

文章编号: 1001-4322(2003)08-0755-04

高功率固体多棒激光腔的动态工作特性*

张 栋, 彭愿洁, 吕百达

(四川大学 激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064)

摘 要: 使用等价腔概念,对高功率固体多棒激光腔的动态特性作了分析,推导出了多棒等价 g 参数和等价腔长的一般公式,由此可得出多棒腔等价 g 参数图上的动态工作特性曲线和临界光焦度,以数值算例说明多棒腔的动态工作特性。讨论了用适当调整腔镜和棒间距离来补偿光焦度偏离的方法,并得出了相应的解析公式。所得结果可作为高功率固体腔设计的参考。

关键词: 多棒腔; 动态工作特性; 等价腔; 等价 g 参数; 光焦度

中图分类号: TN248

文献标识码: A

高功率固体激光器在工业激光材料加工、激光医学和军事等方面已获得了广泛应用。特别是富有生命力的高功率二极管抽运固体激光器正不断开辟新的应用领域。目前,形成产品系列的高功率固体激光加工机主要采用腔内多棒串接和放大的技术方案^[1]。高功率二极管抽运板条和圆盘几何构型固体激光器也正在研究和开发之中,技术上亦多采用腔内多板条(圆盘)串接方案^[1~3]。已有的理论和实验研究表明,在光抽运下,作为一级近似,激光棒可等效为一个焦距随抽运功率变化的热透镜。在腔内合理串接 m 个棒可实现激光输出功率为单棒的 m 倍而光束质量近似保持不变。文献[4,5]对固体激光器的光抽运热透镜效应和含有单棒、两棒的固体激光腔的动态特性作了详细分析,给出了解析的公式。本文将文献[4,5]的结果进一步推广到多棒情况。采用等价腔分析法得出了多棒典型腔的动态特性曲线,研究了多棒腔的动态工作特性。此外,还分析了高功率多棒腔的设计中偏离理想情况时的补偿措施等实际问题。

1 多棒串接腔的等价 g 参数(g^* 参数)

由于光抽运引起的热效应,在一个腔中各棒性质相同和工作条件相同的情况下,每个棒可等效于一个光焦度为 D 的热透镜 L_n (D 为热焦距 f 的倒数, $n = 1, \dots, m$)。设镜 M_1, M_2 的曲率半径分别为 r_1, r_2 ; d_1, d_{m+1} 为最靠近透镜的棒主平面到镜 M_1, M_2 距离;相邻两棒主平面之间的距离分别为 d_2, d_3, \dots, d_m 。以镜 M_1 为参考, m 个棒串接腔的单程变换矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/r_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_{m+1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -D & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -D & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/r_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将多棒串接腔等效于一个 g 参数为 g_1^*, g_2^* 的空腔^[4,6],令

$$M = \begin{bmatrix} g_1^* & L^* \\ \frac{g_1^* g_2^* - 1}{L^*} & g_2^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

由(2)式可计算出基模高斯光束在镜 M_i 上的束宽

$$w_i^2 = \frac{L^*}{g_i^*} \left[\frac{g_j^*}{g_i^* (1 - g_1^* g_2^*)} \right]^{1/2} \quad (i, j = 1, 2; i \neq j, \text{下同}) \quad (3)$$

对比(1)式和(2)式,令每个矩阵元相等,经复杂代数运算,最后得出 m 棒腔的 g^* 参数(等价 g 参数)和等价腔长 L^* 为

$$g_1^* = g_1 + \sum_{n=1}^m (-1)^n D^n \sum_{k=1}^{n-m-n+k+1} d_{s_k} \sum_{l=1}^n (s_l - s_{l-1}) + \frac{1}{L^*} \sum_{n=2}^{m+1} (-1)^n D^{n-1} \sum_{k=1}^{n-m-n+k+1} d_{h_k} \sum_{l=1}^{n-1} (h_{l+1} - h_l) \quad (s_0 = 1, h_0 = 0) \quad (4)$$

* 收稿日期:2003-03-05; 修订日期:2003-04-28

基金项目:国家 863 计划项目资助课题;中国工程物理研究院基金资助课题

作者简介:张 栋(1980-),男,硕士研究生,现从事高功率激光的研究工作;E-mail:scuzd@163.net。

$$g_2^* = g_2 + \sum_{n=1}^m (-1)^n D^n \prod_{k=1}^n s_k^{-1} \prod_{l=1}^n d_{s_k} (s_{l-1} - s_l) + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{m+1} (-1)^n D^{n-1} \prod_{k=1}^n h_k^{-1} \prod_{l=1}^{n-1} d_{h_k} (h_{l+1} - h_l) \quad (s_0 = m+1, h_0 = 0) \quad (5)$$

$$L^* = L - \sum_{n=2}^{m+1} (-1)^n D^{n-1} \prod_{k=1}^n h_k^{-1} \prod_{l=1}^{n-1} d_{h_k} (h_{l+1} - h_l) \quad (h_0 = 0) \quad (6)$$

(4) ~ (6) 式中: s_k, s_l, h_k, h_l 表示棒间距的下标, 其中 k, l 为循环指数。

$$g_i = 1 - L / d_i, \quad L = \sum_{i=1}^{m+1} d_i \quad (7)$$

容易证明, 对 $m=2$ 的两棒腔, (4) ~ (6) 式就简化为文献[5]中的结果, 当 $m=1$ (单棒腔) 时, (4) ~ (6) 式回到文献[4]中的(12), (14)式。

2 临界光焦度

利用(4) ~ (6)式, 可以得出含 m 个棒光腔的 g^* 参数和等价腔长 L^* 作为光焦度 D 函数的表达式。若 $d_1, d_2, d_1, d_2, \dots, d_{m+1}$ 已知, 则可由数值计算得出它的临界光焦度。对特殊情况, 例如 $m=1, 2$ 可推导临界光焦度解析式, 与文献[4]中表1、文献[5]中(16) ~ (18)式相同。作为数值算例, 表1列出了 $m=3, 4, 6$ 时串接腔的

表 1 多棒串接腔的光焦度数值计算例

Table 1 Numerical examples of multirod resonators

resonator parameters	$m=3$	$m=4$	$m=6$
		$d_1=0.04\text{m}$ $d_2=0.20\text{m}$ $d_3=0.35\text{m}$ $d_4=0.13\text{m}$	$d_1=0.04\text{m}$ $d_2=0.20\text{m}$ $d_3=0.35\text{m}$ $d_4=0.30\text{m}, d_5=0.13\text{m}$
	$\gamma_1=2\text{m}, \gamma_2=3\text{m}$	$\gamma_1=2\text{m}, \gamma_2=3\text{m}$	$\gamma_1=3\text{m}, \gamma_2=2\text{m}$
$g_1^* = 0$	0.604, 8.838, 13.455,	0.267, 4.490, 11.299, 13.506,	0.139, 2.014, 5.681, 10.153, 12.708, 15.737,
critical refractive power D/m^{-1}			
$g_2^* = 0$	1.119, 8.158, 31.090,	0.488, 5.360, 10.092, 31.092,	0.082, 2.585, 6.317, 9.760, 13.707, 31.092,
$g_1^* g_2^* = 1$	-0.290, 3.116, 5.292, 12.020, 12.030, 31.095,	-0.221, 1.598, 2.840, 7.607, 8.128, 12.538, 13.013, 31.092,	-0.156, 0.679, 1.225, 3.662, 4.377, 7.965, 8.094, 11.255, 12.187, 13.867, 15.726, 31.092,

数值计算结果, 对应表 1 中腔参数的工作点, 在 g^* 参数图上的动态特性曲线见图 1 至图 3。 $m=1, 2$ 的结果与文献[4, 5]相同, 本文从略。由图 2 与文献[5]比较可知, 在多棒串接腔中, 由于热透镜的影响, 双凹腔与平行平面腔都可以工作在稳定状态, 它们的动态特性曲线是相似的。由图 1 ~ 3 和(4) ~ (6)式可确定多棒腔静态工作点 ($D=0$)、运动方向和运动轨迹, 以及光腔的临界点、非稳区和稳定工作范围, 这些是设计多棒腔的重要技术依据, 也是决定多棒腔输出激光特性的重要参数。由表 1 可知, 如果保持棒间距离不变, 增加棒的数量会导致在一定范围的光焦度内出现更多的稳定区和非稳区, 因此抽运功率稍有小的变化就容易导致光腔的不稳定。对平行平面腔, 当 $D=0$ 时, $g_i^* = g_i = 1 (i=1, 2)$, 为使光腔工作点不在非稳区, 可选择

$$d_1 = d_{m+1} = d, \quad d_2 = d_3 = \dots = d_m = 2d \quad (8)$$

此时对称平行平面腔获得最大范围的稳定性。同样利用(4) ~ (5)式, 分别令 $g_1^* = 0, g_2^* = 0, g_1^* g_2^* = 1$, 可得

出满足(8)式的对称平行平面腔的临界光焦距 D 与棒间距 d 的乘积为常数,见表 2,其中 $m = 2$ 时的结果与文献[5]的(24)~(25)式一致。

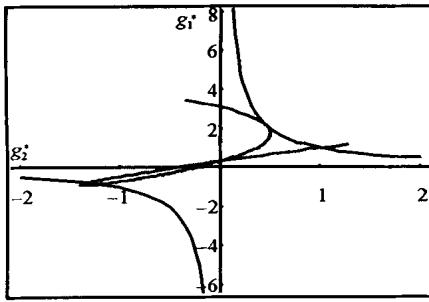


Fig. 1 Dynamical characteristic curve on the g^* -parameter diagram for a 3-rod resonator

图 1 3 棒串接腔工作在 g^* 参数图上的动态特性曲线

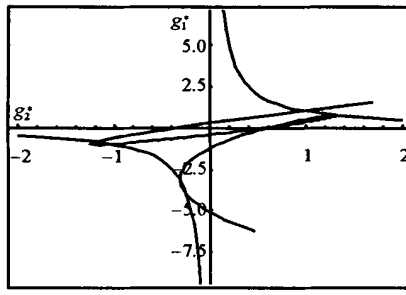


Fig. 2 Dynamical characteristic curve on the g^* -parameter diagram for a 4-rod resonator

图 2 4 棒串接腔工作在 g^* 参数图上的动态特性曲线

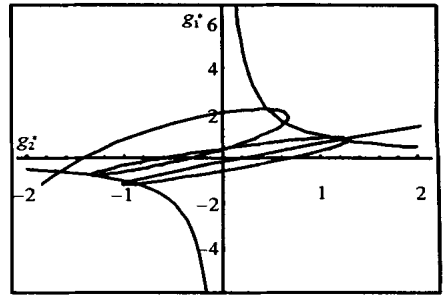


Fig. 3 Dynamical characteristic curve on the g^* -parameter diagram for a 6-rod resonator

图 3 6 棒串接腔工作在 g^* 参数图上的动态特性曲线

表 2 对称平行平面腔的临界值 Dd

Table 2 Critical values of Dd for multirod symmetric parallel plane-plane resonators

	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 6$
critical value of Dd	0, 1, 2, $(2 \pm \sqrt{2})/2$	0, 1, 1/2, 3/2, 2, $(2 \pm \sqrt{3})/2$	0, 1, 2, $(2 \pm \sqrt{2})/2$, $(2 \pm \sqrt{2 \pm \sqrt{2}})/2$	0, 1, 1/2, 3/2, 2, $(2 \pm \sqrt{3})/2$, $(2 \pm \sqrt{2 \pm \sqrt{3}})/2$

从表 2 可看出,对满足(8)式的对称平行平面腔,它的最大的临界光焦距为 $2/d$ 。由于它的临界点都在 $g_1^* g_2^* = 1$ 的曲线或原点上,又由于 $g_1^* = g_2^*$,所以当 $D = 2/d$,光腔都处在稳定和临界状态,即 $0 < g_1^* g_2^* < 1$ 。由此可知,要使多棒串接腔处于约束稳定工作状态,可使用满足(8)式的对称平行平面腔。并且,由等效透镜波导图可知,这类多棒腔与相同棒数的振荡-放大器输出特性相似。多棒对称平行平面腔激光器和多棒对称平行平面振荡-放大系统是目前实用化的高功率固体激光加工机所采用的主要构型。

3 偏离理想情况的分析

在实际工作中,由于激光棒物理和几何参数的差异,或者抽运的非均匀性,都会导致每个棒光焦距的不同。现以平行平面腔中一个棒的光焦距出现小的偏离 D 的情况进行分析,这时,可通过调节 d_1 和 d_{m+1} 使 g^* 参数保持不变。在(1)式中令第 p 棒的光焦距 $D = D_0 + \Delta D$,且 $d_1 = d_1 + x$, $d_{m+1} = d_{m+1} + y$,计算出 g_1^* , g_2^* 分别与 $g_{0,1}^*$, $g_{0,2}^*$ 相减得到 Δg_1^* , Δg_2^* 。由(4)~(5)式计算可知 Δg_1^* 只为 y 的函数,与 x 无关。同样的, Δg_2^* 只为 x 的函数。令 $\Delta g_1^* = \Delta g_2^* = 0$,解得

$$x = \frac{(A/d_{m+1} + 1) E D}{G + F D}, \quad y = - \frac{(A + B) C D}{G + F D} \tag{9}$$

其中

$$A = \prod_{n=2}^p (-1)^{n-1} D^{n-1} \prod_{a=1}^n d_{r_a}^{m-n+a+1} \prod_{l=1}^{n-1} (r_{l+1} - r_l) \quad (r_0 = m - p + 1) \tag{10}$$

$$B = d_l \prod_{l=m-p+2}^{m-p} (-1)^{m-p+l} \tag{11}$$

$$C = -1 + \prod_{n=1}^{m-p} (-1)^{n+1} D^n \prod_{k=1}^n d_{s_k}^{m-n+k-p+1} (s_l - s_{l-1}) \quad (s_0 = 1) \tag{12}$$

$$E = \prod_{l=1}^{m-p+1} d_l - \prod_{n=2}^{m-p+1} (-1)^n D^{n-1} \prod_{k=1}^n h_k^{m-n+k-p+1} d_{h_k} (h_{l+1} - h_l) \quad (h_0 = 0) \tag{13}$$

$$F = -1 - \prod_{n=1}^{m-1} (-1)^n D^n \prod_{k=1}^n d_{s_k}^{m-n+k} (s_l - s_{l-1}) \quad (s_0 = 1) \tag{14}$$

$$G = -mD - D \prod_{n=1}^{m-1} (-1)^n D^n \prod_{k=1}^n \prod_{s_k=s_{k-1}+1}^{m-n+k} d_{s_k} [(m+1-s_n) \prod_{l=1}^n (s_l - s_{l-1})] \quad (s_0 = 1) \quad (15)$$

(10) ~ (15) 式中: $r_a, s_k, h_k, r_l, s_l, h_l, s_n$ 等均表示棒的下标。当 $p=1$, 即第一个棒的 D 出现偏离时, A 不能用(10)式表示, 此时 $A=0$, 而 B, C, E, F, G 的表达式对 $p=1$ 成立。因此, 欲使平行平面腔的 g^* 参数保持理想状态, 可以按(9)式通过调节棒的间距而使 $g_1^* = g_2^* = 0$ 。

以文献[5]的图 10 中 4 棒平行平面腔单棒光焦度发生 +10% 的偏移为例, 计算参数为 $d_1=0.04\text{m}, d_2=0.20\text{m}, d_3=0.35\text{m}, d_4=0.25\text{m}, d_5=0.13\text{m}, D_0=0.5\text{m}^{-1}, D=0.05\text{m}^{-1}$ 。由此算出 $g_1^*=0.082, g_2^*=0.250$ 。当 $p=1$ 时, $A=0, B=0.13, C=-0.259, E=0.686, F=-0.259, G=-1.363$, 因此 d_1, d_5 调整量分别为 $x=-2.492 \times 10^{-2}\text{m}, y=-1.224 \times 10^{-3}\text{m}$ 。当 $p=2$ 时, $x=-1.695 \times 10^{-2}\text{m}, y=-7.436 \times 10^{-3}\text{m}$ 。

对于多个棒的光焦度出现偏离的情况, 应当调节更多棒间距, 可用类似的方法进行处理, 但一般得不到解析结果, 需要通过数值计算求解, 以实现有效的补偿。

4 结 论

本文利用等价腔概念对多棒固体激光腔进行了详细分析, 得出了多棒串接固体激光腔等价 g^* 参数和等效腔长 L^* 的解析公式, 由此可作出高功率固体激光器在 g^* 参数图上的动态工作特性曲线, 并研究其动态工作特性。利用光腔的约束稳定条件, 得出了一般光腔和满足(8)式条件的平行平面腔的临界光焦度。此外, 针对实际工作中容易出现光焦度偏离理想状态的情况, 提出了用调节棒间距来补偿光焦度偏离的方法, 推导出了平行平面腔单棒光焦度偏离时补偿的解析公式。所得结果对高功率多棒串接固体激光腔的设计有参考意义。而且, 原则上亦适用于其他几何构型固体介质激光腔。

参考文献:

- [1] Weber H. Diode pumped solid-state lasers: from 10W to 10kW[A]. SPIE[C]. 1999, 3862:2.
- [2] 吕百达, 马虹. 二极管抽运固体激光器研究的一些新进展[J]. 激光与红外, 2000, 30(2):67. (L ÜB D, Ma H. Some novel developments in diode-pumped solid-state lasers. *Laser and Infrared*, 2000, 30(2):67)
- [3] Giesen A, Hügel, Voss A, et al. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. *Appl Phys B*, 1994, 58:365.
- [4] Körtz H P, Iffländer R, Weber H. Stability and beam divergence of multimode lasers with internal variable lenses[J]. *Appl Opt*, 1981, 20:4124.
- [5] Driedger K P, Iffländer R M, Weber H. Multirod resonators for high-power solid-state lasers with improved beam quality[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1988, 24(4):665.
- [6] 吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. (L ÜB D. Solid-state lasers. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication Press, 2002)

Dynamical characteristics of high-power solid-state multirod laser resonators

ZHANG Dong, PENG Yuanjie, L ÜBai-da

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Using the concept of equivalent resonators, dynamical characteristics of high-power solid-state multirod laser resonators are analyzed. The general expressions for equivalent g -parameters and equivalent resonator length of multirod resonators are derived which permit us to obtain the dynamical characteristic curve and critical refractive powers on the equivalent g -parameter diagram for multirod resonators and to illustrate their dynamical characteristics with numerical examples. In addition, the method of compensating a discrepancy of the refractive power by a suitable adjustment of the distances between the mirror and the rod is discussed and the related analytical formula is given.

Key words: Multirod resonator; Dynamical characteristics; Equivalent resonator; Equivalent g -parameter; Refractive power