

文章编号: 1001-3806(2004)01-0065-03

多棒平行平面腔动态工作特性的研究

张 栋, 吕百达

(四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064)

摘要: 基于等价腔方法, 将高功率固体激光器使用的二棒平行平面腔的结果推广到多棒平行平面腔。推导出了 g^* 参数和等价腔长的解析表达式。对这类光腔的动态工作特性做了详细分析, 并给出了数值计算例。研究表明, 对两类多棒对称平行平面腔, 在 g^* 参数图上的动态特性曲线是过原点的一条直线。若多棒的热焦距有小的偏差, 特性曲线不再是直线。然而, 用适当调节镜和棒以及棒间距离的方法可以使特性曲线重新成为一条直线。因而采用这种方法可以补偿棒的热焦距偏差, 给出了有关的数学公式。

关键词: 多棒平行平面腔; 动态工作特性; 热透镜; 等价腔; 偏差补偿

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Study of dynamic characteristics of multirod plane plane resonators

ZHANG Dong, Lǚ Bai-da

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

Abstract: Based on the equivalent resonator method, the results of a two rod plane plane resonator used for high power solid state lasers are extended to multirod plane plane resonators. The analytical expressions for g^* -parameters and equivalent resonator length of a multirod plane plane resonator are derived. The dynamic characteristics of such a type of resonator are analyzed in detail, and illustrated with numerical examples. It is shown that for two types of multirod symmetric plane plane resonators, the characteristic curve on the g^* -parameter diagram is a straight line passing through the origin. If there is a small discrepancy of the thermal focal length of rods, the characteristic curve is no longer a straight line. However, by a suitable adjustment of the distances between the mirrors and rods, the curve becomes again a straight line. Therefore, the discrepancy of the thermal focal length can be compensated in such a way, and the relevant mathematical formula is also proposed.

Key words: multirod plane plane resonator; dynamic characteristics; thermal lensing; equivalent resonator; discrepancy compensation

引 言

在形成产品系列的高功率固体激光加工系统中, 为了获得高功率激光输出, 大多数采用平行平面腔内多棒串接和放大的技术方案^[1]。KORTZ 和 DRIEDGER 等人^[2,3]对单棒和两棒腔的工作特性作了详细的理论和实验研究。国内李正佳、朱广志等人也开展了相应的工作^[4,5], 但研究工作的重点是针对单棒和两棒情况。笔者将文献[2]和[3]中的结果进一步推广到多棒平行平面腔, 详细分析了这

类光腔的动态工作特性, 并研究了当多棒的热焦距不相等时的补偿问题。研究结果对高功率多棒平行平面腔的设计有实际意义。

1 多棒平行平面腔的 g^* 参数和临界光焦度

在含 m 个棒的平行平面腔中, 设各棒性质和工作条件相同, 在光抽运下, 作为一级近似, 每个棒可等效于一个光焦度为 $D = 1/f$ 的热透镜 L_n (f 为热焦距, $n = 1, \dots, m$)。 d_1, d_{m+1} 为最靠近腔镜的棒主平面到镜 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, 光腔的单程变换矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & d_{m+1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -D & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots$$

基金项目: 国家高技术和中国工程物理研究院基金资助项目(4101-10)

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: scuзд@163.net

收稿日期: 2003-04-28; 收到修改稿日期: 2003-06-11

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -D & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

按等价腔理论^[2,6],多棒串接腔可等效于一个 g 参数为 g_1^* , g_2^* 的空腔,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:

$$w_i^2 = \frac{M_i}{\pi} \left[\frac{g_i^*}{g_i^* (1 - g_1^* g_2^*)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

($i, j = 1, 2, i \neq j$, 下同)

令(1)式和(2)式中每个矩阵元分别相等,得出 m 棒平行平面腔的 g^* 参数和等价腔长 L^* 为:

$$g_1^* = 1 + \sum_{n=1}^m (-1)^n D^n \prod_{k=1}^n \sum_{s_k=s_{k-1}+1}^{m-n+k+1} d_{s_k} \times \prod_{l=1}^n (s_l - s_{l-1}) \quad (s_0 = 1) \quad (4)$$

$$g_2^* = 1 + \sum_{n=1}^m (-1)^n D^n \prod_{k=1}^n \sum_{s_k=s_{k-1}+1}^{s_{k-1}-1} d_{s_k} \times \prod_{l=1}^n (s_{l-1} - s_l) \quad (s_0 = m+1) \quad (5)$$

$$L^* = L - \sum_{n=2}^{m+1} (-1)^n D^{n-1} \prod_{k=1}^n \sum_{s_k=s_{k-1}+1}^{m-n+k+1} d_{s_k} \times \prod_{l=1}^{n-1} (s_{l+1} - s_l) \quad (s_0 = 0) \quad (6)$$

s_k, s_l 表示棒间距的下标,其中 k, l 为循环指数:

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

对两棒平行平面腔,由(4)式~(6)式得:

$$g_1^* = 1 - D \sum_{s_1=2}^3 d_{s_1} (s_1 - s_0) + D^2 \sum_{s_1=2}^2 d_{s_1} \sum_{s_2=s_1+1}^3 d_{s_2} \prod_{l=1}^2 (s_l - s_{l-1}) = 1 - Dd_2 - 2Dd_3 + D^2 d_2 d_3 \quad (8)$$

$$g_2^* = 1 - 2Dd_1 - Dd_2 + D^2 d_1 d_2 \quad (9)$$

$L^* = L - D(d_1 d_2 + 2d_1 d_3 + d_2 d_3) + D^2 d_2 d_3$ 或与文献[3]中的 21(b)式、10(c)式相同,当 $d_1 = d_3$ 时, $g_1^* = g_2^*$ 。

有两类实际工作中感兴趣的对称多棒平行平面腔。第I类满足 $d_1 = d_2 = d_3 = \dots = d_m = d_{m+1} = d$ 条件,由(4)式、(5)式知 $g_1^* = g_2^* = g^*$, g^* 参数动态工作特性曲线为一直线,表1列出了 $m = 3, 4, 6$

Table 1 g^* -parameters of a three rod symmetric plane plane resonator of type I

$$(g_1^* = g_2^* = g^*, d_1 = d_2 = d_3 = \dots = d_m = d_{m+1} = d)$$

g^*	
$m = 3$	$1 - 6dD + 5d^2D^2 - d^3D^3$
$m = 4$	$1 - 10dD + 15d^2D^2 - 7d^3D^3 + d^4D^4$
$m = 6$	$1 - 21dD + 70d^2D^2 - 84d^3D^3 + 45d^4D^4 - 11d^5D^5 + d^6D^6$

的 g^* 参数。现设光抽运的情况下 $D \geq 0$ (下同), 当 $D = 0$ 时, $g_1^* = g_2^* = 1$, 由图1可知, 此时动态工

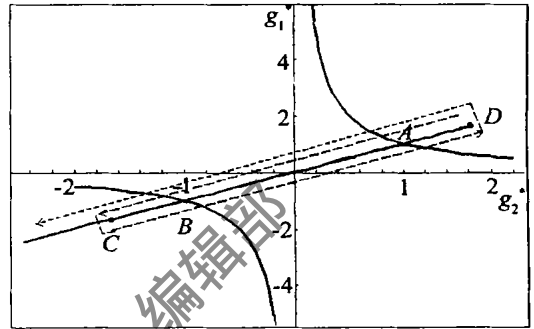


Fig. 1 Dynamic characteristic curve on the g^* -parameter diagram for a 3-rod symmetric plane plane resonator ($d_1 = d_2 = d_3 = d$)

作点在图中的双曲线与直线的交点 $A(1, 1)$ 上, 并且随着光焦距的增大, 动态工作点沿直线往下移动, 依次经过原点、 $B(-1, -1)$, 到 C 点后折返回 D 点, 到 D 点后再次移向 B 点, 因此三棒腔的动态工作曲线存在两个转折点, 见图1中的虚线。推而广之, m 棒串接腔存在 $m-1$ 个转折点。由表1中的 g^* 参数知, 当 $D \rightarrow +\infty$, m 为奇数时, $g^* \rightarrow -\infty$; m 为偶数时, $g^* \rightarrow +\infty$ 。因此, 奇数棒腔的 g^* 参数动态工作特性曲线上的工作点当 $D \rightarrow +\infty$ 时向左下方移动, 而偶数棒腔则向右上方移动。此种腔型的动态稳定工作点在 A 与 B 之间, 在 A 和 B 点为临界腔, 在直线上其余点均处于非稳区。在实际工作中, 经常使用的是第II类满足条件 $d_1 = d_{m+1} = d, d_2 = d_3 = \dots = d_m = 2d$ 的对称平行平面腔。由等效透镜波导图知, 这种几何排列的腔型构成对称透镜波导, 且 $g_1^* = g_2^* = g^*$, g^* 参数图上动态工作特性曲线也为一直线。 $m = 3, 4, 6$ 的满足上述条件平行平面腔的 g^* 参数与 D 的关系见表2, 将

Table 2 g^* -parameters of a three rod symmetric plane plane resonator of type II

$$(g_1^* = g_2^* = g^*, 2d_1 = d_2 = d_3 = \dots = d_m = 2d_{m+1} = 2d)$$

g^*	
$m = 3$	$1 - 9dD + 12d^2D^2 - 4d^3D^3$
$m = 4$	$1 - 16dD + 40d^2D^2 - 32d^3D^3 + 8d^4D^4$
$m = 6$	$1 - 36dD + 210d^2D^2 - 448d^3D^3 + 432d^4D^4 - 192d^5D^5 + 32d^6D^6$

表 2 中的 g^* 参数对 D 求导可得出 g^* 参数在转折点的光焦度与 d 的乘积示于表 3。分别令 $g^* = 0, g^{*2}$

Table 3 Dd values of multirod symmetric plane plane resonators at the turning points ($m = 3, 4$ and 6)
($g_1^* = g_2^* = g^*, 2d_1 = d_2 = d_3 = \dots = d_m = 2d_{m+1} = 2d$)

Dd at the turning points	
$m = 3$	$1/2, 3/2$
$m = 4$	$1, (2 \pm \sqrt{2})/2$
$m = 6$	$1, 1/2, 3/2, (2 \pm \sqrt{3})/2$

$= 1$ 还可以得出临界光焦度的公式。将表 3 中的光焦度值代入表 2 均可得出 $g^* = 1$, 即表 3 的光焦度

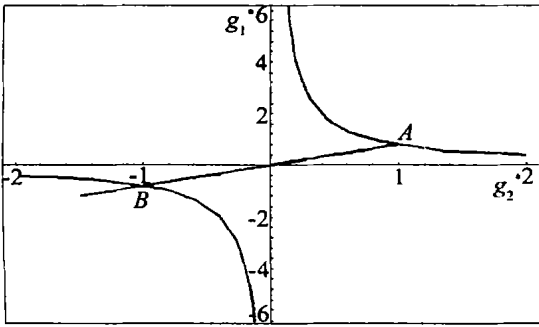


Fig. 2 Dynamic characteristic curve on the g^* -parameter diagram for a 3 rod symmetric plane plane resonator ($2d_1 = d_2 = d_3 = 2d_4$)

对应的动态工作点都在 $g^{*2} = 1$ 的双曲线与直线的交点上, 此类光腔的数值计算例见图 2。在满足 $D \ll 2/d$ 的条件下, 动态工作点总是在 $g_1^* g_2^* = 1$ 的两条双曲线间移动, 由此可知, 当 $D > 2/d$ 时, 光腔处在稳定或临界状态。因此, 这类腔型在一个较大抽运功率范围内激光器都能稳定工作, 输出功率随着抽运功率的增加而增大, 有利于最大输出功率的获得。当 $D > 2/d$ 时, 光腔位于非稳区, 此时增大抽运功率反而会导致输出功率下降。

2 多棒平行平面腔热焦距不相等情况的补偿措施

实际工作中要求多棒热焦距完全相等是很困难的。当热焦距偏差不大时, 可通过调节镜和棒以及棒间距离方法来补偿因热焦距偏离而造成的 g^* 参数的变化。现以三棒腔中热焦距有偏离情况为例。设 M_1, M_2 为腔镜, L_1, L_2 和 L_3 为腔内依次排列的三棒, 其光焦度分别为 $D + \alpha, D + \beta$ 和 D , M_1L_1, L_1L_2, L_2L_3 和 L_3M_2 间距离分别为 $d_1 + x, d_2, d_3$ 和 $d_4 + y$, 由 (4) 式, (5) 式求出热焦距相等时的 g_0^* 和偏离状态的 g_i^* , 令 $\Delta g_i^* = g_i^* - g_0^* = 0 (i = 1, 2)$, 作矩阵运算得:

$$\begin{cases} x = \frac{[-d_4\alpha - (d_3 + d_4)\beta + d_3d_4\alpha\beta + (d_2d_4 + 2d_3d_4)\alpha D + (d_2d_3 + d_2d_4 + d_3d_4)\beta D - (\alpha D + \beta D + \alpha\beta)d_2d_3d_4D]}{[\alpha + \beta - d_3\alpha\beta + (3 - d_2\alpha - 2d_3\alpha - d_2\beta - d_3\beta + d_2d_3\alpha\beta)D - 2(d_2 + d_3 - d_2d_3\alpha - d_2d_3\beta)D^2 + d_2d_3D^3]} \\ y = \frac{[-(d_1 + d_2 + d_3)\alpha - (d_1 + d_2)\beta + (d_1d_3 + d_2d_3)\alpha\beta + (d_1d_2 + 2d_1d_3 + d_2d_3)\alpha D + (d_1d_2 + d_1d_3 + d_2d_3)\beta D - d_1d_2d_3(\alpha\beta + \alpha D + \beta D)D]}{[\alpha + \beta - d_3\alpha\beta + (3 - d_2\alpha - 2d_3\alpha - d_2\beta - d_3\beta + d_2d_3\alpha\beta)D - 2(d_2 + d_3 - d_2d_3\alpha - d_2d_3\beta)D^2 + d_2d_3D^3]} \end{cases} \quad (11)$$

(11) 式为一般三棒平行平面腔的调整公式, 对上面分析的两类对称多棒平行平面腔, 当多棒热焦距不相等时, 光腔的动态工作特性曲线不再是直线, 利用 (11) 式可以调整 x, y 的值, 使 $g_1^* = g_2^*$, 动态工作特性曲线又回到直线。例如, 设参数为 $2d_1 = d_2 = d_3 = 2d_4 = 0.2m, \alpha = 0.1D, \beta = 0.08D$, 三棒平行平面腔的动态工作特性曲线为图 3 中的虚线。将上述计算参数代入 (11) 式得:

$$\begin{cases} x = \frac{0.034D - 0.01256D^2 + 0.000752D^3}{-3.18D + 0.894D^2 - 0.0475D^3} \\ y = \frac{0.074D - 0.0169D^2 + 0.000752D^3}{-3.18D + 0.894D^2 - 0.0475D^3} \end{cases} \quad (12)$$

用 (12) 式调节间距, 使光腔的动态工作特性曲线重新变为一条直线 (见图 3 中实线)。对 $m > 3$ 的多棒

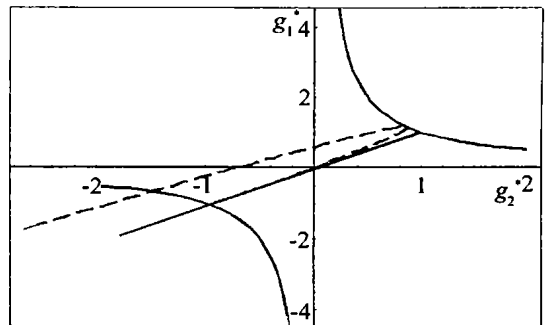


Fig. 3 Dynamic characteristic curve on the g^* -parameter diagram for a 3 rod symmetric plane plane resonator ($2d_1 = d_2 = d_3 = 2d_4 = 0.2m, \alpha = 0.1D, \beta = 0.08D$)

示的发展非常重要。

光致发光有机白光 LED 同无机白光 LED 类似。已封装好的还未见报道, 但已报道了一些发光薄膜的发光情况。如能研制出荧光量子效率高、热稳定性化学稳定性好、具有优良的加工和成膜性的发光膜, 将这种膜覆盖在蓝光 LED 的管芯上, 采用改性环氧树脂进行封装, 能够得到发白光的 LED。这方面的工作正在研究之中。

4 展 望

有机发光物质种类繁多, 在全色显示、大屏幕视频显示方面比无机发光材料有优势, 另外有机白光 LED 制备工艺简单、成本低功耗小, 具有巨大的应用价值及潜在的市场。有机发光器件引起了各国科研工作者的极大重视而成为当今发光显示领域的研究热点, 在不久的将来, 有机白光 LED 存在的问题将得到解决, 将有产品问世, 或许有机白光 LED 与无机白光 LED 会平分秋色, 那时将对人们的生活、生产产生深远的影响。

参 考 文 献

- [1] MILLS A. Optoelectronics, 2001, 14(3): 38~ 42.
- [2] MILLS A. Optoelectronics, 2001, 14(1): 32~ 37
- [3] HOLT M. Optoelectronics, 2001, 14(3): 44~ 47.
- [4] PEARTON S J, ABERMATHY C R, OVERBERG M E *et al.* Material Study, 2002, 6: 24~ 31.
- [5] 刘式壙. 物理, 1998, 28(7): 404~ 408.
- [6] 姚云峰. 白光发光二极管的技术现状. 方大月刊, 2003, 3(23): 1~ 4.

- [7] XIE Zh Y, LI Y Q, HUANG J S *et al.* Synthetic Metals, 1999, 106: 71~ 74.
- [8] XIE Z Y, FENG J, HUANG J S *et al.* Synthetic Metals, 2000, 108: 81~ 84.
- [9] 刘式壙, 杨开霞, 黄劲松 *et al.* 发光学报, 2002, 23(1): 7~ 11.
- [10] 刘式壙, 冯 晶, 李 峰. 发光学报, 2002, 23(5): 425~ 430.
- [11] LIU Z G, NAZARE H. Synthetic Metals, 2000, 111~ 112: 47~ 51.
- [12] DESTRI S, GIOVANELLA U, FAZIO A *et al.* Organic Electronics, 2002, 3: 149~ 156.
- [13] MAZZEO M, THOMPSON J, BLYTH R I R *et al.* Physics, 2002, E13: 1243~ 1246.
- [14] THOMPSON J, BLYTH R I R, MAZZEO M *et al.* A P L, 2001, 79(5): 560~ 562.
- [15] 冯 晶, 刘 宇, 王 悦 *et al.* 发光学报, 2002, 23(1): 25~ 27.
- [16] FENG J, LI F, Gao W B *et al.* A P L, 2001, 78(25): 3947~ 3949.
- [17] ITANO K, OGAWA H, SHIROTA Y. A P L, 1998, 72(6): 636~ 638.
- [18] GEBLER D D, WANG Y Z, BLATCHFORD J W *et al.* A P L, 1997, 70(13): 1644~ 1646.
- [19] LEE T W, PARK O O, CHO H N *et al.* Synthetic Metals, 2001, 122: 437~ 441.
- [20] DESHPANDE R S, BULOVIC V, FORREST S R. A P L, 1999, 75(7): 888~ 890.
- [21] VIRGILI T, LIDZEY D G, BRADLEY D D C. Synthetic Metals, 2000, 111~ 112: 203~ 206.
- [22] FINLAYSON C E, GINGER D S, GREENHAM N C *et al.* Chem Phys Lett, 2001, 338: 83~ 87.
- [23] JIN Y D, CHEN H Z, HEREMANS P L *et al.* Synthetic Metals, 2002, 127: 155~ 158.
- [24] ZHANG B W, ZHAO W, CAO Y *et al.* Synthetic Metals, 1997, 91: 237~ 241.

(上接第 67 页)

平行平面腔的热焦距补偿, 可作类似的计算分析。

3 结 论

对多棒平行平面腔的动态工作特性作了详细分析, 由 g^* 参数和等价腔长 L^* 的解析公式作出了多棒平行平面腔在 g^* 参数图上的动态工作特性曲线。研究了这类光腔的动态工作特性, 并提出了用调节镜和棒间距离来补偿热焦距偏离的方法, 以三棒平行平面腔为例给出了解析公式。本文中所得结果对高功率多棒腔设计和热焦距不等时的补偿有实

际应用意义。

参 考 文 献

- [1] GIESEN A, HÜGEL H, VOSS A *et al.* Appl Phys, 1994, B58: 365~ 372.
- [2] KORTZ H P, IFFLÜNDER R M, WEBER H. Appl Opt, 1981, 20: 4124~ 4134.
- [3] DRIEDGER K P, IFFLÜNDER R M, WEBER H. IEEE J Q E, 1988, 24(4): 665~ 673.
- [4] 李正佳, 夏文建, 朱长虹 *et al.* 激光技术, 1998, 22(5): 284~ 286.
- [5] 朱广志, 陈培峰, 周卓尤 *et al.* 激光杂志, 2003, 24(2): 29~ 31.
- [6] 吕百达. 固体激光器件. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 114~ 117.