

# 多棒高功率固体激光器动态模匹配研究

李正佳 夏文建 朱长虹 应花山 丘军林

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 采用光学矩阵分析了多元热透镜谐振腔内模式的动态匹配特征, 给出了平平腔参数调整的关系式, 实验结果与理论分析相符, 并在两棒连续 Nd YAG 系统上得到 0W ~ 530W 功率范围的稳定输出。

关键词: 多棒 模式动态匹配

## Study on the dynamic mode matching of multirod solid state lasers

Li Zhengjia, Xia Wenjian, Zhu Changhong, Ying Huashan, Qiu Junjin

(National Lab. of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Optical matrix of multirod laser resonator with difference in rod thermal lensing is used in considering the dynamic mode matching characteristics of active elements. By analyzing the relation between the defined normalized mode matching factor and the varying resonator parameters, we derived a relation for adjusting the resonator parameters of two rod system which result in a fine mode matching. Experimental results show in accordance with theoretical analysis and for two rod system we get the stable output power between 0W ~ 530W.

**Key words:** multi-rod dynamic mode matching

### 引 言

多棒串接或放大是提高固体激光器输出功率的最为普遍采用的方法, H. P. Korts 等<sup>[1]</sup>以及 J. M. Eggleston<sup>[2]</sup>研究了多棒热透镜谐振腔的动态运行特性, 其分析结果表明, 采用对称平平腔结构(即谐振腔的反射镜面曲率半径为 $\infty$ , 腔内热透镜元件与反射镜之间的距离为热透镜元件之间距离的一半, 从光学矩阵而言, 该结构等价于单个透镜的周期性排列), 整个系统可得到与棒数成比例的激光输出, 且不降低光束质量, 其基本假设在于各激活元件具有一致的热特性。对于实际运转的激光器, 各激光棒的热特性之间往往存在着差异, 并将导致各激活介质间的模式匹配特性变差, 此时, 谐振腔的结构应作相应调整, 使谐振腔运行在最佳动态模匹配状态。

### 一、理论分析

高泵浦功率条件下, 激光棒等效于一个屈光度与输入功率成正比的热透镜<sup>[3]</sup>, 设两激光棒的屈光度分别为  $D$ ,  $\xi D$ ,  $\xi$  为一系数, 若  $\xi \neq 1$ , 则标志着两激活元件具有不同的热特性, 谐振腔的结构参数如图 1 所示,  $\rho_1, \rho_2$  分别为两反射镜面的曲率半径,  $h$  为激光棒端面到热透镜主面的距离, 为分析方便, 假设  $\xi \geq 1.0$ , 定义模匹配因子  $\delta$  如下: 设腔内高斯光束在两热透镜上的半径分别为  $\omega_1, \omega_2$ , 单位棒长的模体积分别为  $\pi \omega_1^2, \pi \omega_2^2$ ,  $\delta$  定义为  $\pi \omega_1^2, \pi \omega_2^2$  两者中较小者

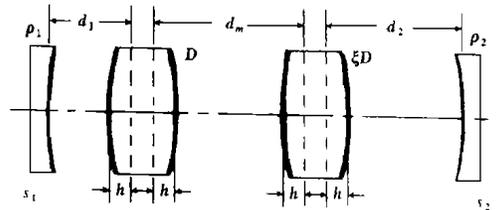


Fig. 1 Scheme of two rod resonator

的模体积分别为  $\pi \omega_1^2, \pi \omega_2^2$ ,  $\delta$  定义为  $\pi \omega_1^2, \pi \omega_2^2$  两者中较小者

与较大者之比, 即 
$$\delta = \min(\omega_1^2, \omega_2^2) / [\max(\omega_1^2, \omega_2^2)] \quad (1)$$
 式中,  $\min(\omega_1^2, \omega_2^2)$  和  $\max(\omega_1^2, \omega_2^2)$  分别为取  $\omega_1^2, \omega_2^2$  中的较小者和较大者函数。当  $\delta = 1$  时, 两激光棒内模体积相等, 因而模式匹配较好, 当  $\delta < 1$  时, 两激光棒内模体积不相等, 则模匹配特性变差, 显然,  $\delta$  仅对谐振腔运行在  $G$  平面上的稳定区有效。由光学矩阵导出  $\omega_1^2, \omega_2^2$  的表达式, 代入 (1) 式后, 进行化简, 得到  $\delta$  与  $G$  参数及谐振腔的有效长度  $b$  关系式:

$$\delta = \frac{\min[b^2 G_2 + d_1^2 G_1(1 - G_1 G_2), b^2 G_1 + d_2^2 G_2(1 - G_1 G_2)]}{\max[b^2 G_2 + d_1^2 G_1(1 - G_1 G_2), b^2 G_1 + d_2^2 G_2(1 - G_1 G_2)]} \quad (2)$$

式中, 
$$G_1 = 1 - (d_1 + d_2 + d_m) / \rho_1 - \{(1 + \xi)(d_2/d_m)(1 - d_1/\rho_1) + [1 - (d_1 + \xi d_2)/\rho_1]\} d_m D + \xi(d_2/d_m)(1 - d_1/\rho_1) d_m^2 D^2 \quad (3)$$

$$G_2 = 1 - (d_1 + d_2 + d_m) / \rho_2 - \{(1 + \xi)(d_1/d_m)(1 - d_2/\rho_2) + [\xi - (d_1 + \xi d_2)/\rho_2]\} d_m D + \xi(d_1/d_m)(1 - d_2/\rho_2) d_m^2 D^2 \quad (4)$$

$$b = d_1 + d_2 + d_m - [(1 + \xi)d_1 d_2 + (d_1 + \xi d_2) d_m] D + \xi d_1 d_2 d_m D^2 \quad (5)$$

图 2 给出了对应于  $\xi = 1$  和  $\xi > 1$  两种情形下, 对称平平腔 ( $d_1 = d_2 = 0.5 d_m, \rho_1 = \rho_2 = \infty$ ) 的  $G$  参数在  $G$  平面上的动态运行轨迹, 与之相对应的  $\delta$  随归一化屈光度 ( $D \times L$ ) 变化的关系见图 3。

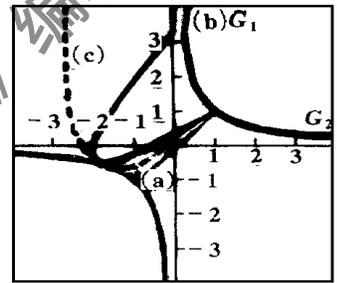


Fig. 2  $G$  diagram of two rod laser system for  
a- $\xi = 1$  b- $\xi > 1$

当  $\xi = 1$  时, 谐振腔在  $G$  平面上  $G$  参数的轨迹曲线为一通过原点、斜率为 1 的直线, 在图 2 中为直线 a, 此时  $\delta = 1$ , 两棒之间达到最理想的模式匹配; 当  $\xi > 1$  时,  $G$  参数轨迹曲线为一抛物线, 分别与坐标轴和双曲线  $G_1 \cdot G_2 = 1$  相交, 存在几个非稳区域, 见图 2 中曲线 b, 此时  $\delta \leq 1$ , 且随屈光度的变化发生起伏, 这表明棒之间的模匹配特性变差。当谐振腔进入非稳区

时,  $\delta$  值不存在。对于实际运转的激光器, 阈值条件以及最大热应力分别决定了屈光度的有效初始值(激光器有激光输出时对应的屈光度)以及屈光度变化的最高值, 因此, 必须调整谐振腔的参数以使谐振腔在某一段屈光度变化范围内达到最佳模式匹配状态。其最佳模匹配条件, 我们定义为图 3 的  $\delta/DL$  曲线图中, 某一段屈光度变化范围内所限定的  $\delta$  曲线与坐标横轴所夹面积最大, 理由在于, 在一定屈光度变化范围内该面积越大, 模式匹配越佳。考虑在实际操作中, 谐振腔的腔镜的位置比激光棒在谐振腔中的位置更易进行调整, 设谐振腔内激活介质的位置由下式确定,  $d_1 = (1 - \beta) d_m$   $(6)$

$$d_2 = (1 + \beta) d_m \quad (7)$$

$$d_m = 0.5L \quad (8)$$

式中,  $L$  为谐振腔的腔长, 且  $L = d_1 + d_2 + d_m$ , 在  $\beta$  变化过程中,  $L$  保持不变, 设满足最佳模匹配条件的  $\beta$  为  $\beta_{opt}$ 。

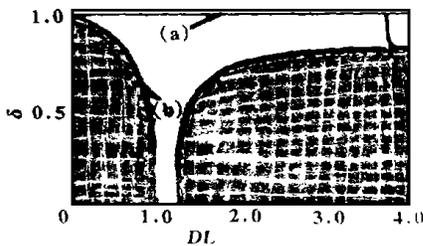


Fig. 3 Mode matching factor  $\delta$  vs  $D \times L$  for  
a- $\xi = 1$  b- $\xi > 1$

值得注意的是, 当腔参数调整使图 2 中  $G$  平面上的抛物线从 (1, 1) 开始, 经过一段稳定区后, 经过 (0, 0) 点, 再进入第二个稳定区, 见图 2 中曲线 c。此时, 由于谐振腔仅经过一非稳点就进入另一个稳定区, 必然导致图 3 中某一段  $\delta$  曲线有较大上升, 因而相对应的  $\delta$  曲线所围面积也将增加。由

此决定的  $\beta$  的数学表达式由  $G$  参数表达式推导得出,

$$\beta = (\xi - 1)^2 / (1 + \xi^2) \quad (9)$$

对应于  $\xi > 1$ ,  $\beta$  要求取正值。

图4给出了理论计算的  $\beta_{opt}$ ,  $\beta$  随  $\xi$  的变化关系曲线,从图4可以看出,当  $\xi = 1$  时,  $\beta = \beta_{opt} = 0$ , 此时, 对应着对称平平腔情形, 即两棒热特性一致时应采用对称平平腔结构, 当  $\xi \neq 1$  时,  $\beta$  和  $\beta_{opt}$  一般不为 0, 这表明两棒热特性不一致时, 对称平平腔结构已不是最佳结构, 当  $\xi$  与 1 差别不大, 即激光棒的热特性差异不大时,  $\beta$  与  $\beta_{opt}$  之间的差异亦较小, 这表明, 对于热特性差异不大的激光棒, 采用(6)式~(9)式所决定的参数来调整谐振腔的结构, 可使谐振腔中两激活元件之间达到较好的模匹配。

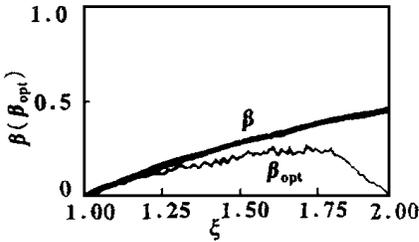


Fig. 4 Parameter  $\beta_{opt}$  and  $\beta$  determining the cavity structure are the function of  $\xi$  showing thermal characteristics of rods

## 二、实验结果及讨论

实验中所采用的激光棒的尺寸  $f 8\text{mm} \times 110\text{mm}$ , 谐振腔长度  $L$  为  $1.0\text{m}$ , 棒的热特性如图5所示, 根据激光棒的屈光度对输入功率关系曲线, 可近似算得两棒热特性差异比例因子  $\xi \approx 1.2$ 。

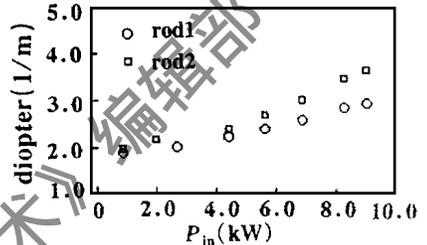


Fig. 5 Rods dioptr vs input power

由(6)式~(9)式, 我们得到  $\beta \approx 0.128$ , 及  $d_1 = 0.22\text{m}$ ,  $d_2 = 0.28\text{m}$ , 我们另外采用  $d_1 = d_2 = 0.25\text{m}$  的谐振腔结构进行对比实验, 激光器在两种参数条件下的输出特性见图6。从图6可以看出, 激光棒热特性不一致时, 对称平平腔结构不能满足最佳动态模匹配条件, 两激活介质的总有效模体积减小, 激活介质未得到充分利用, 此时, 激光器的最大输出功率仅为  $450\text{W}$ , 并达到饱和。当激光棒的屈光度增加时, 谐振腔在  $G$  平面上经过一段非稳区, 表现为随着输入功率的增加, 输出功率出现起伏, 在单棒输入功率为  $10\text{kW}$  时, 输出功率出现下降趋势。

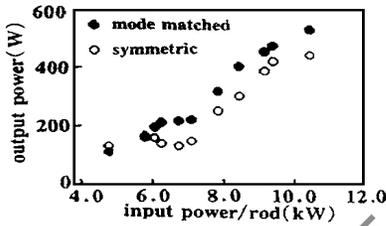


Fig. 6 Output power vs input power for a—symmetric b—mode matched

在谐振腔的  $G$  参数非稳区, 理论上定义的  $\delta$  值不存在, 而实际上, 激光棒存在着径向和方位角两种偏振状态的热焦距<sup>[3]</sup>, 当谐振腔对应于某一偏振态的热焦距为非稳时, 对应于另一偏振态的热焦距而言可能是稳定的, 因此, 在模失配的情况下, 激光器仍有一定功率的激光输出。对谐振腔的参数进行调整后, 谐振腔在两个稳定区之间仅经过一个非稳点, 谐振腔在有效屈光度变化范围内可较好地满足动态模匹配要求, 两激活介质的总有效模体积比前一种情况有所增加, 激活介质得到了较充分的利用, 随输入功率增加其输出功率呈现为稳定上升的趋势。在单棒输入功率为  $10\text{kW}$  时, 激光器的输出功率为  $530\text{W}$ , 且未见饱和现象。

理论分析和实验结果表明, 棒的热特性不一致, 使得谐振腔内激活元件的动态模匹配特性变差, 导致激光器最大输出功率下降, 且激光器输出功率随泵浦功率的变化出现起伏, 多棒串接激光器要求各棒具有尽可能一致的热特性或者尽量采用热特性差异较小的一组激光棒。适当调整对称平平腔的参数, 可改善激活元件间因热特性差异造成的模失配状态, 此时, 激光器输出功率随输入功率的增加而稳定上升, 且最大输出功率得到提高。

# 台阶光栅衍射效率的傅里叶分析

刘晓兵 阮 玉

(华中理工大学光电子工程系, 武汉, 430074)

摘要: 用傅里叶方法对台阶光栅衍射效率进行了分析, 得出任意台阶数, 任意台阶高度的二元光栅任意级次的衍射效率公式。针对二台阶光栅分析了台阶高度, 台阶宽度, 不同波长对 +1 级衍射效率的影响, 理论图像清晰, 结果简单明了。

关键词: 二元光栅 衍射效率 傅里叶分析

## Fourier analysis to diffraction efficiency of step gratings

Liu Xiaobing, Ruan Yu

(Department of Optoelectronic Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Using Fourier transfer, we extend the transparent index function of step grating into Fourier series and derived the expression of diffraction efficiency. The expression shows that the diffraction efficiency is the function of width ratio  $\xi$ , height ratio  $\eta$  and wavelength ratio  $\sigma$ . As a example, we give the calculation results of diffraction efficiency of 2-level step grating.

**Key words:** binary gratings diffraction efficiency Fourier analysis

### 引 言

利用大规模集成电路加工方式对光学元件表面进行波长范围内加工, 使得制造任意波前的二元光学元件成为可能, 这就是 90 年代的二元光学技术。台阶光栅就是其中的一个例子。已有文献对这类器件的衍射效率进行了分析<sup>[1, 2]</sup>, 我们从傅里叶变换角度对台阶光栅的衍射效率进行了分析, 得到了任意台阶数, 任意台阶高度的光栅任意级次的衍射效率公式, 给出了一些计算实例, 分析结果对光栅设计具有理论指导意义。

### 一、傅里叶分析

对于图 1 所示光栅, 在一个周期内其透过率函数可描述

为

$$f_1(x) = \begin{cases} 0 & -T/2 \leq x < -\tau/2 \\ A_0 & -\tau/2 \leq x \leq \tau/2 \\ 0 & \tau/2 < x \leq T/2 \end{cases} \quad (1)$$

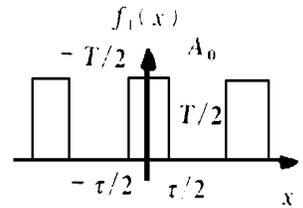


Fig. 1 Ronchi grating

### 参 考 文 献

- 1 Koltz H P, Iflander R, Weber H. Appl Opt, 1981; 20(3): 4124~ 4134
- 2 Eggleston J M. IEEE J Q E, 1988; QE-24(9): 1821~ 1824
- 3 [西德]克希奈尔 W 著, 华光译. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 1988: 377~ 380