

光学谐振腔的图解设计方法(三)

南开大学物理系 张光寅

六、稳定基模固体激光腔

一个比较理想的固体激光腔应当是基模运转,同时,要求在运转过程中模式特性和功率特性稳定;此外,还应要求激光腔紧凑,并能从激活介质内取出尽可能多的能量。

为了获得基模运转的固体激光腔,也就是要求运行于激光腔内的高斯光束在激光棒处的基模光斑尺寸和激光棒的直径相匹配。在简化的三镜腔中,就是要求透镜处高斯光束的基模光斑尺寸有一定的大小。用图解来表示,就是要求该处高斯光束的 π 圆的直径 b' 有一定的大小。如激光棒的有效直径 D 为3毫米,则应要求高斯光束在激光棒处的基模光斑尺寸 ω 约为1毫米,即 $\omega \approx D/3$,才能较好地满足基模运转的匹配条件。对于1.06微米激光波长,相应的 π 圆的直径 b' 可由(6)式计算而得,约为3米。确定了这个 b' 值,如我们预先估计出或测定出激光棒的等效热焦距,原则上我们就可以对基模运转固体激光腔进行具体的结构设计。如果只要求基模运转,这种设计是比较简单的。如图12所示,先按基模运转所要求的 b' 值作透镜所在处的 π 圆,再按透镜的等效热焦距值作 f 圆,然后,可任选一 f 圆的切线,由此定出透镜两侧 σ_1^0 圆和 σ_2^0 圆,由这两个 σ^0 圆与 π 圆的交点,即可决定腔内可能运行的高斯光束的两组侧焦点 F_1, F_1' 和 F_2, F_2' 。最后,就是选择反射镜 R_1 和 R_2 。 R_1 和 R_2 的选择可以是多样的,只要是与其相应的 σ_1 圆和 σ_2 圆分别通过 F_1 和 F_2 ,都可以得到同一特征的高斯光束。这时,高斯光束在透镜处的 π 圆的直径必然是我们所要求的 b' 值。这样,我们就设计了一种基模固体激光腔。显然,这种基模固体激光腔的结构可以是更多式样的。改变 f 圆的切线,重复上述类似手续,还可以得到另一些设计方案。然而,这些可能的设计方案,虽都能得到基模运转,但不能保证激光器运转过程中输出光束模式特性和功率特性的稳定性,结构的紧凑性和最大的能量输出。必须进一步考虑腔内激活介质的热透镜效应的影响,才能确定谐振腔的可能最佳结构。

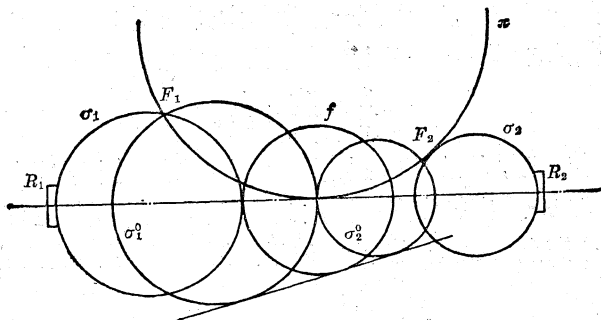


图12 基模固体激光腔的图解设计举例

为了保证激光器运转过程中输出光束模式特性和功率特性的稳定性,重要的是,要弄清楚腔内热透镜 f 的变化是如何影响这种稳定性的。从前两节的分析中已经知道,一个包含热透镜的三镜腔问题可以简化为一个两镜腔的问题,而用图解方法分析这个等效两镜腔,即是要分析 R_1 镜的 σ_1 圆和 R_2 镜的 σ_2 圆的相交情况(图 11)。如 R_2 镜作为激光器输出镜,则输出光束的特性即完全由 σ_1 圆和 σ_2 圆的相交特点所决定。在图 13 中示出 σ_1 圆和 σ_2 圆的几种不同的相交情况。图中 σ_2 圆由 R_2 镜所决定,它是不变的;而 σ_1 圆决定于 R_1 镜,显然,它将随热透镜 f 的变化而变化。正是这种变化情况决定了激光器输出光束特性的不稳定性。然而,我们注意到,在不同的腔结构的情况下,即使透镜 f 的同样变化,对于激光器输出光束特性的影响是极不相同的。如图 13(a) 所示, σ_1 圆相交于 σ_2 圆的边缘部分。这时,如 σ_1 圆由于 f 的改变而发生变化,由它的实线圆变为它的虚线圆,则它和 σ_2 圆的相交点 F_2 、 F'_2 的位置及其间距都将发生明显的变化。而 F_2 和 F'_2 即是激光器输出端高斯光束的侧焦点,因而这两个侧焦点的位置及其间距变化愈大,则输出激光的模式和功率特性将发生较大的变化。在图 13(b) 所示的情况中, σ_1 圆相交于 σ_2 圆的中间部分。这时,如 σ_1 圆发生同样的变化,则它和 σ_2 圆的相交点 F_2 和 F'_2 的间距变化不大,这样,输出激光的稳定性就要好得多。特别令人感兴趣的是,图 13(c) 所示的情况。这里, σ_2 圆交于 σ_1 圆的特别部位,即 σ_1 圆的实线圆和虚线圆的相交处。这时,尽管 σ_1 圆有所变动,但 F_2 和 F'_2 点则是不动的,因此在这种情况下,从 R_2 镜输出的激光束的模式特性将是相对地稳定的,由上述图解分析可知,在腔内存在着一定的热透镜的热扰动,从 R_2 镜输出的激光束的模式稳定性与谐振腔的结构有着密切的联系。图 13(c) 所示的腔结构就是我们所要寻求的那种热稳腔,从其中可望获得稳定的输出激光模式。

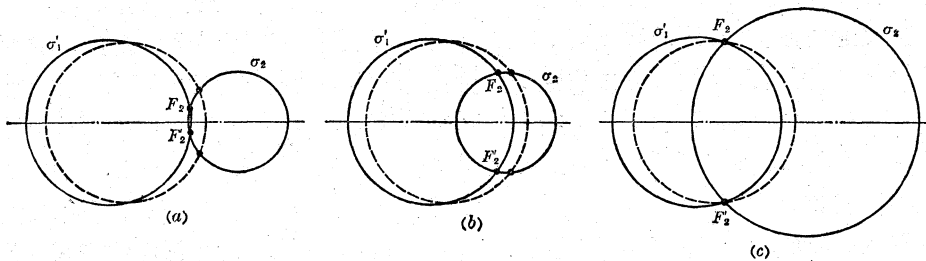


图 13 等效两镜腔的 σ_1 和 σ_2 圆的几种不同相交情况

为了更好地进行这种热稳腔的具体设计,我们需要进一步弄清 σ_1 圆的变动情况和热透镜及其热扰动之间的联系。对于一个具有热扰动特点的热透镜来说,我们可以把它看作是由一个不变焦距 f_0 和一个变动焦距 f' 的两个透镜所组成,前者可称作稳定透镜;后者可称作热扰透镜。热扰透镜通常是一弱透镜,其 f' 值一般地较大,在中小功率固体激光器中,它可由几十米变动至无限大值。如此,热透镜的焦距 f 可由下式表示:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_0} + \frac{1}{f'} \quad (13)$$

在稳定透镜 f_0 的作用下, R_1 镜的 σ_1 圆变换为 R_1 镜的 σ_1 圆实线圆;加上热扰透镜 f' 的作用, σ_1 圆由其实际圆进一步变换为虚线圆,如图 14 所示。图中 d_1 和 d_2 分别表示热透镜离 σ_1 实线圆与腔轴的两个交点的距离; d'_1 和 d'_2 表示热透镜离 σ_1 虚线圆的对应距离。利用模象变换关系,可以导出:

$$d'_1 = \frac{f' d_1}{f' - d_1}; \quad d'_2 = \frac{f' d_2}{f' \pm d_2} \quad (14)$$

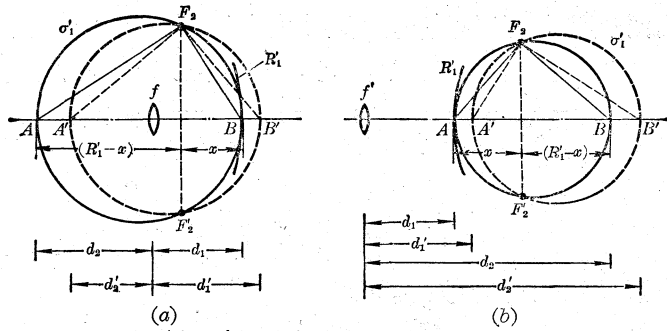


图 14 σ_1 圆的变动情况和热透镜的关系

上面第二个式子中的“+”“-”号分别对应于图 14(a) 和 (b) 的情况。由图中所示的直角三角形 AF_2B 和 $A'F_2B'$ 的几何关系, 可得

$$(R_1 - x)x = [(R_1 - x) + (d'_2 - d_2)][x \pm (d'_1 - d_1)],$$

此处 x 为 σ_1 实线圆和虚线圆的交点 F_2 、 F'_2 的连线在腔轴上的交点离 R_1 镜的距离。将 (14) 式的关系代入上式, 可得

$$x = \frac{R_1 d_1^2 \mp \frac{d_1^2 d_2^2}{f' \pm d_2}}{d_1^2 + d_2^2 \frac{f' - d_1}{f' \pm d_2}}.$$

在 $f' \gg d_1, d_2$ 的情况下, 上式可简化为

$$x = \frac{d_1^2}{d_1^2 + d_2^2} R_1. \quad (15)$$

(15) 式的结果表明, 在满足 $f' \gg d_1, d_2$ 的条件下, 不论 f' 变化多大, σ_1 的实线圆与虚线圆的交点 F_2 和 F'_2 的位置是稳定不动的。因此, 图 13(c) 所示的那种热稳腔的确是存在的, 而且利用 (15) 式的关系, 只要知道了热透镜相对于 σ_1 圆的位置, 我们即可以对它的结构数据进行精确的设计计算。同时, 还由于毋须确切地知道 f' 的大小, 因而这种设计将是十分简便的。

能否同时考虑模式的热稳性和基模运转这两个要求呢? 我们的回答是肯定的。为了更好地说明这一问题, 让我们先来证明两个特殊的图解关系:

(1) 在热稳腔中, 热透镜处的 π 圆外切于 σ_1 圆的 F_2 点 (当热透镜处于 σ_1 圆外时), 或内切于 σ_1 圆的 F_2 点 (当热透镜处于 σ_1 圆内时) (图 15)。

现在我们证明第一种情况。如图 15(a) 所示, 设 $-t$ 圆 (切腔轴于热透镜处的一个圆) 外切

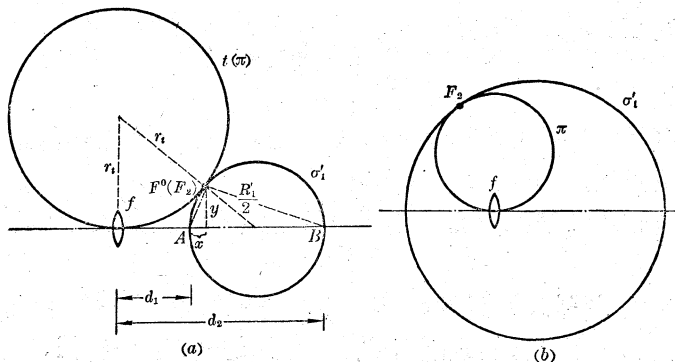


图 15 热稳腔中热透镜处的 π 圆切 σ_1 圆于 F_2 点

于 σ'_1 圆的 F^0 点。由图中所示的几何关系, 可得如下两关系式:

$$\frac{r_t}{d_1+x} = \frac{\frac{R'_1}{2}}{\frac{R'_1}{2}-x}; \quad \frac{r_t}{y} = \frac{d_1+\frac{R'_1}{2}}{\frac{R'_1}{2}-x}。$$

由此可得

$$y \left(d_1 + \frac{R'_1}{2} \right) = (d_1+x) \frac{R'_1}{2}。 \quad (16)$$

再由图中的直角三角形 AF^0B 的几何关系, 可得

$$y^2 = x(R'_1 - x)。 \quad (17)$$

解上面两式, 可得

$$x = \frac{d_1^2}{d_1^2 + d_2^2} R'_1。$$

此即为(15)式。由此可知, t 圆和 σ'_1 圆的切点 F^0 即为前述 σ'_1 圆上的 F_2 点, 也即为热稳腔中 R_2 镜一端高斯光束的一个侧焦点。因而, 这个通过侧焦点 F_2 的 t 圆也就是热透镜处的 π 圆。这样, 我们就证明了这个 π 圆外切于 σ'_1 圆的 F_2 点这一情况。

类似地也可以证明, 在热稳腔中, 当热透镜处于 σ'_1 圆内时, 热透镜处的 π 圆必是内切于 σ'_1 圆的 F_2 点。

上述关系的反命题也是正确的, 若热透镜处的 π 圆和 σ'_1 圆相切, 则这种谐振腔应是热稳的。

(2) 如一谐振腔中的 σ'_1 圆与热透镜处的 π 圆相切, 则与 R_1 镜相应的 σ_1 圆也必然是与 π 圆相切的。

如图 16 所示, 由 π 圆和 σ'_1 圆相切的几何关系, 不难求得

$$r = \frac{S'_1 S'_2}{S'_2 - S'_1}, \quad (18)$$

此处 r 为 π 圆的半径; S'_1 和 S'_2 分别为“象”波面 R'_1 和它的曲率中心离透镜 f 的距离。而由模象关系可得

$$S'_1 = \frac{S_1 f}{S_1 - f}; \quad S'_2 = \frac{S_2 f}{S_2 - f},$$

此处 S_1 和 S_2 分别为“物”波面 R_1 和它的曲率中心离透镜 f 的距离。

将这两个式子代入(18)式, 可得

$$r = \frac{S_1 S_2}{S_1 - S_2}。 \quad (19)$$

比较(19)式与(18)式, 不难看出, 这个 π 圆显然也必是切于 σ_1 圆的。于是这个 π 圆与 σ'_1 和 σ_1 圆的同切关系得证。

顺便指出, 按“物”、“象”距和 f 值的不同关系, 这种相切的关系可以是外切的, 也可以是内切的。

由第(1)个图解关系得知, π 圆与 σ'_1 圆相切, 这是热稳腔的一个特征。因此, 综上所述可知, 热透镜处的 π 圆和 σ_1 圆或 σ'_1 圆相切, 这是热稳腔的一个重要特征。

根据热稳腔的这一特征, 我们就容易进行各种自孔径选模的基模运转热稳腔的设计, 同时

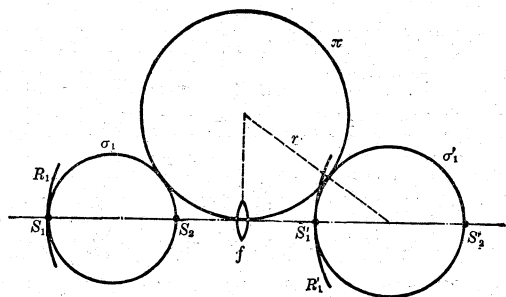


图 16 热稳腔中热透镜处的 π 圆同切于 σ'_1 和 σ_1 圆

还可从中选择较为紧凑的腔结构。如我们考虑一单脉冲基模运转的热稳固体激光腔的设计。这时, $f_0 = \infty$, 热透镜的等效焦距 $f = f'$ (一般地为几十米至无限大值)。在这种情况下, 我们可按图 17 所示的图解关系进行设计。这里, 由于 $f_0 = \infty$, R_1 镜所对应的 σ_1 圆即为前面讨论中的 σ'_1 圆。在热透镜变化的情况下, σ_1 圆将有所变动, 在图中我们用 σ_1 圆的实线圆和虚线圆表示它的变动情况。在满足 $f' \gg d_1, d_2$ 的情况下, σ_1 圆上的 F_2 点(它是 σ_1 实线圆和虚线圆

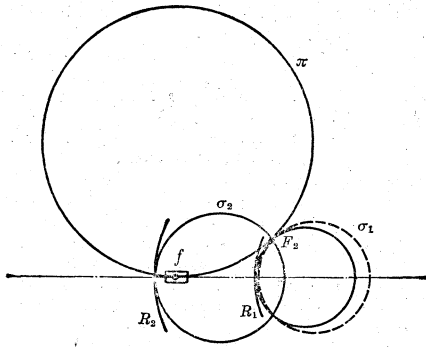


图 17 单脉冲固体激光器的基模热稳腔的设计图解

圆的交点, 同时是热透镜处的 π 圆和 σ_1 圆的切点) 乃是相对地稳定不动的。因此, 只要我们选取这样的 R_2 镜, 使其所对应的 σ_2 圆通过 F_2 点, 则从 R_2 镜一端输出的激光的模式将是稳定的。这里 R_1 镜和 R_2 镜的选择都有一定的任意性, 只要求满足上述图解关系即可。但考虑到腔结构紧凑性的要求, R_1 镜和 R_2 镜应尽可能地靠近激光棒; R_1 镜的 σ_1 圆与热透镜处的 π 圆应为外切的关系, 而且 R_1 镜宜选用凸面镜。过 F_2 点和热透镜 f 处所作的 π 圆, 决定着热透镜处的基模光斑尺寸 ω 。由于 F_2 点在热扰动情况下是相对地稳定不动的, 因而 π 圆和热透镜处的基模光斑尺寸也将是

稳定不变的。如工作物质棒的直径 ϕ 是按自孔径选模要求选定的, 即

$$\phi = 3\omega, \quad (20)$$

则在这样的谐振腔内就可望获得稳定的基模运转和功率输出。

为了便于对这种谐振腔结构进行具体的数值计算, 我们给出如下的一些计算公式:

$$\omega = \sqrt{\frac{\lambda b'}{\pi}}; \quad (21)$$

$$\frac{b'}{2} = \frac{d_1(d_1 + R_1)}{R_1}; \quad (22)$$

$$x = \frac{d_1^2}{d_1^2 + d_2^2} R_1; \quad (23)$$

$$R_2 = \frac{(R_1 - x)x}{L + x} + L + x, \quad (24)$$

式中 b' 为热透镜处 π 圆的直径; d_1, d_2 和 x 与前所用的含义相同; R_1 为 R_1 镜的曲率半径, 其值等于 $d_2 - d_1$; L 为 R_2 镜和 R_1 镜的间距, 其中激光棒所占的长度距离, 应按棒长 l 除其折射率 n 来计算。上面的 (22) 式是根据热稳腔中 π 圆和 σ_1 圆相切这一特点, 并利用 (19) 式的关系导出的; (23) 式则是参照 (15) 式得出的; 最后的 (24) 式则是由 σ_2 圆和 σ_1 圆相交的几何关系导出的。

下面我们举一数值计算的例子。如取激光棒的直径为 $\phi = 3$ 毫米, 则由 (20) 式, 可得激光棒处基模光斑尺寸为 $\omega = 1$ 毫米。再由 (21) 式, 可得相应的 π 圆的直径为 $b' = 2.96$ 厘米 (激光波长 $\lambda = 1.06$ 微米)。如选用 R_1 镜的曲率半径为 $R_1 = 8$ 厘米, 则由 (22) 式, 可得 $d_1 = 30.6$ 厘米; 进而可得 $d_2 = d_1 + R_1 = 38.6$ 厘米。再由 (23) 式, 可得 $x = 3.09$ 厘米。如取 R_2 镜和 R_1 镜的间距 $L = 35$ 厘米, 则由 (24) 式, 可得 $R_2 = 38.5$ 厘米。最后须修正激光棒的折射率对光程的影响, 在棒长为 $l = 6$ 厘米, $n = 1.5$ 的情况下, d_1 和 L 的实际值应分别为 31.6 厘米和 37 厘米。

这样,我们就获得了这种谐振腔的全部结构数据。显然,这种谐振腔也是较为紧凑的,其总腔长不超过 40 厘米。

对于高重复频率脉冲运转或连续运转的固体激光器,激光棒的等效热透镜还应包括稳定透镜 f_0 部分。对于这些激光器仍可按上述图解方法进行设计。但这时,按上述图解方法算得的是 R_2 镜的等效镜 R'_2 的有关数据。应当考虑 f_0 的作用,按模象理论,再由 R'_2 得出 R_2 镜的有关数据(即它的位置和曲率半径)。当然,在作这一计算时,须要知道激光棒的等效热透镜的焦距值。但这个焦距值并不需要十分精确地测定。这是因为,在较为紧凑的谐振腔中, R_2 镜的 σ_2 圆与腔轴的两交点离热透镜的距离一般地远少于热透镜的焦距 f 值,如此, R'_2 镜的 σ'_2 圆较之 σ_2 圆变动不大,而 f 值的一定变化对 σ'_2 圆的影响则更小。用此,在实际使用时,只需对 R_1 和 R_2 镜的位置沿腔轴方向稍作调整,即可适应 f 值的各种可能变化的情况。

按图 17 所示的图解关系确定谐振腔结构,能够较好地解决热稳、基模和紧凑这三个要求,而且由于考虑了自孔径选模的要求,因而对激活介质的利用率,较之利用小孔光阑选模的方法要好得多。但欲使腔结构做得更为紧凑些,这时,紧凑性的要求和对激活介质的高利用率的要求两者之间,就会有矛盾。这是因为,对于一个按自孔径选模要求设计的谐振腔,热透镜处的 π 圆的大小应是按激光棒的直径 ϕ 确定了的,因而为了使谐振腔既是热稳的,同时又是紧凑的,则必须要选择更小曲率半径的 R_1 镜,使它可以更靠近激光棒(参看图 17)。但这时 σ_1 圆就要小得多,而侧焦距 $F_2F'_2$ 也就相应地短得多,因而腔内可能形成的激光束也就具有更大的发散性,这样就不利于充分地利用激光棒中的激活介质(图 18)。

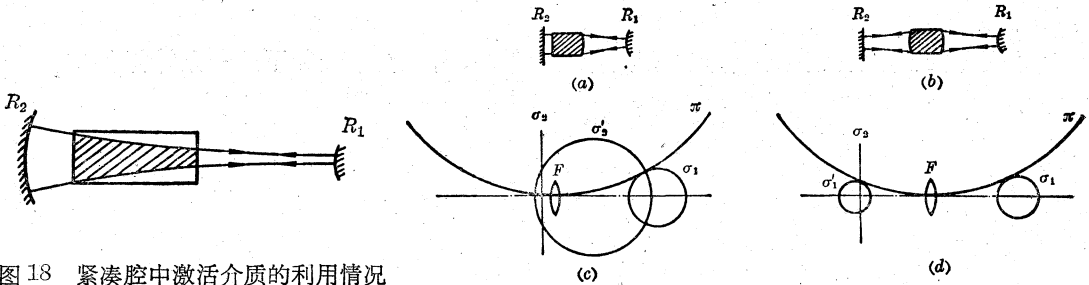


图 18 紧凑腔中激活介质的利用情况
(图中阴影部分为激光振荡的利用区)

图 19 基模、热稳、紧凑、高利用率固体激光腔的建议方案

为了克服这一矛盾,可在腔内插入一个短焦距的固定透镜(通常是将激光棒的一端或两端磨成一球面,使之起固定透镜的作用),这样就可望获得更为理想的腔结构。在图 19 中我们示出这种固体激光腔的两个建议方案。图中(a)、(b)表示它们的结构示意图及其中可能形成的高斯光束的特点;图中(c)、(d)分别示出(a)、(b)这两种腔结构的图解关系。利用这些图解关系,我们可以对它们进行具体的设计计算。设计计算方法和前述大致相同:先根据自孔径选模的要求,确定热透镜处的 π 圆;再根据热稳腔的要求,确定 σ_1 圆,从而可以确定对 R_1 镜的要求,然后分别图 19(c)和图 19(d)两种情况:通过确定 σ_2 圆,定出 σ_2 圆,以确定对 R_2 镜的要求(图 19(c)的情况下);或通过确定 σ'_1 圆,定出 σ_2 圆,以确定对 R_2 镜的要求(图 19(d)的情况下)。在进行这些计算时,腔内透镜 F 应为热透镜 f 和插入固定透镜 f_1 的组合透镜,其焦距 F 为

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f_1} - \frac{\Delta l}{ff_1}, \quad (25)$$

这里 Δl 为热透镜和插入固定透镜的距离,在图 19(c)中 $\Delta l = l/2$ (l 为激光棒长);在图 19(d)中 $\Delta l = 0$ 。

(下转第 29 页)

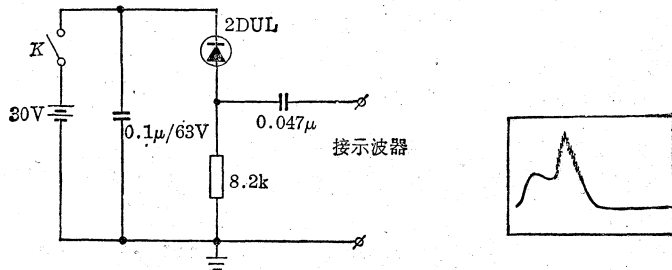


图3 灯光、激光波形及测试电路

后者适合充电电压高而充电电流小的情况,这样可以体积做得较小,便于携带使用。无论哪种高压整流电路,对储能电容的平均充电电流均为:

$$I_a = \frac{Q}{t} = \frac{CU}{t} = CUf,$$

而储能电容对氙灯的输出功率为:

$$P = \frac{1}{2} CU^2 f \quad (f \text{ 为重复频率}).$$

此外,各种电路的元件选择有各自的参数计算公式。但要求充电主变压器的额定功率均为:

$$p' = U_{\text{出}} I_a + P_{\text{损}} \quad (U_{\text{出}} \text{ 为储能电容的最大电压})$$

但经过 $5RC$ 可使储能电容电压高达 $\sqrt{2}U_{\text{出}}$ 。这样设计变压器输出 $U_{\text{出}} I_a$ 留有余量。

3. 确定辅助电路

由不同项目需要选用各种辅助电路、触发电路和程序控制电路。如前所述自动补偿、触发、报警、停电等电路,以及延时、同步、振荡、门控及晶体高压、预电离电路等等。这样才算一台完整的激光器电源。“多用脉冲固体激光器电源”就是一个实例。

(上接第 46 页)

为了选用更为简单的平面镜 R_2 ,应当利用已经确定的 σ_2 或 σ_1 的数据,反求 F 值,再进而确定插入固定透镜的焦距值 f_1 。这样,也就完成了上述方案的全部设计计算。

插入短焦距的固定透镜有许多好处,其一是,如 $f_1 \ll f$,则由(25)式可得, $F \approx f_1$,近似为一常值,这就意味着,热透镜 f 的作用相对地变弱,因而有利于改进腔的热稳定性。其二是,由于 $F \approx f_1$,而 f_1 值较小,因而 F 值较小,这样可使腔结构做得更为紧凑,这是因为在图 19(a)的结构中 R_1 镜距激光棒的距离大致为 F ;而在图 19(b)的结构中 R_2 镜和 R_1 镜距激光棒的距离大致为 $2F$ 。其三是,从图 19 中可以看出,由于引入固定透镜 f_1 ,大大地改善了激光棒内的激光束的平行性,因而也就可以提高激光振荡对激活介质的利用率。此外,这种插入透镜的作用还有助于减弱激光棒的热畸变对激光束传播特性的影响。粗略地看,热畸变的结果是使热透镜焦距在不同的方向具有不同的量值,而不同方向上组合焦距 F 的差异将因引入短焦距的固定透镜而大大地缩小,从而有利于减弱激光棒的热畸变对激光模特性的影响。

上面我们运用图解的方法,比较形象,比较简单地解决了基模、热稳、紧凑、高利用率固体激光腔的设计问题,得出了通用设计方法。应当指出,工作^[7,9]中,用解析计算的方法也曾得出了几种特殊的热稳腔的结构,他们的结果只是我们用通用方法所能得出各种可能结构中的个别特例。然而,工作^[7,9]中的实验已经很好证明,这种热稳固体激光腔确是有利于获得稳定的较大功率的基模输出。