

# 内含热薄透镜 CW 色心激光腔的 振荡光束特性

林 碧 洲

(材料物理化学研究所)

**摘要** 运用像镜原理分析三镜折迭腔、四镜折迭腔和四镜8字型环形腔等光学谐振腔的振荡光束特性及其热行为. 讨论热效应对谐振腔振荡光束特性的影响规律以及像镜分析方法的精确性, 给出谐振腔的热不灵敏条件.

**关键词** 光学谐振腔, 光束特性, 热效应, 等效像镜腔, 分析方法

## 0 引言

色心激光是一种新型的可调谐固体激光, 具有许多优异特性和良好的发展前景<sup>[1]</sup>. 三镜折迭腔、四镜 X-型折迭腔(下称 X-腔)、四镜8字型环形腔(下称环形腔)是色心激光器经常采用的光学谐振腔<sup>[2-5]</sup>. 文献[6, 7, 8]已对它们的空腔光束特性作了分析和讨论, 指出了它们腔内均具有较小的束腰半径, 能较好地满足色心激光运行的需要. 然而, 实际应用中除需要了解谐振腔振荡模参数与几何参数的关系外, 往往还需要了解泵浦产生的热效应对谐振腔振荡模参数的影响规律. 本文采用热薄透镜模型对热效应的影响进行了分析和讨论. 所得的结果对谐振腔的最佳设计和正确调整具有重要意义.

## 1 色心激光腔的等效像镜腔

利用像镜原理可以简化多元件光学谐振腔复杂的分析推导过程<sup>[9]</sup>. 其物理实质就是将端镜通过透镜成像构成与原来多元件腔等效的像镜腔进行分析. 不考虑像散, 三镜折迭腔(图1a)可等效展成如图1b所示的直线腔. 其中, 薄透镜焦距为对应折迭镜曲率半径的一半( $f = \frac{R}{2}$ ),

• 1992-10-15收到.

$f$  为热薄透镜的等效焦距. 利用像镜原理, 即将  $M_2$  对透镜  $f$  成像于  $M_2'$ , 构成如图 1c 所示的像镜腔. 其中, 像镜  $M_2'$  的曲率半径  $R_2'$  和位置  $l_2'$  (以透镜  $f$  为参考) 为

$$R_2' = f^2 R_2 / (l_2 - f)(l_2 - R_2 - f), \quad (1)$$

$$l_2' = fl_2 / (l_2 - f). \quad (2)$$

事实上, 光线经透镜  $f$  入射到反射镜  $M_2$  后返回所经历的变换与光线直接入射到像镜  $M_2'$  的变换相同. 即

$$\begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2'} & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

可见, 像镜法不仅使多元件腔的分析简化, 同时还保持有光线传输矩阵法的高精确性. 对内含热薄透镜谐振腔, 再次将  $M_2$  对  $f$  成像, 即可得如图 1d 所示的等效像镜腔.

类似地, 也可得 X-腔、环形腔的等效像镜腔(图 2, 3). 其中, 图 3 已考虑到环形腔结构的对称特点<sup>(7)</sup>, 将谐振腔从两空腔光腰处切开而用一驻波腔等效代替之, 驻波腔的往返矩阵与环形腔的环绕矩阵相同.

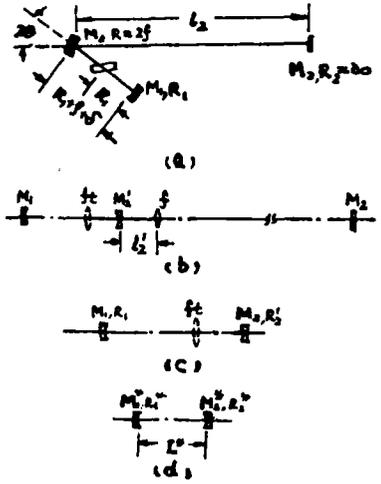


图1 三镜折迭腔

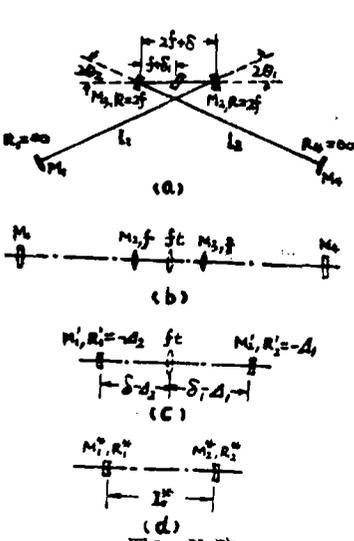


图2 X-腔

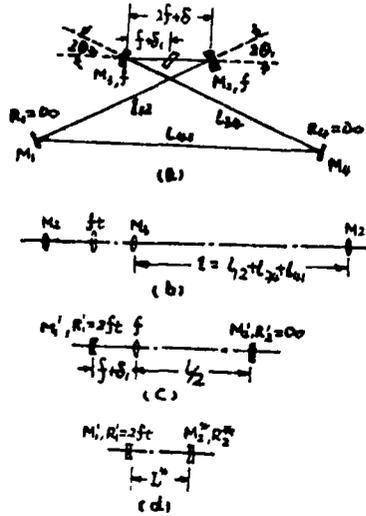


图3 四镜环形腔

表1给出了这三种等效像镜腔的结构参数(腔镜曲率半径  $R_1^*$ 、 $R_2^*$ , 腔长  $L^*$ ,  $g$ -参数).

表1 色心激光腔等效像镜腔的结构参数

谐振腔	$R_1^*, R_2^*, L^*$	$g$ -参数	备注
三镜折迭腔	$R_1^* = R_1$ $R_2^* = -f_i^2 \delta_m / (f_i - \delta)(f_i + \delta_m - \delta)$ $L^* = R_1 - f_i(\delta_m - \delta) / (f_i + \delta_m - \delta)$	$g_1 = \frac{f_i(\delta_m - \delta)}{(f_i + \delta_m - \delta)R_1}$ $g_2 = \frac{(f_i + \delta_m - \delta)[(R_1 + \delta)f_i - R_1\delta]}{f_i^2 \delta_m}$	$\delta_m = f^2 / (l_2 - f)$
X-腔	$R_1^* = -\Delta_2$ $R_2^* = -f_i^2 \Delta_1 / (f_i - \delta_1)(f_i + \Delta_1 - \delta_1)$ $L^* = \delta_1 - \Delta_2 - f_i(\Delta_1 - \delta_1) / (f_i + \Delta_1 - \delta_1)$	$g_1 = \frac{(2\delta_1 - \Delta_1)f_i + (\Delta_1 - \delta_1)\delta_1}{(f_i + \Delta_1 - \delta_1)\Delta_2}$ $g_2 = \frac{(f_i + \Delta_1 - \delta_1)}{f_i^2 \Delta_1} [(2\delta_1 - \Delta_2)f_2 + (\Delta_2 - \delta_1)\delta_1]$	$\Delta_1 = f^2 / (l_2 - f)$ $\Delta_2 = f^2 / (l_1 - f)$ $\delta_1 = \frac{\delta}{2}$
四镜环形腔	$R_1^* = 2f_i$ $R_2^* = -\Delta$ $L^* = \delta_1 - \Delta$	$g_1 = (2f_i + \Delta - \delta_1) / 2f_i$ $g_2 = \frac{\delta_1}{\Delta}$	$\Delta = 2f^2 / (l - 2f)$ $\delta_1 = \frac{\delta}{2}$

## 2 含热薄透镜色心激光腔的光束特性

### 2.1 稳定区

由稳定性判据  $0 < g_1 g_2 < 1$ , 可得谐振腔空腔(即  $f_i \rightarrow \infty$ )稳定性区域内调整量  $\delta$  的取值范围

$$0 < \delta < \delta_m \quad (\text{三镜折迭腔}), \tag{4}$$

$$0 < \delta < \Delta_1 \quad (\text{X-腔}), \tag{5}$$

$$0 < \delta < 2\Delta \quad (\text{环形腔}). \tag{6}$$

由于热扰动的等效热透镜焦距一般较长, 即  $f_i \gg \delta_m, \Delta_1, \Delta$  等. 可以证明, 热扰动对谐振腔稳定性区域范围的影响可以忽略.

### 2.2 束腰情况

利用二镜腔共焦参量( $Z_i$ )和束腰位置( $L_{oi}$ )的结果

$$Z_i^2 \equiv \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2 = \frac{L^2 g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2}, \tag{7}$$

$$L_{oi} = \frac{L g_2 (1 - g_1)}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2} \quad (\text{以镜 } M_1 \text{ 为参考}), \tag{8}$$

可以简便地导出谐振腔基模束腰参数与谐振腔几何结构参数、热透镜等效焦距的解析关系. 其三镜折迭腔

$$Z_3^2 = \frac{f_i^2 (\delta_m - \delta) [(R_1 + \delta)f_i - R_1\delta] [(R_1 + \delta - \delta_m)\delta f_i + R_1(\delta_m - \delta)\delta]}{\{(2\delta + R_1 - \delta_m)f_i^2 + [2(\delta_m - \delta)(\delta + R_1) - R_1\delta_m]f_i - R_1\delta(\delta_m - \delta)\}^2}, \tag{9}$$

$$L_{o3} = \frac{(\delta_m - \delta)\delta f_i^2}{(2\delta + R_1 - \delta_m)f_i^2 + [2(\delta_m - \delta)(\delta + R_1) - R_1\delta_m]f_i - R_1\delta(\delta_m - \delta)}. \tag{10}$$

四镜 X-腔

$$Z_i^2 = [(\Delta_1 + \Delta_2 - 2\delta_1)f_i - (\Delta_1 - \delta_1)(\Delta_2 - \delta_2)][(2\delta_1 - \Delta_1)f_i + (\Delta_1 - \delta_1)\delta_1][2\delta_1 - \Delta_2]f_i + (\Delta_2 - \delta_1)\delta_1][2f_i - \delta_1)\delta_1 / [(4\delta_1 - \Delta_1 - \Delta_2)f_i^2 - (\Delta_1\Delta_2 - 4\Delta_1\delta_1 - 2\Delta_2\delta_1 + 6\delta_1^2)]f_i + (\Delta_1\Delta_2\delta_1 - 2\Delta_1\delta_1^2 - \Delta_2\delta_1^2 + 2\delta_1^3)]^2, \quad (11)$$

$$L_{04} = [(2\delta_1 - \Delta_1)f_i + (\Delta_1 - \delta_1)\delta_1][2f_i - \delta_1)\delta_1 / [(4\delta_1 - \Delta_1 - \Delta_2)f_i^2 - (\Delta_1\Delta_2 - 4\Delta_2\delta_1 - 2\Delta_2\delta_1 + 6\delta_1^2)]f_i + (\Delta_1\Delta_2\delta_1 - 2\Delta_1\delta_1^2 - \Delta_2\delta_1^2 + 2\delta_1^3)]. \quad (12)$$

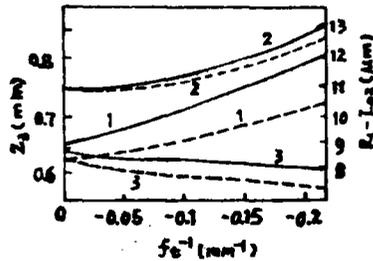
四镜8字型环形腔

$$Z_8^2 = \frac{(2f_i + \Delta - \delta_1)[2(\Delta - \delta_1)f_i - (\Delta - \delta_1)\delta_1]\delta_1}{(2f_i + \Delta - 2\delta_1)^2}, \quad (13)$$

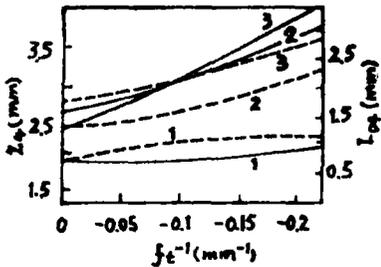
$$L_{08} = \frac{(\Delta - \delta_1)\delta_1}{2f_i + \Delta - 2\delta_1}. \quad (14)$$

令  $f_i \rightarrow \infty$ , 即可得空腔束腰特性, 结果同文[6, 7, 8].

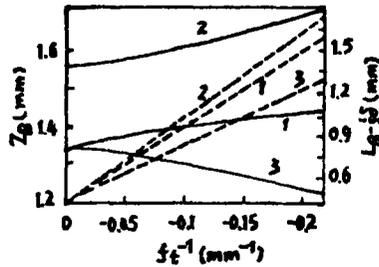
图4给出了不同调整量  $\delta$  下束腰参数随热效应变化的关系曲线. 其中, 稳定区大小  $S \equiv \delta_{\max} - \delta_{\min}$ . 有关几何参数选择如下: 三镜折迭腔  $f = 37.5\text{mm}$ ,  $R_1 = 50\text{mm}$ ,  $l_2 = 1000\text{mm}$ ,  $\delta_m = 1.5\text{mm}$ ; X-腔  $f = 37.5\text{mm}$ ,  $l_1 = 270\text{mm}$ ,  $l_2 = 300\text{mm}$ ,  $\Delta_1 = 5.4\text{mm}$ ,  $\Delta_2 = 6.0\text{mm}$ ; 环形腔  $f = 37.5\text{mm}$ ,  $l_{12} = 270\text{mm}$ ,  $l_{34} = 300\text{mm}$ ,  $l_{41} = 410\text{mm}$ ,  $\Delta = 3.1\text{mm}$ .



(a) 三镜折迭腔



(b) X-腔



(c) 环形腔

图4 束腰参数随热效应的变化情况 (1:  $\delta = \frac{1}{4}S$ , 2:  $\delta = \frac{1}{2}S$ , 3:  $\delta = \frac{3}{4}S$ )

—  $Z_i - f_i^{-1}$  关系曲线; ---  $L_{0i} - f_i^{-1}$  关系曲线

从图中可以看出,热效应对束腰大小和束腰位置的影响的单调性是相似的.当热效应对束腰位置的影响大时,其对束腰大小的影响亦大;相反,当其对束腰位置的影响小时,对束腰大小的影响亦小.其中,三镜折迭腔、四镜环形腔不同调整量下热效应的影响程度依次为  $\frac{S}{4} > \frac{S}{2} > \frac{3}{4}S$  ( $f_i < 0$ 时), 而 X-腔则为  $\frac{S}{2} > \frac{3}{4}S > \frac{1}{4}S$ .

### 2.3 热不灵敏条件

热效应影响了谐振腔的基本特性. 实际应用中要求激光输出特性不随热焦距变化而有明显变化. 谐振腔的热不灵敏条件可由  $g_1 g_2 = \frac{1}{2}$  近似给出. 图5示出了热不灵敏条件下三种色心激光腔  $P$  与  $D$  的关系曲线. 其中,  $P$ 、 $D$  定义为

$$P = \frac{S}{f_i}, \quad (15)$$

$$D = \frac{\delta}{S}, \quad (16)$$

$S$  为稳定区大小. 图中还利用了  $\delta_1 \ll R_1$  (三镜折迭腔) 和  $\Delta_1 \approx \Delta_2$  (X-腔) 的近似条件.

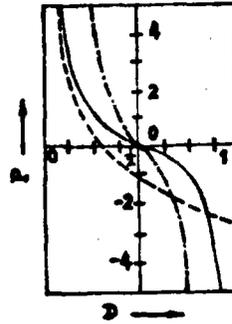


图5 热不灵敏条件下的  $P \sim D$  关系曲线  
 —— 三镜折迭腔,  
 ---- 四镜 X-腔,  
 - · - 四镜环形腔

## 3 讨论

(1) 严格而言, 由于像散的存在, 上述结果分别在子午平面和弧矢平面内成立. 然而, 实际应用中由于折迭角不大, 同时又有布儒斯特角放置的色心晶体的像散自补偿<sup>(7)</sup>, 像散的影响可以忽略.

(2) 注意到在稳定条件式(4)~(6)下, 谐振腔像镜腔等效过程中(图1~3), 腔长出现了负值. 此时, “腔长”已失去了原来意义上长度的概念, 仅表示等效腔中像镜与相应元件的相对位置, 负值意味着像镜与实镜在相应透镜的同侧. 由1节分析知, 像镜法保持有光线传输矩阵法的高精确性. 分析中不考虑其符号正负进行处理, 其结果的正确性得到了光线传输矩阵法的验证.

(3) 由图5和文献[6, 7, 8]结果可知, 在低热扰动  $P \sim 0$  下, 为减小热效应的影响, 三镜折迭腔、四镜环形腔的调整量  $D$  应选择 在 0.5 左右, 此时谐振腔对腔长、调整量的稳定性亦较佳, 而 X-腔则在 0.3 附近具有较佳的抗热扰性, 在 0.8 左右具有较好的腔长稳定性, 实际应用可在 0.3~0.8 间选择工作点.

## 4 结束语

这三种光学谐振腔内均具有较小的束腰 ( $\omega_0 \sim 30 \mu\text{m}$ ), 能较好地满足色心激光运行的需要, 其热效应的影响可以通过选择适当的结构参数加以减缓或消除. 在三种谐振腔中, 环形腔

的单模转换效率高、线宽窄,更能体现出出色心激光的特点,适用于高分辨率光谱分析、超短脉冲等研究;而三镜折迭腔、X-腔则具有光-光转换效率高、操作简便等优点,适用于大功率而对线宽要求不太严格的场合(如生物光敏效应研究等)。

工作 得到许承晃副教授的支持与指导,在此谨致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] Pollock, C.R. et al., *Appl. Phys.*, B48,2(1989),287.
- [2] Mollenauer, L.F. et al., *J. Appl. Phys.*, 47,7(1975),3109.
- [3] German, K.R., *J. Opt. Soc. Am. B*,3,1(1986),149.
- [4] Giberson, K.W. et al., *Appl. Opt.*, 21,2(1982),172.
- [5] 黄妙良等, *激光技术*, 16, 3(1992),151.
- [6] Kogelnik, H. W. et al., *IEEE J. Q. E.*, QE-8,3(1972),373.
- [7] 林碧洲等, *激光杂志*, 13,2(1992),81.
- [8] 张国轩等, *中国激光*, 12,6(1985),366.
- [9] Kogelnik, H., *BSTJ*, 44,3(1965),455.

## The Characteristics of Oscillatory Beam from CW Color Center Laser Resonator with Internally Thermal Thin Lenses

Lin Bizhou

(*Institute of Material Physical Chemistry*)

**Abstract** Based on image-mirror principle, the author analyzes the characteristics of oscillatory laser beam from resonators commonly used in color center laser and their behaviour under hot. These resonators include 3-mirror folded cavity, 4-mirror X-cavity and 4-mirror 8-shaped ring cavity. The influence of thermal effect on the oscillatory laser beam is discussed with emphasis on its regular pattern; and the conditions of insensitive to thermal lens are given. The precision of image-mirror analytical method is also discussed. These results are helpful to the design and applications of resonators.

**Key words** optical resonator, laser beam, thermal effect, image-mirror equivalent, analytical method