

青色 LD 励起 640 nm SESAM モード同期 Pr:YLF レーザ

640 nm SESAM Mode-locked Pr:YLF Laser Pumped by Blue InGaN Laser Diodes

狩山 了介 (M1)

Ryosuke Kariyama

Abstract

We achieve the first diode-pumped Pr:YLF laser, passively mode-locked using SESAM. Stable mode-lock operation starts from an absorbed pump power of 2.8 W, and the average output power reaches 68 mW with a repetition rate of 108 MHz.

1. はじめに

可視領域におけるコヒーレントな光源はディスプレイ光源だけでなく医療、イメージング、加工など様々なアプリケーションがありその産業的意義は非常に大きい。三価のプラセオジウムイオンをドープしたフッ化物である Pr:YLF 結晶は可視域全域にわたって多数の光学遷移を持ち、可視域において最も有用な固体レーザー媒質のひとつである。そして近年の青色 InGaN 半導体レーザーの高出力化に伴い、LD 励起による小型で高効率な可視レーザー発振が達成されてきた[1]。一方で、可視域における Pr レーザのモード同期動作は報告例が少なく波長 639 nm では 1995 年に Ruan[2]らが Ar-ion レーザ励起で平均パワー 30 mW, パルス幅 8-ps をカーレンズモード同期により達成しており、また近年では 2014 年に Gaponenko[3]らによって SESAM を可飽和吸収体として用いた平均パワー 16 mW, パルス幅 18-ps の受動モード同期が光励起半導体レーザー(OPSL)励起によって達成されている。しかし Ar-ion レーザーは装置が大型かつ多大な冷却が必要であり、また 2w-OPSL は波長変換を用いているため効率が悪い。これらの励起源が半導体レーザー励起に置き換わることにより電気・光変換効率の大幅な向上とともに

に簡易で小型なレーザーシステムの構築が可能となる。本研究では SESAM を可飽和吸収体として用いた波長 640-nm における青色半導体レーザー励起 Pr:YLF レーザーの Q スイッチ動作及びモード同期動作について報告する。

2. 実験セットアップ

図 1 に実験セットアップを示す。励起光源は波長のわずかに異なる単一エミッタの青色半導体レーザー(日亜化学工業社製)を用いた。Pr:YLF 結晶は結晶の c 軸に平行な方向では 444-nm で吸収ピークを持ち、c 軸に直行した偏光方向では 442-nm で吸収のピークを持つ。そのため二台の励起 LD を偏光ビームスプリッターによって重畳し、励起パワーのスケールリングを行う。各 LD の出力は $f=4.6\text{mm}$ の非球面レンズでコリメートされ、 $f=-20,100\text{mm}$ のシリンドリカルレンズ対により横方向に 5 倍に拡大する。その後波長 442-nm のビームは半波長板により偏光を 90 度回転させ偏光ビームスプリッターによって重畳した後 $f=75\text{mm}$ の集光レンズで結晶に集光する。Pr:YLF 結晶(AC-materials 社製)は結晶長 5-mm, Pr³⁺ドープ率 0.5 at.%のものを用い、インジウムシートを介して銅ホルダに取り付け、銅ホルダを水冷により 16°Cに固定した。Q スイッチ動作実験における共振器 2 枚のミラーと SESAM(Refle Kron 社製)により(a)、モード同期動作実験は 3 枚のミラーと SESAM で構成され(b)、レーザーの出力はともに励起光入射側のダイクロイックミラー($T=10\%@640\text{ nm}$)から取り出される。これらの 2 種類の共振器は SESAM 上での集光強度が異なり

モード同期実験では Q スイッチ動作実験に比べ約 4 倍の集光強度になるように設計した。共振器長はそれぞれ 240 mm, 1.4 m である。

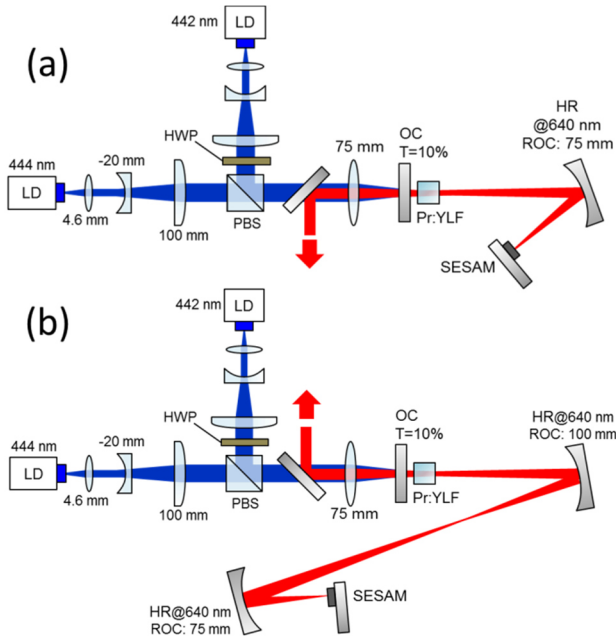


Fig. 1 Experimental setup of SESAM
(a)Q-switched, (b)mode-locked laser.

SESAM の非飽和反射率の特性を Fig. 2 に示す。波長 640-nm において非飽和時の反射率は 97%である。

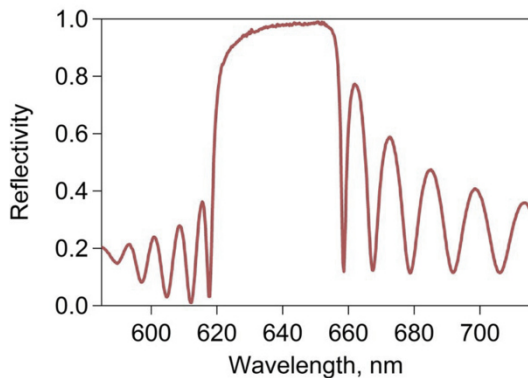


Fig. 2 The non-saturable reflectivity of SESAM.

3. 実験結果

3-A. Q スイッチ動作実験

Q スイッチ動作実験で取得したレーザー出力の特性を Fig. 3.4 に示す。最大励起吸収 3.8 W 時の平均パワーは 104 mW, 最短パルス幅は 550 ns, パルス繰り返し周波数は 96 kHz となりスローブ効率は 9.5%であった。Fig. 5 に Q スイッチパルス列を示す。

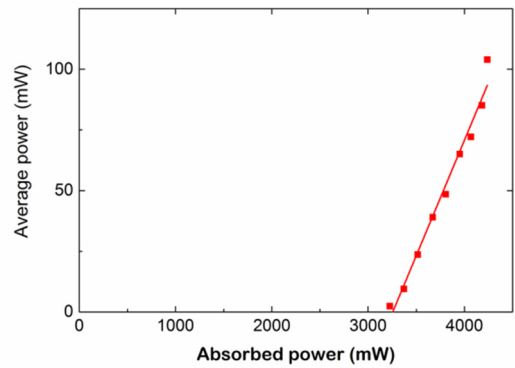


Fig. 3 Q-switched average output power.

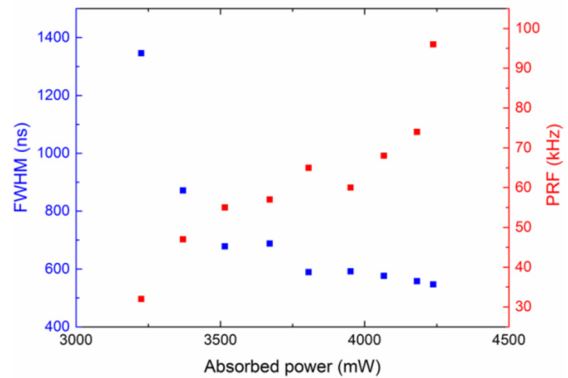


Fig. 4 Q-switched pulse duration(FWHM) and pulse repetition rate.

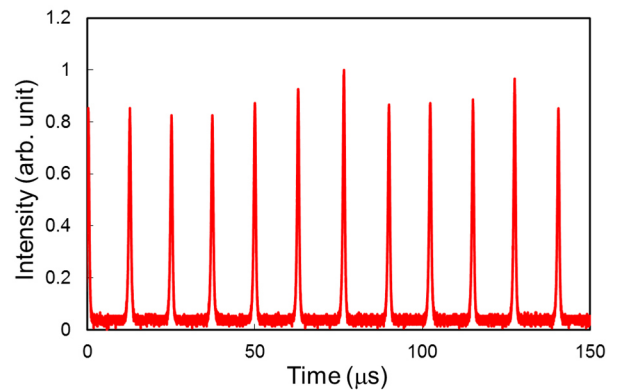


Fig. 5 The pulse train of Q-switched laser.

3-B. モード同期動作実験

モード同期動作の結果を Fig. 6-8 に示す。Fig. 6 のように安定なモード同期動作は励起吸収パワー 2.8W から始まり発振閾値 2.4W から 2.8W までは不安定なモード同期を含む出力であった。ML の最大平均出力は 68 mW であり、繰り返し周波数は 105MHz、パルス幅は 400 ps 以下と推定された。ML パルス幅は 1GHz のデジタルオシロスコープ (LeCroy xi62), 40GHz 高速フォトダイオード(New Focus 4005)によって取得した。

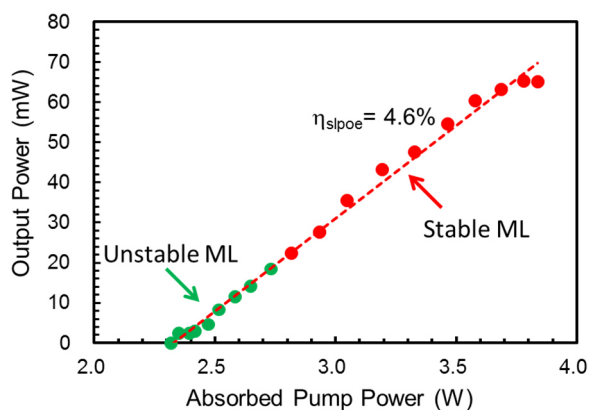


Fig. 6 Output performance of a mode-locked laser. Circle plots correspond to stable mode-locking operation.

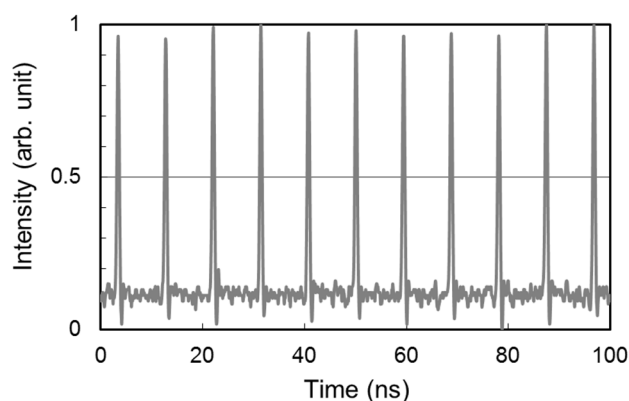


Fig. 7 The pulse train of a mode-locked laser.

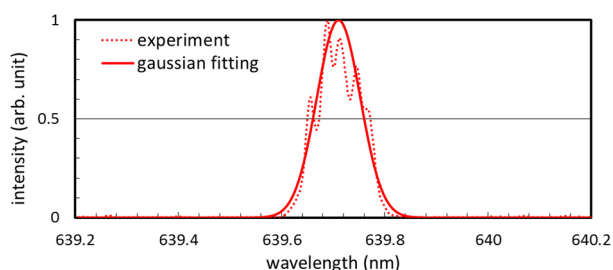


Fig. 8 The spectrum of the mode-locked laser.

ML 時のスペクトルはスペクトルアナライザ (Advantest 2887: 分解能 10-pm)によって取得しスペクトル半値幅(FWHM)は 0.10-nm と計測された。これがフーリエ限界パルス(FTL)であると仮定した場合、ML パルス幅は 4.3-ps となる。今後自己相関計測によるパルス幅計測および RF 周波数の計測を行うことによりモード同期の信頼性を示すことが必要となる。本実験では [4]に基づく共振器設計を行い SESAM 及び Pr:YLF 結晶内での非点収差をなくし SESAM への集光強度を高めるとともに、共振器長を延長させることにより 1 パルスあたりのエネルギーを増加させ SESAM を完全に飽和させ Q スイッチ動作から ML 動作を達成している。また安定な ML 動作は 4 時間維持可能であった。しかし長時間 ML 動作を維持しようとするとアライメントのズレ、振動などの影響により Q スイッチモード同期が発生し SESAM が損傷してしまう現象が見られた。そのため共振器をハウジングする、LD 冷却のファンの振動を取り除くといった対策が今後必要となってくると考えられる。

References

- [1] K. Nakagawa, a. Iwasaki, Y. Oishi, R. Horisaki, A. Tsukamoto, a. Nakamura, K. Hirose, H. Liao, T. Ushida, K. Goda, F. Kannari, and I. Sakuma, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)," *Nat. Photonics* **8**, 6-11 (2014).

- [1] T. Gün, P. Metz, and G. Huber, " Power scaling of laser diode pumped Pr³⁺:LiYF₄ cw lasers: efficient laser operation at 522.6 nm, 545.9 nm, 607.2 nm, and 639.5 nm," *Opt. Lett.* **36**, 1002-1004 (2011).
- [2] S. Ruan, B. H. T. Chai, J. M. Sutherland, P. M. W. French and J. R. Taylor, "Kerr-lens mode-locked visible transitions of a Pr:YLF laser," *Opt. Lett.* **20**, 1041-1043 (1995).
- [3] M. Gaponenko, P. W. Metz, A. Härkönen, A. Heuer, T. Leinonen, M. Guina, T. Südmeyer, G. Huber and C. Kränkel, "SESAM mode-locked red praseodymium laser," *Opt. Lett.* **39**, 6939-6941 (2014).
- [4] W. Qiao, Z. Xiaojun, W. Yonggang, S. Liqun, and N. Hanben, "A simple method for astigmatic compensation of folded resonator without Brewster window," *Opt. Express* **22**, 2309-2316 (2014)