

光学谐振腔的图解设计方法(二)

南开大学物理系 张光寅

四、三镜腔和模象理论

在实际激光器中,我们不能不考虑腔内激活介质对高斯光束传播的影响。我们知道,腔内激活介质,在光泵或放电的作用下,都将不可避免地产生其间温度分布的不均匀性,或介质密度的不均匀性,由此引起介质内折射系数的不均匀分布。这时,激活介质将起一种类似于透镜的作用,因而影响腔内高斯束传播的特性和输出光束的特性。这种现象通常叫做热透镜效应。一般地,在连续固体激光器或脉冲液体激光器中,激活介质将起正透镜的作用;在气体激光器中将起负透镜的作用。在气体激光器中,这种热透镜效应较小,因而在一一般的情况下,其谐振腔我们可以用前节所述的简单球面镜腔来描写。而在固体或液体激光器中,热透镜效应一般较大,特别是连续运转和高重复频率运转的激光器,其激活介质的等效热透镜的焦距可为几米或几十厘米,而且这种等效热透镜焦距随泵浦功率的变化而变化,因此它将明显地影响激光器的输出特性。如何考虑这种热透镜效应的影响,应当是光学谐振腔设计中的一个重要问题。

在近似的理论处理中,我们可将这种激光谐振腔考虑为一种包含有一个简单薄透镜的三镜腔(图7)。在这里,一个简单薄透镜 f 代替了腔内的激活介质。我们在分析这种三镜腔中的光模时,可以用模象理论^[5]进行处理。运用模象理论,我们可以将一个较为复杂的三镜腔

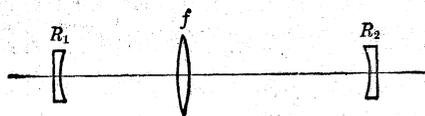


图7 三镜腔

问题,简化为一个两镜腔的问题。如图8所示,如果我们能够找到一个等效球面镜 R'_1 来代替反射镜 R_1 和透镜 f 的共同作用,这时,三镜腔即简化为一个由 R'_1 和 R_2 所组成的两镜腔。这样,我们即可以按上节中处理简单球面镜腔的方法来确定 R'_1 和 R_2 间可能传播的高斯光束。然后,再将该高斯光束从这一区域外延,再考虑高斯光束通过透镜的变换,即可获得整个腔内的光模的传播特性。

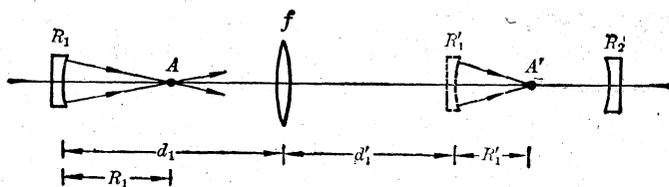


图8 三镜腔及其等效两镜腔

这里的一个关键问题,就是如何确定等效球面镜 R'_1 。按照模象理论,等效镜 R'_1 的位置可由下式确定:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_1'} = \frac{1}{f} \quad (9)$$

此处 f 为透镜的焦距; d_1 、 d_1' 分别为反射镜 R_1 及其等效镜 R_1' 离透镜的距离。 d_1 以在透镜的左方为正值; d_1' 以在透镜的右方为正值。

等效球面镜 R_1' 的曲率半径可由下式确定:

$$\frac{1}{d_1 - R_1} + \frac{1}{d_1' + R_1'} = \frac{1}{f} \quad (10)$$

式中 R_1 和 R_1' 分别为球面镜 R_1 和 R_1' 的曲率半径。

(9)、(10) 两式实际上是描写三镜腔内光模通过透镜的一种特殊的变换关系。我们知道, 不论在何种谐振腔内, 如能形成稳定的来回传播的高斯光束, 那么这个高斯光束在谐振腔的各反射镜处的波面必然与反射镜面相重合。在图 8 中, 高斯光束在反射镜 R_1 处的波面应是和 R_1 镜面相重合。当高斯光束从 R_1 镜向透镜方向传播时, 我们可以将 R_1 处的波面看成是一个“物”, R_1' 处的波面看成是前者的一个“象”。而 (9) 式即表明其间的“物”、“象”关系。再者, 从透镜 f 的角度来看, 发自 R_1 处这个“物”波面的光波和发自位于其曲率中心 A 处的一个“点光源”的光波, 两者是没有什么差别的。因而, 发自 R_1 处的光波可以看成是发自 A 处的一个“点光源”的光波。透镜的作用, 就是将这个“点光源”发出的光波重新会聚于它的“象点” A' 。而这个“象点”显然是 R_1' 处光束波面的曲率中心。(10) 式即是表明上述“物”波面和“象”波面的曲率中心之间的关系。求得了“象”波面及其曲率中心的位置, 也就完全确定了等效镜 R_1' 。

确定了等效镜 R_1' , 一个三镜腔问题也就被简化为一个两镜腔问题。和前节中分析简单球镜腔一样, 我们容易用图解方法确定 R_1' 和 R_2 之间的高斯光束。因而也就容易确定透镜右方的高斯光束。

剩下的问题就是如何进一步考虑透镜左方的高斯光束。透镜左方和透镜右方的高斯光束是互相联系的。利用传播圆作图法, 我们容易获知两者的变换关系。透镜右方的高斯光束既已确定, 那么它的侧焦点 F_2 和 F_2' 也是确定了的。当高斯束自右方传递至透镜 f 时, 在其刚进入透镜前的波面可以用一 σ_2^0 圆来描写, 它是通过侧焦点 F_2 、 F_2' 和透镜中心的一个圆, σ_2^0 圆的直径即为该波面的曲率半径 ρ_2 (图 9)。此时, 高斯光束的光斑尺寸可用图中所示的 π 圆来描写, 它是通过 F_2 并和光轴相切于透镜中心的一个圆。高斯光束通过透镜后, 当其刚从透镜出来时, 在薄透镜的情况下, 其光斑尺寸应与刚进入透镜时的光斑尺寸相同, 也就是说, 它应以同一 π 圆来描写。但这时, 高斯光束的波面将发生变换, 它将对应于新的传播圆 σ_1^0 , 其曲率半径 ρ_1 可由如下公式求得:

$$\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{f} \quad (11)$$

式中 ρ_1 以 σ_1^0 圆在透镜的左侧为正值; ρ_2 以 σ_2^0 圆在透镜的右侧为正值。有了这个 π 圆和 σ_1^0 圆, 由两者的相交, 我们即可确定透镜左方的高斯光束的侧焦点 F_1 、 F_1' 。由此, 也就可以获知透镜左方高斯光束的整个传播特性。这样, 我们就获知了整个三镜腔内高斯光束的传播特性。

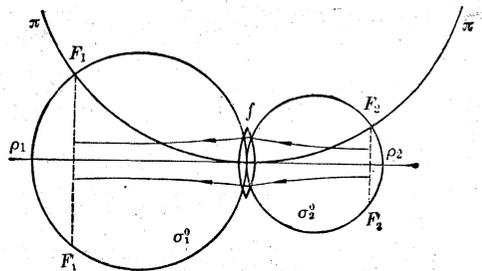


图 9 高斯光束通过透镜的变换

应用模象理论,原则上我们可以对各种三镜腔中的光模作出分析。然而,仅有模象理论,还不能解决谐振腔结构的最佳选择问题。关于这个问题,后面我们还要详细讨论。

除此以外,还应指出,上述描写模象理论的几个基本公式(9)、(10)、(11)式的成立都是有条件的,即要求透镜足够地大,使得光波能够无衍射损耗地通过它。但由于高斯光束的光能一般地较集中于它的光轴附近,因此,这些基本公式的适用性一般地容易被满足。

五、 f 变换圆

为了更好地运用图解方法分析三镜腔中的光模,我们引入一种 f 变换圆的作图法。 f 变换圆是用来描写透镜对光束的变换作用的一种圆。如一个焦距为 f 的透镜,其相应的变换圆就是一个以镜心为中心,以焦距 f 为半径所作的圆。下面我们来介绍 f 变换圆的运用方法。

任一高斯光束通过正透镜时,如其进透镜时的波面的曲率半径为 ρ_1 ,出透镜时的波面的曲率半径为 ρ_2 ,则与这两个波面相应的 σ_1^0 圆和 σ_2^0 圆与 f 圆,如图 10 所示,应同切于一个公切线。图 10 所示的关系是(11)式的一种图解,它相应于 ρ_1 和 ρ_2 均为正值的情况。事实上,由图 10 中 $\triangle ACF$ 、 $\triangle ODF$ 和 $\triangle BEF$ 的相似性,即可导出(11)式的关系式。利用图 10 所示的这种关系,我们容易由 ρ_1 图解求 ρ_2 ;或反过来由 ρ_2 求 ρ_1 。如已知 ρ_1 和透镜焦距 f ,即可作相应的 σ_1^0 圆和 f 圆;进而作两圆的公切线;然后,再作一圆,使其通过镜心,并同时和该公切线相切,则这个圆即为 σ_2^0 圆,它的直径即为 ρ_2 。

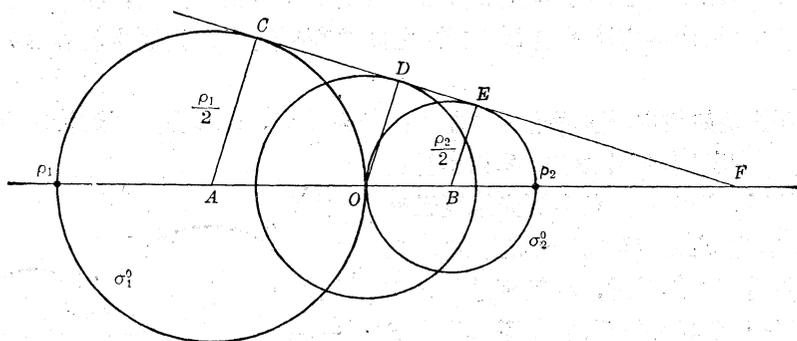


图 10 σ_1^0 、 σ_2^0 圆和 f 圆的联系(相应于 ρ_1 和 ρ_2 均为正值的情况)

须要指出,图 10 所示的例子是相应于 ρ_1 大于 f 的情况,如 ρ_1 仍为正值,但 $\rho_1 < f$,由(11)式可知, ρ_2 应为负值。在这种情况下,和 ρ_1 、 ρ_2 相应的 σ_1^0 、 σ_2^0 圆均位于透镜的左方,这时, σ_1^0 、 σ_2^0 圆和 f 圆不能简单地用一切切线来相切。但我们稍将(11)式进行变换,改变为如下的形式:

$$\frac{1}{-\rho_2} + \frac{1}{f} = \frac{1}{\rho_1} \quad (12)$$

这时, $-\rho_2$ 为正值。因此,和图 10 所示的情况相似,与 $-\rho_2$ 、 f 、 ρ_1 相应的 $(-\rho_2)$ 圆、 (f) 圆和 (ρ_1) 圆仍可借助于同一公切线将它们联系起来(图 11)。这里的 $(-\rho_2)$ 圆即为 σ_2^0 圆,其半径为 $-\rho_2/2$; (ρ_1) 圆的半径为 ρ_1 ,为 σ_1^0 圆的两倍; (f) 圆的半径为 $f/2$,为 f 圆的一半。同时, (ρ_1) 圆外切于 σ_1^0 圆; (f) 圆内切于 f 圆。

我们还可以分析 ρ_1 或 f 为负值等各种情况。分析表明,在所有不同情况下, σ_1^0 、 σ_2^0 圆和 f 圆之间的联系,只有上述两种情况,即一种是 σ_1^0 、 σ_2^0 圆分处于 f 圆的左右两方,如图 10 所示;

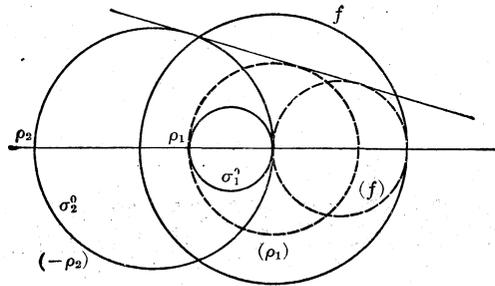


图 11 σ_1^0 、 σ_2^0 圆和 f 圆的联系(相应于 ρ_1 为正值, ρ_2 为负值的情况)

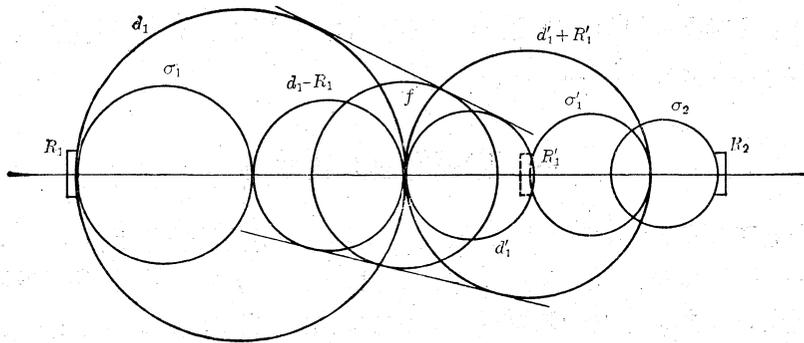


图 12 利用 f 圆作图法将三镜腔简化为等效两镜腔

另一种是 σ_1^0 、 σ_2^0 圆同处于 f 圆的一方, 如图 11 所示。因此, 利用 f 圆和 σ_1^0 、 σ_2^0 圆的上述联系, 我们可以方便地用图解方法来描写高斯光束通过透镜时的变换关系。

运用 f 圆作图法, 我们也可以方便地用图解方法, 将一个三镜腔的问题简化为两镜腔的问题。(9)、(10)两式在形式上和(11)式是相同的, 因此根据(9)、(10)两式的关系, 也可以利用 f 圆作图法, 由 d_1 获知 d_1' ; 由 $d_1 - R_1$ 获知 $d_1' + R_1'$ (图 12)。从图中还可以看出, 和 R_1 对应的 σ_1 圆与 d_1 圆、 $(d_1 - R_1)$ 圆相切; 而和 R_1' 对应的 σ_1' 圆则是与 d_1' 圆、 $(d_1' + R_1')$ 圆相切。因此可以说, f 变换圆的作用就是将 R_1 的 σ_1 圆变换为 R_1' 的 σ_1' 圆。于是, 我们只须分析 R_1' 的 σ_1' 圆和 R_2 的 σ_2 圆的相互关系, 就可以获知三镜腔内高斯光束的传播特征。

下面我们将运用上述这些基本作图法, 分析几个特别要求的激光腔。

* *

(上接第 33 页)

厘米, 漂移角最大不超过 50 微弧度, 它对光通讯的主要影响是造成了附加的闪烁。而慢漂移的尺度虽然较大, 但它的影响可用追踪办法来解决。由于已经有另文对这问题做了介绍^[5], 本文对此不再重复。

参 考 资 料

- [1] V. I. Tatarski, Wave Propagation in a Turbulent Medium. 1961.
- [2] P. J. Titterton, J. P. Speck; *Appl. Opt.*, **12** (1973), 425.
- [3] W. E. Webb, J. T. Marino; *Jr. Appl. Opt.*, **14** (1975), 1413.
- [4] P.L. Fried; *Proc. IEEE*, **55** (1967), 57.
- [5] R. S. Lawrence, J. W. Strohbehn; *Proc. IEEE*, **58** (1970), 1523.