

固体激光器基模热稳腔的设计

王廷福 张纯玉 孙洪建 李喜春

(五机部二〇九所)

提 要

本文运用矩阵光学求得含有厚透镜的谐振腔的等效腔参数,再根据腔的热稳条件,对腔的特性进行了分析,并给出了各类固体激光器的基模热稳腔的设计公式及图表。

随着激光技术的发展,目前在远程测距、激光倍频、全息照相和激光打孔等应用上都对固体激光器提出了输出稳定的基模的要求。但激光棒在重复频率脉冲或连续光泵作用下产生热透镜效应^[1],它将改变原来谐振腔的性质,从而导致输出光束功率下降,发散角增大,甚至使谐振腔停止振荡。为了克服热透镜效应的影响,人们进行了一些研究,并提出了设计热稳腔的方法。用图解法设计虽然简单^[2],但未给出光模的热稳定性与谐振腔参数之间的定量关系。文献[4~5]对热稳腔进行了研究,但在激活介质作为厚透镜时,计算麻烦而不便进行设计。本文运用矩阵光学求得含有厚透镜的谐振腔的等效腔参数,再根据腔的热稳定条件,对腔的特性进行了分析,并给出了各类基模热稳腔的设计公式及图表,使激活介质作为厚透镜的基模热稳腔的设计与薄透镜的情况一样简便、有效。

一、含有热透镜的谐振腔及基模体积

激光棒在重复频率脉冲或连续泵浦时,虽采取了循环水冷却,但在棒内仍形成一定的温度分布,在热稳态下棒内热畸变是轴对

称的。这时谐振腔内相当于放入一个透镜。设谐振腔由两块不同曲率的反射镜和腔内一个光学元件(激光棒)所组成,如图1所示。反射镜的曲率半径分别为 R_1 、 R_2 ,光学元件的主平面为 H_1 、 H_2 ,利用光线在腔内传输的变换矩阵和腔的稳定性判据求得等效腔参数为(参考附录):

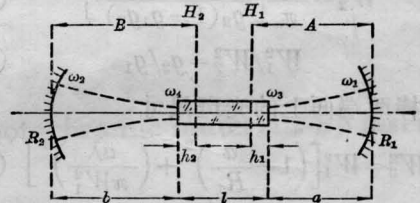


图1 内有热透镜的谐振腔示意图

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= 1 - \frac{B}{f} - \frac{L}{R_1} \\ g_2 &= 1 - \frac{A}{f} - \frac{L}{R_2} \\ L &= A + B - \frac{AB}{f} \\ A &= a + h, \quad B = b + h \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

类透镜介质的主平面到端面的距离近似为

$$h_1 \approx h_2 \approx l / (2n) \quad (1.2)$$

式中 l 为棒的长度, n 为棒的折射率。理论和实验证明热焦距 f 随光泵功率的变化比

收稿日期:1979年5月7日。

较灵敏,而对中小功率器件,激光棒的主平面位置无明显变化,故 h 可近似看作一个常数。

假定输出镜的曲面为 R_1 , 并将输出镜作成薄透镜,使输出光束的波前变为平面波,即激光束通过透镜变换使得它的新腰部在输出镜上,此时光束远场发散角为

$$\theta \approx \lambda / (\pi W_1) \quad (1.3)$$

谐振腔内除基模(TEM₀₀)外,尚可能有高阶模存在。为使谐振腔处于基模运转,可在腔内插入光阑来强迫抑制高阶模的振荡。但遮挡部分的激活介质所贮存的能量未被利用,只有棒中心一小部分工作物质对输出有贡献,利用效率较低。本文利用激光棒的自孔径选模作用,只要通过激光介质的光束发散角小,基模光斑尺寸与激光棒的孔径相匹配,即可达到充分利用激活介质和选模的目的。

基模在反射镜上的光斑尺寸为^[3]

$$W_1^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \left[\frac{g_2}{g_1(1-g_1g_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

$$W_2^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \left[\frac{g_1}{g_2(1-g_1g_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

$$W_1^2/W_2^2 = g_2/g_1 \quad (1.6)$$

激光棒两端面上的光斑尺寸

$$W_3^2 = W_1^2 \left[\left(1 - \frac{a}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{a\lambda}{\pi W_1^2}\right)^2 \right] \quad (1.7)$$

$$W_4^2 = W_2^2 \left[\left(1 - \frac{b}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{b\lambda}{\pi W_2^2}\right)^2 \right] \quad (1.8)$$

现将(1.1)、(1.4)、(1.6)式分别代入(1.7)和(1.8)式,在 $h \ll f$ 时求得

$$W_3^2 = W_1^2 \left(\frac{B+h}{L} \right)^2 \times \left[1 + 2 \frac{A-h}{B+h} g_1 + \left(\frac{A-h}{B+h} \right)^2 \frac{g_1}{g_2} \right] \quad (1.9)$$

$$W_4^2 = W_2^2 \left(\frac{B-h}{L} \right)^2 \times \left[1 + 2 \frac{A+h}{B-h} g_1 + \left(\frac{A+h}{B-h} \right)^2 \frac{g_1}{g_2} \right] \quad (1.10)$$

当 $b \gg l$ 和 $2 \left(\frac{A}{B} \right) g_1 \ll 1$ 时得

$$W_3 \approx W_1 \left(\frac{B+h}{L} \right) \quad (1.11)$$

$$W_4 \approx W_1 \left(\frac{B-h}{L} \right) \quad (1.12)$$

根据高斯光束通过不同孔径时的透射率,选取激光棒的孔径 ϕ 为

$$\phi \approx 3\bar{W}_{3,4} = 3W_1 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (1.13)$$

基模的衍射损耗很小,可以忽略。而高阶模的光斑尺寸大于激光棒孔径,因衍射损耗大而被抑制。

激活介质内的基模体积

$$V \approx \frac{\pi l}{3} (W_3^2 + W_3W_4 + W_4^2) \approx \pi l W_1^2 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \quad (1.14)$$

二、热稳腔的特性

激光器由于光泵输入功率的变化,泵放电过程的波动等原因,使激光棒的热焦距扰动,导致光束发散角和模体积不稳定,输出波动。因此需采用热稳腔,使光束发散角和模体积随激光棒的平均热焦距的变化不灵敏。即要求

$$\frac{dV}{df} \approx 0, \quad \frac{d\theta}{df} \approx 0$$

V 和 θ 随 f 的变化,归结为输出镜上光斑尺寸随热焦距的变化,故要求^[4]

$$\frac{dW_1}{df} \approx 0 \quad (2.1)$$

由(1.1)、(1.4)式求得^[5]

$$\begin{aligned} \frac{dW_1}{df} \frac{f}{W_1} &= \frac{B^2}{4fL} \frac{2g_2 - \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} \left(\frac{A}{B} \right)^2 + 2 \frac{A}{B}}{1 - g_1g_2} \end{aligned} \quad (2.2)$$

谐振腔对热扰动不灵敏的条件为

$$1 = 2g_1g_2 + \frac{g_1}{g_2} \left(\frac{A}{B}\right)^2 + 2g_1 \left(\frac{A}{B}\right) \quad (2.3)$$

假定

$$2g_1 \left(\frac{A}{B}\right) \ll 1 \quad (2.4)$$

$$g_1g_2 \approx \frac{1}{2} \quad (2.5)$$

则(2.1)式的要求得到满足。由(1.4)、(1.13)式得

$$g_1 \approx \frac{9\lambda B^2}{\pi\phi^2 L} \quad (2.6)$$

$$g_2 \approx \frac{\pi\phi^2 L}{18B^2\lambda} \quad (2.7)$$

但需注意在热稳腔内光模并非都是稳定的,因为在(2.4)式条件下求得

$$\begin{aligned} & \frac{dW_2}{df} \frac{f}{W_2} \\ &= \frac{1}{4fL(1-g_1g_2)} \left[A^2(2g_1g_2-1) + \frac{B^2}{g_1} \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

当 $g_1g_2 \approx \frac{1}{2}$ 时, $dW_1/df \approx 0$, 而 $dW_2/df \neq 0$,

这表明反射镜 1 和 2 上的光斑尺寸对热焦距变化的灵敏度是不相同的。只有用靠近激光棒的反射镜作输出镜,才能得到较稳定的激光输出。

热稳腔不仅要求在固定的平均热焦距处导数 dW_1/df 为零,而且要求在平均热焦距变动时, W_1 随 f 的变化要小。由(2.2)、(2.4)式得

$$\frac{dW_1}{df} \frac{f_1}{W_1} = \frac{B^2}{4fL} \frac{2g_1g_2-1}{g_1(1-g_1g_2)} \quad (2.9)$$

并以谐振腔能否维持振荡作判据,由稳定振荡条件求得在 $A \ll f$ 时热焦距最大允许变化范围为

$$\begin{aligned} g_1 \frac{f^2}{B} &\leq \Delta f_{\max} \\ &\leq \frac{1}{g_2} (1-g_1g_2) \frac{f^2}{B} \end{aligned} \quad (2.10)$$

综上所述,为要获得热稳定性良好而基模对激活介质利用率高的谐振腔,必须注

意下列几点:(1) 选取 $g_1g_2 \approx \frac{1}{2}$; (2) 腔长与热焦距的比值即 B/f 值尽可能小;(3) $\Delta f/f$ 值即热扰动要小;(4) 激活介质尽可能靠近输出端反射镜,它不仅对输出稳定性有利,而且在 $|g_2| > 1$ 时可增大激活介质内的基模体积。

三、基模热稳腔的设计

一个较理想的基模热稳腔应具有对热扰动的灵敏度低,基模对激活介质的利用率高,光束发散角小,腔体结构紧凑等。但这些要求之间是有矛盾的,只能根据器件的主要指标,合理选择谐振腔的有关参数。在 $A \ll f$ 时,基模热稳腔的计算公式如下:

球面腔

$$\frac{L}{R_2} = 1 - \frac{\pi L\phi^2}{18B^2\lambda} \quad (3.1)$$

$$\frac{L}{R_1} = 1 - \frac{9B^2\lambda}{\pi L\phi^2} - \frac{B}{f} \quad (3.2)$$

$$L \approx A + B \quad (3.3)$$

凸平(凹平)腔

$$\frac{B}{f} = 1 - \frac{9B^2\lambda}{\pi L\phi^2} \quad (3.4)$$

$$\frac{L}{R_2} = 1 - \frac{\pi L\phi^2}{18B^2\lambda} \quad (3.5)$$

平面平行腔

$$L \approx \frac{1}{2} f \quad (3.6)$$

$$\phi = \left(\frac{9\lambda}{\pi} f \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

式中曲率半径 R 为正值是凹面, R 为负值是凸面。从上述基模热稳腔的几点要求来看,采用凸凹腔是一个较好的折衷方案。但为了使光束发散角小而且稳定,输出镜片需修磨成薄透镜。用平面输出镜却避免了这一麻烦,但凸平腔或平面平行腔在热焦距较长时,腔体结构不紧凑。对平面平行腔,只要改变腔长就可适应不同光泵功率下的热焦距,但要使腔内为基模振荡,激光棒的直径必须与平均热焦距(或腔长)相匹配,一般情况下该

条件不易得到满足。

下面讨论几个参数的确定原则：

(1) g 因子的确定

由光学谐振腔的稳定性图可知， g 因子可选在第一象限或第三象限内，但选取 $g > 0$ 时谐振腔的共焦参量较大，光束发散角小，对充分利用激活介质有利。并因

$$W_1 = \left(\frac{2\lambda L}{\pi} g_2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad W_2 = \left(\frac{2\lambda L}{\pi} g_1 \right)^{\frac{1}{2}},$$

为了扩大基模在激活介质内的光斑尺寸，并要求 W_1 随 f 的变化不灵敏，一般选取 $g_2 > 1$ ，但 g_1 不宜过小，否则将使 W_2 很小，当激光功率较大时，容易引起反射镜上介质膜的损坏。

(2) f 值的确定

实验测出所用激光棒在一定光泵功率下的平均热焦距。对于热透镜效应，还可采取适当的补偿措施。例如对凸平(凹平)腔，若 f 值较长，为了缩短腔长和减小热扰动，可在腔内插入一个短焦距透镜(或将激光棒的端面磨成凸面)。

(3) A 值的确定

根据 $2g_1(A/B) \ll 1$ ，即激光棒靠近输出镜 R_1 的非对称腔结构，以及 $A \ll f$ 的要求选取适当的 A 值。应使 A 小于下列值：

$$A_{\max} = B/(20g_1) \quad (3.8)$$

$$A_{\max} = f/10 \quad (3.9)$$

(4) B 值的确定

因 $|g_2| > |g_1|$ ，则 $W_2 < W_1$ ，在腔内激光功率较大时，易引起反射镜 R_2 上介质膜的损坏，故在 R_2 表面上的功率密度必须低于它的损伤阈值，即要求

$$B_{\min} = 0.42(\phi/\lambda)(P/P_{th})^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

式中 P 为腔内激光功率(瓦)， P_{th} 为膜片的损伤阈值(瓦/厘米²)。

需要说明的是当 $l \leq b < 6l$ 时，激光棒的热透镜应看作为一个厚透镜；当激光棒的长度比腔长短得多即 $b > 6l$ 时，可近似当作一个薄透镜。上述对含厚透镜的谐振腔的设计

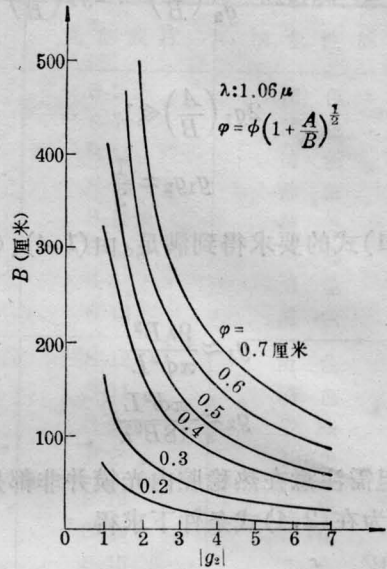


图2 自孔径选模要求热稳腔的 B 、 g_2 、 ϕ 应满足的关系

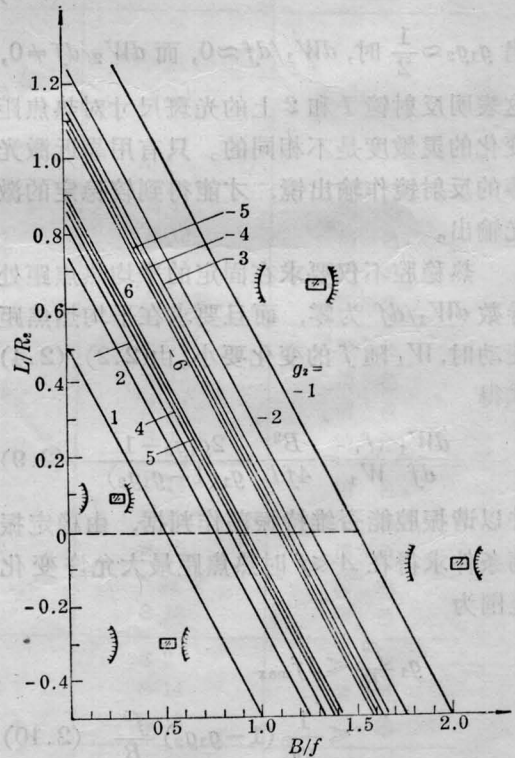


图3 g_2 作参数热稳腔的 L/R_1 与 B/f 之间的关系

完全适用于腔内为薄透镜的情况，此时只要取 $A = a + \frac{l}{2} \approx a$, $B = b + \frac{l}{2} \approx b$ 即可。

最后由(2.7)和(3.1)~(3.3)式得各类基模热稳腔的设计图，示于图2~4中。利用它可以比较简便地确定谐振腔的有关参数。设计时假定激光棒的 l, ϕ, n, f 值已知，根据上述原则由图2可初步确定出 B, g_2 值(可先假定 A/B 和 g_2 为某一定值)，再由 B/f 和 g_2 查图3~4得其他值。但对平凸或平凹腔 ($L/R_1=0$)，还需使图2和图3所确定的 g_2 值近似相等。若所得参数不符合要求，可适当调整有关参数重新设计，直至基本满意为止。最后可用设计公式进行验算。

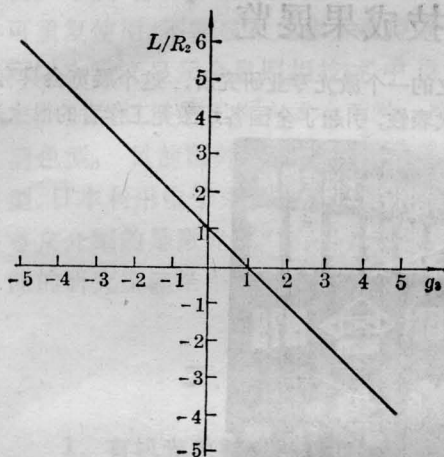


图4 热稳腔 L/R_2 与 g_2 之间的关系

上述基模热稳腔的设计理论在实验中亦得到证实，在文献[4~8]中可找到它的实验例证。

附 录

设腔内光学系统用光线变换矩阵 $\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix}$ 来表

征，光线在腔内往返一周的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D' & B' \\ C' & A' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix}$$

根据谐振腔稳定振荡条件

$$\left| \frac{A_0 + D_0}{2} \right| \leq 1$$

求得含热透镜谐振腔的稳定性判据为

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1$$

式中

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= A' - \frac{B'}{R_1} \\ g_2 &= D' - \frac{B'}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

并因

$$\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \frac{h_2}{f} & h_1 + h_2 - \frac{h_1 h_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{h_1}{f} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

对类透镜介质由(1)、(2)式即可求得(1.1)式。

参 考 文 献

- [1] J. D. Foster *et al.*; *J. Appl. Phys.*, **41**, No. 8 (1970), 3656.
- [2] 张光寅; 《南开大学学报》(自然科学版), 1978, No. 2, 35.
- [3] H. Kogelnik *et al.*; *Appl. Opt.*, **5**, No. 10 (1966), 1550.
- [4] J. Steffen *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-8**, No. 2 (1972), 239.
- [5] J. P. Lorstcher *et al.*; *Opt. and Quant. Electr.*, **7**, No. 6 (1975), 505.
- [6] R. B. Chesler *et al.*; *J. Appl. Phys.*, **43**, No. 5 (1972), 2254.
- [7] W. Culshaw *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-10**, No. 2 (1974), 253.
- [8] R. M. Kogan *et al.*; *Appl. Opt.*, **17**, No. 6 (1978), 927.

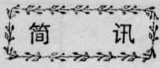
Design of solid state laser resonators for stable fundamental mode operation

Wang Tingfu Chang Chunyu Sun Hungjian Li Shichun

(No. 209 Institute, The 5th Ministry of Machine-Building)

Abstract

Matrix optics was used to obtain the equivalent cavity parameters of resonators with thick lenses. The properties of the resonators are analysed according to the thermally stable conditions, and design formulas, tables and charts of thermally stable fundamental mode operation for various kinds of solid state lasers are given.



丰富多彩的激光科技成果展览

最近, 中国科学院上海光机所举办了一个纪念建所十五周年“科技成果展览会”。该所是我国最早

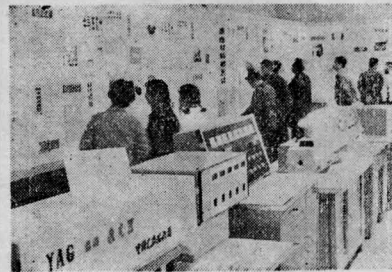
成立的一个激光专业研究所, 这个展览会具有一定的代表性, 引起了全国各地激光工作者的很大兴趣。



当走进展览大厅时, 映入人们眼帘的是丰富多彩的激光科研成果, 其中有激光器及其基础研究、激光材料和元件、单元技术、激光应用与定型样机等几个方面, 共 180 多项, 比较全面地反映了该所激光研究工作的发展过程和主要成就。这次展出以实物为

主, 辅以照片、图表和文字说明, 并且许多展品都进行了表演实验, 博得了参观者的好评。

该所的领导 and 全体人员通过这次展出, 接受上级检查, 邀请同行评议, 认真总结经验, 努力找出差距, 决心再接再厉, 为激光事业作出更大的贡献。



(杨熙承 程逸殿)