

文章编号: 1001-3806(2003)05-0450-03

## 多棒固体激光器棒间匹配耦合的研究

朱广志 陈培峰 周卓尤 黄维玲 邹雪芬

(华中科技大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 采用光学传输矩阵的方法对内含多元件热透镜介质的激光腔进行了分析, 给出了棒间匹配耦合的调整方法。理论分析与实验相符, 并在三棒串接的 CW Nd<sup>3+</sup>: YAG 激光器中获得 (0~1) kW 的稳定功率输出。

关键词: 多棒串接; 谐振腔设计; 棒间匹配耦合; 高功率固体激光器

中图分类号: TN248.1<sup>+</sup>3 文献标识码: A

### Rods' matching and coupling of multi-rod solid state laser

Zhu Guangzhi, Chen Peifeng, Zhou Zhuoyou, Huang Weiling, Zou Xuefen

(Institute of Laser Technology and Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Based on optical transmission matrix, multi element thermal lens resonator is analyzed. The way to adjust rods' matching and coupling is presented. Theoretical analysis is accordant with the experiment results. For three rod serial CW Nd<sup>3+</sup>: YAG laser, the stable output power between (0~1) kW is acquired.

**Key words:** multi rod series connection; resonator design; rods' matching and coupling; high power solid state laser

### 引言

高功率固体激光器的近红外波长有着可用光纤传输、峰值功率高、器件结构紧凑等优点, 在激光材料加工中得到了广泛的应用。多棒串接运转是提高固体激光器输出功率的普遍方法之一。它既可得到与棒数成比例的激光输出, 又不降低光束质量。该方法假设各个热透镜元件具有相同的热特性。但是对于实际的激光器系统, 各个棒的热特性存在着差异, 这样, 就导致了棒间匹配耦合特性的变化, 进而影响激光器系统的稳定性。为使激光器工作在最佳状态, 则必须进行相应的调整。

### 1 理论分析

首先将激光棒等效为一个光焦度为  $1/f$  的透镜来进行分析, 在中低功率的范围内其光焦度与输入功率  $P_{\text{pump}}$  成正比<sup>[1]</sup>:

$$1/f \cong (\alpha/S) P_{\text{pump}} \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为热透镜系数,  $S$  为晶体棒的横截面积, 对于给定的晶体棒,  $\alpha$  和  $S$  都为定值。(1) 式忽略了棒端面效应的影响, 光焦度  $1/f$  与棒长  $L$  无关。其结

构参数如图 1 所示, 为了表示各个棒热特性的不同假设各个棒的光焦度为  $1/f, k_1/f, k_2/f$ , 其中  $M_1, M_2$  为平面镜,  $d$  为主平面到镜面的距离,  $h$  为棒端面到主平面距离,  $h = L/2n$  ( $n$  为 Nd<sup>3+</sup>: YAG 的折射率)。

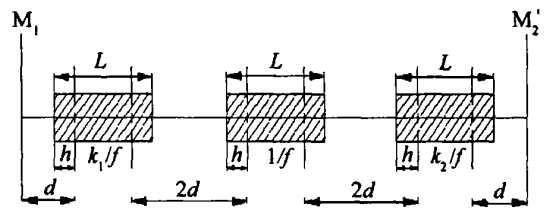


Fig. 1 Symmetric interval setting of the resonator

由图 1 可以得到光线的单向传输矩阵<sup>[2,3]</sup>:

$$M = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -k_1/f & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 2d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -k_2/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

有源介质腔等效为  $g^*$  参数等价腔时, 其光线的单程传输矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} g_1^* & L^* \\ g_1^* g_2^* - 1 & g_2^* \\ L^* & g_2^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

作者简介: 朱广志, 男, 1977 年 12 月出生。硕士研究生。现从事高功率固体激光器的研究工作。

收稿日期: 2003-02-27; 收到修改稿日期: 2003-03-31

比较(2)式和(3)式得到等效参数:  $g_1^* = -4k_1k_2 \times (1/f)^3 d^3 + 4k_1k_2(1/f)^2 d^2 + 2k_1(1/f)^2 d^2 + 6k_2 \times (1/f)^2 d^2 - k_1(1/f)d - 5k_2(1/f)d - 3(1/f)d + 1$ ,  $g_2^* = -4k_1k_2(1/f)^3 d^3 + 4k_1k_2(1/f)^2 d^2 + 6k_1(1/f)^2 d^2 + 2k_2(1/f)^2 d^2 - 5k_1(1/f)d - k_2 \times (1/f)d - 3(1/f)d + 1$ ,  $L^* = -4k_1k_2(1/f)^3 d^4 + 4k_1k_2(1/f)^2 d^3 + 6k_1(1/f)^2 d^3 - 5k_1 \times (1/f)d^2 - 5k_2(1/f)d^2 + 6k_2(1/f)^2 d^3 - 9(1/f)d^2 + 6d$ 。当  $k_1 = k_2 = 1$  时, 各个棒的热效应相同, 处于理想模式的匹配耦合情况。此时,  $g_1^* = g_2^*$ , 在  $g^*$  平面上  $g^*$  参数的轨迹曲线为一通过原点, 斜率为 1 的直线, 如图 2 所示。其工作点在  $g^*$  参数图上的运动轨迹是  $PA \rightarrow PB \rightarrow PC \rightarrow PD$ , 其中  $PA$  ( $PC$ ) 为该直线与  $g_1^* \cdot g_2^* = 1$  曲线第 1 象限部分的交点,  $PB$  ( $PD$ ) 为该直线与  $g_1^* \cdot g_2^* = 1$  曲线第 3 象限部分的交点。

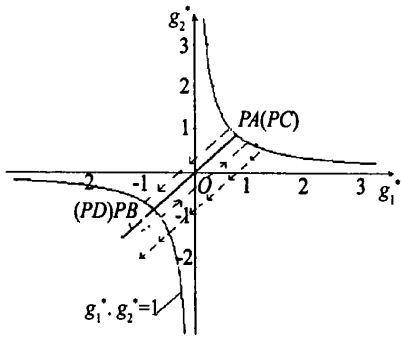


Fig. 2  $g^*$  parameter moves at  $g^*$  plane ( $k_1 = k_2 = 1$ )

由稳定条件 ( $0 < g_1^* \cdot g_2^* < 1$ ) 可以得到其临界点光焦度值, 见表 1 (其中  $O_1, O_2, O_3$  为依次通过原点的临界状态, 热焦距为  $f$ )。

Table 1 The correspondence relationship of the thermal focus and critical point

thermal focus $f$	critical point	stable parameters
$f_1 = \infty$	$PA$	
$f_2 = 2d$	$PB$	
$f_3 = \frac{2}{3}d$	$PC$	$g_1^* \cdot g_2^* = 1$
$f_4 = \frac{1}{2}d$	$PD$	
$f_5 = \frac{2}{2-\sqrt{3}}d$	$O_1$	
$f_6 = d$	$O_2$	$g_1^* \cdot g_2^* = 0$
$f_7 = \frac{2}{2+\sqrt{3}}d$	$O_3$	

$k_1 \neq k_2 \neq 1$  时,  $g^*$  平面上  $g^*$  参数的轨迹如图 3 所示, 该曲线分别与坐标轴和  $g_1^* \cdot g_2^* = 1$  的曲线相交在  $x_1, x_2, x_3, x_4, Pa, Pb, Pc, Pd$  点, 并存在几个非稳区, 这表明棒间匹配耦合变差 (其中  $x_1, x_2, x_3, x_4$  分别为与坐标轴的交点, 而  $Pa, Pb, Pc, Pd$  为与  $g_1^* \cdot g_2^* = 1$  曲线的交点即临界稳定点)。因此, 在实际运行的激光器中, 就应该采用一定的方法进行补偿使之尽量趋近理想的匹配模式, 使光腔稳定区域扩大。

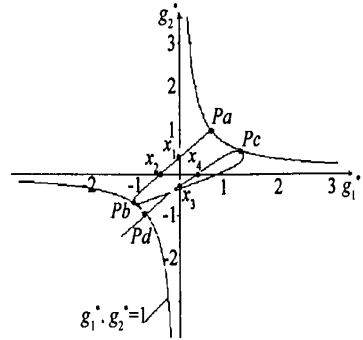


Fig. 3  $g^*$  parameter moves at  $g^*$  plane ( $k_1 \neq k_2 \neq 1$ )

## 2 实验分析和讨论

采用双椭圆聚光腔结构, 选用 3 支热特性比较接近的 YAG 棒。3 支激光棒的尺寸均为  $\varnothing 8\text{mm} \times 160\text{mm}$ , 每支棒的热特性曲线稍有差异 (见图 4)。因此,  $k_1, k_2$  的值都接近于 1。在实验中, 调整范围局限在  $I = (0 \sim 27)\text{A}$  (即注入功率调整范围  $0\text{kW} \sim 7\text{kW}$ )。

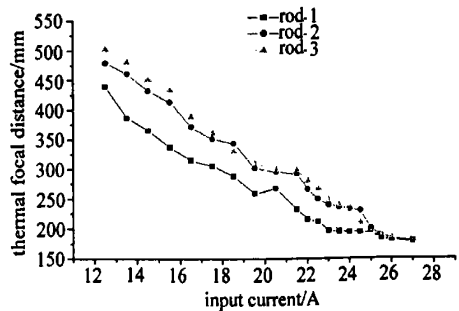


Fig. 4 Thermal focal distance of rod

首先取主平面到镜面的距离  $d$  分别为  $155\text{mm}, 200\text{mm}$ 。在该谐振腔布局的情况下测得功率输出曲线 (见图 5)。

先对  $k_1 k_2$  的值都接近于 1 的情况下进行分析。以图 5 中曲线 a 为例, 当激光器处于非稳区 ( $x_1 \sim x_2$  段), 对应 (见图 4) 的热焦距的值很大且注入电流较小并未达到激光阈值故无激光输出。当注入电流增大时, 由  $x_1 \sim x_2$  段进入稳定区域, 激光功率线性提

实际上理想状态是很难达到的, 通常光腔处于

高。当  $I = 14\text{A}$  时, 对应  $g^*$  参数(见图 3)上的  $Pb$  临界点, 此时, 谐振腔已在非稳状态, 功率明显的下降, 直到越过该非稳区进入下一稳定区, 激光功率又会线性提高。当增至  $I = 24\text{A}$ , 激光器处于又一非稳区( $x_3 \sim x_4$  段), 输出功率又开始下降。

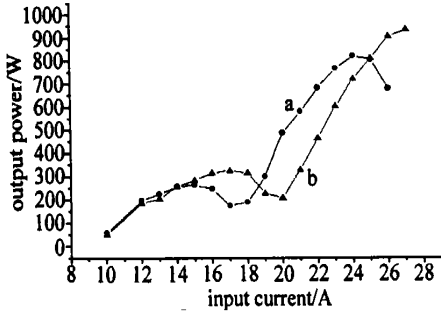


Fig. 5 Output power versus pump power  
a— $d = 200\text{mm}$  b— $d = 155\text{mm}$

为了提高激光功率的输出, 可适当减小  $d$  值(即缩短腔长使  $d$  从  $200\text{mm}$  减小到  $155\text{mm}$ ), 则图 5 中曲线 a 向右移动(变为曲线 b 的情况)。使得在较高注入功率时光腔能够处于稳定的状态, 也就提高输出功率。

这种缩短腔长的设计方案受到了激光器机械设计的限制。不过可以通过调节各个棒的注入电流而使 3 个棒热焦距尽量相等, 对棒的热效应进行补偿, 工作曲线更接近理想状态, 稳定区间得以扩大。图 6 为  $d = 180\text{mm}$  时采用这种补偿和未采用补偿而得到的对比曲线。可以看出注入电流补偿前功率

曲线 A 有功率明显下降的现象。补偿后得到的曲线 B 则线性增长, 在高注入的情况下也未出现功率的下降的趋势。

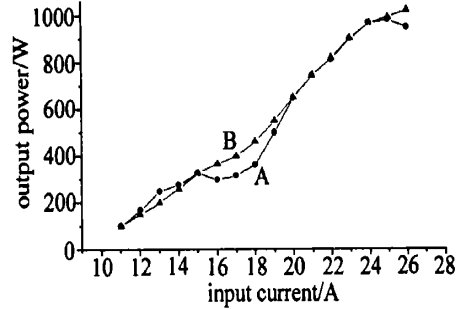


Fig. 6 Output laser power versus pump power  
A— $d = 180\text{mm}$  (not using thermal compensation) B— $d = 180\text{mm}$  (using thermal compensation)

### 3 结论

多棒串接高功率固体激光器热效应是导致激光器输出功率下降的主要因素。在实际光腔设计中, 通过对棒的热效应的补偿来达到棒间的匹配耦合是解决上述问题的最佳方案。

感谢黄维玲、王海林、王英、曹红兵、陈泽民、杨克成等老师和同学的悉心指导及热情帮助。

#### 参考文献

[1] Driedger K P, Hflander R M, Weber H. IEEE J Q E, 1988, 24 (4): 665~ 673.  
[2] 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1992: 16~ 53.  
[3] 周炳琨. 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1995: 142~ 150.

(上接第 449 页)

方法来研究 H-G 光束的实用性。

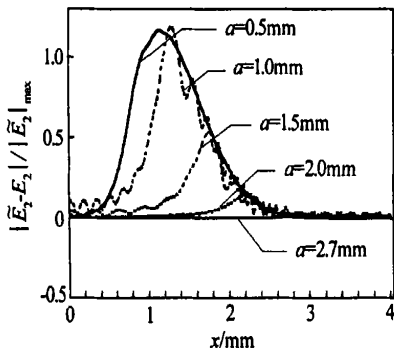


Fig. 4 Effect of hard edge aperture on the TEM<sub>2</sub> H-G beam

### 3 小结

对 H-G 光束经内含硬边光阑的复杂 ABCD 光学系统的传输进行了研究, 推导出了 H-G 光束传输的递推公式, 由此可得任意阶 H-G 光束的传输公式,

且能解析地对光阑效应进行研究。所得公式是严格的解析结果, 适用于含硬边光阑且  $B \neq 0$  的近轴 ABCD 光学系统。对  $B = 0$  情况, 需用矩阵分解方法另加推导。为表述简明, 文中公式是用二维( $x, z$ ) H-G 光束写出的, 但推广到三维( $x, y, z$ ) H-G 光束是直截了当的。递推算公式简单、便于编程实现, 且比直接数值积分计算大大地缩短了机时, 具有实际应用价值。

#### 参考文献

[1] Lü B D, Ma H, Zhang B. Opt Commun, 1999, 164: 165~ 170.  
[2] Collins S A. J O S A, 1970, 60(9): 1168~ 1177.  
[3] Wen J J, Breazeale M A. J Acoust Soc Amer, 1988, 83(7): 1752~ 1756.  
[4] Ding D, Liu X. J O S A, 1999, A 16: 1286~ 1293.  
[5] Lü B D, Luo S R. J Mod Opt, 2001, 48: 2169~ 2178.  
[6] 陶向阳, 周南润, 吕百达. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 50~ 54.  
[7] Lü B D, Zhang B, Cai B W. J Mod Opt, 1993, 40: 1736~ 1743.