

文章编号: 0253-2239(2004)05-633-8

# 线阵激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器特性研究\*

杨爱粉<sup>1,2</sup> 卜英华<sup>2</sup> 陈德东<sup>1</sup> 李兵斌<sup>1</sup> 王石语<sup>1</sup> 蔡德芳<sup>1</sup> 文建国<sup>1</sup> 过 振<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)  
(<sup>2</sup> 西安应用光学研究所, 西安 710065)

**摘要:** 依据四能级系统速率方程, 推导出了多横模振荡固体激光器输出与输入参量的关系。对二极管抽运固体激光器中线阵激光二极管三向对称侧面抽运结构, 计算了抽运光强分布, 并就激光器的阈值抽运功率、近阈值条件下的斜率效率、输出功率和光束质量等与抽运参量的关系, 进行了数值计算。由计算结果看出, 线阵激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器中晶体半径和抽运光束腰半径是影响输出激光功率和光束质量的主要因素, 并通过在谐振腔中加小孔选模, 使光束质量得到明显改善。选择了一组三向侧面抽运结构参量进行了实验验证, 实验结果与理论计算一致。

**关键词:** 激光技术; 固体激光器; 激光二极管抽运; 侧面抽运; 抽运光强

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Characteristic of Liner LDs Side-Pumped Nd:YAG Laser

Yang Aifen<sup>1,2</sup> Bu Yinghua<sup>2</sup> Chen Dedong<sup>1</sup> Li Bingbin<sup>1</sup>  
Wang Shiyu<sup>1</sup> Cai Defang<sup>1</sup> Wen Jianguo<sup>1</sup> Guo Zhen<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071)  
(<sup>2</sup> Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065)  
(Received 17 March 2003; revised 5 June 2003)

**Abstract:** Starting from the four-level system rate-equations, the relationship between output parameters and pump parameters in multi-mode solid-state laser has been deduced. For a three liner laser diode side-pumped symmetry in laser diode-pumped solid-state lasers, the pump intensity distribution is calculated, and series numerical calculations relating to the relationship between output parameters (such as threshold pump power, slope efficiency, output power and beam performance) and pump parameters are conducted. It can be seen that both radius of Nd:YAG crystal and of pump beam waist are main factors to affect output power and beam performance. The beam performance has been improved obviously by mode-selecting with a small aperture. A set of parameters in three Liner laser diode side-pumped symmetry have been chosen to test the numerical calculation results experimentally. The experimental results are consistent to calculated ones.

**Key words:** laser technique; solid-state laser; laser-diode-pumping; side-pumping; pump intensity

## 1 引 言

传统的灯抽运固体激光器, 由于其抽运光形式固定, 因而不容易通过改变抽运光空间分布来改善输出激光功率和光束质量。而激光二极管抽运固体

激光器(DPL)是一种具有效率高、性能稳定、输出光束质量好、体积小、使用方便等优点的全固化器件, 可以通过选择合理的抽运光参量, 提高输出激光功率, 改善光束质量<sup>[1~4]</sup>。

线阵激光二极管侧面抽运是大功率二极管抽运固体激光器的有效抽运途径。然而线阵激光二极管侧面抽运时, 抽运光与腔模振荡光空间匹配性较差, 容易产生多横模振荡, 为此采用三向、五向等多向对称侧面抽运方式可获取较好的光束质量<sup>[5]</sup>。本文将

\* 国家重点实验室基金(00JS08.1.1.DZ0103)、国家自然科学基金(60078022)资助课题。

E-mail: yaf65@sohu.com

收稿日期: 2003-03-17; 收到修改稿日期: 2003-06-05

对常用的三向对称侧面抽运结构,就激光器的阈值抽运功率、近阈值条件下的斜率效率、输出功率和光束质量等与抽运参量的关系,进行数值计算,选择出比较合理的抽运参量,并用实验进行了验证。

## 2 线阵激光二极管侧面抽运理论

### 2.1 速率方程

对确定的激光腔结构,连续运转的固体激光器归一化的  $m$  个横模速率方程组为<sup>[6,7]</sup>

$$\frac{\partial n(x, y, z, t)}{\partial t} = p(x, y, z, t) - \frac{n(x, y, z, t)}{\tau_f} - \frac{cn(x, y, z, t)}{n_g} \sum_{i=1}^m \sigma_i S_i(x, y, z, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_i(t)}{\partial t} = \frac{c\sigma_i}{n_g} \iiint n(x, y, z, t) S_i(x, y, z, t) dV - \frac{c\delta_i}{2L} N_i(t), \quad (2)$$

(1)和(2)式中  $n(x, y, z, t)$  是反转粒子数密度,  $\tau_f$  为激光上能级荧光寿命,  $c$  为真空中光速,  $n_g$  为增益介质的折射率,  $\sigma_i$  为第  $i$  个模的受激辐射截面,  $\delta_i$  为第  $i$  个模在腔内的往返损耗,  $L$  为谐振腔光学长度,  $p(x, y, z, t)$  是抽运速率密度,它等于归一化抽运光场分布函数  $r_0(x, y, z)$  与抽运速率  $R(t)$  的乘积,即

$$p(x, y, z, t) = R(t) \cdot r_0(x, y, z),$$

而  $S_i(x, y, z, t)$  是第  $i$  个振荡模光子密度,它等于腔内第  $i$  个振荡模光子总数  $N_i(t)$  与第  $i$  个模归一化光场分布函数  $s_i(x, y, z)$  的乘积,即

$$S_i(x, y, z, t) = N_i(t) s_i(x, y, z),$$

(2) 式积分在整个增益介质内进行。

### 2.2 稳定条件

激光器稳定运转时,满足,

$$\frac{\partial n(x, y, z, t)}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial N_i(t)}{\partial t} = 0,$$

则由(1)式和(2)式得到激光腔内  $m$  个模所满足的稳态方程:

$$\iiint \frac{r_0(x, y, z) s_i(x, y, z)}{1 + \frac{c}{n_g} \tau_f \sum_{i=1}^m \sigma_i N_i(t) s_i(x, y, z)} dV = \frac{n_g \delta_i}{2L \sigma_i \tau_f R}. \quad (3)$$

### 2.3 阈值抽运功率

当抽运恰好达到阈值时,第  $i$  个模的受激辐射光子数  $N_i(t) = 0$ ,由(3)式得到第  $i$  个模单独起振时的阈值抽运速率  $R_i^{\text{th}}$  为

$$R_i^{\text{th}} = \frac{n_g \delta_i}{2L \sigma_i \tau_f} \frac{1}{J_{0i}}, \quad (4)$$

其中  $J_{0i} = \iiint r_0(x, y, z) s_i(x, y, z) dV$ , 为归一化抽运光场分布函数与第  $i$  个模的归一化振荡光场分布函数的交叠积分,反映了抽运光和振荡光的空间重叠程度。那么激光器第  $i$  个模的阈值抽运功率  $P_i^{\text{th}}$  为

$$P_i^{\text{th}} = \frac{h\nu_p R_i^{\text{th}}}{\eta_0} = \frac{h\nu_p}{\eta_0} \frac{n_g \delta_i}{2L \sigma_i \tau_f} \frac{1}{J_{0i}}, \quad (5)$$

式中  $h$  为普朗克常量,  $\nu_p$  为抽运光频率,  $\eta_0$  为抽运功率转化为被吸收功率的转化系数。可见,激光器第  $i$  个模的阈值抽运功率与交叠积分  $J_{0i}$  成反比,与其在腔内的往返损耗  $\delta_i$  成正比。

### 2.4 输出功率和斜率效率

激光器稳定输出时,  $N_i(t) = N_i$  为常量,第  $i$  个模的输出功率  $P_i^{\text{out}}$  和斜率效率  $\eta_i$  分别为

$$P_i^{\text{out}} = h\nu_s N_i \frac{c}{2L} T, \quad (6)$$

$$\eta_i = P_i^{\text{out}} / (P_i^{\text{in}} - P_i^{\text{th}}), \quad (7)$$

式中  $T$  为输出镜的透过率,  $\nu_s$  为振荡光频率,  $P_i^{\text{in}}$  是第  $i$  个模的抽运功率。

通常很难得到腔内光子数的解析解,这里只讨论近阈值和强抽运两个特殊情况。

#### 1) 近阈值

近阈值附近,腔内光子数密度满足

$$\frac{c\sigma_i}{n_g} \tau_f N_i s_i(x, y, z) \ll 1,$$

将(3)式按泰勒级数展开并取一级近似,可求得腔内第  $i$  个振荡模的光子数

$$N_i = \left[ J_{0i} - \frac{n_g \delta_i}{2L \sigma_i \tau_f R_i} \right] \frac{n_g}{c \sigma_i \tau_f J_{1i}}, \quad (8)$$

式中  $J_{1i} = \iiint r_0(x, y, z) s_i^2(x, y, z) dV$ 。利用(4),并在近阈值附近  $R_i \cdot R_i^{\text{th}} \approx (R_i^{\text{th}})^2$ , 则有

$$N_i = \frac{2L}{c \delta_i} \frac{J_{0i}^2}{J_{1i}} (R_i - R_i^{\text{th}}), \quad (9)$$

所以激光器第  $i$  个模的输出功率和斜率效率分别为

$$P_i^{\text{out}} = \eta_0 \frac{h\nu_s}{h\nu_p} \frac{T}{\delta_i} \frac{J_{0i}^2}{J_{1i}} (P_i^{\text{in}} - P_i^{\text{th}}), \quad (10)$$

$$\eta_i = \eta_0 \frac{h\nu_s}{h\nu_p} \frac{T}{\delta_i} \frac{J_{0i}^2}{J_{1i}}, \quad (11)$$

(10)式和(11)式中  $J_{0i}^2/J_{1i}$  为第  $i$  个模的重叠效率因子,它表征了抽运光与第  $i$  个模的振荡光的空间重叠程度。可见,对确定的激光腔结构,第  $i$  个模

的输出功率和斜率效率与该模的重叠效率因子成正比,与其在腔内的往返损耗  $\delta_i$  成反比。

## 2) 强抽运

强抽运条件下,腔内光子数密度满足

$$\frac{c\sigma_i}{n_g} \tau_i N_i s_i(x, y, z) \gg 1,$$

则由(3)式得

$$N_i = \frac{2L}{c\delta_i} R_i, \quad (12)$$

$$P_i^{\text{out}} = \eta_0 \frac{h\nu_s}{h\nu_p} \frac{T}{\delta_i} P_i^{\text{in}}, \quad (13)$$

可见在强抽运下重叠效率因子  $J_{0i}^2/J_{1i} \rightarrow 1$ ,表明抽运光与振荡光在空间高度重叠,模式达最佳匹配,输出功率和斜率效率最大。

## 2.5 线阵激光二极管侧面抽运光强分布

侧面抽运时,激光二极管阵列沿晶体轴线方向排列成线阵。由于它们排列密集,抽运光沿晶体轴线方向近似呈线状排列,因此在与晶体轴线方向垂直的各横截面内,认为抽运情况相同<sup>[8]</sup>。考虑晶体对抽运光的折射,单向侧面抽运时抽运光与晶体相互作用的横截面如图 1 所示。

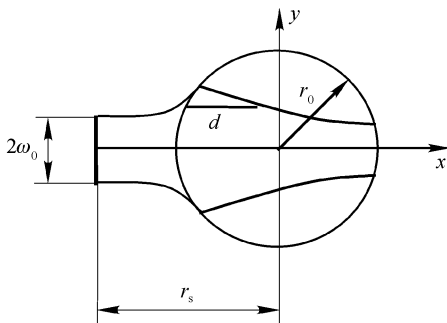


Fig. 1 Cross-sectional view of the Nd:YAG rod pumped by single line LDs

图中  $\omega_0$  为进入晶体的抽运光束腰半径,  $r_s$  为抽运束腰到晶体轴心的距离,  $d$  为抽运光通过晶体的距离,  $r_0$  为 Nd:YAG 晶体的半径。图 1 中晶体内抽运光强分布为

$$I(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x)} \exp\left[-\frac{2y^2}{w^2(x)} - \alpha d\right], \quad (14)$$

其中  $I_0$  是沿晶体轴向单位长度的抽运光功率,  $w(x)$  是由高斯光束的传输矩阵计算出的晶体内  $x$  处抽运光束半径,  $\alpha$  为晶体对抽运光的吸收系数,  $\lambda$  为抽运光的波长。(14) 式中抽运光通过晶体的距离  $d$  可近似表示为

$$d = \sqrt{r_0^2 - y^2} + x. \quad (15)$$

对图 2 所示的三个线阵激光二极管的发射光轴互成  $120^\circ$  抽运的情况,各点抽运光强是三个线阵激光二极管在该点光强的叠加。

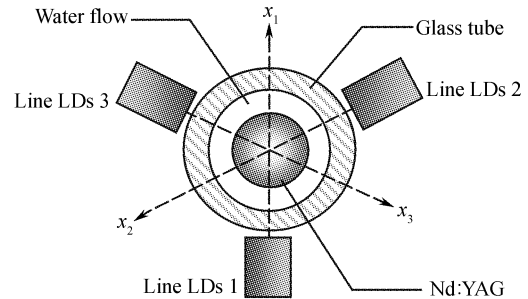


Fig. 2 View of three Liner LDs side-pumped symmetry

假设晶体轴系  $xOy$  与线阵激光二极管 1 轴系  $x_1O_1y_1$  重合,则三个线阵激光二极管在晶体内任一点  $(x, y, z)$  处的抽运光强分布分别为

线阵激光二极管 1

$$I_1(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x)} \exp\left[-\frac{2y^2}{w^2(x)} - \alpha d_1\right], \quad (16)$$

其中  $d_1 = \sqrt{r_0^2 - y^2} + x$ ,

线阵激光二极管 2

$$I_2(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x_2)} \exp\left[-\frac{2y_2^2}{w^2(x_2)} - \alpha d_2\right], \quad (17)$$

其中

$$d_2 = \sqrt{r_0^2 - y_2^2} + x_2,$$

$$x_2 = x \cos 120^\circ + y \sin 120^\circ,$$

$$y_2 = -x \sin 120^\circ + y \cos 120^\circ,$$

线阵激光二极管 3

$$I_3(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x_3)} \exp\left[-\frac{2y_3^2}{w^2(x_3)} - \alpha d_3\right], \quad (18)$$

其中

$$d_3 = \sqrt{r_0^2 - y_3^2} + x_3,$$

$$x_3 = x \cos(-120^\circ) + y \sin(-120^\circ),$$

$$y_3 = -x \sin(-120^\circ) + y \cos(-120^\circ),$$

那么点  $(x, y, z)$  处归一化的抽运光强分布为

$$I(x, y, z) = \frac{1}{3} [I_1(x, y, z) + I_2(x, y, z) + I_3(x, y, z)]. \quad (19)$$

## 2.6 振荡光场分布

三个线阵激光二极管互成  $120^\circ$  抽运时,激光谐振腔中振荡光不再是 TEM<sub>00</sub> 圆高斯光束,其三个低阶振荡模的归一化光场分布函数分别为

TEM<sub>00</sub> 模

$$s_{00}(x, y, z) = \frac{2}{\pi L \omega_{00}^2(z)} \exp\left\{-2\left[\frac{x^2 + y^2}{\omega_{00}^2(z)}\right]\right\}, \quad (20a)$$

TEM<sub>10</sub> 模

$$s_{10}(x, y, z) = \frac{8}{\pi L \omega_{10}^4(z)} x^2 \exp\left\{-2\left[\frac{x^2 + y^2}{\omega_{10}^2(z)}\right]\right\}, \quad (20b)$$

TEM<sub>01</sub> 模

$$s_{01}(x, y, z) = \frac{8}{\pi L \omega_{01}^4(z)} y^2 \exp\left\{-2\left[\frac{x^2 + y^2}{\omega_{01}^2(z)}\right]\right\}, \quad (20c)$$

(20)中的  $\omega_{00}(z)$ 、 $\omega_{10}(z)$  和  $\omega_{01}(z)$  分别为 TEM<sub>00</sub>、TEM<sub>10</sub> 和 TEM<sub>01</sub> 在  $z$  处的光束半径, 并且有  $\omega_{10}^2(z) = \omega_{01}^2(z) = 3\omega_{00}^2(z)$ 。运用(19)和(20)即可求出三个低

阶振荡模与抽运光的交叠积分和重叠效率因子。

### 3 线阵激光二极管三向侧面抽运数值计算

#### 3.1 抽运光强分布

对直径 3 mm、长度 20 mm 的 Nd:YAG 晶体, 取抽运束腰到晶体轴心距离  $r_s = 3.5$  mm, 抽运光束腰半径  $\omega_0 = 0.1$  mm, 由(19)式数值计算线阵激光二极管三向侧面近阈值抽运时晶体横截面内抽运光强分布如图 3 所示。可见抽运光强沿径向并不是高斯分布, 因而将产生多阶厄米—高斯振荡。

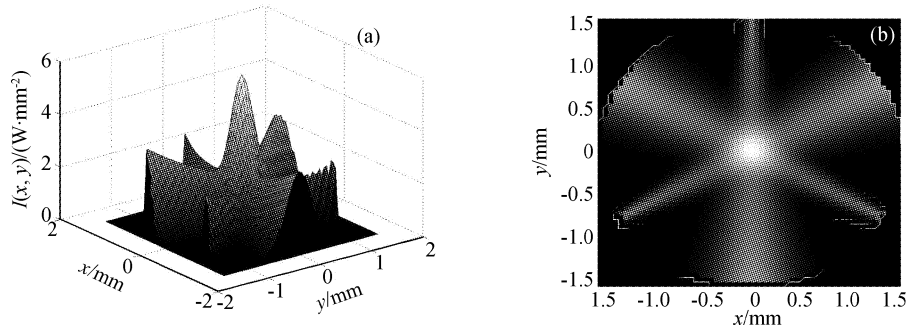


Fig. 3 Pump intensity distribution in three liner LDs side-pumped symmetry

#### 3.2 输出特性

这里仅对 TEM<sub>00</sub>、TEM<sub>10</sub> 和 TEM<sub>01</sub> 三个低阶振荡模式的输出特性进行数值计算。

##### 3.2.1 抽运光束腰半径对输出的影响

取抽运束腰到晶体轴心距离  $r_s = 3.5$  mm, Nd:YAG 晶体半径  $r_0 = 1.5$  mm, 数值计算阈值抽运功率、斜率效率、输出功率和光束质量等随抽运光束腰半径  $\omega_0$  的相对变化, 计算结果见图 4。由曲线看出, 抽运光束腰半径对激光器输出影响较大。当抽运光束腰半径在 0.02~0.03 mm 时, TEM<sub>00</sub> 模和 TEM<sub>10</sub> 模阈值抽运功率最低, 斜率效率和输出功率最大, 但此时输出以 TEM<sub>10</sub> 模为主。抽运光的束腰半径小于 0.09 mm 时, TEM<sub>10</sub> 模的功率大于 TEM<sub>00</sub> 模的功率, 而大于 0.09 mm 时, TEM<sub>00</sub> 模的功率较大, 光束质量有所改进。

##### 3.2.2 晶体半径对输出的影响

取抽运束腰到晶体轴心距离  $r_s = 3.5$  mm, 抽运光束腰半径  $\omega_0 = 0.03$  mm, 数值计算阈值抽运功率、斜率效率、输出功率和光束质量等随 Nd:YAG 晶体半径  $r_0$  的相对变化, 计算结果见图 5。可见

Nd:YAG 晶体半径对激光器输出也有较大影响。TEM<sub>00</sub> 模的阈值抽运功率随着晶体半径的增大而提高, 斜率效率和输出功率随着晶体半径的增大而减小。当晶体半径小于 1.2 mm 时, TEM<sub>10</sub> 和 TEM<sub>01</sub> 模阈值抽运功率随着晶体半径的增大而降低, 斜率效率和输出功率随着晶体半径的增大而提高。晶体半径在 1.2 mm 附近, TEM<sub>10</sub> 和 TEM<sub>01</sub> 模的阈值抽运功率有极小值, 而斜率效率和输出功率有极大值。而当晶体半径大于 1.2 mm 时, TEM<sub>10</sub> 和 TEM<sub>01</sub> 模的阈值抽运功率随着晶体半径的增大而提高, 斜率效率和输出功率随着晶体半径的增大而减小。随着晶体半径的增大, 光束质量降低。

##### 3.2.3 抽运束腰到晶体距离对输出的影响

取抽运光束腰半径  $\omega_0 = 0.03$  mm, Nd:YAG 晶体半径  $r_0 = 1.5$  mm, 数值计算阈值抽运功率、斜率效率、输出功率和光束质量等随抽运束腰到晶体边缘的距离  $r_s - r_0$  的相对变化, 结果见图 6。从图中可知抽运束腰到晶体的距离对三个模的阈值抽运功率影响不大, TEM<sub>00</sub> 模和 TEM<sub>10</sub> 模的斜率效率和输出功率随抽运束腰到晶体边缘距离的增大而降低。

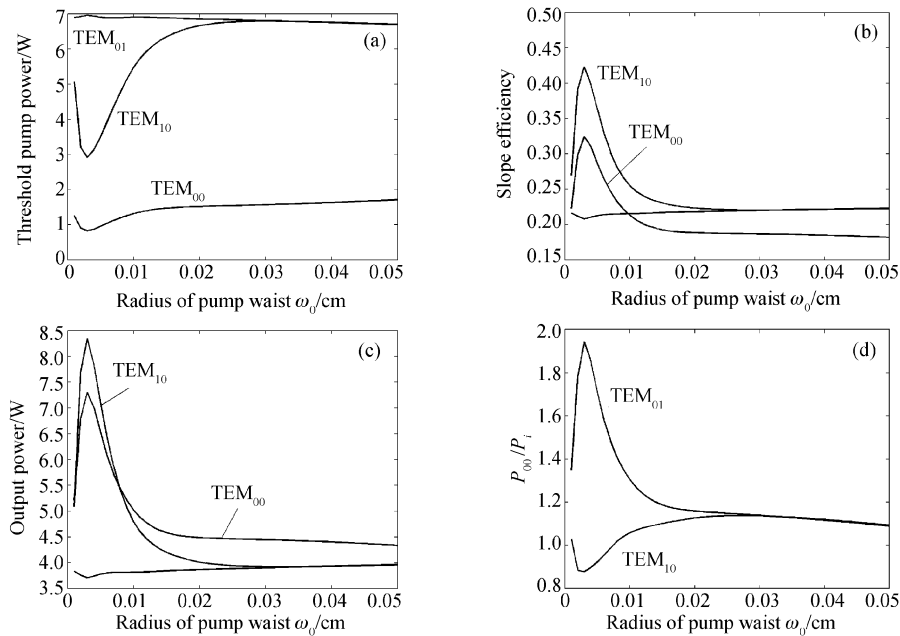


Fig. 4 Influence of radius of pump beam waist ( $\omega_0$ ) on threshold pump-power, slope efficiency, output power and ratio of  $TEM_{00}$  power to  $TEM_{10}$  and  $TEM_{01}$ 's

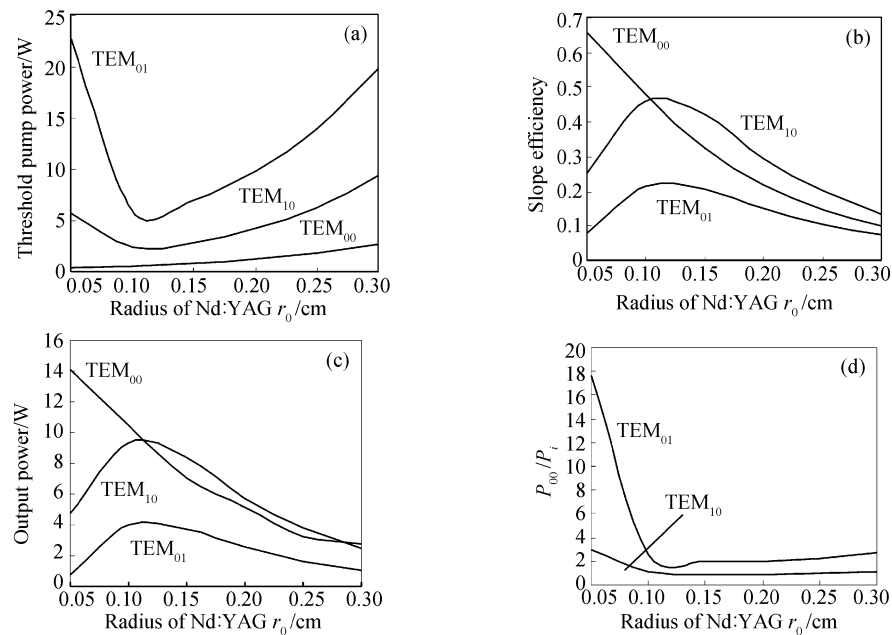


Fig. 5 Influence of radius of Nd:YAG crystal ( $r_0$ ) on threshold pump-power, slope efficiency, output power and ratio of  $TEM_{00}$  power to  $TEM_{10}$  and  $TEM_{01}$ 's

### 3.2.4 输出光束质量

三个模共存时,若  $TEM_{00}$  模的功率相对于  $TEM_{10}$  模和  $TEM_{01}$  模的越大,总的输出光束质量越好,  $M^2$  因子就越小。从图 4~图 6 的曲线可知,两个主要的振荡模  $TEM_{00}$  和  $TEM_{10}$  的输出参量差别不是很大,而总输出是两个模的叠加,因此光束质量不高。为了改善光束质量,在谐振腔中加小孔光阑,

这样  $TEM_{10}$  和  $TEM_{01}$  模损耗的增加远高于  $TEM_{00}$  模损耗的增加。图 7 为加小孔光阑后输出功率及  $TEM_{00}$  模功率与  $TEM_{10}$  模和  $TEM_{01}$  模功率比值的数值计算结果。可见在谐振腔中加小孔光阑可有效抑制  $TEM_{10}$  和  $TEM_{01}$  模振荡,明显提高了光束质量,但这是以降低输出功率为代价的。

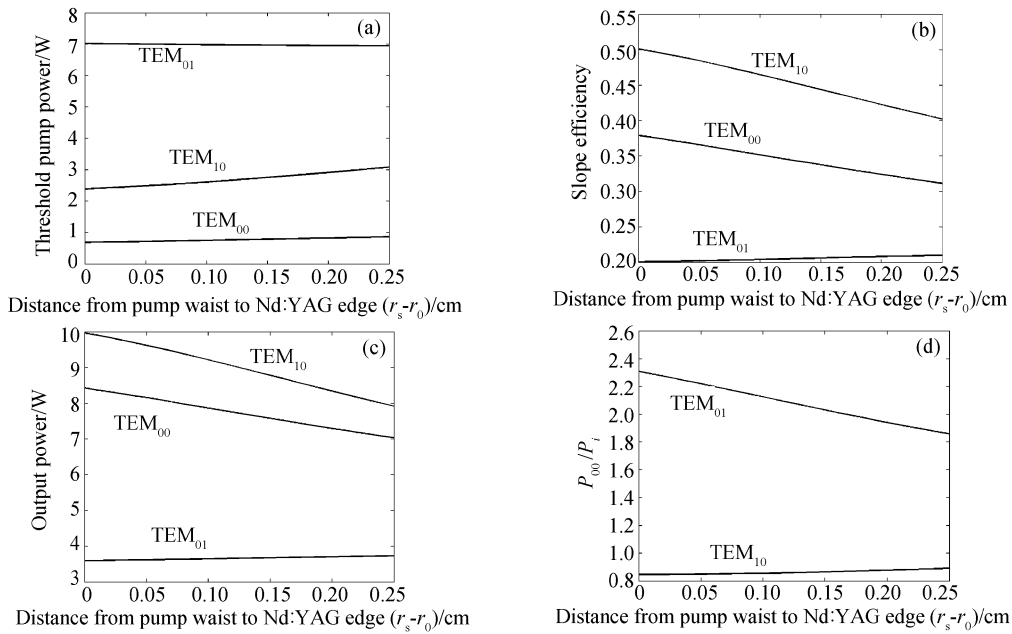


Fig. 6 Influence of distance from pump waist to crystal edge ( $r_s - r_0$ ) on threshold pump-power, slope efficiency, output power and Ratio of  $TEM_{00}$  power to  $TEM_{10}$  and  $TEM_{01}$ 's

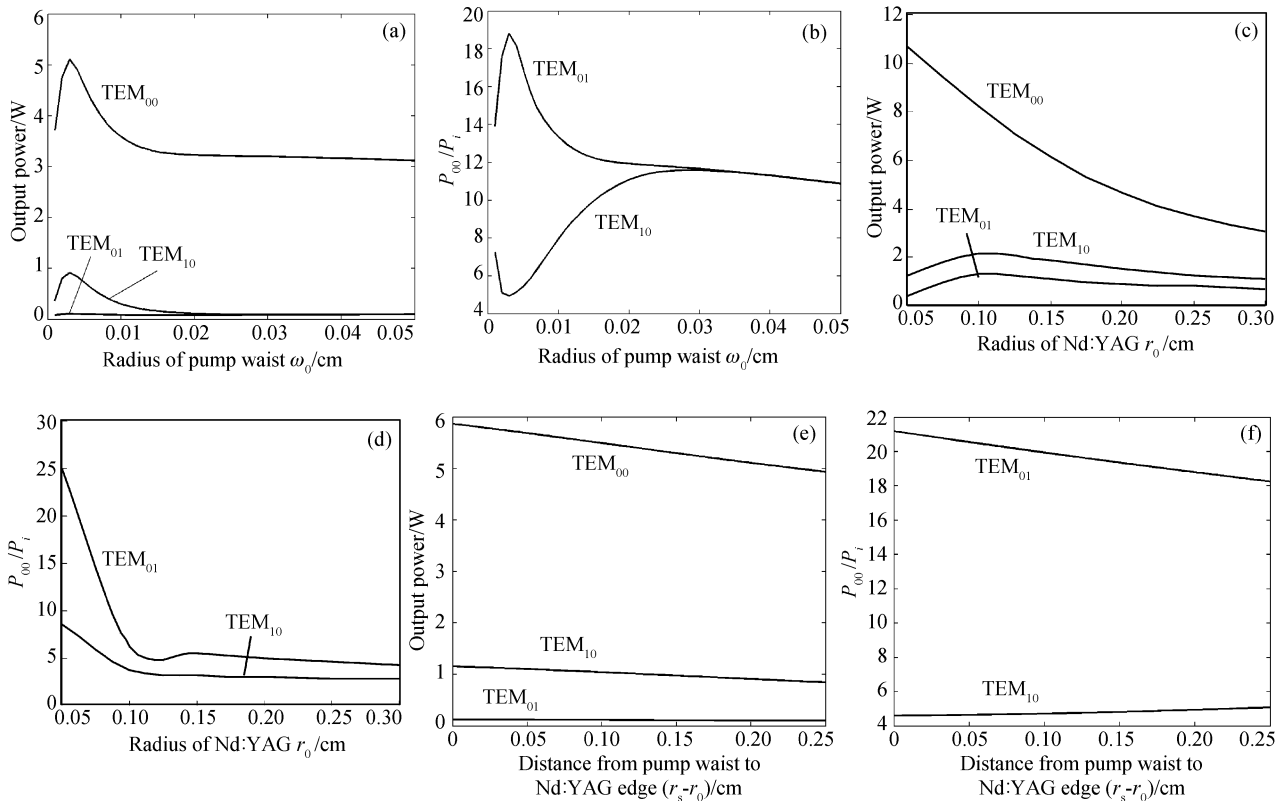


Fig. 7 Output power and its ratio of  $TEM_{00}$  to  $TEM_{10}$  and  $TEM_{01}$ 's with a small aperture

#### 4 线阵激光二极管三向侧面抽运实验

根据实际的 Nd:YAG 晶体尺寸,实验选用的抽运结构参量为  $r_0 = 1.5 \text{ mm}$ ,  $r_s = 3.5 \text{ mm}$ ,  $\omega_0 = 0.03 \text{ mm}$ ,用  $3 \times 20 \text{ W}$  的线阵激光二极管三向侧面

抽运直径  $3 \text{ mm}$ 、长度  $20 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 晶体,获得功率为  $12.80 \text{ W}$  的连续激光,斜率效率  $41\%$ 。实验时无法将  $TEM_{00}$  模与  $TEM_{10}$  模分开,只能考虑总的效果。拍摄近阈值抽运时 Nd:YAG 晶体内的荧光分布如图8所示。输出  $1064 \text{ nm}$  激光光强分布曲

线及拍摄的光斑见图 9, 光斑形状与  $TEM_{10}$  的相似, 可见与数值计算结果一致。实验还测量了近阈值抽运时输出激光的  $M^2$  因子和发散角, 结果见表 1。

Table 1 Differences of the quality of the output laser beam between mode-selecting and no mode-selecting

Experiment content	$M^2$ factor	Divergence angle / mrad
No mode-selecting	27.26	10.8
Mode-selecting with a small aperture	10.35	4.6

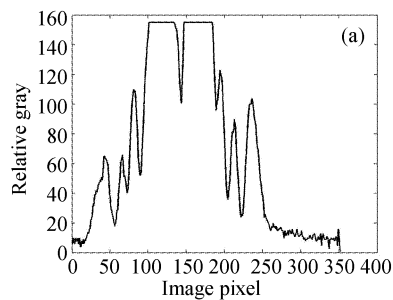


Fig. 9 Intensity distribution and facula of output laser

在谐振腔中用直径 1.2 mm 的小孔进行选模, 虽然降低了输出功率, 但光束质量得到了明显提高。输出激光光强分布曲线及光斑见图 10, 可见输出为  $TEM_{00}$  模。输出激光的  $M^2$  因子和发散角与不加小

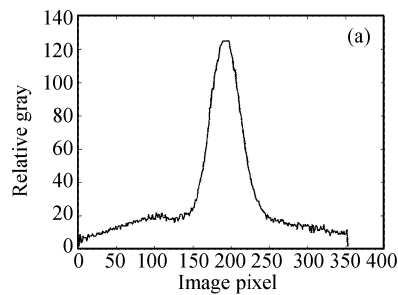


Fig. 10 Intensity distribution and facula of output laser mode-selecting with a small aperture

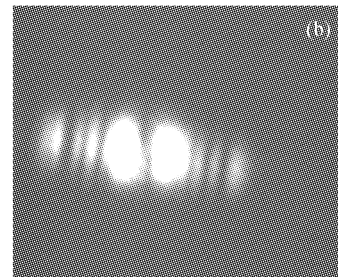
**结论** 线阵激光二极管三向侧面抽运结构产生多模激光振荡, 但以  $TEM_{00}$  模和  $TEM_{10}$  模为主。由数值计算结果看出, 抽运光的束腰半径  $\omega_0$  和晶体半径  $r_c$  对激光器输出性能影响较大, 主要表现为:

1) 当抽运光的束腰半径在 0.02 ~ 0.03 mm 时,  $TEM_{00}$  模和  $TEM_{10}$  模阈值抽运功率最低, 斜率效率和输出功率最大, 但此时输出以  $TEM_{10}$  模为主。而当抽运光的束腰半径  $\omega_0$  大于 0.09 mm 时,  $TEM_{00}$  的功率较大, 光束质量有所改进;

2) 随着晶体半径的增大,  $TEM_{00}$  模的阈值抽运功率提高, 斜率效率和输出功率减小。当晶体半径

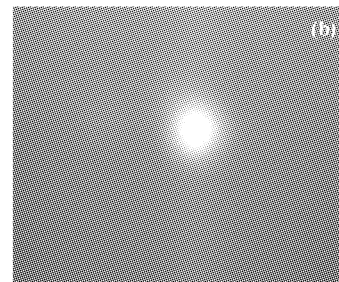


Fig. 8 Fluorescence distribution in Nd:YAG crystal



孔时比较见表 1。

我们还用  $3 \times 60$  W 的线阵激光二极管三向侧面抽运直径  $\phi 3$  mm、长度 63 mm 的 Nd:YAG 晶体, 获得功率为 53 W 的连续激光, 斜率效率达 51%。



$r_c$  小于 1.2 mm 时,  $TEM_{10}$  和  $TEM_{01}$  模阈值抽运功率随着晶体半径的增大而降低, 斜率效率和输出功率随着晶体半径的增大而提高。晶体半径在 1.2 mm 附近,  $TEM_{10}$  和  $TEM_{01}$  模的阈值抽运功率有极小值, 而斜率效率和输出功率有极大值。当晶体半径  $r_c$  大于 1.2 mm 时,  $TEM_{10}$  和  $TEM_{01}$  模阈值抽运功率随着晶体半径的增大而提高, 斜率效率和输出功率随着晶体半径的增大而减小。随着晶体半径的增大, 光束质量降低。

因此通过合理选择抽运光束腰半径、Nd:YAG 晶体半径和抽运光束腰到晶体的距离, 可获得高的

输出功率和好的光束质量。在谐振腔中采用小孔选模措施可以明显改善光束质量。文中选择的一组抽运参量的实验结果与数值计算结果一致。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Shiyu, Xue Haizhong, Tang Yangde *et al.*. Study of the effect of the distribution of pumping light on the diode pumped solid-state laser. *J. Xidian University* (西安电子科技大学学报), 2003, **30**(1):75~80 (in Chinese)
- 2 Wang Shiyu, Guo Zhen, Fu Junmei *et al.*. Heat-induced undulation in the distribution of diode-pumped solid-state laser. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2003, **52**(2): 355~361 (in Chinese)
- 3 Wang Shiyu, Guo Zhen, Fu Junmei *et al.*. The base mode's distribution noises in LD pumped solid-state laser. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2003, **32**(3):286~289 (in Chinese)
- 4 Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(6):895~912
- 5 Zhao Hong, Jiang Dongsheng, Wang Jianjun *et al.*. Gain distribution characteristics in working medium side-pumped by diode bars. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1):57~62 (in Chinese)
- 6 Ning Jiping, Tang Shengshu, Xiong Ying *et al.*. Theoretical analysis of diode-laser arrays pumped solid-state laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9): 1183~1188 (in Chinese)
- 7 Paolo Laporta, Marcello Brussard. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(10):2319~2326
- 8 Sutton S B, Albrecht G F. Simple analytical method to calculate the radial energy deposition profile in an isotropic diode-pumped solid-state laser rod. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(30):5937~5947