

# 两个激光二极管端面泵浦的 基横模 Nd : YAG 激光器

生卫东 刘宏伟 宁继平 姚建铨

肖建伟

(天津大学精仪系, 天津 300072)

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**提要** 用两个功率为 1.5W 的连续激光二极管偏振耦合端面泵浦及分别从双端同时泵浦 Nd : YAG 激光器, TEM<sub>00</sub> 模 YAG 激光最大输出功率分别为 680 mW 和 492 mW, 总的光-光转换效率分别为 26.4% 和 17.7%。从理论上对二极管单端面及双端面泵浦的 YAG 激光器进行了分析计算。

**关键词** 激光二极管, 端面泵浦, Nd : YAG 激光

## 1 引言

激光二极管泵浦的固体激光器以其效率高、寿命长、结构紧凑、稳定性高等优点引起人们的极大兴趣, 成为国内外研究与商业活动的最热点之一。单发光元或列阵二极管端面泵浦固体激光器, 通过调整谐振腔的参数可保证泵浦光与谐振腔模得到理想匹配, 光-光转换效率很高, 多模器件通常为 30~50%<sup>[1]</sup>, 基模器件通常为 20~30%<sup>[2,3]</sup>。由于单个二极管源的功率较低, 从而限制了其端面泵浦的固体激光器件的输出功率。采用激光二极管偏振耦合或两端泵浦技术可使多个二极管同时进行端面泵浦, 可大大提高固体激光器的输出功率。本文采用两个功率为 1.5 W 国产连续激光二极管, 偏振耦合后端面泵浦 Nd : YAG 激光器得到连续、基横模 1.064  $\mu\text{m}$  的激光输出, 最高功率为 680 mW, 从注入 YAG 棒的泵浦光到 YAG 激光, 转换效率为 40.7%, 斜效率为 43.4%, 总的光-光转换效率为 26.4%。用两个激光二极管双端泵浦 Nd : YAG 激光器得到 1.064  $\mu\text{m}$  激光输出, 最高功率为 492 mW, 从注入 YAG 棒的泵浦光到 YAG 激光, 转换效率为 26.6%, 斜效率为 29.3%, 总的光-光转换效率为 17.7%。器件工作连续、稳定。理论上对激光二极管单端面、双端面泵浦的 Nd : YAG 激光器的泵浦阈值、输出功率及泵浦效率进行了计算分析。

## 2 实验装置及结果

实验用激光二极管为国产连续 1.5W 单发光元二极管, 发光面积为  $1 \times 200 \mu\text{m}^2$ , 在 18  $^{\circ}\text{C}$  时中心波长为 810.8 nm, 波长随温度调谐量为 0.3 nm/ $^{\circ}\text{C}$ , 通过温控系统将二极管工作温度调至 9.3  $^{\circ}\text{C}$ , 使二极管发射波长在 Nd : YAG 晶体吸收峰 808 nm 附近。二极管激光远场分布

是非对称的,在垂直于  $P-N$  结方向的发散角  $\theta_{\perp} = 30^{\circ}$  (FWHM),在平行于  $P-N$  结方向的发散角  $\theta_{\parallel} = 6^{\circ}$  (FWHM),远场能量呈高斯分布。

为消除光束的非对称性,并将泵浦光聚焦为一尺寸小于激光腔内基模尺寸的光斑,使泵浦光与振荡光达到最佳模式匹配,实验采用由两块柱面镜,两块双胶合球面镜组成的准直系统,将二极管激光分别准直为两束偏振方向互相垂直的平行光,经偏振棱镜耦合成一束平行光,再利用一块双胶合透镜会聚,端面泵浦 YAG 激光器,实验装置如图 1(a)。

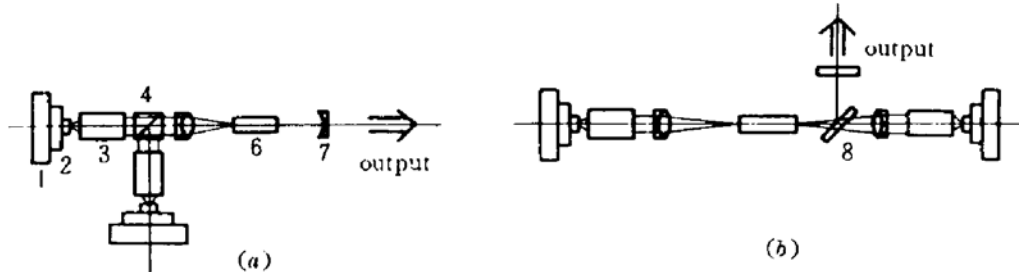


Fig. 1 Experimental setup for a two laser diodes end-pumped Nd : YAG laser

- 1: Temperature controller; 2: LD; 3: Collimating optics; 4: Polarizing prism;  
5: Focusing lens; 6: Nd : YAG; 7: Output mirror; 8: 45° Reflector

两束二极管激光经准直、偏振耦合、聚焦后,焦点处最大功率为 1.67 W,总耦合效率为 60%,聚焦透镜  $f = 22$  mm,焦斑尺寸约为  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。将两束二极管激光分别准直、会聚,从两端泵浦 Nd : YAG 激光器,实验装置如图 1(b)。

两束二极管激光准直聚焦后输入 YAG 棒功率之和最高为 1.85 W,焦斑尺寸约为  $100 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。

Nd : YAG 晶体为  $\phi 3 \times 9$  mm 的圆棒,掺杂浓度为 1.1%,棒一端镀双色膜( $1.064 \mu\text{m}$  高反,  $R > 99\%$ ,  $0.808 \mu\text{m}$  高透,  $T > 98\%$ )作为谐振腔的全反镜,另一端镀  $1.064 \mu\text{m}$  增透膜 ( $T > 99\%$ ),输出镜为凹面镜,曲率  $R = 100$  mm,对  $1.064 \mu\text{m}$  的透过率  $T = 3\%$ ,谐振腔腔长为  $L = 90$  mm。

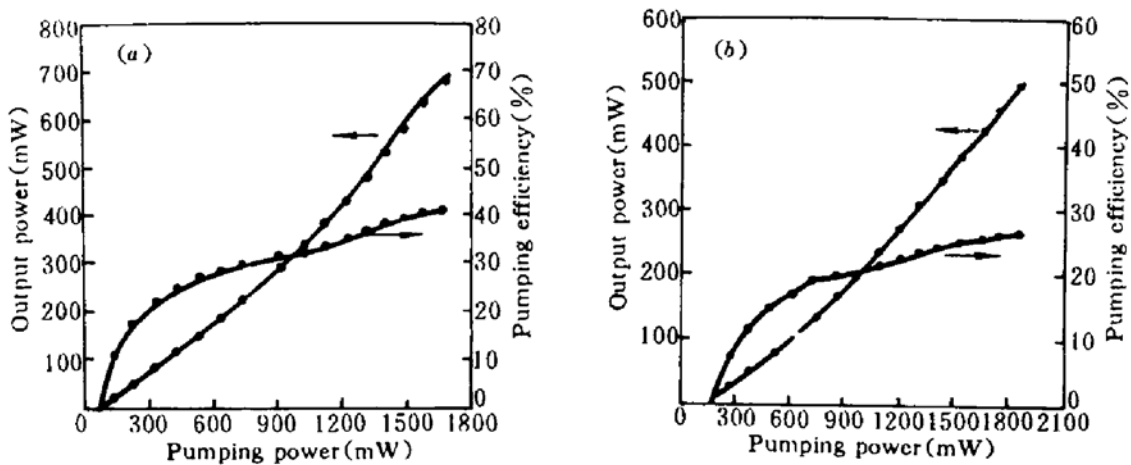


Fig. 2 The output power and pumping efficiency of the two laser diodes end-pumped Nd : YAG laser versus the incident pumping power into the crystal

(a) two laser diodes one-end pump; (b) two laser diodes two-end pump

图 2 (a) 为二极管激光偏振耦合端面泵浦 Nd : YAG 激光器,输出功率及效率与泵浦功率

的关系曲线, 阈值功率为 78 mW, 注入 YAG 棒的最大泵浦功率为 1.67 W 时输出功率为 680 mW, 转换效率为 40.7%, 斜效率为 43.4%。

图 2 (b) 为二极管激光双端泵浦 Nd : YAG 激光器输出功率、效率与泵浦功率的关系曲线, 阈值功率 170 mW, 注入 YAG 棒的最大泵浦功率 1.85 W 时输出功率 492 mW, 效率为 26.6%, 斜效率为 29.3%。

### 3 二极管端面泵浦 Nd : YAG 激光器的理论计算分析

考虑泵浦光和腔内振荡光在激光介质中随空间位置的变化, 基横模条件下, 稳态下速率方程可写为<sup>[4,5]</sup>

$$\iiint \frac{r_p(x, y, z) \cdot s_0(x, y, z) dV}{1 + \frac{c \cdot \sigma \cdot \tau_f}{n_s} S \cdot s_0(x, y, z)} = \frac{\delta}{2n_s \cdot L \cdot \tau_f \cdot \sigma \cdot R} \quad (1)$$

式中  $r_p(x, y, z)$  为归一化泵浦速率密度,  $s_0(x, y, z)$  为归一化光子数密度,  $R$  为介质内单位时间吸收的泵浦光子数,  $S$  为腔内光子数,  $\tau_f$  为荧光寿命,  $\sigma$  为受激发射截面,  $\delta$  为腔内往返损耗,  $L$  为谐振腔长,  $n_s$  为介质折射率

#### 3.1 阈值泵浦功率

阈值条件下,  $S = 0$ ,

$$R_{th} = \frac{\delta}{2n_s L \cdot \tau_f \cdot \sigma} \iiint r_p(x, y, z) s_0(x, y, z) dV \quad (2)$$

设泵浦光与振荡光均为圆对称光, 能量分布为高斯分布, 平均光斑半径分别用  $\bar{w}_p$  和  $\bar{w}_s$  表示。

单端泵浦时,

$$r_p(x, y, z) = \frac{2\alpha_p}{[1 - \exp(-\alpha_p \cdot t)]\pi\bar{w}_p^2} \exp(-\alpha_p r^2) \exp\left[-2(x^2 + y^2) \frac{1}{\bar{w}_p^2}\right] \quad (3)$$

双端泵浦时,

$$r_p(x, y, z) = \frac{\alpha_p}{[1 - \exp(-\alpha_p l)]\pi\bar{w}_p^2} \{\exp(-\alpha_p z) + \exp[-\alpha_p(t - z)]\} \exp\left[-2(x^2 + y^2) \frac{1}{\bar{w}_p^2}\right] \quad (4)$$

$$s_0(x, y, z) = \frac{2}{\pi\bar{w}_s^2 \cdot l} \exp\left[-2(x^2 + y^2) \cdot \frac{1}{\bar{w}_s^2}\right] \quad (5)$$

$\alpha_p$  为介质对泵浦光吸收系数,  $l$  为介质有效长度。

将(3), (4) 分别代入(2) 得到阈值泵浦功率:

$$P_{th} = h\nu_s \frac{R_{th}}{\eta_s} = \frac{1}{\eta_s} \cdot \frac{h\nu_s}{\sigma\tau_f} \cdot \frac{\delta}{2} \cdot \frac{\pi}{2} (\bar{w}_s^2 + \bar{w}_p^2) \quad (6)$$

单端 = 双端阈值泵浦功率的表达式相同, 所不同的是两者泵浦光在介质内的平均光斑半径不同。

设泵浦光焦点在介质端面处, 光在介质内分布为:

$$w_p(z) = w_{p0} + \theta_p \cdot z$$

$w_{p0}$  为焦斑半径,  $\theta_p$  为泵浦光在介质内的发散角。

单端泵浦下,

$$\bar{w}_r^2 = \frac{1}{l} \int_0^l w_r^2(z) dz = \bar{w}_{r_0}^2 \cdot w_{r_0} \theta_r \cdot l + (\theta_r \cdot l)^2 / 3 \quad (7)$$

双端泵浦下,

$$\bar{w}_r^2 = \frac{2}{l} \int_{l/2}^l w_r^2(z) dz = 2 \left[ \bar{w}_{r_0}^2 + \bar{w}_{r_0} \cdot \theta_r \cdot \frac{l}{2} + \frac{3(\theta_r \cdot l)^2}{4} \right] \quad (8)$$

阈值泵浦功率主要取决于泵浦光在介质内的平均光斑,由于双端泵浦的平均光斑比单端泵浦大,所以双端泵浦的阈值功率比单端泵浦高。图 3 为端面泵浦阈值功率与焦斑半径的关系,计算中取  $\sigma = 3.2 \times 10^{-19} \text{cm}$ ,  $\tau_f = 230 \mu\text{s}$ ,  $\alpha_r = 4 \text{cm}^{-1}$ ,  $\theta_r = 4^\circ$ ,  $l = 9 \text{mm}$ ,  $\delta = 0.032$ 。

### 3.2 输出功率与泵浦效率

将式(3),(4)分别代入(1),利用高斯求积法数值求解,可以求得单端、双端泵浦下腔内光子数  $S$ ,进而求得输出功率及泵浦效率。输出功率为

$$P_{\text{out}} = S \cdot h\nu_s \cdot \frac{C}{2n_s L} T \quad (9)$$

$T$  为输出镜的透过率。

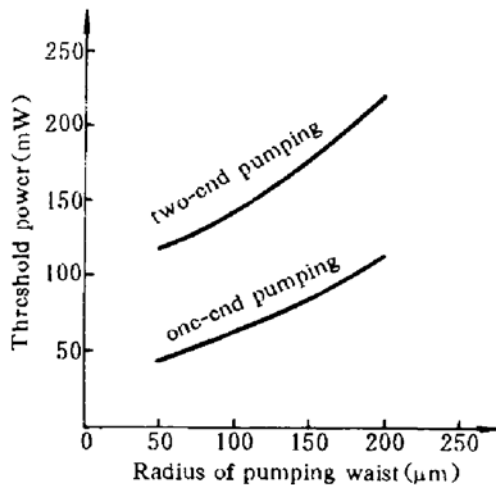


Fig. 3 Calculated end pumping threshold power as a function of the focusing spot size

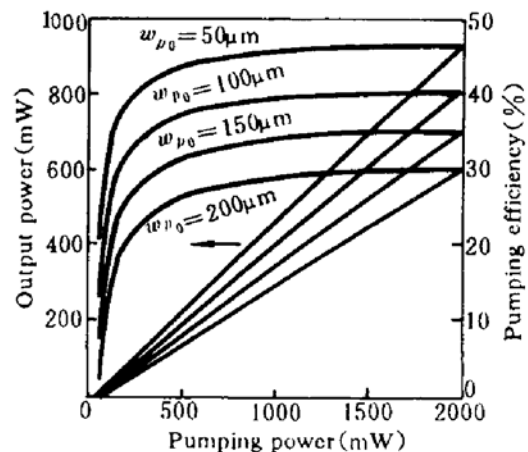


Fig. 4 Calculated output power and pumping efficiency of Nd : YAG laser as a function of the incident end pumping power into the crystal

图 4 为二极管单端泵浦,不同焦斑半径下输出功率、泵浦效率随输入功率变化的曲线。

泵浦效率随着泵浦功率超过阈值逐渐增大而大幅度增大,泵浦功率远离阈值时,泵浦效率增大大幅度逐渐减小。

双端泵浦下,输出功率及效率随泵浦功率变化的趋势与单端泵浦相同,只是由于双端泵浦下,介质内泵浦光平均光斑较大,输出功率及效率较低。

## 4 结 论

本文对两个激光二极管端面泵浦的 Nd : YAG 激光器进行了实验及理论研究,实验中得到  $1.064 \mu\text{m}$  激光的最大输出功率 680 mW,最高泵浦效率 40.7%,最低泵浦阈值 78 mW,理论计算结果与实验略有差别,计算的阈值泵浦功率比实验值低而泵浦效率比实验值高,原因是理论上认为泵浦光斑在介质中是圆对称且与振荡光完全匹配,而实际泵浦光为椭圆分布,且焦

斑处存在像散。因此改善光学耦合系统,使泵浦光斑圆对称且像散很小,可降低阈值功率,提高效率,此工作正在进行中。

**致谢** 参加本工作的还有孙小卫、杨国文、徐遵图等同志,在此一并感谢。

### 参 考 文 献

- 1 S. C. Tidwell, J. F. Seamans, C. E. Hamilton *et al.*. Efficient, 15-W output power, diode-end-pumped Nd : YAG laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(8) : 584~586
- 2 D. C. Shannon, R. W. Wallace. High power Nd : YAG laser end pumped by a CW,  $10\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$  aperture 10W laser diode bar. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(5) : 318~320
- 3 Satoshi Yamaguchi, Hirofumi Imai. Efficient Nd : YAG laser end-pumped by a 1 cm aperture laser diode bar with a GRIN lens array coupling. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1992, **QE-28**(4) : 1101~1105
- 4 Ken'ichi Kubodera, Kenju Otsuka. Single-transverse-mode  $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$  slab waveguide laser. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(2) : 653~659
- 5 M. J. F. Digonnet, C. J. Gada. Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(3) : 333~342

## TEM<sub>00</sub> Mode Nd : YAG Laser End-Pumped by Two Laser Diodes

Sheng Weidong Liu Hongwei Ning Jiping Yao Jianquan

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Xiao Jianwei

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing 100083)

**Abstract** The Nd : YAG lasers one-end pumped by two polarization-coupled CW 1.5 W laser diodes and two-end pumped by two CW 1.5 W laser diodes are reported. The maximum output power of 680 mW and 492 mW of a TEM<sub>00</sub> mode YAG laser at 1.064  $\mu\text{m}$  with overall optical efficiency of 26.4% and 17.7% is obtained respectively. A theoretical analysis is given.

**Key words** laser diode, end-pumped, Nd : YAG laser