

含有多程室的多光程谐振腔的 寄生振荡分析

李育德 杜言庆*

(四川联合大学光电科学技术系 * 物理系 成都 610064)

提要 讨论了用于同轴放电气体激光器的含多程室的多光程谐振腔的寄生振荡,分析了寄生振荡存在的条件,对激光输出的影响及克服办法。

关键词 寄生振荡, 谐振腔, 多光程腔, 多程室

1 引 言

令多程腔^[1,2]的程数为 N_0 , 光束经两环形镜间一个往返在同一镜面之旋转角为 Φ ^[3], 光点在此二镜表面呈圆形分布。由于一般采用条件

$$\frac{1}{2}N\Phi = 2\pi \cdot m \quad (1)$$

式中

$$\Phi = \cos^{-1}(2g_1g_2 - 1) \quad (2)$$

$g_1 = 1 - \frac{L}{\rho_1}$, $g_2 = 1 - \frac{L}{\rho_2}$, ρ_1, ρ_2, L 为两环形镜面曲率半径及间距, N, m 为正整数, 则

$$N_0 = N - 1$$

N_0 是限于上述条件的最大程数。式(2) 有

$$|2g_1g_2 - 1| < 1$$

故两环镜配置满足稳定条件。图 1 为多光程腔。(a) 中黑色圆点(m_1, m_2, \dots) 代表多光程腔光束在环形镜面的光斑及入口、出口。(b) 为其二维图示^[4], 两侧短实线代表相应光斑。光束沿实线在多程室内来回传播而无孔外反射寄生振荡, 最后从出口出射并经半反射镜部分返回。但若光束未占满环形反射镜面和激活空间, 在镜面光斑之间有如(a) 中白色圆点及相应(b) 中两侧短虚线段所示的空处, 它们被长虚线连接形成一个光学上闭合的环路。由(1), (2) 式易证明此环路形成一环形腔^[5], 即寄生振荡腔。本文仅讨论基模光束并对两腔定义有效光束, 其半径为相应基模高斯光束半径 W 之 P 倍, 联系到两环镜开孔尺寸之确定, 依据基模高斯光束衍射损耗理论, P 近似取 1.5。对高阶高斯光束也可仿此定义。

2 不存在寄生振荡的条件

环形腔有效光束在同一环镜光斑半径相同^[5], 令较大一方为 W , 两开孔与未开孔所计算

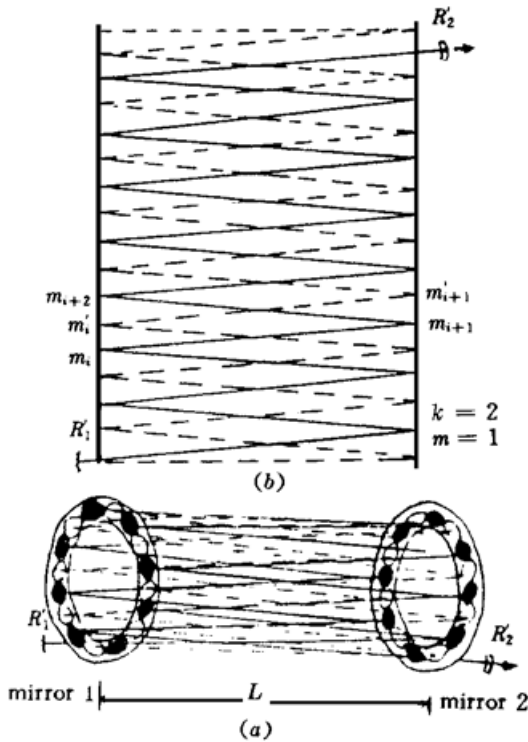


图 1 多光程腔及其寄生振荡的图示 ($m = 1, k = 2$)。当 $N_0 = 15$, 寄生振荡光路(—) 和 15 程谐振腔的光路(---) 之相交示于(a), (b)。(a) 三维示意图, (b) 二维示意图

Fig. 1 Diagram of the multiple-pass resonator and the parasites in it ($m = 1, k = 2$). When $N_0 = 15$, intersection of the ray path (—) of the parasitic oscillation and that (---) of the 15-passes resonator are showed in (a) and (b), (a) the three-dimensional diagram; (b) the two-dimensional diagram

的环形腔有效光斑一致, 多程腔有效光束在开孔处小于或等于孔径, 并设放电室内外半径为 R_1, R_2 , 参见图 2(a), 无寄生振荡条件近似表示为

$$\frac{1}{m} \cos^{-1}(2g_1g_2 - 1) \approx 2tg^{-1} \frac{W}{R_0} \quad (3)$$

式中 $R_0 = (R_1 + R_2)/2$ 。图 2(a) 满足(1), (2) 式且光斑边缘彼此完全靠近, (3) 式表示此时 φ 内 m 个光斑每斑所占角度。开孔大小按此条件确定, 已消除了唯一环形腔, 相应的空间和镜面由 N_0 程多程腔利用, 光束模参数由 ρ_1, ρ_2, L 及开孔处两小镜距孔距离(设为 l_1, l_2) 及曲率半径等确定。在(3) 式条件(含相应开孔) 下, 即使多程腔有效光束未全占相应镜面, 未占部分因开孔而不形成光学环路。环形腔内可出现高次横模^[6], 当二环镜间(设未开孔) 容许高次模时, (3) 式的 W 应视为高次模有效光斑之大小。

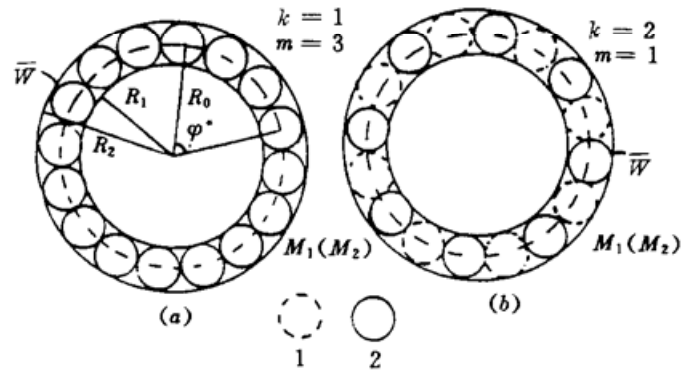


图 2 镜面上的光斑分布, 仅考虑基模情况
1: 寄生振荡光斑; 2: 谐振腔光斑

Fig. 2 Distribution of the spots on mirrors. Only fundamental transverse mode is considered
1: the spots of parasitic oscillation;
2: the spots of the resonator

3 不同程度的寄生振荡

当

$$\frac{1}{m} \cos^{-1}(2g_1g_2 - 1) = k \cdot 2tg^{-1} \frac{W}{R_0} \quad k > 1 \quad (4)$$

成立时, 可程度不同地发生寄生振荡, 当 k 为 2, 3, ... 时, 则只有约 $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots$ 甚至更小的空间被有用振荡占据, 而其余空间则被寄生振荡所利用, 可近似认为有 $k - 1$ 个环形寄生腔振荡存在。有用振荡和寄生振荡区一般是交叠的, 且后者损耗小于前者, 故交叠区激活介质主要被寄

生振荡利用。图 2(b) 给出 $k = 2$ 时之光斑分布, 虚线圆圈近似表示寄生腔利用的镜面部分。

4 k 为 2 时寄生振荡对输出的影响

由于设计时总是力图充分利用激活区, 故考虑高 k 值情况已无意义, 而 m 大又意味着 φ 较大, 不利于光束克服内层壁障碍, 这里对 $k = 2, m = 1$ 仔细分析, 对 $k = 2, m = 2, 3$ 作近似估计。此处仅讨论交叠区对激光输出的影响。为简单和实用^[1,2], 设

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho, \quad g_1 = g_2 = g \tag{5}$$

则
$$\varphi = 2\theta \tag{6}$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[1 - \frac{L}{\rho} \right] \tag{7}$$

用与[4] 相同的坐标系和方法, 当 $k = 2$, 有如下线性方程组

$$\phi = (-1)^{j_1-1} \phi_2 + \frac{\theta}{2} + (j_1 - 1)\theta \tag{8}$$

$$\phi = (-1)^{j_2-1} \phi_2 + \frac{\theta}{2} + (j_2 - 1)\theta + \frac{\theta}{m} \tag{9}$$

$$\phi_{2j_1} = -\frac{\theta}{2} \quad \phi_{2j_2} = \frac{\theta}{2}$$

式中
$$\phi_2 = \text{tg}^{-1} \left[2 \frac{z}{L} \text{tg} \frac{\theta}{2} \right] \quad \left[-\frac{\theta}{2} \leq \phi_2 \leq \frac{\theta}{2} \right] \tag{10}$$

j_1 表示与多程腔相应的环形镜面间的第 j_1 程光束, j_2 表示寄生振荡环形腔的第 j_2 程光束, ϕ_2 是随 z 值改变并依赖于 L, ρ 的单值函数, ϕ 表示相应光束在不同距离 (z) 处的角坐标。用(8), (9) 式可证明任一 j_1 线与 j_2 线的交点数为 m 。图 3 设 $N = 16, k = 2, m = 3, j_1, j_2$ 交点数正好为 3。图中以孔 O 中心为 $\varphi = 0$ 。

现重点分析图 1 所示 $k = 2, m = 1$ 的情况。取 $i = j$, 则(8), (9) 式中取 $j_1 = j + 1, j_2 = j$, 或取 $j_1 = j + 2, j_2 = j + 1$, 均可解得 $\phi = 0$, 交点均在 $z = 0$ 处, 所在圆的半径为^[13]

$$r_c = R_0 \sqrt{\frac{g+1}{2}} \tag{11}$$

这里仅讨论接近的两基模有效光束相交, 这既使问题简化, 也易于在偏离此情况时作定性估计。取寄生腔光束确定 PW 。由[5] 及进一步证明可知环形寄生腔内光束与此两镜驻波腔情况极接近, 故从束腰切断后的两相交有效光束均近似为上、下底半径为 \bar{W}, \bar{W}_0 的圆台,

$$\bar{W}_0 = P \left[\frac{L\lambda}{\pi} \right]^{1/2} \left[\frac{g(1-g^2)^{1/2}}{2-2g} \right]^{1/2} = PW_0$$

$$\bar{W} = P \left[\frac{L\lambda}{\pi} \right]^{1/2} \left[\frac{1}{1-g^2} \right]^{1/4} = PW_m$$

图 4 中①和②两个圆台的方程分别为

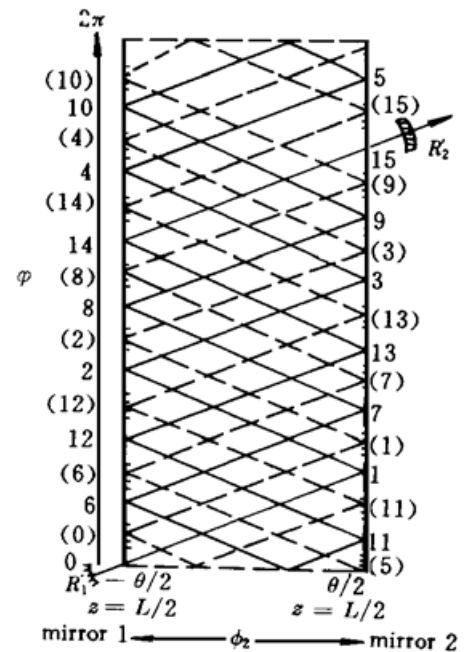


图 3 寄生振荡和多程腔光路相交的二维图示 ($N = 16, m = 3, k = 2$)

Fig. 3 Two-dimensional plot of intersection of the ray paths of a parasitic oscillation and a multiple-pass resonator ($N = 16, m = 3, k = 2$)

$$[x \cos\alpha + z \cos(90^\circ - \alpha)]^2 + y^2 - \left[W_0 + \frac{2(W - W_0)}{L'} [x \cos(90^\circ + \alpha) + z \cos\alpha] \right]^2 = 0 \tag{12}$$

$$[x \cos\alpha + z \cos(90^\circ + \alpha)]^2 + y^2 - \left[W_0 + \frac{2(W - W_0)}{L'} [x \cos(90^\circ - \alpha) + z \cos\alpha] \right]^2 = 0 \tag{13}$$

则交叠区域之体积为(取 $L' \approx L, \Delta h \approx 0$)

$$V_{in} = \left[\frac{-F\sqrt{H}}{a} - \frac{IG}{2a\sqrt{H}} \right] \cdot \left[\frac{1}{4} \left[L - \frac{I}{H} \right] \sqrt{\frac{W_0^2}{H} + \frac{LI}{2H} - \frac{L^2}{4}} + \frac{1}{2} \left[\frac{I^2}{4H^2} + \frac{W_0^2}{H} \right] \right. \\ \cdot \left[\arcsin \frac{\frac{1}{2} \left[L - \frac{I}{H} \right]}{\sqrt{\frac{I^2}{4H^2} + \frac{W_0^2}{H}}} - \arcsin \frac{-I/2H}{\sqrt{\frac{I^2}{4H^2} + \frac{W_0^2}{H}}} + \frac{I}{4H} \sqrt{\frac{W_0^2}{H}} \right] \\ + \frac{G}{12aH} \left[\left(-\frac{HL^2}{4} + \frac{LI}{2} + W_0^2 \right)^{3/2} - W_0^3 \right] \\ + \frac{2}{\sqrt{a}} \int_{z \approx 0}^{z \approx L} \left[\frac{G^2 - 4aH}{4a} z^2 + \frac{FG + 2aI}{2a} z + \frac{F^2}{4a} + W_0^2 \right] \\ \cdot \arcsin \frac{\sqrt{-Hz^2 + Iz + W_0^2}}{\sqrt{\frac{G^2 - 4aH}{4a} z^2 + \frac{FG + 2aI}{2a} z + \frac{F^2}{4a} + W_0^2}} dz \tag{14}$$

式中

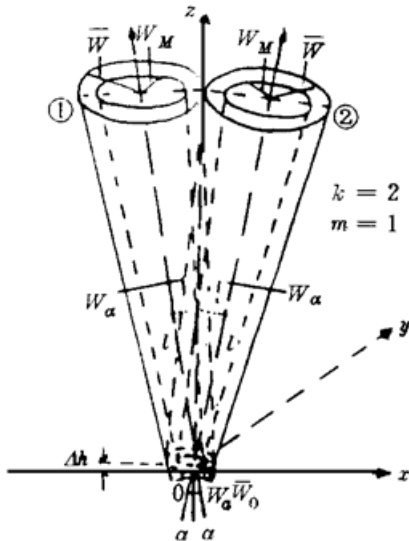


图 4 谐振腔振荡光束和寄生振荡光束的迭加

Fig. 4 The overlap of the beams of the resonator and the parasitic oscillation in the multipath cell

$$a = \cos^2\alpha - \frac{4(W - W_0)^2}{L^2} \sin^2\alpha$$

$$F = \frac{4(W - W_0)W_0}{L} \sin\alpha$$

$$G = \left[1 + \frac{4(W - W_0)^2}{L^2} \right] \sin 2\alpha$$

$$H = \sin^2\alpha - \frac{4(W - W_0)^2}{L^2} \cos^2\alpha$$

$$I = \frac{4(W - W_0)W_0 \cos\alpha}{L}$$

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{2W}{L}$$

①, ② 的体积均为 $V = \frac{1}{3} \pi \cdot \frac{L}{2} (W^2 + W_0^2 + WW_0)$ 。参见图 4, 容易得到两腔相近基模高斯光束在交角 α 时的相交体积为

$$v_{in} \approx V_{in} \left[\frac{L}{2} \rightarrow l, W \rightarrow W_\alpha, W_0 \rightarrow W_0 \right]$$

式中 \rightarrow 表示由前者改为后者, W_α, l 由下式决定:

$$\text{tg}\alpha = \frac{W_\alpha}{l} \quad l = \frac{L}{2} \left[1 - \frac{W_M - W_\alpha}{W_M - W_0} \right] = \frac{L}{2} \left[\frac{W_0}{W_0 - W_M} \right] \left/ \left[1 - \frac{L \text{tg}\alpha}{2(W_M - W_0)} \right] \right.$$

而图中高斯光束一端体积为

$$v = \frac{1}{3} \pi \cdot \frac{L}{2} (W_M^2 + W_0^2 + W_M W_0)$$

针对部分条件作出的计算列入表 1。

表 1 V_{in}/V 和 v_{in}/v 的计算结果(长度单位: mm)

Table 1 Calculated results of V_{in}/V and v_{in}/v (length units: mm)

L	1000	1000	800	
ρ	13137.0712	7464.101618	10509.65696	
g	0.923879532	0.866025403	0.923879532	
θ	22.5°	30°	22.5°	
W_M	2.884066257	2.523132522	2.579587281	
W_0	2.718859996	2.268031878	2.431822309	
$\frac{V_{in}}{V}$	P			
	1	0.5457	0.5170	0.5457
	1.2	0.5457	0.5169	0.5457
	1.5	0.5457	0.5170	0.5457
$\frac{v_{in}}{v}$	P			
	1	0.5457	0.5170	0.5457
	1.2	0.4506	0.4234	0.4506
	1.5	0.3573	0.3331	0.3573
	2	0.26567	0.2458	0.26568

$k = 2, m = 1$

交叠区粒子反转数(假定两振荡上下能级相同)充其量仅一半为有用振荡利用,当寄生腔损耗很小时,则可近似认为交叠中心区(v_{in})粒子反转数基本被寄生振荡利用。近似认为激光输出与光束占据区粒子反转数成正比,并由基模高斯光束理论可知激光能量约 85% 来自 v 区,约 15% 来自 $(V-v)$ 区,则损失范围为 $\frac{1}{2} \left[\frac{V_{in} - v_{in}}{V - v} \right] \times 0.15 + \frac{1}{2} \frac{v_{in}}{v} \times 0.85 \sim \frac{1}{2} \left[\frac{V_{in} - v_{in}}{V - v} \right] \times 0.15 + \frac{v_{in}}{v} \times 0.85$,易知 $V = 2.25v$ 。由表 1 中 $P = 1.5$ 之 $\frac{V_{in}}{V}, \frac{v_{in}}{v}$ 值,可知最低损耗约 19~ 20%,最高损耗约 33~ 36%。

当 $k = 2, m = 2, 3, W \approx W_0$, 这里仅作近似估计。将 $k = 2, m = 1, W \approx W_0$ 时两腔光束在一个单程(L)内的交叠按放电室径向投影作成二维图示于图 5(a), 表 1 三例计算交叠区所占比例近似为 $\frac{1}{2}$, 与 L, W 的取值近似无关。而图 5(a) 中交叠区面积也正好占 $\frac{1}{2}$, 与 L, W 的取值无关。对于 $k = 2, m = 2, 3, W \approx W_0$, 二维图示如图 5(b), (c), 交叠每段长分别为 $\frac{L'}{2}, \frac{L'}{3}$, 交叠面积占一半。因此, 两腔有效光束交叠区所占体积比例仍约为 $\frac{1}{2}$, 故对激光输出的影响与 $k = 2, m = 1$ 时接近。

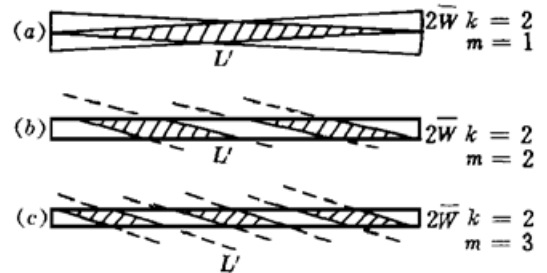


图 5 谐振腔振荡光束与寄生振荡光束交叠的平面图

Fig. 5 Two-dimensional plot of the overlaps of the oscillation beam of the resonator and that of the parasitic resonator

5 寄生振荡的抑制

$k = 2, m = 1, 2, 3, \bar{W} \approx \bar{W}_0$, 两腔光束接近, 寄生振荡使输出损失达 20 ~ 30% 左右。为避免寄生振荡对激光输出的影响, 应让 k 尽量接近于 1, 否则必须在寄生环形腔内适当位置(如镜面上某一位置), 采取措施阻止这一腔的振荡。例如, 对 $1 < k < 2$, 将两开孔角向尺寸适当加大, 使其在角向原空处之部分或大部分被开孔所占有。

参 考 文 献

- 1 Dezenberg G. J., Merritt J. A.. The use of multipath cell as a CO₂-N₂ gas laser amplifier and oscillator. *Appl. Opt.*, 1967, **6**: 1541~ 1543
- 2 程兆谷, H. J. J. Seguln. 一种适用于同轴放电环形增益区的多光程谐振腔. 光学学报, 1989, **9**(2): 113 ~ 118
- 3 W. R. Trutna, R. L. Byer. Multiple-pass Raman gain cell. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(2): 301~ 312
- 4 B. Perry, R. O. Brickman, A. Stein *et al.*. Controllable pulse compression in a multiple-pass-cell Raman laser. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(7): 288~ 290
- 5 李育德. 一种适合于同轴放电气体激光器的多程环形腔. 中国激光, 1992, **19**(10): 755~ 758
- 6 方洪烈. 光学谐振腔理论. 北京: 科学出版社, 1981, 396~ 398

Analyses of Parasitic Oscillation of a Multiple-pass Resonator with a Multipath Cell

Li Yude Du Yanqing*

(Department of Opto-electronic Science and Technology,

* Department of Physics, Sichuan Union University, Chengdu 610064)

Abstract In this paper, parasitic oscillation of a multiple-pass resonator with a multipath cell of coaxial gas lasers is discussed. Conditions under which the parasitic oscillation takes place, its influence on the output of the resonator and the measures to avoid it are analysed.

Key words parasitic oscillation, resonator, multiple-pass resonator, multipath cell