

文章编号: 1007-5461(2005)04-0538-04

# LD 泵浦 Nd:YAG 人眼安全波段 1.44 $\mu\text{m}$ 激光器

薛庆华<sup>1,2</sup>, 郑 权<sup>1</sup>, 卜轶坤<sup>1,2</sup>, 钱龙生<sup>1</sup>

( 1 中国科学院长春光学精密机械与物理所, 吉林 长春 130022;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039 )

**摘 要:** 利用 808 nm LD 作泵浦源, 通过合理的谐振腔镀膜层设计, 实现了 Nd:YAG 的  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  能级跃迁, 获得了 1.44  $\mu\text{m}$  人眼安全波段激光的连续和脉冲运转。在泵浦功率为 1.5 W 的条件下, 激光器连续运转时, 腔内放入布氏片, 获得 268 mW 的稳定 TEM<sub>00</sub> 模线偏振激光输出, 激光阈值 380 mW, 斜效率达 23.9%,  $M^2$  因子小于 1.3。用新型饱和吸收体 V:YAG 代替布氏片垂直于光路放置, 获得了平均输出功率 36 mW, 脉冲宽度 106 ns, 脉冲重复频率 52 kHz 仍然是线偏振的激光输出, 相应脉冲峰值功率和单脉冲能量分别为 6.5 W 和 0.69  $\mu\text{J}$ 。

**关键词:** 激光技术; 激光二极管; Nd:YAG; 人眼安全

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

## 1 引言

波长在 1.4  $\mu\text{m}$  以上的人眼安全波段激光有着广泛的应用领域, 如: 激光雷达、通讯、外科手术等<sup>[1]</sup>。为了获得该波段的激光, 目前, 人们将注意力转向了利用技术非常成熟且价格低廉的 808 nm LD 作为泵浦源, 以性能优异的 Nd:YAG 为工作物质, 实现  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  的跃迁, 来获得 1.4  $\mu\text{m}$  以上人眼安全波段激光运转<sup>[1~4]</sup>。这种方法的优点是: 可获得比直接使用 LD 更高的输出功率, 更好的光束质量<sup>[2]</sup>。由于是四能级结构, 不会像 LD 泵浦准三能级的掺 Er、Tm、Ho 等工作物质时要强制制冷<sup>[3]</sup>, 也不会像以 Cr<sup>4+</sup>:YAG 为工作物质时要 1064 nm 激光作泵浦源<sup>[5]</sup>。

国外关于 Nd:YAG 的 1.44  $\mu\text{m}$  激光谱线的运转报道的较多<sup>[1~4]</sup>, 最大已获得 100 W 的连续输出<sup>[3]</sup>, 而国内这方面的工作尚未见文献报道。

利用额定输出功率为 2 W 的 808 nm LD 泵浦 Nd:YAG, 实现了 1.44  $\mu\text{m}$  人眼安全波段激光的连续和脉冲运转。在泵浦功率为 1.5 W 的条件下, 激光器连续运转时, 腔内放入布氏片, 获得输出功率为 268 mW 的稳定 TEM<sub>00</sub> 模线偏振 1.44  $\mu\text{m}$  激光输出, 其斜效率为 23.9%,  $M^2$  因子小于 1.3。

作者所在课题组已成功地利用新型的饱和吸收体 V:YAG<sup>[6]</sup> 对 Nd:YAG 的 1319 nm 谱线进行调 Q<sup>[7]</sup>, 这里用它对 Nd:YAG 的 1444 nm 谱线进行调 Q, 获得了平均输出功率 36 mW, 脉冲宽度 106 ns, 脉冲重复频率 52 kHz 仍然是线偏振的脉冲激光输出, 相应的峰值功率和单脉冲能量分别为 6.5 W 和 0.69  $\mu\text{J}$ 。

## 2 理论分析

通过选频元件以及镀制特殊的谐振腔膜等手段, Nd:YAG 已实现了 20 多条谱线的激光运转<sup>[8]</sup>, 1444 nm

**基金项目:** 国家 863 计划资助项目 (2002AA311141)

**收稿日期:** 2004-09-16; **修改日期:** 2004-10-25

**E-mail:** xueqinghua1978@sina.com

是其中的一条重要谱线, 对应着  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  的跃迁。该谱线的受激发射截面小, 仅  $3.4 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ <sup>[9]</sup>, 相应增益低, 对应的激光阈值较其它谱线高, 因此要实现它的运转, 必须抑制其它强增益谱线 1064 nm、1319 nm、1338 nm 等的振荡并提高泵浦功率密度。采用 LD 高功率密度泵浦和在谐振腔镜上镀 1444 nm 高反膜和其它谱线的减反膜, 可实现它的有效运转, 同时要选对 1444 nm 高透且价格低廉的材料作谐振腔镜的基底和膜层, 实验中腔镜基底材料为 BK7(透光波段 330~2100 nm), 膜层为光通讯用  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  材料, 它们对激光波长也都有很高的透过率。

当 Nd:YAG 吸收 808 nm 的泵浦光产生 1444 nm 激光时, 量子亏损大, 达 44%, 这将引起严重的热透镜效应, 进一步影响谐振腔的稳定性和腔模光斑的大小。一般情况下将热透镜当成理想的薄透镜来处理,

对于实验中的泵浦光斑半径  $\omega_p = 100 \mu\text{m}$ , 热透镜焦距估算为<sup>[2]</sup>:  $f_{\text{th}} = c/P_i$ , 其中  $c = 80 \text{mm} \cdot \text{W}$ , 为与热焦距  $f_{\text{th}}$  有关的常数,  $P_i$  为注入的泵浦功率。这样在泵浦功率小于 2 W 的情况下, 热焦距大于 40 mm。

平凹线性腔中考虑 Nd:YAG 热焦距时, 工作物质内的光斑半径与腔长的关系如图 1 所示, 其中  $L_0$  为腔的物理长度,  $R = 50 \text{mm}$  为实验中使用的输出镜曲率半径, 从图中可以看出,  $L_0 = 20 \text{mm}$  时, 腔参数对热焦距最不敏感。

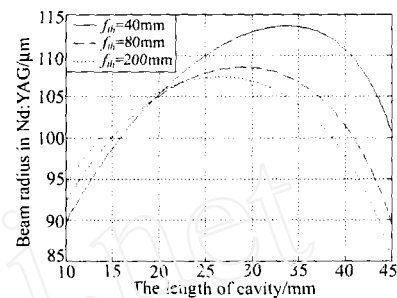


Fig.1 The relationship between the beam spot radius in Nd:YAG and the length of cavity ( $R=50 \text{mm}$ )

### 3 实验装置

根据上面的分析设计了如图 2 所示的实验装置。最大输出功率为 2 W 的 LD, 经耦合效率为 80% 左右的耦合光学系统准直 - 扩束 - 聚焦后, 在掺杂为 1.0 atm% 的 Nd:YAG(3 mm×3 mm×1.5 mm) 内的平均光斑半径约为  $100 \mu\text{m}$ ; Nd:YAG 左端面镀 808 nm 减反膜 ( $T > 95\%$ ) 和 1444 nm 高反膜 ( $R > 99.99\%$ ) 构成谐振腔的一个腔镜, 右端面镀 1444/1064/1319/1338 nm 减反膜 (剩余反射率  $R < 0.2\%$ ), 输出镜的曲率半径为 50 mm, 凹面镀 1444 nm 部分反射膜 ( $T = 2\%$ ) 和 1064/1319/1338 nm

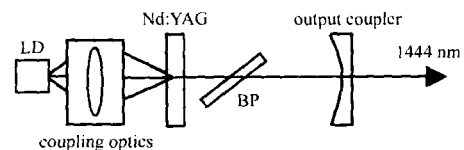


Fig.2 The experimental setup of 1444 nm laser

的减反膜 ( $T > 95\%$  at 1064 nm,  $T > 90\%$  at 1319 nm,  $T > 80\%$  at 1338 nm), 平面镀与 Nd:YAG 右端面相同的膜层。根据图 1, 谐振腔几何长度取 21 mm, 对应的腔模光斑半径为  $105 \mu\text{m}$ , 很好地满足低功率泵浦下的模式匹配要求<sup>[10]</sup>。腔内起偏器为厚度  $t = 0.5 \text{mm}$  的 BK7 材料的布氏片, 在激光波长处的折射率  $N = 1.502$ , 对应的布氏角为  $56.3^\circ$ 。为防止水蒸气对激光的吸收, 影响激光器的性能, 整个实验在干燥的环境下进行。

### 4 实验结果及分析

在图 2 的实验装置中, 不放布氏片, 泵浦功率为 1.5 W 时, 仔细调节 LD 的温控和各光学元件的位置, 获得了 306 mW 的非偏振 1444 nm 激光输出。放入布氏片后, 重新调节光路, 由于热致退偏效应, 获得了 268 mW 的线偏振激光输出, 偏振比大于 1000:1, 当该激光通过厚约 2 mm 的水层时几乎全部被吸收 (水对 1444 nm 吸收系数为  $\alpha = 26 \text{cm}^{-1}$ <sup>[3]</sup>), 利用光谱仪测量, 仅有 1444 nm 激光, 谱线如图 3 所示。此时的输入输出功率曲线如图 4 所示, 激光阈值仅为 380 mW。由于是低功率泵浦, 没有观察到激发态吸收

(ESA) 产生的黄绿色荧光现象, 因此斜效率较高, 为 23.9%, 高于大功率泵浦时 20% 的情况<sup>[1]</sup>。

布氏片在子午和弧矢面的等效空气厚度分别为  $t_t = \frac{\sqrt{N^2+1}}{N^4}t$  和  $t_s = \frac{\sqrt{N^2+1}}{N^2}t$ , 对实验中使用的薄 BK7 布氏片, 计算得到两个方向的束腰光斑半径相差仅  $0.2 \mu\text{m}$ , 束腰位置相差也很小, 仅  $0.05 \text{ mm}$ 。可以看出在上面的腔结构中它并没有产生明显的像散。实验中也证实了这一点, 激光的近场和远场光斑很圆, 利用刀口法测量激光的水平和垂直方向的光束质量  $M^2$  因子, 均小于 1.3。

为获得脉冲运转, 用新型饱和吸收体 V:YAG 对  $1444 \text{ nm}$  进行调 Q, 其在  $1.44 \mu\text{m}$  处小信号透过率约为 96%, 两面镀该波段的宽带减反膜。在 Nd:YAG 和布氏片之间放入 V:YAG, 仔细调节其方位角和倾斜角, 仅获得  $17 \text{ mW}$  平均输出功率。当撤掉布氏片, 获得了  $36 \text{ mW}$  的激光输出, 输出的平均功率与泵浦功率的关系如图 4 所示。用重庆四十四所上升时间小于  $1 \text{ ns}$  的 InGaAs 快速 PIN 光电二极管, 接 TDS1002 双通道  $100 \text{ MHz}$  示波器测量, 两种情况下的脉冲宽度 (FWHM) 和重复频率相差不大, 都约为  $106 \text{ ns}$ (图 5) 和  $52 \text{ kHz}$ , 而后者的脉冲峰值功率和单脉冲能量是前者的两倍, 分别为  $6.5 \text{ W}$  和  $0.69 \mu\text{J}$ 。腔内虽然没有偏振元件, 但输出仍然是高度线偏振的 (偏振比大于 500:1), 类似 Nd:YAG/Cr:YAG 的  $1064 \text{ nm}$  脉冲结果<sup>[11]</sup>, 偏振的激光有利于进行非线性频率变换。

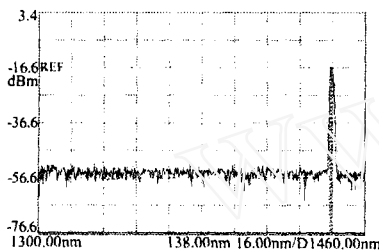


Fig.3 The spectrum of the laser

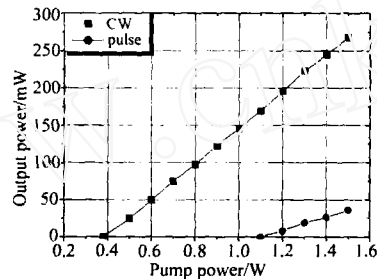


Fig.4 The relationship between the output and incident power

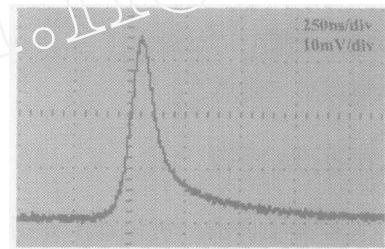


Fig.5 Pulse shape for 1444 nm laser

## 5 结 论

利用  $808 \text{ nm}$  LD 泵浦 Nd:YAG, 实现了  $1444 \text{ nm}$  人眼安全波段激光的连续运转和脉冲运转。在泵浦功率为  $1.5 \text{ W}$  的条件下, 激光器连续运转时, 腔内放入布氏片, 获得输出功率为  $268 \text{ mW}$  的稳定 TEM<sub>00</sub> 模线偏振激光输出, 阈值为  $380 \text{ mW}$ , 斜效率为 24.3%,  $M^2$  因子小于 1.3。用 V:YAG 被动调 Q, 获得了平均输出功率  $36 \text{ mW}$ , 脉冲宽度  $106 \text{ ns}$ , 脉冲重复频率  $52 \text{ kHz}$  仍然是线偏振脉冲激光输出, 相应的峰值功率和单脉冲能量分别为  $6.5 \text{ W}$  和  $0.69 \mu\text{J}$ 。

**致谢:** 对长春光学精密机械与物理研究所赵岭博士后提供的光谱测量表示感谢。

### 参考文献:

- [1] Kretschmann H M, Heine F, Ostroumov V G, et al. High-power diode-pumped continuous-wave Nd<sup>3+</sup> lasers at wavelengths near  $1.44 \mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(7): 466-468.
- [2] Agnesi A, Dell'Acqua S, Pennacchio C, et al. High-repetition-rate Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser at  $1.444 \mu\text{m}$  [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(18): 3984-3986.
- [3] Norman H, et al. Efficient  $100 \text{ W}$  Nd:YAG laser operating at a wavelength of  $1.444 \mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 1994, 19(17): 1328-1330.

- [4] Podlipensky A V, Yumashev K V, Kuleshov N V, *et al.* Passive Q-switching of 1.44  $\mu\text{m}$  and 1.34  $\mu\text{m}$  diode-pumped Nd:YAG lasers with a V:YAG saturable absorber [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, 76: 245-247.
- [5] Wang Jiaxian, Lü Fengping, Su Yafei. Investigation on compound resonator Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG laser with dual Q-switching operation [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 2004, 31(4): 399-402 (in Chinese).
- [6] Malyarevich A M, Denisov I A, Yumashev K V, *et al.* V:YAG-a new passive Q-switch for diode-pumped solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, 67: 555-558.
- [7] Xue Qinghua, Zheng Quan, Bu Yikun, *et al.* Diode-pumped passively Q-switched Nd:YAG 1.319  $\mu\text{m}$  lasers with a V<sup>3+</sup>:YAG crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), (to be published) (in Chinese).
- [8] Marling J. 1.05 ~1.44  $\mu\text{m}$  tunability and performance of the CW Nd<sup>3+</sup>:YAG laser [J]. *IEEE J. of Quant. Electron.*, 1978, 14(1): 56-62.
- [9] Singh S, Smith R G, *et al.* Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd<sup>3+</sup> in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. *Physics Review B*, 1974, 10: 2566-2572.
- [10] Frauchiger J, Albers P, *et al.* Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped CW Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, 28(4): 1046-1056.
- [11] Shimony Y, Burshtein Z, Baranga A, *et al.* Repetitive Q-switching of a CW Nd:YAG laser using Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorbers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, 32(2): 305-310.

## LD-pumped eye-safe Nd:YAG laser at 1.44 $\mu\text{m}$

XUE Qing-hua<sup>1,2</sup>, ZHENG Quan<sup>1</sup>, BU Yi-kun<sup>1,2</sup>, QIAN Long-sheng<sup>1</sup>

( 1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130022, China ;

2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China )

**Abstract:** A laser in eye-safe spectrum region at 1.44  $\mu\text{m}$  was demonstrated by using LD-pumped Nd:YAG. The  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$  transition of Nd:YAG was realized by reasonable coating on the mirrors of the resonator. The CW and pulse operation switched by a new type of saturable absorber V:YAG were realized, respectively. When the incident pump power was 1.5 W, CW linear polarization output power of 268 mW was obtained with Brewster plate acting as polarizer in the cavity. The threshold was 380 mW and the slope-efficiency was 23.9%. Beam quality factor  $M^2$  was less than 1.3. When V:YAG was inserted into the resonator instead of the Brewster plate with 0° incident angle, linear polarization laser was also demonstrated. The results of average power of 36 mW, pulse duration of 106 ns and pulse repetition rate of 52 kHz were obtained. The corresponding peak power and single pulse energy was 6.5 W and 0.69  $\mu\text{J}$ , respectively.

**Key words:** laser techniques; laser diode; Nd:YAG; eye-safe

**作者简介:** 薛庆华 (1978 - ), 男, 现在中国科学院长春光机物理所攻读光学专业博士学位, 研究方向为全固态激光器件及非线性频率变换技术。