

# 1 110 nm Nd:GGG 激光器与 555 nm 倍频激光器

周景涛<sup>1</sup>, 黄敬霞<sup>2</sup>, 李 莉<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院 车辆与电气工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 采用紧凑的直腔设计和精确的膜系设计, 实现了 LD 侧面泵浦 1 110 nm Nd:GGG 和腔内倍频的 555 nm 激光。当泵浦功率为 168 W 时, 得到了 25.5 W 的 1110 nm 连续激光输出。在 10 kHz 的声光调 Q 情况下, 应用 II 类非临界相位匹配 LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>(LBO)倍频晶体, 得到了最大输出功率为 3.1 W 的 555 nm 倍频光输出, 光-光转换效率为 1.8%, 相应的脉冲宽度为 176 ns, 在水平和竖直方向上的  $M^2$  因子分别为 19.6 和 21.3。

**关键词:** 555 nm 激光; Nd:GGG 晶体; LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 晶体

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0867-05

## Nd:GGG laser at 1 110 nm and frequency-doubled laser at 555 nm

Zhou Jingtao<sup>1</sup>, Huang Jingxia<sup>2</sup>, Li Li<sup>2</sup>

(1. Department of Vehicle and Electric Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** A high-power diode-side-pumped 1 110 nm Nd:GGG laser and a laser at 555 nm based on intracavity frequency doubling of 1 110 nm laser were demonstrated for the first time. A simple straight cavity scheme was employed to achieve a compact configuration and all the coatings were designed specially. A 25.5 W 1 110 nm laser continuous wave output was achieved under the incident pump power of 168 W. A LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> (LBO) crystal was used for second harmonic generation of the laser. As a result, at the pump power of 168 W, the maximum power of the frequency-doubled output at 555 nm was found to be 3.1 W with a pulse repetition rate of 10 kHz, corresponding to an optical-to-optical conversion efficiency of about 1.8%. And the pulse width of 555 nm wave was 176 ns. The  $M^2$  factors are measured to be 19.6 and 21.3 in the horizontal and vertical directions, respectively.

**Key words:** 555 nm laser; Nd:GGG crystal; LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> crystal

收稿日期: 2014-07-05; 修订日期: 2014-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(11004122)

作者简介: 周景涛(1981-), 男, 硕士, 主要从事激光物理与技术方面的研究。Email: luori810115@163.com

## 0 引言

555 nm 波长激光在生物和医疗方面有特殊的用途: 血红蛋白在 555 nm 波长处有强烈的吸收峰, 其在探测和检查一氧化碳中毒方面有着重要应用<sup>[1]</sup>; 在毒理学检测方面, 用 555 nm 波长激光可以精确的检测出血液和尿液中的聚乙二醇。另外, 555 nm 波长是人眼最敏感的波长之一, 因此在激光显示和照明等领域有着广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

但是要获得此波长激光并不容易, 目前有 3 种方法: (1) 通过和频方法, 如 Nd:YVO<sub>4</sub> 1 342 nm 与 Nd:YAG 946 nm 激光和频<sup>[3]</sup>, Nd:LuVO<sub>4</sub> 1 343 nm 和 Nd:YAG 946 nm 激光和频<sup>[4]</sup>; (2) 532 nm 激光拉曼频移方法<sup>[5]</sup>; (3) 基频光倍频方法。前两者设计和结构比较复杂, 而第三种方法, 由于缺乏有效的基频激光, 555 nm 黄绿激光并不能像蓝、绿、红光那样容易获得。2010 年, Wang Zhichao 等人通过 Nd:YAG 1 112 nm 激光倍频获得了 556 nm 激光<sup>[6]</sup>, 与 555 nm 波长相差 1 nm。2011 年, Yu Haohai 等人首次报道了 Nd:YGG 1 110 nm 的连续激光<sup>[1]</sup>, 2012 年 Li YL 等人通过倍频 Nd:YGG 1 110 nm 激光获得了 2.31 W 连续的 555 nm 激光<sup>[7]</sup>。然而作为一种新型激光晶体, 获得优质的 Nd:YGG 还需进一步完善生长工艺, 在一定程度上制约了其应用。

文中利用较为成熟的 Nd:GGG<sup>[8-9]</sup> 晶体来达到这一目的, 其在固体热容激光方面已经有了重要应用, 除了已经大量报道的 1 062 nm<sup>[10-11]</sup>, 1 331 nm<sup>[12-13]</sup> 和 938 nm<sup>[14-15]</sup> 激光输出外, 其在 1 110 nm 处还有一较弱的发射峰。该的研究小组曾研究了 LD 侧面泵浦 Nd:GGG 晶体在 1 105 nm 和 1 110 nm 双波长激光运转特性<sup>[16]</sup>。但利用 Nd:GGG 倍频获得 555 nm 激光还未见报道, 文中经过膜系精确设计, 利用 LD 侧面泵浦 Nd:GGG 使之输出 1 110 nm 单一波长, 并以 LBO 为倍频晶体, 最终获得 555 nm 激光。基频光连续输出达到了 25.5 W (而已经报道的 Nd:YGG 1 110 nm 连续激光是 2.1 W<sup>[1]</sup>), 在调 Q 重复频率为 10 kHz 时, 555 nm 倍频光达到了 3.1 W (而已经报道的 Nd:YGG 倍频连续激光是 2.1 W<sup>[7]</sup>), 这是目前 555 nm 激光报道的最高输出功率。

## 1 实验装置

555 nm LD 侧泵 Nd:GGG 倍频激光器实验装置如图 1 所示。Laser head 侧泵激光头 (Northrop Grumman, USA) 中 3 组激光二极管阵列模块平均分布在 Nd:GGG 激光棒 (1.0 at. %,  $\phi 3$  mm $\times$ 62 mm) 侧面, 二极管的最大功率为 180 W, 中心波长为 808 nm, Nd:GGG 晶体两端镀 1 062 nm 增透膜 ( $T > 99.8\%$ )。谐振腔的后腔镜是 (RM) 平-凸镜, 凸面曲率半径为 800 mm, 镀有 1 110 nm 高反膜 ( $R > 99.8\%$ ) 和 1 062 nm、1 331 nm 增透膜 ( $T > 98\%$ ), 保证 1 110 nm 激光振荡, 同时抑制 1 062 nm 和 1 331 nm 激光振荡。在参考文献 [16] 中除了 1 110 nm 波长, 还出现了 1 105 nm 波长, 要使 1 110 nm 激光振荡, 又抑制 1 105 nm 激光振荡是有一定难度的, 因为这两个波长距离太近。参考文献 [16] 插入一合适角度的玻璃片, 能够起到 F-P 标准具的作用, 使得 1 105 nm 光波损耗大于 1 110 nm 光波, 从而抑制了 1 105 nm 激光。实际上, 对于这种情况, 输出镜对 1 105 nm 波的透过率比 1 110 nm 波的透过率大到超过 2% 时, 便使得 1 105 nm 波损耗大于 1 110 nm 波而不能起振<sup>[17-19]</sup>。实验中输出镜 (OC) 是平-平镜, 镀膜对 1 110 nm 和 1 105 nm 的反射率分别为大于 99.8% 和大于 97.8%, 对 555 nm 部分透射 ( $T > 80\%$ )。M1 是一耦合镜, 镀膜对 555 nm 高反 ( $R > 99.8\%$ ), 对 1 110 nm 高透 ( $T > 99.5\%$ ), 这样使得倍频波在相对较短的腔内产生并输出, 减少损耗。声光开关 AO 为声光 Q 开关 (Gooch and Housego, U.K.) 晶体长度 46 mm, 两端镀 1 062 nm 增透膜 ( $T > 99.8\%$ ), 驱动源中心频率 27.12 MHz, 功率 50 W。所用 LBO 晶体 ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 8.4^\circ$ ) 的尺寸为 2 mm $\times$ 2 mm $\times$ 10 mm, 按

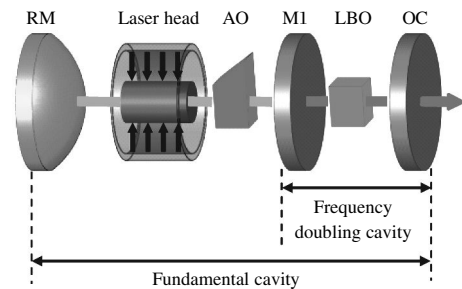


图 1 LD 侧面泵浦 Nd:GGG/LBO 腔内倍频 555 nm 激光器装置图

Fig.1 Schematic diagram of the intracavity frequency doubling

Nd:GGG/LBO laser at 555 nm

II 类非临界相位匹配应用。LBO 晶体两端镀有对 1 110 nm 和 555 nm 的增透膜( $T > 99.8\%$ )。侧泵模块和声光开关均通水冷却,水温分别控制在 24℃、19℃;LBO 晶体用铝箔包裹并放入通水的紫铜块中,水温控制在 19℃。为了获得尽量紧凑的激光器结构,所有元件尽量靠近。最终,基频光腔长 240 mm,倍频光腔长 40 mm。

实验中,为了测量倍频光的功率和时间特性,用了一个分光镜,其镀膜对 1 110 nm 高反,对 555 nm 高透。该实验中所有镜片均由 4 mm 厚的 K9 玻璃制成。输出激光的功率、光谱特性、光束质量因子( $M^2$  因子)分别用 EPM 2000 功率计 (Coherent Inc., U.S.A)、AQ 6315A 光谱仪(Yokogawa, Japan)和 NanoScan 光束分析仪(Photons Inc., U.S.A)检测。测量时间特性时,使用 TDS 5052B 数字存储示波器(Tektronix Inc., U.S.A)和快响应 p-i-n 光电二极管。

## 2 实验结果及分析

首先研究了侧泵 Nd:GGG 1 110 nm 基频光的输出特性。实验中用到了另外一个输出镜(平-平镜),其镀膜对 1 110 nm 和 1 105 nm 的透过率分别为 2% 和 4%,测量基频光输出特性时,在光路中移掉 LBO 倍频晶体。实验结果如图 2 所示,连续工作状态下,阈值为 45.3 W;泵浦功率为 168 W 时,输出最高功率 25.5 W,斜效率为 21.7%。调 Q 工作状态时,随着重复频率的降低,输出功率降低;在重复频率为 5 kHz、10 kHz、20 kHz 时,对应的输出最高功率分别为 17.6 W、12.9 W、9.6 W。基频光的光谱如图 3 所示,图 3 中只有一个波长为 1 110.0 nm 的光谱,说明 1 105 nm 激光已被压制。

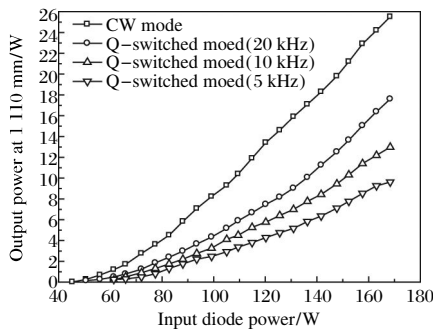


图 2 1 110 nm 基频光输出功率随着 LD 泵浦功率的关系  
Fig.2 Output power of 1 110 nm laser versus incident pump power

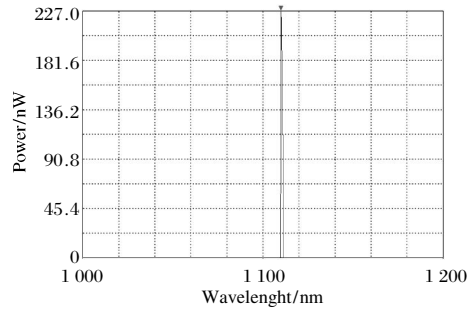


图 3 最大输出功率时的 1 110 nm 基频光的光谱图  
Fig.3 Optical spectrum of 1 110 nm laser at the highest output power

为了确定 555 nm 激光的最佳工作重复频率,测量了 555 nm 激光随着重复频率的变化关系。为了不损伤器件,泵浦功率确定为 140 W,图 4 给出了泵浦功率为 140 W 时的变化曲线,可见重频为 10 kHz 时倍频光功率最高。原因如下:当泵浦功率一定时,输出功率与声光 Q 开关重频变化的关系就有一个最佳值。当低于这个最佳值时,基频光单脉冲能量较大,峰值功率较大,倍频效率较大,随着重频增加,倍频光功率增加;当高于这个最佳值时,由于泵浦功率没有变化,随着脉冲个数变多,基频光单脉冲能量变小,峰值功率变小,倍频效率下降,虽然脉冲个数多了,整体倍频光输出功率下降。后面数据测量均在重复频率为 10 kHz 时进行。重复频率为 10 kHz 时,倍频光随着泵浦功率的变化如图 5 所示,阈值为 45.8 W,泵浦功率为 168 W 时,输出最高功率 3.1 W,光-光转换效率是 1.8%。最大输出功率时的倍频光的光谱如图 6 所示,图中显示倍频光的光谱为 555.4 nm。

图 7 和图 8 给出了脉冲激光的时间特性。从图 7 可见,重复频率为 10 kHz 时,脉冲幅度稳定性较好,起伏小于 5%。从图 8 可见,基频和倍频光的脉冲宽

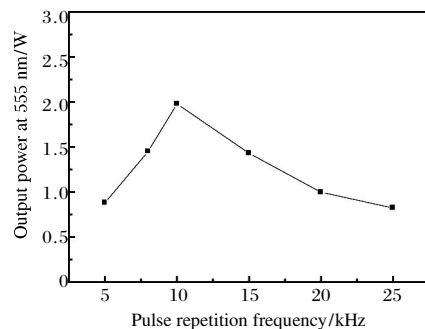


图 4 555 nm 倍频光输出功率随着重复频率的变化关系  
Fig.4 Output power at 555 nm laser versus the pulse repetition rate

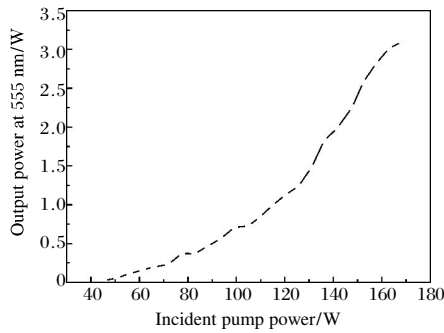


图 5 重复频率为 10 kHz 时 555 nm 激光输出功率随着 LD 泵浦功率的变化关系

Fig.5 Output power at 555 nm versus the incident pump power at a pulse repetition rate of 10 kHz

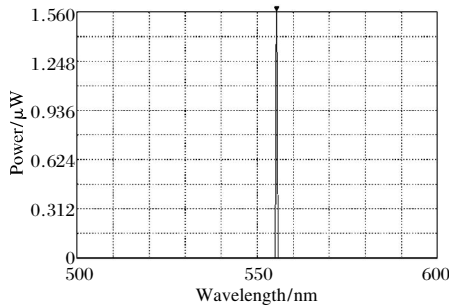


图 6 最大输出功率时 555 nm 倍频光的光谱

Fig.6 Optical spectrum of 555 nm laser at the highest output power

度分别为 214 ns 和 176 ns。

重复频率为 10 kHz 时，基频光和倍频光随着泵浦功率的变化如图 9 所示。随着泵浦功率的增加，脉冲宽度减小，当泵浦光功率从 45.8 W 增加到 168 W 时，基频光的脉宽变化范围为 515~214 ns，倍频光的脉宽变化范围为 420~176 ns。当倍频光脉宽为 176 ns 时，对应的峰值功率和脉冲能量分别为 1.76 kW，0.31 mJ。用 NanoScan 光束质量分析仪对倍频光进行分析，三维和二维光强分布如图 10 所示，测量的  $M^2$

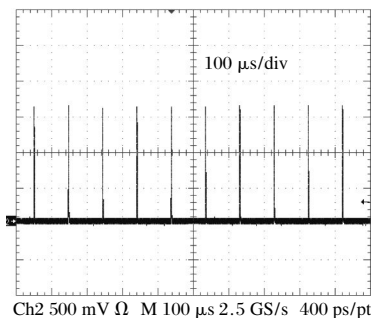


图 7 最大输出功率为 168 W 时的倍频光脉冲幅度变化(重复频率为 10 kHz)

Fig.7 Pulse train of 10kHz pulse repetition rate at the pump power of 168 W

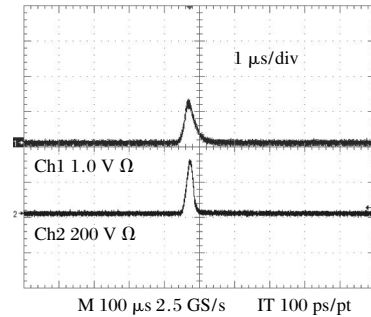


图 8 最大输出功率为 168 W 时基频光和倍频光的脉冲波形

Fig.8 Typical Q-switched pulse at the pump power of 168 W

因子在水平和垂直方向上分别为  $19.6(\pm 0.5)$  和  $21.3(\pm 0.5)$ 。热负载会引起 Nd:GGG 介质的各项异性，因此 Nd:GGG 棒在两个方向上的热透镜焦距不同，导致了在两个方向上的光束质量因子有差异。

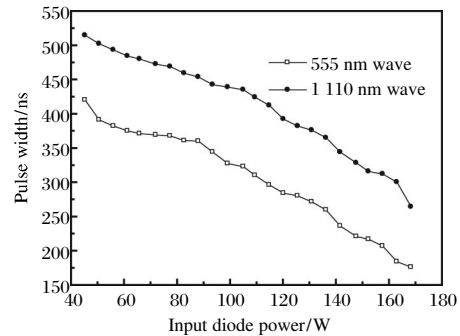


图 9 基频光和倍频光脉冲宽度随着 LD 泵浦功率的变化关系

Fig.9 Pulse widths versus pump power at a pulse repetition rate of 10 kHz

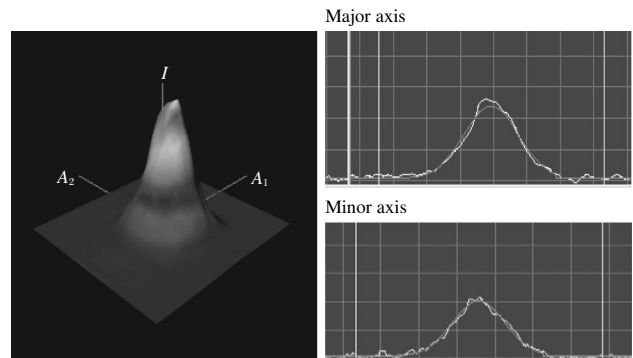


图 10 555 nm 倍频光的三维和二维光强分布

Fig.10 Intensity distribution of the 555 nm beam with the three dimensional distributions and the two dimensional distributions

### 3 结论

实现了 LD 侧泵声光调 Q 的 Nd:GGG/LBO 腔内倍频 555 nm 激光输出。在泵浦功率 168 W、脉冲

重复频率 10 kHz 情况下, 获得了 3.1 W 的倍频光功率, 此时脉冲宽度为 176 ns, 峰值功率为 1.76 kW, LD 泵浦光到倍频光的转换效率为 1.8%。为了进一步提高光-光转换效率, 今后将进一步优化谐振腔的设计和镀膜加工。

#### 参考文献:

- [1] Yu Haohai, Wu Kui, Zhan Huaijin, et al. Nd: YGG crystal laser at 1110 nm: a potential source for detecting carbon monoxide poisoning[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1281–1283. (in Chinese)
- [2] Li C Y, Bo Y, Yang F, et al. A kilowatt level diode-side-pumped QCW Nd: YAG ceramic laser [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(24): 5145–5148. (in Chinese)
- [3] Lv Yanfei, Zhang Xihe, Tan Huiming. 555 nm all solid-state continuous-wave yellow-green laser [J]. *Optics Precision Engineering*, 2007, 15(5): 0674–0678. (in Chinese)
- [4] Wu Y, Zhang X H, Sun G C. All-solid-state doubly resonant sum-frequency mixing laser at 555 nm [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(6): 1074–1077.
- [5] Mildren R P, Convery M, Pask H M, et al. Efficient, all-solid-state, raman laser in the yellow, orange and red [J]. *Macquarie University Research*, 2004, 12(5): 785–790.
- [6] Wang Zhichao, Peng Qinjun, Bo Yong, et al. 60 W yellow laser at 561 nm by intracavity frequency doubling of a diode-pumped Q-switched Nd: YAG laser [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(3): 328–330. (in Chinese)
- [7] Li Y L, Li J H, Liu X H, et al. 555 nm laser sources based on intracavity frequency doubling of Nd: YGG laser [J]. *Solid State and Liquid Lasers*, 2012, 22(3): 527–530.
- [8] Dong Yue, Zu Jifeng, Hou Liqun, et al. Approximate formulas of temperature and stress distributions and thermal induced effects in a heat capacity slab laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, 4(6): 326–328. (in Chinese)
- [9] Zuo C H, Zhang B T, He J L, et al. The acousto-optical Q-switched Nd: GGG laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2008, 5(10): 719–721.
- [10] Zuo Chunhua, He Jingliang, Huang Haitao, et al. Efficient passively Q-switched operation of a diode-pumped Nd: GGG laser with a Cr<sup>4+</sup>: YAG saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(1): 17–20. (in Chinese)
- [11] Li Z Y, Huang H T, He J L, et al. High peak power eye-safe intracavity optical parametric oscillator pumped by a diode-pumped passively Q-switched Nd: GGG laser [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(6): 1302–1306.
- [12] Zuo C H, Zhang B T, He J L, et al. CW and passively Q-switching characteristics of a diode-end-pumped Nd: GGG laser at 1331 nm [J]. *Optical Materials*, 2009, 31(6): 976–979.
- [13] Zuo C H, Zhang B T, Liu Y B, et al. Diode-pumped passively Q-switched and mode-locked Nd: GGG laser at 1.3 μm with V<sup>3+</sup>: YAG saturable absorber [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(8): 1717–1720.
- [14] He Kunna, Gao Chunqing, Wei Zhiyi, et al. Diode-pumped quasi-three-level passively Q-switched Nd: GGG laser with a codoped Nd, Cr: YAG saturable absorber [J]. *Chinese Phys Lett*, 2009, 26(9): 137–139. (in Chinese)
- [15] Huang Haitao, He Jingliang, Zhang Baitao, et al. V<sup>3+</sup>: YAG as the saturable absorber for a diode-pumped quasi-three-level dual-wavelength Nd: GGG laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3352–3357. (in Chinese)
- [16] Zhang X L, Zhang X Y, Wang Q P, et al. LD side-pumped Nd: GGG CW laser operating at 1110 and 1105 nm dual wavelengths and 1110 nm single wavelength [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(6): 1047–1050.
- [17] Zhang S S, Wang Q P, Zhang X Y, et al. High power and highly efficient Nd: YAG laser emitting at 1123 nm [J]. *Laser Physics*, 2009, 19(12): 2159–2162.
- [18] Li C Y, Bo Y, Xu Y T, et al. 219.3 W CW diode-side-pumped 1123 nm Nd: YAG laser [J]. *Optics Communications*, 2010, 283: 2885–2887. (in Chinese)
- [19] Wang Zhichao, Peng Qinjun, Bo Yong, et al. Yellow-green 52.3 W laser at 556 nm based on frequency doubling of a diode side-pumped Q-switched Nd: YAG laser [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(18): 3465–3469.