

可自适应补偿热透镜效应的固体激光谐振腔*

张光寅 宋 峰 冯 衍 许京军

(南开大学光子学中心,天津市光电子联合科学研究中心,天津 300071)

(1999 年 12 月 19 日收到,2000 年 1 月 25 日收到修改稿)

提出了一种新的固体激光器的谐振腔结构,其主要特点是,在腔内引入一较短焦距的固定透镜,并将激光介质,即焦距可变的热透镜,置于它的焦点处,组成一特殊的两透镜组.利用变换圆图解方法分析表明,该透镜组具有光学‘镇定器’的作用.利用这种谐振腔,通过自适应地轴移调节一个腔镜,可以解决较大功率固体激光器在热透镜效应大幅度变化情况下的基本光学模的动力学稳定运行,同时,保持激光介质及两端镜处的基模光斑尺寸不变.

关键词:固体激光器,热透镜,自适应补偿

PACC:4255,4260D

1 引 言

当前,大功率固体激光器的研究与发展是一个重要的课题^[1-3].尤其是激光二极管抽运的固体激光器,在大功率运行的情况下,激光器中激光介质的热透镜效应的大幅度变化不可避免地导致激光器光模的动力学不稳定性.欲使激光器在大功率下运行,必需使激光介质中包含有较大的基模光斑尺寸,但这必然导致固体激光腔的动力学稳定区的变窄^[4].为了克服这一矛盾,本文提出了一种新的固体激光器的谐振腔结构.

2 高斯光束通过特殊的透镜组的一些变换关系

为了阐明本文建议的一种新的谐振腔结构的特点,有必要先证明高斯光束通过特殊两透镜组的一些变换关系.

我们选定的特殊两透镜组为一固定焦距的透镜 F 和一焦距可变的热透镜 F_t 所组成,且后者位于前者的左焦点处,如图 1 所示.设一高斯光束的 σ 传播圆^[5]描写高斯光束某一波面特性的传播圆,它与该波面内切于光轴处,其直径等于该波面的曲率半径,与光轴相交于 S_a 和 S_b 点.按照模象理论^[6],该 σ 圆经热透镜 F_t 变换后,有一对应的‘象’ σ' 圆,

它与光轴相交于 S'_a 和 S'_b 点,它们分别满足如下的‘物象’关系:

$$\frac{1}{s'_a} = \frac{1}{s_a} - \frac{1}{f_t}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{s'_b} = \frac{1}{s_b} - \frac{1}{f_t}, \quad (2)$$

其中 s_a, s_b 和 s'_a, s'_b 分别为 S_a, S_b 和 S'_a, S'_b 点离变换透镜 F_t 的距离,以在其左方为正值; f_t 为变换透镜 F_t 的焦距.

作一与 σ 圆相切,同时切光轴于变换透镜 F_t 处的一个 t 圆.由此相切关系,不难导出 t 圆的直径为

$$b_t = \frac{2s_a s_b}{s_a - s_b}. \quad (3)$$

利用(1)(2)式不难证明^[7];象‘ σ' ’圆也必与 t 圆相切,只是随 $1/f_t$ 值的增大,象‘ σ' ’圆与 t 圆的切点 G' 将沿 t 圆顺时针方向移动.故而, t 圆有变换圆之称.

进而, σ'_1 圆再经透镜 F 的变换,可得‘象’ σ'' 圆,它与光轴的交点 S''_a 和 S''_b 决定于如下两式:

$$s''_a = \frac{f^2}{s_a}, \quad (4)$$

$$s''_b = \frac{f^2}{s_b}, \quad (5)$$

其中 s''_a, s''_b 分别为 S''_a, S''_b 离透镜 F 的右焦点的距离,以在其右方为正; f 为变换透镜 F 的焦距.

*天津市自然科学基金(批准号 99380111)及天津市光电子联合科学研究中心资助的课题.

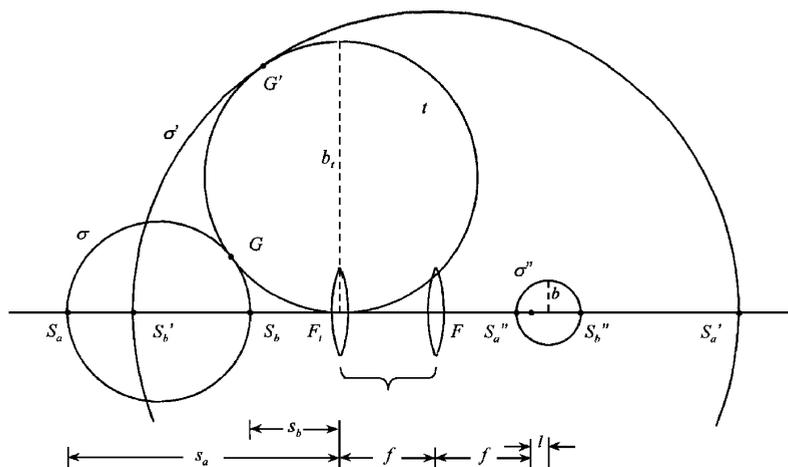


图 1 高斯光束通过特殊的透镜组的一些变换关系

利用(4)(5)式和(1)(2)式的关系,可以导出

$$bb_t = f^2, \quad (6)$$

$$l = \left(\frac{s_a + s_b}{2s_a s_b} - \frac{1}{f_t} \right) f^2, \quad (7)$$

其中

$$b = (s_b'' - s_a'')/2, \quad l = (s_a'' + s_b'')/2 \quad (8)$$

分别为 \$\sigma''\$ 圆的半径,与 \$\sigma''\$ 圆的圆心离透镜 \$F\$ 的右焦点的距离,在其右方为正.由(6)(7)式不难看出, \$\sigma\$ 圆经上述两透镜组变换后的‘象’ \$\sigma''\$ 圆的半径 \$b\$ 不因热透镜 \$f_t\$ 值的变化而变,只是随 \$f_t\$ 值的增大, \$\sigma''\$ 圆沿光轴向左平移.

由上述分析可知, \$\sigma\$ 圆经热透镜 \$F_t\$ 的变换后的 \$\sigma'\$ 圆是一与 \$t\$ 圆相切,并绕 \$t\$ 圆旋转大幅度变化的传播圆,但它再经透镜 \$F\$ 的变换后的 \$\sigma''\$ 圆,则成为一直径不变的沿光轴平移的一个传播圆,而当 \$F\$ 的焦距为较小值时,其平移量大大地变小.由此可知,这个特殊的两透镜组正起到光模的‘光学镇定器’的作用,它将一个大幅度旋转变化的 \$\sigma'\$ 圆转变为一个直径不变的沿光轴适度平移的 \$\sigma''\$ 圆.在谐振腔中引入这种光学镇定器可以为我们带来意想不到的好结果.

3 建议的谐振腔结构及其特性

利用前节所述的变换关系,提出如下的谐振腔结构.如图 2 所示,谐振腔由两个平面反射端镜 \$M_1\$ 和 \$M_2\$,与腔内包含的上述两透镜组所组成. \$M_1\$ 反射镜离热透镜 \$F\$ (即激光介质)的距离为 \$L_1\$; \$F_t\$ 与

固定透镜 \$F\$ 的距离为 \$f\$; \$M_2\$ 反射镜离 \$F\$ 的距离为 \$f + l\$, \$l\$ 由(7)式确定.在谐振腔稳定运行的条件下, \$M_1\$ 镜与 \$M_2\$ 镜处的光模的波面应与镜面重合.因而, \$M_1\$ 镜处的光模的波面可用一曲率半径为无限大的 \$\sigma_1\$ 圆来描写,也即 \$s_a = L_1, s_b = \infty\$. 利用(3), (6)和(7)式,可得到

$$b_1 = L_1, \quad (9)$$

$$b_t = 2L_1, \quad (10)$$

$$b_2 = f^2/2L_1, \quad (11)$$

$$l = \left(\frac{1}{2L_1} - \frac{1}{f_t} \right) f^2, \quad (12)$$

其中 \$b_1, b_t\$ 和 \$b_2\$ 分别为 \$M_1\$ 镜, \$F_t\$ 热透镜和 \$M_2\$ 镜处的 \$\pi_1\$ 圆, \$\pi_t\$ 圆和 \$\pi_2\$ 圆的直径 (\$\pi\$ 圆为另一种传播圆^[5]),它们切上述各镜于光轴处,并通过相关侧焦点 \$F_1\$ 与 \$F_2\$ 处的一些圆,利用它们可描述上述各处的基模光斑尺寸).

利用上面四式不难选定具体的腔参量.如取 \$L_1 = 50\$ cm, \$f = 10\$ cm, 在 \$1/f_t > 0\$ 的情况下,则有 \$l = 1\$ cm, \$L_2 = f + l = 11\$ cm, \$b_1 = L_1 = 50\$ cm, \$b_t = 2L_1 = 100\$ cm, \$b_2 = b = 1\$ cm.

利用 \$\omega_i = \sqrt{b_i \lambda / \pi}\$ (\$i = t, 1, 2\$) 的关系^[5],可得热透镜处与 \$M_1, M_2\$ 处的基模光斑尺寸为

$$\omega_t = 581 \mu\text{m}, \quad \omega_1 = 411 \mu\text{m}, \quad \omega_2 = 58.1 \mu\text{m}.$$

此时,若取激光介质的限模孔径为

$$\phi = \frac{\sqrt{2} + 1}{2} \pi \omega_t = 2.23 \text{ mm}, \quad (13)$$

就可保证激光器的基模运行.这时谐振腔的总腔长为 71 cm,因此可在较短的腔长下获得激光介质中

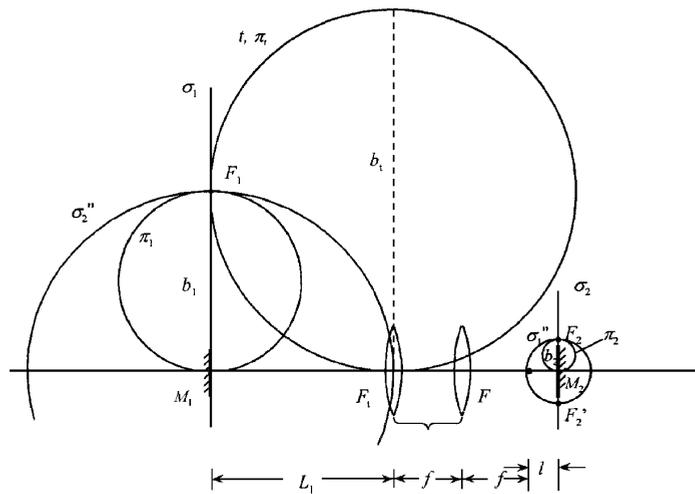


图2 建议的谐振腔结构

较大的基模光斑尺寸,因而,可有较大的功率输出。

在 $1/f_1$ 远离 0 值的情况下,若 f_1 可以预估,则我们可按预估值,按(12)式,调整 l 值,即适当左移 M_2 镜,使其 σ_2 圆能通过 σ_1'' 圆(与 $1/f_1$ 相适应的)的中顶点,即可得到 F_1 处与 M_1 镜处与前相同的基模光斑尺寸。 M_2 镜的平移调整也可用自适应的方法,通过对输出激光束的光斑尺寸的测控,自动地实验确定^[8]。

使 M_2 镜的 σ_2 圆与 σ_1'' 圆相交于后者的中顶点,实际上是构成了一种轴移稳定腔^[7]。当 F_1 值在某值附近微扰变化时,它引起 σ_1'' 圆沿光轴的微小移动。在这种轴移稳定腔中 M_2 镜处的光模的侧焦点 F_2, F_2' 几乎是不变的,因而 M_2 镜- F 透镜- F_1 热透镜处的基模光斑尺寸也都将是很少变化的。在这种情况下,谐振腔实际上处于热稳工作点运行,它的动力学稳定性是十分良好的。

在这种腔结构中不难调整激光腔的光模参量。若希望在激光介质中有更大的基模尺寸,只要适当地增大 L_1 ,并按(12)式相应地调节 l 值即可。若欲增大 M_2 镜处的光斑尺寸,只须适当地增大固定透镜的焦距值,相应地增大其与 F_1' 的间距,并按(12)

式调节 l 值即可。

L_1 值过大会使 b_2 值变得过小。在大功率运行情况下,会过分地增大 M_2 镜处的热负担。在这种情况下,可选用一定曲率半径的凹面镜 M_2' 代替平面镜 M_2 ,只要使它的 σ_2 圆仍通过 σ_1'' 圆的中顶点,即可使腔的光模参量保持不变,而使 M_2' 镜处的热负担大大地减轻。

4 结 论

总之,在腔内引入一个特殊的两透镜组,即采用一较短焦距的固定透镜并将热透镜置于其焦点处,同时适当地选择两端镜的位置。对如此构成的谐振腔,只须适当地沿光轴平移调整一腔镜 M_2 的位置,即可保证较大功率运行的固态激光器在激活介质的热焦距较大幅度变化情况下稳定地基模运行,同时,保持激光介质及两端镜处的基模光斑尺寸不变,并兼有激光介质中的较大基模光斑尺寸与较紧凑的腔结构的特点,而腔的设计十分简单,同时腔的光模参量的调整也很方便。这些综合的优良性能是常用的 V 型腔所不具有的。

[1] E. C. Honea, C. A. Ebberts, R. J. Beach, J. A. Speth, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel, S. A. Payne, *Opt. Lett.*, **23**(1998), 1203.

[2] E. C. Honea, R. J. Beach, S. C. Mitchell, P. V. Avizonis, *Opt.*

Lett., **24**(1999), 154.

[3] Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto, K. Kasahara, T. Tazime, *Opt. Lett.*, **24**(1999) 679.

[4] G. Y. Zhang, *Acta Physica Sinica* **40**(1991), 1065 (in Chinese)

- [张光寅 ,物理学报 **40**(1991) ,1065]
- [5] P. Laures ,*Appl. Opt.* **6**(1967) ,747.
- [6] H. W. Kogelnik ,*Bell Syst. Tech. J.* **44**(1965) ,455.
- [7] G. Y. Zhang ,*Chinese J. Lasers* **4**(1977) ,41(in Chinese) [张光寅 ,中国激光 **4**(1977) ,41]
- [8] Y. Gao ,W. L. Huang ,Y. L. Liu ,*Chinese J. Lasers* **26**(1999) ,205(in Chinese) [高 颖、黄维玲、刘耀兰 ,中国激光 ,**26**(1999) ,205]

A SOLID STATE LASER RESONATOR CAPABLE OF COMPENSATING THERMAL LENS EFFECT ADAPTIVELY*

ZHANG GUANG-YIN SONG FENG FENG YAN XU JING-JUN

(Photonics Center ,Nankai University ;Tianjin United Scientific Research Center on Opto-electronics ,Tianjin 300071 ,China)

(Received 19 December 1999 ; revised manuscript received 25 January 2000)

ABSTRACT

A novel resonator structure for solid state laser is proposed. A lens with short focal length is introduced in the resonator , and the laser crystal (thermal lens) is put at its focusing point , so a special lens set is composed . By using the transform circle approach it is found that the lens set functions as an optical ' ballast ' . With adjusting one end mirror along optical axis adaptively such a resonator may guarantee TEM₀₀ mode dynamic stable operation of high - power solid state laser while thermal focal length varies within a wide range. While the beam spots of TEM₀₀ mode at the laser crystal and end mirrors keep unchangeable.

Keywords : solid state laser resonator , thermal lens , adaptive compensation

PACC : 4255 , 4260D

* Project supported by the Natural Science Foundation of Tianjin ,China (Grant No. 99380111) ,and by the Tianjin United Scientific Research Center on Opto-electronics.