

含热透镜非稳腔的工作特性

吕百达 丘悦 蔡邦维

(物理系)

摘 要

使用矩阵光学方法,对含热透镜非稳腔的主要参数进行了计算,研究了这类光腔在有准直输出光束存在,即广义共焦条件满足时的特性。用光线追迹的几何作图证实了理论结果。

关键词 非稳腔, 矩阵光学, 光线追迹, 广义共焦条件。

因光泵浦产生的热透镜效应会使光腔复杂化,非稳腔亦不例外。实际工作中常是对高功率激光系统选用非稳型光腔,因此更有必要研究这一问题。以含有一个热透镜的非稳腔作为多元件非稳腔的典型例子,使用矩阵光学方法,对其本征球面波的主要参数作了分析,着重研究了当有平面波耦合输出,即广义共焦条件满足时光腔的特征。

1 多元件非稳腔的矩阵光学理论概要

理论分析和实验研究都表明^[1],球面波(特殊情况下可为平面波)是非稳腔基模的良好近似。文[2]已建立非稳腔本征球面波的正则表述理论,并将多元件非稳腔的主要参数用光腔往返一周矩阵元的形式表示出来。出于应用的目的,有必要将这些公式改用 G 参数表示。设组成多元件非稳腔的二反射镜 S_1 、 S_2 的曲率半径分别为 R_1 、 R_2 (对凹面镜,规定 $R_i > 0$,凸面镜 $R_i < 0$, $i = 1, 2$ 下同),以镜 S_1 为参考,腔内单程变换为

阵为 $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$,则往返一周矩阵可写为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2aG_2 - 1 & 2bG_2 \\ \frac{2}{b}(2aG_1G_2 - G_1 - a^2G_2) & 4G_1G_2 - 2aG_2 - 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\text{式中} \quad G_1 = a - \frac{b}{R_1} \quad G_2 = d - \frac{b}{R_2} \quad (2)$$

为多元件腔的 G 参数。

将(1)式代入文[2]中有关公式,经过适当数学运算,得到用 G 参数描述多元件非稳腔基模特征的主要方程。

镜 S_i 处本征球面波波面曲率半径 r_i ($i = 1, 2$)

本文于1988年6月2日收到

$$\frac{b}{r_1} = G_1 - a \pm \frac{1}{G_2} \sqrt{G_1 G_2 (G_1 G_2 - 1)} \quad (3a)$$

$$\frac{b}{r_2} = G_2 - d \pm \frac{1}{G_1} \sqrt{G_1 G_2 (G_1 G_2 - 1)} \quad (4a)$$

$$\text{亦可写为} \quad r_1 = \frac{G_2(a - G_1) \pm \sqrt{G_1 G_2 (G_1 G_2 - 1)}}{2aG_1 G_2 - a^2 G_2 - G_1} b \quad (3b)$$

$$r_2 = \frac{G_1(d - G_2) \pm \sqrt{G_1 G_2 (G_1 G_2 - 1)}}{2dG_1 G_2 - d^2 G_1 - G_2} b \quad (4b)$$

由直观的几何图象可知, (3)、(4)式也是分别以镜 S_1 、 S_2 为参考, 非稳腔共轭物象点位置 p_1 、 p_2 的方程。与使用几何成像法 (高斯公式)^[11]不同, 当 $r_1 > 0$ 时, 表示共轭点 p_1 在镜 S_1 的左方, $r_1 < 0$ 时, p_1 点在镜 S_1 的右方; 当 $r_2 > 0$ 时, 共轭点 p_2 在镜 S_2 的右方, $r_2 < 0$ 时, p_2 点在镜 S_2 的左方。

$$\text{往返一周放大率} \quad M = 2G_1 G_2 - 1 \pm 2\sqrt{G_1 G_2 (G_1 G_2 - 1)} \quad (5)$$

$$\text{能量损耗率} \quad \Gamma = 1 - \frac{1}{M^2} \quad (6)$$

多元件非稳腔是按 $\frac{A+D}{2}$ 或 $G_1 G_2$ 之值分类的。当 $\frac{A+D}{2} > 1$, 即 $G_1 G_2 > 1$ 时为正

支非稳腔, $\frac{A+D}{2} < -1$, 即 $G_1 G_2 < 0$ 时, 为负支非稳腔。对正支非稳腔, (3) — (6) 式中

取 “+”, 对负支非稳腔取 “-”。

文[2]定义的广义共焦条件可推广为

$$G_1 + a^2 G_2 = 2aG_1 G_2 \quad (7a)$$

$$\text{或} \quad G_2 + d^2 G_1 = 2dG_1 G_2 \quad (7b)$$

注意, 与简单非稳腔的公式^[1]相比较, 当作 $g_i \rightarrow G_i$ 的代换后, 仅 M 与 Γ 公式的形式保持不变, r_1 , r_2 公式形式上不再相同, 而含有腔内单程变换矩阵元, 这一点与多元件稳定腔的公式^[3]有类似之处。

2 含热透镜的非稳腔

对图1所示在距镜 S_1 为 l_1 处有一热透镜 (设热焦距为 f) 的非稳腔, 以镜 S_1 为参考, 腔内单程变换矩阵

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - l_2/f & l_1 + l_2 - l_1 l_2/f \\ -1/f & 1 - l_1/f \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$G \text{ 参数} \quad G_1 = 1 - \frac{l_2}{f} - \frac{1}{R_1} \left(l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f} \right)$$

$$G_2 = 1 - \frac{l_1}{f} - \frac{1}{R_2} \left(l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f} \right) \quad (9)$$

将(8)、(9)式代入(3)~(6)式,即可求出含热透镜非稳腔的主要参数,并可按文[2]方程完成非稳腔的几何光学设计。

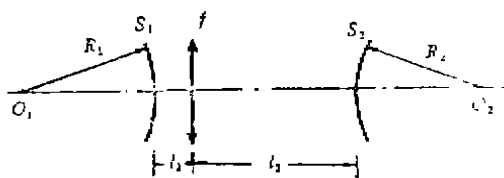


图1 含热透镜非稳腔

在实际工作中,常常对满足广义共焦条件的非稳腔感兴趣,因为采用适当的耦合方式,由这类腔可输出准直的平行光(平面波)。物理上,(7a)式表示在镜 S_1 —热透镜 f 段存在平行光条件,(7b)式表示在镜 S_2 —热透镜 f 段存在平行光条件。

1 镜 S_1 、 S_2 均为球面镜(R_1 、 R_2 取有限值) 利用(9)式可将(7a)式改写为

$$acR_1R_2 - a^2R_1 - (2bc + 1)R_2 + 2ab = 0 \quad (10)$$

推导中已略去 $b=0$ 的解,因会由此得出 $G_1G_2=1$ (临界腔条件)。将(8)代入(10)式,并设

$$R_1 = 2f_1, \quad R_2 = 2f_2 \quad (11)$$

$$l_1 + l_2 = L \text{ (几何腔长)} \quad (12)$$

对 l_1 求解得到

$$l_1^3 + (f + 2f_2 - 2L - f_1)l_1^2 + (L^2 + 2Lf_1 - 2Lf_2 - 2f_1f - 2f_1f_2)l_1 + Lf_1(2f_2 - L) + (2Lf_2 + 2Lf_1 - 2f_1f_2 - L^2)f + (L - f_1 - f_2)f^2 = 0 \quad (13)$$

这是决定 l_1 的方程。当 L 、 f_1 、 f_2 、 f 已定时,由(13)式可求出 l_1 的3个解。应根据物理条件(光腔几何长度量不能为零或负值, G_1G_2 应满足非稳条件等)和实际设计中允许的几何尺寸范围决定 l_1 的取舍。

将(13)式求得 l_1 值代入(9)、(3)、(4)就得到共轭物象点的位置 r_1 、 r_2 。简单的代数运算证明,所得解物理上代表两类不同情况:

$$(1) \quad r_1 \rightarrow \infty, \quad r_2 = -f_2 \left(1 + \frac{f_2}{l_2 - f_2 - f} \right) \quad (14)$$

这时存在由镜 S_1 →热透镜 f 方向的平行光。

$$(2) \quad r_1 = -f_1, \quad r_2 = f - l_2 \quad (15)$$

这时存在由热透镜 f →镜 S_1 方向的平行光。

在镜 S_2 至热透镜 f 段有平行光存在的情况。由(7b)式出发,仿上计算得出决定 l_2 的方程

$$l_2^3 + (f + 2f_1 - 2L - f_2)l_2^2 + (L^2 + 2Lf_2 - 2Lf_1 - 2f_2f - 2f_1f_2)l_2 + Lf_2(2f_1 - L) + (2Lf_1 + 2Lf_2 - 2f_1f_2 - L^2)f + (L - f_1 - f_2)f^2 = 0 \quad (16)$$

$$\text{且 } (1) \quad r_1 = -f_1 \left(1 + \frac{f_1}{l_1 - f_1 - f} \right), \quad r_2 \rightarrow \infty \quad (17)$$

时,存在由镜 S_2 →热透镜 f 方向的平行光。

$$(2) \quad r_1 = f - l_1, \quad r_2 = -f_2 \quad (18)$$

时,存在由热透镜 $f \rightarrow$ 镜 S_2 方向的平行光。

2 镜 S_1 中有一个为平面镜 为确定起见, 设 $R_1 \rightarrow \infty$, 由 (7a) 式得

$$2cf_2 = a \quad (19)$$

$$\text{或者} \quad a = 0 \quad (20)$$

由 (19) 式得到, $G_1 G_2 = 1$, 由 (20) 得 $G_1 G_2 = 0$, 都使光腔成为临界腔。因此, 对于含热透镜的平面-球面镜非稳腔, 在平行平面镜 S_1 至热透镜 f 这一区域内, 不可能存在平行光。

由 (7b) 式得到

$$2c(f_2 d - b) = 1 \quad (21)$$

另一解 $b = 0$ 会导致临界腔条件 $G_1 G_2 = 0, 1$ 应略去。将 (8) 代入 (21) 式有

$$2l_2^2 - 2(L + f_2)l_2 + 2f_2 L + 2f(L - f_2) - f^2 = 0 \quad (22)$$

$$\text{即} \quad l_2 = \frac{1}{2} [L + f_2 \pm \sqrt{(L - f_2 - 2f)^2 - 2f^2}] \quad (23)$$

$$\text{这时有: (1)} \quad r_1 = L - l_2 - f, \quad r_2 \rightarrow \infty \quad (24)$$

存在由镜 $S_2 \rightarrow$ 热透镜 f 方向的平行光。

$$(2) \quad r_1 = l_2 + f - L, \quad r_2 = -f_2 \quad (25)$$

存在由热透镜 $f \rightarrow$ 镜 S_2 方向的平行光。

当 $R_1 \rightarrow \infty, R_2 \rightarrow \infty$ 时, 易证由广义共焦条件会得到 $G_1 G_2 = 0, 1$ 。因此, 对含单透镜的平行平面非稳腔, 腔内不可能存在平面波。

上述分析结果, 从几何光学观点看是十分清楚的, 并得到大量数值计算的证实。典型例子见图2、3。图中本征共轭光线是用光线追迹方法作出的。

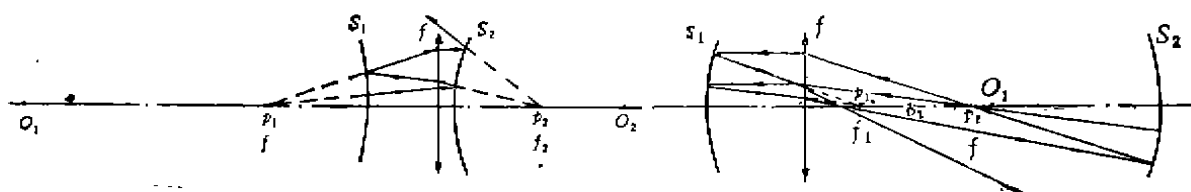


图2 含热透镜非稳腔的本征共轭光线(R_1, R_2 有限)

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad & f_1 = -2\text{m}, f_2 = -1\text{m}, f = 2.1\text{m} \\ & l_1 = 0.83\text{m}, l_2 = 0.17\text{m} \quad G_1 G_2 = 1.23 \\ & r_1 = 1.27\text{m}, r_2 = 1\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(b)} \quad & f_1 = 0.45\text{m}, f_2 = 0.4\text{m}, f = 0.5\text{m} \\ & l_1 = 0.31\text{m}, l_2 = 1.15\text{m} \quad G_1 G_2 = 1.18 \\ & r_1 = -0.45\text{m}, r_2 = -0.65\text{m} \end{aligned}$$

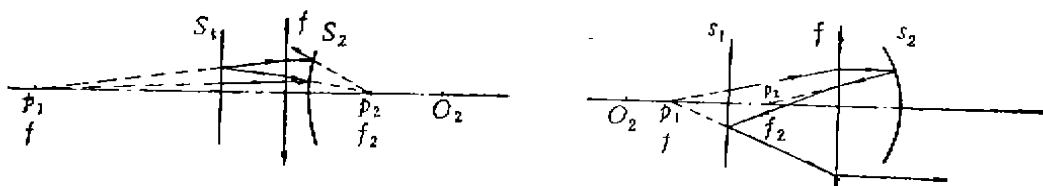


图3 含热透镜非稳腔的本征共轭光线($R_1 \rightarrow \infty$)

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad & f_1 \rightarrow \infty, f_2 = -0.75\text{m}, f = 3\text{m}, \\ & l_1 = 0.75\text{m}, l_2 = 0.25\text{m} \quad G_1 G_2 = 1.26 \\ & r_1 = 2.25\text{m}, r_2 = 0.75\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(b)} \quad & f_1 \rightarrow \infty, f_2 = 0.8\text{m}, f = 1\text{m} \\ & l_1 = 0.66\text{m}, l_2 = 0.34\text{m} \quad G_1 G_2 = -0.09 \\ & r_1 = 0.34\text{m}, r_2 = -0.8\text{m} \end{aligned}$$

3 小 结

1. 本文所得结果表明, 当由简单非稳腔过渡到多元件非稳腔时, 有的计算公式不能简单地由作 $g_i \rightarrow G_i$ 参数代换得出, 并且腔内本征共轭光线也变得复杂, 其传输变换的规律, 可用光线追迹法得出。

2. 对于含热透镜的非稳腔, 共焦条件不再具有简单非稳腔的形式 $2g_1g_2 = g_1 + g_2$ ^[1]。一般而言, 广义共焦条件的腔参数表示式取决于腔内存在平面波的区间, r_1 、 r_2 的公式还与平面波的传播方向有关。另一方面, 广义共焦条件还随热透镜焦距 (与泵浦参数有关) 而变化。因此, 准确地由实验测定热焦距的变化范围, 并选取在这一变化范围内, 共焦条件随热焦距变化不灵敏的腔型和几何参数, 显得十分重要。此外, 由图2、3知, 对多元件非稳腔, 区分实、虚共焦腔型已无多大实际意义, 因为即使对正支 ($G_1G_2 > 1$) 广义共焦腔, 在腔内亦可能存在有光束的会聚点。在光腔设计和实验中注意到这点, 以避免腔内光学元件的损坏。

3. 本文所使用的方法可直接推广用于更复杂的多多元件非稳腔 (例如腔内置望远镜系统的非稳腔) 的分析和计算。当然进一步的推广会带来公式形式的复杂化。

本工作得到了四川省科委的资助, 谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] 周炳琨等, 激光原理, 北京, 国防工业出版社, 1984: 119.
- [2] Siegman A. E., IEEE J. Quantum Electron., 1976, QE12(1): 35.
- [3] 吕百达, 激光光学, 成都, 四川大学出版社, 1986: 222.

CHARACTERISTICS OF UNSTABLE RESONATORS WITH A THERMAL LENS

Lü Baida Qiu Yue Cai Bangwei

(Department of Physics)

ABSTRACT

In this paper, the fundamental parameters of unstable resonators with a thermal lens are calculated by using matrix optics methods. The characteristics of those resonators, if a collimated output beam exists, i. e. the generalized confocal condition is satisfied, are investigated in detail. The geometrical drawing by means of ray tracing has confirmed our theoretical results.

Key Words unstable resonator, matrix optics, ray tracing, generalized confocal condition,