

InGaN 青色半導体レーザ励起モード同期 Ti ドープサファイアレーザ

InGaN-laser diode pumped mode-lock Ti:Sapphire laser

河内 比花留 (B4)、澤井 翔太 (M1)

Hikaru Kawauchi, Shota Sawai

Abstract

We report an InGaN-laser diode pumped Ti:Sapphire laser using a 2.5-mm-long crystal with a figure of merit (FOM) of ~ 100 . CW laser oscillation at wavelength of 800 nm with a maximum average output power of 28.6 mW is obtained. Pulses duration of 96 fs with an average power of 11 mW are demonstrated by mode locking the laser with a SESAM.

1. はじめに

チタンサファイア($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)結晶は広い波長帯域 650~1050 nm を持ち、モード同期発振により最短で 5 fs のパルス幅を実現することができる[1,2]。さらにこの結晶は非常に硬く、とても高い熱伝導性を示す。しかしながら、その短い蛍光寿命(室温で 3.2 μs [3])と比較的高い寄生損失によって発振閾値がかなり高くなってしまっている。それゆえに従来のチタンサファイアレーザでは励起光に高出力の半導体レーザ(LD)励起 Nd:YLF レーザの 2 倍高調波のような高出力緑色レーザが必要となるため、装置はコンパクトになりにくく、また安価にもならない。最近、光励起半導体レーザの 2 倍波励起が市販レーザでも用いられるようになってきているが、安価にはなっていない。赤色 LD で直接励起可能なクロムドープ LiSAF、LiCAF 結晶はこれらの欠点を補える広帯域発振レーザであるが[4]、高出力赤色 LD の汎用性の低さから未だ一般的ではなく、むしろ LD 励起 Yb 系による超高速レーザ開発[5]が注目されている。

近年、プロジェクター用に波長 ~ 440 nm 近傍での高出力 InGaN-LD が開発され、チタンサファイアの LD 直接励起が可能となってきた[6]。励起強度が 1 W 程度の InGaN-LD を励起に用いた場合、レーザ結晶の FOM 値が 100 程度ではレーザの取り出し効率を高くできないとの報告がある。しかし、FOM 値を高くするためにドープ濃度を低下させると結晶長が長くなり LD 励起には適さない。そこで我々は、最近利用可能になった InGaN-LD 励起強度 ~ 3 W を想定し厚さ 2.5 mm の結晶(FOM ~ 100)を使うことで、LD 直接励起チタンサファイアレーザを作製し、半導体多重井戸可飽和吸収体(SESAM)を用いたフェムト秒レーザ発振を行った。最近、1W 出力の緑色 InGaN-LD の開発も実現されており、LD 励起フェムト秒チタンサファイアレーザは今後の主流となるはずである。そこで、半導体可飽和吸収鏡を用いたモード同期発振について研究した。

2. CW 発振実験

Fig. 1 に CW 発振実験のセットアップを示す。チタンサファイア結晶はブリュースターカットで、FOM 値 100、長さ 2.5 mm、ドープ濃度は 0.25 wt.%である。ただし、今回用いている FOM という値は波長 800nm の光に対する波長 514nm の光の吸収係数の比である。銅製の結晶ホルダーを用い、空冷のペルチェユニットによって冷却している。励起には 444 nm 付近で発振する出力 3.5 W のシングルエミッタ InGaN-LD(Nichia Co.)を用いた。この LD のビーム品質は $M^2=1.5 \times 12.1$ であ

る。結晶での吸収をなるべく大きくするために比較的長い波長で発振するように動作温度調整した。CW 発振実験では、二つの凹面ダイクロイック鏡、高反射(HR)鏡、透過率 2%の出力鏡(OC)からなる 4 枚鏡共振器を構成した。2 つの凹面鏡の折り返し角は非点収差補償[7]を考慮して約 8 度とした。励起光は非球面レンズ(焦点距離 3.1 mm)によってコリメートし、遅軸方向のビームをシリンドリカルレンズ対(焦点距離・20 mm と 75 mm)を用いて拡げた。集光レンズには焦点距離 50 mm のものを用い、結晶内での励起光サイズ ($1/e^2$ 半径)は $35 \times 8 \mu\text{m}$ である。また、結晶内の共振器基本モードは $22 \times 12 \mu\text{m}$ である。その結果、57%の励起パワーが結晶内で吸収され 800 nm での CW 発振が確認された。最大吸収励起パワー 1.7 W において最大出力 28.6 mW が得られた(Fig. 2)。閾値は 811 mW でスロープ効率 は 3.3 % である。FOM 値 400、結晶長 5 mm、ドープ濃度 0.25 wt.% で実験を行った Roth らの先行研究[8]と比較して、我々の実験での閾値は 1.5 倍大きく、スロープ効率は 2.7 倍小さかった。しかし彼らが指摘するような、励起準位吸収による影響は見られなかった。

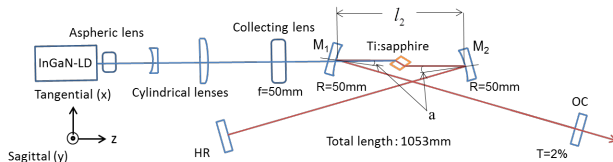


Fig. 1: Experimental setup of the InGaN LD pumped Ti:Sapphire laser. The cavity has a total length of 1 m.

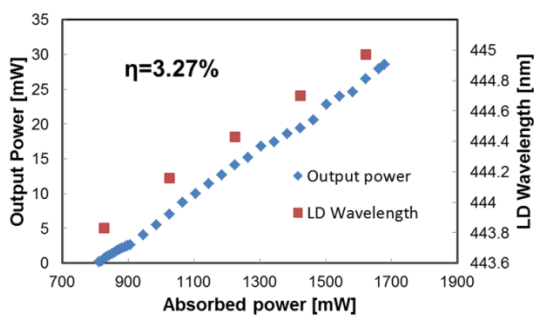


Fig. 2: Plots of CW laser output power as a function of absorbed pumping laser power.

3. パルス発振実験

次に、Fig. 3 のように M_2 と HR の間にチャープミラーを挿入することによってカーレンズ効果によるモード同期を試みた。共振器の全長は 1.4 m であり、チャープミラーの分散量は $-150 \pm 30 \text{ fs}^2$ である。この結果、最大出力 35.4 mW が得られた(Fig. 4(a))。このとき Fig. 4(b) のような共振器長に対応する周期 9 ns のパルス列とスペクトルの拡がり(Fig. 4(c))が観測された。スペクトルの半値全幅は 5 nm であり FTL と仮定したときの時間幅は 135 fs であるが、フォトダイオードで計測したパルスの形状(Fig. 4(b))は、応答速度以下にはなっていない不安定でもあった。このとき自己相関波形計測を試みたが SHG を出すことができなかった。

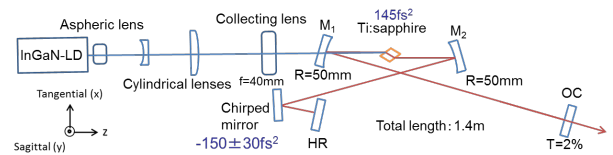


Fig. 3: Experimental setup of the InGaN LD pumped Ti:Sapphire laser without a SESAM. The cavity has a total length of 1.4 m.

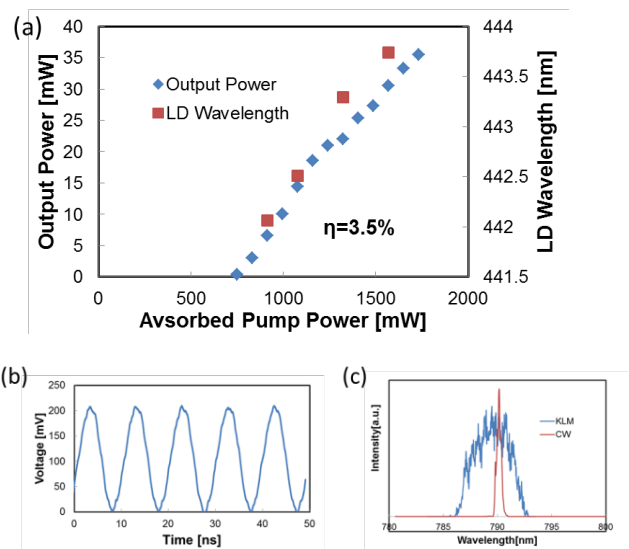


Fig. 4: (a) Plots of pulse-like laser output power as a function of absorbed pumping laser power. (b) Intensity modulation obtained without a SESAM indicating mode correlation in the band width of (c).

次に、凹面チャープミラーと SESAM を挿入し、SESAM をトリガーとして用いたカーレンズモード同期実験を行った。実験セットアップを Fig. 5 に示す。共振器の全長は 1.8 m である。SESAM の反射率は非飽和時で 99 %、飽和時で 99.5 %、飽和エネルギーは 30~50 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ であり、帯域は 775~830nm である。SESAM 表面でのパルスモード半径の計算結果は 15x13 μm であった。チャープミラーの分散量は $-150\pm 30 \text{ fs}^2$ と $-120\pm 40 \text{ fs}^2$ である。最大出力は 10.9 mW で、SESAM なしのモード同期実験と同様に共振器長に対応する周期 12ns のパルス列とスペクトル拡がり観測された(Fig. 6)。パルス列は安定的でフォトダイオードの応答速度以下のパルス幅が得られている。自己相関計測をした結果を Fig. 7 に示す。このプリンジ分解相関波形の形状からパルスは FTL であり、パルス幅(FWHM)は 96 fs であった。スペクトル幅 6.8 nm から計算される時間幅 99 fs とよく一致した。

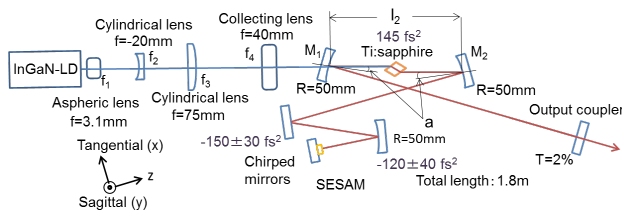


Fig. 5: Experimental setup of the InGaN LD pumped Ti:Sapphire laser with a SESAM. The cavity has a total length of 1.8 m.

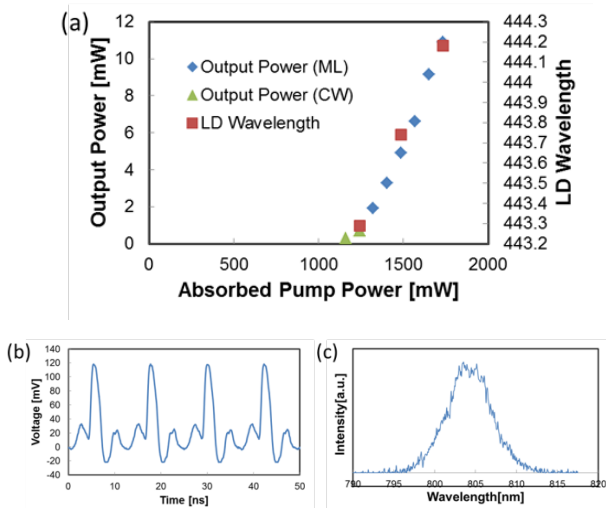


Fig. 6: (a) Plots of pulse laser output power as a function of absorbed pumping laser power. (b) Intensity modulation obtained with a SESAM indicating mode correlation in the bandwidth of (c).

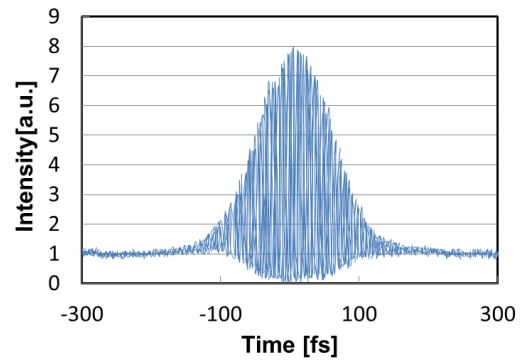


Fig. 7: Interferometric autocorrelation of the pulses at maximum pump power. The repetition rate was 83 MHz.

4. まとめ

厚さ 2.5 mm (FOM~100) のチタンサファイア結晶を出力強度 3.5 W の InGaN-LD で直接励起することで SESAM をトリガーとしたカーレンズモード同期を行った。最大出力 10.9 mW において、中心波長 805 nm、繰り返し周波数 83 MHz、時間幅 96 fs のパルスを生産することができた。

References

- [1] P. F. Moulton: J. Opt. Soc. Am. B **3** (1986) 125.
- [2] R. Ell, U. Morgner, F. X. Kärtner, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, M. J. Lederer, A. Boiko, and B. Luther-Davies: Opt. Lett. **26** (2001) 373.
- [3] P. Albers, E. Stark, and G. Huber: J. Opt. Soc. Am. B **3** (1986) 134.
- [4] P. M. W. French, R. Mellish, J. R. Taylor, P. J. Delfyett, and L. T. Florez: Opt. Lett. **18** (1993) 1934.
- [5] C. Honninger, F. Morier-Genoud, M. Moser, U. Keller, L. R. Brovelli, and C. Harder: Opt. Lett. **23** (1998) 126.

- [6] P. W. Roth, A. J. Maclean, D. Burns, and A. J. Kemp: *Opt. Lett.* **34** (2009) 3334.
- [7] A. Penzkofer, M. Wittmann, M. Lorenz, E. Siegert, S. Macnamara, *Optical and Quantum Electronics* **28** (1996) 423.
- [8] P. W. Roth, A. J. Maclean, D. Burns, and A. J. Kemp: *Opt. Lett.* **36** (2011) 304.

