

热不敏感腔的解与特征

张 光 寅

南开大学物理系, 天津, 300071

1990 年 5 月 17 日收到

本文发展了变换圆图解处理方法, 并运用它求得了热不敏感腔的一般解: σ 圆与 π 圆相切. 清晰地阐明了它的主要特征; 同时, 澄清了有关它的特征的若干不确切的看法. 进而, 还求得了最佳热不敏感腔的特别解: $g_1^* g_2^* = 1/2$; $L_2 = 0$ 或 $L_2 = R_1$.

PACC: 4260D; 42603

一、引 言

关于热不敏感腔 (TIR) 的研究已有不少的报道^[1-9]. Steffen 等人^[1]曾首次讨论了这种腔的问题, 并以较复杂的解析形式给出了它的一般解. 最近, Magni^[8]以较为简化的解析形式给出了解的表达式. 由于 TIR 的解是以一种多参数表征的解析形式, 使得这种腔的主要特征不易被清楚地揭示. 本文发展了变换圆图解处理方法, 并运用它求得了 TIR 的一般解, 清晰地揭示了它的主要特征; 同时, 还求得了最佳 TIR 的特解和它的结构参数关系.

二、变换圆处理方法

在文献[4]中曾运用变换圆图解方法处理了 TIR 的问题. 本文发展了这一方法, 给出定量的表述, 并用来详细地讨论 TIR 的特征.

变换圆处理方法是基于传播圆方法^[10]和模象理论^[11]的基础上发展的一种方法. 按照传播圆方法, 任一已知的高斯光束可用两个侧焦点 F, F' 来描写, 如图 1 所示. 侧焦点 F 与 F' 对称地位于高斯光束束腰的两侧. F, F' 两点离光轴的距离 b_0 与基模束腰半径 w_0 有如下的关系:

$$w_0 = \sqrt{\frac{b_0 \lambda}{\pi}}. \quad (1)$$

高斯光束传播至任意 z 处的波面的曲率半径 R 可由 σ 圆来确定, 它是通过 z 点和侧焦点 F, F' 的一个圆. z 处波面的曲率半径等于这个 σ 圆的直径. 高斯光束在 z 处的基模光斑尺寸可由 π 圆来确定, 它是通过侧焦点 F , 同时切光轴于 z 点的一个圆. z 处基模光斑尺寸 w_z 与这个 π 圆的直径 b_z 有如下的关系:

值得指出,在(5)和(6)式的关系中均不包含 f ,因而可知,上述同切关系与变换透镜的焦距值 f 的大小无关.可以推知,当透镜的 f 值变化时, σ 圆的象 σ' 圆总保持与 t 圆相切的关系.

σ' 圆与 t 圆的相切点 F' 应是随 f 值变化的.下面推求 F' 点的位置关系.作 t 圆圆心 O 分别至 F 点(σ 圆与 t 圆的相切点)和 F' 点的两条连线 OF 与 OF' ;再作 O 至光轴的垂线 Of ,连线 OF 与垂线 Of 间的夹角 θ_0 称为变换的初始转角;连线 OF' 与垂线 Of 间的夹角 θ 称为变换转角.再作 σ 圆与 σ' 圆的相关正交圆 ρ 圆与 ρ' 圆,它们分别通过 F 与 F' 点,和透镜所在处,则其半径分别为

$$v = \frac{sc}{s+c}, \quad (7)$$

$$v' = \frac{s'c'}{s'+c'}. \quad (8)$$

利用 σ 圆与 t 圆相切,和 ρ 圆与它们正交于 F 点的关系,容易求得初始转角为

$$\theta_0 = 2\operatorname{arccot} \frac{r_t}{v} = 2\operatorname{arccot} \frac{s+c}{s-c}. \quad (9)$$

类似地,利用 σ' 圆与 t 圆相切,和 ρ' 圆与它们正交于 F' 点的关系,及(3),(4)式的关系,不难求得 F' 点的变换转角为

$$\begin{aligned} \theta &= 2\operatorname{arccot} \left[\cot \frac{\theta_0}{2} - \frac{2r_t}{f} \right] \\ &= 2\operatorname{arccot} \left[\frac{s+c}{s-c} - \frac{2sc}{s-c} \cdot \frac{1}{f} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

显然, θ 随 $1/f$ 值的增大而变大.利用上述变换圆的关系,可以方便地处理 TIR 问题;阐明它的特征.

三、热不敏感腔的一般解

这里限于讨论腔内包含单一热聚焦透镜(激光棒)的 TIR 的问题,同时热聚焦透镜可作薄透镜近似处理^[8].图3示出

TIR 的图解.对于一个稳定腔,腔镜处的波面是与镜面相吻合的^[12],因而 R_1 镜处的波面可用一直径等于 R_1 镜的曲率半径的 σ_1 圆来描写(为简便起见,这个 σ_1 圆也可叫做 R_1 镜的 σ 圆).进而,作 σ_1 圆的 t 变换圆.当透镜的焦距为某一定值 f_0 时,它将 σ_1 圆变换为一对应的象 σ'_1 圆.后者切 t 圆于 F'_1 点,它的确切位置按(10)式的关系决定于 $1/f_0$ 值的大小.当热聚焦透镜的屈光度在 $1/f_0$ 值附近有一微扰 $\pm\Delta 1/f$ 时,它将引起 σ'_1 圆的

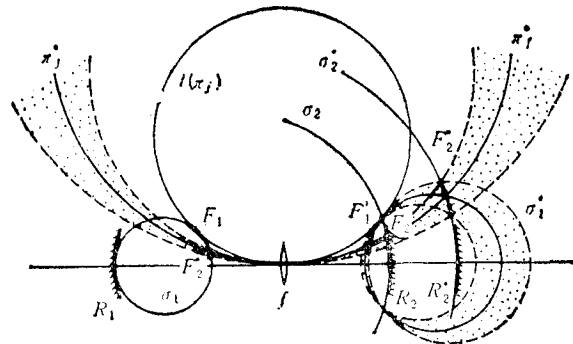


图3 热不敏感腔的图解

相应微扰变化。但由于这个微扰变化着的 σ'_1 圆总保持与 ι 圆相切的关系, 因而它与 ι 圆的相切点将在 F'_1 点附近沿 ι 圆圆周无规地来回移动。在热扰动不是太大的情况下, σ'_1 圆的变化在 F'_1 点附近是最小的, 而且是可以忽略的, 这由图 3 中可以清楚地看出。因此, 可以选择多种 R_2 镜, 只要求它的 σ_2 圆通过切点 F'_1 , 就可使腔内 R_2 镜一边高斯光束的侧焦点 F_2 (它由 σ'_1 圆与 σ_2 圆的相交点所决定) 最小变动, 而稳定在 F'_1 处。这意味着, 在这种腔结构中腔内 R_2 镜一边的高斯光束的传播特性最为稳定。显然, 这种情况相当于

$$\frac{d\omega_2}{df} = 0. \quad (11)$$

此处 ω_2 为 R_2 镜处基模光斑尺寸。由于侧焦点 F_2 稳定不动, 则热透镜处的 π_f 圆也稳定不动, 而且与 ι 圆重合, 由此应有

$$\frac{d\omega_f}{df} = 0 \quad \text{或} \quad \frac{dV_f}{df} = 0. \quad (12)$$

此处 ω_f 和 V_f 分别为热透镜(激光棒)处的基模光斑尺寸和基模体积。因此, 若以 R_2 镜作为激光器的输出端, 则由(11)式表明, 输出激光的模式特性应是稳定的, 对热扰不敏感的; 而由(12)式表明, 从激光棒抽取的激光输出功率也是较为稳定的。具有上述特性的谐振腔即是我们所要寻求的 TIR。

为了正确地概括出这种腔的一般判据, 仍利用图 3 中所示的图解关系。在这种腔中一个明显的特征是, 热透镜 f 处的 π_f 圆是与 ι 圆相重合的, 因而也正好是与 σ_1 圆相切的。可否将这一特征关系作为 TIR 的一般判据? 还需要作如下的反证。若取另一 R_2^* 镜, 它的 σ_2^* 圆不通过 F'_1 点, 如图 3 所示。此时, σ_2^* 圆与 σ'_1 圆的相交点 F_2^* 是随变化着的 σ'_1 圆而较大变动的; 热透镜 f 处的 π_f^* 圆也是较大变化的。由此可知, R_2^* 镜一方高斯光束的模式特性是不断地变化的; 激光棒处的基模体积也是不断地变化的。当 σ_2^* 圆偏离 F'_1 点愈远时, 上述变化则愈大。因此, 从这些腔中不可能有稳定的激光输出。在这些腔中, 显然 π_f^* 圆均不与 ι 圆相重合, 因而也都不与 σ_1 圆相切。

因此, 作为 TIR 的一般判据可以十分简单地表述为: 要求腔内热透镜处的 π_f 圆与腔镜之一的 R_1 镜的 σ_1 圆满足相切的关系。

四、热不敏感腔的主要特征

基于前节的图解分析与 TIR 的一般判据的表述, 容易阐明 TIR 的特征, 它主要有:

1. TIR 的一般解是一个多参数的多值解

TIR 的一般解涉及 R_1, R_2, L_1, L_2 与 f_0 五个参数。参数的多种组合均可满足 σ_1 圆与 π_f 圆相切的要求。即使在要求确定的 ω_f 与 ω_2 的情况下, 也可以通过协调 R_1, L_1 和 f_0 三个参数来实现。对 R_2 镜则有更多的选择自由, 只要求它的 σ_2 圆通过 F'_1 点即可。TIR 的一般解的多值性为我们设计 TIR 提供了较大的选择余地。

2. TIR 中热透镜处的基模光斑尺寸 ω_f 只决定于 R_1 镜的 u_1 参数, 即有

$$\omega_f = \sqrt{\frac{2|u_1|\lambda}{\pi}}, \quad (13)$$

此处

$$u_1 = \frac{L_1(R_1 - L_1)}{R_1}. \quad (14)$$

上面两式分别由(2)与(5)式导出. 这里的 u_1 参数与 Magni^[6] 所采用的相同. 上述结论与 Magni 的结论是一致的. 只是图解更直观地揭示了, u_1 参数的绝对值是 π_f 圆半径的一个直接量度. 基于这一特征, 在设计 TIR 的腔结构时, 可以方便地选取 $|u_1|$ 值, 预先确定激光棒中的基模光斑尺寸.

3. 关于 TIR 的条件

从上节的分析中可知, 作为 TIR 腔需要满足 $\frac{dw_2}{df} = 0$ 与 $\frac{dw_f}{df} = 0$ 或 $\frac{dV_f}{df} = 0$. 这与 Steffen 关于 TIR 的要求^[4]是一致的. 然而, 在文献[8]中仅要求 $\frac{dw_f}{df} = 0$ 即可. 我们认为这是不充分的. 因为若取一 R_2 镜, 其 σ_2 圆与 σ'_1 圆的实线圆相重合, 此时热透镜处的 π_f 圆基本不变化, 即 $\frac{dw_f}{df} = 0$, 但侧焦点 F_2 则是沿 σ_2 圆圆周变动的, 因而 $\frac{dw_2}{df} = 0$ 的条件不满足. 在这种情况下, 从 R_2 镜一端输出的激光的模式特性是不稳定的.

4. 关于 TIR 的热稳定性

直至现在关于 TIR 的热稳定性问题, 所有有关作者均由 $\frac{dV_f}{df} = 0$ 的关系得出 TIR 的稳功率特征的结论. 我们认为, 这一结论需要重新考虑. 尽管 $\frac{dV_f}{df} = 0$ 的关系满足时, 可以改善输出功率的热稳定性, 但必须考虑到激活介质的增益是随输入功率的增加而增大, 因而输入功率的起伏还会导致输出功率的相应变化. 只有在严格保持输入功率不变, 而 f 值的扰动仅由冷却水流等其它因素引起的情况下, 上述结论才是正确的. 然而, 输入功率的起伏通常是难以避免的. 因此, 从严格意义上讲, 通常的 TIR 是为稳模式的热稳腔, 而不是稳功率的热稳腔. 关于稳功率的热稳腔问题, 将另文讨论.

5. TIR 只有一个稳定的输出端

对于 TIR, 只有从 R_2 镜一端输出时, 才具有稳定的激光模式特性. 应当指出, 在 R_1 镜一边高斯光束的侧焦点 F_1 在热扰作用下是沿 σ_1 圆圆周变动的 (见图 3), 因而从这一端输出的激光的模式特性是不稳定的. 因此, 正确选择 TIR 的输出端乃是必要的. 但许多作者均未注意这一特征, 而在个别工作中则作了不正确的使用选择^[13], 而达不到 TIR 的应有效果.

6. TIR 兼有自动补偿激光棒热感应双折射引起的热聚焦象差的作用

在较大功率的泵浦作用下, 在激光棒中会引起明显的热感应双折射, 导致热透镜的热聚焦象差^[14]. 这时, 热透镜的焦距不能用单一的 f 值来表示, 而必需用两个焦距值 f_r 与 f_t 来表示. 在热感应双折射效应不是太大的情况下, 可用 $1/f_r$ 与 $1/f_t$ 的平均值作 $1/f_0$ 处理, 而将 $1/f_r - 1/f_0$ 与 $1/f_t - 1/f_0$ 合并到 $\pm \Delta 1/f$ 中去, 仍可作微扰处理. 这样, 按上节的一般解获得的 TIR 将兼有自动补偿激光棒热感应双折射引起的热透镜的热聚焦象差的作用.

五、最佳热不敏感腔的特别解

从上述 TIR 的一般解中已经清楚,在满足 σ_1 圆与 π_f 圆相切的条件下, R_2 镜可以有多种选择,只要其 σ_2 圆通过 F'_1 点即可。然而,仔细地区别各种可选择的不同的 R_2 镜,不难发现,其中应以在 F'_1 点与 π_f 圆正交的 σ_2 圆所对应的 R_2 镜为最佳。因为在这种情况下,在热透镜的同样程度的热扰作用下, F_2 点的变动乃是各种选择中最小。将这种腔结构称为最佳 TIR。图 4 示出这种腔结构与它的图解关系。由几何学知道,任何与 π_f 圆正交的 σ_2 圆必通过 π_f 圆与光轴的相切点,即热透镜 f 所在处。在这种情况下, R_2 镜的 u_2 参数等于零,即有

$$u_2 = \frac{L_2(R_2 - L_2)}{R_2} = 0. \quad (15)$$

上式也可等价地表示为

$$L_2 = 0 \text{ 或 } L_2 = R_2. \quad (16)$$

另外,与 π_f 圆在 F'_1 点正交的 σ_2 圆,显然也是与 σ'_1 圆正交的。由这一正交关系容易证明,这种腔的等价 g^* 参数应满足

$$g_1^* g_2^* = 1/2 \quad (17)$$

的关系。因此,同时满足(17),(16)两式的要求,可作为最佳 TIR 的判据。

下面通过引入 σ_2 圆的象 σ'_2 圆(见图 4)来推求最佳 TIR 中诸结构参数的关系。由传播圆的方法可知,这个 σ'_2 圆也一定通过 σ_1 圆与 π_f 圆的切点 F_1 (即 R_1 镜一方高斯光束的侧焦点),同时它也是与 σ_1 圆和 π_f 圆正交的。由这一正交关系不难证明, σ'_2 圆的直径为

$$L'_2 = \frac{2L_1(L_1 - R_1)}{2L_1 - R_1}. \quad (18)$$

在 $L_2 = R_2$ 的情况下, σ_2 圆的直径等于 $R_2 = L_2$ 。由 σ'_2 圆与 σ_2 圆的物象关系,可得

$$R_2 = \frac{f_0 L'_2}{L'_2 - f_0}. \quad (19)$$

在 $L_2 = 0$ 的情况下,上面两式同样成立。由(18),(19)两式,容易确定最佳 TIR 的结构参数。

应当指出,Steffen 等人^[1]曾提出 TIR 的一个特别解: $g_1^* g_2^* = 1/2$; $a = 0$ (即 $L_2 = 0$)。一些作者^[2,15]也曾采用这一特别解,并获得了预想的较好实验结果。但他们均没有注意到,这是最佳 TIR 的特别解。至于一些作者,只将 $g_1^* g_2^* = 1/2$ 作为 TIR 的一般判据,是不欠妥的。

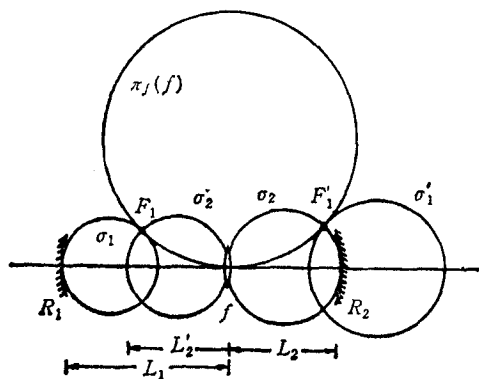


图 4 最佳热不敏感腔的图解

六、结 语

利用变换圆方法简捷地求得了 TIR 的一般解: σ_1 圆与 π_f 圆相切; 清晰地阐明了它的主要特征; 同时, 澄清了关于它的特征的一些不确切的看法. 特别需要指出的是通常的 TIR, 从严格意义上讲, 是为稳模式的热稳腔, 而不是稳功率的热稳腔. 进而, 获得了最佳 TIR 的特别解: $g_1^* g_2^* = 1/2$; $u_2 = 0$; 同时, 给出了它的腔结构参数关系, 为最佳 TIR 的设计提供了方便.

- [1] J. Steffen, J. -P. Lörtscher and G. Herziger, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE8** (1972), 239.
- [2] R. B. Chesler and D. Maydan, *J. Appl. Phys.*, **43** (1972), 2254.
- [3] J. -P. Lörtscher, J. Steffen and G. Herziger, *Opt. Quantum. Electron.*, **7**(1975), 505.
- [4] 张光寅, 激光, **4**(5)(1977), 41.
- [5] 张光寅, 激光, **8**(6)(1981), 9.
- [6] 李世泽, 激光, **8**(8)(1981), 5.
- [7] 王效敬, 中国激光, **12**(1985), 266.
- [8] V. Magni, *Appl. Opt.*, **25**(1986), 107.
- [9] 李世忱、倪文俊、杨巍、胡国绛、张润, 物理学报, **38**(1989), 567.
- [10] P. Laures, *Appl. Opt.*, **6**(1967), 747.
- [11] H. Kogelnik, *Bell. Syst. Tech. J.*, **44**(1965), 455.
- [12] G. D. Boyd and J. P. Gordon, *Bell. Syst. Tech. J.*, **40**(1961), 489.
- [13] A. J. Berry, D. C. Hanna and C. G. Sawyers, *Opt. Commun.*, **40**(1981), 54.
- [14] A. Stein, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE10** (1974), 427.
- [15] 陆祖康、范崎康、赵阳、邱文法、张利明、包成芳, 光学学报, **7**(1987), 879.

SOLUTIONS AND CHARACTERS OF THE THERMAL-INSENSITIVE RESONATOR

ZHANG GUANG-YIN

Department of Physics, Nankai University, Tianjin, 300071

(Received 17 May 1990)

ABSTRACT

In this paper the transformation-circle diagrammatic approach is developed. Using this method, the general solution of the thermal-insensitive resonator is derived, that is, the σ_1 circle is tangential to the π_f circle. Its main characters are elucidated clearly. Some inaccurate current points of view on its characters are made clear. Furthermore, the special solution of the optimal thermal-insensitive resonator is obtained, that is, $g_1^* g_2^* = 1/2$; $L_2 = 0$ or $L_2 = R_2$.

PACC: 4260D; 4260B