

非稳定共振腔的波型限制特性

赫 光 生

(中国科学院上海光机所)

提要: 采用几何光学和干涉仪理论,分析了较大菲涅尔数情况下,非稳腔内不同波型的区分方法以及它们彼此间的损耗率差异;讨论了腔的波型限制能力与腔的几何参数(腔长、横向通光孔径、波面放大率)之间的关系。

Mode restriction characteristics of unstable optical resonators

He Guangsheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: The mode discrimination and loss characteristics of unstable optical resonators with higher Fresnel number are analysed using theories of geometric-optics and interferometer. The parameters affecting the mode restriction ability are discussed.

一、望远镜型非稳腔的波型区分和损耗率相对差异

如图 1 所示,设望远镜型非稳腔由两个球面镜 M_1 和 M_2 按虚共焦状态组合而成,公共焦点为 F ;腔长为 L ;球面镜 M_1 球心为 C_1 点; M_2 镜横向尺寸半径为 a_0 ;腔的几何放大率因子为 $M = R_1/R_2$,这里 R_1 和 R_2 分别为两个镜面的曲率半径。

由图 1 可看出,相当于由焦点 F 发出的发散球面波,经 M_1 镜反射后成为平行于光轴的平面波,这就是望远镜腔内的轴向波型,它在往返一次过程中的波面放大率为

$$\frac{\overline{SS}}{2a_0} = \frac{R_1}{R_2} = M \quad (1)$$

与此相应,该波型在腔内往返一次的能量损耗(输出耦合)率为

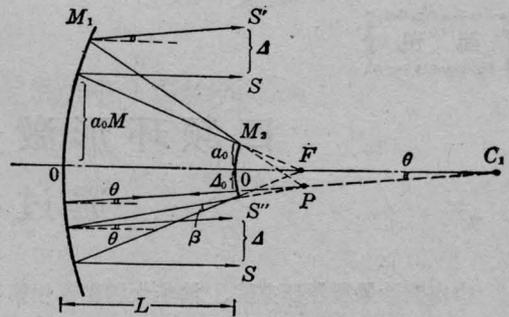


图 1 望远镜腔轴向与非轴向波型光路图

$$\xi = 1 - \left(\frac{2a_0}{SS} \right)^2 = 1 - \frac{1}{M^2} \quad (2)$$

以上是为已有理论所解决了的单波型(轴向波型)的损耗率问题。

下面进一步考虑多波型振荡下非轴向波型的损耗率问题。为此,考虑图 1 中过 F 点并垂直于光轴的平面内的任意一轴外像点 P ,相当于由 P 点发出的球面波经 M_1 镜反射

收稿日期: 1980年5月14日。

后, 成为与光轴成一定微小角度 θ 的非轴向平面波, 它在来回反射行进的过程中, 有一部分波面被镜 M_2 截获成为反馈光, 而其余部分则输出至腔外, 这就是望远镜腔内与轴外“发光”像点 P 对应的非轴向波型。下面着重分析非轴向波型相对于轴向波型而言, 为什么比较难于振荡, 这种难易的程度究竟与哪些因素有关。

在几何光学近轴近似下, 由相似三角形定律即可求出, 上面所考虑的非轴向波型在腔内往返一次后的波面放大率仍为

$$M' = \frac{\overline{S'S''}}{2a_0} = \frac{R_1}{R_2} = M$$

则按公式(2), 似乎非轴向波型的损耗率与轴向波型相同; 而实际上这种推断是不正确的, 这是因为至此为止, 尚未考虑到腔内增益介质有限孔径的限制影响。

在实际的非稳腔激光器系统中, 增益介质一般总是对称地沿腔的光轴方向置放, 并且介质的通光孔径应正好等于轴向波型往返一次后放大的波面横向尺寸 $2a_0M$ 。而对非轴向波型而言, 往返一次后波面尺寸虽然也扩大为 $2a_0M$, 但整个波束相对于光轴来说, 却横向偏移了一定的量 Δ (见图1); 从而造成这样一种情况, 即图1上半部中非轴向波型的一部分波面被增益介质侧面挡住或漫反射而损耗掉, 而图1下半部中非轴向波型的波面却未能全部充满增益介质空间。这意味着, 非轴向波型的实际损耗率增大了, 或者说对增益介质的有效利用空间减少了。

先从对增益介质空间利用效率来说明轴向与非轴向波型产生振荡的难易程度的差别。由图1可以看出, 非轴向波型往返一次后的横向偏移量在近轴近似下为

$$\begin{aligned} \Delta &= \overline{SS''} - \overline{SS'} = \beta L + \theta L \\ &= L \left(\frac{\overline{FP}}{f_2} + \theta \right) = L \left(\frac{f_1 \theta}{f_2} + \theta \right) \\ &= L \theta (M + 1) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $f_1 = R_1/2$ 和 $f_2 = R_2/2$ 分别为两个反射

球面镜的焦距。已经假设轴向波型波面 SS' 正好充满整个增益介质空间, 所以轴向与非轴向波型对增益介质空间利用率的相对差异为(一维考虑下)

$$\delta V_{\text{增益}} = \frac{\overline{SS''}}{\overline{SS}} = \frac{\Delta}{2a_0M} = \frac{L\theta}{a} (1+M)/2 \quad (4)$$

式中 $a = a_0M$ 为增益介质的横向通光半径尺寸; M 为腔的几何放大率因子。

从另外一个角度, 即从不同波型实际损耗率相对差异出发来说明波型限制特点。如图2所示, 设增益介质沿光轴方向对称置放, 由公共焦点 F 发出的轴向波型, 在由球面镜反射后均匀充满整个工作物质。该轴向波型在反向传输过程中, 一部分波面被全反射凸球面镜所截获成为反馈光, 有效反馈面积为 $2a_0$ (考虑一维情况)。对于相当于由任意轴外像点 P 发出的非轴向波型而言, 往返一次后波面虽然也扩大为 $2a_0M$, 但由于横向偏移作用, 图2中上半部波面的边缘部分并不能通过增益介质, 只有相当于由凸面镜上面积 OQ' 发出的球面波才能经凹球面镜反射后刚好通过增益介质。这意味着, 对非轴向波型而言, 有效反馈面积相当于为(一维情况) $2a_0 - \overline{Q'Q} = 2a_0 - \delta_0$, 由此可求出望远镜腔轴向与非轴向波型有效反馈面积的相对差异为

$$\delta S_{\text{反馈}} = \frac{\delta_0}{2a_0} \quad (5)$$

参见图2和 Δ 的表示式(3), 可看出有如下方

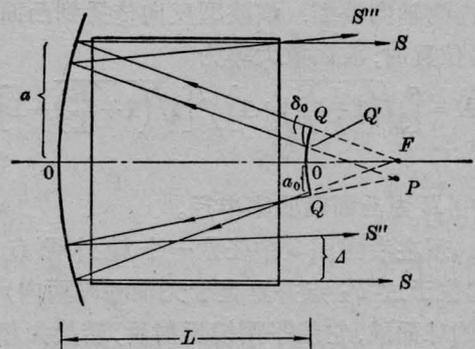


图2 望远镜腔轴向与非轴向波型的有效反馈面积

程式成立:

$$(2a_0 - \delta_0)M = 2a_0M - \Delta \\ = 2a_0M - L\theta(M+1)$$

从而可解出 δ_0 的表示式为

$$\delta_0 = L\theta(1+M)/M \quad (6)$$

将上式代入(5)式后可得

$$\delta S_{\text{反馈}} = \frac{L\theta}{a_0M}(1+M)/2 = \frac{L\theta}{a}(1+M)/2 \quad (7)$$

将(7)式与(4)式相比较可以看出, 两种表示式完全相同。这说明, 无论是从对增益介质空间的利用率来考虑, 还是从对波型的有效反馈面积来考虑, 都可以得出望远镜型非稳腔内轴向与非轴向波型的等效损耗率相对差异为

$$\delta\xi = \frac{L\theta}{a}(1+M)/2 \quad (8)$$

二、平凸型非稳腔的波型区分和损耗率相对差异

按照与望远镜腔同样的考虑程序, 亦可解决平凸腔的波型区分和波型限制特性方面的问题。

如图3所示, 设腔由平面镜 M_1 和凸球面镜 M_2 所组成, P_1 和 P_2 为满足往返一次自洽成像的一对轴上共轭像点。相当于由 P_1 点发出的球面波, 经平面镜 M_1 反射后, 转换为相当于由 P_2 点发出的球面波, 这就是平凸腔内的轴向波型, 该波型反向传播到凸面镜 M_2 位置时, 波面放大率为

$$M = \left[\sqrt{\left(1 + \frac{R}{L}\right) + 1} \right] / \left[\sqrt{\left(1 + \frac{R}{L}\right) - 1} \right] \quad (9)$$

式中 R 为凸面镜曲率半径。

现在考虑图3中任意一个轴外像点 P_1' (它位于过 P_1 点并垂直于光轴的平面内) 发出的球面波, 它经平面镜反射后, 转换为相当于由轴外像点 P_2' (它位于过 P_2 点并垂直于光轴的平面内) 发出的球面波, 该球面波相对

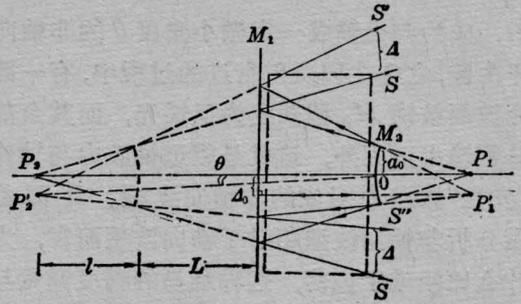


图3 平凸腔轴向与非轴向波型光路图

于输出镜 M_2 而言的中心行进方向与光轴成一微小角度 θ , 这就是平凸腔内的非轴向波型。由简单的相似三角形定律即可证明, 上述非轴向波型在腔内往返一次后的波面放大率因子仍为 M 并由同一公式(9)所确定。但与轴向波型相比所不同的是, 非轴向波型的波面在腔内往返一次后, 相对于轴向波型的波面而言, 侧面横向偏移了一定的数量 Δ 。为求出偏移量 Δ 的表示式, 在图3中过轴外像点 P_1' 向平面镜作一法线, 该法线与光轴的距离为 Δ_0 , 则 Δ 可写为

$$\Delta = (a_0 + \Delta_0)M - \overline{OS} - \Delta_0 \\ = \Delta_0(M-1) \\ = (2L+l)\theta(M-1) \quad (10)$$

式中 l 为平凸腔轴向波型发光像点 P_1 至凸面镜的距离, 并可写为

$$l = L \left[\sqrt{\left(1 + \frac{R}{L}\right) - 1} \right] \quad (11)$$

求出了横向偏移量 Δ , 则参照公式(4)或公式(7)的推导过程, 可求出平凸腔内轴向与非轴向波型, 对增益介质空间利用率或有效反馈面积的相对差异为

$$\delta V_{\text{增益}} = \delta S_{\text{反馈}} = \frac{\Delta}{2a_0M} \quad (12)$$

将(10)、(11)、(9)式一并代入(12), 可最后求得平凸腔内轴向与非轴向波型等效损耗率的相对差异为

$$\delta\xi = \delta V_{\text{增益}} = \delta S_{\text{反馈}} = \frac{L\theta}{a} M \quad (13)$$

将公式(13)与公式(7)相比较可看出, 在 L/a 值与 M 值相同的情况下, 平凸腔的波型限制能力, 要大于望远镜腔的波型限制能力。