

# 激光棒位置对热不灵敏凹凸腔 运转特性的影响\*

翟华金

(中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学联合开放实验室, 上海 201800)

李宝其 陈 聪

(武汉大学物理系, 武汉 430072)

**摘 要** 以典型商用凹凸谐振腔为例, 系统地分析了激光棒位置对热不灵敏腔运转特性的影响, 对有关结果进行了讨论.

**关键词** 热不灵敏腔, 热透镜效应, 激光棒位置.

## 1 引 言

热不灵敏激光谐振腔是为克服固体激光器中激光棒固有的热透镜效应对激光腔运转特性的严重影响而推出的<sup>[1,2]</sup>. 国内外关于热不灵敏腔的最新研究工作<sup>[3~5]</sup>已注意到激光棒位置对激光器运转特性的影响, 激光棒位置的最佳选择将有可能显著改进激光器的运转特性; 本工作以典型商用凹凸腔为例对此进行了系统的理论分析, 其结果将对给定腔型下激光腔的优化设计及其改装提供重要参考.

## 2 热不灵敏腔

大量实验结果表明, 固体激光棒的热效应可归结为热透镜效应, 其热焦距  $f$  与泵浦电功率  $P_m$  之间满足经验关系式

$$1/f = \alpha P_m^\beta, \quad (1)$$

式中  $\alpha$  与激光棒的材料、径向尺寸等有关;  $\beta \sim 1$ , 与激光棒材料有关, 对 Nd:YAG 棒,  $\beta$  稍大于 1, 而对钕玻璃棒,  $\beta$  稍小于 1. 在一级近似下, 由于热透镜的主面位置

$$h = d/2n_0 \quad (2)$$

是与泵浦功率无关的常数 ( $h$  为热透镜主面到激光棒相应端面的距离,  $d$  为棒长,  $n_0$  为棒中心的折射率), 同时激光棒长度远小于激光腔腔长, 故若从主面起计算激光棒到相应各光学元

\* 本课题得到国家自然科学基金资助.

收稿日期: 1993年11月4日; 收到修改稿日期: 1993年12月23日

件的距离, 可将热透镜等效为焦距为  $f$  的薄透镜, 含薄透镜激光腔的腔长  $L$  由下式给出:

$$L = L_1 + L_2, \quad (3)$$

式中  $L_1$ 、 $L_2$  为激光棒相应主面到腔镜  $M_1$  (输出窗, 半径为  $a_1$ , 曲率半径为  $R_1$ )、 $M_2$  (全反镜, 半径为  $a_2$ , 曲率半径为  $R_2$ ) 的距离.

Kogelnik<sup>[6]</sup> 给出了含薄透镜激光谐振腔的等效腔分析, 该等效方法是通过引入形式上的等效腔长  $L'$  和等效  $G$  参数  $G'_1$ 、 $G'_2$

$$\left. \begin{aligned} L' &= L_1 + L_2 - L_1 L_2 / f, \\ G'_1 &= (a_1 / a_2) (1 - L_2 / f - L' / R_1) \equiv (a_1 / a_2) g'_1, \\ G'_2 &= (a_2 / a_1) (1 - L_1 / f - L' / R_2) \equiv (a_2 / a_1) g'_2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

以使含薄透镜的谐振腔“遵循”简单空腔的有关公式(例如稳定性条件、光斑尺寸等), 从而实现含薄透镜的激光腔到简单空腔的等效. 正是这一形式上的等效, 为后来的理论工作和实验工作提供了极大方便, 使人们得以避开众多参数和复杂的等效过程, 用几乎纯数学的方式去分析问题和设计实验, 而结果却没有背离原来的物理系统.

Magni<sup>[2]</sup> 为分析问题的简化和方便, 引入下列辅助性腔参量

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L_1 (1 - L_1 / R_1), \\ u_2 &= L_2 (1 - L_2 / R_2), \\ x &= 1/f - 1/L_1 - 1/L_2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

则(4)式可改写为

$$\left. \begin{aligned} L' &= -L_1 L_2 x, \\ g'_1 &= - (L_2 / L_1) (1 + x u_1), \\ g'_2 &= - (L_1 / L_2) (1 + x u_2). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由于热透镜等效于焦距随泵浦功率而变化的动态薄透镜, 故随着泵浦功率的变化, 激光腔的工作点在  $g'_1 - g'_2$  平面上不再上一个固定点, 由(6)式后二式消去  $x$  得

$$g'_2 = (L_1 / L_2)^2 (u_2 / u_1) g'_1 + (L_1 / L_2) (u_2 / u_1 - 1), \quad (7)$$

也就是说工作点将在  $g'_1 - g'_2$  平面上沿直线运动, 由此决定了含热透镜激光腔理论上将存在两个稳定工作区, I 区和 II 区, 如图 1. 稳定区的定义为<sup>[2]</sup>: 满足激光腔稳定性条件, 并且满足  $|x u_1|, |x u_2| < 1$  的区域称为 I 区; II 区与此相应确定.

激光泵浦功率的起伏将引起热焦距(从而引起  $L'$ ,  $g'_1$ ,  $g'_2$ ) 的起伏, 这将影响激光腔的输出功率和输出光束重量的稳定性, 为克服这一问题, 人们从不同的角度提出了不同的设计, 其中 Lörtscher 等<sup>[1]</sup> 和 Magni<sup>[2]</sup> 从热透镜主面光斑半径  $\omega_s$  的极值条件

$$d\omega_s / df = 0 \quad (8)$$

出发进行腔设计, 这就是目前研究最广泛、实用上也普遍采用的热不灵敏腔, 热不灵敏腔保证了激光棒的模体积(从而输出功率)对于泵浦功率起伏的稳定性.

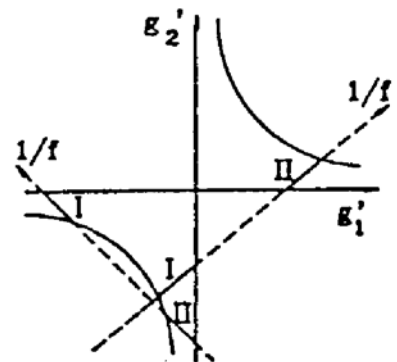


Fig. 1 Stability diagram in the  $(g'_1 - g'_2)$  plane. The stability zones are evidenced by solid lines

### 3 激光棒位置对热不灵敏腔运转特性的影响

利用激光腔的稳定性条件

$$0 \leq g'_1 g'_2 \leq 1, \quad (9)$$

注意到  $g'_1$ 、 $g'_2$  均为热焦距  $f$ 、激光棒位置  $L_1$  的函数, 易将激光腔稳定区边界 ( $g'_1 g'_2 = 0$  和  $g'_1 g'_2 = 1$ ) 写成  $f$  关于  $L_1$  的显式为:

$$1/f = \begin{cases} 1/(L - L_1) + 1/(L_1 - R_1), & g'_1 = 0, \\ 1/L_1 + 1/(L - L_1 - R_2), & g'_2 = 0, \\ 1/L_1 + 1/(L - L_1), & g'_1 g'_2 = 1, \\ 1/(L_1 - R_1) + 1/(L - L_1 - R_2), & g'_1 g'_2 = 1. \end{cases} \quad (10)$$

含热透镜激光腔腔镜上的光斑半径  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  可表述为  $g'$  参数的函数, 再利用高斯光束传输定理可得激光棒主面上光斑半径  $\omega_3$ , 表述式分别为

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= \frac{\lambda |L'|}{\pi} \left[ \frac{g'_2}{g'_1(1 - g'_1 g'_2)} \right]^{1/2}, \\ \omega_2^2 &= \frac{\lambda |L'|}{\pi} \left[ \frac{g'_1}{g'_2(1 - g'_1 g'_2)} \right]^{1/2}, \\ \omega_3^2 &= \frac{\lambda |2xu_1u_2 + u_1 + u_2|}{\pi [g'_1 g'_2(1 - g'_1 g'_2)]^{1/2}}, \end{aligned} \quad (11)$$

以  $\omega_3$  代入(8)式则热不灵敏条件可写为:

$$g'_1 g'_2 \equiv (g'_1 g'_2)_0 = \begin{cases} (1 - u_2/u_1)/2, & |u_1| > |u_2|, \\ (1 - u_1/u_2)/2, & |u_2| > |u_1|. \end{cases} \quad (12)$$

可见, 热不灵敏腔  $g'$  参数之积(式中零脚标表征热不灵敏状态)仅为  $L_1$  的函数, 由于  $g'$  参数之积可以一定程度地反映激光腔的失调特性<sup>[3]</sup>, 故(12)式实际上在一定程度上描述了激光棒位置对热不灵敏腔失调特性的影响.

注意到(12)式左端是  $f$ 、 $L_1$  的函数, 右端仅为  $L_1$  的函数, 故若记(12)式右端为  $p$ , 易得热不灵敏工作点  $(1/f)_0$  作为  $L_1$  的函数的表达式为

$$(1/f)_{0\pm} = \frac{-(u_1 + u_2) \pm \sqrt{(u_1 + u_2)^2 - 4u_1u_2(1 - p)}}{2u_1u_2} + \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L - L_1}, \quad (13)$$

对任一  $L_1$  值, 理论上存在两个热不灵敏工作点, 它们对应于图 1 中不同的稳定区.

含热透镜激光腔的光斑尺寸  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  的表达式由(11)式给出, 注意到在热不灵敏条件下,  $L'$ 、 $g'_1$ 、 $g'_2$ 、 $x$  均为  $(1/f)_0$ 、 $L_1$  的函数,  $u_1$ 、 $u_2$  为  $L_1$  的函数, 于是可给出热不灵敏腔的光斑尺寸  $\omega_{10}$ 、 $\omega_{20}$ 、 $\omega_{30}$  随  $L_1$ 、 $(1/f)_0$  的变化关系:

$$\begin{aligned} \omega_{10\pm}^2 &= \frac{\lambda |L'_{0\pm}|}{\pi} \left\{ \frac{g'_{20\pm}}{g'_{10\pm}[1 - (g'_1 g'_2)_0]} \right\}^{1/2}, \\ \omega_{20\pm}^2 &= \frac{\lambda |L'_{0\pm}|}{\pi} \left\{ \frac{g'_{10\pm}}{g'_{20\pm}[1 - (g'_1 g'_2)_0]} \right\}^{1/2}, \\ \omega_{30\pm}^2 &= \omega_{30}^2 = (2\lambda/\pi) \max(|u_1|, |u_2|). \end{aligned} \quad (14)$$

式中零脚标表征热不灵敏状态; “±”表征不同的稳定区, 与(13)式相对应.

方程式(10)、(13)、(12)、(14)描述了激光棒位置对热不灵敏腔的主要运转参数的影响.

#### 4 数值结果及讨论

利用(10)、(13)、(12)、(14)式, 选用典型商用凹凸腔参数  $R_1 = -120 \text{ cm}$ ,  $R_2 = 100 \text{ cm}$ ,  $L = L_1 + L_2 = 137 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 1.32 \mu\text{m}$ , 进行数值计算, 结果如图 2(a)~(c)所示. 由此可以看出:

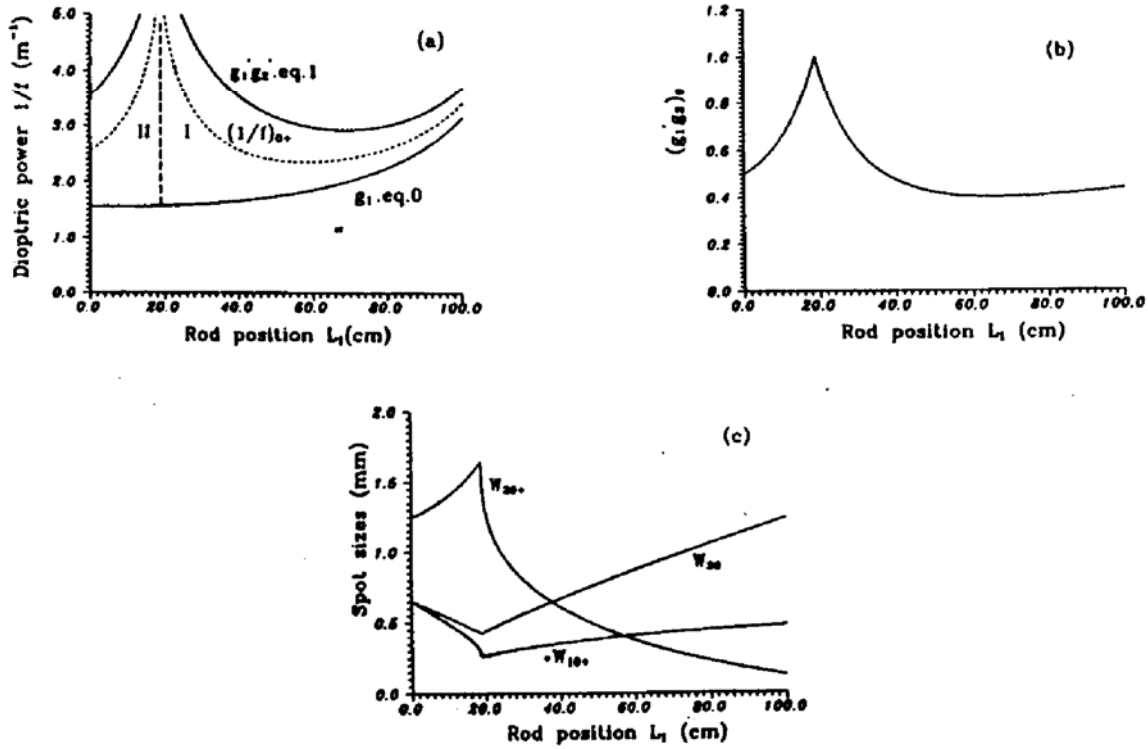


Fig. 2 Influence of rod position on a thermal insensitive resonator with parameters  $R_1 = -120 \text{ cm}$ ,  $R_2 = 100 \text{ cm}$ ,  $L = L_1 + L_2 = 137 \text{ cm}$  and  $\lambda = 1.32 \mu\text{m}$ .

(a) boundaries of stability zones and thermal insensitive points  $(1/f)_0$  vs  $L_1$ , (b)  $(g_1 g_2)_0$  vs  $L_1$ , (c) spot sizes vs  $L_1$

1) 对任一激光棒位置  $L_1$ , 在泵浦功率允许的范围(设定为  $f = \infty \sim 20 \text{ cm}$ , 这是一个较宽的范围)内, 凹凸腔只出现一个稳定区, 且  $|u_1| < |u_2|$  (即  $L_1 < 20 \text{ cm}$ ) 时为 II 区,  $|u_1| > |u_2|$  为 I 区; 稳定区的阈值、截止值、稳定区宽度等均随  $L_1$  改变而改变.

2) 随着  $L_1$  的变化, 热不灵敏工作点  $(1/f)_0$  亦将发生变化, 且一般情况下热不灵敏工作点并不位于稳定区的中心. 注意到  $P_{\text{out}}-P_{\text{in}}$  曲线的峰值满足  $dP_{\text{out}}/dP_{\text{in}} = 0$ , 而  $P_{\text{out}} \propto \omega_3^2$ ,  $P_{\text{in}} \propto 1/f$ , 故  $dP_{\text{out}}/dP_{\text{in}} = 0$  近似地与  $d\omega_3/df = 0$  相等价, 也就是说  $P_{\text{out}}-P_{\text{in}}$  曲线的峰值实际上在热不灵敏工作点附近. 因此, 凹凸腔的输入输出特性曲线将具有非对称结构, 并且, 随着激光棒位置  $L_1$  的改变, 这种非对称性亦有改变.

3)  $(g_1 g_2)_0$  随着  $L_1$  的变化而变化, 这意味着热不灵敏腔的失调特性随激光棒位置的变化而变化. 有趣的是,  $(g_1 g_2)_0$  随  $L_1$  的变化在 I 区较为平缓, 在 II 区则急剧得多, 这从一个新的角度反映出 I 区具有比 II 区更好的失调稳定性.

4) 热不灵敏腔中激光棒存在着一个最佳位置, 这已由文献[4, 5]的实验结果所证实.

由上述分析可知,最佳  $L_1$  值的存在是下列因素共同作用的结果:随  $L_1$  的变化,热不灵敏工作点  $(1/f)_0$  发生变化,如图 2(a)所示,它决定激励能源的大小;  $L_1$  的变化引起最佳模体积( $\propto \omega_{30}^3$ )的变化,如图 2(c),它决定激光棒的有效增益系数及激光棒套管引起的损耗;激光腔腔镜上热不灵敏光斑尺寸  $\omega_{10}$ 、 $\omega_{20}$  随  $L_1$  变化,如图 2(c),它决定了腔镜的衍射损耗. 上述诸种增益、损耗因素及其对比关系随  $L_1$  而表现出复杂的变化,它们之间的最佳平衡决定了激光棒的最佳位置和激光腔的最大输出功率.

**结束语** 对给定的商用腔型,为获得最大的稳定激光输出,必须同时选择最佳的激光棒位置. 若需对现有的激光器在允许的范围内进行改装,例如更新泵浦灯以获得更高的输出功率,必须在增大泵浦功率的同时适当改变激光棒位置,使激光腔在新的泵浦条件下仍工作于热不灵敏状态;又如,将激光器改换到新的工作波长(例如 Nd:YAG 激光器从  $1.06 \mu\text{m}$  到  $1.32 \mu\text{m}$ ),此时各光斑尺寸将发生变化,为获得新工作波长上增益、损耗之间新的最佳平衡,必须适当调整激光棒的位置,并调整热不灵敏工作点,才能获得最大功率的稳定激光输出. 在上述方面,本工作将具有重要指导意义.

作者与答孝义、刘邦群老师进行了有益讨论,特此致谢.

### 参 考 文 献

- [1] J. P. Lörtscher *et al.*, Dynamic stable resonators; a design procedure. *Opt. & Quant. Electron.*, 1975, 7: 505~514
- [2] V. Magni, Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability. *Appl. Opt.*, 1986, 25(1): 107~117
- [3] 李世忱等, 低热敏激光腔理论与实验. *物理学报*, 1989, 38(4): 567~572
- [4] S. De Silvestri *et al.*, The role of the rod position in single-mode solid state laser resonators; optimization of a cw mode-locked Nd:YAG laser. *Opt. Commun.*, 1986, 57(5): 339~344
- [5] S. De Silvestri *et al.*, Novel stability diagrams for continuous-wave solid-state laser resonators. *Opt. Lett.*, 1986, 11(8): 513~515
- [6] H. Kogelnik, Imaging of optical modes-resonators with internal lenses. *Bell Syst. Tech. J.*, 1965, 44: 455~494

## Influence of Laser Rod Position on a Thermal Insensitive Convex-Concave Resonator

Zhai Huajin

(Joint Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Li Baoqi      Chen Cong

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

(Received 4 November 1993; revised 23 December 1993)

**Abstract** We present in this paper results of a theoretical study on influence of laser rod position on the operation of a thermal insensitive solid state laser resonator. Discussion following the results shows the importance of this study in optimization and reconstruction of a thermal insensitive solid state laser resonator.

**Key words** thermal insensitive resonator, thermal lensing effect, rod position.