

小尺寸固体激光器不稳定腔 的两个参数的计算

朱 振 和

(中国科学院物理研究所)

提 要

设计小尺寸固体激光器不稳定腔时需要考虑取多大的放大倍数 M , 为了把不稳定腔激光器输出的球面波会聚为准平行光束, 还需要知道球面波的曲率中心离输出反射镜的距离 x 。本文计算了 x 和 M 这两个参数, 指出了必须考虑激光棒的热透镜效应才能得到正确的结果, 还讨论了共振腔参数的变化如何影响 x 和 M 的值以及其他一些问题。

一、引 言

为了选择激光输出的横模并减少光束发散角, 有时候人们采用不稳定共振腔。由于采用不稳定腔的激光器的输出光束近似于一个球面波, 因此在实验中往往需要用一块会聚透镜将光束会聚为准平行光束, 透镜的焦距和位置取决于球面波中心离输出反射镜的距离 x 。透镜的焦距和位置固然可以由实验来确定, 但如果事先能计算出 x 的值, 对于实验是有指导意义的。此外, 放大倍数 M (其定义见资料[1]) 是决定不稳定腔特性的一个主要参数, 在设计不稳定腔时必须考虑 M 值的大小。本文对常见的小尺寸固体激光器计算了 x 和 M , 并说明了不稳定腔的结构参数如何影响 x 和 M , 可供实验参考。

常见的小尺寸不稳定共振腔如图1所示, 图中的1是半反射平面镜, 2是全反射凸面镜, 其曲率半径为 R , 3是激光棒, 其折射率为 n , 长度为 d , 激光棒离两个反射镜的距离各为 l_1 和 l_2 。如果认为激光棒端面是平

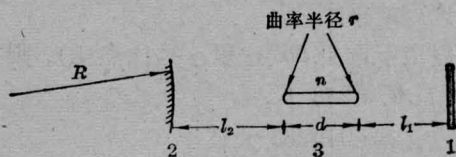


图1 常见的不稳定腔激光器

面, 那么计算的结果与实际情况相差甚多, 因此必须考虑热透镜效应。考虑到激光棒两个端面在工作时实际上是凸面(近似地认为是球面), 曲率半径为 r (为简单起见, 认为两端的曲率半径相同)。在激光棒和全反射镜之间往往有一个电光晶体 Q 开关, 在这种情况下只要把 l_2 看作是等效光学长度就可以了, 图1仍然是适用的。

二、计算 x 和 M

不稳定腔中的场分布可以用几何光学近似来描写^[1], 两列反方向传播的波的曲率中心 O_1 和 O_2 应该互相映象, 光波在图1所示的不稳定腔内传播的光路图见图2。

腔内的激光棒等于是一块厚透镜, 我们

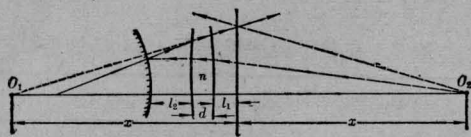


图2 不稳定腔中的光路图

很容易求出它的焦距 f 以及主平面离激光棒端面的距离 δ ^[2]:

$$f = \frac{r'^2}{2r' - d'} \approx \frac{r}{2(n-1)} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{r'd'}{2r' - d'} \approx \frac{d}{2n} \quad (2)$$

其中

$$r' = \frac{r}{n-1} \quad (3)$$

$$d' = \frac{d}{n} \quad (4)$$

利用厚透镜的主平面, 我们可以画出与图2等效的图3, 再根据成象公式^[2]我们可以列出如下方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{x+l_1+\delta} - \frac{1}{x_1} = \frac{1}{f} \end{array} \right. \quad (5a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{x_1+l_2+\delta} - \frac{1}{x_2'} = \frac{-2}{R} \end{array} \right. \quad (5b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{x_2'+l_2+\delta} - \frac{1}{x-l_1-\delta} = \frac{1}{f} \end{array} \right. \quad (5c)$$

在列方程时应注意物距、象距和焦距等的符号, 在这里我们已经取所有的量都是正的。但如果求解方程时得到的 x 或 x_1 , 或 x_2' 为负值也是有意义的, 这就表示它与图3所示的方向相反。令:

$$l_1 + \delta = L_1 \quad (6)$$

$$l_2 + \delta = L_2 \quad (7)$$

$$x_2' + l_2 + \delta = x_2 \quad (8)$$

则方程组(5)化为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{x+L_1} - \frac{1}{x_1} = \frac{1}{f} \end{array} \right. \quad (9a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{x_1+L_2} - \frac{1}{x_2-L_2} = \frac{-2}{R} \end{array} \right. \quad (9b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x-L_1} = \frac{1}{f} \end{array} \right. \quad (9c)$$

解这个方程组得出:

$$x = \left[\frac{(fL_1 + fL_2 - L_1L_2)^2}{(f-L_2)^2 - R(f-L_2)} + \frac{R(f-L_1)(fL_1 + fL_2 - L_1L_2)}{(f-L_2)^2 - R(f-L_2)} \right]^{1/2} \quad (10)$$

方程组有实数解的条件是:

$$f > R + L_2 \quad (11)$$

当这个条件不满足时, 共振腔就不是不稳定腔, 而成为稳定腔了。由此可见, 我们选用的凸面反射镜的曲率半径不能太大, 它必须小于激光棒的热透镜焦距。

根据放大倍数 M 的定义并参照图3, 很容易求出:

$$M = \frac{x+L_1}{x} \cdot \frac{x_1+L_2}{x_1} \cdot \frac{x_2}{x_2-L_2} \cdot \frac{x}{x-L_1} = \frac{(f-L_2)x + (fL_1 + fL_2 - L_1L_2)}{(f-L_2)x - (fL_1 + fL_2 - L_1L_2)} \quad (12)$$

当 $f \rightarrow \infty$ 时, (10) 和 (12) 式化为:

$$x = \sqrt{L^2 + LR} \quad (13)$$

$$M = \frac{\sqrt{L^2 + LR} + L}{\sqrt{L^2 + LR} - L} \quad (14)$$

其中 L 是等效腔长,

$$L = L_1 + L_2 = l_1 + l_2 + \frac{d}{n} \quad (15)$$

(13) 和 (14) 就是认为激光棒端面是平面的情况下的解。

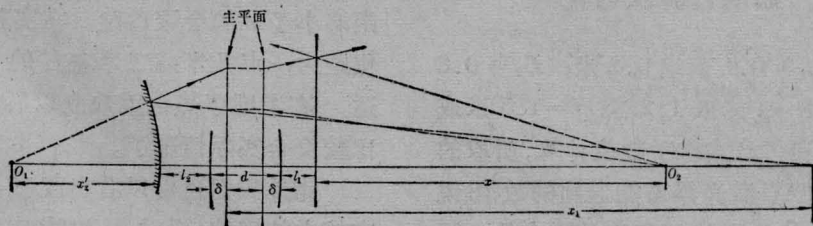


图3 图2的等效光路图

下面我们考虑共振腔的结构参数 L_1 (即 l_1)、 L_2 (即 l_2)、 R 和 f 改变时, x 和 M 的值将怎样改变。我们求出 $\frac{\partial x}{\partial L_1}$ 、 $\frac{\partial x}{\partial L_2}$ 、 $\frac{\partial x}{\partial R}$ 、 $\frac{\partial x}{\partial f}$ 、 $\frac{\partial M}{\partial L_1}$ 、 $\frac{\partial M}{\partial L_2}$ 、 $\frac{\partial M}{\partial R}$ 、 $\frac{\partial M}{\partial f}$ 等偏微商, 可以证明:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial L_1} > 0, & \quad \frac{\partial M}{\partial L_1} > 0, \\ \frac{\partial x}{\partial L_2} > 0, & \quad \frac{\partial M}{\partial L_2} \text{ 不一定}, \\ \frac{\partial x}{\partial R} > 0, & \quad \frac{\partial M}{\partial R} < 0, \\ \frac{\partial x}{\partial f} < 0, & \quad \frac{\partial M}{\partial f} > 0. \end{aligned}$$

$\frac{\partial M}{\partial L_2}$ 大于、等于还是小于零取决于判别式 F ,

$$F = f^2(f^2 - 2fL_1 - 2fL_2 + 2L_1L_2) - R(f - L_1)(2f^2 - 3fL_1 - 3fL_2 + 3L_1L_2) \quad (16)$$

当 $F > 0$ 时, $\frac{\partial M}{\partial L_2} > 0$; 当 $F = 0$ 时, $\frac{\partial M}{\partial L_2} = 0$;
当 $F < 0$ 时, $\frac{\partial M}{\partial L_2} < 0$ 。我们可以列出表 1 来表示 x 和 M 之值如何随着 L_1 、 L_2 、 R 、 f 而改变。

表 1 x 和 M 随着腔结构参数改变的规律

$L_1 \nearrow$	$x \nearrow, M \nearrow$	$L_1 \searrow$	$x \searrow, M \searrow$
$L_2 \nearrow$	$x \nearrow, M$ 不一定	$L_2 \searrow$	$x \searrow, M$ 不一定
$R \nearrow$	$x \nearrow, M \searrow$	$R \searrow$	$x \searrow, M \nearrow$
$f \nearrow$	$x \searrow, M \nearrow$	$f \searrow$	$x \nearrow, M \searrow$

说明: \nearrow 表示数值增加; \searrow 表示数值减少。

三、数值计算及讨论

我们取 $L_1 = 0.1$ 米或 0.2 米; $L_2 = 0.3$ 米或 0.4 米; $R = 1$ 米或 1.2 米; $f = 1.5$ 米或 2 米, 对 (10) 和 (12) 式作了数值计算, 所取的这些数值是 YAG 激光器可能遇到的数值(说明: 由于 δ 之值与 l_1 或 l_2 相比是很小的, 因此 $L_1 \approx l_1$, $L_2 \approx l_2$)。为比较起见, 也对 $f \rightarrow \infty$

的情况作了计算。计算结果列于表 2。

表 2 在若干典型情况下 x 和 M 的值

L_1 (米)	L_2 (米)	R (米)	f (米)	x (米)	M
0.1	0.3	1	1.5	2.16	1.56
0.1	0.3	1	2	1.31	2.05
0.1	0.3	1	∞	0.75	3.3
0.1	0.3	1.2	2	1.66	1.75
0.1	0.3	1.2	∞	0.8	3
0.1	0.4	1	1.5	3.69	1.45
0.1	0.4	1	2	1.69	2.1
0.1	0.4	1	∞	0.87	3.73
0.1	0.4	1.2	2	2.21	1.75
0.1	0.4	1.2	∞	0.92	3.37
0.2	0.3	1	1.5	2.38	1.64
0.2	0.3	1	2	1.47	2.2
0.2	0.3	1	∞	0.87	3.73
0.2	0.3	1.2	2	1.85	1.85
0.2	0.3	1.2	∞	0.92	3.37

对于小尺寸固体激光器一般 M 取的值不要太大^[1], 所以选用的凸面反射镜的曲率半径 R 不宜太小, 我们在实验中采用曲率半径为 1 米左右的凸面反射镜。从表 2 可以看出, 如果不考虑热透镜效应, 把激光棒端面看作平面的话, 则计算的 M 值大于 3, 这太大了。而且 $x < 1$ 米, 也与实际情况不符。在实验中如果把会聚透镜放在输出反射镜附近, 那么透镜焦距近似地应该就是 x 。在实际上激光输出并非理想的球面波, 必然有由于衍射和其他因素造成的发散, 所以往往采用焦距略小于 x 的会聚透镜。在实验中发现采用焦距为一点几米或二米左右的透镜比较合适。在考虑了热透镜效应以后, 计算结果就比较符合实际情况了。

此外我们还可以看出改变 L_2 的值对 x 有较大的影响, 而对 M 则影响不大。因此如果在实验时没有多种焦距的透镜供选择, 需

要改变 α 的值来凑合所用的会聚透镜, 同时又不希望不稳定腔的基本特性有大的改变, 即不希望放大倍数 M 有大的改变, 那么我们就可以移动凸面全反射镜的位置, 即改变 L_2 , 来达到目的。

最后我们还要说明以下两点: (一) 在有些调 Q 的 YAG 激光器中用一块平面玻璃片作为输出端反射镜, 这样实际上就有两个反射表面, 等于有 L_1 相差很小的两个不稳定共振腔, 相应地就有两个相差不大的 α 值, 因此这个激光器的输出光束就近似于曲率中心接近的两列球面波的迭加, 我们能观察到它们相互干涉而形成干涉环。

(二) 激光棒的端面最好镀消反射膜, 因为棒端面的反射可能形成特性相差甚远的另一个共振腔, 这是我们不希望发生的。虽然我们也可以求出这种共振腔的 α 和 M , 但是其表达式太复杂了, 所以我们对这个问题作如下考虑: 我们把前面计算的叫做情况一。如图 4 所示, 从光线 1 传播到光线 6 可以等效为通过由两个厚透镜组成的一个光学系统 (图 4(b)), 这个光学系统的主平面离激光棒端面的距离为 δ' , 其焦距为 f' , 可以求出:

$$f' = \frac{f^2}{2f - 2l_1 - 2\delta} \approx \frac{1}{2} f \quad (17)$$

$$\delta' = \frac{f(l_1 + \delta)}{f - l_1 - \delta} + \delta \approx l_1 + 2\delta \approx l_1 + \frac{d}{n} \quad (18)$$

在写出近似式时假定了 $f \gg l_1 \gg \delta$ 。

我们把从激光棒端面反射形成共振腔叫做情况二。如图 5 所示, 从光线 1 传播到光线 4 可以等效为通过图 5(b) 中这样一个光学系统, 在棒端面的反射等效为通过一个薄透镜 (它的折射率为 n' , 浸没在折射率为 n 的激光介质中)。该光学系统的主平面离棒端面的距离为 δ'' , 其焦距为 f'' , 可以求出:

$$f'' = \frac{nr^3}{2[(2n-1)r - (n-1)d][nr - (n-1)d]} \approx \frac{r}{2(2n-1)} \approx \frac{(n-1)}{(2n-1)} f \quad (19)$$

$$\delta'' = \frac{rd}{nr - (n-1)d} \approx \frac{d}{n} \quad (20)$$

取 $n=1.8$, 则

$$f'' \approx 0.3 f \quad (21)$$

由此可见, 在上述两种情况下从光线 1 出发到被反射回原处可以等效为各通过一个不同的光学系统, 这两个等效光学系统的焦距相差甚多, 所以这两种情况是很不相同的。如果这两种情况下形成的共振腔都能发生振荡, 那么所输出的两个激光球面波的曲率中心是相距相当远的, 就不可能用一块透镜把

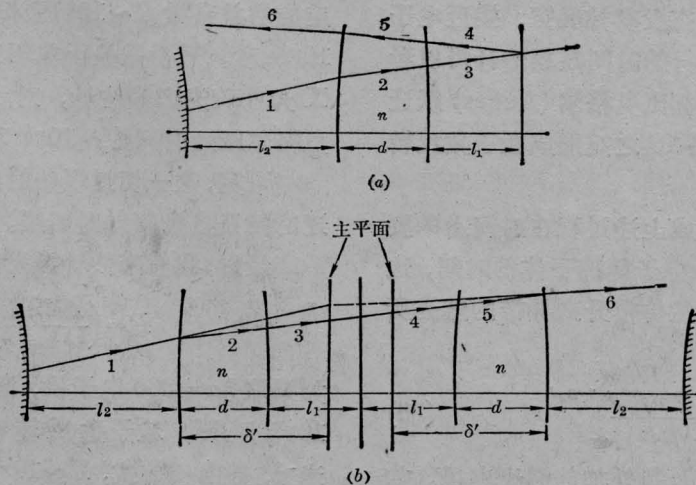


图 4 情况一的等效光路图

(下转第 35 页)

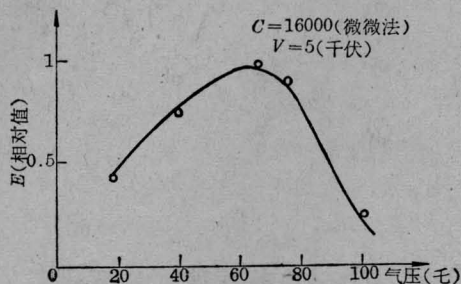


图4 激光器输出能量 E 随氮气压强 P 的变化曲线

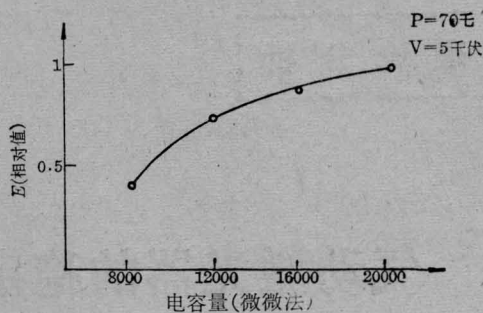


图5 激光器输出能量 E 随储能电容量 C 的变化曲线

3. 储能电容量

如图5所示,在一定的储能电容量范围内,激光器的能量 E 才随电容量 C 的增加而增加。当电容量超过某一范围时,输出能量也将趋于饱和。因此,选择合适的电容值,对于缩短放电管长度并提高储能器转换效率有重要的意义。

除了上述条件外,还要设计合适的电源,选择限流电阻和保持一定的火花隙电极距离,使激光器保持合适的脉冲重复频率,以保证激光器正常工作。

四、结 语

这种陶瓷储能的小型氮分子激光器目前还存在一些问题有待进一步解决。从陶瓷储能电容器来说,还存在转换效率较低,以及由于陶瓷圆盘面积较大,从而材料出现缺陷的几率也较大,以致造成电击穿性能较差等问题。更重要的是,还存在整个氮分子激光器整机的所有部件在保证不降低激光输出的前提下,全面实现小型化的问题。

(上接第45页)

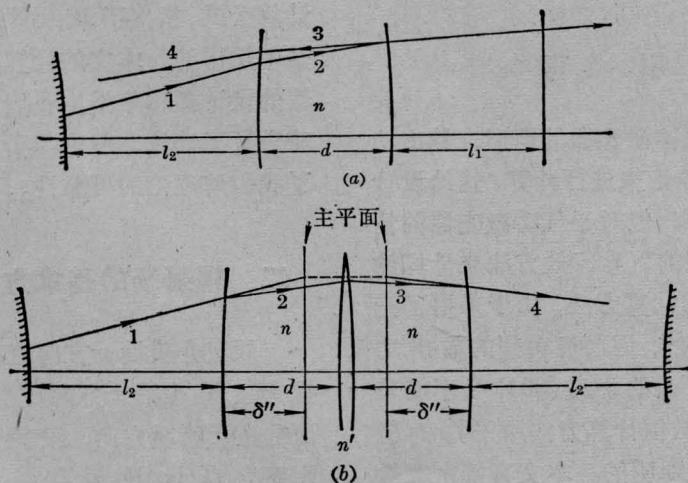


图5 情况二的等效光路图

输出激光会聚成准平行光束,这当然是我们所不希望的。尤其要指出,在情况一中是不稳定腔的时候,在情况二中有可能构成一个稳定腔(可以证明,情况二构成一个不稳定腔的条件是: $2f'' > R + l_2 + \delta''$,近似地是:

$$0.6f > R + L_2,$$

所以有可能在条件(11)被满足时不满足这个条件),这当然更是我们要避免的了。

参 考 资 料

- [1] 国外激光, 1972年第10期(增刊), p. 1~20.
- [2] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 2nd ed. (1964), Chap. IV, p. 151~163.