

# 青色半導体レーザ励起 Pr:YLF 結晶を用いた赤色ピコ秒レーザパルスの再生増幅

Regenerative amplification of red picosecond laser pulses with a Pr:YLF crystal pumped by a blue laser diode

杉山 直仁 (M2), 藤田 将吾 (M1), 原 優作 (B3)

Naoto Sugiyama, Shogo Fujita, Yusaku Hara

## Abstract

Regenerative amplification in the visible range continuously pumped by a blue diode laser is demonstrated for the first time to the best of our knowledge. The gain medium of the amplifier is a Pr:YLF crystal and the absorbed pump power is 3.1 W. The seed picosecond pulse source is a mode-locked Pr:YLF oscillator and a gain-switched LD. The amplified pulse energy is over 10  $\mu\text{J}$  at the wavelength of 640 nm. The spatial beam quality is almost TEM<sub>00</sub>. The second harmonic generation is also demonstrated and the 320-nm pulse energy is 1.7  $\mu\text{J}$ .

## 1. はじめに

窒化インジウムガリウム (InGaN) ベースの青色レーザダイオード (LD) の近年の著しい高出力化は、可視域で発光する利得媒質の実用的な励起を可能とした。最も魅力的な媒質の一つはプラセオジム添加 LiYF<sub>4</sub> (Pr:YLF) 結晶であり、波長 640 nm における連続波出力は既に 6.7 W に到達している[1]。半導体可飽和吸収ミラー (SESAM) を用いたモード同期 Pr:YLF レーザからは 18 ps のパルスが得られているが[2]、出力パルスエネルギーは典型的にはナノジュールレベルであり、実用的ではない。ピコ秒パルス動作は材料加工において熱影響を抑制することができるため、生産性向上のために高出力化が求められる。しかしながら、固体利得媒質を用いた波長 650 nm 以下の光増幅は、パラメトリック増幅を除けばほとんど報告されていない[3]。報告されている増幅率は最大で 10 倍であり、いずれもシングルパスである[4,5]。再生増幅技術は低い入射パルスエネルギーに対しても高いエネルギー抽出効

率を提供するため、効果的なアプローチである。

本研究では、青色半導体レーザ励起 Pr:YLF 結晶を用いて、波長 640nm でのピコ秒パルス再生増幅を初めて実証する。シード光源はモード同期 Pr:YLF 発振器またはゲインスイッチ LD を使用した。単一パスの波長変換による紫外ピコ秒レーザパルス発生についても述べる。

## 2. 実験条件

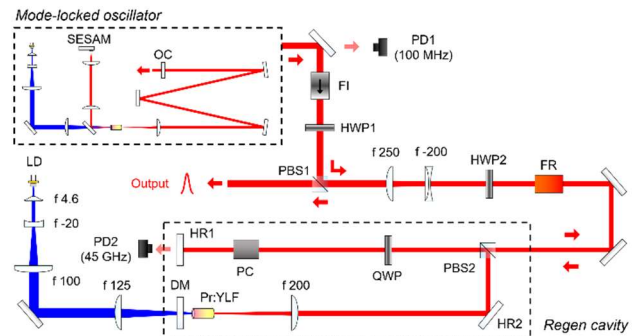


Fig. 1 Schematic view of our Pr:YLF regenerative amplifier.

Fig. 1 に我々の実験構成を示す。シード光源は、最初は青色 LD 励起モード同期 Pr:YLF レーザであり、次の重要な変更を除き文献 6 とほぼ等しい。第一に、共振器に凹面鏡を使用しなかったため、出力に非点収差がほとんど生じなかった。第二に、共振器長は 4.9 m であり、30 MHz の繰り返し周波数に一致した。第三に、パルス幅は以前の研究で 45 ps であるが、今回は計測していない。レンズによる追加の分散により、パルス幅が以前と異なる可能性がある。

出力パルスの一部を 100-MHz フォトダイオード 1 (PD1) によって観測し、ポッケルスセルへのトリ

ガー信号とした。残りの光エネルギーはファラデーアイソレータ (FI)、半波長板 (HWP)、偏光ビームスプリッタ 1 (PBS1)、ファラデーローテータ (FR) を通過し、再生増幅共振器に入射した。すべてのパルスは  $\lambda/4$  板 (QWP) と  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$  (BBO) Pockels 結晶を通過し、高反射ミラー1 (HR1) で折り返された。電圧が印加されない時、ポッケルスセルは全波長板として動作するので、レーザは PBS2 で反射した。続いて焦点距離 200 mm の球面レンズにより集光され、利得媒質中では半径  $\sim 60 \mu\text{m}$  である。300 pJ の初期入射エネルギーの  $>99\%$  がダイクロイックミラー (DM) により反射され、元の光路を折り返す。利得媒質は長さ 5 mm、添加濃度 0.5 at.% のロッド型 Pr:YLF であり、 $a$  軸は垂直方向に配置した。結晶は銅製ホルダーで覆われ、ホルダーは水冷により  $15^\circ\text{C}$  に保った。励起光源は連続波 (CW) 青色 LD であり、ペルチェ素子により  $15^\circ\text{C}$  に制御した。ピーク波長は 444 nm であり、99% が DM を透過した。 $M^2$  因子は垂直、水平方向でそれぞれ 2.6、19.9 と計測され、Cylindrical expander により非点収差を補正した。結晶中での励起とシードのモード整合効率は 70% と計算された。最大吸収パワーは 3.1 W である。共振器長は 1.44 m であり、往復時間は 9.6 ns であった。共振器内にパルスが存在するときに BBO に  $\lambda/4$  電圧を印可すると ( $t=0$  ns)、パルスの閉じ込めと再生増幅が実現される。 $t=T_V$  で高電圧を OFF にすると、パルスは共振器から取り出され、FR と PBS を通過して出力される。ここで、 $T_V$  は高電圧印可時間である。

### 3. 寄生発振および再生増幅実験

シード光が存在しない時、次のステップにより強力なパルス列が発生する。第一のステップは Q switching による寄生発振である。ポッケルス高電圧が OFF のとき反転分布が蓄積され、高電圧が ON になると、Q 値の上昇とともに急激的なレーザ発振が開始される。第二のステップは cavity dumping で

ある。高電圧が OFF になると、ほとんどすべての光エネルギーが共振器一往復以内に取り出される。その後反転分布は再び回復する。ポッケルスセルの動作周波数は 10 kHz に固定した。最適な高電圧印加時間  $T_V = 700$  ns のとき、共振器内光パワーの成長を HR1 の背後から観測した (Fig. 2 (a))。観測には 45-GHz フォトダイオードと 2.5-GHz 40GS/s オシロスコープを使用した。出力パルスエネルギーは  $15 \mu\text{J}$  であった。また、出力波形を挿入図に示す。半値全幅 (FWHM) は 10 ns であり、共振器往復時間に概ね一致した。出力の空間ビーム品質は  $M^2 \sim 1.1$  であった。

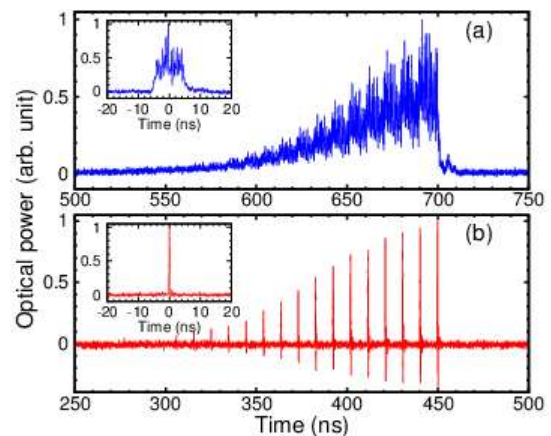


Fig. 2 The build-up of the intracavity optical power without seed light (a) and with 300-pJ seed pulse (b).

次に、300 pJ のシード光を共振器に入射した。最適な高電圧印加時間  $T_V = 450$  ns での共振器内光パワーを Fig. 2 (b) に示す。寄生発振より速い信号の立ち上がりは、再生増幅が明らかに生じていることを意味する。出力パルスエネルギーは  $13 \mu\text{J}$  であった。抽出効率は  $\sim 25\%$  と推定される。出力の空間ビーム品質は  $M^2 < 1.1$  であり、これはシード光のそれとほとんど同一である。興味深いことに、シード光の空間ビーム品質を意図的に低下させた場合 ( $M^2 \sim 3$ ) でも、増幅後にはほとんど  $\text{TEM}_{00}$  のビームが得られた。これは、最低次モードのみが我々の共振器を往復できることを示唆している。

続いて、増幅パルスを  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO) 結晶に半径

~50  $\mu\text{m}$  に集光した。適切な位相整合角度の調整により、波長 320 nm の紫外パルスが発生させた。最大パルスエネルギーは 1.7  $\mu\text{J}$  であり、変換効率は 13% に相当した。

最後に、シード光源をゲインスイッチ LD に置き換えた。高電圧タイミングに合うように LD にパルス電流が流れ、10 kHz の 70 ps パルス光が射出された。しかし、光源の 15 pJ の出力の内、結晶に入射できたパルスエネルギーはおおよそ 1 pJ であり、損失の半分程度は光アイソレータ等によるものである。その他の原因は未だ解明できていない。素子のアライメントが最適でないか、またはビーム径が設計通りでない（素子のアパーチャーを超えている）といった原因が考えられる。また、1 pJ の入射エネルギーの内、スペクトルの一部が Pr:YLF のそれと一致しないため、実質的な入射エネルギーはさらに低いと考えられる。それにも関わらず、一応、シード光の再生増幅が確認された。 $T_V = 650$  ns において、出力パルスエネルギーは 13  $\mu\text{J}$  であった。しかしながら、LBO に照射して得られた紫外パルスのエネルギーは 0.06  $\mu\text{J}$  であり、変換効率は <1% であった。したがって、増幅されたエネルギーの大部分は寄生発振に由来すると考えられる。波長 650 nm 以下における有効な前置増幅器が存在しないことは、本システムを完全なものにする上での課題である。それでもなお、我々の先駆的な達成は、橙色、緑色のようなより短いシード波長での再生増幅器を開発する助けとなるであろう。

#### 4. まとめと展望

結論として、2 種類のシード光源を用いて、波長 640 nm の Pr:YLF 再生増幅器が開発された。モード同期発振器をシード光源にした場合、10  $\mu\text{J}$  以上のパルスエネルギーが得られた。抽出効率は 25% であった。出力空間ビーム品質は TEM<sub>00</sub> であり、シード光のそれに依存しなかった。第二高調波発生により、1.7  $\mu\text{J}$  の紫外パルスを得た。シード光源をゲインス

スイッチ LD にした場合も、再生増幅を確認できたが、寄生発振成分が混在してしまった。LD パルスをシード光に用いるには克服すべき課題は多いが、本研究成果は可視光レーザの発展に役立つだろう。

#### References

- [1] H. Tanaka, S. Fujita, and F. Kannari, "High-power visibly emitting Pr<sup>3+</sup>:YLF laser end pumped by single-emitter or fiber-coupled GaN blue laser diodes," *Appl. Opt.*, **57**, 5923 (2018).
- [2] M. Guina, T. Südmeyer, G. Huber, and C. Kränkel, "SESAM mode-locked red praseodymium laser," *Opt. Lett.*, **39**, 6939 (2014).
- [3] M. K. Reed, M. K. Steiner-Shepard, and D. K. Negus, "Widely tunable femtosecond optical parametric amplifier at 250 kHz with a Ti:sapphire regenerative amplifier," *Opt. Lett.*, **19**, 1855 (1994).
- [4] M. Olivier, J.-L. Doualan, P. Camy, H. Lhermite, P. Pirasteh, J. N. Coulon, A. Braud, J.-L. Adam, and V. Nazabal, "Optical amplification of Pr<sup>3+</sup>-doped ZBLA channel waveguides for visible Laser emission," *Opt. Express*, **20**, 25064 (2012).
- [5] M. Mollae, X. Zhu, J. Zong, K. Wiersma, A. Chavez-Pirson, M. Akbulut, Y. Kaneda, L. LaComb, A. Schülzgen, and N. Peyghambarian, "Single-frequency blue laser fiber amplifier," *Opt. Lett.*, **43**, 423 (2018).
- [6] K. Iijima, R. Kariyama, H. Tanaka, and F. Kannari, "Pr<sup>3+</sup>:YLF mode-locked laser at 640 nm directly pumped by InGaN-diode lasers," *Appl. Opt.*, **55**, 7782 (2016).