

多透镜谐振腔光束参数不变性研究*

李世忱 倪文俊 于 建

天津大学精密仪器系
1989年1月31日收到

给出了多透镜光学谐振腔的解析,分析了透镜腔光束参数的动态特性。提出一种补偿热焦距变化的影响的新观念,从而给出一种新形式的热稳定谐振腔——控制型热稳腔,或称软性腔。

一、引 言

具有折射率温度梯度和热应变的固体激光介质,以及增益呈径向不均匀分布的高功率气体激光介质,在光学上都被视为类透镜介质^[1]。由这种介质构成的激光器,其输出光束参数密切依赖于热作用。为克服这种热影响,迄今在谐振腔方面所做的努力,都是建立在 $dw/df = 0$ (光斑半径对热焦距的微分)的设计思想基础上的热不灵敏腔^[2-4],它们的共同特征都是只有在设计规定的热焦距值(因而也是特定的输入、输出功率)下才有效,而且这种补偿结果,只能是对热微扰的不敏感性,而并非真正的热稳定性。

本文要论述的热稳观念,是指腔光束参数的热稳定性。并且认为,在光束参数不变的前提下,激光器理应具有如下性能:即在不更换任何腔构元件的情况下,其输出功率应能随泵浦功率的增加而增加,在需要保持输出功率严格稳定的场合,可以通过稳定泵功率或腔损耗调节等手段来实现。从这一观点出发,本文将探讨激励水平显著变化的情况下,保持光束参数不变性(或称动态稳定性)的最可行方法。

二、单透镜谐振腔的光束参数动态特性

在几何光学范畴,前述的类透镜介质都可等效为一个光学厚透镜,从而又可等效为如图1(c)所示的薄透镜谐振腔,但该腔不再可能以双端高斯光束同时等价而简化为一个通常的空腔,因此把单透镜腔看成是另一基本光腔形式。该腔的解析早已由文献[1]给出,其参数 g , 镜面光斑半径 w_i , 束腰半径 w_{0i} 和腰位置 z_{0i} 可写成

$$g_1 = 1 - L_2/f - L'R_1; \quad g_2 = 1 - L_1/f - L'/R_2; \quad L' = L_1 + L_2 - L_1L_2/f, \quad (1)$$

$$w_i' = \lambda L / \pi (g_i / [g_i(1 - g_1g_2)])^{1/2}, \quad (2)$$

$$w_{0i}^2 = w_i'^2 / (1 + [\pi w_i'^2 / (\lambda R_i)]^2), \quad (3)$$

$$z_{0i} = L_i - R_i / (1 + [\lambda R_i / (\pi w_i'^2)]^2). \quad (4)$$

本文所论高斯光束参数 q_1 或 q_2 的不变性,是指其 w_{0i} 和 z_{0i} (图1(c))的不变性,因为只有这样才代表输出束参数的不变性。由(1)~(4)式可推断出,当 f 变化时,一般只有使 R_i

* 国家自然科学基金资助的课题。

和 L_i 都发生相应改变才有可能使 w_{0i} 和 t_{0i} 保持原值不变。

本文采用的符号规则：光学元件之间的间距、正透镜焦距和凹透镜曲率半径皆取正，反之为负。

三、多透镜谐振腔的等效

对于任何一个线性光学系统，光线的人射和出射关系都可以由该系统的光线矩阵

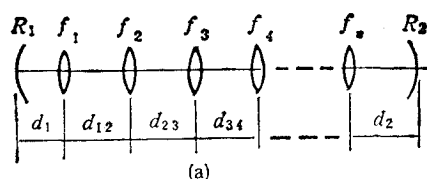
$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

确定。于是该系统的焦强 p 和主面位置 h_i 由下式决定：

$$p = 1/f = -C, \quad (5)$$

$$h_1 = (D - 1)/C, \quad (6)$$

$$h_2 = (A - 1)/C. \quad (7)$$



$$(b) \quad R_1 \left(d_1 \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix} d_2 \right) R_2$$

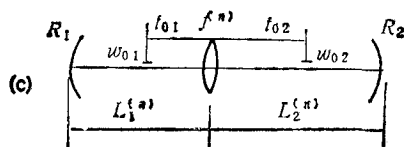


图 1

今设该系统是由图 1(a) 所示的多透镜系统和二个反射镜 R_1, R_2 (曲率半径) 组成的光学谐振腔，则经化简后的单透镜等效腔，由图 1(b) 和图 1(c) 表示。以 p_1 主面为参考平面的几个透镜系统的矩阵可写成

$$\begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -p_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_{n-1,n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{n-1} & B_{n-1} \\ C_{n-1} & D_{n-1} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

于是化简后的等效单透镜腔的参量可表示成

$$p^{(n)} = 1/f^{(n)} = -C_n, \quad (9)$$

$$L_1^{(n)} = d_1 + h_1, \quad (10)$$

$$L_2^{(n)} = d_2 + h_2. \quad (11)$$

R_1, R_2 未参于上述运算，故维持不变。上述诸式中加括号的上标代表腔内透镜序数。

根据 (8)–(11) 式，不难算出二透镜腔

$$(p_3 = p_4 = \dots = p_n = 0, d_{23} = d_{34} = \dots = d_{n-1,n} = 0)$$

的 3 个等效腔参量为

$$p^{(2)} = p_1 + p_2 - d_{12}p_1p_2, \quad (12)$$

$$L_1^{(2)} = d_1 + d_{12}p_2/p^{(2)}, \quad (13)$$

$$L_2^{(2)} = d_2 + d_{12}p_1/p^{(2)}. \quad (14)$$

同样可算出 3 透镜腔的 3 个等效腔参量为

$$p^{(3)} = p_1 + p_2 + p_3 - d_{12}p_1p_2 - d_{23}p_2p_3 - (d_{12} + d_{23})p_1p_3 + d_{12}d_{23}p_1p_2p_3, \quad (15)$$

$$L_1^{(3)} = d_1 + [d_{12}p_2 + (d_{12} + d_{23})p_3 - d_{12}d_{23}p_2p_3]/p^{(3)}, \quad (16)$$

$$L_2^{(3)} = d_2 + [(d_{12} + d_{23})p_1 + d_{23}p_2 - d_{12}d_{23}p_1p_2]/p^{(3)}. \quad (17)$$

对于四透镜腔有

$$\begin{aligned} p^{(4)} = & p_1 + p_2 + p_3 + p_4 - d_{12}p_1p_2 - d_{23}p_2p_3 - d_{34}p_3p_4 \\ & - (d_{12} + d_{23})p_1p_3 - (d_{12} + d_{23} + d_{34})p_1p_4 - (d_{23} + d_{34})p_2p_4 \\ & + d_{12}d_{23}p_1p_2p_3 + d_{23}d_{34}p_2p_3p_4 + d_{12}(d_{23} + d_{34})p_1p_2p_4 \\ & + d_{34}(d_{12} + d_{23})p_1p_3p_4 - d_{12}d_{23}d_{34}p_1p_2p_3p_4, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} L_1^{(4)} = & d_1 + [d_{12}p_2 + d_{12}d_{23}p_3 + (d_{12} + d_{23} + d_{34})p_4 - d_{12}d_{23}p_2p_3 \\ & - d_{12}(d_{23} + d_{34})p_2p_4 - d_{34}(d_{12} + d_{23})p_3p_4 \\ & + d_{12}d_{23}d_{34}p_2p_3p_4]/p^{(4)}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} L_2^{(4)} = & d_2 + [(d_{12} + d_{23} + d_{34})p_1 + (d_{23} + d_{34})p_2 + d_{34}p_3 \\ & - d_{12}d_{34}p_1p_2 - d_{23}d_{34}p_2p_3 - (d_{12} + d_{23})d_{34}p_1p_3 \\ & + d_{12}d_{23}d_{34}p_1p_2p_3]/p^{(4)}. \end{aligned} \quad (20)$$

这样,用递推方法即可得到含几个透镜腔的上列基本参量与 R_1 和 R_2 构成的等效单透镜腔。显然,上述的等效,仅指二个腔反射镜输出光束参数 q_1 和 q_2 的等效。各透镜之间的束参数,需按光束传播定理,或 Kogelnik 等效变换^[1]方法另行计算。

四、多透镜腔中光束参数的不变性分析

由上述分析可见,任何多透镜腔都可等效为图 1(c) 所示的单透镜腔。当 f 变化时,其余 4 个参量中一般不可能只调节其中的部分腔参量以使束参数 q_1 或 q_2 保持不变。但在二透镜腔中,则是可能的。

在二透镜腔中,当认为 d_1 , d_2 和 d_{12} 为常数,并取 f_2 为热无关薄透镜(或称硬透镜),则令

$$f_2 = d_{12} \quad (21)$$

时,由 (12)–(14) 式有

$$f^{(2)} = f_2 = d_{12}, \quad (22)$$

$$L_1^{(2)} = d_1 + d_{12}, \quad (23)$$

$$L_2^{(2)} = d_2 + d_{12}f_2/f_1. \quad (24)$$

又当

$$f_1 \gg d_{12}f_2/d_2 = d_{12}^2/d_2 \quad (25)$$

时,则 (24) 式成为

$$L_2^{(2)} \approx d_2. \quad (26)$$

这种腔结构示于图 2, f_1 表示激光介质。于是 (22), (23), (26) 式对应一个与热影响无关的激光器;而 (22), (23), (24) 式表达的激光器,是把热焦距效应仅限制在与 $L_2^{(2)}$ 一个参量有关(或可以是弱有关)的最简单情形。这时如欲维持束参数 q_1 和 q_2 热无关,仅需给与 d_2 一个带负号的

$$\delta d_2 = -d_{12}f_2\delta f_1/f_1^2 \quad (27)$$

或者

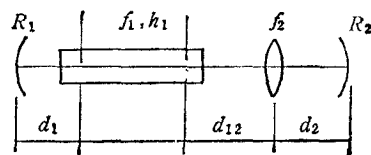


图 2

$$\Delta d_2 = -d_{12}f_2\Delta f_1/[f_1(f_1 + \Delta f_1)] \quad (28)$$

的补偿量即可,因为这样可得

$$L_2^{(2)}(f_1 + \Delta f_1) \equiv L_2^{(2)}(f_1), \quad (29)$$

式中 δf_1 表示热微扰;而 Δf_1 表示 f_1 较大范围的变化量. 具体实施是测量出 δf_1 或 Δf_1 (例如通过泵功率 P_{in} 的测量), 依照 (27) 或 (28) 式算出补偿函数 $-\delta d_2$ 或 $-\Delta d_2$, 经执行机构平移 $L_2^{(2)}$ 臂, 即取得完全补偿. 这样就找到一种新观念下维持光束参数不变性或者动态热稳定性的优化方法.

另一方面,原则上也可以使 L_2 臂按照特定的函数关系平移,从而控制束参数 q ; 按照所希望的规律变化. 无论如何,本方案都使计算和实施大为简化.

对于 3 透镜腔,维持束参数动态不变性的方案之一,也是把 f_3 取为硬透镜,并令

$$f_3 = d_{23}, \quad (30)$$

于是由 (15)–(17) 式有

$$1/f^{(3)} = 1/f_3 - d_{12}/(f_1f_3), \quad (31)$$

$$L_1^{(3)} = d_1 + (d_{12}/f_3 + 1)f^{(3)}, \quad (32)$$

$$L_2^{(3)} = d_2 + [(d_{12} + d_{23})/f_1 + d_{23}/f_2 - d_{12}d_{23}/(f_1f_2)]f^{(3)}. \quad (33)$$

可见在含有二热介质的 3 透镜中,已不存在象二透镜腔那样的简单补偿关系. 但再补充

$$f_1 \gg d_{12} \quad (34)$$

的条件后,则 (31)–(34) 式成为

$$f^{(3)} \approx f_3 = d_{23}, \quad (35)$$

$$L_1^{(3)} \approx d_1 + d_{12} + d_{23}, \quad (36)$$

$$L_2^{(3)} \approx d_2 + d_{23}^2(1/f_1 + 1/f_2). \quad (37)$$

从而又可构成象二透镜腔那样的控制型热稳定腔. 当再加入

$$f_1 \gg d_{23}, f_2 \gg d_{23} \quad (38)$$

的条件后,则 (37) 式成为

$$L_2^{(3)} \approx d_2. \quad (39)$$

从而也可构成无需调控的硬性近似热稳腔.

对于 4 透镜腔,同样把 f_4 取为硬透镜,并令 f_i 和 d_{ij} 不同程度地满足

$$f_i = d_{3i}, f_i \gg d_{ij} \quad (40)$$

时,则由 (18)–(20) 式可得到类似于 3 透镜腔的 L_2 臂控制补偿型,或者硬性的近似热稳腔.

类似的条件和结论,可推广到 n 个透镜腔. 这些腔的实例之一是多棒串接式固体激光器,但在大功率情况下,相应的光泵功率很高,这时 $f_i \gg d_{ij}$ 的条件,在结构上难以满足. 补救方法之一是修磨棒端面,以增加等效的 f_i ; 且可证明,这时 h_i 的热影响仍可很小,但 f_i 的热起伏量将随之增大. 这些将另文叙述.

五、结 论

1. 本文提出的多透镜动态稳定谐振腔,是高斯光束不变性腔. 有了不变性也就有了

容易明确定量的可变性,例如通过腔外变换来实现所需的焦位(即束腰位置)调节等。本文所给出的控制型补偿腔,对于单热介质腔存在精确的补偿关系,它不但实用于热扰动性补偿,也适用于热焦距大范围变化的情形。这是通常的热不灵敏腔和其它硬补偿措施(例如修磨固体激光棒端面等)所不能胜任的。同时也注意到满足(21)和(25)式时所对应的硬性热稳腔,这是一种新的低热敏腔。而且,只要能满足 $f_i \gg d_{ij}$,多透镜腔也能构成这种新形式的低热敏腔。

2. 上述的控制型热稳定腔和硬性低热敏腔,不必象通常的热不灵敏腔需要按照 $dw/df = 0$ 或 $dw/dp = 0$ 的限制设计腔结构参数,故本文提供的方法也适用于介稳腔和非稳腔。

3. 由本文的分析可见,我们的补偿方法,在形式上完全补偿了单热介质的焦距变化影响,但并不能补偿类透镜介质主面位置 h 的热扰动。幸而不难证明,把 h 视为与热无关的常数所带来的误差,即使在高功率激光器中,也是一个 10^{-3} 数量级的小量。

- [1] H. Kogelnik, *Bell Syst. Tech. J.*, **44** (1965), 455.
- [2] T. Steffen, *IEEE J. Quant. Elect.*, **QE-8** (1972), 239.
- [3] V. Magni, *Appl. Optics*, **25**(1986), 107.
- [4] 李世忱、倪文俊等,物理学报, **38** (1989), 567.

AN ANALYSIS OF PARAMETER CONSTANCY OF LIGHT BEAM FOR MULTILENS RESONATORS

LI SHI-CHEN NI WEN-JUN YU JIAN

Department of Precision Instrument, Tianjin University

(Received 31 January 1989)

ABSTRACT

An analysis is given for multilens optical resonators. Dynamic characteristics of beam parameters for multilens resonators are analyzed. A new concept of compensating the effects caused by the change in thermal focal length is presented. Hence, a new type of thermal stable resonators——controlled model resonators also called soft resonators is presented.