

# 基模动态稳定望远镜谐振腔

吕 百 达  
(四川大学物理系)

## 提 要

本文使用等价腔和传播矩阵方法,在一般情况下推导出了望远镜腔的基模热稳条件,该表示式简单而又严格,还易于推广到含热透镜多元件腔的一般情况,并与用近似方法所得结果作了比较和讨论。

关键词: 动态稳定谐振腔,望远镜腔,高斯光束参数,传播矩阵方法,热稳条件。

## 一、引 言

含有望远镜系统的谐振腔(简称望远镜腔)是目前高效固体激光器、可调谐染料激光器广为采用的一种腔型。合理设计的望远镜腔的主要优点是:(1)能得到大体积  $TEM_{00}$  模激光输出,而光学元件(如腔反射镜、透镜等)上的激光功率密度又不致过大;(2)增加有效腔长;(3)可以方便地通过调节望远镜系统的失调量  $\Delta$  来改变激光器的输出功率(或能量),对高功率泵浦固体激光器,可用调节  $\Delta$  方法来补偿激光介质的热透镜效应。即设计基模动态稳定望远镜腔;(4)染料激光器内置望远镜系统可提高光谱分辨率(Hänsch型腔)等等。在对望远镜腔的研究中,腔的动态稳定性问题是国内外研究者注目的课题之一。Hanna 等人<sup>[1]</sup>从 Steffen 的公式<sup>[2]</sup>出发,提出了设计大体积  $TEM_{00}$  模稳定平行平面望远镜腔的简化近似方法。国内陆祖康等<sup>[3]</sup>在二次谐波、三次谐波频率重复 Nd:YAG 激光腔设计中,推导出了平行平面热稳望远镜腔失调量的近似公式。在满足文献[1]、[3]的近似条件下,其实验都得到了和理论相符的结果。我们曾对望远镜腔的基本性质用等价腔的方法作了详细分析,得出了计算模参数的解析公式和有关的曲线,从中发现一些带规律性的特征,并作了相应的实验研究<sup>[4,5]</sup>。认真分析文献[1]、[3]发现,他们的结果(特别是文献[3])具有工程上的简明性、使用方便等优点,但不十分严格,因为文中使用的近似条件在物理上不可能在一般情况下全部满足。而事实上,这一问题的严格求解是可能的。

本文使用等价腔的概念传播矩阵方法和适当的数学变换技巧,在一般情况下用多种方法较为严格地推导出了望远镜腔的热稳公式,文中所使用的方法和所得解析结果对基模动态热稳定望远镜腔的工程设计有参考意义。

## 二、望远镜腔的热稳公式

### 1. $G$ 参数等价腔分析法<sup>[4,5]</sup>

为明确起见,研究对象如图1所示的多元件谐振腔,两腔反射镜曲率半径分别为  $\rho_1, \rho_2$ ,

收稿日期: 1986年6月30日; 收到修改稿日期: 1986年8月8日

腔内含有三个薄透镜,其焦距分别为  $f_1, f_2$ , 相距为  $l$  的望远镜系统和具有可变热焦距  $f'$  的热透镜。其余腔参数见图 1。首先将望远镜系统用一个焦距  $f_1$  主距(主面到顶点距离)  $h_i (i=1, 2)$  的厚透镜来等价代替:

$$f = (f_1 f_2 / \Delta), h_i = (l / \Delta) f_i, \Delta = f_1 + f_2 + l. \quad (1)$$

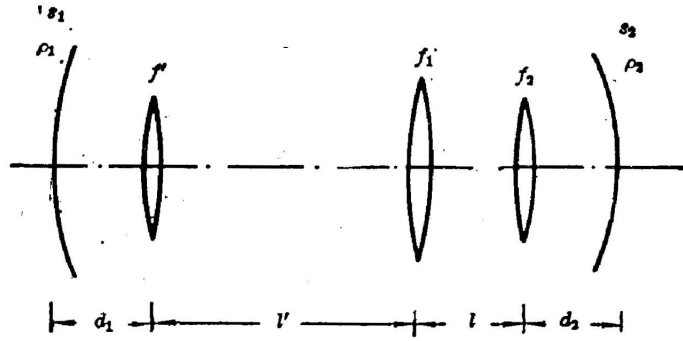


Fig. 1 Resonator with a thermal lens and a telescope

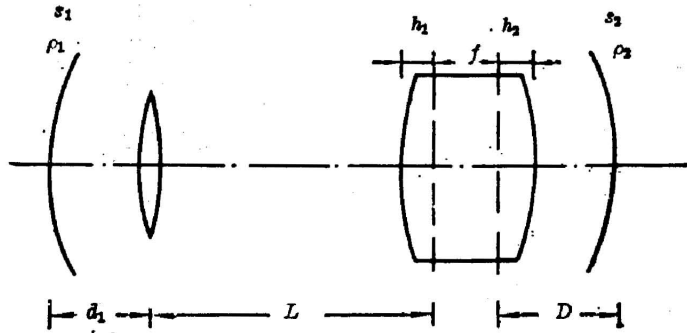


Fig. 2 Equivalent resonator with a thermal lens and a thick lens

于是,可求得如图 2 所示的等价  $G$  参数腔的  $G$  参数和有效腔长  $L_G$  为

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= 1 - \frac{L}{f'} - \frac{D_2}{F} - \frac{L_G}{\rho_1}, \\ G_2 &= 1 - \frac{L}{f} - \frac{d_1}{F} - \frac{L_G}{\rho_2}, \\ L_G &= d_1 + D_2 + L - \frac{d_1 D_2}{F} - \frac{L}{f'} d_1 - \frac{L}{f} D_2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中

$$D_2 = d_2 + \frac{f_2 l}{\Delta}, F = \frac{f f'}{f + f' - L}, L = l' + \frac{f' l}{\Delta}. \quad (3)$$

设激光由  $s_1$  镜端输出,且  $s_1$  镜是“匹配”的,则按文献[2],热稳条件为

$$\frac{dw_1}{df'} = 0, \quad (4)$$

$$w_1^2 = \frac{\lambda L_G}{\pi} \left[ \frac{G_2}{G_1(1 - G_1 G_2)} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中  $w_1$  为  $s_1$  镜处基模高斯光束光斑半径,  $\lambda$  为激光波长。将(5)式代入(4)式于是得

$$\frac{2L_G}{2f'} + \left(2G_2 - \frac{1}{G_1}\right) \left(L_G \frac{2G}{2f'} - G_1 \frac{2L_G}{2f'}\right) + \frac{L_G}{G_2} \frac{2G_2}{2f'} = 0. \quad (6)$$

对  $L_G, G_1, G_2$  求导, 利用(2)、(3)、(6)式, 经过计算并作适当整理后得到

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + \frac{2d_1}{D_2 + L - (D_2/f)L} + \frac{1}{G_2} \left(\frac{d_1}{D_2 + L - (D_2/f)L}\right)^2. \quad (7)$$

(7)式即一般情况下望远镜腔的热稳公式。

现作以下两点讨论:

(1) 平行平面望远镜腔 ( $\rho_1 \rightarrow \infty, \rho_2 \rightarrow \infty$ )

由(2)式知, 此时  $G$  参数为

$$G_1 = 1 - \frac{L}{f'} - \frac{D_2}{F}, \quad G_2 = 1 - \frac{L}{f} - \frac{d_1}{F}. \quad (8)$$

由此易得

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + \frac{2d_1}{D_2 + L - (D_2/f)L} + \frac{1}{G_2} \frac{d_1^2}{[D_2 + L - (D_2/f)L]^2}. \quad (9)$$

(9)式就是文献[1]、[3]所讨论的平行平面望远镜腔较为严格的基模热稳公式。

(2) 含一个热透镜腔 ( $f_1 \rightarrow \infty, f_2 \rightarrow \infty$ )

由(7)式和(9)式可得

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + 2 \left(\frac{d_1}{D_2 + L}\right) + \frac{1}{G_2} \left(\frac{d_1}{D_2 + L}\right)^2. \quad (10)$$

(10)式为众所周知的含热薄透镜腔 ( $d_1 \neq 0$ ) 的热稳公式。

## 2. $g'$ 参数、 $g^*$ 参数等价腔分析法<sup>[5]</sup>

对图1所示望远镜腔可用多种方法分析。例如, 还可使用  $g'$  参数、 $g^*$  参数等价腔分析法(见图3)以避免上面繁琐的求导运算和变换。这一方法的物理实质在于先将  $s_1$  镜通过望远镜系统成像, 构成与原来多元件腔等价的  $g'$  参数腔。新的  $g'$  参数腔中仅含一个热透镜, 于是问题大为简化。然后再用  $g^*$  参数等价腔分析法, 得到  $s_1$  镜处基模高斯光束光斑半径  $w_1$  和热稳条件分别为

$$w_1^2 = \frac{\lambda L^*}{\pi} \left[ \frac{g_2^*}{g_1^*(1 - g_1^* g_2^*)} \right]^{1/2}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{g_1^*} = 2g_2^* + 2 \left(\frac{d_1}{d_2}\right) + \frac{1}{g_2^*} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2, \quad (12)$$

$$g_1^* = 1 - \frac{L^*}{\rho_1} - \frac{d_2'}{f'}, \quad g_2^* = 1 - \frac{L^*}{\rho_2} - \frac{d_1}{f'},$$

$$L^* = d_1 + d_2' - \frac{d_1 d_2'}{f'},$$

$$\rho_2' = \frac{\rho_2}{\left(M + \frac{\Delta}{f_1} - \frac{\Delta d_2}{f_1 f_2}\right)^2 + \frac{\rho_2 \Delta}{f_1 f_2} \left(M + \frac{\Delta}{f_1} - \frac{\Delta d_2}{f_1 f_2}\right)}, \quad (13)$$

$$d_2' = l + \frac{[(1/M) + (\Delta/f_2)]d_2 + l}{[M + (\Delta/f_1)] - (\Delta d_2/f_1 f_2)},$$

$$M = -(f_2/f_1),$$

式中  $M$  为望远镜系统的角放大率, 容易证明:

(1) 平行平面望远镜腔 ( $\rho_1 \rightarrow \infty, \rho_2 \rightarrow \infty$ )

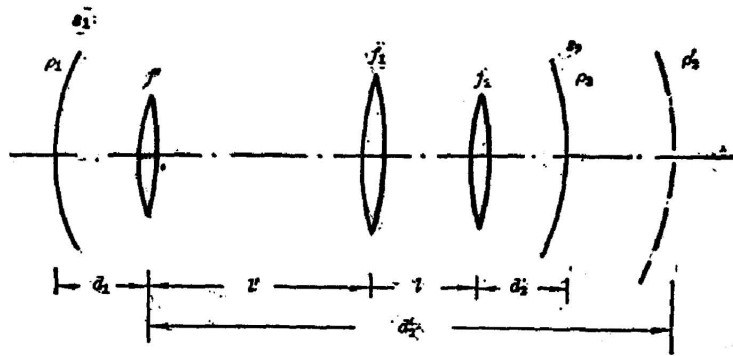


Fig. 3  $g'$  parameter equivalent resonator

$$\rho_2' = \frac{f_1^2 f_2^2}{\Delta(f_1 f_2 - \Delta d_2 - f_2 l)}, \tag{14}$$

$$g_1' = 1 - (d_2'/f_2'). \tag{15}$$

热稳条件仍为(12)式。

(2) 调焦望远镜腔( $\Delta=0$ )

$$\rho_2' = \rho_2 / M^2, \tag{16}$$

$$d_2' = l + \frac{1}{M} \left( \frac{d_2}{M} + l \right). \tag{17}$$

热稳条件仍为(12)式。

### 三、推 广

对望远镜腔的分析结果很容易推广用于图4所示含热透镜多元件腔的一般情况。设  $s_i$  镜与热透镜(焦距为  $f'$ )间的传播矩阵为

$$\begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix}, \quad i=1, 2,$$

则腔内的传播矩阵  $m$  可表示为

$$m = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix}, \tag{18}$$

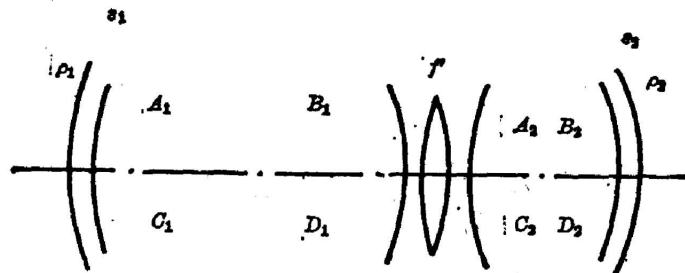


Fig. 4 Multielement resonator with one thermal lens

由此得

$$\left. \begin{aligned} A &= A_1 A_2 + B_2 C_1 - (A_1 B_2 / f'), \\ B &= A_2 B_1 + B_2 D_1 - (B_1 B_2 / f'), \\ D &= B_1 C_2 + D_1 D_2 - (B_1 D_2 / f'). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

于是多元件腔的  $G$  参数为

$$G_1 = A - (B / \rho_1), \quad G_2 = D - (B / \rho_2), \quad (20)$$

式中  $\rho_1, \rho_2$  分别为  $s_1, s_2$  镜的曲率半径。 $s_1$  镜处基模高斯光束光斑半径  $w_1$  为

$$w_1^2 = \frac{\lambda B}{\pi} \left[ \frac{G_2}{G_1(1 - G_1 G_2)} \right]^{1/2}. \quad (21)$$

由此易得热稳条件为

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + 2 \left( \frac{B_1}{B_2} \right) + \frac{1}{G_2} \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^2. \quad (22)$$

(22) 式为含热透镜多元件腔的一般热稳条件, 式中  $B_i (i=1, 2)$  可称为  $s_i$  镜与热透镜间的“有效长度”。很易证明在上节讨论的望远镜腔的热稳条件(7)式为(22)式的特例。又如图 5 所示多元件腔, 设  $f'$  为热透镜(焦距为  $f'$ )、 $f_1, f_2$  为两薄透镜(焦距分别为  $f_1, f_2$ ), 则由(18)~(22)式知, 热稳条件为

$$\frac{1}{G_1} = 2G_2 + 2 \left( \frac{d_1^*}{d_2^*} \right) + \frac{1}{G_2} \left( \frac{d_1^*}{d_2^*} \right)^2, \quad (23)$$

$$d_1^* = d_1 + l' - (d_1 l' / f_1), \quad d_2^* = d_2 + l - (d_2 l / f_2). \quad (24)$$

$G_i$  为腔的  $G$  参数。

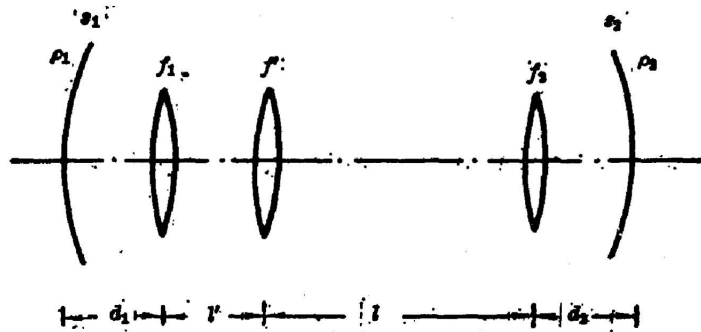


Fig. 5 Resonator with one thermal lens and two thin lenses

#### 四、结果的分析 and 讨论

(1) 文中(7)、(12)式是比较严格和普遍情况下望远镜腔的热稳公式。这里所谓“比较严格和普遍情况”是指: (i) 腔反射镜曲率半径  $\rho_i$  为有限值。若令  $\rho_i \rightarrow \infty$  便得到平行平面望远镜的热稳公式。(ii) 失调量  $\Delta$  可为非零失调情况或者为零(调焦情况)。(iii) 热透镜  $f'$  不要求紧靠腔反射镜  $s_1$  腔参数的大小也无如文献[1]、[3]中的限制和近似, 若令  $d_1 = 0$ , 则得到熟知的热稳公式  $G_1 G_2 = g_1^* g_2^* = (1/2)$ 。

本文所用的近似是热薄透镜模型, 这是常用的一个近似, 文献[1]、[3]都是在这一前提下讨论问题的。若使用类透镜介质或热厚透镜模型, 在低热扰下, 设主距不随热焦距改变

时,热厚透镜公式计算结果与热薄透镜公式并无实质性差异。当主距随热焦距改变时,也可用本文使用方法进行计算。

而文献[1]、[3]都只讨论了平行平面望远镜腔的热稳问题。文献[1]要求热薄透镜紧靠望远镜系统,且紧靠腔反射镜,条件较为苛刻,实验中实现相当困难。文献[3]在(i)  $|f_1|, |f_2| \gg |d|$ ; (ii)  $|f'| \gg |f_1|, |f_2|$ ; (iii)  $G_1 G_2 \cong (1/2)$ 假设下,推导出计算 $\Delta$ 的简单近似公式

$$\Delta = \frac{[f_2(f_1^2 + f_2 f') / 2d_2] - f_1^2}{V - f' - f_1} \quad (25)$$

并通过计算和实验证实,当 $f'$ 较大时该公式符合甚好。在望远镜腔的设计和实验工作中,失调量 $\Delta$ 的计算和调节是很重要的。我们认为,用本文推导出的公式与文献[3]所得结果作比较,不仅对失调量 $\Delta$ 可精确求解,而且,本文所得热稳公式具有人们乐于采用的解析形式,可直接用以从物理上分析望远镜热稳腔的特性,因此对望远镜腔的研究有实际意义。

(2) 利用(2)、(3)、(13)式不难证明(7)式与(12)式是完全等价的,且有 $G_1 G_2 = g_1^* g_2^*$ ,但是一般 $G_i \neq g_i^*$ 。

由本文的分析可知,正确使用等价腔的物理概念和有关的数学变换技巧可以方便地研究多元件谐振腔的动力学特性。但是,对腔的等价性意义理解上还存在有一些含混之处<sup>[6]</sup>。我们认为,腔的等价性是有条件的,特别是不同的成像方法会导致相异的等价模参数,不注意到这一点,就会导致错误的结果。

(3) 本文的分析方法可以推广用于含有三个以上透镜多元件腔的一般情况(其中有一个是热透镜),对于少于三个透镜的多元件腔不难作为本文特例具体分析。

作者曾就本文有关问题与西德 Prof. Dr. H. Weber 先生进行十分有益的讨论,谨此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] D. C. Hanna *et al.*; *Opt. Commun.*, 1981, **37**, No. 5 (Jun), 359~362.
- [2] J. Steffen *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1972, **QE-8**, No. 2 (Feb), 239~245.
- [3] Z. K. Lu, Y. Zhao; (*to be published*).
- [4] 魏光辉; 私人通讯。
- [5] 吕百达; 《激光光学》, (四川大学出版社, 成都, 1986), 222~228.
- [6] G. Herziger, H. Weber; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 10 (May), 1450~1452.

## Telescopic resonators for dynamic stable TEM<sub>00</sub> mode operation

Lü BADA

(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu)

(Received 30 June 1986; revised 8 August 1986)

### Abstract

In the general case the condition for thermal stability of telescopic resonators in TEM<sub>00</sub> mode operation is derived by using equivalent resonators and transfer matrix method. The expression is simple but strict, and can be generalized easily to the multielement resonators with many internal lenses one of which is thermal lens. The results are compared and discussed with those obtained by approximate methods.

**Key Words:** dynamic stable resonator; telescopic resonator; Gaussian beam parameter; transfer matrix method; condition for thermal stability.

---

### 首届国际激光和光学晶体讨论会在上海召开

由中国硅酸盐协会和中国光学学会联合召开的首届“国际激光和光学晶体讨论会”于1986年10月9日至12日在上海召开。出席会议的有来自西德、英国、日本、美国、苏联和中国六个国家的近79名专家、学者。学部委员干福熹教授担任会议主席。学部委员冯端教授出席了会议。

会议共录用论文近80篇，其中宣读的论文近40篇。论文的内容大致包括激光、光学和非线性晶体的生长、晶体性质、晶体光谱、晶体缺陷以及晶体物理的研究成果。

在晶体生长技术方面：西德汉堡飞利浦公司的马替卡博士专门评述了晶体生长的各种方法、及其优缺点。日本无机材料研究所木村茂行总合研究官报告了用卤素灯聚焦加热浮区熔法生长非一致熔化材料YIG的研究成果，给人以启迪。上海光机所报告了《用改进的温梯法生长YAG:Nd晶体》的研究成果，获得二公斤以上大直径YAG:Nd单晶，可提供作为片状激光器的工作物质。所得结果引人注目。

几种早期生长的激光晶体至今乃有着强大的生命力。如安徽光机所报告的《用引上法生长变色宝石及其缺陷的研究》一文，这种宝石晶体作为激光器工作物质，仍有供不应求的趋势。从1964年开拓出来的YAG晶体，20多年来，研究工作经久不衰，这次会议上报告的论文就有7篇之多。品种除了YAG以外，还有GGG(Ca, Mg, Zr):(Nd, Cr)、GSGG、YAG:Cr等。

非线性晶体是激光器应用中不可缺少的元件，南京大学报告的《调制结构的LiTaO<sub>3</sub>晶体中二次谐波的产生》一文，是南京大学多年来在非线性晶体的一系列研究中的一个方面。山东大学的《自信频Nd:Y<sub>1-2</sub>Al<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>复合功能晶体》以及有机非线性晶体(二磷酸钾、LAP)等的研究，品种日益增多。

(下转第119页)