

# 一种改进的激光二极管纵向泵浦固体激光器的腔模设计方法

李振华<sup>1</sup> 李培勇<sup>2</sup> 鲍国君<sup>2</sup> 胡文涛<sup>3</sup> 马建伟<sup>3</sup> 贺安之<sup>1</sup>

1, 南京理工大学应用物理系, 南京 210094

2, 浙江大学光科系, 杭州 310027

3, 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

**摘 要** 以空间相关的速率方程理论为基础, 提出了一种改进的激光二极管纵向泵浦固体激光器的设计方法, 给出了在一定泵浦耦合方式下, 激光器腔模尺寸和输出耦合率最佳值的选取依据。以采用不同耦合系统的端面泵浦 Nd: YAG 激光器为设计实例, 相应的实验结果与理论计算符合得较好。

**关键词** 激光二极管阵列泵浦, 激光器, 腔模设计。

## 1 引 言

Fan<sup>[1]</sup>和 Risk<sup>[2]</sup>等通过引入空间相关的速率方程理论, 讨论了激光二极管纵向泵浦的固体激光器的阈值、斜率效率及输出功率与泵浦模和激光振荡模各参量的依赖关系, 但如何选择合理的腔模参数, 并不能由其理论模型直观给出。后来 Laporta 和 Brussard<sup>[3]</sup>提出了一种激光二极管纵向泵浦的固体激光器腔模匹配的简化分析方法, 给出了一定泵浦功率和强度分布条件下激光腔模尺寸的选取依据, 但由于没有同时考虑到输出耦合率变化对激光器输出功率的影响, 因此通常并不能满足激光器的最佳工作条件。本文在此基础上, 提出一种改进的腔模匹配简化分析方案, 进而确定激光器腔模尺寸和输出耦合率的设计原则, 并得到相应实验结果的证实。

## 2 理论模型及计算结果

本文仍以空间相关的速率方程理论为基础, 并在简化分析中对泵浦模和振荡模的场分布引入下述两个近似:

1) 对纵向泵浦, 假定激光器以 TEM<sub>00</sub>模运转。由于一般激光二极管阵列纵向泵浦固体激光器的腰斑尺寸  $w_s \leq 100 \mu\text{m}$ , 其瑞利距离远大于增益介质长度(一般 5 mm 左右), 因此可以认为  $w_s(z) \approx w_s$ , 即振荡模光斑半径在增益介质内为常数。

2) 泵浦光呈椭圆高斯分布, 且一般  $w_{px} \neq w_{py}$ , 忽略像散影响, 增益介质内的泵浦光尺

寸为  $w_{px,y}(z) = w_{pox,y} + \theta_{px,y}|z - z_0|$ 。其中  $\theta_{px}, \theta_{py}$  为泵浦光在增益介质中的发散角,  $w_{pox}, w_{poy}$  分别为  $X, Y$  方向(垂直于腔轴方向  $z$  的两椭圆主轴)的腰斑半径,  $z_0$  为泵浦光束腰离增益介质前端面的距离。此近似对具有部分空间相干性的激光二极管列阵发射光是成立的<sup>[4]</sup>。

以  $\overline{w_{px}}$  和  $\overline{w_{py}}$  表示增益介质内  $X$  和  $Y$  方向泵浦光的平均腰斑半径, 定义  $\overline{w_{pe}} = \min(\overline{w_{px}}, \overline{w_{py}})$ , 其椭圆度  $\beta = \overline{w_{pe}} / \max(\overline{w_{px}}, \overline{w_{py}})$ , ( $0 < \beta \leq 1$ ); 定义参量  $\Omega = (w_s / \overline{w_{pe}})^2$ , 为振荡光与泵浦光在增益介质内沿长度方向的平均尺寸之比; 并以  $\alpha$  表示激光谐振腔内的固有腔耗,  $T$  为输出镜的输出耦合率, 定义相对输出率  $T_\alpha = T / \alpha$ ; 参照文献[3]中的推导过程, 可得出激光器的输出功率  $P_{out}$  与腔模参数的关系:

$$P_{out} = \eta_p P_{tho} T_\alpha f_1 [\xi / (1 + T_\alpha) - f_0] \quad (1)$$

式中  $\eta_p$  为泵浦效率; 它等于光学耦合系统传递效率, 增益介质吸收率和振荡光与泵浦光光子能量之比的乘积,  $P_{tho} = (1/\eta_p)(h\nu_s / \sigma\tau_f)(\pi\alpha/4)\overline{w_{pe}}^2$  为给定泵浦耦合方式下, 当  $w_s = T = 0$  时, 泵浦阈值的极限值;  $\xi = P_{in}/P_{tho}$  为超极限阈值倍数, 其中  $P_{in}$  为激光二极管列阵的输出功率;  $f_0$  和  $f_1$  都是参量  $\Omega$  的函数。  $f_0 = [(\Omega + 1)(\Omega\beta^2 + 1)]^{\frac{1}{2}}/\beta$ , 正比于等效泵浦截面, 反映了泵浦模与振荡模在增益介质中的光斑尺寸对阈值泵浦功率的影响;  $f_1 = \Omega\beta[(\Omega\beta^2 + 2)(\Omega + 2)]^{\frac{1}{2}}/[(\Omega + 1)(\Omega\beta^2 + 1)]$ , 为振荡模与泵浦模的重叠效率, 它表征激光器的光-光转换效率与模式匹配状况的依赖关系。

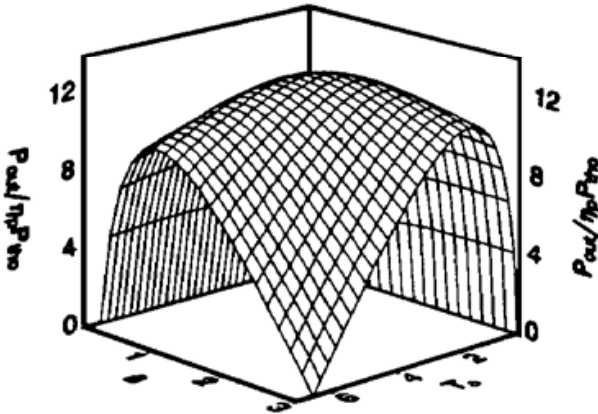


Fig. 1 Normalized output power with respect to  $\Omega$  and  $T_\alpha$  ( $\xi = 30$ )

显然, 当  $\beta = 1$  时, 上式描述了圆高斯光泵浦时的特殊情况。图 1 示出了在此条件下, 超极限阈值倍数  $\xi = 30$  时, 归一化的输出功率  $P_{out}/\eta_p P_{tho}$  与相对输出率  $T_\alpha$  和参量  $\Omega$  的依赖关系:

由图 1 可看出, 对一定的泵浦功率和泵浦方式, 存在使  $P_{out}$  达到最大的  $\Omega_{opt}$  和  $T_{\alpha opt}$ ,  $\Omega_{opt}$  和  $T_{\alpha opt}$  是相互关联的, 它们分别确定了激光器腔模半径和输出耦合率的最佳值。而有些文献仅考虑激光腔模大小对  $P_{out}$  的影响, 往往不能得到  $\Omega$  的最佳解。在一定泵浦耦合方式下, 为使  $P_{out}$  达到最大

值, (1) 式应满足  $\partial P_{out} / \partial \Omega = \partial P_{out} / \partial T_\alpha = 0$ , 由此得到求解最佳值  $T_{\alpha opt}$  和  $\Omega_{opt}$  的联立方程:

$$T_{\alpha opt} = \sqrt{\xi / f_{0, opt}} - 1 \quad (2)$$

$$\frac{1}{\Omega_{opt}} - \frac{\beta^2}{2(\Omega_{opt}\beta^2 + 2)(\Omega_{opt}\beta^2 + 1)} - \frac{1}{(\Omega_{opt} + 2)(\Omega_{opt} + 1)} = \sqrt{\frac{\xi}{f_{0, opt}}} \left[ \frac{1}{\Omega_{opt}} - \frac{\beta^2(\Omega_{opt}\beta^2 + 3)}{2(\Omega_{opt}\beta^2 + 2)(\Omega_{opt}\beta^2 + 1)} - \frac{\Omega_{opt} + 3}{2(\Omega_{opt} + 2)(\Omega_{opt} + 1)} \right] \quad (3)$$

式中  $f_{0, opt} = [(\Omega_{opt} + 1)(\Omega_{opt}\beta^2 + 1)]^{\frac{1}{2}}/\beta$ 。  $\Omega_{opt}$  和  $T_{\alpha opt}$  随归一化泵浦功率  $\xi$  和椭圆率  $\beta$  的变化关系可通过数值计算方法求解(2) 式和(3) 式得出, 如图 2 所示。图 2 的结果表明, 1)  $\Omega_{opt}$  和  $T_{\alpha opt}$  都随泵浦功率的增加而单调上升, 但当激光模尺寸远大于泵浦光尺寸时, 几乎与泵浦功率无关。此时影响斜效率的几何因子  $f_1$  趋于 1; 2) 在同样泵浦功率下,  $\beta$  越小,  $\Omega_{opt}$  越大, 而  $T_{\alpha opt}$  随  $\beta$  的变化趋势与  $\Omega_{opt}$  相反,  $\beta$  越小, 则  $T_{\alpha opt}$  越小。注意  $\Omega_{opt}$  和  $T_{\alpha opt}$  是一一对应的, 它们一起构成器件的最佳工作点。

综上所述, 对激光二极管列阵纵向泵浦固体激光器, 为实现一定泵浦功率下的最大输

出,可采取以下设计步骤:

1) 泵浦光束应尽量整圆。 $\beta$  越大,模式重叠效率越高,但同时应保证泵浦光在增益介质内的平均光斑尺寸尽量小,以提高单位泵浦功率的增益系数。

2)  $w_{pe}$  和  $\beta$  确定后,可据给定的谐振腔的固有腔耗  $\alpha$  算出极限泵浦阈值  $P_{tho}$ ,再根据可利用的最大泵浦功率  $P_{in}$  算出超极限阈值倍数  $\xi$ ,通过解联立方程(2)和(3),得到应取的  $T_{\alpha opt}$  和  $\Omega_{opt}$  值。其中  $\Omega_{opt}$  决定了振荡光腔模半径大小,可通过选择合适的谐振腔结构参数满足要求。

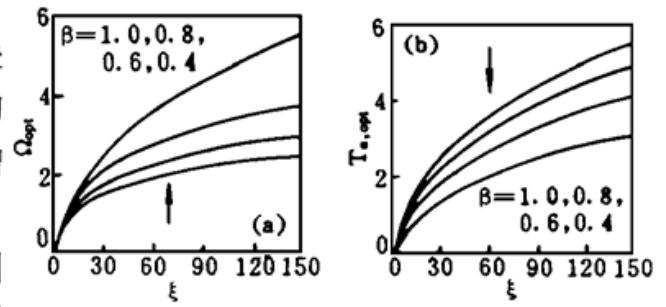


Fig. 2  $\Omega_{opt}$  (left) and  $T_{\alpha opt}$  (right) as a function of  $\xi$  with various of  $\beta$

### 3 设计实例及实验结果

在激光二极管列阵端面泵浦 Nd·YAG 的实验中,本文采用了下述两种泵浦耦合方式。

A) 通光口径  $\phi 50$  mm,  $f_1 = 60$  mm,  $f_2 = 120$  mm 的一对非球面透镜分别用来准直激光二极管列阵发射光和将准直后的光束聚焦到 Nd·YAG 晶体内,横向放大率  $M = 2$ 。

B) 通光口径  $\phi 10$  mm,  $f_1 = 8$  mm 的非球面透镜将激光二极管列阵发射光准直后,利用  $M_p = 4.15$  的扩束棱镜对整形. 经通光口径  $\phi 4$  mm,  $f_2 = 32$  mm 的单透镜聚焦到 Nd·YAG 晶体上,平行于激光二极管列阵发光结方向放大率  $M_p = 0.96$ ,垂直方向  $M_v = 4$ 。

泵浦源为 CW-500 mW 的激光二极管列阵(SDL-2430-H<sub>1</sub>),发光结尺寸  $1 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ,平行和垂直于 PN 结方向的发射角(FWHM)分别为  $10^\circ$  和  $40^\circ$ 。所用 Nd·YAG 掺杂浓度 1%,吸收系数  $\alpha_p = 3.4 \text{ cm}^{-1}$ ,棒长 5 mm,其前端面镀对泵浦波长  $0.808 \mu\text{m}$  增透( $T = 90\%$ ),对  $1.064 \mu\text{m}$  全反的双色膜;后端面镀对  $1.064 \mu\text{m}$  的增透膜( $T > 99.5\%$ );采用平凹腔结构,输出腔镜曲率半径  $R$  从 1 cm 到 200 cm 不等,对  $1.064 \mu\text{m}$  的透过率在 0.6% 到 8% 之间。通过选用不同曲率半径  $R$  的输出腔镜,可改变 Nd·YAG 晶体内振荡模腰斑的大小,以确定实现最大输出的腔模半径。输出耦合率只能取 0.6% 至 8% 之间的一系列分离值。但当超极限阈值倍数较大时,输出功率随输出耦合率的变化趋缓。因此仍能保证在一定泵浦功率下最佳耦合输出的要求。

根据经光学耦合系统后的泵浦束腰大小和发散度,以及晶体吸收系数  $\alpha_p$ ,算得最佳泵浦焦面位于距棒前端面 1.8 mm 处,泵浦光在增益介质中的平均腰斑尺寸: A)  $w_{pe} = 94 \mu\text{m}$  (平行结面方向),  $\beta = 0.48$ , B)  $w_{pe} = 99 \mu\text{m}$  (垂直结面方向),  $\beta = 0.8$ 。两种方式的椭圆长短轴互换。光学系统的传递效率  $\eta_t$  为 80%,吸收效率  $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha_p l) = 81\%$ ,总的泵浦效率  $\eta_p = 44.7\%$ 。腔内固有损耗约为  $\alpha = 1\%$ ,对应 A、B 两方案的极限泵浦阈值  $P_{tho}$  分别为 3.95 mW 和 4.4 mW。表 1 列出了激光二极管列阵入射功率  $P_{in} = 420$  mW 时,上述两种方案实现最佳运转状态的理论计算和实验结果。

实验结果与理论计算值基本符合。方案 A 中输出较计算值偏低较多的原因包括:受大非球面准直镜数值孔径的限制,耦合系统的收光效率实际只有 70%,计算时,为与方案 B 比较而设定同为 80%。另外椭圆度较大时, $\beta$  的估算误差也会使最终计算结果精度降低。在方案 B 中,实现了超过 100 mW 的 TEM<sub>00</sub> 模  $1.064 \mu\text{m}$  激光输出,其  $w_{s,opt}$  和  $T_{opt}$  的实际值都与计算结果极为接近,说明上节提出的优化设计方法具有很强的实用价值。

图3至图5画出方案B中激光器的泵浦阈值,斜率效率和输出功率随输出耦合率 $T$ 和腔模参量 $\Omega$ 之变化关系。图中的实线为理论计算曲线,●为实验结果。当 $T$ 和 $\Omega$ 中的某一个作为变量时,另外一个参量取 $P_{in} = 420 \text{ mW}$ 条件下的最佳值。

Table 1 Theoretic calculations and experimental results of the optimized design

scheme	A					B				
parameter	$w_{s,opt} (\mu\text{m})$	$T_{opt}$	$P_{th} (\text{mW})$	$\eta_k$	$P_{out} (\text{mW})$	$w_{s,opt}$	$T_{opt}$	$P_{th}$	$\eta_k$	$P_{out}$
theor. value	189	0.03	104	0.28	89	158	0.041	84	0.32	107
exp. value	210	0.02	145	0.22	62	165	0.04	90	0.31	102
note	$\xi = 106, \Omega_{opt} = 4.025$					$\xi = 96, \Omega_{opt} = 2.548$				

由图3(a)、图3(b)可以看出,激光器的泵浦阈值随着 $T$ 和 $\Omega$ 单调上升, $T$ 和 $\Omega$ 较小时,实验结果略高于对应的理论计算值。这是因为计算时的极限泵浦阈值是以 $T = 0.6\%$ 时的值做为推算依据,另外 $T$ 和 $\Omega$ 变化时,实验中激光器达到最低阈值时的调节状况每次不完全一致,其固有腔耗会有微小差别。 $P_{th}$ 随 $T$ 和 $\Omega$ 的整个变化趋势基本一致。

图4(a)、图4(b)中,激光器的斜率效率在 $T$ 和 $\Omega$ 较小时,随 $T$ 、 $\Omega$ 上升较快,当 $T > T_{opt}$ 后,对 $T$ 、 $\Omega$ 变化不敏感。实验中达到的最大斜效率达33% ( $\Omega = 6$ ),已接近泵浦效率。当 $\Omega < 1$ 时,激光器通常工作在多横模状态,重叠效率较低,实验中应避免使激光器工作在此区域。

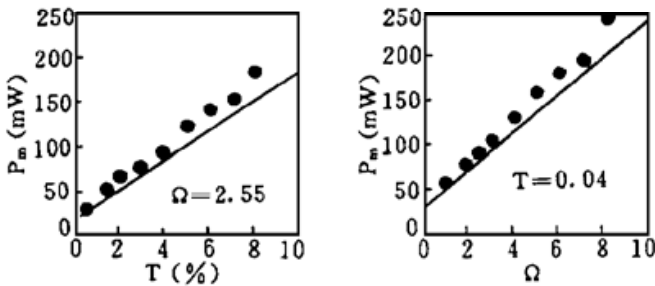


Fig. 3 The relationship between pump thresholds and transmission of the output coupler (a), or  $\Omega$ (b), in scheme B ( $\Omega$  corresponds to TEM<sub>00</sub> mode size)

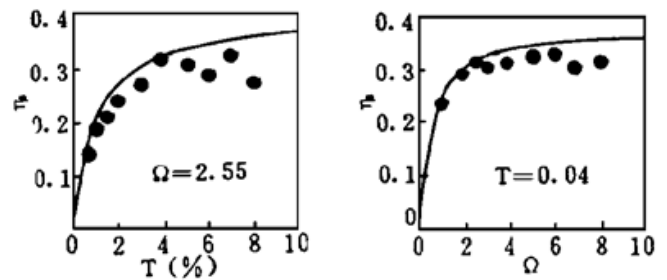


Fig. 4 The relationship between slope efficiency and transmission of the output coupler (a), or  $\Omega$ (b), in scheme B with input pump power of 420 mW

激光器的输出功率在 $T = T_{opt}$ 和 $\Omega = \Omega_{opt}$ 时,获得最大值,如图5(a)、图5(b)所示。在 $T_{opt}$ 和 $\Omega_{opt}$ 附近,输出功率随 $T$ 和 $\Omega$ 的变化较小,有利于激光器在 $T_{opt}$ 和 $\Omega_{opt}$ 的较大误差范围保持最佳运转状态。高泵浦功率时为保证单横模运转,一般应取 $\Omega$ 略大于 $\Omega_{opt}$ 。实验中最大输出对应总的光-光转换效率超过24%,已接近国外通常30%的报道水平,其差距主要仅在于光泵耦合系统的传递效率上。

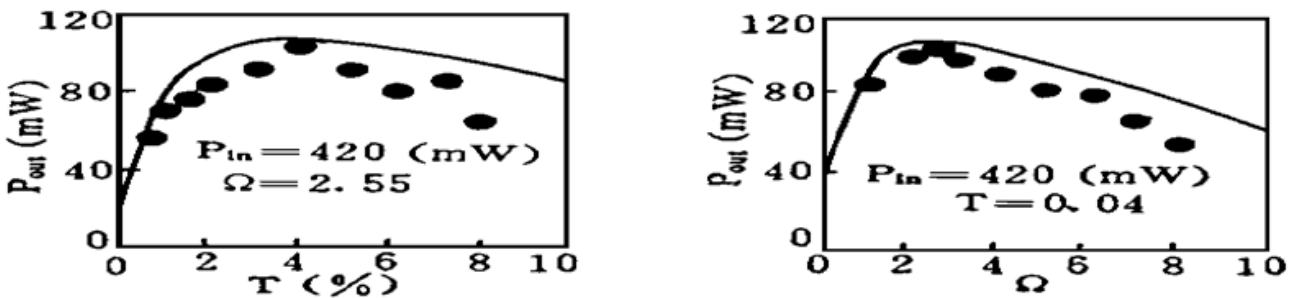


Fig. 5 The relationship between output power and transmission of the output coupler (a), or  $\Omega$ (b), in scheme B with input pump power of 420 mW

结 论 本文的实验结果与理论计算具有较高的符合精度,说明激光二极管纵向泵浦的固体

激光器实现高效率运转的关键是泵浦模和振荡模的合理匹配以及最佳输出耦合率的选取。所提出的最佳腔模设计方法能较好地解决这一问题。计算结果还表明, 采用高吸收率的增益介质(如 Nd·YVO<sub>4</sub> 或较高掺杂的 Nd·YAG), 能有效地降低泵浦阈值和对泵浦光束质量的要求, 使激光器的光-光转换效率得到进一步提高。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] T. Y. Fan, R. L. Byer, Modeling and CW operation of quasi-three level 946 nm and Nd·YAG laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(5) ·605~ 612
- [ 2 ] W. P. Risk, Modeling of longitudinally pumped solid-state laser exhibiting reabsorption losses. *J. Opt. Soc. Amer. (B)*, 1988, **5**(7) ·1412~ 1423
- [ 3 ] P. Laporta, M. Brussard, Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(10) ·2319~ 2326
- [ 4 ] T. Y. Fan, A. Sanchez, Pump source requirements for end-pumped lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(2) ·311~ 316

## An Improved Design Method for Diode Laser Longitudinally Pumped Solid-State Lasers

Li Zhenhua<sup>1</sup>    Li Peiyong<sup>2</sup>    Bao Guojun<sup>2</sup>    Hu Wentao<sup>3</sup>  
Ma Janwei<sup>3</sup>    He Anzhi<sup>1</sup>

1, Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094

2, Department of Optic-Electrical Technology Scientific Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027

3, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

(Received 20 December 1995; revised 14 March 1996)

**Abstract** A improved design method for diode longitudinally pumped solid-state laser was developed based on space-dependent rate equation analysis. It provides a useful guideline for optimization of the laser mode sizes and output mirror transmission simultaneously for a given pump configuration. Experimental examples are given for an end-pumped Nd·YAG laser, showing a good agreement with the design predictions.

**Key words** LDA pumped, solid-state laser, design method.