

共焦型激光谐振腔

金德运

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文分析了一种特殊类型激光腔—— G_1, G_2 恒为零的共焦腔的动态振荡特性,指出随着激光腔直线运动方程的取向不同,这种腔分别具有高斯驻波腔、临界腔及点光束行波腔的振荡特性,讨论了如何合理选择腔参数,最后从实验上得到预期结果。

—

文献[1]从理论上详尽地分析了激光谐振腔的振荡特性,讨论了高斯驻波腔、临界腔与点光束行波腔的区别及联系。对于一个含有类透镜介质激光腔,表征其振荡特性的往返矩阵 $\mathcal{A}_{往返}$ 为^[1]:

$$\mathcal{A}_{往返} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4G_1G_2 - 2A_0G_2 - 1 & 2B_0G_2 \\ \frac{2A_0}{B_0} \left(2G_1G_2 - A_0G_2 - \frac{G_1}{A_0} \right) & 2A_0G_2 - 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 $G_1 = A_0 - B_0/R_1$, $G_2 = D_0 - B_0/R_2$, $A_0 = 1 - b/f_T$, $B_0 = a + b - ab/f_T$, $D_0 = 1 - a/f_T$ 。

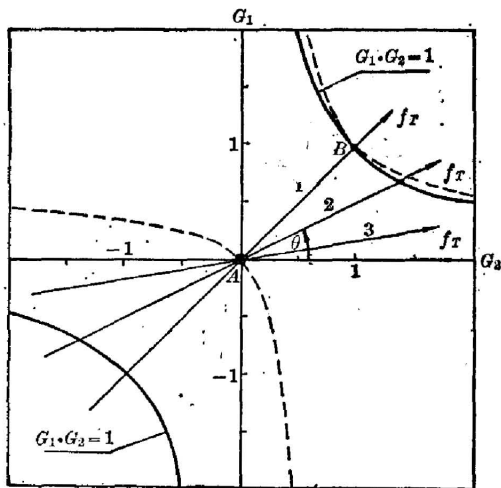


图1 共焦激光腔动态稳定图

Fig. 1 Dynamic stability diagram of confocal laser resonators

R_1, R_2 分别为输出腔镜、后反射镜曲率半径。 a, b 为前、后腔镜至激活介质“主平面”间的距离。 f_T 为一定泵浦功率下激活介质热焦距。由共焦条件 $C=0$, 得到共焦激光腔方程为:

$$2G_1G_2 - A_0G_2 - G_1/A_0 = 0. \quad (2)$$

显然,共焦腔方程(2)反映在动态稳定图上是以 A_0 为参数的两组共焦腔曲线族。图1给出 $A_0=1$ 的两条共焦腔曲线,如图中虚线所示。由图示结果可见,在共焦曲线族上存在两个特殊点: A 与 B 。 B 点表征共焦型临界腔,由于它的衍射损耗大,实际应用有很大局限性。然而, A 点所表征的共焦腔,处于高斯驻波腔、临界腔与点光束行波腔的“汇聚点”,因而具有“奇特”的特性。由于这种腔具有相对低的衍射损耗,在高重复率或连续固体激光器的低增益系统中,

较多地采用这种腔结构。本文基于这一点,从理论上分析了它的动态振荡特性,讨论了如何合理选择腔参数,最后从实验上得到了较为满意的结果。

收稿日期: 1985年4月23日; 收到修改稿日期: 1985年5月31日

二

激光腔振荡特性由特征波面曲率半径 R_o 来表征^[1]:

$$R_o = B / \sqrt{g^2 - 1}, \quad (3)$$

式中 $g = (A + D) / 2$ 。由于激活介质热焦距 f_T 的无规扰动, 引起腔结构的变化, 反映在动态稳定图上为一直线运动方程^[2]:

$$G_2 = \eta G_1 + B_2, \quad (4)$$

式中 $\eta = a(1 - b/R_2) / b(1 - a/R_1)$, $B_2 = 1 - (a + b) / R_2 - \eta(1 - (a + b) / R_1)$ 。 η 、 B_2 为方程(4)的斜率与截距。设此直线与 G_2 轴的夹角为 θ , 如图 1 所示。不难得到:

$$\theta = \text{ctg}^{-1} \eta_o. \quad (5)$$

显然, 对于 $G_1 = G_2 = 0$ 的共焦腔, $B_2 = 0$ 。相应特征波面曲率 $R_{o, \text{cot}}$ 为:

$$R_{o, \text{cot}} = \begin{cases} i B_o \sqrt{|\eta|} & 0 < \theta < \pi/2, \pi < \theta < 3\pi/2, \\ B_o \sqrt{|\eta|} & \pi/2 < \theta < \pi, 3\pi/2 < \theta < 2\pi, \end{cases} \quad (6)$$

式中 $i = \sqrt{-1}$ 。(6)式结果表明: 当 $0 < \theta < \pi/2$ 或 $\pi < \theta < 3\pi/2$ 时, $R_{o, \text{cot}}$ 为复数, 故为高斯驻波腔, 相应的基模束散角 $\alpha_{1, \text{cot}}$ 为^[1]:

$$\alpha_{1, \text{cot}} = K / (B_o \sqrt{|\eta|})^{1/2}, \quad (7)$$

式中 $K = \sqrt{\lambda/\pi}$, λ 为激光波长。当 $\pi/2 < \theta < \pi$ 或 $3\pi/2 < \theta < 2\pi$ 时, $R_{o, \text{cot}}$ 为实数, 故为点光束行波腔, 相应的球面波曲率半径 R_{cot} 为^[1]:

$$R_{\text{cot}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{B_o \sqrt{|\eta|}} \right)^{-1}. \quad (8)$$

显然, 当 $\theta = 0$ 或 π 时, 为共焦型临界腔。(7)~(8)式结果表明: 对于 G_1 、 G_2 恒为零的共焦激光腔, 不但本征振荡模(高斯光束或点光束), 而且输出特性(束散角或球面波曲率)与动态稳定图上直线运动方程(4)的取向密切相关。换言之, 随着直线运动方程(4)的取向不同, 共焦腔分别具有高斯驻波腔、临界腔及点光束行波腔的振荡特性。

对于共焦型高斯驻波腔, 基模束散角 $\alpha_{1, \text{cot}}$ 与 $\eta^{1/4}$ 、 $B_o^{1/2}$ 成反比。因此, θ 值越小, f_T 越长(相应 B_o 值大), 相应输出的激光亮度高。然而, 共焦型点光束行波腔的输出球面波曲率半径 R_{cot} 不仅取决于 f_T 、 θ 值的大小, 而且还与输出腔镜的曲率半径 R_1 有关。

三

共焦腔结构参数 a 、 b 、 R_1 、 R_2 与激活介质热焦距 f_T 满足方程:

$$\frac{a(1 - b/R_2)}{1 - (a + b)/R_2} = \frac{b(1 - a/R_1)}{1 - (a + b)/R_1} = f_T o.$$

在激光器的实际运转过程中, 介质热焦距 f_T 的无规扰动往往是难以避免的。对于一个确定结构的共焦腔, f_T 的扰动致使共焦腔畸变为非共焦腔。设 $m = G_1 \cdot G_2$, 并以 m 为参变量, 相应的特征球面波曲率半径 R_o 沿方程(4)的变化为:

$$R_o = R_{o, \text{cot}} / (|m - 1|)^{1/2}. \quad (9)$$

m 随 f_T 的变化为:

$$m = \eta [1 - (a + b) / R_1 - b(1 - a / R_1) / f_T]^2. \quad (10)$$

显然, (9)、(10)式定量地反映了共焦腔的动态振荡特性。图 2、3 分别给出特征波面曲率 R_c-G_1 与等效 G 因子 G_1-f_T 的动态变化曲线。结果表明: 当激活介质热焦距 f_T 偏离与共焦腔相对应的 f_{T0} 值时, 沿 f_T 增加方向变化所引起 R_c 的变化要比沿 f_T 缩短方向变化小得多。其次, 对于共焦型高斯驻波腔, θ 值大的腔结构, 相应的 R_c 随 f_T 变化的热稳定性比较好(见图 2)。这些有益的结论, 对于共焦腔的合理设计是很重要的。

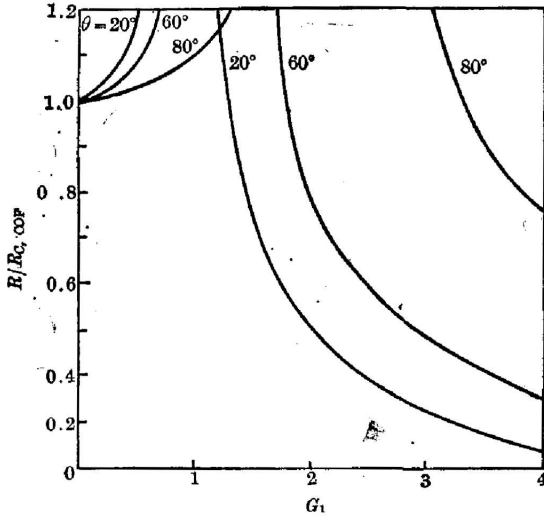


图 2 特征波面曲率随 θ 相对变化曲线
Fig. 2 Characteristic wave-front curvature R_c vs. θ

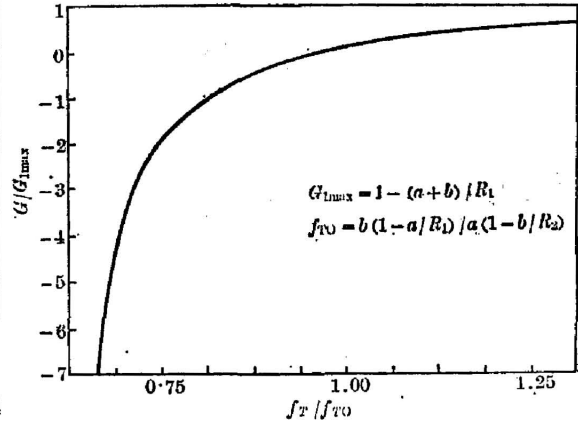


图 3 等效 G_1 因子随热焦距 f_T 的相对变化曲线
Fig. 3 Equivalent factor G_1 vs. thermo-focal length f_T

四

综合上述, 共焦腔的振荡特性与它在动态稳定图上直线运动方程(4)的取向密切相关。当选定激活介质与确定相应于一定泵浦功率下的介质热焦距 f_T 后, 我们可以根据实际应用对激光器输出的不同要求, 合理地选择腔参数:

1. 相应于不同的应用目的与选用激活介质增益的大小, 要确定采用高斯驻波腔或点光束行波腔。对于大多数低增益系统, 宜采用共焦型高斯驻波腔。

2. 根据选用的腔类型与(6)式给出的结果, 适当选取 θ 值, 同时, 由实际应用对输出束散角 $\alpha_{1,cof}$ (或球面波曲率半径 R_{cof})的要求, 对 $R_{c,cof}$ 适当选值, 并以 θ 、 $R_{c,cof}$ 值作为设计参数。

3. 求解下列非线性方程组, 得到共焦腔的结构参数 a 、 b 、 R_1 与 R_2 :

$$\begin{cases} 1 - \frac{a+b}{R_1} - \frac{b(1-a/R_1)}{f_T} = 0, \\ 1 - \frac{a+b}{R_2} - \frac{a(1-b/R_2)}{f_T} = 0, \\ a\left(1 - \frac{b}{R_2}\right) - \eta b\left(1 - \frac{a}{R_1}\right) = 0, \\ \sqrt{\eta}\left(a+b - \frac{ab}{f_T}\right) - R_{c,cof} = 0, \end{cases}$$

式中 $\eta = \text{ctg } \theta$ 。

4. 根据设计结果, 定量计算共焦腔的输出特性:

$$\text{基模束散角: } \alpha_{1, \text{cot}} = K \cdot (\text{tg } \theta)^{1/4} \cdot B_0^{-1/2} \quad (\text{对于高斯驻波腔}),$$

$$\text{球面波曲率半径: } R_{\text{cot}} = \frac{B_0 R_1 (|\eta|)^{1/2}}{R_1 + B_0 (|\eta|)^{1/2}} \quad (\text{对于点光束行波腔}).$$

5. 根据(9)、(10)两式, 定量分析共焦腔动态输出特性。

如果设计的激光腔, 输出束散角 $\alpha_{1, \text{cot}}$ 或球面波曲率半径 R_{cot} 不能满足实际应用的要求, 可以适当修改 θ 、 $R_{0, \text{cot}}$ 值, 直至设计得到满意的共焦腔为止。

五

我们以低增益连续 YAG 激光器为例, 进行了共焦型高斯驻波腔振荡特性的实验研究。YAG 棒的尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 105 \text{ mm}$, $R_1 = \infty$, R_2 为平板或凸镜。输出腔镜透过率为 11%。聚光腔是用一支 LK-8 \times 75 氩灯泵浦的单椭圆柱腔, 有效长度为 100 mm。输出光功率用 JGK-3 型激光功率计测量。多模激光束散角采用直接测量法得到。

实验中选用三种不同结构的共焦腔。腔结构参数、理论计算值及实验测量结果如表 1 所示。结果表明: 3# 腔与 1# 腔相比, θ 值小 4.5 倍, 激光束散角降低 2.4 倍, 亮度相应提高 6.3 倍。2# 腔与 1# 腔相比, θ 值小 1/3, 亮度提高 1.7 倍。从输出稳定性的实验观测结果来看, 1# 腔输出比较稳定, 2# 腔次之, 3# 腔稍差。此外, 多模束散角 $\alpha_1^{(p)}$ 的测量值与理论计算值比较接近。由此可见, 本文给出共焦腔理论分析所得到的结论基本上是正确的。这些结论对于共焦腔技术的应用有一定的指导意义。

表 1 共焦腔结构及实验结果

Table 1 Structures and experimental results of confocal resonators

| 序 号 | 1 | 2 | 3 | |
|--------------------------------------|---|----------|----------|----------|
| 腔 参 数 | $a(\text{cm})$ | 30 | 39 | 65 |
| | $b(\text{cm})$ | 30 | 30 | 26 |
| | $R_1(\text{cm})$ | ∞ | ∞ | ∞ |
| | $R_2(\text{cm})$ | ∞ | -100 | -20 |
| 热 焦 距 $f_T(\text{cm})$ | 30 | 30 | 26 | |
| 取 向 | $\theta(^{\circ})$ | 45.0 | 30.6 | 9.9 |
| | B_2 | 0 | 0 | 0 |
| 束 散 角 $\alpha_1^{(p)}(\text{m rad})$ | 5.89 | 4.53 | 2.72 | |
| 测 量 值 | 输出功率(W) | 12.01 | 9.20 | 7.13 |
| | 束散角(m rad) | 5.41 | 4.10 | 2.21 |
| | 亮度 $\left(\frac{10^6 \text{ W}}{\text{cm}^2 \cdot \text{stero. rad.}}\right)$ | 1.039 | 1.811 | 6.574 |

参 考 文 献

- [1] 金德运等;《中国激光》,1984, 11, No. 3 (Mar), 159.
[2] 金德运;《应用激光》,1982, 2, No. 5, 33.
[3] H. Kogelnik; *B. S. T. J.*, 1965, 44, No. 3 (Mar), 455.

A confocal laser resonator

JIN DEYUN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 23 April 1985; revised 31 May 1985)

Abstract

The dynamic oscillation characteristics of a special confocal resonator with $G_1=0$ and $G_2=0$ have been analysed. This resonator shows oscillation characteristics of a Gaussian standing-wave resonator, a critical resonator, and a travelling-wave resonator, respectively, when the direction of the rectilinear-motion equation for the resonator is changed. The method for designing the resonator is proposed. Experimental results are in agreement with theoretical analysis.