これら先行研究では、波長 450 nm 付近で動作する高出力 (>1 W) 半導体レーザを用いており、~450 nm におけるチタンサファイアの吸収係数の低さから約 5 mm という長い結晶が用いられている。それに伴いプリズム対ベースの分散補償によりモード同期動作が達成されている。一方、本研究室では 3.5 W 高出力青色半導体レーザにより結晶長 2.5 mm のチタンサファイア結晶を励起し、チャープミラーを使った分散補償でモード同期動作を達成している [6]。

本研究ではごく最近日亜化学工業により開発され波長 518nm、出力 1 W の高出力緑色半導体レーザを用いてフェムト秒チタンサファイアレーザを実現することを目的とした。波長 518 nm の吸収係数は波長 450nm に比べ 1.6 倍程度高いため、その分吸収長が短い。したがって、1 W 半導体レーザー一台でも結晶長 2.5 mm のチタンサファイア結晶から十分な利得を確保できる。そのため先行研究 [3-5] と比べ、結晶による損失を小さくできるだけでなく結晶内でのモード整合も改善できる。また、昨年度の成果 [6] 同様チャープミラーによる分散補償も可能である。それだけでなく緑色波長帯励起の場合、Roth らによって指摘された、短波長励起光源による寄生損失も存在しない [3]。

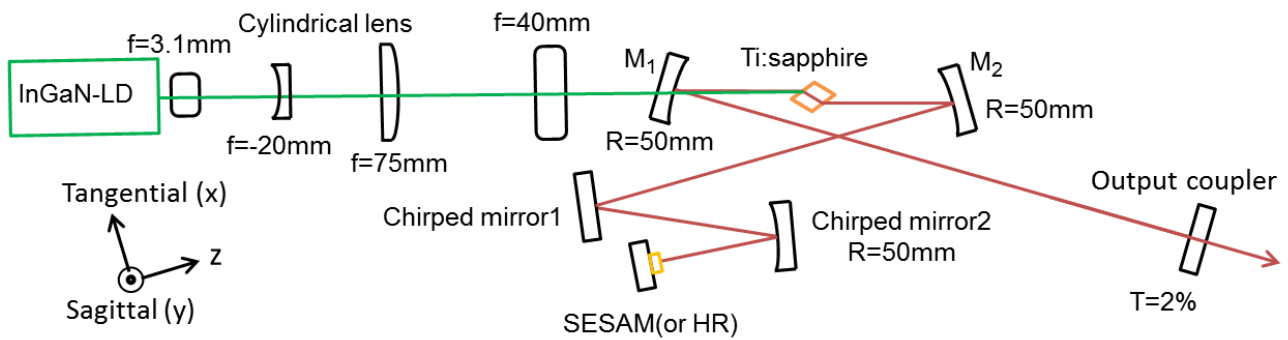


Fig.1 Experimental setup of direct GaN-LD pumped mode-lock Ti:Sapphire laser.

2. 実験および実験結果

Figure1 にチタンサファイアレーザの実験セットアップを示す。励起光源には InGaN 半導体レーザ（日亜化学工業）を用いた。動作波長 518 nm、出力 1 W、ビーム品質 $M^2=1.3 \times 5.1$ (速軸 \times 遅軸) である。印加電流の増加に伴う動作波長の赤方シフトは Fig.2 赤プロットに示されているとおりである。実験に用いたチタンサファイア結晶（CasTech 社製）は、ブリュースターカット、結晶長 2.5 mm、 Ti^{3+} ドープ率 0.25wt.% である。FOM (figure-of-merits, 514 nm/800 nm) は >200 である。半導体レーザからの出射光線は非球面レンズでコリメイトされたのち、高次モードを多く含む x 方向のビーム径をシリンドリカルレンズ対で拡大し、アクロマティックレンズで結晶に集光している。ABCD 行列による結晶中でのビームウエストサイズ計算値は、 $25 \times 7 \mu\text{m}$ ($1/e^2$ 半値) である。

共振器はダイクロイック凹面鏡対とエンドミラー対からなる 4 枚鏡共振器である。ダイクロイック凹面鏡の曲率半径は 50 mm である。凹面鏡での折り返し角度は非点収差を考慮し $\sim 8^\circ$ とした [1]。取り出し鏡 (OC, output coupler) の透過率は 2% である。もう一方のエンドミラーには高反射鏡 (HR, high reflectivity) および SESAM をそれぞれ CW 動作時、モード同期動作時に用いた。波長 800 nm における SESAM の反射率は 99% (非飽和時)、99.5% (飽和時) である。回復時間は 1~10 ps であ

り、飽和エネルギーは $30 \sim 50 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ である。これら 4 枚のミラーに加え、チャープミラー (LAYERTEC 社製) が 2 枚 (平面鏡 1 枚, 凹面鏡 1 枚) 挿入されている。平面・凹面チャープミラーで一回反射あたり付与される GDD (group delay dispersion) はそれぞれ、 $-150 \pm 30 \text{ fs}^2$ and $-120 \pm 40 \text{ fs}^2$ である。これら 2 枚のチャープミラーにより、結晶で生じる正の分散 $\sim 145 \text{ fs}^2$ に対して十分な負分散が与えられている。

結果として我々は CW 動作および SESAM を用いたモード同期動作を達成した。我々の知る限り、緑色半導体レーザ直接励起チタンサファイアレーザを実現したのはこれが世界で初めてである。チタンサファイアレーザ出力特性の実験結果を Fig.2 に示す。CW 動作の入出力特性は青色でプロットされ

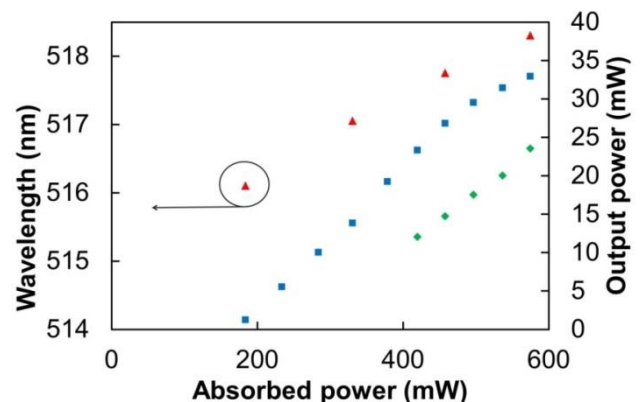


Fig.2 Plots of laser output power and wavelength of the pumping diode laser as a function of absorbed pumping laser power.

ており、最大吸収パワー575 mW時に最大出力32.9 mWを得た。発振波長は802 nm、発振閾値吸収パワーは184 mW、スロープ効率は8.6%である。この閾値吸収パワーは現在報告されている半導体レーザ直接励起チタンサファイアレーザの中で最小である。これまで青色半導体直接励起チタンサファイアレーザの先行研究では、Rothらにより閾値入射パワー252 mW（うち83%が結晶で吸収、OC透過率0.5%、結晶長5.2 mm、FOM400）が報告されている[4]。このような低閾値発振が得られたのは、先行研究に比べ結晶長が短い分共振器内の損失が小さいことに加え、短い結晶にタイトに集光することで結晶全体にわたり励起モード体積も共振器モード体積も小さくなっているからであると考えられる。文献[4]では結晶内のウェストサイズは25 × 12 μm（励起モード）、32 × 18 μm（共振器モード）と計算されているのに対し、本実験の計算値は25 × 7 μm（励起モード）、12 × 8 μm（共振器モード）である。しかしながら、最大出力、スロープ効率は青色半導体一台励起の結果（最大出力44 mW、スロープ11.1%、OC3% [4]）に勝ってはいない。

モード同期動作の出力はFig.2緑色プロットで示されている。安定したCWモード同期動作は吸収パワー420 mWから得られた。最大出力23.5 mW、スロープ効率7.3%を得た。最大出力がCW動作時に比べ小さいのは、SESAMの反射率が飽和時でも99.5%でありHRの反射率(>99.8%)に劣るためであると考えられる。繰り返し周波数は92.2 MHzであった。最大出力時のスペクトル、自己相関波形をそれぞれFig.3,4に示す。スペクトル幅は11.2 nm (FWHM)である。自己相関波形はオートコリレータ (Scanning Autocorrelator MODEL 750, FEMTOWAVE社製)により測定した。フリッジ分解相関波形は背景強度値(単一パルスに生じるSHG強度に相当)と最大強度値の比が1:8であり適切な測定結果であることが分かる。また、フリッジ

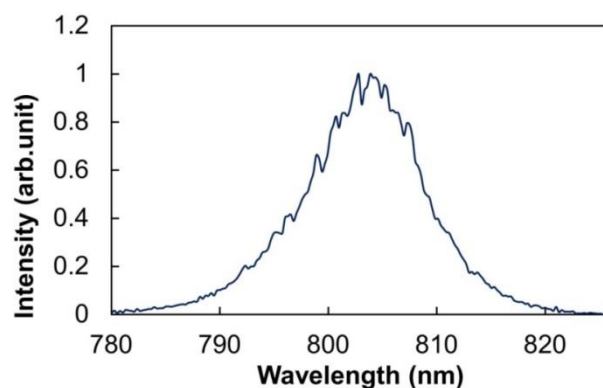


Fig. 3 Spectrum of output pulses at maximum output power.

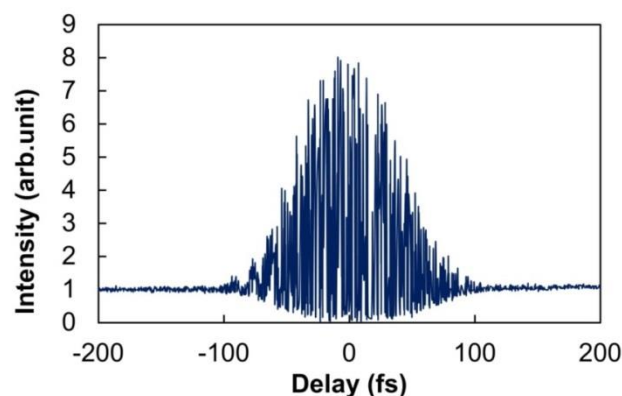


Fig.4 Interferometric autocorrelation of the pulses at maximum output power.

分解相関波形を構成する強度相関の項とフリッジの項の幅が等しく、その形状からFTLパルスであることが分かる。自己相関波形からその相関波形幅は96 fsと分かり、sech²パルス波形と仮定するとその時間幅は62 fs (FWHM)となる。逆にスペクトル幅11.2 nmからsech²型FTLパルスの時間幅を求めると60 fsとなり自己相関波形から求まる時間幅とよく一致している。この結果はチャープミラーにより分散補償が達成されていることを示している。

続いて我々はSESAMを用いないモード同期、すなわちカーレンズ効果のみによるフェムト秒パルス発生を試みた。共振器はCW動作時と同様であり、エンドミラーをHRとしている。出力強度は共振器長に対応する周期で変調するものの、スペク

トルは幅 ~ 0.5 nm(FWHM)と広帯域化しておらず、CW モードに対してパルスモードを優先的に発振させることができなかつたためであると考えられる。今後、共振器内パワーの増加あるいは分散補償の微調整により可飽和吸収体を用いたカーレンズモード同期によるフェムト秒パルス発生が達成できると考えられる。

3. まとめ

世界で初めて緑色半導体レーザ直接励起チタンサファイアレーザを実現した。波長 518 nm, 出力 1W の InGaN 半導体レーザを励起光源としたチタンサファイアレーザを実現し, 発振波長 802 nm, 平均出力パワー 32.9 mW の CW 動作を達成した。また, チャープミラーによる分散補償系と SESAM を用いることによりモード同期動作を達成し, 平均出力パワー 23.5 mW, 中心波長 804 nm, スペクトル幅 11.2 nm(FWHM), パルス幅 62 fs(FWHM)を得た。

References

- [1] P. F. Moulton, *J. Opt. Soc. Am. B* **3**, 125 (1986).
- [2] S. Nakamura, M. Senoh, S.-I. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, L74 (1996)
- [3] P. W. Roth, A. J. Maclean, D. Burns, and A. J. Kemp, *Opt. Lett.* **34**, 3334 (2009).
- [4] P. W. Roth, D. Burns, and A. J. Kemp, *Opt. Express* **20**, 20629 (2012).
- [5] C. G. Durfee, T. Storz, J. Garlick, S. Hill, J. A. Squier, M. Kirchner, G. Taft, K. Shea, H. Kapteyn, M. Murnane, and S. Backus, *Opt. Express* **20**(13), 13677 (2012).
- [6] 河内比花留: InGaN 青色半導体レーザ励起 Ti ドープサファイアレーザ(慶應義塾大学電子工学科卒業論文, 2012).