

# 多用脉冲固体激光器电源

天津大学精仪系激光教研室科研组 宁喜程友

由于脉冲固体激光器输出功率大,特别是采用调 $Q$ 、选模等技术措施,不仅大大提高峰值功率,而且激光模式、相干性也大为改善,因此在各个领域获得了广泛的应用。尤其在激光高速摄影和高速全息摄影、精密干涉计量等方面显示了独特的优点。脉冲氙灯是脉冲固体激光器的泵浦源,因此对氙灯电源的研制具有广泛的实际意义。我们研制的多用脉冲固体激光器电源,经使用实践的考验,基本达到设计要求,实现了有程序、高稳定、自动化、高效率和多用性等方面的要求。

## 一、特点

本电源是对二组储能网络充电使双灯同时触发泵浦的程序控制电源。由于采用了简单可靠的自动扫描可控硅交流调压电路,实现恒流充电、自动补偿、自动报警和自动或手动触发,同时自动停电,因此,除具有高稳定、自动化、有程序等特点外,还有高效率和多用性等特点。本电源可具有如下四种工作状态:

1. 手动升压、手动触发档。可手转升压电位器(如图2所示 $W_3$ )达到任何所需值关闭充电开关( $K_3$ )即可。使用灵活方便,可靠简单。
2. 自动扫描升压,单次手动触发档。调整( $W_1$ )其充电电压可在0.05~2千伏范围内选择。当储能网络充到所需电压值后,电路实现自动补偿和自动报警(便于暗室工作),经手动触发氙灯点亮,同时电源自动停电。如需重新充电,手按复位按钮( $K_9$ )即可。加有自动补偿可使储能电容上的电压保持在误差不超过 $\pm 1$ 伏的范围内。本档是常用的工作状态。
3. 自动扫描升压、单次自动触发档。即充到所需电压值后,自动发出触发脉冲点亮氙灯同时自动停电。
4. 重复、自动触发档。处于本档工作时,就成为重复率固体激光器电源。其重复率的高低由扫描速度、充电变压器功率及开关器件决定。如本电源采用无触点开关——可控硅作开关器件时,其重复率很高。而采用继电器触点时,其重复率只能达每秒一次至几次。

## 二、工作程序

可参看图1和图2。先接通 $K_1$ 再接通 $K_2$ ,使激光器通入冷却蒸馏水。然后接通 $K_3$ 充电。当用自动扫描升压单次手动触发档时,自动扫描电路使 $SCR_1$ 导通角逐渐自动增加,经桥

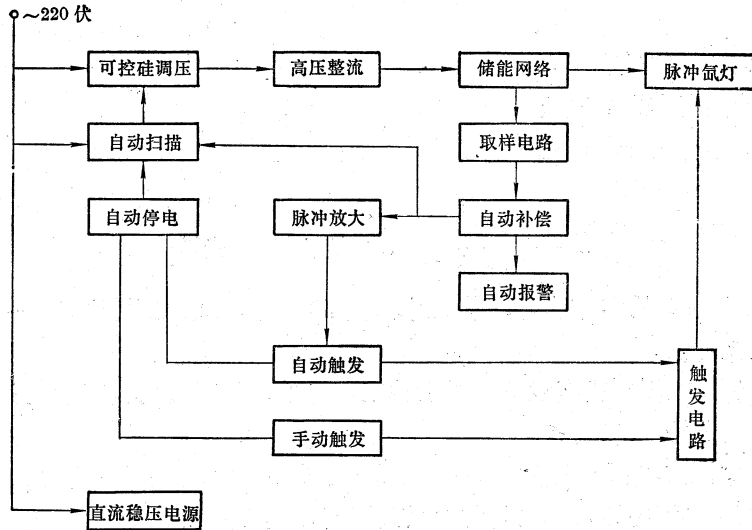


图1 电源工作程序方框图

式高压整流，以恒流对储能网络充电，当充到预定值后（由  $W_1$  调定），即由  $W_1$  取出信号通过 NG04 直流放大和  $BG_4$ 、 $BG_3$  功率放大，触发  $SCR_3$  使  $J_4$  动作，立即停止充电，接通自动补偿电路，同时发出充好电的报警信号（喇叭间断叫），这时即可手按  $K_8$ ，使二灯点亮，同时电源自动停电。如是自动触发，则使  $BT_2$  的负脉冲经  $BG_5$  倒相放大使  $J_5$  动作，同时实现自动停电和自动触发。如需“双曝光”，再手按  $K_9$  重复上述过程实现第二次氙灯泵浦。最后关  $K_3$  开  $K_4$ ，放掉剩余电压。

### 三、电路原理

#### 1. 自动扫描及交流调压部分

电路如图 2 所示。当接通  $K_3$ ，常开触点  $K_{3,1}$  接通，常闭触点  $K_{3,2}$  断开。使与市电同步的梯形波电压加给  $BT_1$  电路，并经  $D_{13}$  通过  $C_{13}$  滤波后得以给  $C_{16}$  自动地逐渐充电，使  $BG_1$  的基极电位逐渐降低而使其逐渐导通，管电阻随之逐渐减小。设变阻管  $BG_1$  的管电阻为  $R(t)$ ，则  $BT_1$  的振荡频率为：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{[R(t) + R_{13}] \cdot C_{14} \ln \frac{1}{1-\eta}} \quad (\eta \text{ 为分压比})$$

由此可见，在每一个梯形波里， $BT_1$  的振荡频率  $f$  是逐渐增加的。就是梯形波里第一个触发  $SCR_1$  的尖脉冲的相位逐渐前移，使  $SCR_1$  的导通角逐渐地自动增大，使  $T_1$  初级交流电压自动地增加。但一般调整  $W_5$  使  $SCR_1$  的最大导通角不超过  $90^\circ$ ，并且通过  $T_3$  来触发  $SCR_1$ ，又由于  $C_{16}$  可使  $R(t)$  呈线性变化。这些措施都是使电源稳定工作，抗干扰能力强不可缺少的环节。

$D_{1\sim4}$  和  $SCR_1$  构成可控硅交流调压电路的另一种形式，也可用二只可控硅组成交流调压电路。二种形式的调压效果是一样的。 $C_1$ 、 $R_2$  是使  $SCR_1$  输出“缺块”波形上的高频振荡滤掉， $R_1$  主要是用来消除低频振荡。这样使高压电路安全工作。 $Z_1$  和  $V_1$  用来观察  $SCR_1$  导通

角的变化。

令:  $e_2$  为  $T_1$  次级电压

$u_c$  为储能电容上的电压

$I_c$  为对电容的充电电流

则有:

$$I_c = \frac{e_2 - u_c}{R} \quad (R \text{ 为充电回路阻抗})$$

而当  $SCR_1$  导通角从零开始均匀增长时,  $e_2$  和  $u_c$  也同时增加, 其差值  $e_2 - u_c$  基本不变。因此, 电源是恒流充电的。

实现恒流充电, 控制扫描速度就可以去掉限流电阻。因而大大提高了电源的伏安效率。

## 2. 自动补偿部分

如图 2 所示。由  $W_1$ 、NG04、 $BG_4$ 、 $BG_3$ 、 $BG_2$ 、 $BG_1$  构成自动补偿电路。也就是储能电容上的充电电压与  $SCR_1$  导通角之间的负反馈回路。其作用是维持储能电容上的电压保持恒定。当电容上电压下降时, 该回路能自动使  $SCR_1$  的导通角增加, 以补偿下降部分的电压, 又立即充到原定值。反之亦然。

其工作过程如下: 当充到预定电压值后,  $W_1$  取出直流信号, 通过高灵敏、高增益的 NG04 以百倍放大, 由  $BG_4$  使  $BG_3$  导通, 直流信号得以功率放大而触发  $SCR_3$  使  $J_4$  动作, 停止充电接通报警电路和自动补偿电路。调节  $W_6$  通过  $BG_1$  而使  $SCR_1$  有合适的补偿导通角。从而使电容上的电压保持恒定。实践表明, 电压误差范围不超过  $\pm 1$  伏。具有相当高的补偿精度。

运算放大器采用同相输入接法, 其电压增益为:

$$\frac{U_B}{U_A} = \frac{R_{27} + R_{29}}{R_{29}} = \frac{1 \text{ M}\Omega + 10 \text{ k}}{10 \text{ k}} = 101 \quad (\text{闭环状态})$$

因而储能电容电压  $U_c$  稍降一点, 通过 NG04 百倍放大, 使  $BG_4$  基极电位下降而趋向截止,  $BG_2$  也跟随趋向截止,  $BG_1$  基极电位下降使之趋向导通, 从而使  $SCR_1$  导通角  $\alpha$  有所增长, 以维持  $U_c$  不变。

令:  $SCR_1$  的补偿导通角为  $\alpha_0$

$T_1$  补偿时初级峰值电压为  $U_1$

$T_1$  补偿时次级峰值电压为  $U_2 = \frac{3000}{220} U_1$  合适的补偿电压就是在导通角为  $\alpha_0$  的情况下, 使  $U_2 - U_c$

下, 使  $U_2 - U_c$

$$\therefore U_1 = \frac{U_2}{\frac{3000}{220}} = \frac{U_c}{13.6}$$

$$U_1 = \sqrt{2} \times 220 \sin \alpha_0 = 311 \sin \alpha_0$$

$$\therefore 311 \sin \alpha_0 = \frac{U_c}{13.6} \quad \text{即} \quad \sin \alpha_0 = \frac{U_c}{311 \times 13.6} = \frac{U_c}{4230}$$

$$\therefore \alpha_0 = \arcsin \frac{U_c}{4230}$$

这就是由  $U_c$  决定补偿导通角  $\alpha_0$  的公式。

求出  $\alpha_0$ , 就可求出  $V_1$  指示的  $T_1$  初级交流补偿电压为:

$$\bar{U}_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi-\alpha_0}^{\pi} (\sqrt{2} \times 220 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = 220 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2(\pi - \alpha_0) + \frac{\alpha_0}{\pi}}$$

这样调节  $W_6$ , 使  $V_1$  交流电压表指示为  $\bar{U}_1$ , 就能使  $U_0$  基本保持不变。实验表明, 补偿电压取值并不十分严格, 可以很容易由实验确定。根据  $U_0$  的不同, 一般为十几伏到几十伏。

### 3. 报警、触发及过压保护部分

如图 2 所示。当  $J_4$  动作以后,  $J_{4,5}$  闭合而接通稳压电源。  $BT_2$  首先发出振荡脉冲使  $SCR_6$  导通, 于是  $BT_3$ 、 $BT_4$  组成的电路通过  $SCR_6$  接地, 因二单结管电路  $R$  和  $C$  的取值不同, 故  $BT_4$  先发出振荡脉冲而使喇叭叫, 但叫一会  $BT_3$  就发出振荡脉冲而使  $SCR_7$  导通, 于是  $SCR_6$  阻断, 接地断路, 二管停止工作, 喇叭停叫。但过一会  $BT_2$  又恰好发出振荡的第二个脉冲, 重新使  $SCR_6$  触发导通, 电路又重复上述工作过程。因而我们听到的是悦耳的间断叫声。这样可以在暗室里利用我们的听觉而继续工作。

触发电路主要由  $C_{21}$ 、 $T_4$  和  $SCR_2$  组成。无论手动或自动触发, 均使  $SCR_5$  导通  $J_5$  动作, 一方面  $J_{5,1}$  闭合  $BG_1$  截止电源自动停电, 另一方面  $J_{5,3}$  闭合而使  $SCR_2$  导通,  $C_{21}$  对  $T_4$  放电输出高压脉冲触发双灯, 使触发在停电以后。由于  $SCR_2$  正向漏电流的存在, 调节  $W_9$  可使  $C_{21}$  充电电压不同, 从而调节了高压触发脉冲的幅度。减少不必要的射频干扰。

$W_2$  和  $BT_5$  电路组成过压保护部分。当停电电路失灵 (NG04 损坏等), 充电一直进行到储能电容的最大耐压值时,  $BT_5$  发出脉冲信号触发  $SCR_5$  使  $J_5$  动作, 得以停电、触发同时进行。避免储能电容因过压而击穿。

### 4. 储能网络部分

如图 2 所示。这里采用仿真线路和二极管 ( $D_9$ 、 $D_{10}$ ) 隔离双灯并联式。仿真线节数越多, 放电灯光波形越接近方波。若把灯阻近似为常数  $R_{\text{灯}}$ , 则仿真线匹配条件为

$$R_{\text{灯}} = Z_0 = \sqrt{\frac{L_i}{C_i}}$$

灯光脉冲宽度等于线路传输时间的 2 倍:

$$T = 2Z_0C = 2\sqrt{LC} = 2n\sqrt{L_iC_i}$$

$$\text{系统储能为: } W = \frac{1}{2} CU_0^2$$

$$\text{电路运转电压为: } U_0 = 2\sqrt{\frac{Z_0W}{T}} = 2\sqrt{\frac{R_{\text{灯}}W}{T}}$$

$$\text{脉冲上升时间为: } T_r = 0.53Tn^{-2/3}$$

$$\text{氙灯电阻: } R_{\text{灯}} = \frac{K_0}{i^{1/2}} = \frac{2kl}{\sqrt{\pi d} \left( \frac{0.77Wd}{Tl} \right)^{1/3}} (\Omega)$$

式中:  $L$ ——总电感量

$L_i$ ——每节电感量

$C$ ——总电容量

$C_i$ ——每节电容量

$n$ ——节数

$T_r$ ——脉冲上升时间

$d$ ——灯内径

$T$ ——灯光脉宽 (1/2 光输出峰点之间的时间)

$U_0$ ——充电电压

$R_{\text{灯}}$ ——等效灯阻

$K_0$ ——电阻系数  $K_0 = \frac{2kl}{\sqrt{\pi \cdot d}}$

$i$ ——放电电流  $i = \left[ \frac{0.77Wd}{Tl} \right]^{2/3}$

$k$ ——电阻率系数  $k = 1.13 \Omega \cdot A^{1/2}$

$l$ ——灯极间距

设计这种电路必须使灯阻  $R_{灯}$  与线路的特征阻抗相匹配:

$$R_{灯} = Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L_i}{C_i}},$$

这样才能将电能最有效地传送给负载, 否则将产生失配效应。

$R_{灯} < Z_0$  为欠阻尼情况, 将出现减幅振荡;

$R_{灯} > Z_0$  为过阻尼情况, 使波形幅值减弱。

这样都不利于激光输出。只有  $R_{灯} = Z_0$ , 电路工作在临界阻尼状态, 才能使灯光最强。另外必须使脉冲上升时间  $T_r$  尽量短, 灯光脉宽  $T$  不可过长, 节数  $n$  要尽量多, 接线电阻尽量小而线短。这对于提高泵浦速率和激光输出功率都是不可缺少的。特别对于产生序列激光脉冲和全息照相显得特别重要。

本电源仿真电路产生的灯光脉宽  $T=1$  毫秒。用硅光电二极管 2DUL 可同时测得灯光脉宽和静态激光波形。采用的测试电路及波形拍照如图 3 所示。显而易见, 激光波形是迭加在灯光波形上的, 且约在灯光波形的  $2/3$  处为激光波形的峰值点。因此, 采用调 Q 技术时, 要由延时器控制在此刻打开光闸, 可获得最强的动态激光输出。

#### 四、固体激光器电源的设计

脉冲固体激光器电源实质上是给储能电容的充、放电过程。在电源的设计前, 首先根据激光应用项目, 确定输出激光能量, 功率及激光脉宽等, 然后根据激光效率确定总的电能(应等于  $1/2 CU^2$ ), 由此确定脉冲氙灯尺寸及其相匹配的激光工作物质的大小。再选好最佳聚光器和光学谐振腔, 方可根据激光器的运行情况确定储能网络、充电方案、触发电路及其附加电路。

##### 1. 储能网络及氙灯触发

如项目需要静态激光输出或调 Q 单脉冲输出, 一般采用 LC 氙灯放电线路即可。这时灯光脉宽为  $T \approx \pi \sqrt{LC}$ 。如项目需要二个或二个以上的序列脉冲, 则必须采用仿真电路, 且节数  $n$  要多些, 灯光波形前沿要陡些, 每节电感量  $L_i$  要小些, 灯光脉宽也不宜长, 要在 1 毫秒以内, 这样才能保证具有足够的泵浦速率。

如不加水冷, 可将触发丝直接绕在灯上; 如加有水冷, 一个办法是将触发丝放在小玻璃管里, 再跟灯靠近密封好; 另一个办法就是腔体触发。高重复率的触发电路, 开关器件可采用高反压大功率管, 或采用闸流管。

##### 2. 选择充电主体电路

一般通常采用如下几种充电主体电路:

- 1) 用电阻限流。虽然简单易行但浪费电能 50% 以上。
- 2) 用感抗限流。虽然感抗不象电阻浪费电能, 将感抗功率返回电源。但使用电感体积大而笨重。
- 3) 如前所述, 不用任何电抗限流, 采用“自动扫描可控硅交流调压电路”实现恒流充电, 伏安效率很高, 是目前较好的充电方案之一。
- 4) 谐振充电。用于高重复频率, 充电精度高, 重复率可调, 效率较高。但成本高体积大, 低重复率不宜采用。具体电路可采用双开关、母子电容的 LC 谐振电路。

无论采用上述哪种充电主体电路, 一般均可采用桥式整流、全波整流和倍压整流电路。而

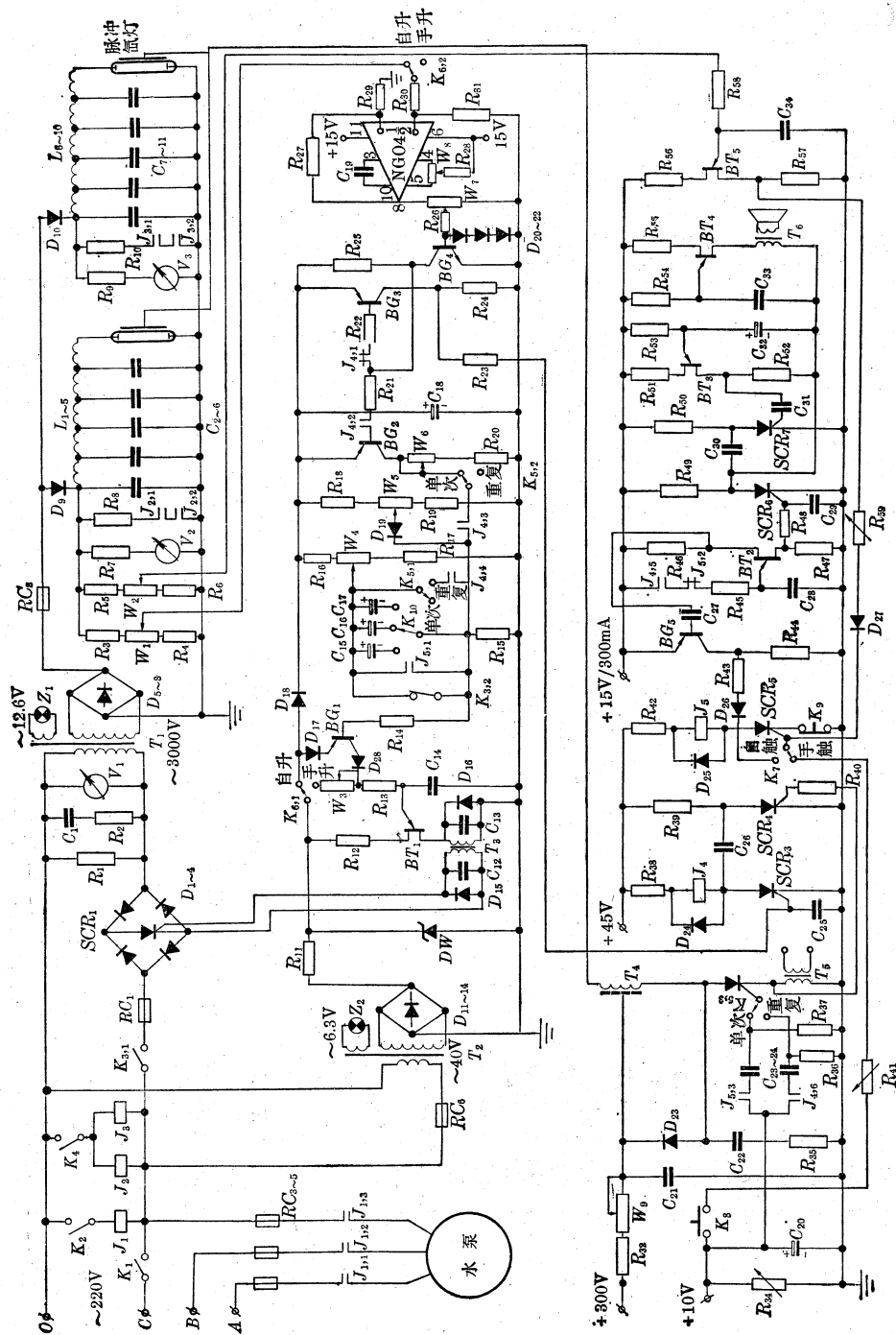


图 2 多用脉冲固体激光器电源原理线路(各元件参数见附表)

附表:

元 件	名 称 及 参 数	元 件	名 称 及 参 数	元 件	名 称 及 参 数	元 件	名 称 及 参 数
K <sub>1</sub>	电源总开关	K <sub>2</sub>	水泵开关	K <sub>3</sub>	充电开关	K <sub>3</sub>	充电开关
K <sub>4</sub>	放电开关	K <sub>5</sub>	单次、重复率档	K <sub>6</sub>	手动升压、重复率档	K <sub>6</sub>	手动升压、自动升压档
K <sub>7</sub>	手动触发,自动触发档	K <sub>8</sub>	手动触发按钮	K <sub>9</sub>	水泵控制继电器	K <sub>9</sub>	电源复位按钮
K <sub>10</sub>	高、中、低速扫描选择档	J <sub>1</sub>	水泵控制继电器	J <sub>2,3</sub>	放电控制继电器	J <sub>2,3</sub>	放电控制继电器 522 型
J <sub>4</sub>	自动补偿控制继电器 JRX-5A	J <sub>5</sub>	停电控制继电器 JRX-5A	V <sub>1</sub>	0~250V 交流电压表	V <sub>1</sub>	0~250V 交流电压表
V <sub>2,3</sub>	0~2kV 电压表	RC <sub>1</sub>	9A 快速熔断器	RC <sub>2</sub>	1A 快速熔断器	RC <sub>2</sub>	1A 快速熔断器
RC <sub>3,4,5,6</sub>	0.5A 快速熔断器	SCR <sub>1</sub>	3CT20/800	SCR <sub>2</sub>	3CT5/600	SCR <sub>2</sub>	3CT5/600
SCR <sub>3-7</sub>	3CT5/100×5	BT <sub>1-6</sub>	BT33E×5	NG04	运算放大器	NG04	运算放大器
EG <sub>1,2,3,5</sub>	3AK33A×4	EG <sub>4</sub>	3DG6C	T <sub>1</sub>	2kW 充电变压器 220V/3000V	T <sub>1</sub>	2kW 充电变压器 220V/3000V
T <sub>2</sub>	220V/40V, 6.3V 变压器	T <sub>3,5</sub>	脉冲变压器	T <sub>4</sub>	汽车点火线圈	T <sub>4</sub>	汽车点火线圈
T <sub>6</sub>	音频变压器	DW	2CW21j	W <sub>1</sub>	充电电压选择电位器 1k	W <sub>1</sub>	充电电压选择电位器 1k
W <sub>2</sub>	过压保护调节 1k	W <sub>3</sub>	手动升压调节 80k	W <sub>4</sub>	可控硅初始导通角调节 3.3k	W <sub>4</sub>	可控硅初始导通角调节 3.3k
W <sub>5</sub>	可控硅最大导通角调节 46k	W <sub>6</sub>	自动补偿电压调节 22k	W <sub>7</sub>	取样电平调节 33k	W <sub>7</sub>	取样电平调节 33k
W <sub>8</sub>	NG04 调零电位器 10k	W <sub>9</sub>	触发氙灯高压调节 150k	Z <sub>1,2</sub>	6.3V 指示灯	Z <sub>1,2</sub>	6.3V 指示灯
I <sub>1-10</sub>	66μH×10	C <sub>1</sub>	1μ/400	C <sub>2-11</sub>	150μ/2kV×10	C <sub>2-11</sub>	150μ/2kV×10
C <sub>12,13,26,31</sub>	0.22μ×4	C <sub>14,23,34</sub>	0.5μ×3	C <sub>15</sub>	50μ/25V	C <sub>15</sub>	50μ/25V
C <sub>16</sub>	300μ/25V	C <sub>17</sub>	1000μ/25V	C <sub>18</sub>	100μ/25V	C <sub>18</sub>	100μ/25V
C <sub>19</sub>	30P	C <sub>20</sub>	30μ/25V	C <sub>21</sub>	2μ/400	C <sub>21</sub>	2μ/400
C <sub>22, C<sub>29</sub></sub>	0.047μ/400V, 0.15μ	C <sub>23,24,26,30</sub>	0.47μ×4	C <sub>27,33</sub>	0.068μ×2	C <sub>27,33</sub>	0.068μ×2
C <sub>32</sub>	3μ/25V	D <sub>1-4</sub>	2CZ10/500×4	D <sub>5-10</sub>	2DL1/6kV×6	D <sub>5-10</sub>	2DL1/6kV×6
D <sub>11-14</sub>	2CZ1/100×4	D <sub>15-17,19-22</sub>	2CK13×7	D <sub>18</sub>	2CP24	D <sub>18</sub>	2CP24
D <sub>23</sub>	2CP26	D <sub>24-28</sub>	2CK13×4	R <sub>1</sub>	510Ω/100W	R <sub>1</sub>	510Ω/100W
R <sub>2</sub>	200Ω/5W	R <sub>3,7,9</sub>	10MΩ×3	R <sub>4</sub>	20Ω	R <sub>4</sub>	20Ω
R <sub>5</sub>	1MΩ	R <sub>6</sub>	5.1k	R <sub>8,10</sub>	2k/100W×2	R <sub>8,10</sub>	2k/100W×2
R <sub>11</sub>	400Ω/2W	R <sub>12,45,51,55</sub>	510Ω×4	R <sub>13</sub>	620Ω	R <sub>13</sub>	620Ω
R <sub>14</sub>	20k	R <sub>15</sub>	110k	R <sub>16</sub>	200Ω	R <sub>16</sub>	200Ω
R <sub>17</sub>	68k	R <sub>18</sub>	2k	R <sub>19</sub>	70k	R <sub>19</sub>	70k
R <sub>20,28,35,37</sub>	1k×4	R <sub>21,22</sub>	18k×2	R <sub>23,40,41</sub>	150~890Ω×3	R <sub>23,40,41</sub>	150~890Ω×3
R <sub>24,25,44</sub>	1.8k×3	R <sub>23</sub>	10k	R <sub>27,31</sub>	1MΩ×2	R <sub>27,31</sub>	1MΩ×2
R <sub>30,30</sub>	10k×2	R <sub>32</sub>	820Ω/2W	R <sub>45</sub>	470k×2	R <sub>45</sub>	470k×2
R <sub>34</sub>	13k~18k	R <sub>35</sub>	33Ω	R <sub>38,42</sub>	160Ω/2W×2	R <sub>38,42</sub>	160Ω/2W×2
R <sub>39</sub>	240Ω/2W	R <sub>43,46,59</sub>	150Ω~390Ω×3	R <sub>47,52,57</sub>	50~100Ω×3	R <sub>47,52,57</sub>	50~100Ω×3
R <sub>40,50</sub>	360Ω×2	R <sub>63</sub>	47k	R <sub>64</sub>	15k	R <sub>64</sub>	15k
R <sub>56</sub>	510Ω	R <sub>68</sub>	200k				

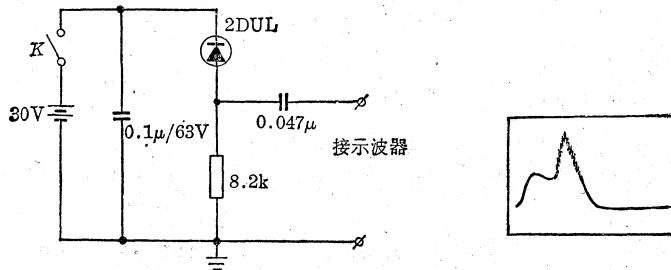


图3 灯光、激光波形及测试电路

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  $\sigma_2$  或  $\sigma_1$  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<sup>[7,9]</sup>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<sup>[7,9]</sup>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。