

# LD 端面抽运的 1356 nm Nd:YAG 晶体激光器研究

陈久益 段延敏\* 潘小歌 凤正荣 朱海永

(温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325035)

**摘要** 报道了基于 Nd:YAG 晶体的  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{13/2}$  能级跃迁的 1356 nm 单波长 LD 端面抽运 Nd:YAG 激光器。采用 LD 端面抽运的平平腔结构, 实现了 2.4 W 的连续波 1356 nm 和 1414 nm 双波长激光输出, 光光转换效率为 26.7%。通过在腔内插入 1.3  $\mu\text{m}$  波段的声光 Q 开关, 增加了 1414 nm 波长的腔内损耗, 从而获得了 1356 nm 的单波长连续和调 Q 脉冲激光输出。单波长输出功率为 2 W; 重复频率为 5 kHz 时, 脉冲光平均功率为 1.3 W, 脉冲宽度为 71 ns, 峰值功率为 3.66 kW。

**关键词** 激光器; Nd:YAG 晶体; 1356 nm 激光; 端面抽运; 声光 Q 开关

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602020

## Investigation on Diode-End-Pumped Nd:YAG Crystal Laser at 1356 nm

Chen Jiuyi Duan Yanmin Pan Xiaoge Feng Zhengrong Zhu Haiyong

(College of physics and electronic information engineering, Wenzhou University,  
Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

**Abstract** LD pumped Nd:YAG crystal laser emitting at 1356 nm single wavelength from  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{13/2}$  transition is reported. Continuous-wave (CW) output power of 2.4 W with 1356 nm and 1414 nm dual-wavelength is achieved using flat-flat cavity, and the corresponding optical conversion efficiency is 26.7%. With the insertion of an acousto-optic Q-switcher in the cavity, the loss for 1414 nm increases, so that the 1356 nm CW single wavelength as well as the Q-switched pulse are achieved. At the pulse repetition frequency of 5 kHz, the pulse width is 71 ns and the peak power is about 3.66 kW.

**Key words** lasers; Nd:YAG crystal; 1356 nm laser; end-pumped; acousto-optic Q-switcher

**OCIS codes** 140.3480; 140.3530; 140.3580

## 1 引言

1.3  $\mu\text{m}$  波段的激光水吸收系数较大, 位于大气的传输窗口, 在光纤传输中具有损耗低和接近零色散区域等特点, 在激光医疗、国防安全以及光纤通讯等领域具有重要用途<sup>[1~3]</sup>。此外, 通过频率变换可产生红蓝激光, 在激光显示、生物医学以及作为可调谐掺 Cr<sup>3+</sup> 激光器的抽运源等方面有着广泛的应用前景。其中通过掺钕晶体中  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{13/2}$  能级跃迁是获得 1.3  $\mu\text{m}$  波段激光的主要途径。

Nd:YAG 晶体的  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{13/2}$  能级跃迁在 1.3  $\mu\text{m}$  波段有两条较强且强度相当的谱线, 对应波长为

1319 nm 和 1338 nm, 较容易实现激光输出。目前这两波长已被广泛研究, 并实现了高功率的单波长及双波长激光输出<sup>[4~7]</sup>。而对应的 1356 nm 波长谱线, 由于紧靠两条强谱线, 而且发射截面相对较小, 难于实现单波长的激光输出。Freitag 等<sup>[8]</sup> 最先报道了基于特殊膜系设计实现了 Nd:YAG 晶体的 1357 nm 单波长激光输出。最近, Fan 等<sup>[9]</sup> 报道了使用 LD 端面抽运布儒斯特角切割的 Nd:YAG 晶体, 选择性地实现了 1357 nm 单波长激光输出。在 15.0 W 的入射抽运功率的情况下得到了 1.03 W 的激光输出, 光光转换效率为 6.9%。2011 年, Li

**收稿日期**: 2013-01-04; **收到修改稿日期**: 2013-01-24

**基金项目**: 国家自然科学基金(10904143, 11210101003), 浙江省自然科学基金(LY12F05003), 浙江省新苗人才计划和温州市科技计划项目(G20110002)资助课题。

**作者简介**: 陈久益(1992—), 男, 本科, 主要从事新型激光器方面的研究。E-mail: jiuyic@126.com

\* **通信联系人**。E-mail: ymduan12@gmail.com

等<sup>[10]</sup>报道了采用标准具对 Nd:YAG 晶体的输出波长进行选择,在 18.2 W 的抽运下,获得了 1.02 W 1356 nm 激光输出<sup>[10]</sup>。腔内使用色散元件选波长导致了损耗增加,降低了激光输出效率。

通过对腔镜的膜系控制抑制 1064 nm 和 1.3 μm 波段的两条强谱线,实现了 2.4 W 的 Nd:YAG 晶体 1356 nm 和 1414 nm 双波长连续波的激光输出。结合 1.3 μm 波段声光 Q 开关对其他波长的表面反射损耗,首次实现了基于 Nd:YAG 晶体的调 Q 脉冲 1356 nm 单波长激光输出。在 9 W 的抽运功率下,分别实现了 2 W 连续激光和 1.3 W (5 kHz, 71 ns) 的调 Q 单波长脉冲激光输出。

## 2 Nd:YAG 能级跃迁与发射谱

Nd:YAG 晶体硬度较大、光学质量好、热导率高,属于光学各向同性的立方结构晶体,是目前常用激光晶体之一。其在 800 nm 附近有个吸收带,对应 808 nm 有较强的吸收峰,适合于采用 808 nm 波长的半导体激光抽运使得基态的粒子数跃迁到<sup>4</sup>F<sub>5/2</sub> 高能级。

图1和图2所示分别为 Nd:YAG 晶体的能级跃迁图和对应的发射光谱。<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 到<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级跃迁分别发射 0.9、1.0~1.1、1.3~1.4 μm 的谱线。其中<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级跃迁拥有许多较强的跃迁谱线,而且光谱覆盖的波段比较宽。几个较强的谱线,如 1444、1414、1356、1338 和 1319 nm 分别对应 R1-X7、R2-X6、R1-X4、R2-X3 和 R2-X1 斯塔克能级跃迁,对应的发射跃迁截面如表 1 所示<sup>[11]</sup>。

<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级跃迁截面不到<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级跃迁截

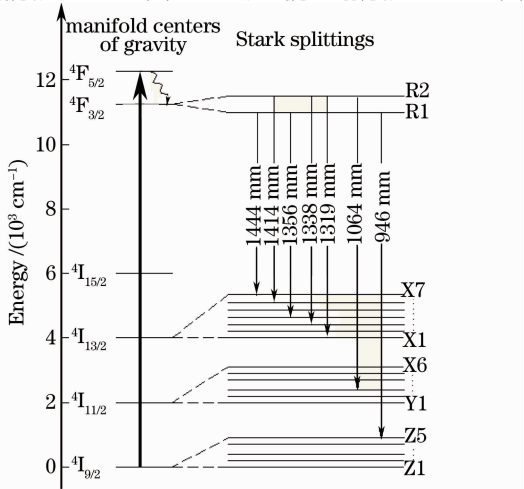


图 1 Nd:YAG 晶体能级跃迁图

Fig. 1 Diagram of energy levels of Nd:YAG crystal

面的 1/5,所以要实现<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级跃迁波长激光的振荡,一般可通过控制腔镜镀膜增加<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级跃迁对应的波长的损耗来抑制强线振荡。但<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级跃迁的 R2-X1 的 1319 nm 波长和 R2-X3 的 1338 nm 波长对应的跃迁截面相当且发射强度在<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级跃迁谱线中最大,所以较容易实现两个波长的激光输出<sup>[12]</sup>。R1-X4 对应的 1356 nm 的截面为 0.44 × 10<sup>-19</sup> cm<sup>2</sup>,只有 1919 nm 和 1338 nm 两谱线的一半,且波长非常靠近,较难实现单波长的激光输出。

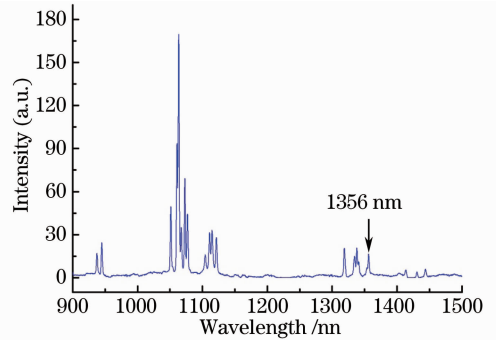


图 2 Nd:YAG 晶体发射光谱图

Fig. 2 Emission spectra of Nd:YAG crystal

为了实现在 1356 nm 激光振荡,必须抑制 Nd:YAG 晶体中光谱强度最强的 1064 nm 波长以及 1319 nm 和 1338 nm 波长的振荡。通过腔镜膜系的精确控制和腔内元件的反射损耗来共同抑制其他波长的增益,希望实现 1356 nm 单波长输出。实验中采用输出腔镜在不同波长处的反射率,如表 1 所示。

表 1 Nd:YAG 晶体的<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 跃迁截面和不同波长处输出镜反射率

Table 1 Stimulated emission cross-sections of Nd:YAG and reflectivities of the output coupler at different wavelengths

Wavelength /nm	1319	1338	1356	1414	1444
$\sigma / (10^{-20} \text{ cm}^2)$	8.7	9.2	4.4	3.3	3.4
Reflectivity /%	55.4	84.6	93.5	98.9	99.2

## 3 实验装置

图 3 所示为 LD 端面抽运 Nd:YAG 实现 1356 nm 激光输出的实验装置示意图。采用简单紧凑的平平腔结构。抽运源为光纤耦合输出的中心波长为 808 nm 的半导体激光器,光纤芯径为 200 μm,数值孔径为 0.22。光纤输出的抽运光经一对焦距分别为 50 mm 和 80 mm 的平凸透镜组成的耦合系统,聚焦成束腰直径为 320 μm 的光斑入射到 Nd:YAG 晶体内。实验中采用掺杂原子数分数为

1.0%的 Nd:YAG 晶体,尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm。Nd:YAG 晶体的侧面用铝箔包裹再置于紫铜块内,并用半导体制冷器对其进行冷却控温,使其温度保持在 300 K 左右。晶体两端面镀有对 1064 nm 和 1319 nm 波长的增透膜,该膜系对 1356 nm 和 1444 nm 的反射率分别为 0.9% 和 2.5%。为了减少对 1356 nm 的腔内损耗,将晶体的两端面严格垂直光路。对于连续波激光实验,该平平腔结构的总腔长为 50 mm,激光晶体放置于腔正中间模式最大的位置。为了实现调 Q 脉冲输出,在激光晶体与输出镜片之间放置一个 1.3 μm 波段的声光 Q 开关(AOS 通光方向长度为 30 mm,驱动中心频率为 40 MHz,射频功率为 20 W,为 Gooch & Housego 公司产品),此时总腔长增加到 90 mm。输入镜(高反镜)镀对抽运光 808 nm 增透、同时对 1310~1450 nm 波段高反(反射率  $R>99.9\%$ )的膜系。输出镜的镀膜参数如表 1 所示。为了抑制  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  能级跃迁的最强谱线,所有的光学元件均镀对 1064 nm 的高透膜(透射率  $T>80\%$ )。

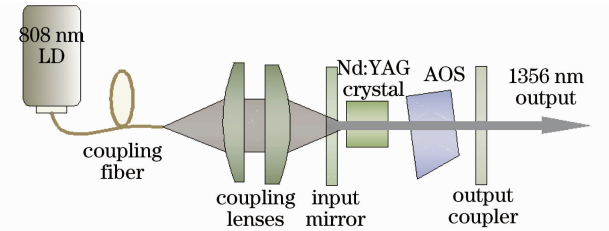


图 3 激光实验装置

Fig. 3 Schematic of experimental setup

### 4 实验结果与讨论

对该激光器的连续波激光输出特性进行测量,输出激光功率和谱线如图 4 所示。抽运阈值功率约为 2 W,随着入射抽运功率的增加,激光输出功率线性升高,在 9 W 抽运功率下,获得了 2.4 W 的连续激光输出,光光转换效率达 26.7%,斜率效率  $\eta$  为 34.7%。通过单色仪在 1000~1500 nm 波段对激光输出谱线进行测量,探测到了 1356 nm 和 1414 nm 两个谱线,表明腔内存在着双波长同时振荡。

为了进一步实现调 Q 脉冲激光输出,在腔内放置了声光 Q 开关,在未加射频驱动情况下,对连续波激光输出谱线进行测量,发现 1414 nm 谱线相对强度变小。实验中通过微调 Q 开关的倾斜角度,可使得 1414 nm 波长完全消失。这是因为实验中的 Q 开关主要是针对 1.3 μm 激光设计,其对 1414 nm 波长具有相对较大的损耗,从而保证了 1356 nm 单波长激光

振荡的实现。由于腔长加长,1356 nm 单波长激光输出功率相对于没有放置 Q 开关时略有减小。在 9 W 抽运功率下,激光输出功率为 2 W,斜效率约为 27.9%。图 4 所示为腔内放置 Q 开关和无 Q 开关情况下的连续波输出功率和激光光谱对比。

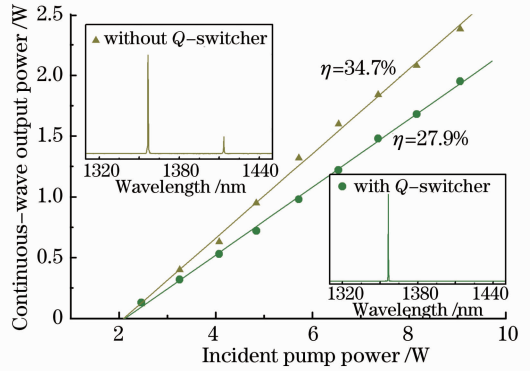


图 4 腔内放置 Q 开关和无 Q 开关情况下的连续激光输出功率和激光光谱

Fig. 4 Output power and spectra for continuous-wave laser with and without Q-switcher

开启声光 Q 开关的射频驱动,该激光器实现了不同重复频率  $f_{PR}$  下的 1356 nm 单波长脉冲激光输出。图 5 所示为在 5、10、20 和 30 kHz 的调 Q 重复频率下的输出平均功率。由图 5 可知,激光输出平均功率随着调 Q 重复频率下降而降低,重复频率为 30 kHz 时,输出功率的斜率效率为 26.8%,接近连续激光的斜率效率;最高输出功率为 1.9 W,对应光光转换效率为 21.1%。当重复频率下降到 5 kHz 时,输出平均功率也下降到 1.3 W (斜率效率为 17.5%,光光转换效率为 14.4%)。

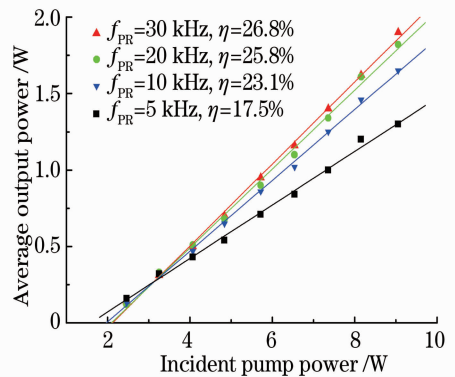


图 5 不同重复频率下,1356 nm 单波长激光平均输出功率与入射抽运功率的关系

Fig. 5 Output power versus incident pump power for the 1356 nm single wavelength with different pulse repetition frequencies

实验中采用 PIN 光电二极管探测激光脉冲,采

用示波器(泰克 DPO3052B 型, 500 MHz 带宽)测量脉冲波形。图 6 所示为 1356 nm 波长激光输出的峰值功率和脉冲宽度随着重复频率变化的关系。当重复频率为 5 kHz 时, 输出激光脉冲宽度最窄为 71 ns (图 6 中插图)。当脉冲重复频率由 5 kHz 增加到 30 kHz 时, 平均功率由 1.3 W 增加到 1.9 W, 脉冲宽度由 71 ns 增加到 140 ns, 峰值功率从最高的 3.66 kW 降至 0.45 kW。实验结果表明, 保持其他条件不变, 调 Q 脉冲重复频率越低, 平均输出功率越低, 但脉冲宽度越窄, 峰值功率越高, 因此通过降低脉冲宽度, 可望获得更高峰值功率的激光输出。

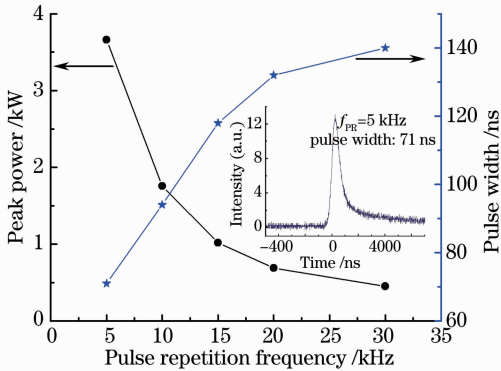


图 6 在 9 W 的抽运功率下, 峰值功率和脉冲宽度与脉冲重复频率的关系(插图: 脉冲波形)

Fig. 6 Peak power and pulse width versus pulse repetition frequency with the incident pump power of 9 W (inset: temporal profiles of pulse)

## 5 结 论

报道了采用 LD 端面抽运 Nd:YAG 晶体实现 1356 nm 单波长激光输出的实验结果。采用平平腔结构, 实现了 2.4 W 的 1356 nm 和 1414 nm 双波长连续激光输出, 光光转换效率为 26.7%。通过在腔内插入 1.3 μm 波段的声光 Q 开关, 增加了 1414 nm 波长的损耗, 从而实现了基于 Nd:YAG 晶体的调 Q 脉冲 1356 nm 单波长激光输出。在 9 W 的抽运功率下, 声光 Q 开关未加射频驱动时, 获得了 2 W 连续单波长激光输出; 声光调 Q 重复频率由 5 kHz 增

加到 30 kHz 时, 平均输出功率由 1.3 W 上升到 1.9 W。在 5 kHz 重复频率下, 脉冲宽度为 71 ns, 峰值功率为 3.66 kW, 光光转换效率为 14.4%。

## 参 考 文 献

- 1 A. Rolle, A. Pereszlenyi, R. Koch *et al.*. Is surgery for multiple 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 范品忠. 化学氧碘激光器的现状及发展前景[J]. 激光与光电子学进展, 2002, **37**(12): 1~7
- 3 T. J. Whitley. A review of recent system demonstrations incorporating 1.3-μm praseodymium-doped fluoride fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5): 1744~1760
- 4 Chen Jing, Zhang Ge, Zhu Haiyong *et al.*. Laser diode side-pumped high power 1338 nm Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1051~1054  
陈 静, 张 戈, 朱海永等. 激光二极管侧面抽运高功率 1338 nm Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(8): 1051~1054
- 5 Li Ping, Chen Xiaohan, Wang Qingpu *et al.*. Study of a diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG ceramic 1319 nm laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2963~2966  
李 平, 陈晓寒, 王青圃等. 激光二极管抽运主动调 Q 陶瓷 Nd:YAG 1319 nm 激光器特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2963~2966
- 6 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**(3-4): 451~454
- 7 Y. F. Wan, K. Z. Han, Y. Wang *et al.*. High power CW and Q-switched operation of a diode-side-pumped Nd:YAG 1319 nm laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 124~126
- 8 I. Freitag, A. Tünnermann, H. Welling. Intensity stabilised Nd:YAG ring laser with 1.5 W single-frequency output power at 1.357 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**: 777~778
- 9 Y. X. Fan, Y. E. Hou, Y. Liu *et al.*. A linearly polarized continuous-wave 1357 nm Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**(3): 443~445
- 10 C. L. Li, X. H. Zhang, W. Liang *et al.*. Diode-pumped CW Nd:YAG laser at 1356 nm based on the  $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$  transition [J]. *Laser Phys.*, 2011, **21**(6): 1017~1020
- 11 S. Singh, R. G. Smith, L. G. Van Viter. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd<sup>3+</sup> in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. *Phys. Rev. B*, 1974, **10**(6): 2566~2572
- 12 Y. M. Duan, H. Y. Zhu, C. W. Xu *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**(1): 012701

栏目编辑: 张 腾