

# 高功率准连续激光二极管泵浦的 Nd : YAG 激光器

宁继平 肖绪辉 汤声书 熊 英 姚建铨

(天津大学激光与光电子研究所, 天津 300072)

**提要** 对高功率准连续激光二极管侧面泵浦 Nd : YAG 固体激光器进行了理论和实验研究。当泵浦能量为 135 mJ 时, 得到脉冲能量为 16 mJ 和 1064 nm 激光, 重复频率可达 400 Hz。

**关键词** 高功率准连续激光二极管, 侧面泵浦, Nd : YAG 激光器

## 1 引 言

半导体激光泵浦的固体激光器(DPL)由于兼有了激光二极管和固体激光器的双重优点, 近年来得到迅速发展, 在军事、医疗、通讯、加工和科学研究中将得到广泛的应用。

激光二极管侧面泵浦方式相对端面泵浦模式覆盖度差、效率低、激光阈值高, 但是光学耦合简单、结构紧凑且均匀, 适合高功率线阵和面阵的 LD 泵浦, 可获得高功率激光输出。本文报道了采用高功率准连续激光二极管侧面泵浦 Nd : YAG 激光器的理论与实验研究结果。

## 2 理论分析

激光二极管泵浦的固体激光器其理论分析采用激光速率方程。由于泵浦光不能充满整个激光介质, 且不是均匀分布, 因此, 泵浦速率密度  $W(x, y, z, t)$  和腔内光子数密度  $\varphi_0(x, y, z, t)$  是空间和时域的函数。理想的四能级激光速率方程为<sup>[1~3]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta n(x, y, z, t)}{\partial t} &= n_1(x, y, z, t)w_{14}(x, y, z) - \frac{\Delta n(x, y, z, t)}{\tau_3} - v\sigma_{32}\Delta n(x, y, z, t)\varphi(x, y, z, t) \\ \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} &= v\sigma_{32} \iiint \Delta n(x, y, z, t) \varphi(x, y, z, t) dV - \frac{\psi(t)}{\tau_c} \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\Delta n(x, y, z, t)$  为激活介质内的反转粒子密度,  $\varphi(x, y, z, t)$  是基模的光子密度,  $n_1$  为基态粒子数密度,  $v$  为激光介质中的光速,  $V$  为激光模体积,  $\psi(t)$  为腔模内的光子总数, 且

$$\psi(t) = \iiint \varphi(x, y, z, t) dV \quad (2)$$

$w_{14}(x, y, z)$  为泵浦速度,  $\tau_3$  为激活介质的荧光寿命,  $\sigma_{32}$  为受激辐射截面,  $\tau_c$  为腔内光子的寿命。定义归一化的泵浦速率和光子数分布函数为

$$\begin{aligned}\varphi(x, y, z, t) &= \psi(t)\varphi_0(x, y, z) \\ w(x, y, z, t) &= w(t)w(x, y, z)\end{aligned}\quad (3)$$

其中  $\varphi_0(x, y, z)$  和  $w(x, y, z)$  满足归一化条件。当激光器达到稳态时, 利用(1), (3) 式得到

$$\iiint \frac{\varphi_0(x, y, z)w(x, y, z)dV}{1 + v\sigma_{32}\tau_3\psi(t)\varphi_0(x, y, z)} = \frac{1}{v\sigma_{32}\tau_c\tau_3w(t)}\quad (4)$$

### 2.1 激光器的泵浦阈值

在(4) 式中令  $\psi(t) = 0$ , 即可得到阈值泵浦功率

$$P_{th} = \frac{hv_0}{\eta_p} \frac{1}{\sigma_{32}\tau_3} \frac{\delta}{2} \frac{n}{L} \frac{1}{J(0)}\quad (5)$$

其中  $J(0) = \iiint \varphi_0(x, y, z) w(x, y, z) dV$  (6)

$\tau_c = 2L/\delta c$  为腔内光子寿命,  $L$  为腔的光学长度,  $\delta$  为光在腔内往返损耗,  $\eta_p = \eta_1\eta_2(hv_0/hv_p)$  为泵浦效率,  $\eta_1$  为光学耦合效率,  $\eta_2$  为增益介质的吸收效率。

### 2.2 近阈值近似下的输出功率

当激光器在阈值附近运转时, 利用(4) 式得

$$v\sigma_{32}\tau_3\psi(t)\varphi_0(x, y, z) \ll 1$$

激光器的输出功率为  $P_{out} = \eta_p \frac{T}{\delta} \frac{J^2(0)}{J_1} (P - P_{th})$  (7)

式中  $J_1 = \iiint \varphi_0^2(x, y, z) w(x, y, z) dV$  (8)

$T$  为输出镜的透过率。

### 2.3 强泵浦时的输出功率

如果泵浦光很强, 激光器远离阈值状态运转, 即

$$v\sigma_{32}\tau_3\psi(t)\varphi_0(x, y, z) \gg 1$$

激光器的输出功率为  $P_{out} = \eta_p \frac{T}{\delta} P$  (9)

上述推导假定激光器单模工作, 在强泵浦情况下, 要保持激光器单模工作, 必须满足激光介质中激光模体积远远大于泵浦模体积的要求, 这时  $J^2(0)/J_1 = 1$ 。

总之, 对于上述两种情况, 激光器的输出功率与泵浦功率、泵浦光与激光的交叠因子  $J^2(0)/J_1$  及输出镜的透过率成正比。

### 2.4 侧面泵浦 DPL 理论

激光器泵浦方式不同会影响到泵浦光和激光在激光介质中的交叠情况。对于侧面泵浦的情况, 假定激光介质为长方体晶体, 谐振腔为直线腔。z 轴在端面的中轴线上, 激光沿长方体 z 方向振荡, 晶体长为  $l$ , 沿 x 轴厚度为  $d$ , y 轴宽度为  $h$ , 则基模高斯光束为

$$\varphi_0(x, y, z) = \frac{2}{\pi l w_0^2} \exp\left\{\frac{2(x - d/2)^2 + 2y^2}{w^2(z)}\right\}\quad (10)$$

为了充分利用泵浦光, 通常在泵浦侧的对面镀 808 nm 光的高反膜(Nd: YAG), 此时 x 处的泵浦功率等于正反两方向泵浦光功率的叠加。设另一侧对泵浦光的反射率为  $R$ , 则

$$w(x, y, z) = \frac{\alpha_p[\exp(-\alpha_p x) + R(-2\alpha_p d + \alpha_p x)]}{2lw_0[1 - R\exp(-2\alpha_p d)]}\quad (11)$$

将(10), (11) 式分别代入(6), (8), (5), (7), (9) 式, 可得到  $J(0)$ ,  $J_1$  侧面泵浦的表达式, 激光器的阈值泵浦功率及输出功率。图 1~2 表示了反射镜的曲率半径对阈值泵浦功率和  $J^2(0)/J_1$

的影响。曲率半径的增加,使激光光斑  $w_0$  增加,从而阈值提高,而  $J^2(0)/J_1$  和  $w_0$  增加,提高了输出功率。

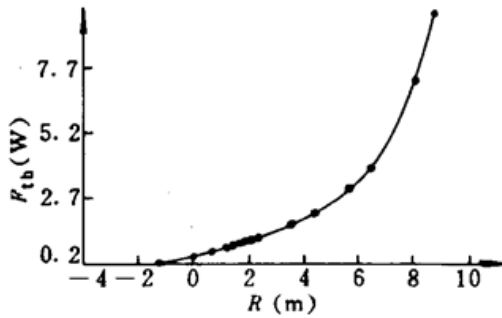


Fig. 1 Pump threshold power versus radius of mirror curvature

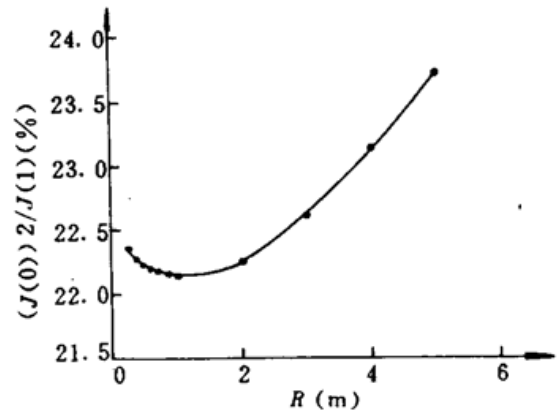


Fig. 2 Parameter  $J^2(0)/J_1$  versus radius of mirror curvature

### 3 实验结果

实验中采用准连续激光二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 晶体方式,泵浦源为美国 SDL 公司 Q-CW LDA 产品,其发光尺寸为  $40 \times 3.6$  mm,中心波长在温度  $25^\circ\text{C}$  时为 807 nm, Nd:YAG 几何尺寸为  $2 \times 5 \times 41$  mm<sup>3</sup>, Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 1%,在  $2 \times 5$  mm<sup>2</sup> 的端面镀 1064 nm 光高反膜,作为谐振腔的全反镜,而另一端镀 1064 nm 光的增透膜,  $5 \times 41$  mm<sup>2</sup> 尺寸的一面镀 808 nm 的增透膜,而相对的另一面镀 808 nm 的全反膜,采用 LD 直接侧面泵浦方式。实验中研究了泵浦光功率、温度、重复率、腔长及输出镜的透过率等参数对激光输出特性的影响。

#### 3.1 泵浦光功率的影响

实验中选取 LD 重复率 400 Hz,脉宽 250  $\mu\text{s}$ ,腔长 27 cm,输出镜的透过率 19%,实验结果表明,随着输入功率的增加,激光输出功率近似线性增大,如图 3 所示,这与理论分析一致。当泵浦能量为 135 mJ 时,产生 1064 nm 激光最大能量为 16 mJ,光-光转换效率为 12%,阈值泵浦能量为 30 mJ,输出镜的透过率为 30%。

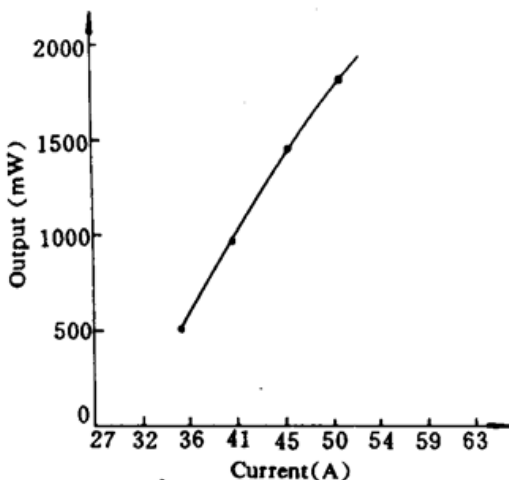


Fig. 3 Output power as a function of pump power

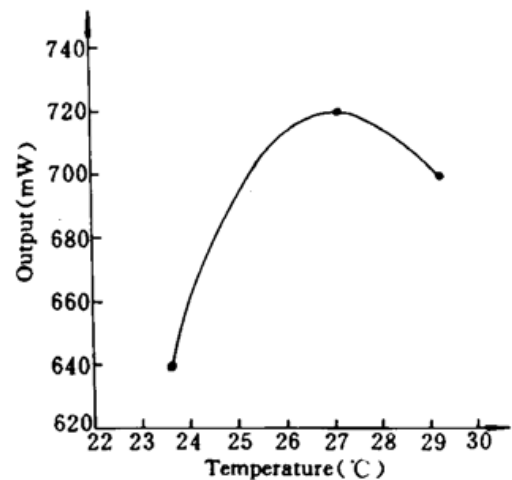


Fig. 4 Laser output power as a function of temperature for a diode laser

#### 3.2 温度的影响

由于 LD 的输出功率及波长随着温度的改变而变化,而 Nd:YAG 介质的吸收带宽较窄,

为了使 LD 的输出波长与 YAG 晶体的吸收中心波长相匹配,对 LD 采用恒温控制,结果表明,当 LD 重复率为 65 Hz,脉宽为 300  $\mu\text{s}$ ,输入电流为 50 A,输出镜的透过率为 13%和温度在 25~29  $^{\circ}\text{C}$  范围内时,激光输出功率最大,如图 4 所示。这是 LD 输出波长、功率及自身随工作电流不同波长存在漂移综合影响的结果。

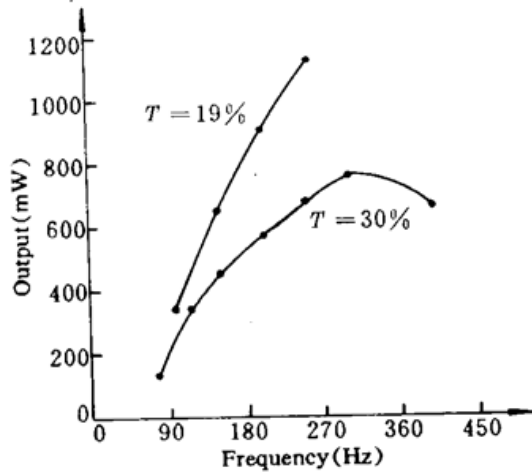


Fig. 5 Output power versus repetition rate and mirror transmissivity

输出功率最大,如图 5 所示。结果表明,LD 泵浦能量从 60 mJ 到 135 mJ,重复率从 100 Hz 到 400 Hz 变化时,输出镜的最佳透过率处于 7.9%到 30%之间的某一值。

### 3.5 谐振腔长度的影响

实验中采用平-平谐振腔,改变腔长,理论上并不改变腔内基模光斑大小,只改变腔内横模个数,但由于在高功率泵浦时,腔内有一定的热效应,因而腔长的改变,对基模光斑大小也有影响。实验中发现,不同泵浦功率和重复率,最佳腔长也有差别。

### 3.3 重复率的影响

实验中选取 LD 脉宽 300  $\mu\text{s}$ ,腔长 10 cm,输入电流 35 A,温度在 30  $^{\circ}\text{C}$  左右,改变 LD 的重复率从 80 Hz 到 300 Hz,激光输出功率近似线性增长,如图 5 所示。当重复率从 300 Hz 增加到 400 Hz 时,激光输出功率反而下降,这是由腔内存在的热效应造成的。

### 3.4 输出镜透过率的影响

由于泵浦阈值与腔内损耗成正比,透过损耗的增大,泵浦阈值也线性增加,因此,输出镜透过率  $T$  也是影响激光输出特性参量之一。不同的泵浦能量和重复率,对应一最佳的透过率  $T$ ,使激光

## 参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan, R. L. Byer. Laser pumped solid-state laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1988, QE-24(6): 895
- 2 M. J. F. Digonnet, C. J. Gaeta. Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators. *Appl. Opt.*, 1985, 24(3): 333
- 3 T. Y. Fan, R. L. Byer. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm-Nd:YAG laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1987, QE-23: 605

## High Power Q-CW Diode Laser Arrays Side-pumped Nd:YAG Laser

Ning Jiping Xiao Xuhui Tang Shengshu Xiong Ying Yao Jianquan

(Laser and Optic-electronics Institute, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** A high power Q-CW diode laser arrays side-pumped Nd:YAG laser is theoretically and experimentally studied. A pulse energy of 16 mJ at the wavelength of 1064 nm under a pump pulse energy of 135 mJ is obtained. The maximum pulse repetition rate is 400 Hz.

**Key words** high power quasi-diode laser, side-pump, Nd:YAG laser