

文章编号: 1001-4322(2008)01-0045-04

# 1 319 和 1 338 nm 双波长 Nd:YAG 脉冲激光输出实验研究\*

魏 勇, 张 戈, 黄呈辉, 黄凌雄, 朱海永, 沈鸿元

(中国科学院 福建物质结构研究所, 福州 350002)

**摘 要:** 根据计算得到的双波长激光振荡的阈值条件, 激光实验中对全反镜镀制 1 319 和 1 338 nm 的全反膜(其反射率大于 99.73%, 而对 1 064 nm 激光的反射率约为 7%); 输出镜采用对 1 064 nm 强谱线 95% 的高透过率, 而对 1 319 和 1 338 nm 谱线的透过率分别为 34.7%, 32.5%, 有效抑制了强线 1 064 nm 振荡, 成功实现了 1 319 和 1 338 nm Nd:YAG 同时双波长激光脉冲输出。当输入能量为 125 J 时, 1 319 和 1 338 nm 脉冲双波长激光的单脉冲总输出能量为 0.89 J, 电-光转换效率为 0.71%, 斜率效率为 0.89%。输出的双波长激光的中心波长分别在 1 318.8 和 1 338.2 nm 处, 谱线宽度(FWHM)分别为 0.35 和 0.48 nm, 强度之比为 36:44。

**关键词:** 双波长激光; 脉冲激光; Nd:YAG 激光器; 激光输出

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

由于可广泛应用于光通信、光动力学医疗、光计算、非线性频率变换、环境监测、激光遥感、激光雷达及光谱学研究等领域, 双波长激光成为近年来国内外较为热门的研究课题<sup>[1-4]</sup>。利用非线性光学差频技术, 对 1.3 μm 双波长激光进行差频, 可以产生相干 THz 波, 因此开发 1.3 μm 双波长激光器具有重要的意义<sup>[5-6]</sup>。

Nd:YAG 晶体中钕离子在 1.3 μm 波段有两条主要跃迁谱线, 即产生 1 319 nm 相干辐射的跃迁<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>(R<sub>2</sub>) - <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>(X<sub>1</sub>) 和产生 1 338 nm 相干辐射的跃迁<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>(R<sub>2</sub>) - <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>(X<sub>3</sub>), 1.3 μm 双波长激光主要利用这两条谱线产生。文献[6]报道了 LD 端面泵浦 1 319 和 1 338 nm 连续双波长 Nd:YAG 激光器, 在 15 W 的泵浦功率下取得了 6.3 W 的同时双波长输出。文献[7]利用 LD 侧面泵浦, 获得了 1 319 和 1 338 nm 连续双波长 Nd:YAG 激光, 最大输出功率达到了 109 W, 二者的功率强度比为 57:78。我们在已完成的研究项目中<sup>[8]</sup>, 实现了 1 319 和 1 338 nm Nd:YAG 双波长激光同时准连续输出, 双波长激光总平均输出功率为 101 W。本文根据计算得到的 1 319 和 1 338 nm 双波长激光振荡的阈值条件, 有效抑制了 1 064 nm 强谱线的振荡, 成功实现了 1 319 和 1 338 nm Nd:YAG 双波长激光脉冲同时实验输出。

## 1 同时输出双波长激光理论分析

文献[9-10]报道了钕激光晶体中同时产生连续双波长激光(SDWL)的运行条件, 认为考虑空间烧孔效应后, 双波长激光同时振荡不要求阈值严格相等, 其相应的振荡条件只需满足以下不等式:

$$\frac{2}{1 + P_{in}/P_{th1}} \frac{\sigma_2 \nu_1}{\sigma_1 \nu_2} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_1}\right) + 2\alpha L \right] \leq \ln\left(\frac{1}{R_2}\right) + 2\alpha L \leq \frac{\sqrt{1 + 8P_{in}/P_{th1}} + 1}{4} \frac{\sigma_2 \nu_1}{\sigma_1 \nu_2} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_1}\right) + 2\alpha L \right] \quad (1)$$

式中:  $P_{in}$ ,  $P_{th}$ ,  $\sigma$ ,  $\nu$ ,  $R$ ,  $\alpha$  和  $L$  分别代表泵浦输入功率、阈值功率、跃迁截面、光子频率、激光腔反射率、腔内单程损耗和腔长, 下标 1 和 2 分别表示波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ 。如果振荡条件满足不等式(1), 就能够实现同时连续双波长激光运转。

由于泵浦能量  $Q = Pt$ , 故有

$$P_{in}/P_{th1} = Q_{in}/Q_{th1} \quad (2)$$

式中:  $Q_{in}$ ,  $Q_{th1}$  分别为泵浦输入能量、阈值泵浦能量。将式(2)代入式(1)可得到

$$\frac{2}{1 + Q_{in}/Q_{th1}} \frac{\sigma_2 \nu_1}{\sigma_1 \nu_2} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_1}\right) + 2\alpha L \right] \leq \ln\left(\frac{1}{R_2}\right) + 2\alpha L \leq \frac{\sqrt{1 + 8Q_{in}/Q_{th1}} + 1}{4} \frac{\sigma_2 \nu_1}{\sigma_1 \nu_2} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_1}\right) + 2\alpha L \right] \quad (3)$$

\* 收稿日期: 2007-06-21; 修订日期: 2007-11-14

作者简介: 魏 勇(1977—), 男, 湖南岳阳人, 助研, 主要从事激光器件和激光电源研究; weiyong@fjirsm.ac.cn.

联系作者: 张 戈, zhg@fjirsm.ac.cn

表 1 Nd:YAG 晶体的相关激光参数  
Table 1 Basic parameters of Nd:YAG crystal

$\lambda/\text{nm}$	energy level	$\sigma/(10^{-19}\text{cm}^2)$	$\nu/(10^{14}\text{Hz})$	cavity loss
1 319	$^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}(R_2-X_1)$	0.92	2.27	0.151
1 338	$^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}(R_2-X_3)$	0.90	2.24	

表 1 给出了 Nd:YAG 晶体中 1 319 和 1 338 nm 两条谱线的参数<sup>[11-13]</sup>。

根据文献[9-10]的研究结果,在计算 Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体同时产生连续双波长激光条件时,用  $P_{in}=1.3P_{th1}$  代入不等式(1);而在文献[14] Nd:YAlO<sub>3</sub> 调 Q 双波长激光的计算模型中,认为泵浦能量设置为阈值能量的 2 倍较为合适。我们考虑到 Nd:YAG 晶体 1 319 和 1 338 nm 双波长激光脉冲泵浦运转的条件,取  $Q_{in}/Q_{th1}=2$  代入式(3)中;并将表 1 中给出的相关数据代入式(3)中计算,得到的结果示于图 1 中。 $R_{1319}$  为 1 319 nm 波长激光的反射率, $R_{1338}$  为 1 338 nm 波长的反射率。图 1 中曲线 1 以上区域为产生 1 319 nm 单一波长激光需满足的反射率,曲线 2 以下为产生 1 338 nm 单一波长激光需满足的反射率条件,而曲线 1 和曲线 2 之间为同时产生 1 319 和 1 338 nm 双波长激光需满足的反射率条件。因此要获得 1 319 和 1 338 nm 同时双波长激光输出,其反射率条件必须位于曲线 1 和曲线 2 之间的区域。如果选用的反射率越低,激光损耗越大,激光阈值就越高。实验中我们结合脉冲电源所能提供的高峰值功率抽运的实际情况,选择对 1 319 和 1 338 nm 两条谱线合适的反射率,可以实现 1 319 和 1 338 nm 同时双波长脉冲激光的较为均衡的能量输出。

## 2 实验与结果

实验装置如图 2 所示。激光谐振腔采用由反射镜  $M_1$  和输出耦合镜  $M_2$  构成的腔长为 400 mm 的平行平面腔。Nd:YAG 激光棒尺寸为  $\phi 6\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ ,两端面镀上 1 319,1 338 和 1 064 nm 的增透膜,以防止 1 064 nm 最强线激光在高峰值功率泵浦时产生自激振荡,1 064 nm 的反射率为 0.067%。采用单支氙灯泵浦,氙灯外径为  $\phi 8\text{ mm}$ ,两电极间距离为 100 mm,脉冲泵浦电源重复率为 1 Hz。全反镜  $M_1$  镀制 1 319 和 1 338 nm 的全反膜( $R>99.73\%$ ,而  $R_{1064\text{ nm}}\approx 7\%$ )。根据图 1 给出的反射率条件的要求,为了有效抑制强线 1 064 nm 起振以获得 1 319 和 1 338 nm 同时双波长脉冲激光,并结合激光电源泵浦功率的实际情况,输出镜  $M_2$  采用对 1064 nm 强谱线 95% 的高透过率,而对 1 319 和 1 338 nm 谱线的透过率分别为 34.7% 和 32.5%。1 319 和 1 338 nm 双波长激光总的输出能量用型号为 PM-100 的激光能量计测量。输出光束经分束镜  $M_3$  分光后,用 44W 平面光栅单色仪在相关的波长范围内扫描确定输出激光谱线的波长;并由锗光敏二极管接收后由 TDS3052B(500 MHz) 数字存储示波器记录激光器输出的单个脉冲波形,用微安表检测输出激光中各波长的相对强度及其谱线宽度。

图 3 给出了 1 319 和 1 338 nm 双波长脉冲激光输出能量与输入能量的关系曲线。从图 3 中可看出激光的阈值较低,约为 23 J。输入电能量为 125 J 时,双波长

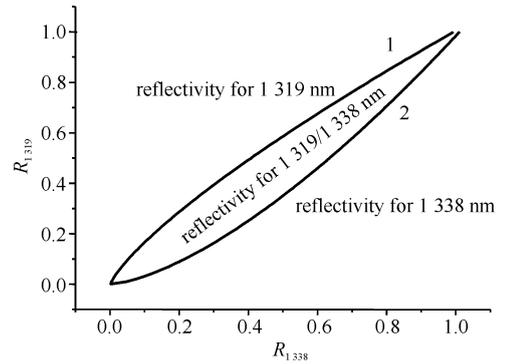


Fig. 1 Calculated corresponding reflectivities for Nd:YAG crystal according to Eq. (3)

图 1 根据式(3)计算的 1 319 和 1 338 nm Nd:YAG 激光反射率条件

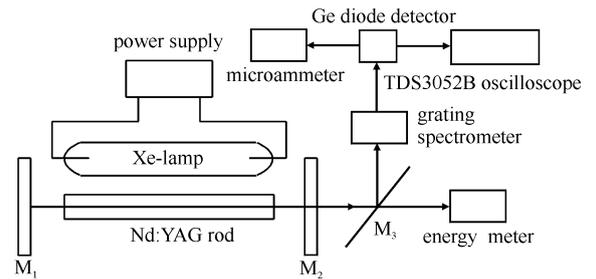


Fig. 2 Experimental setup of simultaneous dual wavelength (1 319 and 1 338 nm) Nd:YAG laser

图 2 1 319 和 1 338 nm 双波长脉冲 Nd:YAG 激光输出的实验装置

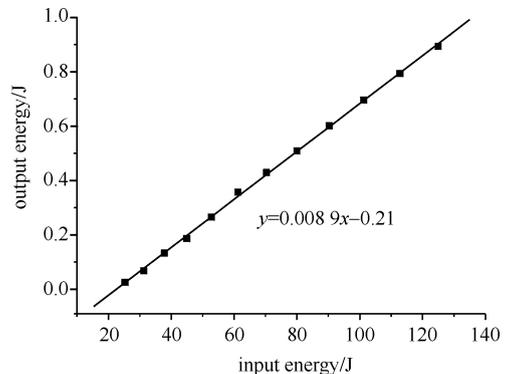


Fig. 3 Relationship between pump energy and output energy

图 3 输出能量与泵浦能量的关系

激光的单脉冲总输出能量为 0.89 J,电-光转换效率为 0.71%,斜率效率为 0.89%。输出能量与输入能量保持较好的线性关系,提高泵浦输入能量还可以相应提高其输出能量。

图 4 给出了在输出能量 0.18 J 时,TDS3052B(500MHz)数字存储示波器记录的双波长激光器输出的单个脉冲波,图中可看出 1 319 和 1 338 nm 谱线单个脉冲宽度分别为 150  $\mu$ s 和 230  $\mu$ s。

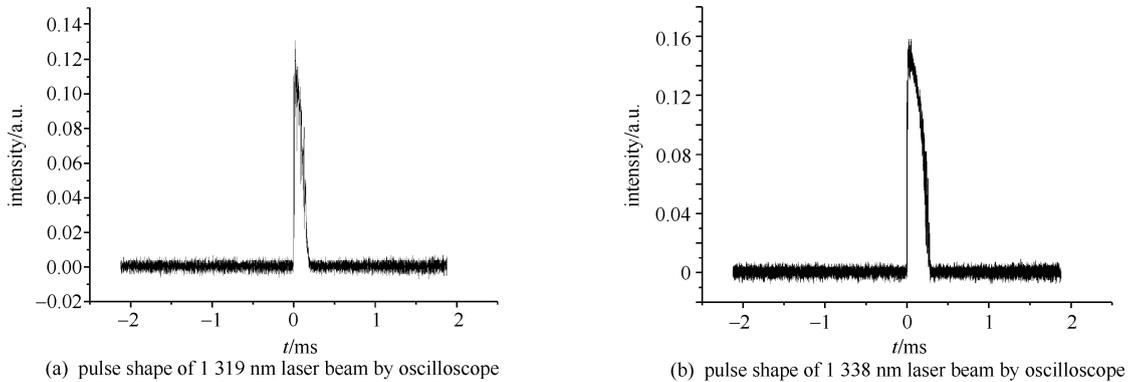


Fig. 4 Pulse shapes of 1319 and 1338 nm laser beam by oscilloscope with output energy of 0.18 J

图 4 示波器记录的 1319 和 1338 nm 双波长脉冲激光单个脉冲波形,输出能量 0.18 J

在双波长激光单脉冲最大输出能量为 0.89 J 时,用分光方式,在 1 000~1 500 nm 的波长范围内,用 44 W 平面光栅单色仪扫描输出激光波长,未发现其它激光波长。微安表记录的扫描谱线宽度如图 5 所示。从图 5 中可看出同时输出的双波长激光的中心波长分别在 1 318.8 和 1 338.2 nm 处,其谱线宽度(FWHM)分别为 0.35 和 0.48 nm,强度之比为 36 : 44。实验中,1 338 nm 激光强于 1 319 nm 激光,进一步调整输出镜  $M_2$  对 1 319 和 1 338 nm 谱线的输出耦合率,可获得较为均衡的双波长激光输出。

### 3 结 论

通过计算双波长激光振荡的阈值条件,获得了 1 319 和 1 338 nm 脉冲双波长激光器输出耦合镜的反射率条件。在输入能量为 125 J 时,1 319 和 1 338 nm 双波长脉冲激光的单脉冲最大输出能量为 0.89 J,电-光转换效率为 0.71%,斜率效率为 0.89%。用 44 W 平面光栅单色仪扫描输出激光波长,输出的双波长激光的中心波长分别在 1 318.8 和 1 338.2 nm 处,谱线宽度(FWHM)分别为 0.35 和 0.48nm,强度之比为 36 : 44。

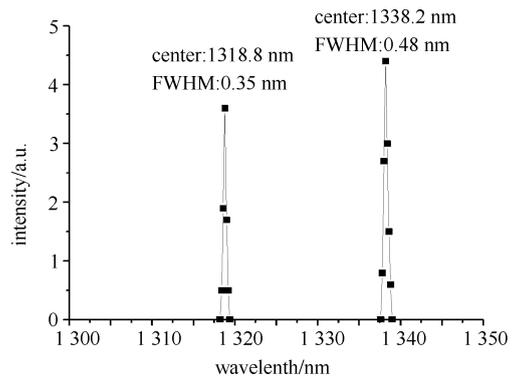


Fig. 5 Measured emission spectrum of 1319 and 1338 nm dual wavelength Nd:YAG pulse laser at output energy of 0.89 J

图 5 在输出能量为 0.89 J 时,1 319 和 1 338 nm 双波长脉冲激光的输出谱线测量

### 参考文献:

- [1] Hou Y E, Fan Y X, He J L, et al. High-efficiency continuous-wave and Q-switched diode-end-pumped multi-wavelength Nd:YAG lasers[J]. *Opt Commun*, 2006, **265**(1): 301-305.
- [2] Li P X, Li D H, Li C Y, et al. Simultaneous dual-wavelength continuous wave laser operation at 1.06  $\mu$ m and 946 nm in Nd:YAG and their frequency doubling[J]. *Opt Commun*, 2004, **235** (1-3): 169-174.
- [3] Chen Y F. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Appl Phys B*, 2000, **70**: 475-478.
- [4] He J L, Du J, Sun J, et al. High efficiency single- and dual-wavelength Nd:GdVO<sub>4</sub> lasers pumped by a fiber-coupled diode[J]. *Appl Phys B*, 2004, **79**: 301-304.
- [5] 朱海永,张戈,黄呈辉,等.高功率连续侧面泵浦 1 341.4 nm Nd:YAP 激光器[J].强激光与粒子束,2006,**18**(9):1413-1416. (Zhu H Y, Zhang G, Huang C H, et al. High-power CW diode-side-pumped Nd:YAP laser at 1 341.4 nm. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006,**18**(9):1413-1416)
- [6] Zhou R, Wen W L, Cai Z, Q, et al. Efficient stable simultaneous CW dual wavelength diode-end-pumped Nd:YAG laser operating at 1 319 and 1 338 nm[J]. *Chin Opt Lett*, 2005, **3**(10):597-599.
- [7] Zhu H Y, Zhang G, Huang C H, et al. 131 W diode-side-pumped 1 319 nm single wavelength CW Nd:YAG laser[J]. *Appl Opt*, 2006,**46**

(3): 384-388.

- [8] 魏勇,张戈,黄呈辉,等,1 318.8 nm/1 338 nm 同时振荡双波长 Nd:YAG 激光器[J]. 激光与红外,2005,**35**(3):164-166. (Wei Y, Zhang G, Huang C H, et al. A 1 318.8 nm/1 338 nm simultaneous dual wavelength Nd:YAG laser. *Laser and Infrared*, 2005,**35**(3):164-166)
- [9] Shen H Y, Su H. Operating conditions of continuous wave simultaneous dual wavelength laser in neodymium host crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999; **86**(12):6647-6651.
- [10] Shen H Y, Zeng R R, Zhou Y P, et al. Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from  $^4F_{3/2} - ^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 1990;**86**(20):1937-1938.
- [11] 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社,2002:45. (Koechner W. Solid-state laser engineering. Beijing: Science Press,2002: 45)
- [12] 沈鸿元. 双波长激光晶体[J]. 中国激光,1994,**21**(5):334-340. (Shen H Y. Dual wavelength crystal lasers. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, **21**(5):334-340)
- [13] Kaminskii A A. Laser crystals [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1990:332.
- [14] Su H, Shen H Y, Lin W X, et al. Computational model of Q-switch Nd:YAlO<sub>3</sub> dual wavelength laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998,**84**(12):6519-6522.

## Output of 1 319 nm and 1 338 nm dual wavelength Nd:YAG pulse laser

WEI Yong, ZHANG Ge, HUANG Cheng-hui, HUANG Ling-xiong, ZHU Hai-yong, SHEN Hong-yuan  
(Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** On the basis of the calculation result of the simultaneous dual wavelength threshold condition, the reflectivities of reflection mirror were more than 99.73% at 1 318.8 nm and 1 338 nm wavelengths, but about 7% at 1 064 nm; the output mirror was coated with the transmissions of 34.7% and 32.5% at 1 319 nm and 1 338 nm, respectively, the transmittance of the output mirror was 95% for 1 064 nm laser in the experiment. The strongest 1 064 nm line was effectively suppressed and a 1 319 nm and 1 338 nm dual wavelength Nd:YAG pulsed laser was successfully developed. The output energy of 0.89 J was obtained at the pump energy of 125 J with the total efficiency of 0.71% and the slope efficiency of 0.89%. The central wavelengths of the output laser are 1 318.8 nm and 1 338.2 nm with the FWHM of 0.35 nm and 0.48 nm, respectively. The intensity ratio of 1 319 nm to 1 338 nm wavelengths is 36 : 44.

**Key words:** Dual-wavelength; Pulsed laser; Nd:YAG laser; Laser output