

# LD 端抽运平直腔 Nd :YVO<sub>4</sub> 固态激光器的 输出功率特性研究\*

武丁二<sup>1)†</sup> 周 睿<sup>2)</sup> 张晓华<sup>1)</sup> 丁 欣<sup>2)</sup> 姚建铨<sup>2)</sup> 颜彩繁<sup>1)</sup> 张光寅<sup>1)</sup>

1) 南开大学物理学院, 天津 300071)

2) 天津大学精仪学院, 天津 300072)

3) 中国民航学院理学院, 天津 300300)

(2005 年 4 月 13 日收到, 2005 年 8 月 8 日收到修改稿)

对 LD 端抽运平直腔 Nd :YVO<sub>4</sub> 固态激光器输出功率特性受激光器内在诸因素(热透镜效应、腔长、激活孔径等)的制约关系进行了研究,并用传播圆-变换圆图解分析方法给出了合理的解释,同时,对进一步提高其输出功率特性指出了方向.

关键词: 固体激光器, 热透镜, 变换圆, 平直腔

PACC: 4260B, 4260D

## 1. 引 言

关于 LD 抽运 Nd :YVO<sub>4</sub> 固态激光器的特性已有不少报道<sup>[1-6]</sup>. 平直腔也是固态激光器通常采用的一种简单谐振腔结构. 尽管如此, 然而关于 LD 端抽运平直腔 Nd :YVO<sub>4</sub> 固态激光器的输出功率特性如何受其内在诸因素(热透镜效应、腔长、激活孔径等)的制约关系仍缺少详细地研究. 本文实验研究了这

种激光器的输出功率特性,并用传播圆-变换圆<sup>[7,8]</sup>图解分析方法给出了合理的解释,同时,对进一步提高其输出功率特性指出了方向.

## 2. 实验与结果

实验装置如图 1 所示. 采用两平面镜, 简称平直腔.

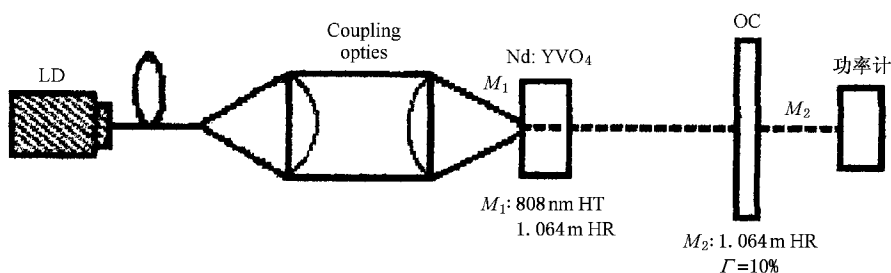


图 1 实验装置图

激光介质为 3mm × 3mm × 5mm 的 Nd :YVO<sub>4</sub> 掺杂浓度 0.5at%. 左端面镀 808nmHT 和 1.064 $\mu$ mHR 膜. 输出耦合镜 OC 镀 1.064 $\mu$ mHR 膜对 1.064 $\mu$ m 激光的透过率为  $T = 10\%$ , 它可以平移, 以测量不同腔

长时的激光输出特性. 实验采用的半导体激光器是 Limo 系统, 经传输光纤(芯径为 400 $\mu$ m)由透镜聚焦通过耦合系统从激光器的左端抽运激光晶体, 抽运光孔径约为 600 $\mu$ m. 抽运光的中心波长为 808nm, 功

\* 国家自然科学基金(批准号 60078014)和教育部弱光非线性光子学材料先进技术及制备重点实验室资助的课题.

† E-mail: wu\_dinger@yahoo.com.cn

率在 1 至 25W 之间.

实验结果如图 2 所示. 图 2 给出了不同腔长 (9cm, 12cm, 13.3cm, 19cm, 24cm, 29cm, 35cm) 下激光输出功率随着抽运功率变化的关系.

### 3. 结果分析与讨论

图 3 是连续 LD 端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 平行平面腔激光系统简化的内含热透镜的等效三镜腔系统. 可以用谐振腔的变换圆的理论对该谐振腔进行分析. 图 3 中  $M_1$  镜为输入镜,  $M_2$  镜为输出镜. 若使激光器有稳定的激光输出, 则要求  $M_1$  镜与  $M_2$  镜的波面与各自的镜面相吻合. 设  $\sigma_1$  圆 ( $\sigma_1$  圆为描写  $M_1$  镜处波面特征的一个传播圆, 它是切  $M_1$  镜于光轴处, 其直径等于  $M_1$  镜处波面曲率半径的一个圆) 和  $M_2$  镜的  $\sigma_2$  圆相交. 当没有抽运时,  $f_T$  为无穷大. 如以  $M_1$  与光轴的交点为原点,  $\sigma_1$  圆与光轴的交点分别为  $S_1$  和  $S_2$ , 两交点与热透镜的距离也分别为  $S_1$  和  $S_2$ . 因为  $M_1$  为平面镜,  $\sigma_1$  圆是一条直线, 所以  $S_1 = 0, S_2 = \infty$ . 当激光器处于抽运状态时, 由于激光棒存在热透镜效应, 将会产生有限大小的热焦距  $f_T$ .  $\sigma_1$  圆经热透镜变换为  $\sigma'_1$  圆, 与光轴的交点分别为  $S'_1$  和  $S'_2$ , 如图 4 所示. 根据光学模成像原理<sup>[7]</sup>, 可求得  $S'_1$  和  $S'_2$ .

$$\begin{cases} \frac{1}{S'_1} = \frac{1}{f_T} - \frac{1}{S_1}, & S'_1 = 0, \\ S_1 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

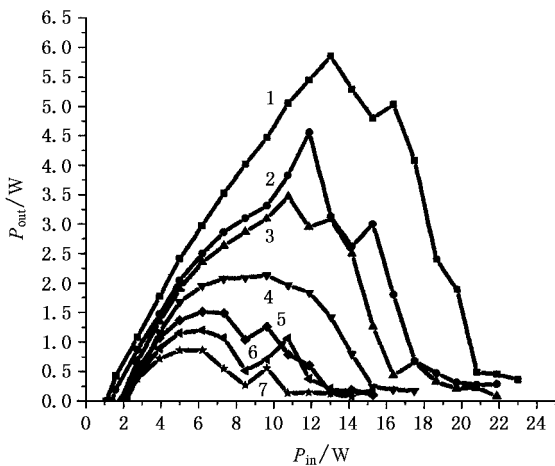


图 2 不同腔长下输出功率随抽运功率变化曲线 (■  $L=9\text{cm}$ , ●  $L=12\text{cm}$ , ▲  $L=13.3\text{cm}$ , ▼  $L=19\text{cm}$ , ◆  $L=24\text{cm}$ , ▲  $L=29\text{cm}$ , ★  $L=35\text{cm}$ )

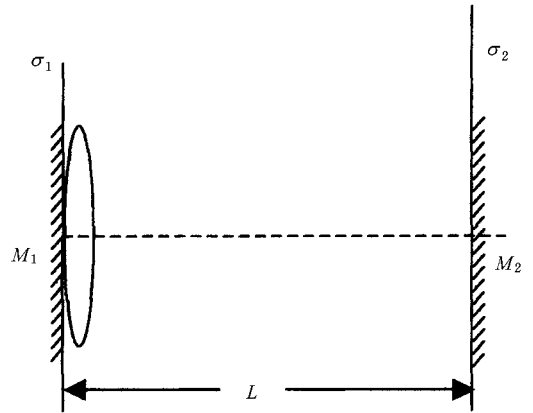


图 3 内含热透镜的平行平面腔

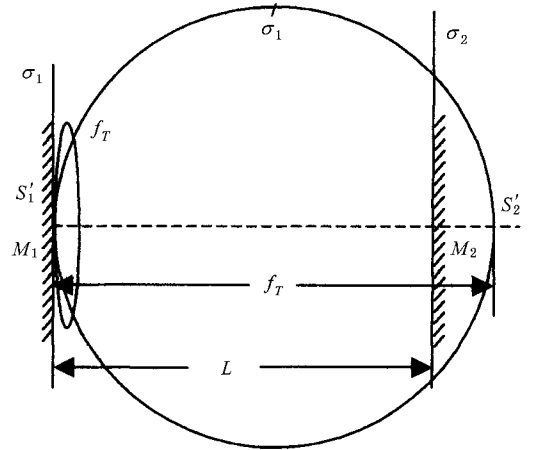


图 4  $M_1$  镜  $\sigma_1$  圆的变换圆  $\sigma'_1$  与  $\sigma_2$  圆相交

$$\begin{cases} \frac{1}{S'_2} = \frac{1}{f_T} - \frac{1}{S_2}, & S'_2 = f_T, \\ S_2 = \infty, \end{cases} \quad (2)$$

所以,  $S'_2$  是激光棒晶体热透镜的焦点.

图 5 给出了  $M_2$  距  $M_1$  镜为  $L$  时, 不同抽运功率下  $M_1$  镜  $\sigma_1$  圆的变换圆  $\sigma'_1$  与  $\sigma_2$  圆相交的情况. 由等效两镜腔的图解分析方法<sup>[8]</sup>可知,  $\sigma_1$  圆若能与  $\sigma_2$  圆相交, 则在此腔内均可形成稳定的光模振荡. 从图 4 中可以看出, 除热透镜的焦距为  $f_1$  外, 在其他的焦距值  $f_2, f_3, f_4, \dots$  下均可在腔内形成稳定的光模振荡.

由变换圆理论可知,  $\sigma_1$  圆的变换圆  $\sigma'_1$  与  $\sigma_2$  圆的交点为  $M_2$  镜处高斯光束的侧焦点. 通过该侧焦点和  $M_1$  镜在  $S_1$  处与光轴相切的点可以作一  $\pi$  圆, 它的直径  $b_\pi$  可由图 6 所示的几何关系推出:

$$b_{\pi} = \frac{f_1 L}{\sqrt{f_1 L - L^2}}, \quad (3)$$

式中  $f_1$  为热透镜的焦距.  $b_{\pi}$  与  $L$  和  $f_1$  的变化有关. 它可以决定  $M_1$  镜处腔模的光斑尺寸

$$w_1 = \sqrt{\frac{b_{\pi} \lambda}{\pi}}. \quad (4)$$

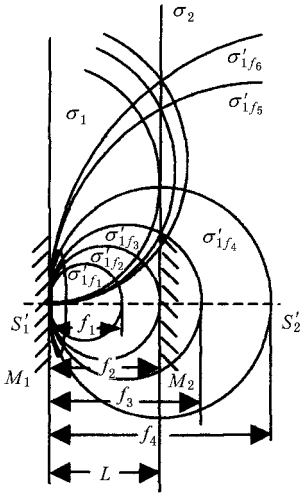


图 5 镜间距  $L$  时  $M_1$  镜的变换圆及参数

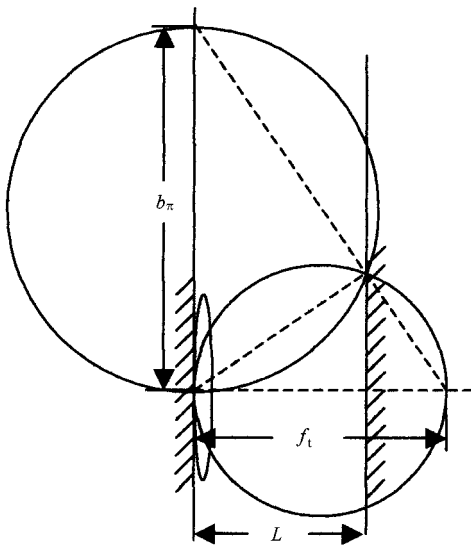


图 6  $b_{\pi}$  与  $L$  和  $f_1$  的变化有关

由 (3) 式可以推得, 当  $f_1 > L$  时,  $b_{\pi} > 0$ , 在  $S_1$  处会有振荡光模产生, 有激光输出. 激光腔为稳定腔; 当  $f_1 < L$  时,  $b_{\pi}$  为虚数, 这说明在  $S_1$  处将不会有振荡光模, 也就不会有激光输出.

为了进一步分析腔内稳定光模输出的有效性, 我们需要研究  $M_1$  镜处可能形成的光模的光斑尺寸

$w_1$  与光抽运孔径的关系. 为此, 我们引入一个与光抽运孔径相对应的  $\pi_p$  圆. 如图 7 所示, 它由下式决定:

$$w_p = \sqrt{\frac{b_p \lambda}{\pi}}. \quad (5)$$

在本实验中, 光抽运孔径约  $600 \mu\text{m}$ , 由此决定  $b_p$  约为  $26.6 \text{cm}$ .

下面分两种情况来讨论.

### 3.1. 长腔型

$L > b_p/2$ ,  $M_1$  镜的变换圆及参数如图 7 所示. 光抽运孔径相对应的  $\pi_p$  圆, 由图 7 可知, 这时  $w_1 > w_p$ , 腔内光模运行时衍射损耗为

$$\alpha = \frac{b_{\pi} - b_p}{b_p}, \quad (6)$$

其中  $f_5 = 2L$ , 对应的光斑尺寸  $w_5$  最小,  $b_5$  最小, 激光输出的衍射损耗  $\alpha_5$  最小;  $f_4, f_6$  对应的光斑尺寸  $w_{4,6}$  较大,  $b_{4,6}$  较大, 激光输出的衍射损耗  $\alpha_{4,6}$  较大;  $f_3$  对应的光斑尺寸  $w_3$  最大,  $b_3$  最大, 激光输出的衍射损耗  $\alpha_3$  最大.  $L > b_p/2$  愈大,  $b_{\pi}$  愈大, 衍射损耗  $\alpha$  也愈大, 功率输出愈小. 图 7 中变换圆  $\sigma'_{1/f_1}$  对应的热透镜焦距  $f_1 < L$ , 这时在  $S_1$  处将不会有激光光束.

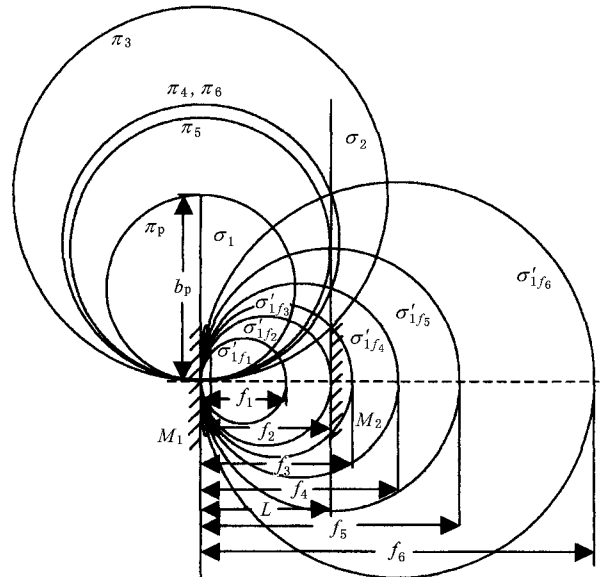


图 7  $L > b_p/2$  时  $M_1$  镜的变换圆及参数

### 3.2. 短腔型

$L < b_p/2$ , 这时  $w_1 < w_p$ , 激光腔为稳定腔, 光模可以有效输出, 但以高阶多模输出. 为使腔模以基模

输出,需取  $L = b_p/2$ ,即  $w_t = w_p$ .图 8 中  $\pi_3, \pi_5$  圆的光斑尺寸  $w_{3,5} = w_p$ ,激光腔具有低的衍射损耗,激光为基模输出,且输出基模与激光孔径匹配.但在  $\pi_3, \pi_5$  圆之间,  $w_t < w_p$ ,激光仍为基模输出,但输出功率略有减小,如图 8 中的  $\pi_4$  圆.图 8 中  $\pi_6$  圆的光斑尺寸大于  $\pi_p$  圆的光斑尺寸  $w_p$ ,激光输出有一定衍射损耗,输出功率减小.图 8 中的变换圆  $\sigma'_{1/1}$  对应的热透镜焦距  $f_1 < L$ ,这时激光腔为非稳腔; $\sigma'_{1/2}$  的  $f_2 = L$ ,激光腔为介稳腔.

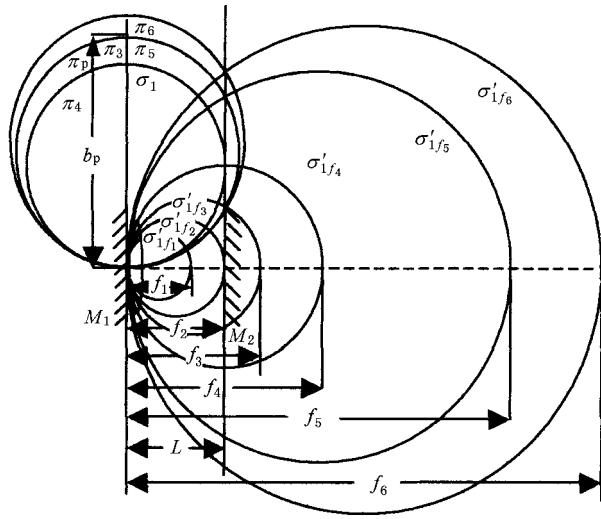


图 8  $L < b_p/2$  时  $M_1$  镜的变换圆及参数

由上面传播圆和变换圆理论的推论,我们可对实验结果作如下的分析.在  $L$  远大于  $b_p/2$  时,虽然激光腔可能是稳定腔,但由于  $b_\pi$  远大于  $b_p$ ,激光腔的衍射损耗  $\alpha$  非常大,其输出功率也非常小,如图 2 中腔长为 35cm 时输出功率的变化曲线.随着腔长  $L$  的减小,处于稳定腔的  $b_\pi$  在减小,衍射损耗也会减小,输出功率会增大,如图 2 中腔长为 35cm, 29cm, 24cm, 19cm 时输出功率的变化曲线.随着抽运功率的增加,晶体的热透镜效应更加明显,热透镜焦距  $f_T$  进一步减小.当抽运功率增加到使得热透镜焦距  $f_T$  小于  $L$  时,激光腔变为非稳腔,这时激光腔的输出功率会明显的降低,直至为零.所以,长腔型激光

器的输出功率不会很大.

短腔型激光腔一般为稳定腔,可以有较大的功率输出,如图 2 中腔长为 9cm, 12cm, 13.3cm 时输出功率的变化曲线.而且可使输出基模与激活孔径匹配,得到大的基模输出功率.文献 [5, 9, 10] 介绍的激光腔就属于短腔型.文献 [5] 激光腔的振荡光模小于激活孔径  $b_p$ , 所以  $M_2 < 1.5$ . 如果能使振荡光模与激活孔径  $b_p$  相匹配,会使  $M_2$  更接近 1.

## 4. 结 论

LD 端抽运平直腔 Nd:YVO<sub>4</sub> 固态激光器的输出功率的变化受其内在诸因素(热透镜效应、腔长、激活孔径等)的直接影响.热透镜效应使平直腔产生激光输出,随着抽运功率的增加,热透镜效应会更加明显.热透镜焦距  $f_T$  会进一步减小,光模的光斑尺寸  $w_t$  也会随着变化,使得输出功率发生改变.

激光输出的稳定性及输出功率的大小与谐振腔的长度有关.对于腔长  $L$  远大于  $b_p/2$  的长腔型,由于衍射损耗非常大,激光输出功率很小.当腔长为  $L < b_p/2$  的短腔型时,光模可以有效输出,但以高阶多模输出.当  $L = b_p/2$  时,激光束的光斑尺寸  $w$  与抽运光束的光斑尺寸  $w_p$  相当,这时激光器的基模输出功率最大.

激活孔径  $b_p$  是影响输出功率的一个重要参数,当振荡光模的尺寸与激活孔径相当时,会有最大输出功率的基模光束输出.同时,它也是判断腔型的一个重要参数.激活孔径  $b_p$  较小时,长腔型的腔长  $L > b_p/2$  也较小,而在激活孔径  $b_p$  较大时,短腔型的腔长  $L < b_p/2$  也较大.但当激活孔径过大时,使得  $L$  也过大时,热透镜效应的影响就较明显.所以应该根据热透镜效应来确定激活孔径,再根据激活孔径来确定腔长.

在本实验中,我们采用的实验设备的数据,根据传播圆和变换圆理论推得腔长  $L = 13.3\text{cm}$  时,激光器的基模输出功率会达到最大.

[1] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, Fields R A 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1831

[2] Yelland C, Sibbett W, Mad J 1996 *Opt.* **43** 893

[3] Tsunekane M, Tagnchi N, Kasamatsn T, Inaba H 1997 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **3** 9

[4] He J L, Zhang H L 1998 *Chin. Phys. Lett.* **15** 418

- [ 5 ] Chen Y F , Land Y P , Wang S C 2000 *Opt. Lett.* **25** 1016  
*optical resonator* ( Beijing : National Defense Industry Press ) § 2.4  
 ( in Chinese ) 张光寅、郭曙光 2003 光学谐振腔的图解分析与  
 设计方法( 北京 : 国防工业出版社 ) § 2.4 ]
- [ 6 ] Song F , Zhang C B , Ding X , Xu J J , Zhang G Y , Leigho M ,  
 Peyghambarian N 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2145
- [ 7 ] Zhang G Y , Guo S G 2003 *Graphic analysis and design method of*  
*optical resonator* ( Beijing : National Defense Industry Press ) § 1.3  
 ( in Chinese ) [ 张光寅、郭曙光 2003 光学谐振腔的图解分析与  
 设计方法( 北京 : 国防工业出版社 ) § 1.3 ]
- [ 8 ] Zhang G Y , Guo S G 2003 *Graphic analysis and design method of*  
*optical resonator* ( Beijing : National Defense Industry Press ) § 2.4  
 ( in Chinese ) [ 张光寅、郭曙光 2003 光学谐振腔的图解分析与  
 设计方法( 北京 : 国防工业出版社 ) § 2.4 ]
- [ 9 ] Zhang C B , Meng F Z , Ding X , Song F , Shang M R , Zhang G Y  
 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1517 ( in Chinese ) [ 张潮波、孟凡臻、  
 丁欣、宋峰、商美如、张光寅 2002 物理学报 **51** 1517 ]
- [ 10 ] Zhang G Y , Jiao Z Y , Yan C F 2003 *Chin. Phys.* **12** 74

## Output characteristics of LD end-pumped Nd :YVO<sub>4</sub> solid-state laser with flat-flat cavity \*

Wu Ding-Er<sup>1)†</sup> Zhou Rui<sup>2)</sup> Zhang Xiao-Hua<sup>1)</sup> Ding Xin<sup>2)</sup>

Yao Jian-Quan<sup>2)</sup> Yan Cai-Fan<sup>1)</sup> Zhang Guang-Yin<sup>1)</sup>

1) *Nankai University, Tianjin 300071, China*

2) *Tianjin University, Tianjin 300072, China*

3) *Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*

( Received 13 April 2005 ; revised manuscript received 8 August 2005 )

### Abstract

Internal factors ( thermal lens , cavity lengths , enabled aperture etc ) restricting the output of the LD end-pumped Nd :YVO<sub>4</sub> solid-state laser with flat-flat cavity is studied . A reasonable explanation is given and a way of improving the output is pointed out through the graphic analysis of the transmitting and transforming circle .

**Keywords :** solid-state lasers , thermal lens , transform circle , flat-flat cavity

**PACC :** 4260B , 4260D

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60078014 ) and the Key Laboratory of Advanced Technique and Fabrication for Weak-Light Nonlinear Photonics Materials of Ministry of Education .

† E-mail : wu\_dinger@yahoo.com.cn