

# プラセオジウム添加 YLF 結晶を用いた赤色半導体レーザーパルスの再生増幅と逓倍波発生 Regenerative amplification of red semiconductor laser pulse with Pr:YLF crystal and generation of doubled wave

原 優作 (B4)

Yusaku Hara

## Abstract

We report Pr:YLF regenerative amplifier at 640 nm with a gain-switched AlGaInP diode laser as a picosecond seed pulse. At an absorbed pump power of 5.9 W, we obtained an amplified pulse energy of 33  $\mu\text{J}$  at 10 kHz, a 320-nm SHG pulse of 17.6  $\mu\text{J}$ , and a 213-nm THG pulse of 0.83  $\mu\text{J}$ . In addition, we achieved a walk-off free 320 nm pulse of 1.8  $\mu\text{J}$  by second harmonic generation using a PP-LBGO crystal.

## 1. はじめに

三価のプラセオジウム( $\text{Pr}^{3+}$ )イオンを添加した利得媒質は可視域に多くの発振波長をもち、近年の励起光源である青色 LD の出力向上に伴い多くのグループで研究が盛んに行われている。  $\text{Pr}^{3+}$  ドープ  $\text{LiYF}_4$  結晶(Pr:YLF)を用いた波長 640 nm における連続波発振で出力パワー 6.7 W が報告されている[1]。 更には、金属加工等に応用可能な紫外光発生の観点から見ても、Nd 結晶をはじめとする 1  $\mu\text{m}$  帯のレーザーでは最低二回の波長変換を必要とするのに対し、可視域に発光遷移を持つ利得媒質を用いた場合、一回の波長変換で紫外光を得ることができ、変換効率の点で優位性がある。

波長変換を用いた高効率な紫外光発生に向け、基本波は高いピークパワーを持つパルスが有効であるが、短パルスを得るために有効なアプローチであるモード同期を用いた場合、得られるパルスエネルギーはナノジュールレベルであり、実用的とは言えない。そこで、高出力化のためには増幅器を用いることが効果的なアプローチである。我々は既に SESAM モードロック Pr:YLF レーザー

をシード光に使い、Pr:YLF 結晶を用いた波長 640 nm 再生増幅器を実現しており、13  $\mu\text{J}$  の  $\sim 50$  ps パルスを得ることができ、更には  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO)を用いた二倍波発生により 5.9  $\mu\text{J}$  の 320 nm 紫外パルスの発生を行った[2]。しかしモードロックパルスをシード光に用いた場合、システム全体が煩雑、高価なものになり、モードロック動作の点から安定性にも問題があるなど様々な課題が存在していた。

そこで我々は今回、シード光として gain-switched LD を用いることで、システム全体がコンパクト、安価、安定である再生増幅器を開発した。さらに、LBO 結晶及び分極反転  $\text{LaBGeO}_5$  (PP-LBGO)結晶を用いた波長変換による紫外光発生についても報告を行う。

## 2. 再生増幅実験装置

Fig. 1 に我々が本実験で用いる実験セットアップを示す。

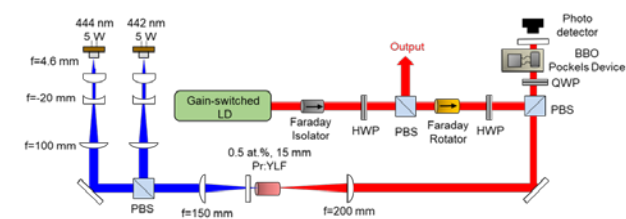


Fig. 1 Experimental setup of Pr:YLF regenerative amplifier

まず励起系については、最大出力 5 W の単一エミッタ型青色 LD を 2 台使用し、これを偏光ビームスプリッタ(PBS)で偏光重畳している。各偏光の波長は、Pr:YLF 結晶の c 軸及び a 軸の吸収ピーク波長(444 nm 及び 442 nm)に等しくなるよう、ペルチェ素子で 15  $^{\circ}\text{C}$  に温度調整し、最大 5.9 W が結晶に吸

収された。励起光のビーム品質は  $M^2 \approx 2.2 \times 15.7$  と計測された。

次に再生増幅器について、利得媒質として用いた結晶は結晶長 15 mm, ドープ濃度 0.5 at.% の Pr:YLF 結晶であり, c 軸は水平方向に配置した。シード光源として用いたものは, gain-switched LD であり, パルスエネルギーは 15 pJ, パルス幅はサンプリングオシロスコープを用いたメーカーの測定値で 69 ps であり, ビーム品質は  $M^2 \approx 1.1 \times 1.1$  と計測された。シード光はファラデーアイソレータ, HWP, PBS, ファラデーローテーターを通過し, 再生増幅器に入射する。その後, QWP と  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(BBO)ポッケルスデバイスを通し, HR( $R > 99.5\%$ )で折り返す。電圧がかかっていない間はポッケルスセルは全波長板として機能するため, シード光は PBS を透過し, 結晶に入射する。シード光出射から結晶入射までの間の数多の素子による損失のため, 結晶に実際に入射するシードパルスエネルギーは  $\sim 8$  pJ である。結晶中のシード光半径はおよそ 70  $\mu\text{m}$  であり, 励起光とのモードマッチング効率は 59%, 共振器長は 1.5 m(往復時間 10 ns)である。

### 3. 再生増幅実験及び Cavity dumping 発振

最大吸収励起パワー 5.9 W における共振器内光パワーの立ち上がりを Fig. 2 に示す

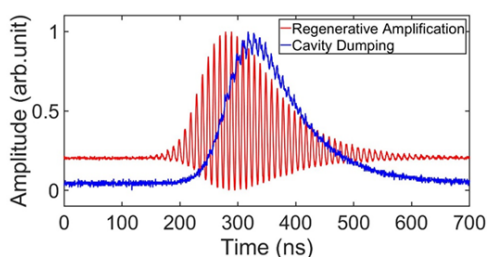


Fig.2 Build-up of the intracavity optical power of regenerative amplification(red) and cavity dumping(blue)

測定には 300 MHz のフォトダイオードと, 600MHz, 10 GS/s のオシロスコープを使用した。シード光を入射しない場合, 本再生増幅器は発振器

として機能し, Cavity dumping によるパルスが得られる。Fig. 2 より, シード光のほうが Cavity dumping より早く立ち上がっていることから, シード光の再生増幅が達成されていることが確認される。これを共振器内光パワーが最大となるタイミングでポッケルスセルの高電圧をオフにすることで, 繰り返し周波数 10 kHz において, 33  $\mu\text{J}$  の増幅パルスを得ることができた。高電圧印加時間は再生増幅の場合で 280 ns, Cavity dumping で 380 ns である。抽出効率は 50% であり,  $M^2 \approx 1.2 \times 1.2$  であった。また, 高い繰り返し周波数においてパルス列の周期倍分岐が確認された。理論上ではシードパルスエネルギーを高くすることでこの周期倍分岐は避けることができる[3]が, 本実験では安定なパルス列を得るためには繰り返し周波数を 10 kHz 以下にする必要がある。また, シードパルスエネルギーを 0.7 pJ まで下げてもシード光の再生増幅が達成されることが確認された。Fig. 3 に励起パワー毎の増幅パルスエネルギーを示す。

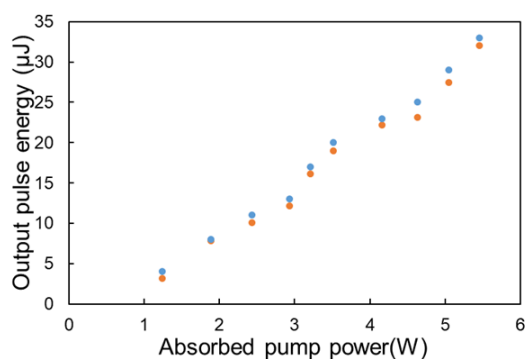


Fig. 3 Output characteristics of regenerative amplification(red) and cavity dumping(blue)

増幅後のパルス幅について, Cavity dumping により得られたパルスは, 共振器 1 往復の時間に相当する 10 ns であったが, シード光の再生増幅により得られたパルスは, 強度自己相関係を用いて測定した結果  $\sim 400$  ps になっており, 元のパルス幅(69 ps)より大幅に長くなってしまっていた。これにつ

いては, Pr:YLF の利得スペクトルが非常に狭いために, シードパルスの波長 640 nm 近傍の縦モードしか増幅できないことから, 増幅後のパルス幅は, 増幅される縦モードのパルス幅で決まるはずである. よって, 640 nm 近傍の増幅される縦モードのパルス幅が長いと考えられる.

#### 4. 紫外光発生

続いて, 波長変換による紫外光発生を試みた. まず, 得られた再生増幅パルスを Type-I  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO) 結晶に集光径 10  $\mu\text{m}$  で入射し, 波長 320 nm においてパルスエネルギー 17.6  $\mu\text{J}$  の紫外パルスを発生させることができた. 変換効率は 51% に相当する. このとき, LBO 結晶内での強い walk-off 効果の影響で, ビームクオリティは非常に悪くなっており,  $M^2 \approx 1.4 \times 3.3$  であった. 続いて, Type-I  $\text{BaB}_2\text{O}_4$  (BBO) 結晶を用いて基本波(640 nm)と 2 倍波(320 nm)の和周波混合を行うことで, 波長 213 nm の深紫外パルスを得た. 得られたパルスエネルギーは 0.83  $\mu\text{J}$  であり, 基本波からの変換効率として 3.5% に相当する. このとき, LBO 結晶内での walk-off 効果を抑制するために LBO 結晶への集光は緩くし, 集光径は 15  $\mu\text{m}$  とした. 次に, 分極反転素子である PP-LBGO 結晶を用いた紫外光発生についても実証した. 擬似位相整合が可能であることから, LBO 結晶などの角度位相整合の結晶と比べて, 長い相互作用長及び優れたビーム品質の walk-off free な紫外パルスを得ることが可能となる. 本実験で用いた結晶は, 結晶長 15 mm, 分極反転周期は 3.98  $\mu\text{m}$ ~4.12  $\mu\text{m}$  のマルチグレーティング構造となっている. 今回用いた導波路は反転周期が 4.06  $\mu\text{m}$  のところであり, 集光径は 16  $\mu\text{m}$  とした. また, 位相整合温度は 84°C であり, 温度許容幅(FWHM)は 7 K である. このとき問題となるのが, 結晶における基本波の非線形吸収であり, 30  $\mu\text{J}$  の基本波を入射したとき, このうち 55% が結晶内で吸収されている. これは結晶表面のコーティングの後処理が不完全

であることが原因だと考えられ, 適切なアニーリング処理を施すことで改善可能と考えられる. 得られた 320 nm 光は 1.8  $\mu\text{J}$  であり, 変換効率としては 6.5% と LBO を使った場合と比べ低い値になってしまったが,  $M^2 \approx 1.4 \times 1.4$  と, Fig. 4 の通り walk-off 効果のない円形ビームを得ることができた.

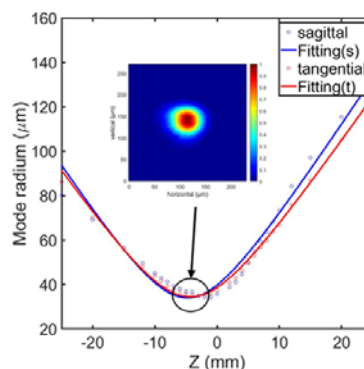


Fig. 4 Beam profile of the SH pulse from PP-LBGO crystal

#### 5. まとめ

gain-switched LD をシードとした, 波長 640 nm における Pr:YLF 再生増幅器を構築し, 8 pJ のシードパルスを 33  $\mu\text{J}$  まで増幅させることに成功した. シードパルスエネルギーは 0.7 pJ 以上あれば増幅可能であり, 繰り返し周波数は 10 kHz が上限であった. gain-switched LD をシードとした増幅器は, システム全体を安価かつコンパクトに抑えられ, 他波長への応用も期待できる.

また, LBO 結晶を用いた第二高調波発生により 17.6  $\mu\text{J}$  の 320 nm 光を発生させ, BBO 結晶を用いた基本波と 2 の和周波発生により, 0.83  $\mu\text{J}$  の 213 nm 光を得ることに成功した. また, PP-LBGO 結晶を用いた 2 倍波発生により, 1.8  $\mu\text{J}$  の walk-off free な紫外パルスを得ることができた. 結晶の適切なアニーリング処理及び結晶長を長くすることにより, 変換効率の向上が期待できる.

#### References

- [1] H. Tanaka *et al.*, Appl. Opt., **57**, 5923(2018)..
- [2] N. Sugiyama *et al.*, Opt. Express, **44**, 3370 (2018)
- [3] M. Grishin *et al.*, Opt. Express, **17**, 15700 (2009).