

固体激光器热不灵敏谐振腔的设计方法

彭堃焯 谢常德

(山西大学)

提 要

本文讨论了同时满足自孔径选模及热不灵敏条件的固体激光器谐振腔的设计方法。利用此法,可简便地设计出运转时对热效应不灵敏且具有与棒直径相容的极大基模体积的固体激光器。

处于基模(TEM₀₀)运转的固体激光器,由于消除了不同横向模式之间的竞争,光输出具有最小的发散及波动。因此,在对输出光束特性有一定要求的大量激光应用中,基模运转的激光器占有十分重要的地位。

但由实验及理论指出^[1],固体激光器中存在的热效应,严重地影响了输出光的横模结构及基模运转效率。

因此,要实现效率高、重复性好的基模运转激光器,必须对有害热效应进行补偿,使激光器满足下列要求:

- (1) 输出光束具有最小发散角 α ;
- (2) 激光棒中具有与棒直径相容的极大基模体积 V ;
- (3) α 及 V 对热焦距变化反应是不灵敏的。

一般来说,采用“热不灵敏腔”的方法,虽可实现第三个要求,但却不能保证其它两个要求的同时满足。把激光棒自身作为孔径,对TEM₀₀模以外的其它模式产生高衍射损耗的所谓自孔径选模方法,可提供一个与棒直径相容的极大基模体积,但对热效应不一定是不灵敏的。因此,我们把热不灵敏腔方法与自孔径选模方法结合起来,给出一组计

算公式,利用此公式可简捷地确定同时满足上述要求的一些谐振腔的有关参数。

一、热不灵敏谐振腔

光束的发散角 α 和模体积 V ,可利用高斯光束传播定律,由谐振腔镜上基模尺寸 ω_1, ω_2 推出^[2](图1):

$$\omega_3^2 = \omega_1^2 \left[\left(1 - \frac{a}{R_1} \right)^2 + \left(a \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\omega_4^2 = \omega_1^2 \left\{ \left[1 - \frac{1}{R_1} \left(a\xi + \frac{d}{n} \right) \right]^2 + \left[\frac{\left(a\xi + \frac{d}{n} \right) \lambda}{\pi \omega_1^2} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

$$V \simeq \frac{\pi d}{3} (\omega_3^2 + \omega_3 \omega_4 + \omega_4^2) \quad (3)$$

$$\xi = \left(1 - \frac{d}{nf} \right)$$

式中, d ——激光棒长; λ ——波长; R ——镜曲率; $\omega_{3,4}$ ——棒端斑点尺寸; a ——镜与棒间距。

若输出镜曲率 R_3 与 R_1 匹配,即

$$R_3 = R_1 \cdot \frac{n-1}{n},$$

收稿日期:1978年10月9日。

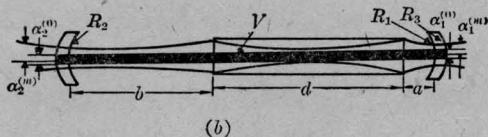
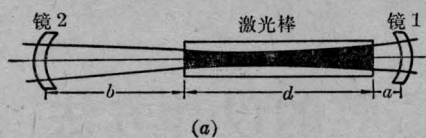


图 1

(a) 没有泵浦情况下, 谐振腔中光束的轮廓;

(b) 在泵浦情况下, 谐振腔中光束的轮廓。

V —TEM₀₀ 模体积; $R_{1,2}$ —反射镜曲率;

$R_3 \approx R_1 \frac{n-1}{n}$, $\alpha_{1,2}^{(m)}$ —由棒决定极大横模发散;

$\alpha_{1,2}^{(n)}$ —TEM₀₀ 在两个镜上发散

以使光束离开谐振腔时具有平面波前, 则发散角为

$$\alpha_1 = \frac{\lambda}{\pi \omega_1} \quad (4)$$

一般来讲, 当棒的长度相对于由输入功率所决定的热焦距可以忽略时, 可把谐振腔内热畸变的激光棒作为薄透镜处理。

在谐振腔内部具有薄透镜情况下, (3)式可简化为

$$V \approx \pi d \omega_3^2 = \pi d \omega_1^2 \left[\left(1 - \frac{a}{R_1} \right)^2 + \left(a \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right] \quad (5)$$

其等价腔有关参数为

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} - \frac{b}{f} \quad (6)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} - \frac{a}{f} \quad (7)$$

$$L = (a+b) - \frac{ab}{f} \quad (8)$$

腔镜 1 上的光斑半径为

$$\omega_1^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \left[\frac{g_2}{g_1(1-g_1g_2)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

假设光束发散角和模体积对于激光棒的平均热焦距的变化是不灵敏的, 则这种谐振腔就称为热不灵敏谐振腔^[3], 即

$$d\alpha_1/df = 0 \quad (10)$$

$$dV/df = 0 \quad (11)$$

由于内部具有薄透镜情况下, V 及 α_1 皆由 ω_1 决定, 故只要 $\frac{d\omega_1}{df} = 0$ 成立, (10)及(11)式就一定成立。

$$\begin{aligned} \text{由} \quad \frac{d\omega_1}{df} &= \frac{\partial \omega_1}{\partial g_1} \frac{\partial g_1}{\partial f} + \frac{\partial \omega_1}{\partial g_2} \frac{\partial g_2}{\partial f} \\ &+ \frac{\partial \omega_1}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial f} = 0 \end{aligned}$$

以(6)、(7)、(8)及(9)式代入上式, 则得

$$\frac{1}{g_1} = 2g_2 + \frac{1}{g_2} \left(\frac{a}{b} \right)^2 + 2 \frac{a}{b} \quad (12)$$

对于棒紧靠输出镜 1, 即 $a \approx 0$ 这一特殊情况, 上式变为:

$$g_1 g_2 = \frac{1}{2} \quad (13)$$

当输入功率足够大, 以至棒长相对于热焦距不能忽略, 即是内部具有厚透镜的情况, 当 $a \approx 0$ 时, 则有^[3]:

$$\frac{1}{g_1} = 2g_2 + \frac{d}{b \left(b + \frac{d}{n} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{n} \right)^2} \left(\frac{1}{g_2} \cdot \frac{1}{2} \frac{d}{n} + b \right) \quad (14)$$

由上述讨论看来, 在谐振腔内部具有薄透镜及厚透镜, 且 $a \approx 0$ 的情况下, 由分别满足(13)及(14)式的 g 参数所决定的谐振腔, 对热效应就一定是不灵敏的。

二、谐振腔的设计方法

由上节讨论知道, 当激光棒可近似作为薄透镜处理, 且有 $a \approx 0$ 时, 热不灵敏条件为

$$g_1 g_2 = \frac{1}{2}$$

若激光棒半径为 ω_2 , 根据自孔径选模要求, 应使镜 1 的斑点 ω_1 为

$$\omega_1 = \frac{\omega_2}{2} \quad (15)$$

结合自孔径选模要求及热不灵敏条件, 由(9)式可得:

$$\omega_1^2 = \frac{\omega_z^2}{4} = \left(\frac{\lambda L}{\pi}\right) \left[\frac{g_2}{g_1(1-g_1g_2)}\right]^{1/2}$$

$$= \frac{2g_2\lambda L}{\pi}$$

因此,

$$g_2 = \frac{\pi\omega_z^2}{8\lambda L} \quad (16)$$

$$g_1 = \frac{4\lambda L}{\pi\omega_z^2} \quad (17)$$

由(6)及(7)式知:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} - \frac{b}{f} \approx 1 - \frac{L}{R_1} - \frac{L}{f} (\because a \approx 0) \quad (18)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} - \frac{a}{f} \approx 1 - \frac{L}{R_2} \quad (19)$$

将(18)及(19)式分别代入(16)、(17)两式后得:

$$R_2 = \frac{8L^2\lambda}{8\lambda L - \pi\omega_z^2} \quad (20)$$

$$R_1 = \frac{Lf\pi\omega_z^2}{f\pi\omega_z^2 - L\pi\omega_z^2 - 4L\lambda f} \quad (21)$$

已知棒的半径 ω_z , 测出一定输入功率下激光棒的热焦距^[4], 在 R_1 、 R_2 和 L 三个参数中, 根据实际条件任意选定一个后, 即可由(20)及(21)式计算出其余两个值。这样决定的参数所确定的谐振腔, 既能满足热不灵敏条件, 又符合自孔径选模的要求。

在设计谐振腔时, 我们不仅希望对于某一平均热焦距 f 是不灵敏的, 即 $\frac{d\omega_1}{df} = 0$, 还希望在 f 值发生波动时, 斑点 ω_1 尺寸变化缓慢, 即 $\frac{d\omega_1}{df}$ 变化缓慢。同时又需要保证有一定大小的斑点尺寸。由理论及实验证明^[3],

g_2 的值取在 1 与 3 之间能较好满足上述要求。因此, 进行设计时首先在 1 与 3 之间选定某一 g_2 值, 根据(16)式确定腔长 L , 再由(20)及(21)式分别计算 R_1 与 R_2 。

在输入功率足够大时, 棒的热焦距可能较短, 此时就不能把棒作为薄透镜处理, 故应使用厚透镜的热不灵敏条件(14)式, 结合自孔径选模要求进行计算, 计算步骤与上述基本相同, 只是过程较烦而已。

设 $a \neq 0$, 处理方法也无本质不同, 只是棒端斑点尺寸 ω_3 与镜 R_1 上斑点尺寸 ω_1 不相同, 应根据(1)式计算出 ω_3 后, 再取

$$\omega_3 = \frac{\omega_z}{2}$$

以达到自孔径选模要求。

当棒半径 ω_z 给定时, 可在 1 与 3 之间选择 g_2 值以达到变化腔长的目的。虽然原则上可以用不断增加 g_2 值以获得愈来愈短的腔, 但当 g_2 之值超过 3 时, 随着 g_2 值继续增加, $\frac{d\omega}{df}$ 随 f 波动的变化亦增大了。故在实际情况中, 只能在腔长、热不灵敏性及适当 ω_1 尺寸之间作一合理的折衷。

参 考 文 献

- [1] J. D. Foster, L. M. Osterink; *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**, 3656.
- [2] H. Kogelnik; *BSTJ*, 1965, **44**, 455.
- [3] J. Steffen et al.; *IEEE J., Quant. Electr.*, 1972, **QE-8**, 237.
- [4] 《重复率和连续激光器》编写组, “重复率和连续激光器”, 上海人民出版社, 1977.