

环形染料激光腔的分离参数设计方法

张 光 寅

(南开大学物理系固体能谱研究室)

近年来,利用环形行波激光腔以提高单频染料激光器的输出功率,曾经引起了人们的极大兴趣^[1~3]。然而,这种环形激光腔的设计是十分复杂的。它的复杂性在于,一般地必须考虑多元腔结构参数对腔内光模参数的相互影响。本文证明了高斯光束的一个特殊变换关系,同时在此基础上发展了一种分离参数的设计方法,使我们能够容易地设计适合各种要求的环形染料激光腔。

一、高斯光束的一个特殊变换关系

为了阐明环形染料激光腔的分离参数设计方法,有必要先证明高斯光束的一个特殊变换关系。如图1所示,设有一束高斯光束通过由透镜 L_1 和 L_2 组成的光学系统。若该高斯光束有一共焦参数为

$$b_1 = \frac{\sqrt{2} f_1^2}{l_{12}} \quad (1)$$

的束腰位于透镜 L_1 的左焦点 O_1 的左边,离 O_1 的距离为

$$l_1 = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \frac{f_1^2}{l_{12}}, \quad (2)$$

此处 f_1 为透镜 L_1 的焦距, l_{12} 为透镜 L_1 的右焦点 O_1' 与透镜 L_2 的左焦点 O_2 的距离,则当它经透镜 L_1 和 L_2 的相继变换后,从透镜 L_2 一端出射的高斯光束的共焦参数必为

$$b_2 = \frac{\sqrt{2} f_2^2}{l_{12}}, \quad (3)$$

且束腰位于透镜 L_2 的右焦点 O_2' 的右边,离 O_2' 的距离为

$$l_2 = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \frac{f_2^2}{l_{12}}, \quad (4)$$

此处 f_2 为透镜 L_2 的焦距。同时这个高斯光束在透镜 L_1 的右焦点 O_1' 和透镜 L_2 的左焦点 O_2 的正中间还有一束腰,其共焦参数为

$$b = (\sqrt{2} + 1) l_{12}, \quad (5)$$

束腰离 O_1 的距离为

$$l = l_{12}/2. \quad (6)$$

上述高斯光束的变换关系的证明是简单的。我们利用高斯光束通过一个透镜 L_i 时物

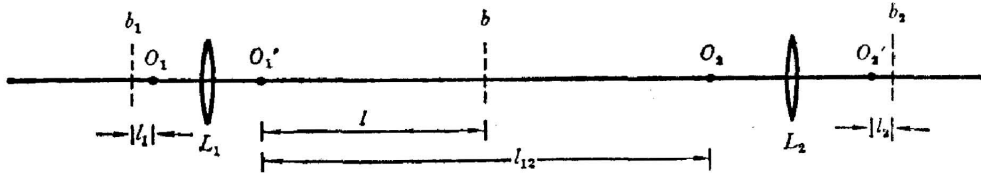


图1 高斯光束通过两透镜光学系统时的一个特殊变换关系

象两方束腰参数的如下两个变换公式^[4]:

$$b = \frac{b_s f_s^2}{l_s^2 + (b_s/2)^2}, \quad (7)$$

$$l = \frac{l_s f_s^2}{l_s^2 + (b_s/2)^2}, \quad (8)$$

此处 b_s, l_s 分别为物方高斯光束的共焦参数和束腰离透镜 L_s 物方焦点的距离; b, l 分别为象方高斯光束的共焦参数和束腰离透镜 L_s 象方焦点的距离。令(7)、(8)两式中的 $b_s = b_1, l_s = l_1, f_s = f_1$, 将(1)、(2)两式代入; 或令 $b_s = b_2, l_s = l_2, f_s = f_2$, 将(3)、(4)两式代入, 均得两透镜 L_1 和 L_2 间高斯光束的束参数为

$$b = (\sqrt{2} + 1)l_{12}, \quad l = l_{12}/2,$$

即(5)、(6)两式的关系。这就证明了上述高斯光束通过两透镜光学系统的一个特殊变换关系。

这一变换关系表明, 在此特定的光学系统中, 以特定方式传播的高斯光束, 在透镜 L_1 左方的束腰参数 b_1 和 l_1 只与 f_1 和 l_{12} 有关, 而与 f_2 无关; 在透镜 L_2 右方的束腰参数 b_2 和 l_2 只与 f_2 和 l_{12} 有关, 而与 f_1 无关; 而在两透镜 L_1 和 L_2 中间的束腰参数 b 和 l 则只与 l_{12} 有关。也就是说, 这里高斯光束的特征传播参数与相关的光学系统的参数之间具有简单的分离参数的关系。利用这一特殊的变换关系, 我们可以找到环形染料激光腔设计的简捷途径。下面我们结合三种不同腔型的环形染料激光腔的设计加以说明。

二、I型环形染料激光腔的设计方法

图2(a)示出I型环形染料激光腔的结构图。它是一种对称环形腔, 由两个等曲率半径的凹面反射镜 R_1, R_2 和两个平面反射镜 R_3, R_4 所组成。若光束在凹面反射镜处的折迭角 2θ 不大于 20° , R_1 与 R_2 镜的象散作用实际可以忽略。因而这种腔的光学特性可用图2(b)所示的等效光路来描写。这里我们考虑到这种腔结构的对称特点, 可以预知, 若在腔内存在稳定的光模, 在腔的对称点 C, C' 两处的光束波面应为平面波面, 也就是束腰在 C, C' 处。因此, 可以从 C 点断开, 将这种腔展成图2(b)所示的等效光路。并且若使高斯光束在其输入端与输出端取相同的束腰参数: $b_1 = b_2 = \sqrt{2} f_1^2 / l_{12}$; $l_1 = l_2 = (1 - \sqrt{2}/2) f_1^2 / l_{12}$ (此处 l_{12} 为两等效透镜 L_1, L_2 的焦点 O_1 与 O_2 间的光程), 则这一等效光路实际上就是图1所示的光路在 $f_1 = f_2$ 情况下的一个特例, 而该高斯光束就是满足自洽要求的腔内稳定光模。由此可知, 两个球面反射镜 R_1, R_2 的焦点 O_1 与 O_2 的间距为

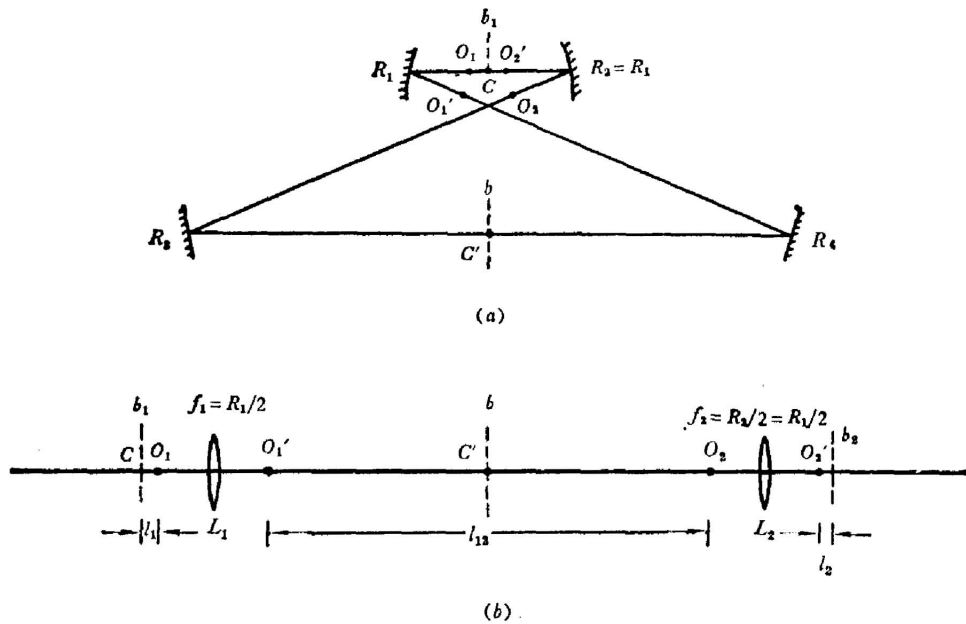


图2 I型环形染料激光腔及其等效光路

$$l_{11} = l_1 + l_2 = (2 - \sqrt{2}) \frac{f_1^2}{l_{12}}, \quad (9)$$

R_1-R_2 短腔臂中高斯光束的束腰位于其中点 C , 其共焦参数 b_1 可用(1)式表示; R_3-R_4 长腔臂中高斯光束的束腰也位于其中点 C' , 其共焦参数 b 可用(5)式表示。

利用(1)、(5)和(9)式, 我们可以容易地设计出特定要求的环形染料激光腔。如果我们要求在 R_1-R_2 短腔臂中有一小束腰(放置染料液膜), 同时在 R_3-R_4 长腔臂中有一较大光斑尺寸的准直光束(放置单向器和选频元件), 则我们可取较小的 f_1 值与较大的 l_{12} 值, 就能很好地满足上述要求。设取 $f_1 = 4 \text{ cm}$, $l_{12} = 120 \text{ cm}$, 则由(1)式可得 $b_1 = 1.88 \text{ mm}$ 。因而对于 $\lambda = 0.59 \mu$ 的激光来说, R_1-R_2 短腔臂中小束腰的光斑直径为 $2\omega_1 = 2\sqrt{\frac{\lambda b_1}{2\pi}} = 26.5 \mu$ 。再由(5)式可得 $b = 2.9 \text{ m}$ 。因而 R_3-R_4 长腔臂中束腰的光斑直径为 $2\omega = 1.04 \text{ mm}$ 。再由(9)式可得 $l_{11} = 0.78 \text{ mm}$ 。最后可得总腔长 $L = l_{11} + l_{12} + 4f_1 = 136.078 \text{ cm}$ 。

三、II型环形染料激光腔的设计方法

图3(a)表示II型环形染料激光腔的结构图。它是由三个不同曲率半径的凹面反射镜 R_1 、 R_2 、 R_3 和一个平面反射镜 R 所组成。在光束的折迭角不大的情况下, 我们仍可用图3(b)所示的等效光路来描写。若我们采用特定的腔结构参数, 使高斯光束在通过等效透镜 L_1 和 L_2 的前后, 恰好满足第一节中所述的变换关系[见图3(b)中上一部分的等效光路, 它显然是与图1的光路相同的], 则各束参数 b_1 、 l_1 、 b_2 、 l_2 、 b 、 l 可以仍用(1)~(6)式来描写。这样, 也就规定了特定束参数的高斯光束。要使这样的高斯光束实际成为腔内的稳定光模, 则还应要求 b_2 束腰处的光束参数通过等效透镜 L_3 的变换后, 恰好能够得到 b_1 束腰处的光束参数。为此, 由(7)、(8)两式可知, 这两处的束参数必须满足如下的关系:

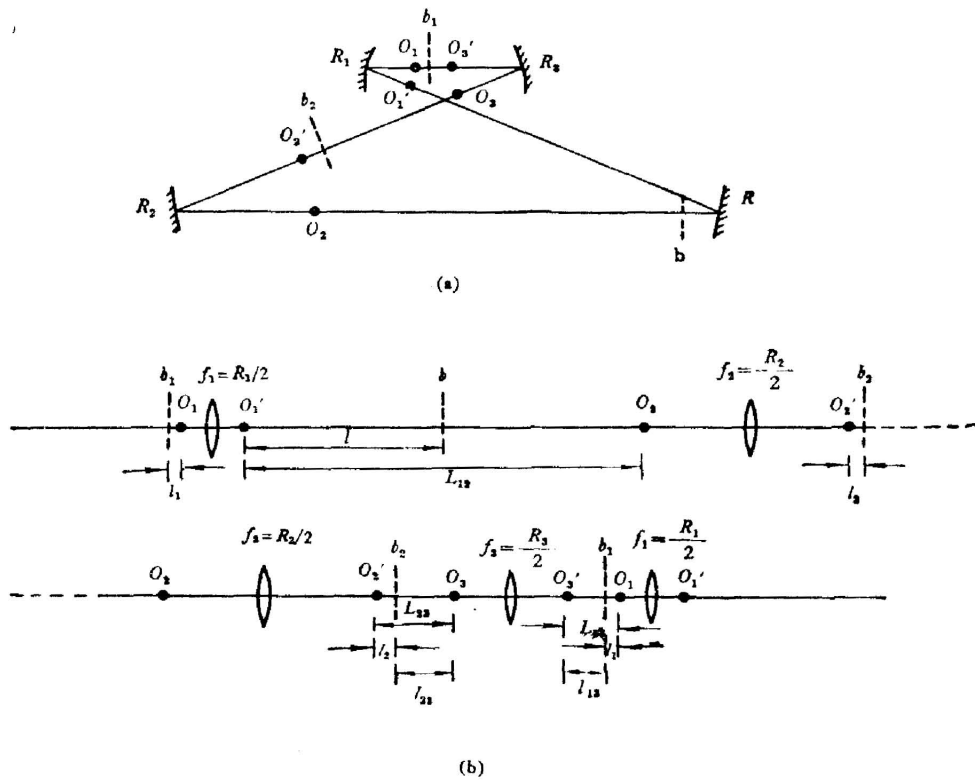


图 3 II 型环形染料激光腔及其等效光路

$$\frac{b_2}{l_{23}} = \frac{b_1}{l_{13}}, \tag{10}$$

此处 l_{23} 为 b_2 处束腰至等效透镜 L_3 的左焦点 O_3 的距离, l_{13} 为 b_1 处束腰至等效透镜 L_3 的右焦点 O_3' 的距离[见图 3(b) 中下一部分的等效光路]。进而, 根据(1)、(3)两式的关系可知, 只要求

$$l_{23} = x \frac{f_2^2}{l_{12}}, \tag{11}$$

$$l_{13} = x \frac{f_1^2}{l_{12}}, \tag{12}$$

此处 x 为任意正值, 则关系式(10)总是成立的。再将(1)、(3)和(11)式代入(7)式, 或将(3)、(11)和(12)式代入(8)式[注意现在(7)、(8)式中的 $b_s = b_2$; $l_s = l_{23}$; $b = b_1$; $l = l_{13}$; $f_s = f_3$], 均得如下的关系式:

$$f_3^2 = \left(x^2 + \frac{1}{2}\right) \frac{f_1^2 f_2^2}{l_{12}^2}. \tag{13}$$

再由(4)和(11)式, (2)和(12)式可得

$$l_{23} = l_2 + l_{23} = \left(x + 1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \frac{f_2^2}{l_{12}}, \tag{14}$$

$$l_{13} = l_1 + l_{13} = \left(x + 1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \frac{f_1^2}{l_{12}}, \tag{15}$$

此处 l_{23} 为透镜 L_2 的右焦点 O_2 至透镜 L_3 的左焦点 O_3 的距离; l_{13} 为透镜 L_1 的左焦点 O_1 至透镜 L_3 的右焦点 O_3 的距离。(13)~(15)式给出了 f_1 、 f_2 、 l_{12} 对 f_3 、 l_{23} 、 l_{13} 的制约关系。只要这些关系是满足的,则上述高斯光束即为腔内的实际稳定光模。

至此,我们获得了 II 型腔设计所需的全部公式:(1)~(6)和(13)~(15)式。显然这些计算公式是简单的。这就使我们容易设计特定要求的 II 型腔。如我们要求在 R_1-R_3 短腔臂中有一小束腰(放置染料液膜);在 R_2-R_3 斜腔臂中有另一辅助束腰(放置倍频晶体);同时在 R_1-R-R_2 腔臂中有一较大光斑尺寸的准直光束(放置单向器和选频元件),则我们只须取较小的 f_1 值,稍大的 f_2 值和较大的 l_{12} 值,就不难获得满意的结果。若取 $l_{12}=80$ cm,则由(5)、(6)式可得 $b=1.93$ m, $l=40$ cm,因而 R_1-R-R_2 腔臂中的束腰光斑直径为 $2\omega=0.85$ mm ($\lambda=0.59\mu$)。继续取 $f_1=3.2$ cm,由(1)、(2)式可得 $b_1=1.81$ mm, $l_1=0.375$ mm,因而 R_1-R_3 腔臂中的小束腰的光斑直径为 $2\omega_1=26.0\mu$ 。再取 $f_2=11$ cm,由(3)、(4)式可得 $b_2=2.14$ cm, $l_2=0.444$ cm,因而 R_2-R_3 腔臂中辅助束腰的光斑直径为 $2\omega_2=89.6\mu$ 。再取 $f_3=5$ cm,由(13)式可得 $x=11.32$,进而由(14)、(15)式可得 $l_{23}=17.6$ cm, $l_{13}=1.49$ cm。最后可得总腔长为 $L=l_{12}+l_{23}+l_{13}+2(f_1+f_2+f_3)=137.49$ cm。这种腔适合于倍频染料激光器的要求。

四、III 型环形染料激光腔的设计方法

图 4 表示 III 型环形染料激光腔的结构图。它是由两个等曲率半径的凹面镜 R_1 , 两个等曲率半径的凹面镜 R_2 和两个平面镜 R 组成对称形式。 R_1-R_1 腔臂和 R_2-R_2 腔臂的中点 c_1 和 c_2 为腔的两个对称点。两个小束腰就在这两处。从这两个对称点断开的谐振腔的两个部分,可以用两个如图 1 所示的完全相同的等效光路来描写。因而我们只需利用(1)~(6)式来对它进行设计计算就可以了。

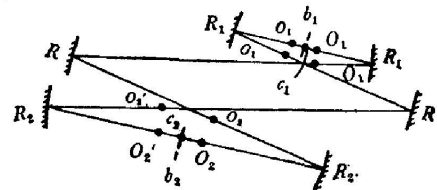


图 4 III 型环形染料激光腔

如仍采用前一节中的一些数据: $l_{12}=80$ cm, $f_1=3.2$ cm, $f_2=11$ cm, 则立即可知, R_1-R_1 腔臂中点 c_1 处的束腰光斑直径为 $2\omega_1=26.0\mu$; R_2-R_2 腔臂中点 c_2 处的束腰光斑直径为 $2\omega_2=89.6\mu$; 两 R_1-R-R_2 准直臂中束腰(在 O_1 和 O_2 的中间点)光斑直径为 $2\omega=0.85$ mm。因此,这一腔中的光模特性与上节的例子是基本相同的。但在这种腔型中,容易局部地改变腔内高斯光束的束参数。如要改变 R_1-R_1 腔臂中束腰光斑直径,只需按(1)、(2)两式的要求改变两块 R_1 镜的曲率半径和两块 R_1 镜间距与位置即可,而且这种改动不引起腔内其它部分的光模特性的变化。

五、讨 论

由上述设计例子十分清楚,这种分离参数设计方法为我们提供了设计环形染料激光腔的捷径。这种设计方法原则上还可应用于任何其它复杂的环形腔的设计。

它实际上是一种分段组合设计法。如环形腔中有偶数个球面镜,则我们可先将它分成

若干段类似于图 1 所示的单元等效光路。利用(1)~(6)式,使各段各自满足预定的对它的光模特性的要求。然后再将各段连接起来,并注意相邻两段首尾的 b_s 值的一致性。若环形腔中有奇数个球面镜,则先将成对球面镜的光路部分仍按上述分段组合方法逐段连接起来,剩下的最后一个球面镜,可利用(13)~(15)式的关系将它与其它部分连接起来。因此,任何复杂的环形腔都可以按预定的要求简便地设计出来。

最后还应指出,图 1 所示的单元等效光路的计算公式(1)~(6)还可用另一组公式代替,即将其中(2)、(4)、(5)三式中的“+”、“-”符号,一起换成相反的符号。这样,可以得到稍有差别的另一单元等效光路。我们在设计复杂环形腔时,可以灵活地运用这两组计算公式中的任何一组,使得能更好地达到我们预定的设计要求。

参 考 文 献

- [1] D. Frolich, L. Stein *et al.*; *Appl. Phys.*, 1976, **11**, No. 1 (Sep), 97.
- [2] H. W. Schröder, L. Stein *et al.*; *Appl. Phys.*, 1977, **14**, No. 4 (Dec), 377.
- [3] S. M. Jarrett, F. Young; *Opt. Lett.*, 1979, **4**, No. 6 (Jun), 176.
- [4] H. Kogelnik; *Bell Syst. Tech. J.*, 1965, **44**, No. 3 (Mar), 455.

Method of separating parameters design for ring dye laser resonator

ZHANG GUANGYIN

(Group of Solid Spectroscopy, Physics Department, Nankai University, Tienjin)

(Received 1 September 1980)

Abstract

In this paper, a special transformation relation of Gaussian beam has been demonstrated. On the basis of this transformation relation, a simple method of separating parameters design for ring dye laser resonator has been developed. Designs of three types of resonators for ring dye laser have been given as examples.