

# 高光学质量、高平均功率非稳腔 Nd : YAG 激光器

钱列加

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 在分析含热透镜的非稳腔固体激光器普遍特性的基础上, 分别定义了几何放大率和输出曲率半径的热敏感度, 结合腔镜失调敏感度而成为设计该类谐振腔的重要依据。据此, 进一步改善和发展了新型的棒成像非稳腔。

**关键词** 热透镜, 热敏感度, 棒成像。

## 1 引 言

近衍射极限的光学质量以及大基模体积振荡, 是高平均功率固体激光器的发展趋势。固体激光器因其波长较短, 相应可聚焦光斑较小, 在工业应用中与传统的高功率 CO<sub>2</sub> 激光器相比, 它应该更富竞争力<sup>[1]</sup>。然而, 高功率棒状固体激光器中, 存在着严重的热致双折射和热透镜问题, 影响了它的发展<sup>[2]</sup>。通常把热透镜等效成一个具有一定焦距涨落 ( $\bar{F}$ ,  $\Delta F$ ) 的非理想透镜(对 Nd : YAG,  $\Delta F/\bar{F} \sim 10\%$ ), 平均热焦距与泵浦功率成反比<sup>[3]</sup>。受热焦距涨落的影响, 在高功率泵浦 ( $\sim 10$  kW) 时, 很难用稳定腔获得大基模振荡, 从而影响最大可输出功率。对较高增益的重复率脉冲 Nd : YAG 激光器, 为获得大模体积振荡, 可采用非稳腔结构。但非稳腔的主要参数几何放大率  $M$  及输出曲率半径  $r_0$  也是动态变化的。与稳定腔结构采用热动态稳定<sup>[4]</sup>相似, 希望非稳腔也能实现各参数的动态稳定。文献[5, 6]报道了棒成像非稳腔, 具有充分利用增益介质储能和减弱热透镜影响的优点已成为高平均功率固体激光器的典型谐振腔结构。本文讨论了一般形式的棒成像非稳腔, 在分析定义热敏感度的基础上, 提出了进一步降低热敏感度和改善输出激光特性的具体措施, 并引入空间滤波的作用以进一步提高模式鉴别力, 最后在实验上成功地获得了 155 W、1.9 倍衍射极限的高功率激光输出。

## 2 含热透镜的非稳腔固体激光器的几何光学分析

对谐振腔的设计和分析, 本文的思路是, 首先应用几何光学方法, 对谐振腔进行一般的分析, 然后针对所关心的问题, 提出相应的物理措施。最后在此基础上, 采用菲涅尔衍射积分对所设计的谐振腔进行严格的数值计算, 分析其基模体积、基模损耗及模式鉴别力。谐振

腔中,使用超高斯镜作为输出耦合并望进一步增加模式鉴别力,所以几何光学方法能很好地胜任<sup>[7]</sup>,但在本文不作更精确的数值计算分析。图 1 表示最一般形式的光学谐振腔,其间的透镜表征泵浦时固体棒的热透镜,两端的光学系统以一般形式的  $ABCD$  矩阵表征。

平面 1 至平面 4 的单程  $ABCD$  矩阵经计算后为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 B_2 (X_A - 1/f_t) & B_1 B_2 (X_B - 1/f_t) \\ D_1 D_2 (X_C - 1/f_t) & B_1 D_2 (X_D - 1/f_t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $X_A = A_2/B_2 + C_1/D_1$ ;  $X_B = A_2/B_2 + A_1/B_1$ ;  $X_C = C_2/D_2 + C_1/D_1$ ;  $X_D = C_2/D_2 + A_1/B_1$ 。

而非稳区域则对应:

$$ABCD > 0 \quad (2)$$

几何放大率

$$M = m \pm \sqrt{m^2 - 1} \quad (3)$$

式中  $m = 2AD - 1$ , 当  $m < 0$  时, 上式取“ $-$ ”号, 对应负支非稳腔。应用  $ABCD$  定律<sup>[8]</sup>, 平面 1 处的输出曲率半径  $r_0$  为:

$$r_0^{-1} = r_1^{-1} = [(M^2 - 1)/4M](1/BD) \quad (4)$$

$r_0$  随热透镜  $f_t$  的动态变化, 可由其一阶微分粗略反映。

$$\frac{\partial (1/r_0)}{\partial (1/f_t)} = \frac{1}{r_0} (X_A - X_B) \left\{ \left[ \left( \frac{1}{f_t} - X_A \right) \left( \frac{1}{f_t} - X_B \right) \right]^{-1} + \left[ \left( \frac{1}{f_t} - X_C \right) \left( \frac{1}{f_t} - X_D \right) \right]^{-1} \right\} \quad (5)$$

而平面 3 处的曲率半径, 则可由(4)推出, 下式中“ $+$ ”表征朝向热透镜, “ $-$ ”则表征背向热透镜。

$$r_2^{\pm} = \frac{D_1 r_1 + B_1}{C_1 r_1 + A_1} \quad (6)$$

相同地, 可以得出其它平面处的几何光学腔模曲率半径, 这里不再赘叙。按照上述理论分析, 对一般形式的非稳腔, 有以下结论:

1) 非稳腔的主要物理参数  $M$  及  $r_0$  都是  $f_t$  的函数, 因而均有一定的涨落。

2) 如  $\frac{\partial M}{\partial (1/f_t)} = 0$ , 不难发现, 它将导致  $r_2^+, r_3^+ = 0$ 。这表明腔模将被聚焦于棒主平面 (PP) 上, 因此不能采用  $M$  动态稳定。

3) 因  $ABCD > 0$ , 从(5)式可明显发现  $\frac{\partial (1/r_0)}{\partial (1/f_t)} \neq 0$ , 这意味着不可能实现  $r_0$  的动态稳定。

在上述几何光学处理中, 几何放大率  $M$  和输出曲率半径  $r_0$  是描述非稳腔的最重要参数, 它们的大小和动态变化程度将直接影响输出激光的功率和光束质量, 对此定义  $M$  及  $r_0$  的热敏感度  $S_1$ 、 $S_2$  为:

$$S_1 = \left| \frac{1/f_t}{M} \cdot \frac{\partial M}{\partial (1/f_t)} \right|, \quad S_2 = \left| \frac{1/f_t}{1/r_0} \cdot \frac{\partial (1/r_0)}{\partial (1/f_t)} \right| \quad (7)$$

对于任何实际的应用, 最关心的激光器指标是输出功率及其稳定性和输出激光的聚焦情况或光束质量。很明显上述定义的  $S_1$  将主要影响输出功率及其稳定性,  $S_1$  适度地小, 还可以避免腔模在棒处的聚焦。 $S_2$  将决定输出激光的聚焦情况, 因此总是希望  $S_2$  应尽量趋于零, 越

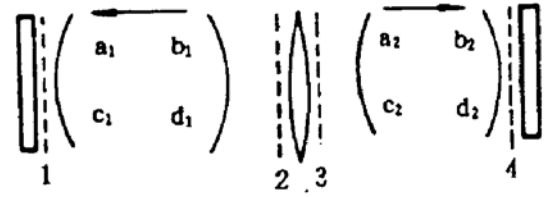


Fig. 1 The general resonator sandwiched by the thermal lens

小越好。将适用于高功率固体非稳腔的设计要点归纳为: 1) 几何放大率  $M$  主要决定了模式鉴别力及激光的耦合。为进一步提高模式鉴别力, 通常可使用超高斯镜等; 2) 增益介质储能的充分利用及其有限口径不引起严重损耗; 3) 应充分考虑热敏感度  $S_1$ 、 $S_2$  及腔镜失调敏感度  $S_3 = |4M\tilde{B}/(M-1)^2|^{[7]}$ , 其中  $\tilde{B} = 2BD$ 。

### 3 棒成像非稳腔的发展

至此, 已分析了含热透镜的非稳腔的一般特性。与通常的非稳腔不同, 含热透镜的非稳腔必须考虑  $M$  及  $r_0$  的热敏感度。棒成像技术, 能较有效地减弱这些热效应。本节针对一般形式的棒成像非稳腔, 讨论敏感度  $S_1$ 、 $S_2$  及  $S_3$ 。在图 1 中, 如  $D_2 = 0$ , 即意味着棒成像, 因为从棒端面 3 至腔镜 4 再回到平面 3 所对应的传输矩阵元  $B_{343} = 2B_2D_2 = 0$ , 因而棒经过上述光学系统后, 被成像于棒自身位置(棒成像)。对此, 应用第 2 部分的结果, 可以发现:

$$\begin{aligned} S_1 &= \left| \frac{2M}{M^2 - 1} \cdot \left( \frac{2B_1D_1}{f_t} \right) \right|, & S_2 &= \left| \frac{4M^2}{(M^2 - 1)^2} \cdot \left( \frac{2B_1D_1}{f_t} \right) \right|, \\ S_3 &= \left| \frac{2M}{(M^2 - 1)^2} \cdot \left( \frac{2B_1D_1}{f_t} \right) \right| \end{aligned} \quad (8)$$

从(8)式可清楚地看到, 缩短热透镜 2 至输出镜 1 再回到平面 2 的成像距离  $B_{212} = 2B_1D_1$  (仅为了说明简单, 称之为输出端的成像距离), 将有利于降低各类敏感度  $S_1$ 、 $S_2$  及  $S_3$ 。可以借助透镜的成像作用实现成像距离  $B_{212}$  的缩短, 如图 2 所示。透镜  $f_2$  具有成像作用, 使得超高斯镜等效地位于其成像面 1 处, 以缩短输出端的成像距离。而透镜  $f_1$  的引入以补偿成像中的曲率变化, 使得平面 1 处的等效超高斯镜仍近似为平面镜。图中棒成像端仍采用文献[5]中的方式, 使得棒主平面至后腔镜的距离  $L_1$  等于后腔镜的曲率半径  $R$ , 这时如  $f_1 = L_1$ , 则谐振腔位于临界稳定点, 对 Nd:YAG 而言, 因其增益相对较低, 实际工作的非稳腔的  $M$  应较小,  $f_1$  稍大于  $L_1$ 。

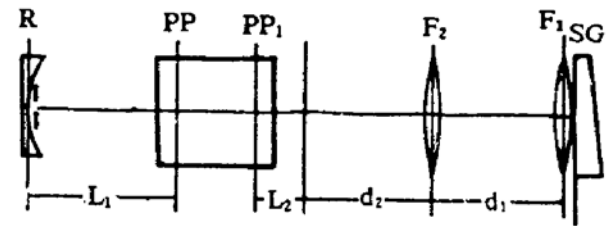


Fig. 2 The typical rod-imaging unstable resonator with low thermal sensitivities and high mode discrimination

显然, 成像距离的缩短, 使得谐振腔的菲涅尔数增大, 将会引起模式鉴别力的降低, 在实验中也证实了这一点(也可从下面的实验结果说明)。对此, 作者提出的相应解决办法是在腔内引入额外的模式鉴别作用。分析棒主平面  $PP_1$  至后腔镜间的光学系统, 因  $f_1$  与  $L_1$  很接近, 意味着它非常接近单程傅里叶变换系统, 因此后腔镜处引入适当的光阑, 将能最有效地抑制高阶模振荡, 而不导致基模损耗的显著增加。

经过简单矩阵运算, 不难发现对应第 2 部分的  $ABCD$  矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_2/R & -R(1 + l_2/f_0) \\ C & -R\{(1/f_2) - (1/f_1)[1 + (l_2/f_0)] + (1/f_0)\} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中  $1/f_3 = 1/f_2 - 1/f_1$ ,  $1/f_0 = 1/R - 1/f_1$ 。这里的输出端成像距离为  $2l_2$ , 其它主要物理量可照第 2 部分分析求出。

实验中泵浦源的重复率为 27 Hz 的脉冲泵浦, 脉冲宽度为 4 ms, 电源最大泵浦功率为 12

kW, 所用 YAG 棒尺寸为  $\phi 6.3 \text{ mm} \times 155 \text{ mm}$ , 其平均热焦距系数  $K$  经测量为  $0.5/\text{kW} \cdot \text{m}$ 。具体的腔参数选取有一定的任意性, 主要根据第 2 部分的设计要点及棒内光斑大小决定, 注意到  $R$  由临界稳定点的  $f_i$  值决定, 同时避免所有光学元件的被聚焦及其有限口径引起的衍射损耗。实验所用  $N=5$  阶的超高斯镜, 其中心反射率为 50%, 光斑为  $\phi 4 \text{ mm}$ 。表 1 给出适用于实验条件的具体腔参数。其中  $l_2$  取 25 mm, 远比文献[5]中相应的 170 mm 小, 因而热敏感度有较大幅度的降低, 作为比较, 在本文的设计中当不存在泵浦 ( $1/f_i = 0$ ) 时, 相应的  $M = -1.6$  (而在文献[5]的设计中  $M = -5.8$ ), 同样  $r_0$  随  $f_i$  的变化也相对不敏感, 具体计算结果如图 3 所示。图中同时给出了  $r_0$  的实验测量结果。

Table 1. Resonator parameters used in the experiment (unit in mm)

$f_1$	$d_1$	$f_2$	$d_2$	$l_2$	$l_1$	$R$
88	176	86	172	25	170	170

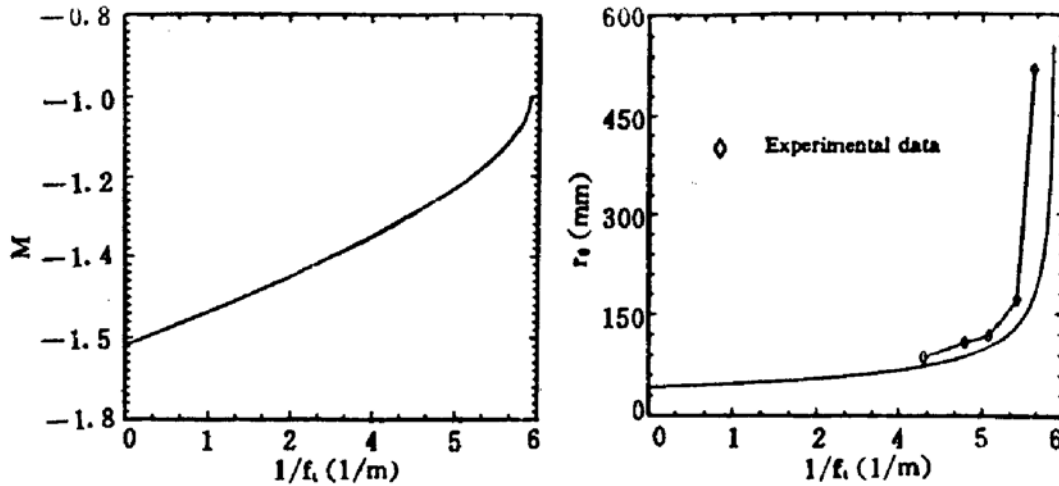


Fig. 3 Calculated results for magnification and output ray curvature vs thermal focal lens.

The experimental data of  $r_0$  has also been given

为测量  $r_0$ , 在激光输出端超高斯镜后引入一透镜( $f$ ), 通过测量其聚焦位置(离透镜距离  $L$ ), 间接确定输出曲率半径  $r_0 = Lf/(L - f)$ 。其实验数据和理论模拟结果较好地吻合, 因此所设计的谐振腔随  $f_i$  的变化相对不敏感, 这也表明几何光学方法能较好地处理这类问题。对应工作点  $P_{in} = 11 \text{ kW}$ ,  $M = -1.27$ , 最合适的滤波小孔为  $\phi 5.5 \text{ mm}$ , 它能在基本抑制高阶模的基础上, 提供最大的输出功率为 155 W, 为避免金属材料受激光辐照的溅射, 选用石英毛玻璃作为滤波小孔。激光器的效率约 1.4%, 这样的高效率与低  $M$  热敏感度有关, 较小的  $M$  及  $M$  热敏感度为谐振腔提供了更好的激光耦合。输出激光近场和聚焦远场光斑形状如图 4 所示, 对应光束质量为衍射极限的 1.9 倍。

为更好地反映光束的聚焦情况, 图 5 给出了焦点附近的光斑尺寸测量结果(实线), 并同时给出了对应严格衍射极限光束的理论结果(虚线), 它们表明瑞利距离的实验测量值是理论值的 51%, 这从另一个侧面反映光束质量约为 1.9 倍衍射极限。如不引入空间滤波小孔, 输出功率为 175 W, 而光束质量则是衍射极限的 4.8 倍, 激光近场光强分布如图 6 所示, 其中心有一较大的尖峰, 而非凹陷, 表明腔内光束相对基模的超高斯型分布有较大的偏差, 高阶模含量较高。因此空间滤波进一步提高了模式鉴别力, 同时又没引入太大的衍射损耗。

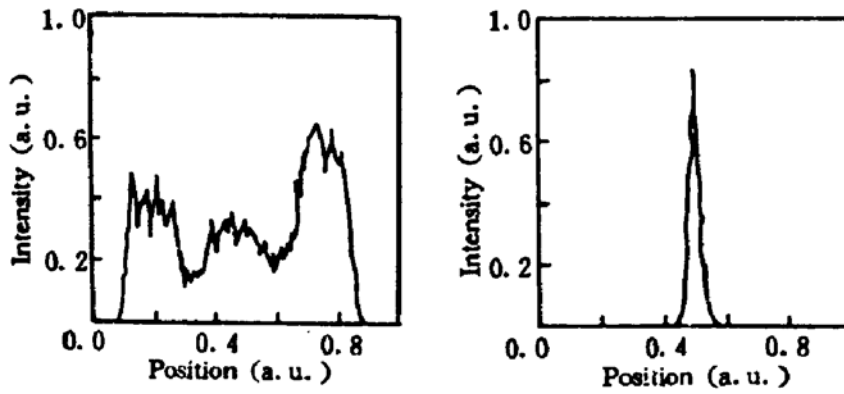


Fig. 4 Near field (a) and far field (b) profile at 11 kW input power and 155 W output power

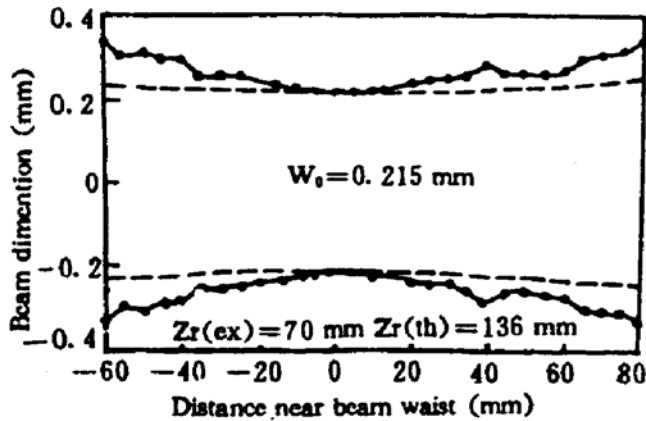


Fig. 5 Beam dimension versus distance far from the beam waist

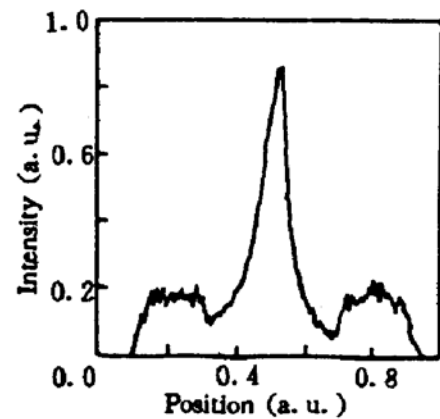


Fig. 6 Near field profile at 11 kW input power and 175 W output power without the pinhole of spatial filter

**总 结** 对含热透镜的非稳腔定义了  $M$  及  $\tau_0$  的热敏感度, 以分析提高激光功率和光学质量。针对新型的棒成像非稳腔, 提出缩短输出端的成像距离, 以降低热敏感度和引入空间滤波作用提高模式鉴别力。实验上成功地获得了 155 W、1.9 倍衍射极限的激光输出。

### 参 考 文 献

- [1] C. Miller, Semiconductor processing benefits from small spot size. *Laser Focus World*, 1992, 28(6): 91~96
- [2] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*. 2nd Ed., Beilin, Spring, 1988: 350~381
- [3] 钱列加, 衍射损耗耦合型高功率 Nd : YAG 激光器. *光学学报*, 1994, 14(5): 486~489
- [4] V. Magni, Resonators for solid-state lasers with large volume fundamental mode and high alignment stability. *Appl. Opt.*, 1986, 25(1): 107~117
- [5] V. Magni, S. Desilverstri, L. J. Qian *et al.*, Rod-imaging supergaussian unstable resonator for high power solid-state lasers, *Opt. Commun.*, 1992, 94(11): 87~91
- [6] J. R. Hobbs, Unstable Nd : YAG resonators generate 200 W diffraction-limited beams. *Laser Focus World*, 1992, 28(7): 30~31
- [7] S. Desilverstri, V. Magni, O. Svelto, Lasers with super-Gaussian mirrors. *IEEE J. Quant. Electron*, 1990, QE-26(9): 1500~1505
- [8] A. E. Siegman, *Lasers*. California, University Science Books, Mill Vally, 1986: 629~811

## High Average Power Nd : YAG Unstable Resonator with High Beam Quality

Qian Liejia

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 4 November 1993; revised 7 March 1994)

**Abstract** In this paper we have studied the general optical properties of unstable resonators with thermal lens inside. Thermal sensitivities of magnification and output ray curvature have been defined they constituted the important design points for the unstable resonators. Furthermore, we have improved the novel rod-imaging unstable resonator based on these design points.

**Key words** thermal lens, thermal sensitivity, rod-imaging.