

# Q スイッチ Pr:YLF レーザの共振器内 2 次高調波発生によるパルス紫外光発生

## Pulsed UV Generation by Intracavity SHG of Q-Switching Pr:YLF Laser

児嶋洋典(B4), 渡辺洋次郎(M1)

Y. Kojima and Y. Watanabe

### Abstract

Pulsed ultraviolet light at 320 nm is obtained by intracavity frequency doubling of red-emitting Pr:YLF laser with Q-switching. Using LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> as nonlinear medium, 27 mW of ultraviolet radiation with 69% conversion efficiency is achieved. The pulse width is 36 ns and the pulse energy is 2.5 μJ.

### 1 はじめに

現在、固体レーザによる紫外光発生には、近赤外から 2 段階の波長変換を経る必要がある。主に使用されているものとして Nd:YAG レーザでは、3 倍波で 355 nm, 4 倍波で 261 nm の紫外光が得られる。これらは外部で波長変換する必要があるため、装置が大掛かりになることや、基本波からの変換効率が低下してしまうことがデメリットとなる。3 倍波の変換効率は、CW では 1%程度[1-3], パルスでは 12~27%[4-6]が報告されている。

Pr<sup>3+</sup> をドープしたフッ化物材料は可視域に多数のレーザ遷移を持つ。これを利用すれば、共振器内 SHG で紫外光を得ることができる。そのため安価でコンパクトな使い勝手の良い紫外光源として医療やバイオの分野で利用されることが期待できる。半導体レーザ励起 Pr:LiYF<sub>4</sub>(YLF)レーザでは、波長 320 nm で、変換効率 36%, 50 mW の CW 出力が報告されている[7]。CW で高出力な紫外光を得るには、基本波に対し極めて反射率の高いミラーが必要であり、これは非常に高価である。そこで我々は Q スイッチを用いたピークパワーの増大により、共振器内 SHG で簡単に高効率な紫外光出力を得ることを目的とした。ここではその実験の詳細と、得られた出力特性を記述する。

### 2 実験セットアップ

Fig. 1 に実験セットアップを示す。共振器はビームウェストが 2 箇所ある V 字型共振器を採用し、曲率半径 R=50 mm のミラー M1 と、R=75 mm のミラー M2, そして平面ミラー M3 の 3 枚で構成した。ミラーは全て基本波(639 nm)に対して全反射であり、SHG 出力(320 nm)は M2 から取り出した。Q スイッチには音響光学変調器(AOM)を用いた。また、結晶長 4 mm, ドープ率 0.5at-%の Pr:YLF 結晶と、結晶長 8 mm の LBO を、それぞれビームウェストとなる箇所に配置した。

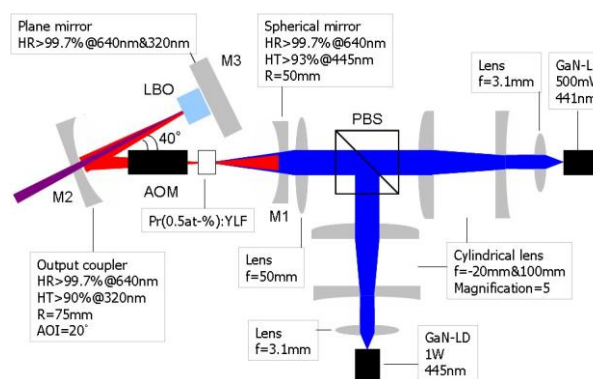


Fig. 1 Schematic setup for the Q-switching SHG experiments using Pr:YLF pumped by two GaN-LDs.

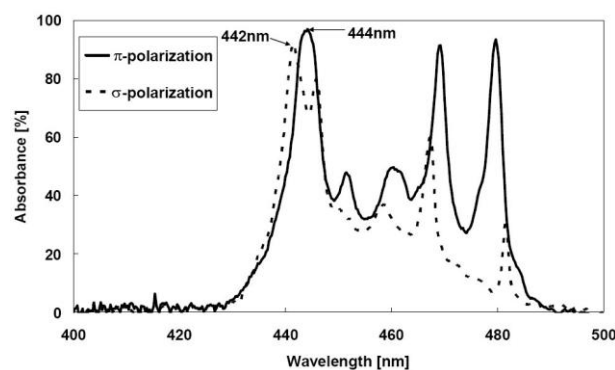


Fig. 2 Absorption spectra of 10 mm-long Pr<sup>3+</sup> 0.5 at-% doped YLF crystal around 450 nm at room temperature.

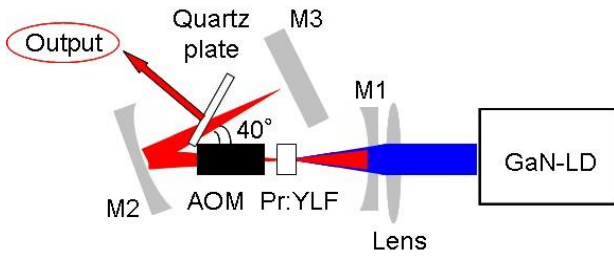


Fig. 3 Schematic setup for the Q-switching Pr:YLF laser at the 639-nm fundamental wavelength. Output of the fundamental wave is extracted by a quartz plate.

Fig. 2 に示すように、Pr:YLF は  $c$  軸に平行な偏光では 444 nm に吸収スペクトルのピークがあり、 $c$  軸に垂直な偏光では 442 nm に吸収スペクトルのピークを持っている。そこで、それぞれのピークに偏光を合わせるように最大出力 500 mW の 441 nm GaN-LD と最大出力 1W の 444 nm GaN-LD を励起光源として配置した。それぞれの励起光は 2 枚のシリンドリカルレンズによってビームシェイプを整えた後、偏光ビームスプリッタで併せ、焦点距離 50 mm のレンズで Pr:YLF に集光した。

また、基本波の出力は、Fig. 3 のように共振器内の LBO を外し、石英板をブリュースター角付近で挿入して取り出した。石英板の角度は出力が最大になるように調節し、基本波の最適な出力を見積もった。

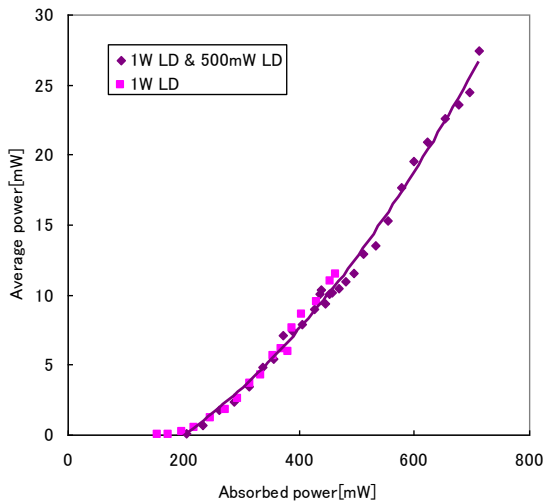


Fig. 4 Pulsed UV average power at 320 nm vs. the absorbed pump power for the Pr:YLF laser. Continuous line is approximated curve.

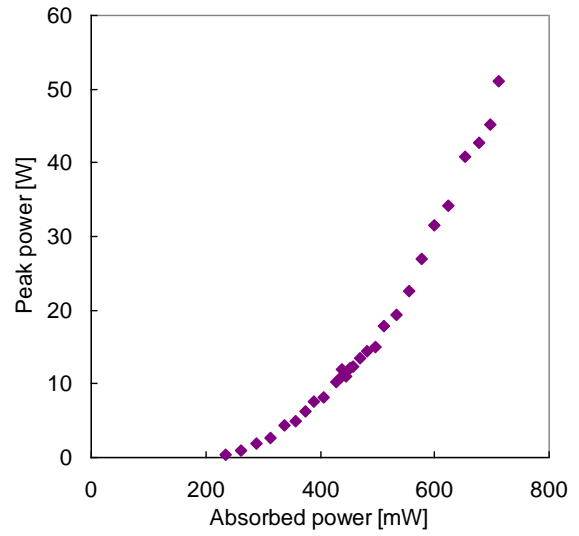


Fig. 5 Peak power at 320 nm vs. the absorbed pump power for the Pr:YLF laser.

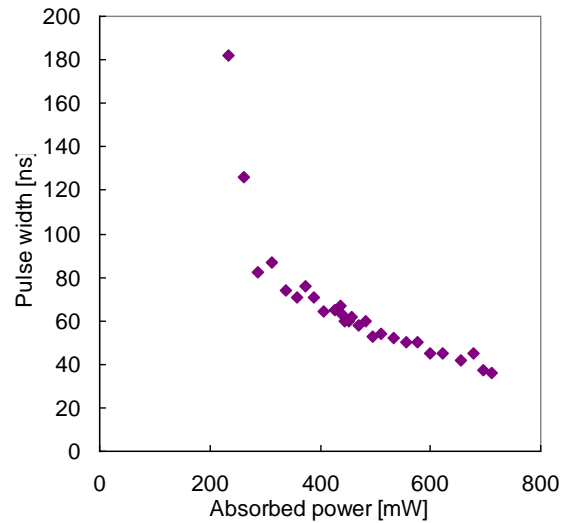


Fig. 6 Pulse width at 320 nm vs. the absorbed pump power for the Pr:YLF laser.

### 3 実験結果

Fig. 4 に得られた平均パワーを示す。繰り返し周波数 11 kHz で、最大平均パワー 27 mW、パルスエネルギー 2.5  $\mu$ J の紫外光出力 (320 nm) が得られた。基本波 (639 nm) の最大平均パワーは 44 mW、パルスエネルギーは 4  $\mu$ J であり、基本波 - 2 倍波の変換効率は 69% となった。また、基本波のスペクトル幅は 0.3 nm であった。市販の窒素ガスレーザー (発振波長 337.1 nm) はパルス

エネルギー数百 $\mu\text{J}$ ，繰り返し周波数 10 Hz 程度のものが多い。これと比べると，1 パルスあたりのエネルギーは小さいが，繰り返し周波数が大きいため 1 桁ほど大きな平均パワーが得られることになる。

Fig. 5 に紫外光出力のピークパワーを示す。最大で 51 W のピークパワーが得られた。また，このとき基本波のピークパワーは 55 W であった。Fig. 6 に紫外光出力のパルス幅を示す。吸収パワーが最大するときパルス幅は 36 ns となった。このとき基本波ではパルス幅 55 ns であった。

## 4 まとめ

Q スイッチを用いた共振器内 SHG により，GaIn-LD 励起 Pr:YLF レーザで波長 320 nm の紫外光出力を得た。平均パワー 27 mW，繰り返し周波数 11 kHz，パルスエネルギー 2.5  $\mu\text{J}$ ，ピークパワー 51 W，パルス幅 36 ns，変換効率 69% が得られた。639 nm から 320 nm への変換効率は非常に高いが，さらなる高出力化のためには基本波の特性の改善が必要である。

## References

- [1] Baichang Wu, Nong Chen, Chuangtian Chen, Daoqun Deng, and Zuyan Xu, *Opt. Lett.* **14**, 1080 (1989).
- [2] N. Pavel, T. Taira, K. Mizuuchi, A. Morikawa, T. Sugita, and K. Yamamoto, in *Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications*, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2004), paper TuA2.
- [3] L.B. Chang, S.C. Wang, and A.H. Kung, *Opt. Commun.* **209**, 397 (2002).
- [4] Y. Bai, Y.H. Li, Z.G. Shen, D.F. Song, Z.Y. Ren, and J.T. Bai, *Laser Phys. Lett.* **6**, No. 11, 791 (2009).
- [5] Yong Zhou, Guiling Wang, Yinchao Yue, Chengming Li, Yuanfu Lu, Dafu Cui, Zhanggui Hu, and Zuyan Xu, *Opt. Lett.* **34**, 746 (2009).
- [6] Fu-qiang Jia, Quan Zheng, Qing-hua Xue, Yi-kun Bu, and Long-sheng Qian, *Appl. Opt.* **46**, 2975 (2007).
- [7] G. Huber, A. Richter, N. -. Hansen, M. Fechner, and E. Heumann, *CLEO/Europe and EQEC 2009 Conference Digest*, (Optical Society of America, 2009), paper CA11\_3.