

文章编号: 1001-3806(2018)01-0100-04

## 基于三硼酸锂晶体高功率紫外脉冲激光器

卢一鑫, 杨森林, 赵小侠, 张变莲

(西安文理学院 应用物理研究所, 西安 710065)

**摘要:** 为了获得高功率、高重复频率的紫外脉冲激光器, 采用 1064nm 基频光通过三硼酸锂(LBO)晶体与 3 次谐波 355nm 进行和频得到 4 次谐波 266nm 紫外激光的方法, 进行了实验验证, 取得了重复频率为 20kHz、紫外激光器的平均输出功率为 2.5W、红外到紫外的转换效率为 12.5% 的实验数据。结果表明, 此脉冲激光器利用 LBO 晶体在高重复频率下取得了较大的紫外平均输出功率。

**关键词:** 激光器; 紫外; 2 次谐波; 3 次谐波; 4 次谐波; 三硼酸锂晶体

**中图分类号:** TN248.1; O437.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.01.019

### High power ultraviolet pulsed lasers based on LBO crystal

LU Yixin, YANG Senlin, ZHAO Xiaoxia, ZHANG Bianlian

(Institute of Applied Physics, Xi'an University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to achieve the ultraviolet pulsed laser with the high power and high frequency, the fourth harmonic 266nm in  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO) crystal was generated by frequency mixing of the fundamental (1064nm) and third harmonic (355nm) of electro-optical Q-switched laser, and experiment verification was carried out. Deep ultraviolet (UV) output power of 2.5W at 266nm with the repetition rate at 20kHz and 12.5% infrared (IR)-to-UV conversion efficiency were achieved. The result show that the pulse laser has achieved a large average output power at high repetition frequency by using LBO crystal.

**Key words:** lasers; ultraviolet; the second harmonic generation; the third harmonic generation; the fourth harmonic generation;  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  crystal

## 引 言

紫外激光器在医疗、科学研究、工业生产<sup>[1-5]</sup>等方面都有广泛的应用。相比于红外和可见光波段的激光器, 紫外激光具有较高的单光子能量和更小的光焦。为了得到高重复频率、高单脉冲能量以及窄线宽的 266nm 紫外激光, 采用 1064nm 的脉冲激光器利用三硼酸锂 ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , LBO) 或偏硼酸钡 ( $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ , BBO) 晶体倍频 2 次谐波 (the second harmonic generation, SHG) 得到 532nm 绿光, 再通过工作在紫外波段的如  $\text{RbBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$  (RBBF)<sup>[6]</sup>,  $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$  (KABO)<sup>[7]</sup>,  $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$  (KBBF)<sup>[8]</sup>, BBO<sup>[9]</sup> 角度相位匹配技术或者  $\text{KD}_2\text{PO}_4$  ( $\text{KD}^*\text{P}$ )<sup>[10]</sup> 非临界相位匹配技术进行倍频, 即 4 次谐波效应 (the fourth harmonic generation, FHG) 获得 266nm 的紫外激光输出。常见的晶体主要有 BBO 和磷酸二氧钾 ( $\text{KD}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KD}^*\text{P}$ ), 但上述晶体在紫外

波段都易于潮解, 而且  $\text{KD}^*\text{P}$  具有较低的热传导率, 只能在重复频率 100Hz 以下工作, BBO 有较大的走离角、角度相位匹配范围较窄、较高的吸收率通常在重复频率 10kHz 以下可以得到较好的紫外光输出。

LBO 晶体的通光范围在 200nm 以下, 其光学均匀性好、损伤阈值高、非线性光学系数适中、走离角小、允许角大等优点, 可以利用 3 次谐波技术 (the third harmonic generation, THG) 获得 355nm<sup>[11]</sup> 的紫外光, 由于双折射效应, 利用 LBO 晶体在 I 类角度匹配条件下不能通过 SHG 得到的 532nm 四倍频输出 266nm 的紫外激光, 通过四倍频技术最短波长只能达到 277nm<sup>[12]</sup>。

本文中报道了利用基于电光调 Q 脉冲激光器 1064nm 基频光通过 LBO 晶体与产生的 3 次谐波 355nm 进行和频得到 266nm 的紫外激光输出。全固态紫外脉冲激光器在重复频率为 20kHz 条件下获得平均输出功率为 2.5W 的 266nm 紫外光, 其在 1.5h 内测得输出功率稳定性为 4.6%。

## 1 实验装置

获得 266nm 的紫外激光输出需要具有高单脉冲能量, 窄脉冲宽度 1064nm 基频光。实验的光路如图 1

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401356)

作者简介: 卢一鑫 (1982-), 男, 实验师, 现从事非线性光学、光电子器件的研究工作。

E-mail: tongy1982@163.com

收稿日期: 2017-02-20; 收到修改稿日期: 2017-03-09

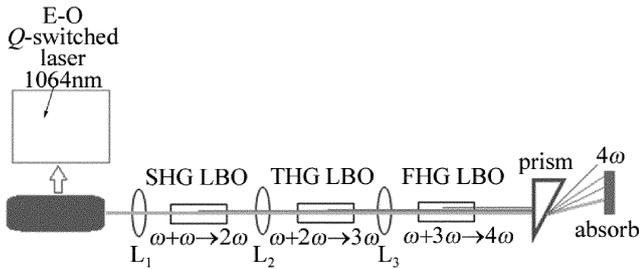


Fig. 1 Experimental setup of 266nm UV pulsed laser

所示。基于 Bright Solutions 公司商用 Onda 电光 (electro-optic, E-O) 调 Q 脉冲激光器, 可以获得脉冲宽度为 8ns 的 1064nm 激光输出, 光束质量因子  $M^2 < 1.5$ , 在重复频率为 20kHz 时最大的平均输出功率可达 20W。

图 1 中  $\omega$  表示基频的光波,  $2\omega$  表示 2 次谐波, 以此类推。基频光 1064nm 经过透镜  $L_1$  在第 1 个 LBO 晶体进行倍频 (SHG) 得到 532nm 的输出光, 再通过透镜  $L_2$  后基频光 1064nm 和倍频光 532nm 经过 THG LBO 晶体和频得到 3 次谐波 355nm, 最后通过透镜  $L_3$  基频光 1064nm 与 3 次谐波 355nm 在 FHG LBO 晶体相互作用得到 4 次谐波 266nm 的紫外激光输出。SHG LBO 晶体采用的相位匹配 (phase-matching, PM) 方式

是 I 类非临界相位匹配 (non critical phase matching, NCPM), 匹配温度是 148℃, 其走离角近似为 0mrad, 晶体尺寸为 3mm × 3mm × 20mm; THG LBO 是 II 类角度相位匹配, 匹配角  $\theta = 47^\circ, \varphi = 90^\circ$ ; FHG LBO 是 I 类角度相位匹配, 匹配角  $\theta = 90^\circ, \varphi = 61^\circ$ 。3 个晶体具体参量见表 1, 其中  $o_{z,\omega}$  表示入射光为慢光偏振态, 偏振方向沿着 z 轴;  $e_{xy,2\omega}$  表示产生的 2 次谐波是快光偏振态, 偏振方向在 x-y 平面; 下标  $\omega$  表示基频的光波,  $2\omega$  表示 2 次谐波, 以此类推。

光束通过分光棱镜后, 基频光 1064nm、倍频光 532nm、3 次谐波 355nm 被光学吸收器转化为热能, 从而 266nm 紫外激光输出, 通过光电探测器和功率计测出 266nm 的脉冲宽度和平均输出功率。  $L_1, L_2, L_3$  聚焦透镜的作用是把输出光汇聚在 LBO 晶体的中心点, LBO 晶体和聚焦透镜镀减反膜 (anti-reflection, AR) 的参量见表 2。SHG LBO 晶体入射面和出射面镀对 1064nm/532nm 波长的减反膜, 聚焦透镜  $L_1$  入射面和出射面镀对 1064nm 波长的减反膜,  $L_2$  入射面和出射面镀对 1064nm/532nm 波长的减反膜,  $L_3$  入射面和出射面镀对 355nm 波长的减反膜, THG LBO 和 FHG LBO 两个晶体无需镀膜。

Table 1 Characteristics of LBO crystal

crystal	PM type	PM scheme	walk-off angle <sup>[13]</sup>	PM angle	PM temperature	dimensions
SHG LBO	I	$o_{z,\omega} + o_{z,\omega} \rightarrow e_{xy,2\omega}$	0mrad	$\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$	148℃	3mm × 3mm × 20mm
THG LBO	II	$o_{z,\omega} + e_{xy,2\omega} \rightarrow o_{z,3\omega}$	10mrad	$\theta = 47^\circ, \varphi = 90^\circ$	60℃	3mm × 3mm × 15mm
FHG LBO	I	$o_{z,\omega} + o_{z,3\omega} \rightarrow e_{xy,4\omega}$	16mrad	$\theta = 90^\circ, \varphi = 61^\circ$	140℃	3mm × 3mm × 20mm

Table 2 Antireflection coating of optical components

LBO crystals						lenses					
SHG LBO		THG LBO		FHG LBO		$L_1 (f=35\text{mm})$		$L_2 (f=57\text{mm})$		$L_3 (f=57\text{mm})$	
input	output	input	output	input	output	input	output	input	output	input	output
AR 1064nm/532nm		uncoated		uncoated		AR 1064nm		AR 1064nm/532nm		AR 355nm	

## 2 实验结果与讨论

基频光 1064nm 通过第 1 个 LBO 晶体进行倍频

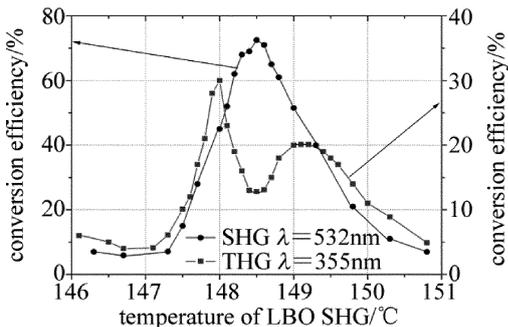


Fig. 2 Dependence of conversion efficiency of SHG (1064nm + 1064nm → 532nm) and THG (1064nm + 532nm → 355nm) on temperature of the SHG LBO crystal

(SHG) 得到 532nm 的输出光, 最大的平均输出功率为 14.5W, 转换效率为 72.5%, 通过调节 SHG LBO 晶体的温度可以得到基频光 1064nm 与倍频 (SHG) 532nm 不同的输出比率, 当 SHG LBO 晶体温度为 148℃, 通过 SHG 平台后输出的基频光 1064nm 光功率与倍频 (SHG) 532nm 光功率的比值为 1.2, 即 1064nm 光功率 10.8W, 532nm 光功率 9W, 可以得到 3 次谐波 (THG) 355nm 最大输出功率为 6W, 转换效率为 30%, 如图 2 所示。

基频光 1064nm 和 3 次谐波 (THG) 355nm 通过 FHG LBO 获得 266nm 的激光输出。分离出来的 4 次谐波 266nm 紫外激光在重复频率 20kHz 时最大输出功率为 2.5W, 转换效率为 12.5%, 如图 3 所示。

FHG LBO 晶体 I 类角度相位匹配角晶体温度的

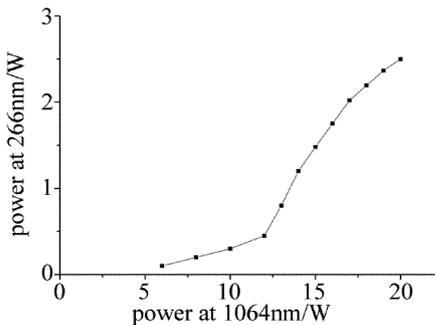


Fig. 3 Relationship between 266nm output UV power and 1064nm fundamental radiation power

关系通过基于 KATO 的 LBO Sellmeier 方程 SNLO 软件计算得到温度匹配带宽为 55℃, 范围很大, 但是实际测量的温度匹配带宽比较窄, 如图 4 所示。这可能是由于在晶体温度 65℃ ~ 250℃ 变化范围, Sellmeier 方程中没有考虑 LBO 晶体对于波长 200nm ~ 400nm 入射光的吸收损耗引起的。

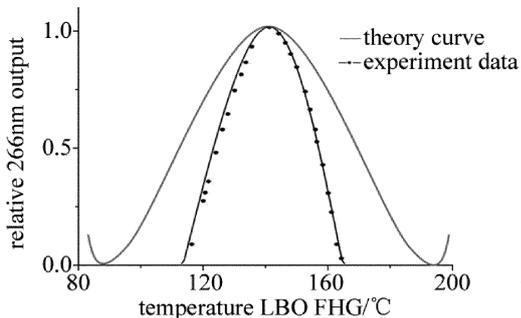


Fig. 4 The experimental and theoretical curves of relationship between FHG LBO temperature and acceptance bandwidth at 266nm

在重复频率 20kHz 时测得输出 266nm 紫外光的脉冲宽度为 10ns, 如图 5 所示, 较基频光有一定的展宽。

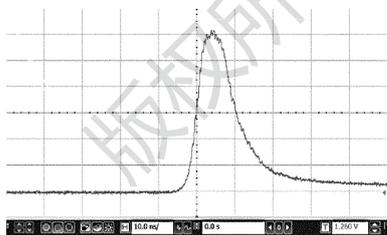


Fig. 5 Pulse width of 266nm ultraviolet light with repetition rate of 20kHz

由于 FHG LBO 的走离角比较小, 在距离 FHG LBO 大约 1m 处测得 266nm 紫外光输出的能量分布, 如图 6 所示。同时在 1.5h 内测得输出功率为 0.5W 以及 1W 的稳定度分别好于 1.2% 和 1.4%, 在最大输出功率为 2.5W 时, 其稳定度可以达到 4.6%, 如图 7 所示。

高功率抽运激光工作较长时间情况下, THG LBO 晶体出现了降解现象<sup>[14-15]</sup>, 通过带有 CMOS 的数码显微镜观测到了具体的降解区域, 如图 8 所示。实验过程中发现, 出现降解现象的特征时间从几个小时到几

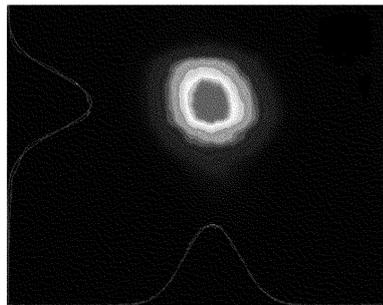


Fig. 6 Far-field energy distribution of 266nm UV beam

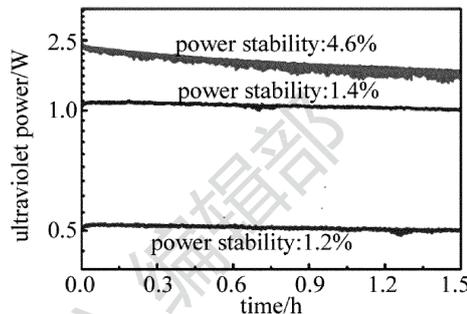


Fig. 7 Power stability of the generated UV output power of 0.5W, 1W and 2.5W based on LBO

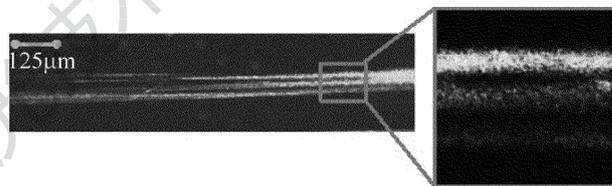


Fig. 8 Magnified image of the degraded LBO crystals

百个小时不等, 降解程度与激光以及晶体的诸多参量有关, 还需要进一步地研究其原因, 进行改善。

### 3 结论

采用电光调 Q 获得了脉宽为 8ns 的高质量 1064nm 基频光, 通过 LBO 晶体与产生的 3 次谐波 355nm 进行和频得到 266nm 的紫外激光输出。在重复频率为 20kHz 时, 紫外光最大平均输出功率为 2.5W, 脉冲宽度 10ns, 相应的红外到紫外的转换效率为 12.5%, 其稳定度可以达到 4.6%。同时, 后续可以通过增大基频光的峰值功率提高转换效率。此外, 长时间工作导致 LBO 晶体出现了降解现象, 还需进一步研究。

### 参考文献

[1] LI Q, THOMAS RUCKSTUHL A, SEEGER S. Deep-UV laser-based fluorescence lifetime imaging microscopy of single molecules [J]. Journal of Physical Chemistry, 2004, B108(24):8324-8329.  
 [2] LE H R, KÖNIG K, WÜLLNER C, et al. Ultraviolet femtosecond laser creation of corneal flap[J]. Journal of Refractive Surgery, 2009, 25(4):383-389.  
 [3] PARK S J, SONG J H, LEE G A. Analysis of UV laser machining process for high density embedded IC substrates[J]. Advanced Materials Research, 2012, 630(5):171-174.

- [4] ORTHAUS S, KÖNIG M, SCHÖNAU T, *et al.* Crossing the limit towards deep UV[J]. *Optik & Photonik*, 2013, 8(1):33-36.
- [5] KONG L R, ZHANG F, DUAN J, *et al.* Research of water-assisted laser etching of alumina ceramics[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3): 330-334(in Chinese).
- [6] CHEN C, LUO S, WANG X, *et al.* Deep UV nonlinear optical crystal: RbBe<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>F<sub>2</sub> [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2009, B26(8):1519-1525.
- [7] WANG Y, WANG L, GAO X, *et al.* Growth, characterization and the fourth harmonic generation at 266nm of K<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> crystals without UV absorptions and Na impurity[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2012, 348(1):1-4.
- [8] WANG L, ZHAI N, LIU L, *et al.* High-average-power 266nm generation with a KBe<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>F<sub>2</sub> prism-coupled device[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22):27086-27090.
- [9] CHAITANYA K S, CANALS C J, SANCHEZ B E, *et al.* Yb-fiber-laser-based, 1.8W average power, picosecond ultraviolet source at 266nm[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10):2397-2400.
- [10] YANG S T, HENESIAN M A, WEILAND T L, *et al.* Noncritically phase-matched fourth harmonic generation of Nd:glass lasers in partially deuterated KDP crystals[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1824-1828.
- [11] ZHENG B R, YAO Y Ch, HUANG Ch Y. Experiment of double-end-pumped intra-cavity triple frequency ultraviolet laser[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 155-157 (in Chinese).
- [12] CHEN C. Chinese lab grows new nonlinear optical borate crystals [J]. *Laser Focus World*, 1989, 25(11):129-137.
- [13] SMITH A V. Software for calculated "SNLO version\_52." [CP/OL]. (2000-02-15) [2009-06-12]. <http://www.sandia.gov/pensc/departments/lasers/snlo-software.html>.
- [14] MÖLLER S, ANDRESEN A, MERSCHJANN C, *et al.* Insight to UV-induced formation of laser damage on LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> optical surfaces during long-term sum-frequency generation [J]. *Optics Express*, 2007, 15(12):7351-7356.
- [15] HONG H, LIU Q, HUANG L, *et al.* Improvement and formation of UV-induced damage on LBO crystal surface during long-term high-power third-harmonic generation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(6):7285-7293.