

激光二极管面阵列泵浦固体 激光器的理论分析

宁继平 汤声书 熊 英 常志武 姚建铨

(天津大学精仪学院教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072)

摘 要 对于激光二极管侧面泵浦的固体激光器, 泵浦光和振荡光场为空间分布函数, 利用四能级速率方程, 得到了激光器输入和输出参数之间的关系。分析了空间参数对激光器输出特性的影响, 找到了最佳参数。

关键词 激光二极管侧面泵浦, 空间分布函数, 输出特性, 最佳参数。

1 引 言

激光二极管(LD)泵浦的固体激光器(DPL)效率高, 频率稳定, 谱线窄, 寿命长, 结构简单, 使用方便, 可制成小体积全固化器件, 已成为固体激光器件发展的主流方向。采用大功率激光二极管面阵列(LDA)作泵浦源, 可以得到高功率的激光输出, 使其在激光雷达、测距、水下通信、精密加工、激光医学、激光武器等应用方面成为首选激光器, 具有巨大的潜在应用。

2 激光二极管面阵列侧面泵浦理论

大功率激光二极管面阵列由于发光面积大, 很难把泵浦光高效地沿轴向耦合进入激光介质, 所以采用侧面泵浦方式。但侧面泵浦与纵向泵浦不同, 由于侧面泵浦的泵浦光与振荡光场很难重合, 转换效率低, 易产生多模运转。因而, 从理论上研究侧面泵浦的输出特性对于设计和优化器件都有重要的意义。理论分析采用激光速率方程, 对于连续运转的固体激光器, 归一化的 m 个横模运转的速率方程组为^[1-3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta n(x, y, z, t)}{\partial t} &= W(t) W_p(x, y, z) - \frac{\Delta n(x, y, z, t)}{\tau} - \\ &\frac{c}{n} \Delta n(x, y, z, t) \sum_{i=1}^m \sigma_i \Phi_i(t) \mathcal{Q}(x, y, z) \\ \frac{\partial \Phi_i(t)}{\partial t} &= \frac{c}{n} \sigma_i \iiint \Delta n(x, y, z, t) \Phi_i(t) \mathcal{Q}(x, y, z) dV - \frac{\Phi_i(t)}{\tau_{ci}} \\ W(x, y, z, t) &= W(t) W_p(x, y, z) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Phi_i(x, y, z, t) = \Phi_i(t) \mathcal{Q}(x, y, z) \quad (2)$$

其中 $\iiint_{mV} W_p(x, y, z) dV = 1$, mV 表示对增益介质体积分。

$$\iiint_{rV} \mathcal{Q}(x, y, z) dV = 1, \quad rV \text{ 表示对谐振腔积分。}$$

式中 $W_p(x, y, z)$ 和 $\mathcal{Q}(x, y, z)$ 分别为归一化的泵浦速率密度函数及腔内第 i 个模光子数密度函数, $W(t)$ 、 $\mathcal{Q}(t)$ 分别为泵浦速率和腔内第 i 个模的光子总数, τ 为激光介质的荧光寿命, σ_i 为第 i 个模的受激辐射截面, τ_{ci} 为第 i 个模的光子寿命, n 为介质的折射率。当激光器达到稳定时, $\frac{\partial \Delta n(x, y, z, t)}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial \Phi_i(t)}{\partial t} = 0$, 由(1)式得到:

$$\iiint \frac{\mathcal{Q}(x, y, z) W_p(x, y, z)}{1 + \frac{c}{n} \tau_i \sum_{i=1}^m \sigma_i \Phi_i(x, y, z)} dV = \frac{n}{c \tau_{ci} \tau \sigma_i W} = \frac{n \delta_i}{2L \sigma_i \tau W} \quad (3)$$

式中 $\tau_{ci} = \frac{2L}{c \delta_i}$, L 为谐振腔的光学长度, δ_i 为第 i 个横模在腔内的往返损耗。(3)式即为腔内 m 个振荡模所满足的稳态方程。它决定了泵浦光与振荡光空间上相互重叠程度, 而重叠程度直接影响到激光器的输出特性。

2.1 阈值泵浦功率

在(3)式中, 当 $\Phi = 0$ 时, 激光器的阈值泵浦功率为:

$$P_{\text{th}} = \frac{h\nu_p W_{\text{th}}}{\eta_1} = \frac{h\nu_p}{\eta_1} \frac{1}{\sigma_i \tau_i} \frac{\delta_i n}{2L} J_{i(1)}^{-1} \quad (4)$$

式中 $J_{i(1)} = \iiint \mathcal{Q}(x, y, z) W_p(x, y, z) dV$ (5)

P_{th} 为第 i 个模的阈值泵浦功率, $h\nu_p$ 为泵浦光子能量, η_1 为增益介质的吸收效率。 $J_{i(1)}$ 为第 i 个模的重叠积分, 它表征了泵浦光与第 i 个模的振荡光的空间重叠程度。

2.2 输出功率 P_{out} 和斜效率 η_φ

$$P_{\text{out}} = h\nu_0 \Phi \frac{c}{2L} T \quad (6)$$

式中 T 为输出镜的透过率, $h\nu_0$ 为振荡光子的能量。

$$\eta_\varphi = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}} - P_{\text{th}}} \quad (7)$$

式中 P_{in} 为照射在增益介质上的泵浦功率。

通常情况下, 很难得到腔内光子数 Φ 的解析解。因此仅讨论在近阈值和远离阈值泵浦时激光器的输出特性。

1) 近阈值条件下的输出功率和斜效率

在阈值附近, 腔内光子数密度满足 $\frac{c}{n} \sigma_i \tau_i \Phi \mathcal{Q}(x, y, z) \ll 1$, 把(3)式的被积函数按泰勒级数展开, 并取一级近似, 可求得腔内每一振荡模的光子数:

$$\Phi = \left[J_{i(1)} - \frac{n \delta_i}{2L \sigma_i \tau_i W_i} \right] \frac{n}{c \sigma_i \tau_i J_{i(2)}} \quad (8)$$

$$J_{i(2)} = \iiint W_p(x, y, z) \mathcal{Q}^2(x, y, z) dV \quad (9)$$

利用 $W_{\text{th}} = \frac{n \delta_i}{2L \sigma_i \tau_i} J_{i(1)}^{-1}$ 及在近阈值范围内 $W_i \approx W_{\text{th}}$, 则

$$\phi_i = \frac{2L}{c} \frac{1}{\delta_i} \frac{J_{i(1)}^2}{J_{i(2)}} (W_i - W_{ih}) \tag{10}$$

而

$$P_{in} = \frac{h\nu_p W_i}{\eta_2}$$

所以

$$P_{iout} = \eta_2 \frac{h\nu_0}{h\nu_p} \frac{T}{\delta_i} \frac{J_{i(1)}^2}{J_{i(2)}} (P_{in} - P_{ih}) \tag{11}$$

利用(7)式得到第*i*个模的斜效率

$$\eta_{i\phi} = \eta_2 \frac{h\nu_0}{h\nu_p} \frac{T}{\delta_i} \frac{J_{i(1)}^2}{J_{i(2)}} \tag{12}$$

式中 $\frac{J_{i(1)}^2}{J_{i(2)}}$ 为第*i*个模的重叠效率因子，它决定了泵浦光与第*i*个模的振荡光的空间重叠程度。

2) 强泵浦时的输出功率和斜效率

在远离阈值的强泵浦时，腔内光子数密度满足

$$\frac{c}{n} \pi \delta_i \phi_i \varphi(x, y, z) \gg 1,$$

则由(3)式得

$$\phi_i = \frac{2L}{c} \frac{1}{\delta_i} W_i \tag{13}$$

$$P_{iout} = \eta_2 \frac{h\nu_0}{h\nu_p} \frac{T}{\delta_i} P_{in} \tag{14}$$

可见在强泵浦下重叠效率因子 $\frac{J_{i(1)}^2}{J_{i(2)}} \rightarrow 1$ ，表明泵浦光和振荡光在空间高度重叠，模式完全匹配，斜效率达到最大值。

2.3 侧面泵浦的泵浦光与振荡光的场分布函数

1) 振荡光场分布函数 $\varphi(x, y, z)$

激光二极管面阵列横向泵浦时稳定激光腔内振荡模场分布为厄米-高斯分布，由于大功率激光二极管面阵发出的是宽反射孔径的非相干光束，而且泵浦激活区在激光棒或板条的边缘，而 TEM₀₀模体积在棒或板条中央，这样泵浦激活区与 TEM₀₀模体积的交叠程度较低，因而侧面泵浦中多模运转效率较高，所以要考虑振荡光场多模分布函数 $\varphi(x, y, z)$ 。下面以增益介质是板条状的 Nd·YAG 为例讨论泵浦光、振荡光的场分布情况。

如图 1 所示，泵浦光横向泵浦板条状 Nd·YAG，泵浦光沿 *x* 轴泵浦，谐振腔沿 *z* 轴，坐标中心位于介质一端面中央，*yOz* 面为介质的底面，介质在 *x* 方向的厚度为 *d*，在 *z* 方向长度为 *l*，宽度为 *h*，*d'* 为振荡光光斑中心与后侧面的距离。归一化的几个低阶振荡模光场分布函数为：

TEM₀₀ 模
$$\varphi_{00}(x, y, z) = \frac{2}{\pi L \omega_0^2} \exp \left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2(z)} \right] \tag{15}$$

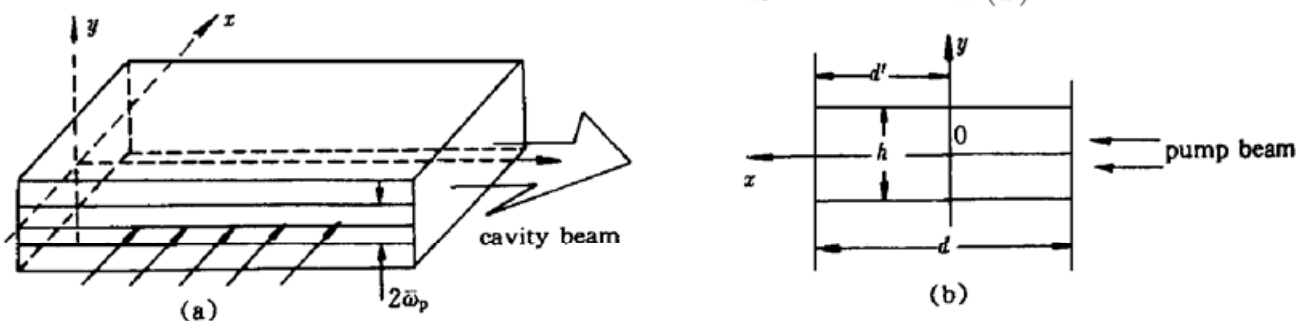


Fig. 1 Schematic diagram of side-pumped solid-state laser

$$\text{TEM}_{10} \text{ 模} \quad \mathcal{Q}_0(x, y, z) = \frac{8}{\pi L \omega_0^4} x^2 \exp \left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)} \right] \quad (16)$$

$$\text{TEM}_{11} \text{ 模} \quad \mathcal{Q}_1(x, y, z) = \frac{32}{\pi L \omega_0^6} x^2 y^2 \exp \left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)} \right] \quad (17)$$

2) 泵浦光的场分布函数

激光二极管阵列出射光经过光学耦合系统准直聚焦或直接贴在介质的入射面上。在 z 方向泵浦光与介质等长度，但由于入射光在 x 方向上仍是发散光束，因此，在介质内泵浦光斑半径为 x 的函数。取平均泵浦光斑 \bar{w}_p 近似代替 $w_p(x)$ ，则

$$\bar{w}_p = \left[\frac{1}{d} \int_{d'-d}^{d'} W_p^2(x) dx \right]^{1/2} \quad (18)$$

假设泵浦光在 yOz 面上分布均匀，并为了充分利用泵浦光，常在泵浦侧的对面镀上 808 nm 的高反射膜，设反射率为 R ，则归一化的泵浦速率分布函数为：

$$W_p(x, y, z) = \frac{\alpha_p \{ \exp[-\alpha_p(x + d - d')] + R \exp[-\alpha_p(d + d' - x)] \}}{2\bar{w}_p [1 - (1 - R) \exp(-\alpha_p d) - R \exp(-2\alpha_p d)]} \quad (19)$$

式中 α_p 为增益介质对泵浦光的吸收系数。

3 数值计算结果

由理论分析可知，影响泵浦阈值、输出功率以及斜效率的关键因素为交叠积分 $J_{i(1)}$ 和重叠效率因子 $J_{i(1)}^2/J_{i(2)}$ 。输出功率与 $J_{i(1)}^2/J_{i(2)}$ 成正比；将泵浦光 and 不同模式振荡光场分布函数 (15) 式、(16) 式、(17) 式代入 $J_{i(1)}$ 、 $J_{i(2)}$ 以及 $J_{i(1)}^2/J_{i(2)}$ 的表达式中，其中积分区域为 $x(d' - d, d')$ ， $y(-\omega_0, \omega_0)$ ， $z(0, l)$ ，即可求出各低阶横模的泵浦阈值和近阈值情况下的重叠效率或斜效率。设

$$\beta = \omega_0/\bar{w}_p \quad (20)$$

数值计算结果如下：

1) 泵浦阈值和重叠效率与板条 x 方向的厚度 d 的关系

由图 2 可知，板条 x 方向的厚度 $d \approx 2 \text{ mm}$ 时，各个模式的重叠效率较大，泵浦阈值较低，适合于多模运转，由于激光器的输出功率与重叠效率成正比，所以这时输出功率较大，而当 $d \approx 1 \text{ mm}$ 时，易于实现单横模运转。

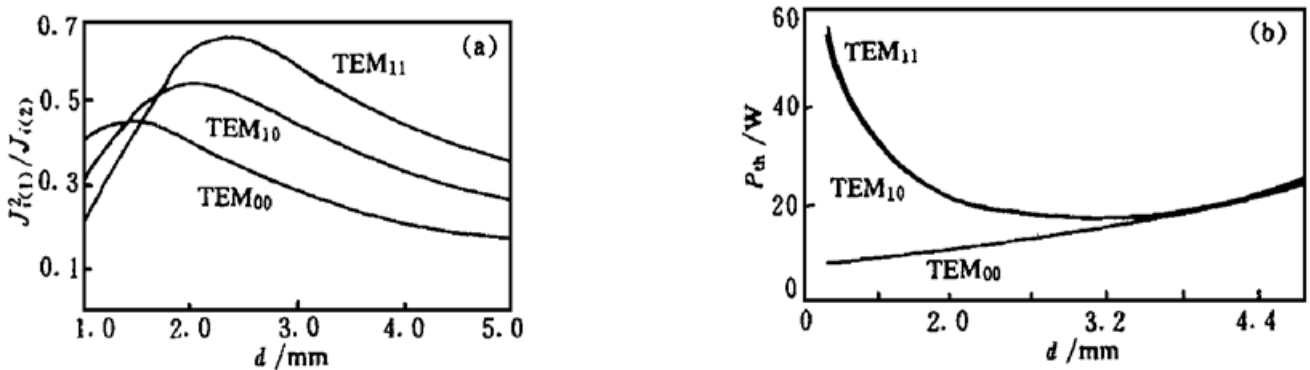


Fig. 2 Overlapping efficiency (a) and pump threshold (b) of several low-order modes versus thickness d of gain medium

2) 重叠效率与 d' 的关系

由图 3 可知, 当 $d = 5 \text{ mm}$ 时, 几个模式最大重叠效率的位置 (d') 不一致, 并且模场分布中心略靠近泵浦面(即 $d' > \frac{d}{2} \approx 2.5 \text{ mm}$), 这导致输出光斑增大, 光束质量变差。而当 $d \approx 2 \text{ mm}$ 时, 最大重叠效率近似在 x 方向中点($d' \approx d/2 = 1 \text{ mm}$), 这表明参数 d 的选择对输出激光的光束质量和功率影响很大。

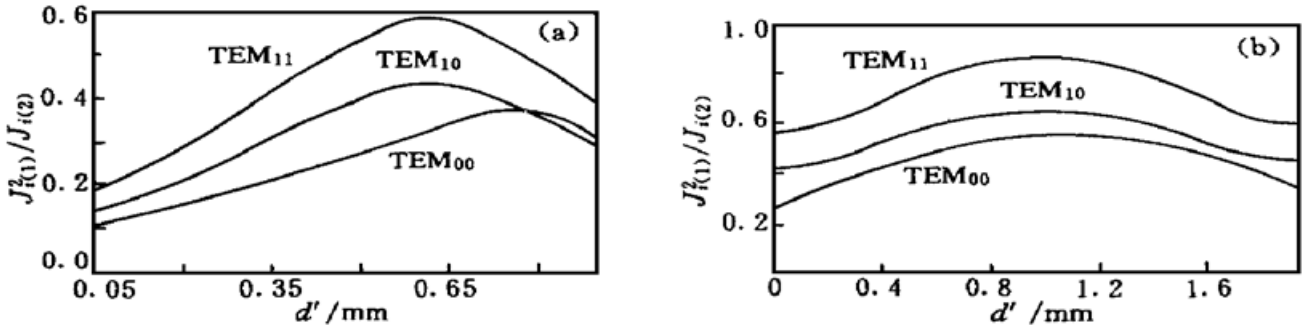


Fig. 3 Overlapping efficiency of several low-order modes versus d' of gain medium. (a) $d = 5 \text{ mm}$, (b) $d = 2 \text{ mm}$

3) 泵浦阈值与参数 β 的关系

图 4 表明, β 值越大, 泵浦阈值越高, 但 β 太小会减少泵浦光的利用率。一般 β 值近似为 1 时, 易达到模式匹配, 从而有小的阈值。当 β 值增大时, 基模相对于其它高阶模泵浦阈值增长慢, 因此, β 值越大, 越有利于基模输出。

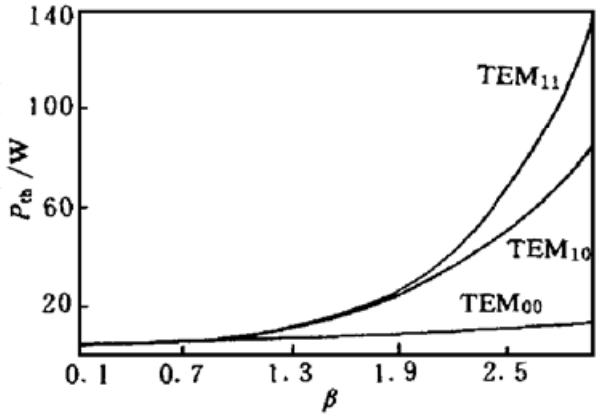


Fig. 4 The pump threshold of several low-order modes versus β , $\beta = w_0/\bar{w}_p$

4) 重叠效率和泵浦阈值与参数 \bar{w}_p 的关系

图 5 表明, 当 $\bar{w}_p \approx 1.2 \text{ mm}$ 时, 各阶模的重叠效率都比较高, 有利于多模输出, 随着 \bar{w}_p 的增大, 基模的重叠效率增大, 但其泵浦阈值也增大, 因此, 必须采取一定的措施, 才能得到单模运转。

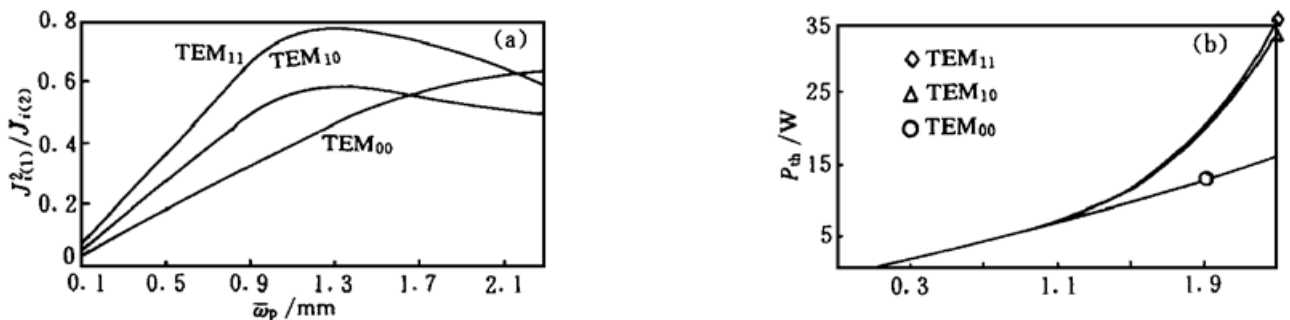


Fig. 5 Overlapping efficiency (a) and the pump threshold (b) of several low-order modes versus average radius \bar{w}_p of the pump shot

结 论 对于大功率激光二极管阵列侧面泵浦的固体激光器, 必须合理地选择激光介质的厚度 d , 参数 β 及泵浦平均光斑 \bar{w}_p 等参数, 才能获得最佳的输出参数, 即激光阈值最小, 输出功率最高, 并满足光束质量的要求。

1) 激光介质的厚度 d 对激光器输出特性有较大的影响。在激光参数固定的情况下, 存在

最佳厚度 d , 不同的泵浦功率有不同的最佳厚度, 泵浦功率越高, 最佳厚度越大, 而且激光光场在介质内的分布也不同。单模运转的最佳厚度比多模运转的要小。

2) 泵浦光斑与振荡光斑相近时, 易达到模式匹配。但对于单模和多模运转来说, 腔内振荡激光的光斑是不同的, 单模激光的光斑大约 $200\sim 300\ \mu\text{m}$, 而对于多模激光的光斑, 则随激光介质的尺寸和泵浦光斑的大小而变, 一般在 $1\ \text{mm}$ 以上, 因此对于单模和多模输出激光器, 要求泵浦激光的光斑是不同的。

参 考 文 献

- [1] Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state laser. *IEEE J. Quant. Elect.*, 1988, **QE-24**(6) : 895~ 912
- [2] Welford D, Rines D M, Dinerman B J. Observation of enhanced thermal lensing due to near-Gaussian pump energy deposition in a laser-diode side-pumped Nd:YAG laser. *IEEE J. Quant. Elect.*, 1992, **QE-28**(4) : 1075~ 1080
- [3] Brioschi F, Nava E, Reali G C. Gain shaping and beam quality in diode-laser multiarray side-pumped solid-state laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(4) : 1070~ 1074

Theoretical Analysis of Diode-Laser Arrays Pumped Solid-State Laser

Ning Jiping Tang Shengshu Xiong Ying Chang Zhiwu Yao Jianquan
(*Photoelectronic Information Science and Technology Laboratory, MOE,
College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072*)
(Received 20 April 1998)

Abstract Starting from the four-level laser rate-equations with spatial dependence of both the pump beam and the cavity beam, the corresponding relations between input and output parameters in diode side-pumped solid-state laser are obtained. The influence of spatial variations on output performance is analyzed. The optimum parameters are found out.

Key words diode laser side-pumped, spatial distribution function, output characteristics, optimum parameter.