



## La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub>晶体高效紫外激光输出研究

王丽荣, 张国春, 冯景程, 白磊, 刘丽娟, 王晓洋

### 引用本文:

王丽荣, 张国春, 冯景程, 等. La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub>晶体高效紫外激光输出研究[J]. *发光学报*, 2020, 41(2): 140–145.

WANG Li-rong, ZHANG Guo-chun, FENG Jing-cheng, et al. Highly Efficient UV Laser Output of La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> Crystal[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(2): 140–145.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204102.0140>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### LD侧面泵浦Nd:YVO<sub>4</sub>高重频紫外激光器

LD-side Pumping Nd:YVO<sub>4</sub> High Repetition Rate UV Laser

发光学报. 2019, 40(8): 1011–1014 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194008.1011>

#### 高能量高转换效率355nm紫外激光器

High Energy and High Conversion Efficiency 355 nm UV Laser

发光学报. 2018, 39(12): 1730–1734 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183912.1730>

#### 瓦级激光二极管端面抽运351 nm紫外激光器

Watt-class Laser Diode End-pumped 351 nm Ultraviolet Laser

发光学报. 2016, 37(11): 1367–1371 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163711.1367>

#### 高效率LD端面抽运准连续355nm激光器

High Efficient LD End-pumped QCW 355 nm Laser

发光学报. 2014, 35(3): 332–336 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143503.0332>

#### 脉冲LD泵浦电光调Q深紫外激光器

Pulse LD Pumped EO-Q Switched DUV Laser

发光学报. 2016, 37(4): 463–466 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163704.0463>

文章编号: 1000-7032(2020)02-0140-06

## La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> 晶体高效紫外激光输出研究

王丽荣<sup>1</sup>, 张国春<sup>1</sup>, 冯景程<sup>1,2</sup>, 白 磊<sup>1</sup>, 刘丽娟<sup>1</sup>, 王晓洋<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所 北京人工晶体研究与发展中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> (LCB) 为可通过 Nd: YAG 激光三倍频产生 355 nm 紫外激光的非线性光学晶体, 其光学性能可与商用化的 LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> (LBO) 晶体媲美, 但抗潮解特性优势明显。本文对用 LCB 晶体实现 355 nm 紫外激光输出的三倍频产生过程进行了优化设计, 利用走离补偿方法来提高激光输出转换效率。通过在光路中加入沿  $\theta = 45^\circ$  方向切割、厚度为 1.2 mm 的方解石晶体走离补偿片, 在脉冲宽度为 60 ns、重复频率 10 kHz 的激光参数下实现 355 nm 输出功率由 12 W 提升至 20 W; 在脉冲宽度为 25 ps、重复频率为 10 Hz 的激光参数下 355 nm 转换效率由 28.3% 提升至 35.2%。

**关键词:** LCB; 非线性光学晶体; 紫外激光; 三倍频; 走离补偿

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20204102.0140

## Highly Efficient UV Laser Output of La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> Crystal

WANG Li-rong<sup>1</sup>, ZHANG Guo-chun<sup>1</sup>, FENG Jing-cheng<sup>1,2</sup>, BAI Lei<sup>1</sup>, LIU Li-juan<sup>1</sup>, WANG Xiao-yang<sup>1\*</sup>

(1. Beijing Center for Crystal Research and Development, Technical Institute of Physics and Chemistry,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding Author, E-mail: xywang@mail.ipc.ac.cn

**Abstract:** La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> (LCB) is a nonlinear crystal which can produce 355 nm ultraviolet (UV) laser output through the third harmonic generation (THG) of Nd: YAG laser, its optical property is comparable to that of commercial LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> (LBO) crystal, with an obvious advantage in its moisture resistance. In this paper, the THG process of 355 nm UV laser output with LCB crystal was optimized, and the walk-off compensating method was used to improve the conversion efficiency of laser output. By adding a calcite crystal compensator cut at  $\theta = 45^\circ$  to the optical axis with a thickness of 1.2 mm, the output power of 355 nm can be increased from 12 W to 20 W under the laser parameters of 60 ns pulse width and 10 kHz repetition rate. When the pulse width is 25 ps and the repetition rate is 10 Hz, the conversion efficiency from 1 064 nm to 355 nm is improved from 28.3% to 35.2%.

**Key words:** LCB; non-linear optical crystal; ultraviolet laser; third-harmonic generation; walk-off compensation

收稿日期: 2019-11-25; 修订日期: 2019-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(51890864, 51972314)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(51890864, 51972314)

## 1 引 言

紫外激光的出现推动了半导体和电子工业的发展<sup>[1-3]</sup>, 紫外激光具有波长短、单光子能量高、热效应小、聚焦特性好等诸多优点, 同时加工成本低、效率高, 逐渐代替了传统的加工工艺, 在工业应用和科学研究中占有重要的地位<sup>[4-5]</sup>。产生 355 nm 紫外激光最直接、有效的方法是使用非线性光学晶体对 Nd: YAG 激光器进行三倍频频率变换, 所以晶体的质量以及三倍频性能的好坏直接影响着最终得到的 355 nm 紫外激光的质量。

2001 年, 美国光谱物理公司 Hodgson 等报道了用激光二极管双端抽运的 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器输出了 12 W 的 355 nm 激光<sup>[6]</sup>, 该 355 nm 激光的光束质量仅为 1.2; 2003 年, 日本的 Kitano 采用顶部籽晶法生长出来的 CBO 晶体进行了 355 nm 和频实验, 得到了 3 W 的紫外激光输出, 重频为 31 kHz, 转换效率为 30%<sup>[7]</sup>; 2005 年, 吴以成等使用 16 mm 长的二类匹配 CBO 晶体进行和频得到了 17.7 W 的 355 nm 激光输出<sup>[8]</sup>; 2007 年, McDonagh 等使用 888 nm 泵浦的 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器, 放大后输出 111 W 的 1 064 nm 基频光, 用二类匹配的 LBO 晶体通过三倍频得到 35 W 的 355 nm 紫外激光<sup>[9]</sup>, 转换效率为 31.5%; 2009 年, 美国相干公司在侧面泵浦 Nd: YAG 激光器内加入新型的双折射补偿技术和二类匹配的 LBO 晶体获得 160 W 的 355 nm 激光输出<sup>[10]</sup>, 为目前为止 355 nm 激光的最高输出功率, 转换效率为 6%。2018 年, 侯占宇等利用新型非线性光学晶体 KBB 在不同激光

条件下均获得了有效的 355 nm 激光输出<sup>[11]</sup>: 在 25 ps、10 Hz 激光条件下, 355 nm 激光转换效率高 30.8%; 在 10 ps、80 MHz、35 W 的激光条件下, 355 nm 输出功率可达 5.3 W。

$\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  (LCB) 晶体也是一种可以实现三倍频的非线性光学晶体<sup>[12-14]</sup>, 它具有很宽的透光波段、适中的双折射、较大的非线性光学效应和物化稳定性, 并且损伤阈值高达 11.5 GW/cm<sup>2</sup><sup>[15-16]</sup>。更重要的是它完全不潮解, 经实验研究, 它比 LBO 更适于在室温条件下应用<sup>[17]</sup>。我们曾对其三倍频输出性能进行了较为详细的研究, 获得了高达 31.6 W 的 355 nm 激光输出功率<sup>[18-19]</sup>。本文在之前的研究基础上对实验光路进行优化改进, 通过加入方解石补偿片, 对三倍频产生过程中 LCB 晶体内部 1 064 nm 和 532 nm 激光光束之间的走离进行补偿, 有效提高了 355 nm 激光输出功率和转换效率。

## 2 实 验

### 2.1 高重频纳秒激光三倍频实验

为实现 355 nm 激光有效输出, 我们采用侧面泵浦棒状 Nd: YAG 晶体结合对称平镜谐振腔的方式, 自行搭建了高功率、高重频的纳秒激光光源。光路结构示意图如图 1 所示, 所采用的 Nd: YAG 晶体直径 4 mm, 长度 120 mm, Nd<sup>3+</sup> 离子掺杂浓度为 0.6%。激光模块采用五维 808 nm LD 阵列侧面泵浦结构, LD 电光转换效率约 50%。采用声光 Q 开关 (中电二十六所 QGS41-4 型) 实现脉冲输出。输出镜镀 808 nm 高反膜, 对 1 064 nm 波段透过率  $T = 30\%$ 。

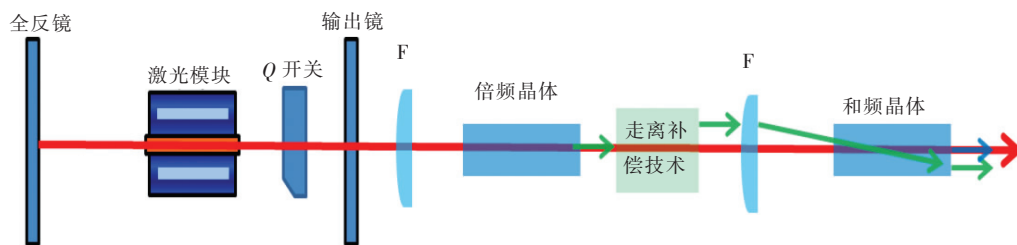


图 1 高重频纳秒激光三倍频实验光路结构图

Fig. 1 Experimental setup for third-harmonic generation under high-repetition-frequency nanosecond laser conditions

倍频晶体采用非临界相位匹配的 LBO 晶体, LBO 晶体切割角度为  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , 尺寸为 3 mm × 3 mm × 15.6 mm, 两个通光面均镀有 1 064 nm 和 532 nm 高透膜。我们采用自制的晶体控温装置给 LBO 晶体精确控温, LBO 晶体温度为 149.5

℃, 控温精度可达  $\pm 0.1$  ℃。1 064 nm 激光经过焦距  $f = 250$  mm 的聚焦透镜汇聚后入射至 LBO 晶体中。经过倍频后产生的 532 nm 激光与剩余的 1 064 nm 激光通过焦距为 150 mm 的透镜聚焦后直接入射至三倍频晶体中。实现 355 nm 紫外

激光输出的三倍频晶体为 I 类相位匹配的 LCB 晶体,相位匹配角度为  $\theta = 49.4^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , 晶体尺寸  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 17.6 \text{ mm}$ 。由于我们实验中所搭建的  $1064 \text{ nm}$  激光偏振方向为水平偏振,倍频所产生的  $532 \text{ nm}$  激光偏振方向为垂直偏振,而我们所用的三倍频晶体为 I 类相位匹配,需要基频光和倍频光偏振方向一致,所以我们用双波长波片 (WPD-200-1064/532-1/2-1, Castech Inc.) 将  $1064 \text{ nm}$  激光偏振方向转为垂直偏振,而  $532 \text{ nm}$  激光的偏振方向不变,仍为垂直偏振,LCB 晶体内部光的偏振匹配情况为:  $e(1064 \text{ nm}) + e(532 \text{ nm}) \rightarrow o(355 \text{ nm})$ 。为了补偿三倍频产生过程中在 LCB 晶体内部的走离效应,有效提高  $355 \text{ nm}$  激光输出功率,我们在倍频晶体和三倍频晶体中间放置了走离补偿片。

## 2.2 低重频皮秒激光三倍频实验

为了验证这种走离补偿方案的可行性,我们采用另一台进口的低重频皮秒锁模 Nd:YAG 激光器 (PL2140, Ekspla, Lithuania), 可同时输出波长  $1064 \text{ nm}$  和  $532 \text{ nm}$  的激光,重复频率为  $10 \text{ Hz}$ ,脉冲宽度  $25 \text{ ps}$ 。用同一块 LCB 晶体进行了激光三倍频实验。

图 2 为实验光路图, M1 和 M2 为  $1064 \text{ nm}$  高反镜, M3 ~ M9 为  $532 \text{ nm}$  高反镜, M10 为  $1064 \text{ nm}$  高透,  $532 \text{ nm}$  高反镜,将两束光重叠入射至 LCB 晶体内。为了精确补偿在 LCB 晶体内  $1064 \text{ nm}$  和  $532 \text{ nm}$  的群速失配,我们采用了 M5 ~ M8 的结构,使  $532 \text{ nm}$  在传播方向有相应的空间延迟。M11 为  $1064 \text{ nm}$  半波片, M12 为格兰激光棱镜, M11 和 M12 配合使用可实现  $1064 \text{ nm}$  激光输出功率的精确、方便调节,从而便于优化  $1064 \text{ nm}$

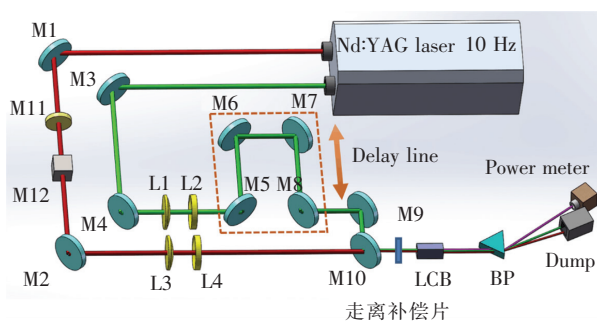


图 2 低重频皮秒激光三倍频实验光路图

Fig. 2 Experimental setup for third-harmonic generation under low-repetition-frequency picosecond laser conditions

和  $532 \text{ nm}$  激光功率比例关系,达到最佳的三倍频实验条件。通过 L1 和 L2 组成 2:1 缩束系统,用于调节入射至 LCB 晶体的  $532 \text{ nm}$  激光光斑尺寸, L3 和 L4 组成 3:1 缩束系统,用于调节入射至 LCB 晶体的  $1064 \text{ nm}$  激光光斑尺寸。从 LCB 晶体出射的激光以布儒斯特角入射到一个三棱镜上,被分开成为三束,  $1064 \text{ nm}$  基频光和  $532 \text{ nm}$  二倍频光被激光垃圾筒收集,  $355 \text{ nm}$  三倍频光由功率计 (LPE-1A, 物科光电) 探测。

## 3 结果与讨论

### 3.1 高重频纳秒激光三倍频实验

当半导体模块泵浦电流为  $15 \text{ A}$  时,  $1064 \text{ nm}$  激光功率可达  $250 \text{ W}$ , 且被声光 Q 完全关断, 重复频率为  $10 \text{ kHz}$ 。经过测量,  $1064 \text{ nm}$  激光脉冲宽度为  $60 \text{ ns}$  @  $250 \text{ W}$ 。  $532 \text{ nm}$  倍频光输出功率最大可达  $120 \text{ W}$ , 对应的倍频转换效率为  $48\%$ 。

在开始的三倍频产生过程中, 我们并没有加入走离补偿片。从原理上来讲,  $1064 \text{ nm}$  与  $532 \text{ nm}$  光在单位面积内的光子数之比为 1:1 时为三倍频产生的最佳条件, 而  $1064 \text{ nm}$  光斑与  $532 \text{ nm}$  激光光斑尺寸是不同的, 所以要达到三倍频最佳输出条件, 需要调节  $532 \text{ nm}$  激光与剩余的  $1064 \text{ nm}$  激光的功率比例, 我们通过调节非临界相位匹配 LBO 晶体的温度来保证  $355 \text{ nm}$  紫外激光的有效输出。但是实验结果并不理想, 我们最终得到的  $355 \text{ nm}$  激光功率只有  $12 \text{ W}$ ,  $1064 \text{ nm}$  到  $355 \text{ nm}$  激光相应转换效率仅为  $4.8\%$ 。这里除了基频激光光束质量不够好这一因素外, 在三倍频产生过程中  $1064 \text{ nm}$  和  $532 \text{ nm}$  激光之间的走离也

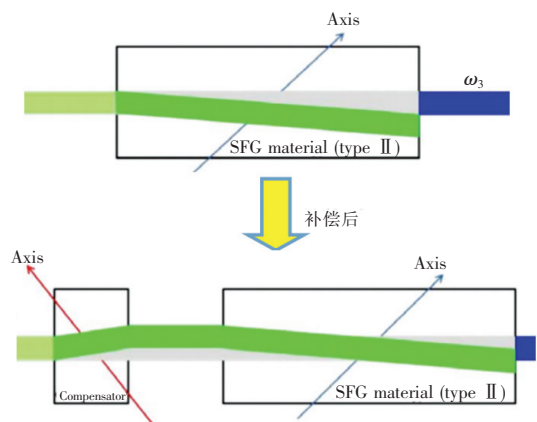


图 3 走离补偿示意图

Fig. 3 Diagram of walk-off compensation

是不可忽略的重要因素。由于我们采用的 LCB 晶体实现三倍频的偏振匹配方式为:  $e(1\ 064\ \text{nm}) + e(532\ \text{nm}) \rightarrow o(355\ \text{nm})$ , 所以在 LCB 晶体内部  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光均有走离, 文献[18]中曾指出, 在  $\theta = 49.4^\circ$ 、 $\varphi = 0^\circ$  的 LCB 晶体内部, 三倍频产生过程中  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光的走离角分别为  $31.7\ \text{mrad}$  和  $33.5\ \text{mrad}$ 。

图 3 所示为用 matlab 编程软件模拟的在三倍频产生过程中 LCB 晶体内部  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光光束重叠情况。在实验中我们使用的 LCB 晶体通光方向长度为  $17.6\ \text{mm}$ , 根据 LCB 晶体内部  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光的走离角数据, 计算可得在  $355\ \text{nm}$  激光产生过程中,  $1\ 064\ \text{nm}$  激光从 LCB 晶体出射时的位置与入射时相比偏移的距离为  $560\ \mu\text{m}$ ,  $532\ \text{nm}$  激光从 LCB 晶体出射时的位置与入射时相比偏移的距离为  $590\ \mu\text{m}$ , 所以在没有加入走离补偿片的情况下  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光光斑最终会有  $30\ \mu\text{m}$  的偏移。由于在实验过程中经过透镜汇聚后的光斑半径一般也是在百微米量级,  $30\ \mu\text{m}$  的偏移量势必会影响  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光的和频效果, 降低  $355\ \text{nm}$  激光的有效输出。为了保障  $355\ \text{nm}$  激光的有效输出, 我们有必要加入走离补偿片, 使  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光在从走离补偿片出射时(入射至 LCB 晶体前)沿相反方向有  $15\ \mu\text{m}$  左右的偏移。

$$n_o^2 = 2.69705 + \frac{0.0192064}{\lambda^2 - 0.01820} - 0.0151624\lambda^2$$

$$n_e^2 = 2.18438 + \frac{0.0087309}{\lambda^2 - 0.01018} - 0.0024411\lambda^2$$
(1)

$$\tan\alpha = \frac{1}{2} \frac{|n_o^2 - n_e^2|}{n_o^2 \sin^2\theta + n_e^2 \cos^2\theta} \cdot \sin 2\theta, \quad (2)$$

方解石晶体为负单轴晶体, 具有很大的双折射 ( $\Delta n = 0.172$ ), 本实验中选择方解石晶体作为走离补偿片。公式(1)为 casix 网站 (<https://www.casix.com>) 中列出的方解石晶体的色散方程, 公式(2)为在负单轴晶体中 e 光的走离角计算公式<sup>[20]</sup>, 通过两个公式可以得到, 在  $\theta = 45^\circ$  时 e 光偏振的  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光在方解石晶体内部传播时的走离角最大, 分别为  $0.1\ \text{rad}$  和  $0.11\ \text{rad}$ 。如果我们选用厚度为  $1.2\ \text{mm}$  的方解石作为本实验的走离补偿片, 可使  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光在入射至 LCB 晶体内部时有  $12\ \mu\text{m}$  的偏移,

基本满足本实验的走离补偿条件。图 3 下边部分是我们加入  $1.2\ \text{mm}$  的方解石走离补偿片后的情况, 可以看到,  $1\ 064\ \text{nm}$  和  $532\ \text{nm}$  激光在 LCB 晶体内部传播过程中重叠区域得到明显增加, 有效地补偿了 LCB 晶体的走离效应。所以光路中走离补偿片的加入有助于提高  $355\ \text{nm}$  激光输出功率和转换效率。图 4 所示为使用走离补偿前后输出的  $355\ \text{nm}$  紫外激光功率的对比曲线, 走离补偿后,  $355\ \text{nm}$  输出功率由  $12\ \text{W}$  提高至  $20\ \text{W}$ , 相应的  $1\ 064\ \text{nm}$  到  $355\ \text{nm}$  激光转换效率由  $4.8\%$  提升至  $8\%$ 。

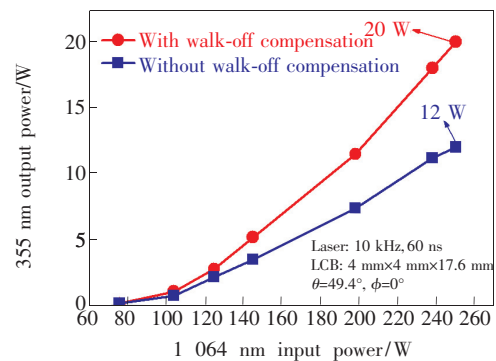


图 4 走离补偿前后 LCB 晶体输出  $355\ \text{nm}$  激光功率对比  
Fig. 4 Comparison of  $355\ \text{nm}$  output power using LCB crystal before and after the walk-off compensation

### 3.2 低重频皮秒激光三倍频实验

本实验所采用的  $1\ 064\ \text{nm}$  激光初始偏振方向为垂直偏振,  $532\ \text{nm}$  激光为水平偏振, 用于实现  $355\ \text{nm}$  紫外激光输出的 LCB 晶体同上, 仍为 I 类相位匹配。入射至 LCB 晶体前,  $1\ 064\ \text{nm}$  激光通过 M11 和 M12 的组合后偏振方向发生改变, 由垂直偏振改为与  $532\ \text{nm}$  激光偏振方向相同的

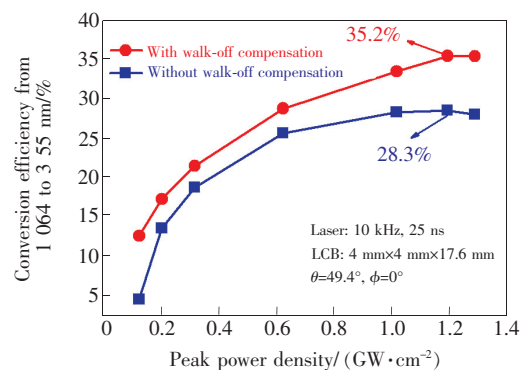


图 5 走离补偿前后 LCB 晶体  $355\ \text{nm}$  转换效率对比  
Fig. 5 Comparison of conversion efficiency from  $1\ 064\ \text{nm}$  to  $355\ \text{nm}$  using LCB crystal before and after the walk-off compensation

水平偏振。所以为满足 LCB 晶体 I 类相位匹配的三倍频实现条件: $e(1\ 064\ \text{nm}) + e(532\ \text{nm}) \rightarrow o(355\ \text{nm})$ , LCB 晶体的侧面以通光方向为轴旋转了  $90^\circ$ 。同样地,我们进行了不加走离补偿和加入走离补偿两种实验条件下 355 nm 输出效果的对比。图 5 为加入走离补偿前后 1 064 nm 到 355 nm 激光转换效率对比曲线,可以看出,通过方解石走离补偿片的加入,LCB 晶体的 355 nm 激光转换效率由 28.3% 提升至 35.2%,走离补偿效果明显。

## 4 结 论

LCB 晶体是在高功率 355 nm 紫外激光输出方面具有实用价值的晶体,随着晶体生长工艺的改进,今后可得到更大尺寸、更高光学质量的 LCB 晶体,亦即在三倍频激光实验中可获得更长通光方向的晶体。但由于 LCB 晶体的三倍频实现方式为  $e(1\ 064\ \text{nm}) + e(532\ \text{nm}) \rightarrow o(355\ \text{nm})$ ,所

以在 LCB 晶体内部 1 064 nm 激光和 532 nm 激光均为非寻常光,它们之间的走离是不可避免的,而且通光方向尺寸越大,1 064 nm 和 532 nm 激光之间的走离越明显,重叠区域越小,355 nm 输出效果势必会受到影响。本文通过采用在光路中加入走离补偿片的方法增加在三倍频产生过程中 LCB 晶体内部 1 064 nm 基频光和 532 nm 倍频光的重叠区域,从而有效提高 355 nm 激光输出功率和转换效率。实验结果证明,通过在光路中加入沿  $\theta = 45^\circ$  方向切割、厚度为 1.2 mm 的方解石晶体走离补偿片,在脉冲宽度为 60 ns、重复频率 10 kHz 的激光参数下实现了 355 nm 输出功率由 12 W 提高至 20 W;在脉冲宽度为 25 ps、重复频率为 10 Hz 的激光参数下 355 nm 转换效率由 28.3% 提升至 35.2%,该走离补偿方案对 355 nm 紫外激光输出效果的提升是有帮助的。这一方法将会更进一步地推进 LCB 晶体在 355 nm 紫外激光输出方面的实用化进程。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] ZHANG F, DUAN J, ZENG X Y, *et al.*. 355 nm DPSS UV laser micro-processing for the semiconductor and electronics industry [C]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, San Francisco, 2010, 7584:1-10.
- [ 2 ] LI K, SPARKES M, O'NEILL W. Comparison between single shot micromachining of silicon with nanosecond pulse shaped IR fiber laser and DPSS UV laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2014, 20(5):0900807-1-8.
- [ 3 ] 张菲, 段军, 曾晓雁, 等. 355 nm 紫外激光加工柔性线路板盲孔的研究 [J]. *中国激光*, 2009, 36(12):3143-3148. ZHANG F, DUAN J, ZENG X Y, *et al.*. Study of blind holes drilling on flexible circuit board using 355 nm UV laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2009, 36(12):3143-3148. (in Chinese)
- [ 4 ] 季凌飞, 凌晨, 李秋瑞, 等. 皮秒激光工程应用研究现状与发展分析 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(5):115-126. JI L F, LING C, LI Q R, *et al.*. Research progress and development of industrial application of picosecond laser processing [J]. *J. Mech. Eng.*, 2014, 50(5):115-126. (in Chinese)
- [ 5 ] MCGINTY J, GALLETLY N P, DUNSBY C, *et al.*. Wide-field fluorescence lifetime imaging of cancer [J]. *Biomed. Opt. Express*, 2010, 1(2):627-640.
- [ 6 ] HODGSON N, DUDLEY D, GRUBER L, *et al.*. Diode end-pumped, TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> laser with output power greater than 12 W at 355 nm [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics, Baltimore*, 2001:389-390.
- [ 7 ] KITANO H, MATSUI T, SATO K, *et al.*. Efficient 355-nm generation in CsB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(4):263-265.
- [ 8 ] WU Y C, CHANG F, FU P Z, *et al.*. High-average-power third harmonic generation at 355 nm with CsB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, 22(6):1426-1428.
- [ 9 ] MCDONAGH L, WALLENSTEIN R, NEBEL A. 111 W, 110 MHz repetition-rate, passively mode-locked TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> master oscillator power amplifier pumped at 888 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(10):1259-1261.
- [ 10 ] DUDLEY D R, MEHL O, WANG G Y, *et al.*. Q-switched diode pumped Nd:YAG rod laser with output power of 420 W at 532 nm and 160 W at 355 nm [C]. *Proceedings Volume 7193 Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices*, San Jose, 2009, 7193:71930Z-1-8.
- [ 11 ] HOU Z Y, WANG L R, XIA M J, *et al.*. Stable, high power, high efficiency picosecond ultraviolet generation at 355 nm in

- $\text{K}_3\text{B}_6\text{O}_{10}\text{Br}$  crystal [J]. *Opt. Commun.*, 2018,416:71-76.
- [12] WU Y C, LIU J G, FU P Z, *et al.*. New class of nonlinear optical crystals  $\text{R}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  (RCB) [C]. *Proceedings Volume 3556, Electro-Optic and Second Harmonic Generation Materials, Devices, and Applications II*, Beijing, 1998, 3556:8-13.
- [13] WU Y C, FU P Z, ZHENG F, *et al.*. Growth of a nonlinear optical crystal  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  (LCB) [J]. *Opt. Mater.*, 2003, 23(1-2):373-375.
- [14] WANG G L, LU J H, CUI D F, *et al.*. Efficient second harmonic generation in a new nonlinear  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  crystal [J]. *Opt. Commun.*, 2002,209(4-6):481-484.
- [15] WU Y C, LIU J G, FU P Z, *et al.*. A new lanthanum and calcium borate  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  [J]. *Chem. Mater.*, 2001,13(3):753-755.
- [16] JING F L, FU P Z, WU Y C, *et al.*. Growth and assessment of physical properties of a new nonlinear optical crystal:lanthanum calcium borate [J]. *Opt. Mater.*, 2008,30(12):1867-1872.
- [17] ZHANG J X, WANG L R, WU Y, *et al.*. High-efficiency third harmonic generation at 355 nm based on  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  [J]. *Opt. Exp.*, 2011,19(18):16722-16729.
- [18] WANG L R, WU Y, WANG G L, *et al.*. 31.6-W, 355-nm generation with  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  crystals [J]. *Appl. Phys. B*, 2012,108(2):307-311.
- [19] 王丽荣, 吴洋, 王桂玲, 等.  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$ 晶体三倍频特性表征 [J]. *人工晶体学报*, 2012,41(4):849-852.  
WANG L R, WU Y, WANG G L, *et al.*. Characterization of  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  crystal on third-harmonic generation [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2012,41(4):849-852. (in Chinese)
- [20] 李港. 激光频率的变换与扩展—实用非线性光学技术 [M]. 北京:科学出版社, 2005.  
LI G. *Transformation and Expansion of Laser Frequency—Practical Nonlinear Optical Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)



王丽荣(1983 -),女,河北石家庄人,博士,副研究员,2012年于中国科学院理化技术研究所获得博士学位,主要从事非线性光学晶体光学性能表征、激光频率变换及激光光源等的研究。

E-mail: lrwang@mail.ipc.ac.cn



王晓洋(1967 -),男,江苏镇江人,硕士,正高级工程师,2002年于武汉理工大学获得硕士学位,主要从事功能晶体的研究。

E-mail: xywang@mail.ipc.ac.cn