

CsB₃O₅ 晶体高效三倍频产生 28.3 W 355 nm 激光

谢仕永 鲁远甫 张小富 乐小云 杨程亮 王保山 许祖彦

28.3 W 355 nm laser generated by efficient third-harmonic in CsB₃O₅ crystal

Xie Shi-Yong Lu Yuan-Fu Zhang Xiao-Fu Le Xiao-Yun Yang Cheng-Liang Wang Bao-Shan
Xu Zu-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 184203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.184203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.184203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

160W 端面抽运正支混合腔板条激光器的研究

160 W laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ slab laser with positive branch hybrid resonator

物理学报.2016, 65(19): 194206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194206>

用于汤姆孙散射诊断的高重频高光束质量焦耳级 Nd:YAG 纳秒激光器

High repetition rate and high beam quality joule level Nd: YAG nanosecond laser for Thomson scattering diagnosis

物理学报.2016, 65(15): 154204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154204>

高功率激光终端 KDP 晶体非共线高效三倍频及远场色分离方案数值模拟分析

Numerical simulation analysis of high efficient SFG and color separation in far field in high power laser facility based on noncollinear phase matching by KDP crystal

物理学报.2016, 65(14): 144202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144202>

热退火、激光束和电子束等作用对纳米硅制备及其局域态发光特性的影响

Effects of thermal annealing, laser and electron beam on the fabrication of nanosilicon and the emission properties of its localized states

物理学报.2016, 65(10): 104202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104202>

周期极化 KTiOPO₄ 晶体和频单块非平面环形腔激光产生连续单频 589nm 黄光

Continuous-wave single-frequency 589 nm yellow laser generated from sum frequency of single-block non-planar ring cavity laser in periodically poled KTiOPO₄ crystal

物理学报.2016, 65(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094203>

CsB₃O₅ 晶体高效三倍频产生 28.3 W 355 nm 激光*

谢仕永¹⁾²⁾ 鲁远甫^{3)†} 张小富¹⁾ 乐小云¹⁾ 杨程亮²⁾
王保山⁴⁾ 许祖彦⁴⁾

1) (北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

3) (中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055)

4) (中国科学院理化技术研究所, 激光物理与技术研究中心, 北京 100190)

(2016年4月26日收到; 2016年7月1日收到修改稿)

利用 CsB₃O₅ (CBO) 晶体对 Nd:YAG 声光调 Q 准连续 1064 nm 激光的高效三倍频效应获得高功率 355 nm 激光输出. 1064 nm 激光采用大功率脉冲式半导体激光 (LD) 列阵侧面抽运 Nd:YAG 晶体的主振荡-功率放大 (MOPA) 系统实现 210 W 的调 Q 准连续输出, 激光以 1 kHz 脉冲串方式运转, 每个脉冲串包含 5 个调 Q 脉冲, 单脉冲宽度为 40 ns. 经 I 类 LiB₃O₅ (LBO) 晶体倍频产生 98 W 532 nm 绿光. 通过 30 mm 长的 II 类 CBO 晶体对 1064 nm 与 532 nm 光和频获得 28.3 W 的 355 nm 紫外光, 相应的三倍频转换效率为 13.5%, 比相同条件下 II 类 LBO 晶体高 28.6%. 研究了 CBO 三倍频产生 355 nm 光的温度敏感特性, 得到其温度带宽为 25 °C, 远大于 LBO 晶体的 4 °C. 实验证明, CBO 晶体在三倍频产生 355 nm 的转换效率和温度不敏感性方面均优于 LBO 晶体.

关键词: 355 nm 激光, CsB₃O₅ 晶体, 三倍频, 温度带宽

PACS: 42.55.-f, 42.70.Mp, 42.65.-k, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.65.184203

1 引言

355 nm 紫外激光由于具有波长短、单光子能量高、分辨率高等优点而被广泛应用于激光雷达、生物荧光医学、细微加工、激光标记及激光烧蚀等领域^[1-6]. 此外, 355 nm 激光可作为激发源用于研究蓝光发射材料^[7,8], 为实现红绿蓝三基色全色显示起到极大推动作用. 通过非线性光学晶体对激光介质中 Nd³⁺ 的 ${}^2F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 能级跃迁产生的 1064 nm 激光三倍频是目前获取 355 nm 紫外激光最高效便捷的方法. LiB₃O₅ (LBO) 晶体具有优秀的紫外透光性能和高的抗激光损伤能力, 且

在高功率下长时间工作无灰迹效应, 常被用作三倍频晶体产生高功率 355 nm 激光^[9-11]. 与 LBO 晶体相比, 同样以 B₃O₇ 基团为基本结构单元的 CsB₃O₅ (CBO) 晶体除了具有以上优点外, 其三倍频产生 355 nm 光时具有更高的非线性系数^[12], 因而受到广泛关注. Kitano 等^[13] 使用 CBO 晶体 II 类相位匹配和频纳秒 Nd:YVO₄ 激光的基频与二次谐波获得 3 W 的三次谐波输出; Guo 等^[14] 通过 CBO 晶体三倍频锁模 Nd:YVO₄ 激光产生 5.4 W 的 355 nm 皮秒激光; Wu 等^[15] 利用 16 mm 长的 CBO 对 133 W 的纳秒 Nd:YAG 激光三倍频输出了 17.7 W 的 355 nm 紫外光, 相应三次谐波转换效率

* 应用光学国家重点实验室开放基金、国家自然科学基金 (批准号: 61205101) 和深圳市科技计划 (批准号: GJHZ20140417-113430592, JCYJ20140417113130693, JCYJ20150925163313898) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yf.lu@siat.ac.cn

达到13.3%，为同条件下LBO晶体的2倍。

温度变化会引起非线性光学晶体折射率发生改变，进而导致相位失配而影响变频效率，因此温度敏感性是非线性晶体的一个重要特性。2013年，Zhang等^[16]利用自准直法精确测量了CBO晶体折射率温度系数，而CBO三倍频产生355 nm光的温度带宽却未见报道。本文利用CBO晶体对Nd:YAG声光调Q准连续1064 nm激光的高效三倍频效应获得高功率355 nm激光输出，并对CBO晶体三倍频产生355 nm的温度敏感性进行了研究。采用大功率脉冲式半导体激光(LD)列阵侧面抽运Nd:YAG晶体的主振荡-功率放大(MOPA)系统获得平均功率210 W的1064 nm基频光，光为1 KHz脉冲串输出，每个脉冲串中含有5个调Q脉冲，单脉冲宽度为40 ns。I类LBO晶体和II类CBO晶体分别用于倍频和三倍频1064 nm激光，最终获得28.3 W的355 nm紫外光输出，相应的三倍频转换效率达到13.5%，比相同条件下II类LBO晶体的三倍频效率高28.6%。研究得到CBO三倍频产生355 nm光的温度带宽为25 °C，远大于LBO晶体的4 °C，表明CBO更利于高功率稳定三倍频355 nm激光输出。

2 实验与分析

2.1 实验装置

三倍频Nd:YAG 1064 nm激光获得高功率355 nm激光输出的光路如图1所示，分别包含激光振荡级、放大级、二倍频及三倍频系统，具体包括腔镜M1, M2, 起偏镜M3, 调Q元件Q1, Q2, 激光侧泵模块LM1, LM2, LM3和LM4, 1064 nm 90°

旋光晶体QR1, QR2, 转向镜片M4, M5, 透镜F1, F2及F3, 倍频晶体SHG, 三倍频晶体THG以及分光棱镜P。其中，M1镀1064 nm高反膜，M2为1064 nm振荡器的输出耦合镜，镀1064 nm部分透射膜，M3为1064 nm薄膜偏振片，对1064 nm进行起偏，使得垂直偏振的s光反射，水平偏振的p光透射，从而使输出的1064 nm激光为偏振光。Q1, Q2为声光调Q元件，通过正交放置提高损耗实现高功率Q脉冲激光输出。QR1, QR2分别置于两激光测泵模块之间，用来补偿热致双折射效应。M4, M5镀45° 1064 nm高反膜，用于调整激光出射方向。F1镀1064 nm减反膜，对1064 nm光发散以匹配抽运模块LM4的热透镜效应。F2镀1064 nm减反膜，将MOPA输出的1064 nm激光聚焦至二倍频晶体产生高功率的532 nm绿光。F3为消色差透镜，镀1064与532 nm减反膜，将1064 nm基频与倍频激光聚焦至三倍频晶体产生高功率的355 nm紫外光。分光棱镜P将三波长激光空间分离，实现355 nm激光功率的准确测量。

激光抽运模块是全固态激光器的核心器件，是研制高功率、高光束质量激光的基础。本实验中四个激光抽运模块均采用单线8列808 nm LD五围侧面抽运，其中，LD列阵为脉冲式运转，重复频率为1 kHz，脉冲宽度为200 μs，单巴平均功率最大为5 W，脉冲式LD一方面增大了抽运强度有利于获得高能量脉冲激光，另一方面20%的占空比相对于连续抽运方式改善了激光器的热效应，有利于热管理，从而获得高光束质量激光输出。采用的激光晶体为Nd:YAG晶体，形状为棒状。Nd:YAG晶体由于其良好的光学性能与机械性能，成为大功率固体激光器最普遍使用的激光晶体。Nd:YAG棒的尺

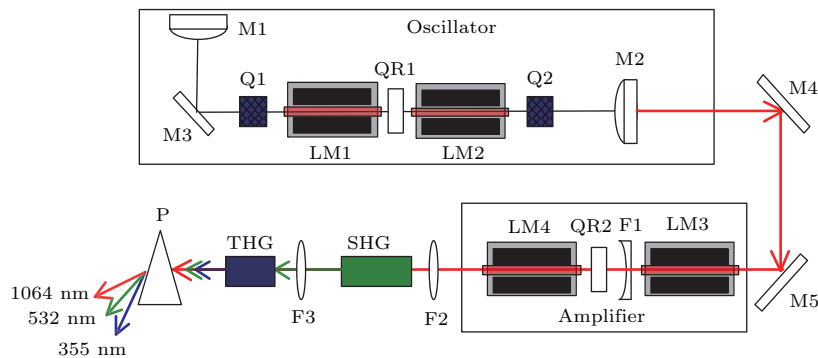


图1 1064 nm MOPA系统及二倍频、三倍频光路图

Fig. 1. Schematic diagram of optical path of 1064 nm MOPA system, second-harmonic and third-harmonic generation.

寸为 $\Phi 4\text{ mm} \times 120\text{ mm}$, Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 0.6%, 使用较低的掺杂浓度可使激光棒中的增益分布更为均匀, 因而可提高光束质量. $\text{Nd}:\text{YAG}$ 棒双面镀 1064 nm 高透膜, 以降低激光棒端面反射损耗. 激光棒放于一石英玻璃管中, 冷却循环水在激光棒和石英管之间高速流动, 以带走抽运过程中产生的废热, 对激光棒进行冷却.

2.2 高功率 1064 与 532 nm 激光研制

1064 nm 振荡腔采用热近非稳腔的设计 [17,18], 即 1064 nm 振荡器运行在激光工作热稳区的边缘接近非稳区的位置, 以使 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 棒获得大的基模半径, 这样一方面可以尽可能多地提取抽运能量, 获得高功率激光输出; 另一方面可利用激光介质本身的横向尺寸起到限模光阑的作用, 抑制高阶模式起振, 获得基横模输出, 有利于提高振荡激光的光束质量. 为了分析腔内光束传输特性和计算模参数, 将激光介质等效为透镜, 并假设透镜中心就在激光棒的中心. 从一根激光棒中心参考面处截断, 展开成一个等效的多元件直腔处理, 采用 $ABCD$ 传输矩阵对谐振腔的模式进行了理论计算. 基于 $ABCD$ 矩阵的基模半径为

$$\omega = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{1/2} |B|^{1/2} \left[1 - \left(\frac{A+D}{2}\right)^2\right]^{-1/4}, \quad (1)$$

其中, ω 为激光棒中心的基模半径, λ 为激光波长, A , B 和 D 分别是 $ABCD$ 矩阵的对应元素. 通过模拟计算得到随着腔镜 M_1 , M_2 曲率半径的减小, 一方面, 稳区左移, 意味着激光器在稳区工作时可以获得的最大抽运功率逐渐提高, 输出激光功率也会不断增大; 另一方面, 稳区内基模光斑半径逐渐变大, 更有利于提高输出激光光束质量. 测试了激光棒在最大抽运功率下热透镜焦距为 350 mm, 此时腔镜曲率半径取为 -500 mm 激光器正好运行在热近非稳区, 因此腔镜 M_1 , M_2 选用曲率半径为 -500 mm 的平凸镜.

在 808 nm LD 抽运功率 400 W 时, 获得平均功率 82 W 的调 Q 1064 nm 偏振激光输出, 相应的光-光转换效率为 20.5%. 声光 Q 开关以 25 kHz 运转, 通过准连续 LD 驱动源的脉冲同步输出信号对声光 Q 射频信号进行触发, 从而保证在每一个 LD 抽运脉冲时间 (200 μs) 内可以获得 5 个 Q 脉冲激光输出. 与每个抽运脉冲只调 Q 一次产生单脉冲激光

输出相比, 调 Q 脉冲串运转方式一方面缩短了激光增益累积时间从而可以减少上能级粒子自发辐射造成的损耗, 提高了输出激光平均功率; 另一方面对于脉冲串中的每一个 Q 脉冲, 较短的抽运累积时间意味着较低的增益, 产生的 Q 单脉冲能量较低和脉冲宽度较宽, 从而降低了激光的峰值功率, 避免激光器件的损伤. 1064 nm 激光脉冲波形通过一硅光电探测器 (DET10 A, Thorlabs) 和示波器 (DPO 4104, Tektronix) 进行测量, 测量结果如图 2 所示. LD 以 1 kHz 重复频率抽运时, 1064 nm 激光为脉冲串输出, 每个抽运脉冲时间内在声光调 Q 作用下产生 5 个 1064 nm 调 Q 脉冲, 如图 2(a) 所示, 测量得到的单脉冲宽度为 40 ns, 如图 2(b) 所示.

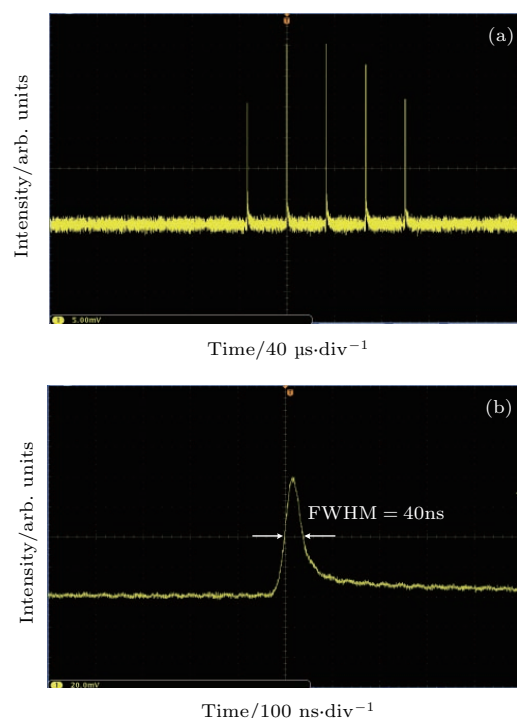


图 2 1064 nm 激光脉冲波形 (a) 脉冲串; (b) 单个脉冲
Fig. 2. Pulse waveform of 1064 nm laser: (a) Pulse train; (b) single pulse.

为了获得更高功率的 1064 nm 激光, 采用了 MOPA 系统对振荡级输出激光进行功率放大. 放大级抽运电源由振荡级抽运电源同步触发. 一平凸镜置于放大级两抽运模块之间对 1064 nm 激光整形, 一方面防止激光经放大级前一个抽运模块后聚焦导致损伤后一个抽运模块中的激光晶体; 另一方面用于模式匹配后一个抽运模块以提高抽运功率提取效率. 在放大级以 400 W 功率抽运时, MOPA 系统最大输出功率为 210 W, 相应的能量提取效率为 32%.

非临界相位匹配技术由于对于非常光没有走离效应从而可以采用较长的非线性晶体实现高效的二倍频. 本实验采用非临界位相匹配的LBO作为倍频晶体, 晶体尺寸为5 mm × 5 mm × 40 mm, 前后通光面均镀有1064与532 nm减反膜. 晶体放置在控温精度为±0.1 °C的温控炉中进行控温, 当晶体温度为146.8 °C时获得了98 W 532 nm绿激光. 同时还研究了LBO倍频产生532 nm的温度敏感型, 532 nm绿光输出功率随温度变化的归一化曲线如图3所示, 可以看出LBO二倍频功率随温度变化很敏感, 温度带宽仅为1.3 °C, 可见精密温控是实现绿激光稳定输出的重要条件.

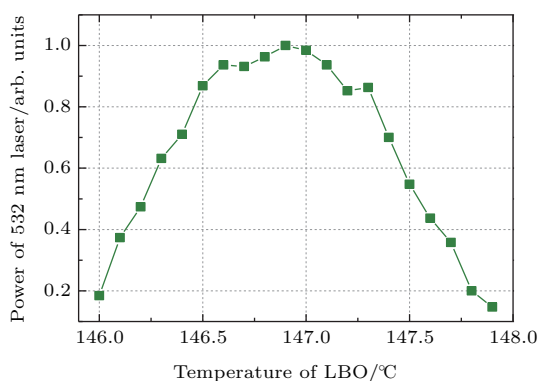


图3 532 nm绿光归一化功率随温度变化曲线
Fig. 3. Variation curve of 532 nm normalized power with temperature of LBO.

2.3 高功率355 nm紫外激光产生

CBO三倍频晶体按照II类相位匹配方向切割, CBO晶体的规格参数如下: 1) 5 mm × 5 mm × 20 mm通光面未镀膜; 2) 5 mm × 5 mm × 30 mm通光面未镀膜; 3) 5 mm × 5 mm × 30 mm前通光面镀0°高透1064与532 nm膜, 后通光面镀0°高透355 nm膜. 实验比较了以上3类CBO晶体的三倍频性能, 如图4所示. 首先, 对于未镀膜的CBO晶体, 长度20和30 mm时三倍频产生的355 nm激光最高功率分别为20.5和25.6 W, 可以看出CBO晶体长度的增加有利于提高三倍频效率. 然后比较了相同长度下镀膜及未镀膜CBO晶体的355 nm激光最大输出功率, 在长度为30 mm时紫外光功率分别为28.3和25.6 W, 显然镀膜的CBO晶体三倍频转换效率高, 而两个晶体产生355 nm光的斜效率基本一致, 分别为14.4%和12.7%, 表明未镀膜的CBO晶体前后通光面引入了入射激光及三倍频激光的菲涅耳反射损耗, 在相同的抽运条件下三倍频

输出功率会偏低. 通过以上实验比较得出, 在基频光功率为210 W时, 利用镀膜的30 mm长CBO产生的355 nm紫外光功率最高, 为28.3 W, 相应的三倍频效率为13.5%.

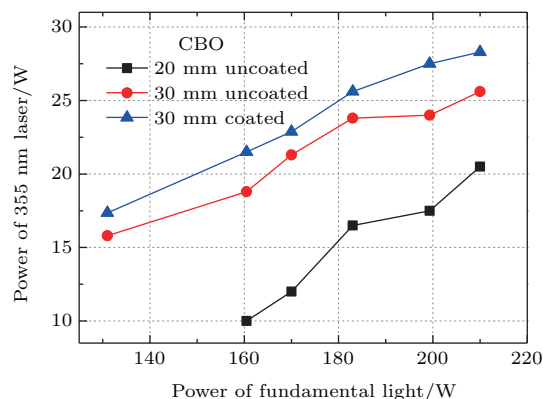


图4 不同类型CBO晶体三倍频输出功率曲线
Fig. 4. Curve of output power of third-harmonic generation by different types of CBO crystals.

用同样尺寸及膜系的II类相位匹配方向切割的LBO三倍频晶体作为比较, 355 nm输出功率见图5. 在最大抽运功率时CBO及LBO三倍频功率分别为28.3和22 W, 转换效率分别为13.5%和10.5%, CBO三倍频转换效率比LBO高28.6%. CBO及LBO三倍频斜效率分别为14.4%和11.2%, CBO三倍频斜效率比LBO高28.6%. 实验中CBO晶体三倍频转换效率与斜效率均高于LBO晶体, 可归结为在II类相位匹配条件下, CBO三倍频的有效非线性系数为1.15 pm/V, 高于LBO的0.75 pm/V^[13], 因此CBO晶体更易实现高功率355 nm紫外激光.

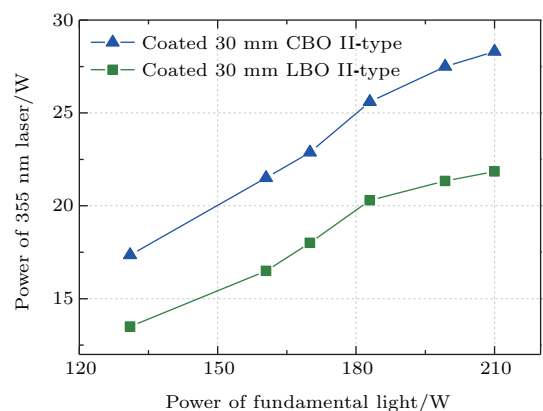


图5 CBO/LBO三倍频输出功率比较
Fig. 5. Comparison of output power of third-harmonic generation for CBO and LBO crystal.

在某一波长下, 非线性晶体的折射率与温度的关系可以表示为^[16]

$$n = n_0 + \frac{dn}{dT} (T - T_0), \quad (2)$$

其中, n 为温度是 T 时的折射率, n_0 为温度是 T_0 时的折射率, dn/dT 为折射率温度系数. 从 (2) 式可以看出, 当晶体温度发生改变时, 相应的折射率也会改变, 进而导致相位失配而影响变频效率, 因此温度敏感性是非线性晶体的一个重要特性. 实验测试了 CBO 及 LBO 三倍频输出功率随温度变化的曲线, 如图 6 所示. 图 6 (a) 为 CBO 晶体三倍频产生的 355 nm 激光归一化功率随温度变化的曲线, 在晶体温度 140 °C 时输出 355 nm 激光功率最高, 当调低或调高晶体温度时都会导致三倍频效率下降, 在 355 nm 激光功率下降至最高值的一半时对应的晶体温度分别为 128 和 153 °C, 即温度带宽为 25 °C; 同样的, LBO 晶体三倍频 355 nm 激光归一化功率随温度变化的曲线如图 6 (b) 所示, 在 355 nm 激光功率下降至最高值的一半时对应的

晶体温度分别为 75 和 79 °C, 相应的温度带宽为 4 °C. 通过比较发现, CBO 三倍频的温度带宽是 LBO 的 6 倍多, CBO 更利于高功率稳定三倍频 355 nm 激光输出, 从实际应用产业化的角度而言, 输出功率随温度变化越不敏感即温度带宽越宽越利于实用.

3 结 论

在热近非稳腔运转条件下, 采用大功率脉冲式 LD 列阵侧面抽运 Nd:YAG 晶体的 MOPA 系统获得平均功率 210 W 的 1064 nm 基频光, 光为 1 kHz 脉冲串输出, 每个脉冲串包含 5 个调 Q 脉冲, 单脉冲宽度为 40 ns. 经 I 类 LBO 晶体倍频产生 98 W 532 nm 绿光. 实验了 3 类不同 CBO 晶体的三倍频性能, 比较得出利用镀膜的 30 mm 长 CBO 产生的 355 nm 紫外光功率最高, 为 28.3 W, 相应的三倍频效率为 13.5%, 比相同条件下 II 类 LBO 晶体的三倍频效率高 28.6%. 实验研究了 CBO 与 LBO 晶体三倍频的温度敏感型, 相应的温度带宽分别为 25 °C 和 4 °C, 从实际应用产业化的角度而言, CBO 更利于高功率稳定三倍频 355 nm 激光输出. 实验证明, CBO 晶体在三倍频产生 355 nm 的转换效率和温度不敏感性方面均优于 LBO 晶体.

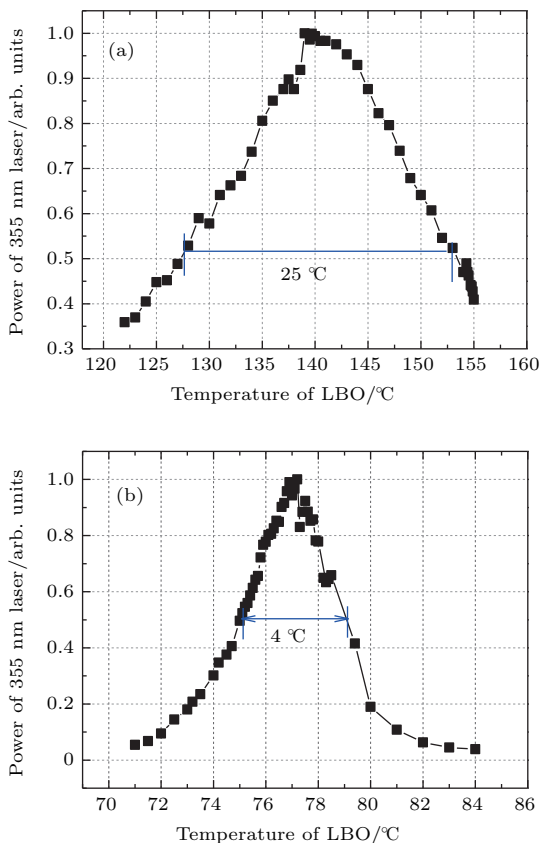


图 6 (a) CBO 三倍频温度带宽; (b) LBO 三倍频温度带宽
Fig. 6. (a) Temperature bandwidth of third-harmonic generation by CBO crystal; (b) temperature bandwidth of third-harmonic generation by LBO crystal.

参考文献

- [1] Jing M, Hua D X, Le J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 070704 (in Chinese) [景敏, 华灯鑫, 乐静 2016 物理学报 **65** 070704]
- [2] Drakaki E, Dessinioti C, Stratigos A J, Salavastru C, Antoniou C 2014 *J. Biomed. Opt.* **19** 030901
- [3] Itoh S, Sakakura M, Shimotsuma Y, Miura K 2015 *Appl. Phys. B* **119** 519
- [4] Zhang F, Duan J, Zeng X Y, Li X Y 2010 *Infrared and Laser Engineering* **39** 143 (in Chinese) [张菲, 段军, 曾晓雁, 李祥友 2010 红外与激光工程 **39** 143]
- [5] Ryoo K, Kim M, Sung J, Kim K, Kang M 2015 *J. Mech. Sci. Technol.* **29** 365
- [6] Bao L D, Han J H, Duan T, Sun N C, Gao X, Feng G Y, Yang L M, Niu R H, Liu Q X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 197901 (in Chinese) [包凌东, 韩敬华, 段涛, 孙年春, 高翔, 冯国英, 杨李茗, 牛瑞华, 刘全喜 2012 物理学报 **61** 197901]
- [7] Shi L F, Chen Q, Yang P, Li B, Wang Y X, Zhang L J, Ye Y Y 2014 *Chinese Journal of Luminescence* **35** 926 (in Chinese) [史林芳, 陈倩, 杨平, 李兵, 王雨香, 张丽君, 叶媛媛 2014 发光学报 **35** 926]

- [8] Zhao S L, Hou Y B, Xu Z 2006 *Chinese Journal of Luminescence* **27** 191 (in Chinese) [赵谔玲, 侯延冰, 徐征 2006 发光学报 **27** 191]
- [9] Gapontsev V P, Tyrtyshtnyy V A, Vershinin O I, Davydov B L, Oulianov D A 2013 *Opt. Express* **21** 3715
- [10] Cole B, Hays A, McIntosh C, Goldberg L 2013 *Proc. SPIE* **8599** 85991L
- [11] Liu H, Gong M L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7000 (in Chinese) [刘欢, 巩马理 2009 物理学报 **58** 7000]
- [12] Wu Y C, Fu P Z, Wang J X, Xu Z Y, Zhang L, Kong Y F, Chen C T 1997 *Opt. Lett.* **22** 1840
- [13] Kitano H, Matsui T, Sato K, Ushiyama N, Yoshimura M, Mori Y, Sasaki T 2003 *Opt. Lett.* **28** 263
- [14] Guo L, Wang G L, Zhang H B, Cui D F, Wu Y C, Lu L, Zhang J Y, Huang J Y, Xu Z Y 2007 *Appl. Phys. B* **88** 197
- [15] Wu Y C, Chang F, Fu P Z, Chen C T, Wang G L, Geng A C, Bo Y, Cui D F, Xu Z Y 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1426
- [16] Zhang G C, Liu S S, Huang L X, Zhang G, Wu Y C 2013 *Opt. Lett.* **38** 1594
- [17] Wang P Y, Xie S Y, Bo Y, Wang B S, Zuo J W, Wang Z C, Shen Y, Zhang F F, Wei K, Jin K, Xu Y T, Xu J L, Peng Q J, Zhang J Y, Lei W Q, Cui D F, Zhang Y D, Xu Z Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 094208
- [18] Wang P Y 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王鹏远 2014 博士学位论文 (北京: 中科院理化技术研究所)]

28.3 W 355 nm laser generated by efficient third-harmonic in CsB₃O₅ crystal*

Xie Shi-Yong¹⁾²⁾ Lu Yuan-Fu^{3)†} Zhang Xiao-Fu¹⁾ Le Xiao-Yun¹⁾ Yang Cheng-Liang²⁾
Wang Bao-Shan⁴⁾ Xu Zu-Yan⁴⁾

1) (School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

2) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

3) (Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

4) (Research Center for Laser Physics and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 26 April 2016; revised manuscript received 1 July 2016)

Abstract

Ultraviolet laser operating at 355 nm has been found to have wide applications in scientific and industrial fields of laser radar, biological fluorescence medicine, micro processing, laser marking and laser ablation, owing to its superior properties of short wavelength, high single-photon energy, and high resolution. In addition, 355 nm laser plays a vital role in promoting the development of RGB full color display because it can be used as an excitation source for investigating the blue light emitting materials.

LiB₃O₅ (LBO) crystal possesses relatively high nonlinear coefficient and high optical damage threshold. Therefore, it is generally employed to generate 355 nm light through the third harmonic generation (THG) of the Nd:YAG laser (1064 nm). However, the CsB₃O₅ (CBO) crystal, which also belongs to B₃O₇ group has attracted more attention for its larger nonlinear coefficient.

The temperature sensitivity is another important characteristic of the nonlinear crystal. Temperature fluctuation can cause the variation of refractive index of nonlinear optical crystal, which leads to phase mismatch and thus affects the nonlinear conversion efficiency. The principal refractive index of CBO crystal was accurately measured using the auto-collimation method in a temperature range from 40 to 190 °C for the first time by Zhang *et al.* in 2013 [Zhang G C, *et al.* 2013 *Opt. Lett.* **38** 1594], while the temperature bandwidth of CBO for 355 nm THG has not been reported.

In the present paper, a high-power 355 nm laser is produced by efficient THG of an acousto-optic Q-switched quasi-continuous wave 1064 nm laser in CBO crystal. The master-oscillation power-amplification (MOPA) system with Nd:YAG crystal which is side pumped by high-power pulsed laser diode (LD) array delivers 210 W of a quasi-continuous Q-switched 1064 nm laser power. The laser operates at a 1 kHz repetition rate, and each pulse train contains five Q-switched pulses each with a duration of 40 ns. The 98 W of 532 nm green light is produced by second-harmonic generated in type-I LBO crystal. The 28.3 W ultraviolet laser is achieved by a 30-mm type-II CBO crystal through the sum frequency of 1064 nm and 532 nm light. The conversion efficiency from the fundamental light to the third harmonic reaches 13.5%, which is 28.6% higher than that obtained with a type-II LBO crystal under the same experimental conditions. The temperature sensitivity of CBO crystal in the 355 nm THG process is studied. Its temperature bandwidth is 25, which is much broader than that of LBO crystal. The experimental results show that the CBO crystal is superior to LBO crystal in the sense of conversion efficiency and temperature sensitivity for THG of 355 nm.

Keywords: 355 nm laser, CsB₃O₅ crystal, third-harmonic generation, temperature bandwidth

PACS: 42.55.-f, 42.70.Mp, 42.65.-k, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.65.184203

* Project Supported by the State Key Laboratory of Applied Optics, China, the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61205101), and the Science and Technology Project of Shenzhen, China (Grant Nos. GJHZ20140417113430592, JCYJ20140417113130693, JCYJ20150925163313898).

† Corresponding author. E-mail: yf.lu@siat.ac.cn