

介稳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: 采用几何光学理论, 说明了介稳腔的分类概念和介稳工作条件。着重分析了最基本的二元介稳腔(平行平面腔、虚共心腔、实共心腔、各种零 g 腔)的波型区分和波型限制特性。最后讨论了与介稳腔实际应用有关的几个问题。

Mode restriction characteristics of metastable optical resonators

He Guangsheng

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

Abstract: The classification concepts and operational conditions for metastable resonators are given by using geometric-optics theory. The mode discrimination and restriction characteristics of the principal two-element metastable resonators (such as parallel-plane, imaginary concentric, real concentric and various zero g cavities) are analysed. Some problems concerning practical applications of metastable resonators are discussed in conclusion.

一、介稳腔的定义和一般特点

按照人们到目前为止的习惯看法, 通常把共振腔区分为两大类。一类称为稳定腔, 满足条件 $0 < g_1 g_2 < 1$ 。这里 $g_1 = 1 - L/R_1$; $g_2 = 1 - L/R_2$ 。其中 L 为腔长; R_1 和 R_2 为组成腔的两个反射镜的曲率半径。另一类称为非稳腔, 满足条件 $g_1 g_2 < 0$ 或 $g_1 g_2 > 1$ 。稳定腔的优点是损耗小, 调整精度要求低; 缺点是波型限制能力差, 输出光束发散角大。非稳腔的优点是波型限制能力强, 输出光束发散角小; 缺点是损耗大, 一般需采用侧面逸出输出耦合, 输出场图分布不均匀等^[1]。

为同时克服稳定腔与非稳腔的各自弱点, 有必要从理论上和实验上去探索新的腔

型。

本文讨论的重点是与稳区图中分界线所对应的一类共振腔的普遍特点。这一类腔既不全与稳定腔相同, 也不全与非稳腔相同, 而是处于两者之间, 因此把它们称为介稳腔是恰当的。介稳腔所满足的介稳工作条件分别为:

$$g_1 g_2 = 1 \text{ 或 } g_1 = 0 \text{ 或 } g_2 = 0$$

设腔的非涅耳数足够大, 则采用有关光学共振腔的几何光学理论, 可对这一类共振腔的波型区分和波型限制特性, 给出很简单很直观的物理说明。

图 1 给出了满足介稳条件的介稳腔的几种可能的组成方式, 并绘出了每种腔型内横向偏折损耗为零的基本波型的光束结构。

收稿日期: 1980年1月17日。

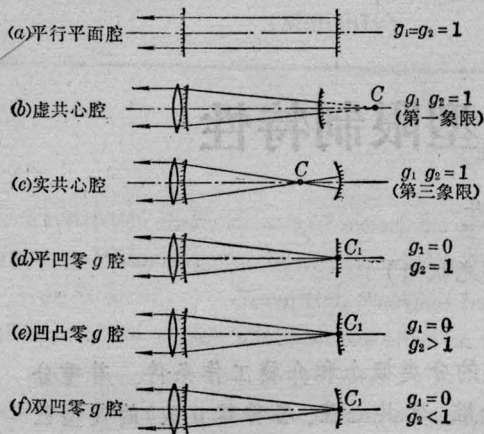


图1 各种介稳腔型和损耗最低的光束波型

图1(a)所示为平行平面腔,它为介稳腔中的一个特例,其横向偏折损耗为零的基本波型为沿光轴(两平面镜公共法线)方向往返行进的平面波,而沿与光轴成一定角度行进的非轴向波型,则存在不同程度上的横向偏折损耗。

图1(b)所示为虚共心腔,对应着稳区图中第一象限中的 $g_1g_2=1$ 曲线。其组成特点是一个曲率半径较大的凹球面镜的球心,与另一个曲率半径较小的凸球面镜的球心相重合。腔内横向偏折损耗为零的基本波型,是相当于由公共球心点 C 发出的球面波,该球面波型输出腔外并经一透镜准直后,可转换为平行于系统光轴的平面波型。

图1(c)所示为实共心腔,对应着稳区图中第三象限中的 $g_1g_2=1$ 曲线;其组成特点是两个凹球面镜的球心重合。腔内损耗率最低的基本波型,是相当于由公共球心 C 发出的球面波。

图1(d)至(f)所示为所谓零 g 型介稳腔,对应着稳区图中的某一条坐标轴分界线;其组成特点是一个凹球面镜的球心,正好落在另外一个反射镜面(可以分别是平面镜、凹球面镜或凸球面镜)上。腔内横向偏折损耗为零的基本波型,是相当于由落在一个镜面上的球心 C_1 所发出的球面波,该球面波型输

出并经透镜准直后,可转换为平行于系统光轴的平面波型。

下面的分析将表明,介稳腔中除了图1所画出的基本(轴向)波型外,还存在着一系列其他的非轴向波型,它们具有不同程度上的光能横向偏折损耗,并且不同波型间的损耗率相对差异,将与腔的组成方式和几何参数的选择有关。因此适当选择腔型及其几何参数,可较大幅度地提高介稳腔的波型限制特性,从而可期望获得低发散角和高亮度的激光输出。

二、平行平面腔的波型限制能力

对于平行平面腔而言, $g_1=g_2=1$,满足介稳条件 $g_1g_2=1$,因此属于介稳腔中的一种。由图1(a)可见,对于沿光轴方向行进的轴向平面波型而言,在几何光学近似下,往返一次过程中的光能横向偏折损耗可以忽略,亦即损耗率为

$$\xi_0 = 0 \quad (1)$$

而对于沿与光轴成 θ 角方向行进的非轴向平面波型而言,在腔内每往返一次,必然伴随着由于波束横向偏折所引起的光能逸出损耗。如图2所示,设腔的有效通光孔径为 $2a$,腔长为 L ,则非轴向平面波型在腔内往返一次的波面横向偏移量为 $\delta = 2L\theta$ (近轴近似下);由此可进一步写出非轴向波型往返一次的光能横向偏折(逸出)损耗率为

$$\xi_\theta = \frac{2L\theta}{2a} = \frac{L\theta}{a} \quad (2)$$

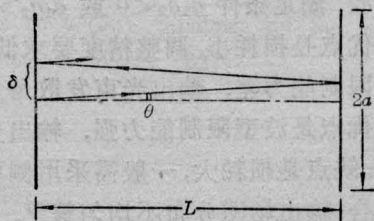


图2 平行平面腔中非轴向波型的横向偏折损耗

根据公式(1)和(2),可写出平行平面腔内,轴向($\theta=0$)与非轴向($\theta \neq 0$)平面波型的横向光能偏折损耗率的相对差异为

$$4\xi = \xi_{\theta} - \xi_0 = \frac{L\theta}{a} \quad (3)$$

由上面求得的公式(3)可以看出,在腔的几何参数 L 和 a 为给定的情况下, θ 角愈大的非轴向波型的损耗率也愈大,亦即相对于轴向波型而言也就愈难产生振荡,因此平面腔的波型限制能力远比一般稳定球面腔要强。另一方面,在其他条件一定的情况下,比值 L/a 愈大,则非轴向波型相对于轴向波型的损耗率差异也就愈大,因此腔对非轴向波型的限制能力也就愈强。在实验上,可分别采用拉长腔(增大 L)的方法或限孔(减小 a)的方法,来增强平面腔的波型限制能力和压缩输出发散角。但腔长的增大总是受到限制的;而采用限孔光阑的方法又往往不能充分利用工作物质的全部增益空间,导致输出功率或能量的下降;此外,平面腔对工作物质的热畸变和热焦距等效应比较敏感,很容易偏离理想情况。以上这些因素,都限制了平行平面腔的实际应用效果。

三、虚共心腔的波型限制能力

对于由图 1(b) 所示的虚共心腔而言,具有类似于平行平面腔的波型限制特点,只不过在平面腔情况下,腔内光束按具有不同行进方向的平面波型加以区分;而在虚共心腔情况下,腔内光束则按相当于由不同点发出的球面波型加以区分,其中只有通过公共球心的球面波型的横向偏折损耗为零,而其他的球面波型在往返过程中均存在不同程度的偏折损耗。

图 3 为几种具有实际应用意义的虚共心腔装置图及其基本球面波型的光路图。其中图 3(a) 为典型的虚共心腔,相当于由公共球心 C 发出的所有光线都是两球面镜的公共法

线,故可在腔内往返无限多次数而不会横向偏折出腔外;换一种说法,相当于由公共球心 C 发出的球面波在腔内往返过程中的光能横向偏折损耗为零,该球面波输出并经过具有适当焦距的正透镜系统后,可转换为平行于光轴的平面波,因此仍可把虚共心腔内损耗率最低的基本波型,称为轴向波型。图 3(b) 为由一块透镜式反射镜和一块凸球面镜组成的等价虚共心腔;透镜为正弯月式,它的凹面镀反射膜并且其球心与凸球面全反射镜的球心重合,而透镜的凸面镀增透膜,整个透镜的设计,是使透镜焦点与公共球心 C 点重合。图 3(c) 是由一块平凸式透镜反射镜与一块凸球面镜组成的等价虚共心腔;透镜的凸球面向腔内并镀增透膜,透镜的平面则镀反射膜,整个透镜的焦点与另一块全反射镜的球心 C 相重合。以上两种等价虚共心腔内横向偏折损耗为零的基本波型,都是相当于由球心 C 点发出的轴向球面波型,只不过由腔左端输出后,直接转换为平行于光轴的平面波。

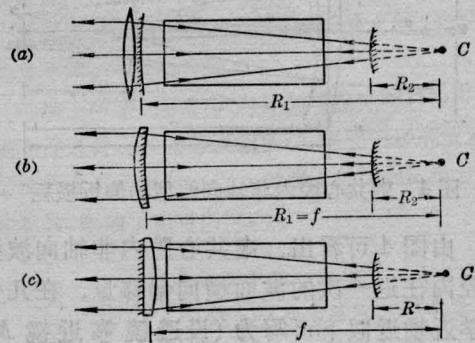


图 3 虚共心腔(a)和等价腔(b)、(c)

下面的进一步分析将表明,与同样 L/a 条件下的平行平面腔相比,虚共心型介稳腔的波型限制能力可显著增强。

首先来考虑图 3(a) 所示的典型虚共心腔中轴向与非轴向波型的损耗率差异问题。前面已提到过,相当于由公共球心 C 点发出的球面波在腔内往返一次过程中的光能横向偏折损耗为零,亦即

$$\xi_0 = 0 \quad (4)$$

为进一步求出非轴向波型的损耗率, 考虑过 C 点并垂直于光轴的平面内任意一轴外点 P 所发出的任意一条光线 s_1s_2 (见图 4), 由球面镜成像原理和几何作图方法可发现, 这样一条光线在腔内往返一定次数后必然横向偏折出腔外, 并且这些多次往返的光线的延长线恒交于 P 点和与它对称的 P' 点。由此可见, 这样一组多次往返光线的集合, 对应着腔内的一对球面波, 球面波的“发光”中心相当于轴外点 P 和 P' , 该球面波输出到腔外并经靠近 M_1 镜置放的具有适当焦距的透镜后, 转换成与光轴成一定角度的平面波, 这就是虚共心腔的非轴向波型。为便于说明起见, 图 4 中假设所选择的光线 s_1s_2 在第二次往返中的行进方向正好通过透镜的中心 O 点, 此时的光线行进方向与光轴夹角为 θ , 则相当于由 P 或 P' 点发出的非轴向球面波型经透镜后转换为与光轴成 θ 角的平面波型。

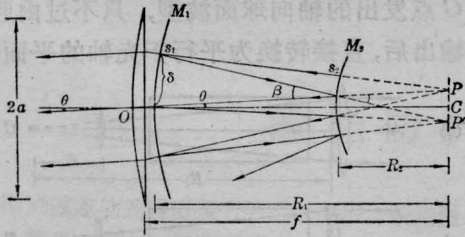


图 4 虚共心腔内非轴向波型的偏折损耗

由图 4 可看出, 虚共心腔内非轴向波型在腔内往返一次的波面横向偏移量, 在几何光学近轴近似下可写为 (设透镜靠近镜 M_1 置放, 腔长为 L)

$$\delta = \beta L = L \frac{PP'}{R_2} = 2L\theta \frac{R_1}{R_2}$$

设输出镜 M_1 上的有效通光直径为 $2a$, 则由此可进一步求出非轴向波型往返一次时的光能横向偏折损耗率为

$$\xi_\theta = \frac{\delta}{2a} = \frac{L\theta}{a} \frac{R_1}{R_2} \quad (5)$$

根据上面导出的公式 (4) 和 (5), 可最后写出虚共心腔内轴向 ($\theta=0$) 与非轴向 ($\theta \neq 0$) 波型的损耗率相对差异为

$$\Delta\xi = \xi_\theta - \xi_0 = \frac{L\theta}{a} \frac{R_1}{R_2} = \frac{(R_1 - R_2)\theta}{a} \frac{R_1}{R_2} \quad (6)$$

将上式与平面腔情况下对应的公式 (3) 相比, 可看出在 L/a 值相同的情况下, 虚共心腔的轴向与非轴向波型损耗率差异, 与平面腔相比增大了 R_1/R_2 倍; 换句话说, 虚共心腔的波型限制能力, 比平面腔显著增强, 增强的程度由比值 R_1/R_2 来决定。

对于由图 3(b) 所示的等价虚共心腔而言, 其腔内轴向与非轴向波型的损耗率差异, 显然与图 3(a) 所示情况相同, 亦即同样由公式 (6) 所表示。

对于图 3(c) 所示的等价虚共心腔而言, 通过类似的分析很容易证明, 腔内轴向与非轴向波型的损耗率相对差异为

$$\Delta\xi = \frac{L\theta}{a} \frac{f}{R} = \frac{(f-R)\theta}{a} \frac{f}{R} \quad (7)$$

四、实共心腔的波型限制能力

对于图 1(c) 所示的实共心腔而言, 其腔内波型的区分以及损耗率相对差异的确定方式, 与虚共心腔基本相同。相当于由腔内公共球心 C 发出的轴向球面波型在往返过程中的横向偏折损耗为零, 亦即 $\xi_0 = 0$ 。

为进一步求出非轴向波型的损耗率, 考虑过公共球心 C 并垂直于光轴的平面内的任意一轴外点 P 所发出的光线 PO , 这里 O 为靠近 M_1 镜置放的准直透镜的中心 (见图 5)。设光线 PO 与光轴夹角为 θ , 则相当于由轴外点 P 或与它对称的点 P' 所发出的球面

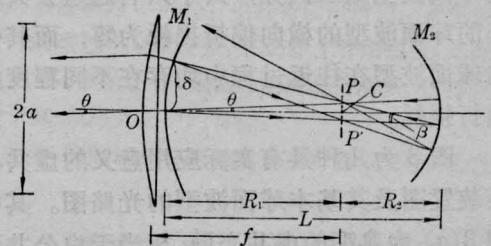


图 5 实共心腔内非轴向波型的偏折损耗

波,在输出到腔外并经透镜准直后,转换成为与光轴成 θ 角的平面波,以上就是实共心腔的非轴向波型。由图5可以看出,这种非轴向波型在腔内往返一次过程中的波面横向偏移量,在几何光学近轴近似下为

$$\delta = \beta L = L \frac{\overline{PP'}}{R_2} = L \frac{2\theta f}{R_2}$$

假设准直透镜与镜 M_1 的间距与 R_1 相比可以忽略,则可进一步求出非轴向波型往返一次的光能横向偏折损耗率为

$$\xi_0 = \frac{\delta}{2a} = \frac{L\theta}{a} \frac{R_1}{R_2}$$

从而可得出轴向与非轴向波型损耗率相对差异为

$$\Delta\xi = \xi_0 - \xi_0 = \frac{L\theta}{a} \frac{R_1}{R_2} = \frac{(R_1 + R_2)\theta}{a} \frac{R_1}{R_2} \quad (8)$$

从公式(8)与(6)的比较中可看出,在同样的 L/a 和比值 R_1/R_2 的条件下,实共心腔的波型限制能力与虚共心腔完全相同。但在实际使用上,实共心腔与虚共心腔还是有不同之处的,主要有两个方面:(1)在实共心腔内,公共球心 C 及其附近区域,是光束的汇聚区,而虚共心腔内则不存在光束汇聚点;(2)在同样的曲率半径 R_1 和 R_2 值的情况下,实共心状态所要求的腔长($L=R_1+R_2$)比虚共心状态所要求的腔长($L=R_1-R_2$)要长,这对缩小激光器系统尺寸来说往往是不便利的;在低功率或连续运转的器件中,实共心腔内球心位置附近光能密度比较高,因此适于置放腔内限孔元件、倍频元件以及待考查的散射或吸收样品等,这又是这种腔的优点。

五、零 g 型介稳腔的波型限制能力

(1) 平凹型零 g 腔[图1(d)]

根据平面镜的成象原理,腔长为 R 的平凹型零 g 腔在光学上等价于腔长为 $2R$ 的对称实共心腔。省略中间的光路往返的推导过

程,可以证明这种腔内的轴向与非轴向波型的横向偏折损耗率的相对差异为

$$\Delta\xi = \xi_0 - \xi_0 = \frac{2\theta L}{a} = \frac{2\theta R}{a} \quad (9)$$

由上式可见,这种腔的波型限制能力,相当于腔长 $L'=2R$ 的平面腔或对称实共心腔。

(2) 凹凸型零 g 腔[图1(e)]

如图6所示,考虑由镜 M_2 上任意轴外点 P 发出的非轴向波型。设该波型初始出发时的中心光线沿 PO 方向行进,则第一次往返后该中心线向图下方移动量为 $\delta'_1 = \beta L$;为求出 β ,可在图6中过 P' 点分别作光轴的平行线1和返向光线的延长线2,则有 $\beta = 2(\alpha + \theta) = 2(\theta + \overline{PP'}/2R_2)$,从而有

$$\delta'_1 = 2L\left(\theta + \frac{2L\theta}{2R_2}\right) = 2L\theta\left(1 + \frac{L}{R_2}\right)$$

上述光线在完成第二次往返后,又向图的上方横向偏移了数量 δ'_2 ,其大小为

$$\delta'_2 = \delta'_1 + \delta_2 = \beta L + 2\beta L = 6L\theta\left(1 + \frac{L}{R_2}\right)$$

依次类推,可求出 n 次往返后的横向偏移量为

$$\delta'_n = (2n-1)\beta L = (2n-1)2L\theta\left(1 + \frac{L}{R_2}\right)$$

设镜 M_1 的有效通光直径为 $2a$,则根据条件 $\delta'_n = 2a$ 可求出最大往返次数 n ,从而可写出非轴向波型单次往返的平均损耗率为 $\xi_0 = 1/n$ 。依此,可最后写出凹凸型零 g 腔内轴向与非轴向波型损耗率相对差异为

$$\begin{aligned} \Delta\xi = \xi_0 - \xi_0 &= \frac{2L\theta}{a} \left(1 + \frac{L}{R_2}\right) \\ &= \frac{2R_1\theta}{a} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

由上式可看出,在同样的 L/a 条件下,只要适

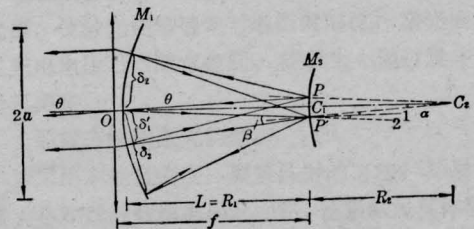


图6 凹凸型零 g 腔内非轴向波型的偏折损耗

当选取 $R_2 \ll R_1$, 可使腔的波型限制能力明显高于平凹型零 g 腔。

(3) 双凹型零 g 腔 [图 1(f)]

按照与上面相同的推导过程, 可求出双凹型零 g 腔内轴向与非轴向波型损耗率的相对差异。对于 $R_2 < R_1$ 的情况有

$$\Delta\xi = \frac{2\theta L}{a} \left(\frac{L}{R_2} - 1 \right) = \frac{2\theta R_1}{a} \left(\frac{R_1}{R_2} - 1 \right) \quad (11)$$

而对于 $R_2 > R_1$ 的情况, 则有

$$\Delta\xi = \frac{2\theta L}{a} \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) = \frac{2\theta R_1}{a} \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (12)$$

六、讨 论

(1) 虚共心类介稳腔的波型限制能力与

平面腔相比远为增强, 而且由于腔内基本波型为球面波, 对于工作物质无规则折射率动态畸变不敏感, 因此用于实际激光器中可望获得高亮度和场图均匀性好的高质量激光输出。这已为实验工作^[1]所充分证实。

(2) 在工作物质呈现出热透镜效应情况下, 热透镜的作用只不过是使第一个曲率半径较大的凹球面镜的表观球心位置发生移动; 此时, 只要相应移动另一个反射镜的前后位置, 就可补偿由热透镜效应产生的影响, 而保证共振腔仍在介稳状态下工作。

参 考 文 献

[1] 赫光生, 刘凤兰, 朱大庆: 《激光》, 1978, 5, No. 2, 6~10。

