

内含热薄透镜四镜环形腔的光束特性

林碧洲

(华侨大学材料物理化学研究所, 泉州, 362011)

摘要: 二平二凹四镜8字型环形腔是色心激光、激光陀螺等研究经常采用的谐振腔。本文采用热薄透镜模型, 运用等效腔方法, 分析了四镜环形腔的光束特性。详细讨论了热效应对谐振腔基本特性的影响, 给出了四镜环形腔的热不灵敏条件。这些结果对谐振腔的设计和应用具有一定的指导作用。

Beam characteristics of the four-mirror ring resonator with an internal thermal thin lens

Lin Bizhou

(Institute of Material Physical Chemistry, Huaqiao University)

Abstract: The 8-shaped 4-mirror ring resonator containing two flat mirrors and two concave mirrors is widely used in color center lasers, laser gyroes and other research fields. With the model of a thermal thin lens, we give an equivalent linear cavity to analyse its beam characteristics. The thermal influences on its basic properties are discussed in detail. And the insensitive condition of the 4-mirror ring resonator to thermal thin lens is given. The results are useful to guide the resonator design and its application.

一、引言

环形激光器因其具有一系列优点而广泛用于激光的许多研究领域, 实际应用的环形腔以规则、对称最为常见。图1所示的二平二凹四镜8字型稳定环形腔是色心激光、染料激光、四频差动激光陀螺、激光光谱学等研究经常采用的谐振腔^[1~3]。我们曾利用光线传输矩阵方法对其空腔的光束特性作了初步的分析^[4]。然而, 实际激光运行中泵浦产生的热效应将影响谐振腔的基本特性。本文将泵浦产生的热效应概括为一个热

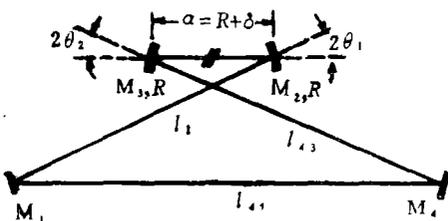


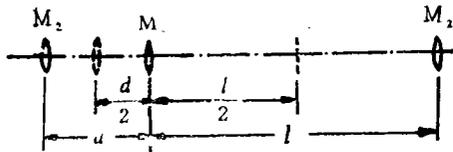
Fig. 1 Schematic diagram of the 8-shaped 4-mirror ring resonator

薄透镜, 在文献〔4〕基础上, 利用该腔的对称特点, 将其等效成一驻波腔。分析、讨论热效应对谐振腔基本特性的影响; 导出了谐振腔基模热不灵敏条件。所得的结果对谐振腔的设计和具有一定的指导作用。

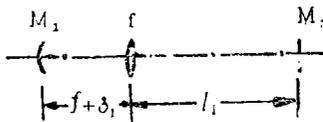
二、内含热薄透镜四镜环形腔的振荡模参数及基模热稳条件

1. 等效腔分析方法

忽略象散, 可将环形腔等效展成周期性薄透镜序列(图2a), 薄透镜焦距为对应折透镜



(a)



(b)

曲率半径的一半 ($f=R/2$)。由文献〔4〕知, 空腔时环形腔内存在两个束腰, 分别位于 $d/2$ 和 $l/2$ ($l=l_{12}+l_{34}+l_{41}$) 处。实际应用中, 一般将介质置于 $d/2$ 束腰上。利用谐振腔结构的这一对称特点, 将薄透镜序列从两束腰处切开, 则可用图2b所示的含有一个薄透镜的线形腔等效代替之, 线形腔的往返矩阵恰等于原来环形腔的环绕矩阵。图中, $l_1=l/2$, $\delta_1=\delta/2$ (δ 为环形腔稳定区内 M_2M_3 间距 d 的调整量)。

介质置于等效腔的镜 M_1' 位置上。忽略热效应(即空腔)时, 镜 M_1' 的曲率半径 $R_1'=\infty$; 存在热效应时, 则 $R_1'=2f$ (f 为热薄透镜的等效焦距)。图2b谐振腔的单程传输矩阵(以 M_1' 为参考平面)为

Fig. 2 Optical equivalents of the ring resonator
a—equivalent circle of thin lenses
b—equivalent linear cavity

$$M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{f}{\Delta} & \frac{f}{\Delta}(\Delta - \delta_1) \\ -\frac{1}{f} & -\frac{\delta_1}{f} \end{pmatrix} \quad (1)$$

G参数为

$$G_1 = -\frac{f}{\Delta R_1'}(R_1' + \Delta - \delta_1) \quad (2a)$$

$$G_2 = 1 - \delta_1/f \quad (2b)$$

式中, $\Delta = f^2/(l_1 - f)$

由G参数等效腔分析方法可方便地分析谐振腔的基本特性及其热效应的影响。

2. 谐振腔的基本特性及热效应的影响

(1) 空腔情形 空腔或忽略热效应的影响时, $R_1' = \infty$ 。此时,

$$G_1 = -f/\Delta \quad (3a)$$

$$G_2 = -\delta_1/f \tag{3b}$$

由判据 $0 < G_1 G_2 < 1$, 得稳定性条件

$$0 < \delta_1 < \mathcal{A} \tag{4}$$

镜 M_1' (介质) 上共焦参量 Z_0 满足

$$Z_0^2 = \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)^2 = (\mathcal{A} - \delta_1) \delta_1 \tag{5}$$

这些结果与利用光线传输矩阵法所得的结果^[4]一致。

(2) 存在热效应情形 由稳定性判据 $0 < G_1 G_2 < 1$, 得调整量范围随热效应变化如下:

$$0 < \delta_1 < \mathcal{A} \text{ 或 } R_t < \delta_1 < R_t + \mathcal{A} \quad (R_t < -\mathcal{A}) \tag{6a}$$

$$-\mathcal{A} < \delta_1 < \mathcal{A} \text{ 且 } \delta_1 \neq 0 \quad (R_t = -\mathcal{A}) \tag{6b}$$

$$R_t < \delta_1 < 0 \text{ 或 } \mathcal{A} + R_t < \delta_1 < \mathcal{A} \quad (-\mathcal{A} < R_t < 0) \tag{6c}$$

$$0 < \delta_1 < R_t \text{ 或 } \mathcal{A} < \delta_1 < \mathcal{A} + R_t \quad (0 < R_t < \mathcal{A}) \tag{6d}$$

$$0 < \delta_1 < 2\mathcal{A} \text{ 且 } \delta_1 \neq \mathcal{A} \quad (R_t = \mathcal{A}) \tag{6e}$$

$$0 < \delta_1 < \mathcal{A} \text{ 或 } R_t < \delta_1 < R_t + \mathcal{A} \quad (R_t > \mathcal{A}) \tag{6f}$$

一般地, 热效应参数 R_t 在米的数量级^[5], 而调整量极限 \mathcal{A} 在毫米量级, 即以 (6a), (6f) 情形为常见。不考虑随热效应变化的稳定区, 比较 (4) 式, 低热扰动不影响谐振腔稳定性区域的调整范围。热效应对谐振腔稳定性区域的影响只有在高扰动时 ($|R_t| \ll \mathcal{A}$) 才显著。

介质面 (镜 M_1') 上的基模光斑半径满足

$$Z_1^2 = \left(\frac{\pi \omega_1^2}{\lambda} \right)^2 = \frac{(\mathcal{A} - \delta_1) \delta_1 R_t^2}{(R_t - \delta_1)(R_t + \mathcal{A} - \delta_1)} \tag{7}$$

此时, 束腰偏离 M_1' 的距离为

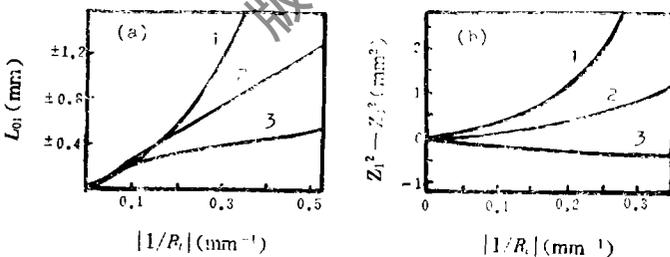


Fig. 3 Beam waist location (L_{01}) and confocal parameter (Z_1) versus thermal effect parameter (R_t) in the ring cavity with an internally thermal thin lens

(a) $L_{01} - 1/R_t$ (+ for $R_t > 0$; -, $R_t < 0$)

(b) $(Z_1^2 - Z_0^2) - 1/R_t$

1— $\delta_1 = \mathcal{A}/4$, $3\mathcal{A}/4$, $Z_0^2 = 1.8 \text{ mm}^2$ 2— $\delta_1 = \mathcal{A}/2$, $\mathcal{A}/2$,

$Z_0^2 = 2.4 \text{ mm}^2$ 3— $\delta_1 = 3\mathcal{A}/4$, $\mathcal{A}/4$, $Z_0^2 = 1.8 \text{ mm}^2$

$$L_{01} = \frac{(\mathcal{A} - \delta_1) \delta_1}{R_t + \mathcal{A} - 2\delta_1} \tag{8}$$

设 $f = 37.5 \text{ mm}$, $l_{12} = 270 \text{ mm}$, $l_{34} = 300 \text{ mm}$, $l_{41} = 410 \text{ mm}$, 有 $\mathcal{A} = 3.1 \text{ mm}$ 。图 3 示出了不同调整量 δ_1 下基模光斑大小和束腰位置随热效应的变化情况, 其中, Z_0 为空腔共焦参量。从图中可以看出: 当热扰动属负热薄透镜效应时, 热效应对谐振腔基本特性 (束腰位置、介质面上基模光斑) 的影响 $\delta_1 < \mathcal{A}/2$ 时较 $\delta_1 > \mathcal{A}/2$ 时大; 而当热扰动属正热透镜效

应时, 则 $\delta_1 < \Delta/2$ 时的热影响较 $\delta_1 > \Delta/2$ 时小。

3. 基模热稳条件

热焦距 f_t 随光泵功率而变化, 它将影响激光的输出特性。环形腔的热不灵敏条件可由

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial f_t} = 0 \tag{9}$$

给出。热不灵敏腔的真正含义是腔模体积对 f_t 的微小变化不敏感。

将(7)式代入上式, 得环形腔的基模热稳条件

$$R_t = \frac{2\delta_1(\Delta - \delta_1)}{\Delta - 2\delta_1} \tag{10}$$

热稳条件下, 介质面上的基模光斑半径 ω 满足

$$\frac{\pi \omega^2}{\lambda} = \frac{2\delta_1(\Delta - \delta_1)}{\Delta} \tag{11}$$

引入无量纲相对变化量

$$D = \frac{\delta_1}{\Delta}, \quad P = \frac{\Delta}{R_t}, \quad W = \frac{\pi \omega^2}{\lambda \Delta}, \tag{12}$$

(10) 式, (11) 式分别可化为:

$$P = \frac{1 - 2D}{2D(1 - D)} \tag{13}$$

$$W = 2D(1 - D) \tag{14}$$

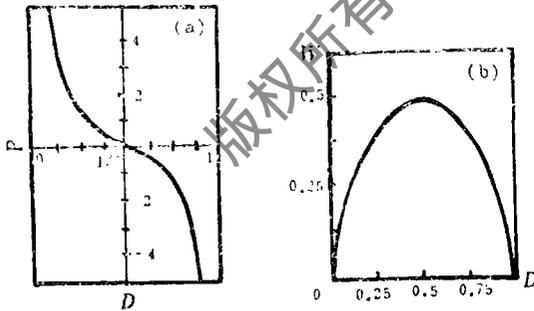


Fig. 4 P and W versus D under the thermally stable condition

(a) P - D relative curve (b) W - D relative curve

图4为热稳条件下, P 与 D , W 与 D 的关系曲线。可以看出, 热不灵敏腔参数 D 的取值范围为:

$$\frac{1}{2} < D < 1 \quad (P < 0) \tag{15a}$$

$$0 < D < 1/2 \quad (P > 0) \tag{15b}$$

W 的取值范围为:

$$0 < W \leq 1/2 \tag{16}$$

低热扰动 $P \sim 0$, 谐振腔的调整量 D 应选择 0.5 左右, 此时谐振腔的抗热扰动性、腔光束特性对腔调整量的稳定性均较佳^[4]。

三、分析与讨论

1. 上面的分析忽略了象散的影响。象散的存在将使光束在子午平面和弧矢平面内的行为出现差异, 以上分析结果分别在两平面内成立。事实上, 由于折迭镜的折迭角不大, 折迭镜在两平面内的有效焦距差别不大。实际应用中又可利用光在布儒斯特角放置的介质中所经过

的有效长度不同进行自补偿,使象散基本得到补偿^[4,6]。

2.从上面分析可知,通过选择适当的调整量可以克服或减缓热效应的影响。当热扰动属负热透镜效应时,调整量 δ_1 应取 $\delta_1 > \Delta/2$;当热扰动属正热透镜效应时,则应取 $\delta_1 < \Delta/2$ 。当调整量 δ_1 满足(10)式时,谐振腔的热稳性最好。此时, $G_1 G_2 = 1/2$ 。这与利用光线传输矩阵法的结果^[7]一致。

3.稳定环形腔内高斯光束 q 参数环绕一周自再现,驻波腔 q 参数则往返一周自再现。也就是说,环形腔传输光束参数计算的出发点是环绕矩阵,而驻波腔则为往返矩阵。本文利用8字型四镜环形腔结构的对称特点,使用等效腔的物理概念,将环形腔等效成一驻波腔进行分析,简化了分析过程。自由状态下,环形腔两传播方向相反的行波在各处具有相同的 q 参数和基模热稳性,而且这些基本光束特性与等效直腔对应各处的光束特性相同。应该说明的是,环形腔与所用的等效直腔并非完全等价。(1)在环形腔中采用抑制倒向波技术可以实现单向行波运行。行波运行可避免空间烧孔效应,易于实现单频工作。(2)由于环形腔内反射镜的存在,腔中 l_{12} 段和 l_{34} 段的光线与等效直腔中的对应段光线存在着镜象关系。

4.文中采用的近似是常用的热薄透镜模型。若使用热厚透镜近似,在低热扰动下,设主距不随热焦距而改变,热厚透镜计算公式与热薄透镜公式无实质差别,仍可用本文方法进行分析。

参 考 文 献

- [1] Giberson K W, Cheng C, Dunning F B *et al.* Appl Opt, 1982; 21(2): 172
- [2] 廖复中. 中国激光, 1982; 9(2): 112
- [3] 张国轩, 刘玉璞, 张影华 *et al.* 中国激光, 1985; 12(6): 366
- [4] 林碧洲, 黄妙良, 许承晃. 激光杂志, 1992; 13(2): 81
- [5] 方洪烈. 光学谐振腔理论. 北京: 科学出版社, 1981: 352~357
- [6] 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1986: 281~288
- [7] Peng K C, Wu L, Kimble H J. Appl Opt, 1985; 24(7): 938

* * *
作者简介: 林碧洲, 男, 1967年11月出生。研究实习员。现从事色心晶体材料和色心激光研究。

收稿日期: 1992年5月28日。 收到修改稿日期: 1992年11月23日。

· 简 讯 ·

半导体饱和吸收器锁定掺铒纤维激光器模式

结合饱和吸收器的锁模掺铒纤维激光器可获得有限转换320fs, 40pJ的激光脉冲。保偏光用来确立1.3m单模纤维激光器的偏振态。饱和吸收器是InP基片上外延2 μ mInGaAsP层, 放置在输出镜上实现突发脉冲锁模应用。

这种半导体材料可起到快速和慢速饱和的两种作用, 从而在运转中能有自动锁模和压窄脉宽。上述设计可能促使实现锁模纤维激光器的功能。美国密执安大学的Mohamed Islam和AT&T贝尔实验室的E.DeSouza及其同事们去年9月在美国阿尔伯克基城召开的OSA年会上宣读了这些结果。

译自L F World, 1992; 28(11): 9 卢中尧 译 巩马理 校