

非共振环形腔的热稳性

吕百达 黄 渊

(四川大学物理系)

Thermal stability of nonresonant ring laser cavity

Lü Baida, Huang Yuan

(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu)

Abstract: The thermal stability of a nonresonant ring laser cavity is analyzed by means of equivalent laser resonators. In the general case i. e., principal-point distances $h_i (i=1, 2)$ varies with the focal length of the internal thermal lens, the analytical expressions are derived and compared with those obtained by using approximate method.

一、引 言

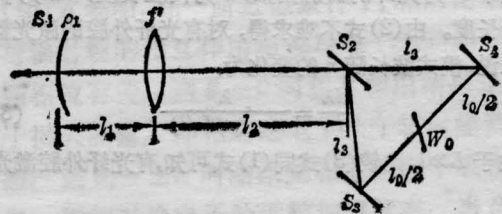
Siegman 早在 1973 年就从理论上研究了非共振环形腔 (ARR) 的基本性质并且指出了各种可能的用途^[1], 后来 ARR 又在碰撞脉冲锁模技术中获得了重要应用。我们在[2]中分析了用于碰撞脉冲锁模 (CPM) 的非共振环形腔的稳定性和模参数等问题, 并指出目前使用的各种类型非共振环形腔总可以归结为简单的两镜腔和多元件腔两大类来处理另一方面, 由于 CPM 可以超阈值运转, 因此有必要考虑在高功率泵浦下激光介质的热透镜效应和非共振环形腔的热稳性等问题。对含有多个透镜复杂腔的热稳性, 通常是用化为热厚透镜的方法来处理, 但迄今的计算都是假定热厚透镜的主距 h_i 不随热焦距而变化^[3-5], 以避免数学处理的复杂性。理论分析和实验结果都表明, 这一假设只在低热扰动情况下成立。实际上, 如果针对具体物理问题, 使用一些变换技巧来简化数学计算, 这一问题的严格求解是可能的。本文用等价腔的概念^[6,7], 对含热透镜非共振环形腔的模参数和热稳条件用多种方法作了计算, 并对所得结果作了分析和比较。本文的计算方法和所得结果对在高功率、高重复频率泵浦条件下 ARR 腔参数的选取有参考意义。

二、A 型非共振环形腔的热稳条件

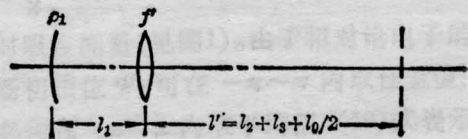
因非共振环形腔兼有环形腔和线形腔的特点,

因此, 既可以用环形腔的分析方法也可以用多元件驻波腔的分析方法来进行计算。注意到这类腔型的对称结构, 从 S_2, S_4 臂中点腰斑 W_0 (图 1(a)) 处截开后化为多元件平凹腔的分析最为简明。为方便起见先列出图 1(a) 所示简单情况的有关结果 (称 A 型腔) 设输出镜 S_1 曲率半径为 ρ_1 , 其余各镜均为平面镜 激光介质 (例如钕玻璃或 YAG) 可等效为一个具有可变焦距 f 的热薄透镜, 其余各量见图 1(a)。A 型腔可化为图 1(b) 所示的内含一个热透镜的平凹腔。

利用 G 参数等价腔分析法^[6,7], 得到



(a) A 型腔



(b)

图 1

$$G_1 = 1 - \frac{L}{\rho_1} - \frac{l'}{f'} \left(1 - \frac{l_1}{\rho_1} \right)$$

$$G_2 = 1 - \frac{l_1}{f'} \quad (2-1)$$

$$L_G = L - \frac{l_1 l'}{f'} \quad (2-2)$$

式中

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_0/2 = l_1 + l' \quad (2-3)$$

$$l' = l_2 + l_3 + l_0/2 \quad (2-4)$$

当输出镜 S_1 “匹配”时,按[3],热稳条件为

$$\frac{dW_1}{df'} = 0 \quad (2-5)$$

式中 W_1 为镜 S_1 处高斯光束光斑半径。由此求得

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + 2 \left(\frac{l_1}{l'} \right) + \frac{1}{G_2} \left(\frac{l_1}{l'} \right)^2 \quad (2-6)$$

三、B型非共振环形腔的热稳条件

B型非共振环形腔的结构如图2(a)所示,与图1(a)的差异仅是 S_3 、 S_4 镜用曲率半径为 ρ 的凹面镜代替了原来的平面镜。从腰斑 W_0 处截开后,它等效于图2(b)所示含两个薄透镜的平凹腔。众所周知,薄透镜组(f' , $f = \rho/2$)可等效于一个热厚透镜,其焦距 F 为

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{f} - \frac{d}{f'f} \quad (3-1)$$

主距 h_1 为

$$h_1 = \frac{d}{f'} F$$

$$h_2 = \frac{d}{f} F \quad (3-2)$$

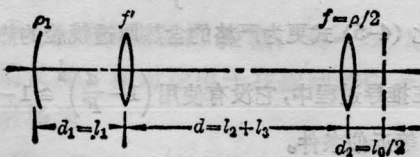
式中

$$d = l_2 + l_3 \quad (3-3)$$

即二透镜间距离。因此,B型腔的热稳问题实际上可归结为含热厚透镜腔的热稳问题。但与[4,5]情况



(a) B型腔



(b)

图 2

不同,我们已设主距 h_1 随热焦距 f' 按(3-1)和(3-2)式变化。

1. G 参数等价腔分析法

对图2(b)所示腔,其 G 参数和 L_G 为

$$G_1 = 1 - \frac{d_2 + h_2}{F} - \frac{L_G}{\rho_1}$$

$$G_2 = 1 - \frac{d_1 + h_1}{F} \quad (3-4)$$

$$L_G = d_1 + d_2 + h_1 + h_2 - \frac{(d_1 + h_1)(d_2 + h_2)}{F} \quad (3-5)$$

输出镜 S_1 处光斑半径

$$W_1^2 = \frac{\lambda L_G}{\pi} \left[\frac{G_2}{G_1(1 - G_1 G_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-6)$$

其余模参数亦可仿节二写出。

由(2-5)式可得热稳条件为

$$\frac{dW_1}{df'} = \frac{2W_1}{2L_G} \cdot \frac{2L_G}{2f'} + \frac{2W_1}{2G_1} \cdot \frac{2G_1}{2f'} + \frac{2W_1}{2G_2} \cdot \frac{2G_2}{2f'} = 0 \quad (3-7)$$

利用(3-1)~(3-6)式,可将(3-7)式改写为

$$\frac{2L_G}{2f'} + \left(2G_2 - \frac{1}{G_1} \right) \left(L_G \frac{2G_1}{2f'} - G_1 \frac{2L_G}{2f'} \right) + \frac{L_G}{G_2} \frac{2G_2}{2f'} = 0 \quad (3-8)$$

对 L_G 、 G_1 、 G_2 求导,取消 h_1 不随 f' 而变化的限制,经过较为冗长的计算,得到下面几个经整理后大为简化的表示式:

$$\frac{2L_G}{2f'} = \frac{1}{f'^2} \left(d + d_2 - \frac{d}{f} d_2 \right) \quad (3-9)$$

$$L_G \frac{2G_1}{2f'} - G_1 \frac{2L_G}{2f'} = \frac{1}{f_1^2} \left(d + d_2 - \frac{d}{f} d_2 \right)^2 \quad (3-10)$$

$$\frac{2G_2}{2f'} = \frac{d_1}{f'^2} \left(1 - \frac{d}{f} \right) \quad (3-11)$$

式中

$$d_1 = l_1$$

$$d_2 = l_0/2$$

将(3-9)~(3-11)式代入(3-8)式,得到热稳条件为

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + \frac{d_1}{d + d_2 - \frac{d}{f} d_2} + \frac{d_1}{G_2} \cdot \frac{L_G \left(1 - \frac{d}{f} \right)}{\left(d + d_2 - \frac{d}{f} d_2 \right)^2} \quad (3-12)$$

亦可改写为:

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + 2 - \frac{d_1}{d_1 + d_2 - \frac{d}{f} d_2}$$

$$+ \frac{1}{G_2} \left(\frac{d_1}{d_1 + d_2 - \frac{d}{f} d_2} \right)^2 \quad (3-13)$$

当 $f \rightarrow \infty$ 时

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + 2 \left(\frac{d_1}{d_2 + d} \right) + \frac{1}{G_2} \left(\frac{d_1}{d_2 + d} \right)^2 \quad (3-14)$$

这就是(2-6)式。

2. g' 参数、 g^* 参数等价腔分析法

(2-9)~(3-11)的求导运算和化简过程颇为繁琐,为避开数学上的困难,对B型腔可采用 g' 参数、 g^* 参数等价腔分析法^[6,7]。其物理实质如图3所示,即先将 \bar{S} 通过焦距 $f = \rho/2$ 的薄透镜成像。构成与原多元件腔等价的 g' 参数腔,这时,腔内仅含一个热薄透镜。然后再用 g^* 参数等价腔分析法,得到输出镜 S_1 处光斑半径 W_1 为

$$W_1^2 = \frac{\lambda L^*}{\pi} \left[\frac{g_2^*}{g_1^*(1-g_1^*g_2^*)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-15)$$

于是,易求得B型腔的热稳条件为

$$\frac{1}{g_1^*} = 2g_2^* + 2 \left(\frac{l_1}{l'} \right) + \frac{1}{g_2^*} \left(\frac{l_1}{l'} \right)^2 \quad (3-16)$$

式中

$$g_1^* = 1 - \frac{L^*}{\rho_1} - \frac{l'}{f} \quad (3-17)$$

$$g_2^* = 1 - \frac{L^*}{\rho_2} - \frac{l_1}{f'} \quad (3-17)$$

$$L^* = l_1 + l' - \frac{l_1 l'}{f'} \quad (3-18)$$

$$l' = l_2 + l_3 - \frac{l_0 \rho}{2(l_0 - \rho)} \quad (3-19)$$

$$\rho_2 = \frac{\rho^2}{2(\rho - 2d_2)} \quad (3-20)$$

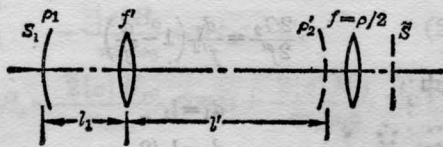


图 3

四、结果的比较和讨论

1. (3-13)、(3-16)式是B型腔比较严格的热稳条件。(3-13)式是在(3-5)式中 h_i 随 f' 而变化的一般情况下推导出来的,(3-16)式则使用了 g' 参数等价腔的变换技巧,直接利用节二中A型腔的结果写出,但 g_1^* 、 L^* 、 l' 等参数需另行计算。

2. 利用(3-4)~(3-8)及(3-15)~(3-20)式容易证明:(3-13)式与(3-16)式是等价的,并有 $G_1 G_2 = g_1^* g_2^*$ 。但二种分析方法并不是完全等价的^[6,7]。例如,若设激光由图3中 \bar{S} 端输出,则仿前用 g' 参数

等价腔的计算将导致错误的结果,而 G 参数等价腔的方法仍然有效。这一点,是在实际工作中使用等价腔分析法时应当注意的。

3. 若设 h_i 不随 f' 而变化(例如低热扰动情况,且 $d \ll d_1 + d + d_2 = L$),则仿照[3]的计算,求得热稳条件为

$$\begin{aligned} \frac{1}{G_1} = & 2G_2 + \frac{1}{G_2} \left(\frac{d_1}{e_2} \right)^2 \\ & \times \frac{\left(1 + \frac{d}{2\xi d_1} \right) \frac{L_G}{d_1}}{\left(\xi + \frac{d}{d_2} \right) + \frac{1}{2\xi} \left(\frac{d}{d_2} \right)^2 + \frac{d}{2\xi F}} \\ & + \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \frac{d_1 + \frac{d}{2\xi} \left(1 + \frac{d_2}{d_1} \right)}{\left(\xi d_2 + d \right) + \frac{d^2}{2\xi d_2} + \frac{d_1 d_2}{2\xi F}} \end{aligned} \quad (4-1)$$

式中

$$G_1 = \xi - \frac{L_G}{\rho_1} - \frac{d_2}{F}$$

$$G_2 = \xi - \frac{d_1}{F} \quad (4-2)$$

$$L_G = \xi(d_1 + d_2) + d - \frac{d_1 d_2}{F} \quad (4-3)$$

$$\xi \cong \left(1 - \frac{d}{F} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-4)$$

F 、 d 、 d_1 、 d_2 分别如(3-1)、(3-3)、(3-12)式所示。当 $\frac{d}{F} \ll 1$ 时,由(4-1)式得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{G_1} = & 2G_2 + \frac{1}{G_2} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \frac{\left(1 + \frac{d}{d_1} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{d_1} \right)^2}{\left(1 + \frac{d}{d_2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{d_2} \right)^2} \\ & + 2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \frac{d_2 + \frac{d}{2} \left(1 + \frac{d_2}{d_1} \right)}{\left(d_2 + d \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2}{d_2} \right)} \end{aligned} \quad (4-5)$$

这即通常使用的当 $d_1 \neq 0$ 时含热厚透镜腔的热稳条件。实际上,当设 h_i 不随 f' 而变化时,直接使用第二节的分析方法,经简单计算后可求得热稳条件为

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + \frac{1}{G_2} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \quad (4-6)$$

式中

$$\bar{d}_1 = d_1 + \frac{d}{f} F$$

$$\bar{d}_2 = d_2 + \frac{d}{f'} F \quad (4-7)$$

这是比(4-5)式更为严格的含热厚透镜腔的热稳公式。在推导过程中,它没有使用 $\left(1 - \frac{d}{F} \right)^{\frac{1}{2}} \cong 1 - \frac{d}{2F}$, $\frac{d}{F} \ll 1$ 等近似条件。

应当指出,虽然假定了 h_i 不随 f' 而变化,但(4-1)式的数学推导也并不容易,而且在物理上也不

严格。本文使用的方法原则上可以解决 h_i 随 f' 而变化时含热厚透镜腔热稳公式的推导。

4. 由于透镜组都可以等效为一个厚透镜, 或者使用 $g'(g'')$ 参数等价腔可将含有多个透镜的多元件腔(其中有一个或一个以上是热透镜)变换为只含有一个热透镜的腔, 因此本文使用的方法可直接用于讨论含有多个透镜的多元件腔的热稳问题, 并且腔反射镜曲率半径可以是 $\rho_i \neq \infty$ (球面镜) 或 $\rho_i = \infty$ (平面镜), $i=1, 2$ 。

参 考 文 献

[1] A. E. Siegman; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1973,

QE-9, No. 2, 247.

[2] 吕百达等;《量子电子学》, (待发表)。

[3] J. Steffen *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1972, QE-8, No. 2, 239.

[4] 金德运等;《四川激光》, 1982, 3, No. 1, 39.

[5] 王效敬;《中国激光》, 1985, 12, No. 5, 266.

[6] 吕百达;“激光光学”, 四川大学出版社, 1986, 222.

[7] 吕百达等;《四川大学学报》, 1985, No. 4, 48.

(收稿日期: 1986年6月20日)

60号钢表面激光合金化的研究

郑克全 张思玉 方心济

(兰州大学物理系)

刘锡璋 林燕妮

(河北省科学院激光研究所)

Study on laser alloying of 60# steel surface

Zheng Kequan, Zhang Siyu, Fang Xinji

(Department of Physics, Lanzhou University, Lanzhou)

Liu Xizhang, Lin Yanni

(Laser Institute, Academy of Sciences of Hebei, Shijiazhuang)

Abstract: Experimental procedures are presented for laser alloying of 60# steel surface using a transversely excited flow CW CO₂ laser with an output power of about 2 kW. Microstructural and electron spectrum analyses of the treated surface indicate that laser alloying offers the possibility *in situ* alloy synthesis on workpiece surface.

1. 实验条件及方法

实验采用 JL-6 型横向流动 CO₂ 激光器, 其输出功率为 500~2000 W 连续可调。激光光束用焦距 300 mm 的砷化镓透镜聚焦, 依靠调节焦点与试验样品表面之间的距离来改变光斑的大小。处理的机械部分是通过可控硅控制伺服电机带动丝杆构成的机械装置, 调节工件表面激光扫描所需要的动作和速度。

实验样品是以 60 钢为基体材料, 并加工成 20×

20×6 mm 的金属块。合金化元素使用的是 Cr、C、Mn 和 Al 等单元素粉末, 其粒度都在 40 μm 以下。合金元素配制成如下四种比例: ① 100% Cr, ② 85% Cr, 15% C, ③ 25% Cr, 50% C, 25% Mn, ④ 24% Cr, 48% C, 24% Mn, 4% Al。选择铬、碳元素合金化的基本理由是, 在奥氏体基体、珠光体基体或马氏体基体中容易生成如 M₇C₃ 和 M₃O 之类的稳定碳化物。使用锰是因为锰是碳化物的强稳定剂。而铝是一种优越的脱氧剂, 因而在合金化实验中也就不