

光学谐振腔的图解设计方法(一)

张 光 寅

(南开大学)

光学谐振腔是激光器的重要组成部分,它直接影响激光输出的模式特性、功率特性和稳定性。在激光技术的发展进程中,关于光学谐振腔的一般理论已经有了较好的解决^[1,2]。然而,有关光学谐振腔的理论,通常联系着一些较复杂的数学公式,这样,不便于人们掌握和运用。这里,我们尝试用图解的方法,将光学谐振腔的有关理论给以形象化的描写,这就使我们能够以更直观的形式,比较简易地处理一些光学谐振腔的设计问题。

我们所采用的图解方法是以描写高斯束传播特性的传播圆方法^[3,4,8]作为基础。与此同时,我们还引入了一种 f 变换圆的作图法作为补充,使得这种图解方法更为完善。在本文中我们用这种图解方法分析了简单球面镜腔、稳定基模固体激光腔、倍频腔和三镜染料激光腔等有关结构,并讨论了它们的最佳设计方案问题。文中着重讨论了固体激光器的稳定基模运转条件,同时提出了稳定焦距的概念,使我们能够较好地解决热透镜效应影响问题。

一、高斯光束的基本特性

由于受激发射过程和光学谐振腔的作用,在激光器内发生的和从激光器输出的光束是一种特殊的高斯光束。因此,为了更好地考虑光学谐振腔的设计问题,我们有必要先从了解高斯光束的基本特性入手。我们知道,高斯光束是一种具有均一球面波前的横向电磁波(通称为 TEM 波),它的横场分布可用厄密-高斯或拉盖尔-高斯函数来描写^[2]。对于一个沿 z 方向传播的高斯光束,其光场的变化可表示为

$$E \sim \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\omega^2} - j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x^2+y^2}{2R}\right), \quad (1)$$

其中

$$\omega = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \frac{(b/2)^2 + z^2}{(b/2)}}; \quad (2)$$

$$R = \frac{(b/2)^2 + z^2}{z}, \quad (3)$$

式中 λ 为激光的波长, ω 、 R 为高斯光束的两个特征量,分别表征其基模的光斑尺寸和波面曲率半径。 ω 和 R 都是 z 的函数,这表明在高斯光束传播的过程中, ω 和 R 都将不断地发生变化(参看图 1)。这是光波的衍射特性所决定的。式中 b 值是高斯光束的重要参数,它决定着高斯光束的两个特征量 ω 和 R 如何随 z 而变化的规律。

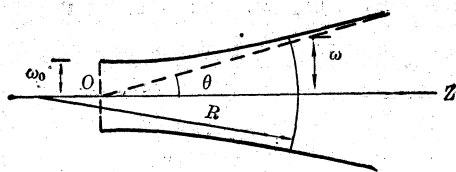


图1 高斯光束的传播特性

从(2)式可以看出,高斯光束基模的光斑尺寸 ω 在 $z=0$ 处具有最小值:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda b}{2\pi}} \quad (4)$$

高斯光束的这个最细部分通常叫做束腰。由(3)式可知,高斯光束束腰处的波面为一平面,即 $R=\infty$ 。对于给定波长的激光束, b 值是唯一决定高斯光束基模束腰光斑尺寸的一个参数。

在高斯光束的传播过程中,其光斑尺寸将随 z 的增大而愈来愈扩大。光束的这种扩展特性通常用光束发散角 θ 来描写,即有

$$\theta = \frac{\omega}{z} \Big|_{z \rightarrow \infty} = \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi b}} = \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (5)$$

由此可知,高斯光束束腰的光斑尺寸 ω_0 愈小,或 b 值愈小,则光束传播时扩展得愈快。相反地,欲使高斯光束有较好的平行性,束腰的光斑尺寸或 b 值必须要适当地大。由(2)式可知,在 $z = \pm b/2$ 处, $\omega = \sqrt{2}\omega_0$,也就是说,在 $z = -b/2$ 至 $z = +b/2$ 的区间内是高斯光束的最平行部分,光斑尺寸保持在 ω_0 至 $\sqrt{2}\omega_0$ 的量值之内。因此, b 值也可用来描写高斯光束的平行性,或叫做高斯光束的平行长度。

高斯光束除了有其基模形式外,还可以有高次模式。通常以 TEM_{00} 表示基模;以 TEM_{mn} 表示高次模。以同一 ω 和 R 表征的高斯光束,在任意 z 处, TEM_{mn} 和 TEM_{00} 具有同一的波面曲率半径,但其光束的截面,前者要比后者大 $\sqrt{(2m+1)(2n+1)}$ 倍。因此,基模是给定的高斯光束中光束最细窄的一种模式,因而,也是能量最集中的一种模式。这就是为什么在各种激光应用中都希望从激光器中获得高斯光束的基模输出。在各种激光谐振腔的设计中显然都须要考虑这一要求。

二、传播圆作图法^[3, 4, 8]

作为光学谐振腔图解设计方法的基础,先让我们熟悉一下传播圆作图法。传播圆作图法是用来描写高斯光束传播特性的一种图解方法。从上节对高斯光束特性的描写中可知,光束参数 b 值是高斯光束最重要的一个参数。确定了这个 b 值,高斯光束的各种传播特性都可以完全确定下来。传播圆作图法就是根据高斯光束的这一特点,利用作圆图的方法,来描写它的传播特性。

在传播圆作图法中首先定义了高斯光束的侧焦点 F 、 F' (参看图2),它们位于束腰平面上,对称地分置于高斯光束光轴的两侧,两者的距离为 b 值。因此,光束参数 b 值也叫高斯光束的侧焦距。确定了侧焦距,也就确定了束腰的光斑尺寸 ω_0 (参看(4)式)。

确定了侧焦点 F 、 F' 后,就可以通过作两种传播圆来决定高斯光束沿光轴任意点 p 处基模的光斑尺寸和波面的曲率半径:一是作 σ 圆,它是通过侧焦点 F 、 F' 和光轴上任意点处的一个圆。 σ 圆决定着高斯光束波面的曲率半径,通过任意点 p 处的 σ 圆的直径多大,则光轴上该

点处波面的曲率半径 R 也就有多大。另一为 π 圆，它是通过侧焦点 F ，同时又和光轴相切的一个圆。相切于 p 点处的 π 圆的直径 b' 可用来确定 p 点处的基模光斑尺寸 ω ，它可由下式计算而得，即有

$$\omega = \sqrt{\frac{\lambda b'}{\pi}} \quad (6)$$

σ 圆和 π 圆与高斯光束传播特性之间的上述关系不难证明。由图 2 中直角三角形 $\triangle EFP$ 和 $\triangle OFP$ 的相似性，即可导出 (3) 式的关系。类似地由 $\triangle FPQ$ 和 $\triangle FPS$ 的相似性，可以求得 π 圆的直径为

$$b' = \frac{(b/2)^2 + z^2}{(b/2)} \quad (7)$$

将这一关系式代入 (6) 式，即可得到 (2) 式的关系。

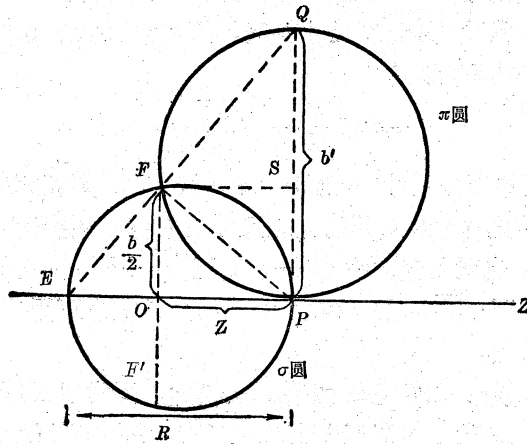


图 2 传播圆 σ 圆和 π 圆

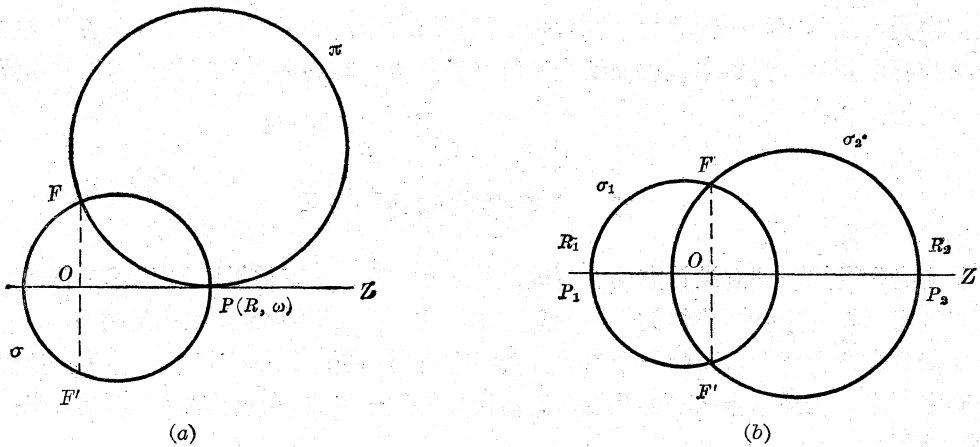


图 3 由 (a) 光轴上任意点处的 ω 和 R ，或 (b) 光轴上任两处的 R_1 和 R_2 确定高斯光束的传播特性

由上所述可知，对于任一高斯光束，只要确定了它的侧焦点，就可以通过作一系列的 σ 圆和 π 圆，来描写它的整个传播特性。

由上所述我们还可以明了，对于给定的高斯光束，各个 σ 圆和 π 圆都将交会于确定的侧焦点。因此，只要知道高斯光束在光轴上任一点处的波面曲率半径及其光斑尺寸，或光轴上任何两处的波面曲率半径，我们均可以通过作相应的 σ 圆和 π 圆，求其交点，即可定出该高斯光束

的侧焦点(参看图3)。确定了侧焦点,即可按上述作图法,同样确定出高斯光束的整个传播特性。

传播圆作图法为我们用图解方法设计光学谐振腔提供了十分有用的工具。

三、简单球面镜腔

先让我们运用传播圆作图法来分析简单球面镜腔的结构问题。激光器的光学谐振腔通常是由两块球面反射镜 R_1 和 R_2 (平面镜可看作是球面镜的特例) 所组成。它们的作用,就是为了能在腔内获得稳定的来回传播的高斯光束,以增强其间激活介质的放大作用。如我们所选用的这两个反射镜能够在腔内形成某种稳定的来回传播的高斯光束,那么这个高斯光束在这两个反射镜 R_1 和 R_2 处的波面必然各自与两镜的镜面相重合(可用图3(a)来说明)。也就是说,如果我们选定了反射镜 R_1 和 R_2 , 及它们的位置,那么可能在其间稳定的来回传播的高斯光束也就被唯一地确定下来。这时,我们可用类似于图3(b)所示的作图法来确定在腔内可能振荡的高斯光束。

在图4所示的例子中,两面反射镜所对应的 σ_1 和 σ_2 圆是相交的,因而,我们能够得到稳定的来回传播的高斯光束。这种谐振腔通常叫做稳定腔。如将两镜的距离拉远,或将两镜的距离适当地靠拢,使得与它们相应的 σ_1 圆和 σ_2 圆不能相交,这时,在谐振腔内不可能获得稳定的来回传播的高斯光束。这种谐振腔是为非稳定腔。在设计简单球面镜腔时,如果要求选择稳定腔结构,那么,首先要看一看谐振腔的两面反射镜所对应的 σ_1 圆和 σ_2 圆是否相交。

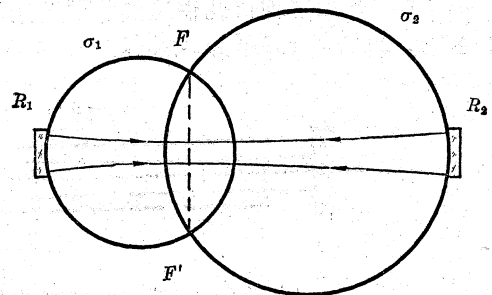


图4 简单球面镜腔和其中的高斯光束

在满足了这一条件的情况下,重要的是,还必须要考虑腔内可能产生的高斯光束的基模光斑尺寸和腔内激活介质的尺寸是否相匹配的问题,也就是说,要使腔内可能产生的高斯光束的基模的模体积尽可能地充满激活介质所占空间。如基模的模体积比激活介质所占的空间大得多,那么当高斯光束在腔内来回传播时,就会有相当大的一部分光能逸出激活介质区外,造成谐振腔内光能的较大损耗,因而严重影响激光的输出,甚至使激光的振荡不能发生。如基模的模体积比激活介质所占空间小得多,则容易在腔内形成高次模的振荡,或不能有效地从激活介质内取出应有的激光能量。

下面我们结合小型氩-氖激光器的一个例子,具体分析一下它的谐振腔的图解设计问题。国内通行的内腔式小型氩-氖激光器,一般采用平凹腔结构,其凹面反射镜的曲率半径取一米左右;腔长取20厘米左右。利用传播圆作图法,我们先作平面镜 R_1 和凹面镜 R_2 各自对应的 σ_1 圆和 σ_2 圆。如图5中所示的, σ_1 圆是一个与平面镜 R_1 相重合的平面; σ_2 圆则是一个直径为 $R_2=1$ 米的,通过 R_2 的曲率中心,并和 R_2 镜面相切的一个圆。这两个 σ 圆相交于 F 、 F' ,即为腔内可能产生的高斯光束的侧焦点,它们位于平面镜 R_1 所在平面上。由此可知,平凹腔中高斯光束的束腰应位于平面镜上。如我们把上述圆图作在坐标计算纸上,则我们由图中 F 和 F' 点的距离,即可直接定出高斯光束的参数 b 值;然后由(4)式即可计算出基模束腰的光斑尺寸 ω_1 , 约为0.28毫米。在 R_2 镜上的光斑尺寸可通过作一 π_2 圆而求得,这个 π_2 圆是通过 F

点,并和谐振腔的光轴相切于反射镜 R_2 处的一个圆。由图中可以看出,这个 π_2 圆的直径 b'

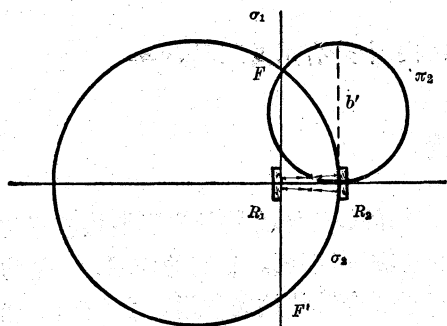


图5 小型氩氦激光器平凹腔结构的图解分析

等于 σ_2 圆的半径,即为 0.5 米。因而,将该值代入 (6) 式,即可求得反射镜 R_2 处的基模光斑尺寸 ω_2 , 约为 0.31 毫米。这样,我们用图解的方法,很快地获得了这种谐振腔内可能产生的高斯光束的基模光斑尺寸的数据。

对于这种小型氩-氦管,放电毛细管的内径 D 可按如下的关系选择(参看图 6), 即有

$$D \approx 3\omega_{\max}, \quad (8)$$

式中 ω_{\max} 为腔内最大的光斑尺寸。在这种情况下,基模光束既能较好地充满放电毛细管,又能以极低的

衍射损耗从管内来回通过;而对于较高次的模式,由于其模体较大,从管内通过时,衍射损耗较大,将不能维持振荡。这种由放电管的孔径自动抑制高次模振荡的方法,通常叫做自孔径选模技术。按照这种自孔径选模的原则来考虑,欲使上述激光器获得基模输出,放电毛细管的内径应取 0.93 毫米(即 $D=3\omega_2$)。

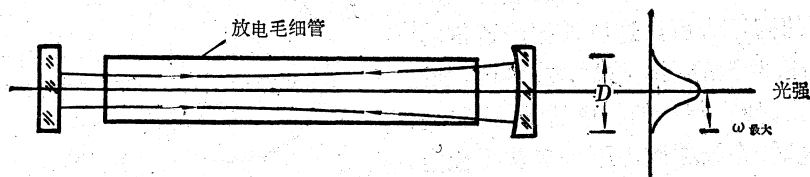


图6 高斯光束基模光斑尺寸和放电毛细管内径匹配示意图

在实际器件的制作中,还应考虑到毛细管的可能不平直度,及谐振腔反射镜的可能失调,因而实际选用的放电毛细管的内径还应比这个值再加大 10~20%,也就是说,应取 1.0~1.1 毫米为宜。国内常用的小型氩-氦激光器的放电毛细管径即是取这个量值,因而是较为合理的。

我们在设计激光器的光学谐振腔时,除了要考虑上述一些原则外,还应考虑其中激活介质的一些特点。在氩-氦激光器中,其激活介质的小讯号增益和放电毛细管的内径成反比,因而选择较小内径的管子有利于光模的增益放大。因此,在氩-氦激光器中,一般较多地采用小腔管(指放电管内径)大半径(指谐振腔反射镜的曲率半径)的结构。我们认为,这样的结构设计是较为合理的。