

文章编号: 1006 - 1088(1999)04 - 0029 - 04

高输出功率的热稳谐振腔的设计

徐荣青¹, 刘以安¹, 王 建²

(1. 华东船舶工业学院电子与信息系, 江苏 镇江 212003; 2. 扬州大学工学院, 江苏 扬州 225003)

摘 要: 运用激光腔的矩阵理论, 给出了内含热透镜的平 - 平腔的 G 参数, 并给出了热稳条件, 进而以高输出功率及稳定的输出光束参数为目的对谐振腔进行了优化设计, 并用设计的参数进行了实验。

关键词: 激光腔; 热稳定性

分类号: TN242

文献标识码: A

0 引 言

高输出功率和稳定的激光输出一直是从事激光研究的广大科研工作者两个重要的研究方向, 这两个方向的研究往往是独立进行的。为获得连续 Nd:YAG 激光器输出功率, 一般采用大尺寸的晶体棒和多棒串接^[1]等方法, 采用热稳谐振腔^[2~4], 获得稳定的激光输出, 但在许多应用中对输出的激光既要求稳定, 又要求有较高的功率, 因此, 把高输出功率和稳定的激光输出结合在一起进行研究是很必要的。

1 基本理论

在连续 Nd:YAG 固体激光器中, K_p 灯所发出的光能只有少量的被 Nd^{3+} 离子吸收, 用于产生激光, 绝大部分被 YAG 基质吸收变成热负载, 热负载有害无益, 它使晶体温度上升, 激光输出降低, 甚至不输出光, 严重时还会损伤晶体, 因此, 必须对晶体进行强制冷却。冷却只能通过晶体的侧壁传导进行, 这样又造成晶体中心温度高, 侧壁温度低, 产生径向温度梯度, 从而形成热透镜效应, 此类激光腔可等效成图 1 所示的内含热透镜的激光谐振腔, 该激光腔的单程光学传输矩阵为:

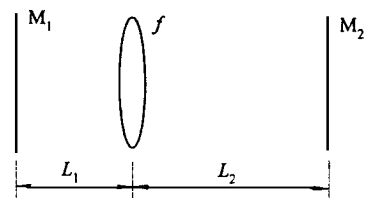


图 1 内含热透镜的平 - 平腔

$$M = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - L_2 x & L_1 + L_2 - L_1 L_2 x \\ -x & 1 - L_1 x \end{bmatrix} \quad (1)$$

激光腔的基本参数为:

$$G_1 = 1 - L_2 x \quad (2)$$

$$G_2 = 1 - L_1 x \quad (3)$$

$$L_e = L_1 + L_2 - L_1 L_2 x \quad (4)$$

其中, G_1 、 G_2 为腔的 G 参数, L_e 为等效腔长。当谐振腔处于基模运转时, 腔镜 M_1 和 M_2 处的光斑参数分

收稿日期: 1998 - 12 - 02

作者简介: 徐荣青(1966 -), 男, 华东船舶工业学院讲师。

别为:

$$w_1 = \left(\frac{\lambda L_e}{\pi} \right)^{1/2} \left[\frac{G_2}{G_1 (1 - G_1 G_2)} \right]^{1/4} \quad (5)$$

$$w_2 = \left(\frac{\lambda L_e}{\pi} \right)^{1/2} \left[\frac{G_1}{G_2 (1 - G_1 G_2)} \right]^{1/4} \quad (6)$$

高斯光束的波前曲率应与腔镜的曲率相等,故对于平-平腔,输出光的束腰在输出镜处。由高斯光束传输理论知热透镜上的光斑 w_3 为:

$$w_3^2 = w_1^2 \left[1 + \left(\frac{2L_1}{kw_1^2} \right)^2 \right] \quad (7)$$

一般认为激光棒内光斑即热透镜上光斑,且各处一致,于是有效模体积正比于 w_3^2 。

Steffen 热稳条件 $dw_1/dx = 0$ 与 Magni 热稳条件 $dw_3/dx = 0$ 本质上有区别的, w_1 为输出端的光斑半径,能够决定输出光模式; w_3 为激光棒处的光斑半径,它决定模体积,是与激光输出功率有关的。当满足 Steffen 条件时,一定能满足 Magni 条件,但相反则不一定成立,只有在 $L_2 > L_1$ 的情况下,两条件等价,而在 $L_2 < L_1$ 条件下, $dw_3/dx = 0$ 与 $dw_2/dx = 0$ 等价。故在 M_1 为输出镜时,只有当 $dw_1/dx = 0$ 时,谐振腔既有稳定模式又有稳定功率,所以谐振腔的热稳条件为:

$$\frac{dw_1}{dx} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dw_1^4}{dx} = 4w_1^3 \frac{dw_1}{dx} = 0 \quad (9)$$

因为 $w_1 \neq 0$,故(8)式与(9)式是等价的,把(2)、(3)、(4)式代入(5)式可得:

$$w_1^4 = \frac{\lambda^2}{\pi^2} \frac{(1 - L_1 x)(L_1 + L_2 - L_1 L_2 x)}{x(1 - L_2 x)} \quad (10)$$

由(10)式得:

$$x(1 - L_2 x) w_1^4 = \frac{\lambda^2}{\pi^2} (1 - L_1 x)(L_1 + L_2 - L_1 L_2 x) \quad (11)$$

(11)式两边对 x 求导并整理得:

$$(1 - 2L_2 x) w_1^4 = \frac{\lambda^2}{\pi^2} (-L_1^2 - 2L_1 L_2 + 2L_1^2 L_2 x) \quad (12)$$

(10)式代入(12)式并整理得:

$$2L_1 L_2^2 x^2 + (-2L_2^2 - 2L_1 L_2)x + (L_1 + L_2) = 0 \quad (13)$$

(13)式求解得:

$$x = \frac{(L_1 + L_2) \pm \sqrt{(L_1 + L_2)(L_2 - L_1)}}{2L_1 L_2} \quad (14)$$

x 只有取实数才有物理意义,因此必须要求 $L_2 \geq L_1$, M_1 端输出要满足热稳条件,必须有 $L_2 \geq L_1$,且有两个热稳点。若以 M_2 为输出端,可用类似的方法,并以 $dw_2/dx = 0$ 为条件可解得:

$$x = \frac{(L_1 + L_2) \pm \sqrt{(L_1 + L_2)(L_1 - L_2)}}{2L_1 L_2} \quad (15)$$

因 x 为实数,故必须满足 $L_1 \geq L_2$,这与(14)式的要求相反,因此,在腔镜 M_1 端热稳输出的同时,腔镜 M_2 端的输出必定是非热稳的,反之亦然,这说明热稳输出只能是单端的。

2 数值计算与实验

用下面公式^[5]求热稳时激光棒处的光斑半径 w_{30} 。

$$w_{30}^2 = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{1}{|\Delta x|} \quad (16)$$

其中 Δ_x 为稳定区的宽度。对于内含热透镜的平 - 平腔, 根据谐振腔的稳定条件。

$$0 < G_1 G_2 < 1 \tag{17}$$

可知稳定区的边界为

$$\begin{cases} x_1 = 0 & (G_1 G_2 = 1) \\ x_2 = \frac{1}{L_1} & (G_1 G_2 = 0) \\ x_3 = \frac{1}{L_2} & (G_1 G_2 = 0) \\ x_4 = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} & (G_1 G_2 = 1) \end{cases} \tag{18}$$

由(18) 式可以画出稳定区的边界曲线图(见图 2), 所用的参数为腔长 $L_1 + L_2 = 1\text{ m}$ 。由图 2 和(18) 式可知激光腔有两个稳定区, 且宽度相等; 当 $L_2 > L_1$ 时, 稳定区的宽度为 $\frac{1}{L_2}$, 当 $L_2 < L_1$ 时, 稳定区的宽度为 $\frac{1}{L_1}$, 那么(16) 式可写成

$$w_{30}^2 = \begin{cases} \frac{2\lambda}{\pi} L_2 & (L_2 > L_1) \\ \frac{2\lambda}{\pi} L_1 & (L_2 < L_1) \end{cases} \tag{19}$$

由(19) 式可作出 w_{30}^2 随 L_2 的变化关系, 腔参数取 $L_1 + L_2 = 1\text{ m}$, $\lambda = 1.06\text{ }\mu\text{m}$, 结果见图 3。(14) 式和(15) 式对应于热稳点的屈光度, 由实验可知, 屈光度 x 与泵浦功率成正比, 要获得高的输出功率必须要有高的泵浦功率, 故设计时应在两个热稳点中取高 x 值, 在讨论时舍去(14) 和(15) 式中的负号, 由(14) 和(15) 式可计算出高值热稳定点的 x 值随 L_2 的变化关系见图 4。设计应满足高功率稳定输出的要求, 由

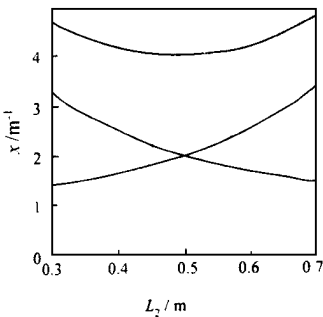


图 2 稳定区边界曲线图

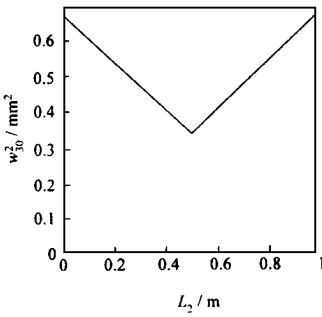


图 3 w_{30}^2 随 L_2 的变化关系

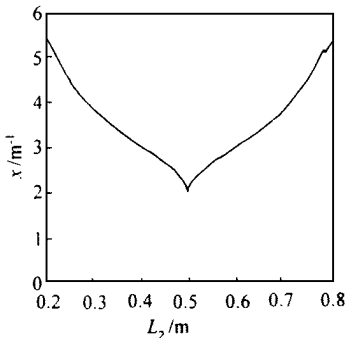
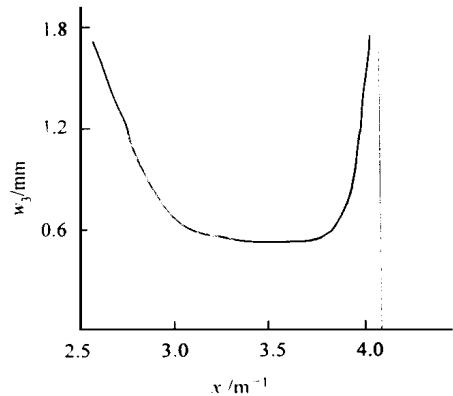
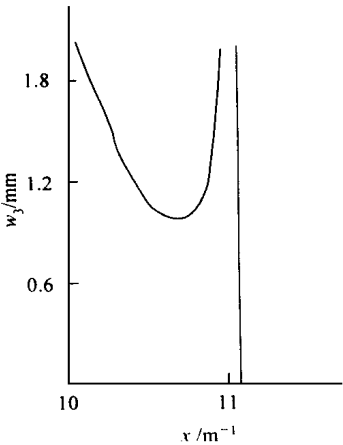


图 4 高值热稳点随 L_2 的变化关系



(a)



(b)

图 5 w_3 随 x 的变化曲线

图 3 和图 4 知,高值热稳点的 x 值和此时的 w_{30}^2 均随 $L_2 (L_2 > L_1)$ 的增大而增大, x 对应于泵浦功率, w_{30}^2 正比于模体积,理论上 L_2 越大越好,但实际应用中不应把 L_2 取得过大,这是因为热稳点仅仅是一个点,在有热扰时,激光器不可能工作在这一固定点上,对于实际激光器真正有意义的是在热稳点附近,有一个小的 Δx 的变化, w_3 几乎不变,这样有热扰时,才能保证输出激光既有稳定模式又有稳定功率。由 (5) 式及 (7) 式可画出 w_3 随 x 变化关系示意图(图 5)。图 5(a) 取 $L_2 = 0.6 \text{ m}$,图 5(b) 取 $L_2 = 0.9 \text{ m}$,图 5(a) 能满足要求,但图 5(b) 不能。为了兼顾输出激光高功率和对热扰稳定,实验时取 $L_2 = 0.7 \text{ m}$ 。

实验在一连续高功率固体激光器上进行,激活介质的尺寸为“8 × 100 mm,泵浦激光棒的双灯泵浦功率在 0 ~ 10 kW 之间变化,谐振腔的两个腔镜均为平面镜,反射镜的反射率为 100 %,输出镜的反射率为 80 %,当 L_2 取 0.7 m 时,对应的高值热稳点的 x 值为 3.89 m^{-1} ,实验测得对应于此值的泵浦功率为 8.6 kW。实验结果获得了 251 W 的稳定的激光输出。

3 结束语

若要进一步提高输出功率,需增大模体积,同时要保证输出激光稳定,由 (19) 式知,须增加谐振腔的长度,但若谐振腔过长,势必超过机械设计和正常使用的限度,另外增加谐振腔的长度,会使腔的损耗增加。另一种方法可以增大模体积而又不使谐振腔过长,就是在腔内插入倍数一定的望远镜,此法可以减短实际腔长,但腔的结构复杂,调整难度大,另外腔内插入望远镜,增加了损耗;总的来说,大模体积的高泵浦功率的热稳腔可获得更高功率的稳定的输出激光。

参 考 文 献

- [1] 杨盛宜,李 港,陈 莹 1 双棒串接单级与双级 Nd YAG 激光器的分析[J] 1 应用激光,1997,17(4):161.
- [2] 曹 清,罗治江,张为俊等 1 动态热不敏感谐振腔分析[J] 1 物理学报,1993,42(9):1452.
- [3] Silvestri S, Laporta P, Magni V. Novel Stability diagrams for continuous wave solid state laser resonators[J]. Opt. Lett., 1986, 11(8):513.
- [4] Silvestri S D, Laporta P, Magni V. The role of the roof position in single mode solid state laser resonators: optimization of a CW mode locked Nd YAG laser[J]. Optics Communication, 1986, 57(5):339.
- [5] Magni V. Resonators for solid state lasers with large volume fundamental mode and high alignment stability[J]. Applied Optics, 1986, 25(1):107.

Study on the Design of Thermal Insensitive Resonators with High Output Power

Xu Rongqing¹, Liu Yian¹, Wang Jian²

(1. Dept. of Electronics and Information, East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang, Jiangsu, 212003, China;

2. Yang Zhou University, Yang Zhou, Jiangsu, 225003, China)

Abstract: The parameters of plane-plane laser cavity and the condition of thermal insensitive laser resonators are given. By using the matrix theory of resonators. The optimistic design of laser resonator is made to obtain stable high output of laser power. Then the experiments with the designed resonators parameters are carried out.

Key words: laser resonators; thermal stability

(责任编辑:邵仁蔚)