

LD 端面抽运 Nd : YAG 1338 nm 单波长激光器

甘海波¹, 廖小青¹, 石豪珂¹, 阮秀凯¹, 袁先漳¹, 王鸿雁², 朱海永¹, 段延敏¹

(1. 温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325035; 2. 青岛海泰光电技术有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要:通过 LD 端面抽运 Nd : YAG 激光腔镜膜系的合理设计, 抑制 Nd : YAG 晶体最强跃迁对应的 1064 nm 波长和相邻的 1319 nm 波长的激光振荡, 成功实现了 1338 nm 单波长激光输出。实验中对比了平平和平凹腔型, 研究了连续运转和声光调 Q 模式下的激光输出。连续运转模式时, 在 12.9 W 的抽运功率下, 获得了最高 3.25 W 的 1338 nm 激光输出; 声光调 Q 模式下, 1338 nm 激光的平均输出功率和脉冲宽度随着重复频率的减小而下降。在 12.9 W 的抽运功率下, 当声光调 Q 重复频率从 15 kHz 减少到 5 kHz, 平均输出功率由 2.8 W 降低到 1.9 W, 对应的脉冲峰值功率由 1.7 kW 升高到 5.4 kW。

关键词: Nd : YAG 晶体; 1338 nm 激光; 端面抽运

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.02.010

LD end-pumped Nd : YAG single-wavelength laser at 1338 nm

GAN Hai-bo¹, LIAO Xiao-qing¹, SHI Hao-ke¹, RUAN Xiu-kai¹, YUAN Xian-zhang¹,
WANG Hong-yan², ZHU Hai-yong¹, DUAN Yan-min¹

(1. College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

2. Crystech Inc., Qingdao 266100, China)

Abstract: Through reasonable design of LD end pumped Nd : YAG laser cavity mirror film, laser oscillation of the strongest transition of 1064 nm and the adjacent 1319 nm line were simultaneously suppressed, and single wavelength laser output at 1338 nm was achieved successfully. In the experiment, the plane-plane and plane-concave cavities were compared. The output of 1338 nm single wavelength laser at the continuous-wave mode and the acousto-optic Q-switched mode were studied. For continuous-wave mode, the maximum output power of 3.25 W was obtained at the incident pump power of 12.5 W. For the acousto-optic Q-switched mode, both the average output power and pulse width decreased with the reducing of pulse repetition frequency. Under the incident pump power of 12.9 W, the average output power reduced from 2.8 W to 1.9 W when pulse repetition frequency reduced from 15 kHz to 5 kHz, and the corresponding pulse peak power increased from 1.7 kW to 5.4 kW.

Key words: Nd : YAG crystal; 1338 nm laser; end pump

1 引言

1.3 μm 波段激光处于大气传输的窗口, 而且水吸收系数较大, 所以该波段激光在空间光通信、激光医疗等领域发挥极其重要的作用^[1-2]。此外, 通过 1.3 μm 波段激光倍频是获得红光的重要来源, 在激

光显示、舞台灯光方面也具有重要应用^[3-5]。钕离子掺杂材料的 $^4\text{F}_{3/2} - ^4\text{I}_{13/2}$ 能级跃迁是获得 1.3 μm 波段激光的主要途径^[6]。Nd : YAG 由于较高的热导性能和优异的机械性能, 成为应用最广、最成熟的激光工作物质^[7]。Nd : YAG 材料的 $^4\text{F}_{3/2} - ^4\text{I}_{13/2}$ 跃

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61505147); 浙江省公益技术应用研究项目 (No. 2017C34008, 2015C35017); 浙江省新苗人才计划项目项目; 温州大学实验室开放项目资助。

作者简介: 甘海波 (1995 -), 男, 本科, 主要从事固体激光器的研究。

通讯作者: 段延敏 (1983 -), 女, 博士, 主要从事激光和非线性光学方面研究。E-mail: ymduan12@gmail.com

收稿日期: 2016-06-08

迁包含 R2 - X1 和 R2 - X3 两个较强子跃迁,对应的波长分别为 1319 nm 和 1338 nm。在 Nd : YAG 晶体中,1319 nm 波长激光比 1338 nm 更容易实现单波长激光输出,所以目前针对 $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ 跃迁的激光以 1319 nm 单波长^[8-10]和 1319 nm 与 1338 nm 双波长为主^[11-14]。2000 年,日本 Y. Inoue 等采用两个抽运模块串接,通过标准具选模,在 622 W 抽运下获得了 122 W 1319 nm 单波长激光输出^[15]。2008 年,中国科学院福建物质结构研究所朱海永等报道大功率 LD 侧面抽运获得了 43 W 的 1319 nm 与 1338 nm 双波长激光输出^[16]。2009 年,张戈等首次报道了通过对腔镜损耗控制实现了 1338 nm 单波长激光输出,采用 LD 侧面抽运实现了超过 100 W 的激光输出^[17]。Nd : YAG 晶体可通过大功率 LD 侧面抽运获得高功率的激光输出,而 LD 端面抽运的小功率激光也具有结构紧凑和效率高等优势。本文采用 LD 端面抽运 Nd : YAG 晶体,选择了合理的激光腔镜膜系参数,进行了连续运转和声光调 Q 下的 1338 nm 单波长激光输出特性研究。

2 实验装置设计

为了获得 Nd : YAG 晶体 $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ 跃迁中 R2 - X1 子跃迁对应的 1338 nm 激光输出,必须抑制 $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ 跃迁对应的 1064 nm 波长和 $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ 跃迁中 R2 - X3 子跃迁对应的 1319 nm 波长的激光振荡。1319 nm 和 1338 nm 波长对应的跃迁截面分别为 $0.87 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 和 $0.90 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,不到 1064 nm 波长对应跃迁截面的 $1/5$ ^[18]。在对腔镜的镀膜上尽量增加 1064 nm 和 1319 nm 波长的损耗来抑制其起振,从而获得 1338 nm 单波长激光输出。图 1 给出了 LD 端面抽运 Nd : YAG 晶体实现 1338 nm 单波段激光输出的装置示意图。抽运源为 808 nm 波长的光纤耦合的半导体激光器,光纤芯径为 200 μm ,数值孔径为 0.22。抽运光经由两个焦距分别为 50 mm 和 80 mm 的透镜组成的准直聚焦系统后会聚成直径约 320 μm 的聚焦光斑注入 Nd : YAG 晶体内部。Nd : YAG 晶体尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 8 mm,钕离子掺杂浓度为 0.8 at. %。晶体的两端面精细抛光后镀膜上对 808 nm、1.0 μm 和 1.3 μm 波段的增透膜。Nd : YAG 晶体侧面用铝箔包裹置于循环水冷铜块中,温度控制在 20 $^{\circ}\text{C}$ 。激光谐振腔由平面镜 IM 和耦合输出镜 OC 构成。其中平面镜 IM 镀对 808 nm 波长抽运光的高透膜 ($T > 95\%$),对 1300 ~ 1350 nm 高反 ($R > 99.8$) 的介质膜。输出耦合镜 OC 镀对 1.3 μm 波段部分透过的介质膜。为

抑制 1319 nm 波长起振,所使用的输出镜片对 1319 nm 和 1338 nm 的透过率分别为 4.2% 和 2.5%。在镀膜设计时,要求 1338 nm 波长的反射率尽量比 1319 nm 波长的高,同时对 1064 nm 波长有较大透过率 ($T > 90\%$)。为了实现调 Q 激光输出,采用了 Gooch & Housego 公司生产的工作波长为 1.06 μm 的声光调 Q 开关,通光长度为 30 mm,驱动中心频率为 40 MHz,射频功率 20 W。

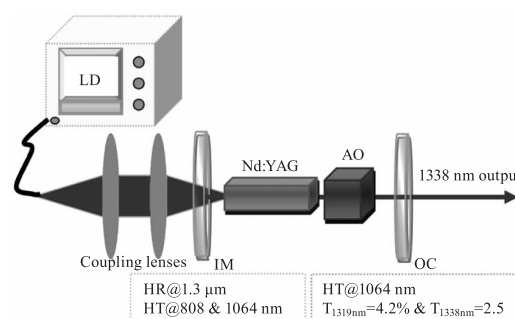


图1 LD端面抽运 Nd : YAG 的 1338 nm 单波长激光实验装置示意图

Fig. 1 Experimental arrangement configuration for LD end - pumped Nd : YAG crystal emitting at 1338 nm

3 实验结果与讨论

首先,对连续运转模式下的 LD 端面抽运 Nd : YAG 激光性能进行了研究。实验装置相对图 1 中省去了声光 Q 开关,总腔长为 43 mm。实验中对对比了采用平平和平凹两种输出镜片的输出激光功率特性,结果如图 2 所示。

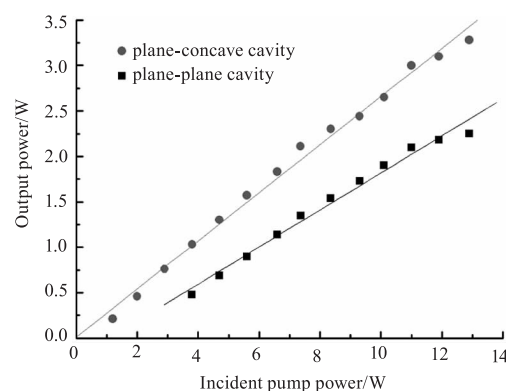


图2 连续运转模式下,采用平平和平凹腔结构的激光输出功率随抽运功率的变化关系

Fig. 2 Output power versus incident diode pump power under continuous-wave with plane-concave and plane-plane cavity

平凹腔对应的阈值约为 0.7 W,明显低于平平腔的阈值(约 2.8 W)。在 12.9 W 的抽运功率下,平平和平凹腔分别获得了 3.25 W 和 2.26 W 的输出功率,对应的斜效率分别为 26.4% 和 20.5%。所以平凹腔失稳灵敏度低、损耗小,输出功率和效率

更高。输出激光谱线由型号为 Omni- λ 500 的光栅单色仪(狭缝 0.05 mm, 分辨率 0.05 nm)来测量。对于两种腔型的激光输出,在 1000 ~ 1400 nm 之间都只测到了 1338 nm 单个波长,对应的线宽约为 0.4 nm,如图 3 所示。

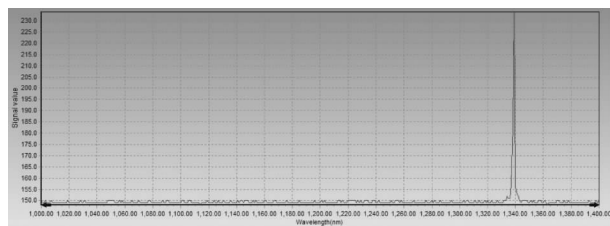


图3 实验测量得到的输出激光谱线

Fig. 3 The measured laser spectrum of output laser

进一步对调 Q 实验的研究采用平凹腔结构,由于加入了声光 Q 开关,总腔长增加为 90 mm。重点对比研究了 5、10 和 15 kHz 的重复频率下输出特性,而且通过光栅单色仪测量表明激光输出仍然是 1338 nm 单波长。图 4 给出了不同重复频率下,1338 nm 激光平均输出功率与入射抽运功率的关系。不同重复频率下的激光阈值较为接近,约为 0.8 W 左右,输出功率和脉冲宽度都随着重复频率的减小而下降。在抽运功率小于 10 W 的情况下,输出功率随着抽运功率的升高呈近线性的增加。对于 5、10 和 15 kHz 的重复频率下的输出激光斜效率分别为 19.2%、23.5% 和 26.8%。但随着抽运功率的进一步升高,输出功率出现饱和现象,主要是因为腔长较长,而且调 Q 运转时更严重的热效应导致的。在 12.9 W 的入射抽运功率下,当声光调 Q 重复频率从 15 kHz 减少到 5 kHz,平均输出功率由 2.8 W 降低到 1.9 W。

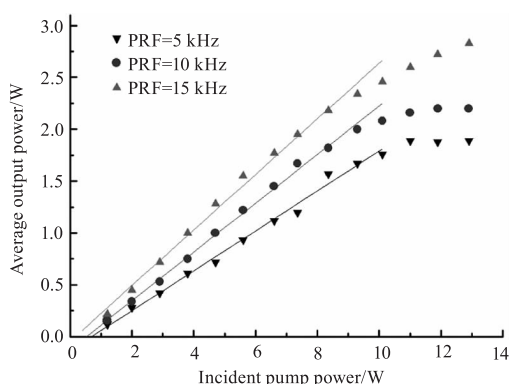


图4 重复频率 5、10 和 15 kHz 下,激光平均输出功率随抽运功率的变化关系

Fig. 4 Average output power versus incident diode pump power with different pulse repetition frequencies (PRF) of 5, 10 and 15 kHz

用 InGaAs 自由空间的光电探测器对激光脉冲

特性进行探测,并由 500 MHz 泰克数字示波器(型号 DPO3052B)呈现输出激光的脉冲波形。脉冲宽度由重复频率 15 kHz 下的 110 ns 降到 5 kHz 下的 70 ns,对应的脉冲峰值功率由 1.7 kW 升高到 5.4 kW。图 5 给出了重复频率 5 kHz 的 1338 nm 激光脉冲波形及脉冲序列。由图 5 可知,1338 nm 激光脉冲稳定性高于 $\pm 8\%$ 。

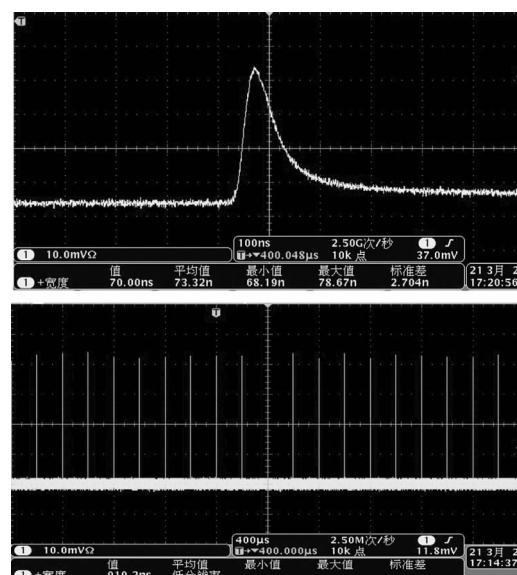


图5 重复频率 5 kHz 下,输出激光的脉冲波形及脉冲序列

Fig. 5 The temporal pulse profile and pulse train for output laser with the PRF of 5 kHz

4 结论

本文报道了连续运转和声光调 Q 模式下的 Nd:YAG 晶体 $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ 能级跃迁对应的 1338 nm 单波长激光输出。通过对腔镜的合理膜系设计,抑制 Nd:YAG 晶体 1064 nm 的最强跃迁波长和相邻的 1319 nm 波长的激光振荡。实验中对比了平平和平凹腔型、以及不同声光调 Q 重复频率下的激光输出。连续运转模式下,在 12.9 W 的抽运功率获得了最高 3.25 W 的 1338 nm 激光输出;声光调 Q 模式下,1338 nm 激光平均输出功率和脉冲宽度随着重复频率的减小而下降。在 12.9 W 的抽运功率下,当声光调 Q 重复频率从 15 kHz 减少到 5 kHz,平均输出功率由 2.8 W 降低到 1.9 W,对应的脉冲峰值功率由 1.7 kW 升高到 5.4 kW。该 1338 nm 激光在空间光通信、激光医疗等领域具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Rolle A, Pereszlenyi A, Koch R, et al. Is surgery for multi-

- ple lung metastases reasonable? A total of 328 consecutive patients with multiple-laser metastasectomies with a new 1318 nm Nd : YAG laser[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2006, 131(6):1236 – 1242.
- [2] Boquillon J P, Musset O, Guillet H, et al. High efficiency flashlamp-pumped lasers at 1.3 μm with Nd-doped crystals-scientific and medical applications [C]. Conference on Lasers & Electro-optics, 1999:126 – 127.
- [3] Zhu H Y, Zhang G, Huang C H, et al. The study of 670.7 nm red light generated by intracavity frequency doubling of a Q-switched Nd : YAlO₃ laser[J]. J Phys D: Appl Phys, 2009, 42:045108.
- [4] WEN Xiaobin, SAN Yu, ZHANG Guizhong, et al. Study on electro-optic Q-switched Nd : YAG frequency doubling laser at 660 nm [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(6): 633 – 637. (in Chinese)
文晓彬, 撒昱, 张贵忠, 等. 电光调 Q 660 nm Nd : YAG 倍频激光器的研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(6): 633 – 637.
- [5] WANG Jianjun, ZOU Yue, ZHAO Shuyun, et al. Hectowatt-level diode pumped solid-state red laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1560 – 1563. (in Chinese)
王建军, 邹跃, 赵书云, 等. 二极管抽运百瓦级红光固体激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1560 – 1563.
- [6] ZHU Haiyong, ZHANG Ge, HUANG Chenghui, et al. High-power CW diode-side-pumped Nd : YAP laser at 1341.4 nm [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9):1413 – 1416. (in Chinese)
朱海永, 张戈, 黄呈辉, 等. 高功率连续侧面抽运 1341.4 nm Nd : YAP 激光器[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9):1413 – 1416.
- [7] WANG Ze, LIU Yang, LIU Lei, et al. Laser diode side-pumped Nd : YAG thin slab laser based on MOPA[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(4):364 – 368. (in Chinese)
王喆, 刘洋, 刘磊, 等. LD 侧泵 Nd : YAG 薄板条 MOPA 激光器[J]. 激光与红外, 2015, 45(4):364 – 368.
- [8] Zhu H Y, Zhang G, Huang C H, et al. Diode-side-pumped acoustooptic Q-switched 1319 nm Nd : YAG laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 44(5): 480 – 484.
- [9] Gao M W, Zhao Y, Zhang L Y, et al. 1319-nm single-frequency output from diffusion-bonded monolithic nonplanar Nd : YAG ring resonator with undoped end[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(4):041406.
- [10] Li M L, Zhao W F, Zhang S B, et al. 1.86 W cw single-frequency 1319 nm ring laser pumped at 885 nm[J]. Appl Opt, 2012, 51:1241 – 1244.
- [11] ZHENG Fanghua, LIU Huan, LI Xifu, et al. Simultaneous dual-wavelength quasi-continuous-wave laser-diode-end-pumped Nd : YAG laser for terahertz wave source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 200 – 205. (in Chinese)
郑芳华, 刘欢, 李喜福, 等. 产生太赫兹辐射源的 Nd : YAG 双波长准连续激光器[J]. 中国激光, 2008, 35(2):200 – 205.
- [12] Guo L, Lan R J, Liu H, et al. 1319 nm and 1338 nm dual-wavelength operation of LD end-pumped Nd : YAG ceramic laser[J]. Opt. Express, 2010, 18:9098 – 9106.
- [13] Gao S. Diode-end-pumped passively Q-switched Nd : YAG crystal laser with V : YAG saturable absorber at 1319 and 1338 nm [J]. Journal of Modern Optics, 2015, 62(13): 1098 – 1101.
- [14] Duan Y M, Zhu H Y, Xu C W, et al. Comparison of the 1319 and 1338 nm dual-wavelength emission of neodymium-doped yttrium aluminum garnet ceramic and crystal lasers[J]. Appl Phys Express, 2013, 6:012701.
- [15] Inoue Y, Fujikawa S. Diode-Pumped Nd : YAG laser producing 122 W CW power at 1.319 μm [J]. IEEE J Quantum Electron, 2000, 36(6):751 – 756.
- [16] H Y Zhu, G Zhang, C H Huang, et al. 1318.8 nm/1338.2 nm simultaneous dual-wavelength Q-switched Nd : YAG laser[J]. Appl Phys B, 2008, 90:451 – 454.
- [17] Zhang G, Zhu H Y, Huang C H, et al. Diode-side-pumped Nd : YAG laser at 1338 nm [J]. Optics Letters, 2009, 34(10):1495 – 1497.
- [18] Singh S, Smith R G, Vitert L G V. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd³⁺ in yttrium aluminum garnet at room temperature[J]. Phys Rev B, 1974, 10(6):2566 – 2572.