

重复率固体激光器电源

中国科学院上海光机所 206 组

重复率固体激光器在焊接、打孔、切割、显示、测距及军事技术、科学实验中获得越来越多的应用。在重复率激光器里，通常用氙闪光灯激发，从而涉及到重复率电源的设计和试制问题。本文简要介绍重复率固体激光器的电源设计的某些要点以及试制过程中的点滴经验，并提供一个重复率固体激光器电源的实际方案。

一、重复率固体激光器电源的几个问题

重复率电源本质上与一般电源相似，但重复率电源又有它本身的特点。下面先介绍重复率电源的几个问题，使我们对这个事物的规律性有所认识，从而正确设计重复率电源。

1. 重复率电源运行于瞬变状态

一般电源的工作接近于稳定状态，通常只在线路接通或切断过程中才出现浪涌，持续时间达几个周波。重复率电源则不一样，工作频率从几周到数百周，负载是电容或电感，运行于瞬变状态。

重复率电源计算是否要采用繁复的瞬态分析呢？实践证明，简便的工程计算完全能达到预定指标的要求。

为使重复率电源安全可靠地运转，须采取保护措施，使之经得起重复浪涌的冲击，选择元件也要留有充分的余地。

2. 伏安效率低于 50%

已知贮能电容的容量 C 、充电电压 V_c 和每次充电时间 T_z ，可由下式计算充电的平均电流：

$$I_{cp} = \frac{CV_c}{T_z}$$

电源平均功率：

$$P_{cp} = I_{cp} E_c \approx \frac{CV_c^2}{T_z}$$

贮能电容器的输出功率：

$$P_0 = \frac{1}{2} CV_c^2 f = \frac{CV_c^2}{2T_0}$$

式中： f ——重复频率

T_0 ——重复周期

显然，重复率电源的容量至少为贮能电容器输出功率的一倍，这由于贮能电容器在充电中存在无功部分，它将返回供电网络。谐振充电可提高功率因数，伏安效率接近 1。激光器电源配备专用发电机时应从最大充电电流考虑。

3. 氙灯的消电离

氙灯弧光放电以后,须经 3~15 毫秒,才能消电离,恢复阻断状态。若氙灯处于电离状态,加上数百伏以上电压,维持电流超过数十毫安(视电源容量而异),发出连续辉光或弧光。通常我们称之为“失控”。严重时会造成氙灯炸裂,电源损坏。

防止“失控”最简便的方法,是限制充电电流,使其小于灯的维持电流。氙灯充气压低,电源电压高,维持电流就小;反之就大。这就往往需要加入限流元件,如:对交流电源则串电感,而对直流电源则加电阻,在此情况下损耗也随之增大。因此,仅适用于小功率或重复率甚低的激光器。

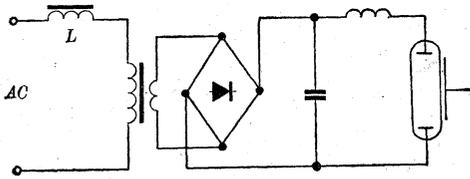


图1 电感限流

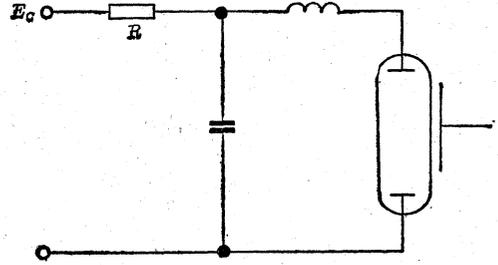


图2 电阻限流

大功率激光器电源充电电流超过氙灯的维持电流,充电时间加氙灯消电离时间小于重复周期,这时选用强流控制开关切断充电网络,确保灯已经消电离才充电,即充放电不能在同一时刻进行。图 3、图 4 用可控硅(SCR)做充电控制开关。待灯消电离后,再打开 SCR 充电。图 5 中的半波分频是利用正半周充电,负半周放电及消电离。

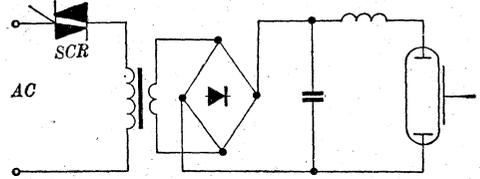


图3 初级控制

在高重复率情况下,重复周期小于灯的消电离加电源的充电时间,这时除加充电控制开关,氙灯网络中尚须安置放电控制开关,保证充、放电时间错开。

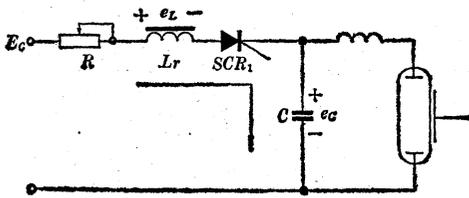


图4 谐振充电

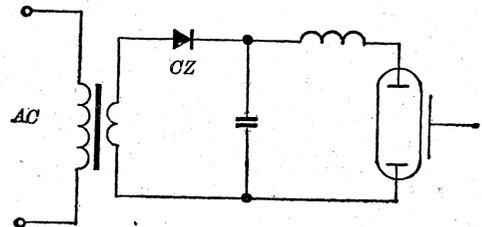


图5 半波分频

4. 充电精度

为了使激光输出稳定,贮能电容器必须在每个充电周期内精确地充电。在供电网络稳定时,充电精度直接由控制充电的开关动作误差 ΔT_z 来确定。

充电精度:

$$A = 1 - \frac{\Delta T_z}{T_z}$$

如：重复率 5 周，设贮能电容器精确充电时间 $T_c = 150$ 毫秒，如果选用有触点开关来接通和切断充电网络，动作误差为 50 毫秒，那末充电精度 $A = 66.7\%$ 。由此可见，重复率电源不宜采用有触点开关来控制充电。

可控硅开关时间仅几十微秒，做直流开关，动作误差可很小，充电精度极高。作交流控制开关，如与供电网络没有同步，相差半个周波（10 毫秒），设重复率仍为 5 周， $T_c = 150$ 毫秒，则 $A = 93.3\%$ 。

二、部件的选择、计算和工作原理

重复率电源一般由下列部件组成：氙灯网络、充电电源、触发器、氙灯触发等。

1. 氙灯网络

研制固体激光器，必须正确地选择与工作物质相匹配的泵浦灯。对重复率固体激光器，氙灯是目前最好的泵浦光源。氙灯本身是非线性元件，伏安特性复杂。额定能量、消电离时间、寿命等技术参数原则上应由实验测定。通常，为了使氙灯稳定工作，首先对它进行老化处理，也就是先使灯在低重复率、小能量下工作一段时间，然后在额定条件下工作。

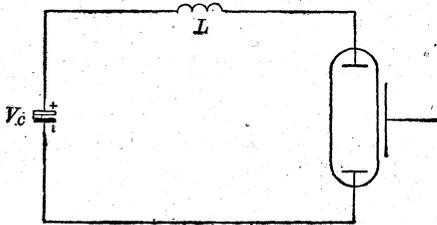


图 6 氙灯网络

图 6 给出了固体激光器电源最常用的氙灯网络。 C 是电容器电容（法拉），设其上充电电压为 V_0 （伏），则它所贮的能量为：

$$W_0 = \frac{1}{2} C V_0^2 \text{ (焦耳)}$$

这个能量基本上就是每次放电给氙灯的能量。

L 是成形电感，一方面降低放电电流的峰值和上升率，对延长灯的寿命是很有益的；另一方面还可以改善放电波形，提高光效。

成形电感的选择主要取决于灯光输出波形。灯光脉宽与工作物质的荧光寿命有关。如钽石榴石功率器件要求灯光脉宽约 200 微秒，红宝石 1 毫秒左右，钽玻璃 500~700 微秒。

氙灯网络在临界阻尼状态最佳。此时，可按下列近似方程估算网络元件、技术参数。

贮能电容器电容：

$$C = \frac{1}{K} \left[W_0 \Delta T_c \left(\frac{d^4}{l} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \text{ (法拉)}$$

式中： K ——与氙灯充气压力及杂质含量有关的参数。氙气气压高、杂质含量多， K 值也高，一般取 3~4.5。

W_0 ——电容器贮能量（焦耳）

ΔT_c ——灯光输出半功率点宽度（秒）

l ——氙灯极间距（毫米）

d ——氙灯内径（毫米）

电容器充电电压：

$$V_0 = \left(\frac{2W_0}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ (伏)}$$

成形电感量：

$$L = \frac{\Delta T_c^2}{3.6C} \text{ (亨利)}$$

放电电流峰值:

$$I_m = V_c \left(\frac{C}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ (安培)}$$

放电电流有效值:

$$I = I_m \left(\frac{\Delta T}{3T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ (安培)}$$

式中: ΔT ——灯光波形底宽(秒)

T_0 ——重复周期(秒)

高重复率情况下, 氙灯网络串接可控硅作放电控制开关。其电流、电压等级选择条件如下:

$$I_F \geq \frac{I}{1.57}$$

$$V_{SCR} \geq V_{cm}$$

我们在脉冲固体激光器系统中, 采用 $\phi 8 \times 80$ 毫米水冷电极氙灯, 灯内充气压 550 托, 输入 70 焦耳, 要求灯的闪光时间为 100 微秒(半宽), 底宽 200 微秒, 重复率 100 周, 则:

$C = 91.5$ 微法, 实际电容器已规格化, 选 100 微法高压脉冲电容器。

$$V_c = 1200 \text{ 伏}$$

$L = 27.8$ 微亨, 为便于调节, 成形电感分 10、20、30 微亨三档。实用 20 微亨。

$$I_m = 2690 \text{ 安培}$$

无感电阻串接放电网络测得 $I_m = 2200$ 安培。无成形电感时, 放电电流峰值达 3500 安培左右。

放电电流有效值 $I = 173$ 安培。按电流有效值选取氙灯网络导线和成形电感线径, 电流密度取 2~5 安培/毫米²。网络导线绞起来可减少射频干扰。

由于高压、大电流可控硅不多, 水冷可控硅使用不方便, 采用两只 3CT200/1200 串接起来运用。

2. 充电电源

充电电源是整个固体激光器电源最重要的组成部件之一。设计试制固体激光器电源主要围绕充电电源考虑, 计算充电电源电流、电压和功率, 权衡经济性和通用性, 选择较好的充电电源方案。

在设计和试制重复率电源设备过程中, 经历了不断实践、认识和提高的过程。半波分频简单、可靠, 缺点是重复率只能 50 周分频, 电压微调困难。初级控调电压调节方便, 但重复率仍受到限制。

经使用考验, 谐振充电电源充分显示了它的优越性: 充电精度高、重复率连续可变, 效率约 90%。整流变压器抽头, 谐振网络串接滑线电阻构成电压调变系统, 容易在大范围内调节充电电压。理论上可从 E_c 到 $2E_c$, 实际上只能做到 $1.6 \sim 1.8E_c$ 。应当指出, 谐振充电电源体积大, 成本高, 低重复率不宜采用。

谐振充电原理图见图 4、图 12。可控硅 SCR_1 触发导通, 恒压电源 E_c 向电容器 C 充电, 由于谐振电感 L_r 的存在, 电流只能逐渐增大, 电容器 C 上电压 e_c 也逐渐提高, 而电感上电压

$e_L = E_c - e_c$ 逐渐下降, 当 $e_c = E_c$, 则 $e_L = 0$, 电流达最大值, 此时电流使 C 继续充电, 使 e_c 大于 E_c , 这时电感 L_r 上出现反电动势, e_L 为负值, 电感 L_r 中电流逐渐减少, 当 $e_c = 2E_c$ 时, 则电流 $i = 0$, 以后 C 向 L_r 放电, i 为负值, 可控硅 SCR_1 关闭, 然后触发氙灯 (或打开放电可控硅 SCR_2)。待灯消电离 (或 SCR_2 切断) 后, 再次触发 SCR_1 , 如此循环不已。

计算充电电源, 首先合理选择充电时间 T_z 。氙灯消电离或放电开关 SCR_2 通断时间, 充电电源容量两者兼顾。 T_z 一般取重复周期 $1/3 \sim 3/4$, 由此计算谐振电感:

$$L_r = \frac{T_z^2}{C\pi^2} \text{ (亨利)}$$

调变电阻:

$$R \leq 2 \left(\frac{L}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ (欧姆)}$$

充电电源电压:

$$E_c = \frac{V_c}{1.6 \sim 1.8} \text{ (伏特)}$$

充电电源电流:

$$I_{cp} = \frac{CV_c}{T_z} \text{ (安培)}$$

电源容量:

$$P_{cp} = E_c I_{cp} = \frac{CV_c^2}{(1.6 \sim 1.8) T_z} \text{ (瓦特)}$$

可控硅 SCR_1 电流、电压等级的选择:

$$I_F \geq I_{cp}$$

$$V_{SCR} \geq 2E_{cp}$$

设: $T_z = 3 \sim 15$ 毫秒, $C = 100$ 微法, $V_c = 1200$ 伏特

$$L_r \approx 9 \sim 225 \text{ 毫亨}$$

重复率低, 工作时间短, 谐振电感采用铁芯, 分 30、100、200 毫亨三档。

重复率高, 工作时间长, 考虑散热, 电感量又小, 宜选用空芯型, 分 10、20、30 毫亨三档。

$$I_{cp} = 8 \sim 40 \text{ 安培}$$

$$E_c = 667 \sim 750 \text{ 伏特}$$

$$P_{cp} = 6 \sim 30 \text{ 千瓦}$$

现在我们使用两种规格直流电源: 7 千瓦/600、800、1000 伏特和 30 千瓦/600、800、1000 伏特。均采用三相桥式整流, 优点是效率高, 三相平衡, 波纹小, 减轻滤波装置。滤波电容一般取 $2 \sim 4C$, 它还起到电压调节作用。

$$R \geq 20 \sim 34.6 \text{ 欧姆}$$

实际上, 7 千瓦电源的调变电阻为 6 安培/10 欧姆, 30 千瓦电源的调变电阻为 20 安培/10 欧姆 (并联), 从 1800 伏调致 600 伏。

整流电源、电感线圈、变压器等设计, 应根据上述参数实际情况, 参照有关书籍进行计算。

充电可控硅采用两只 3CT50/1200 串接。

3. 触发器

触发器的作用是控制贮能电容充、放电。打开充电开关 SCR_1 , 使贮能电容精确地充电。

等充电完毕，在希望的时刻点燃氙灯。待灯消电离完了或放电开关 SCR_2 切断，再次打开充电开关……。

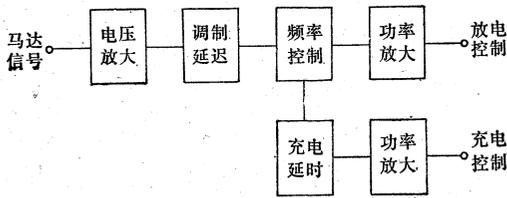


图7 马达调制触发器方框图

磁头位置取数十微秒到马达周期的二分之一。如6万转马达，调制延时可取50~500微秒。此延时信号加在单晶体管第二基极上，使之同步，达到调制目的。充电延时按灯消电离时间选择。如 $\phi 8 \times 80$ 灯，70焦耳，约3毫秒； $\phi 10 \times 120$ 灯，500焦耳，约8毫秒，充电延时取1~2毫秒。

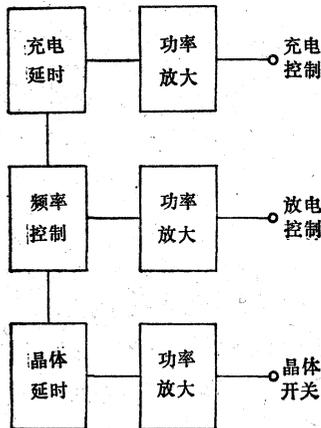


图8 晶体调制触发器

激光器采用的马达调制触发器方框图、原理线路分别示于图7和附图。

选用简单可靠的单结晶体管线路作频率发生器，控制重复频率。马达信号由录音磁头拾取，约100毫伏以上，经一级放大2伏左右。调制延时采用单稳态触发器，根据调制马达转速，

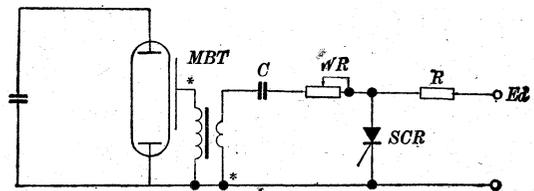


图9 外触发

晶体调制和马达调制触发器基本相似，方框图如图8所示。

4. 氙灯触发

(1) 外触发又称并联触发，是固体激光器最常使用的一种方法，如图9所示。高压触发脉冲加到缠绕灯的镍铬丝上或聚光器上，在灯中产生电离火花束，灯点燃发出很强的弧光。

由灯的击穿高压，触发强度选取高压 E_a ，触发储能电容 C 。阻断电阻 $R > E_a / I_H$ ，其中 I_H 是 SCR 的维持电流。通常采用： $E_a = 500$ 伏； $C = 0.47$ 微法； SCR ：3CT5H； $R = 50$ 千欧。触发强度的调节电阻 WR 取20欧姆。触发脉冲变压器用M4型 $\phi 12 \times 40$ 毫米磁芯，初级 $\phi 0.07 \times 12$ 高频纱包线20~50匝，次级43号漆包线1100~1600匝，变比1:30~50。

外触发简单，但储能电容电压不能太低，否则影响氙灯输出能量的稳定度，并容易产生射频干扰，高压击穿；可靠性随重复率提高而下降。

实验发现负高压触发可以提高激光输出的稳定度。

(2) 内触发：

内触发又称串联触发。我们曾采用过火花放电、饱和变压器二种方式的内触发。

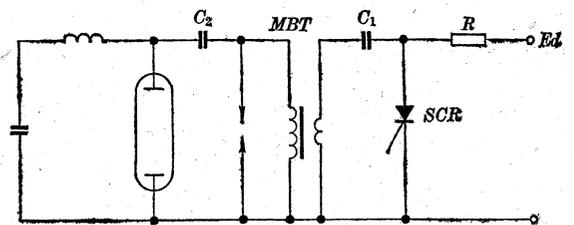


图10 火花放电式内触发

图 10 为火花放电式内触发线路, C_1 是触发贮能电容, C_2 是高频高压耦合电容, 适当选择 C_2 容量, 使 C_1 、 L 、 C_2 火花放电回路谐振, 产生高频高压, 使灯起始电离。这种方式比较简单, 可有很高的触发强度, 但是可靠性差, 火花隙使用寿命不长, 接收干扰大, 效率低。

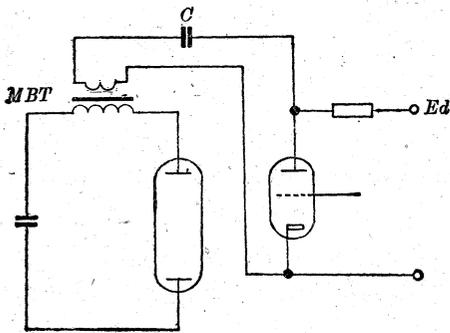


图 11 饱和变压器式内触发

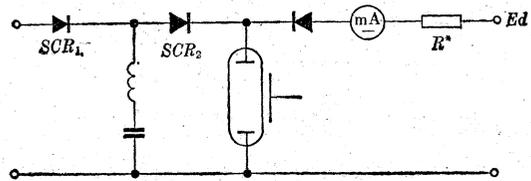


图 12 双开关预引燃

饱和变压器式内触发是这样工作的, 当变压器初级加上脉冲信号时, 变压器起着脉冲变换作用, 次级回路感应一个脉冲高压, 因而在灯内形成电离火花束, 促使氙灯点燃, 随之而来的巨大放电电流将变压器饱和, 次级电感量大大降低, 可视为空芯电感, 它起到成形电感的作用。铁芯采用冷轧硅钢带或普通硅钢片。

(3) 预引燃:

氙灯网络安装一个放电控制开关, 有可能也必须采用预引燃。图 12 中氙灯两端并联一个直流高压 E_d , 首先高压脉冲触发氙灯, 使灯预引燃, 用 R 限流, 维持辉光放电状态。这样, 当贮能电容充电完毕, 只要可控硅 SCR_2 一打开, 氙灯即形成弧光放电, 一俟放电电流小于 SCR_2 的维持电流, 则 SCR_2 自行截止。预引燃减少了由于高压触发引起的射频干扰, 并且延长灯的寿命, 提高了光效。预燃高压 E_d 宜选高些, 约 1200~2000 伏, 预燃电流约 20 毫安以上。若 E_d 过低, 维持预燃所需的电流便大, 而且灯易熄灭。

我们曾用高压脉冲变压器内触发使连续灯(氙灯)起辉进行预燃点灯, 获得良好结果。实验表明氙灯较氙灯维持预燃的电流大好几倍, 同时预燃电流大, 但氙灯起弧电压低。

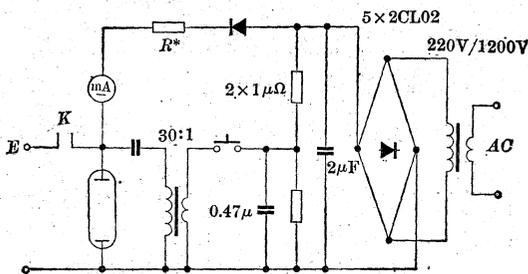


图 13 连续灯预燃线路

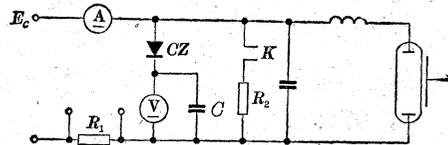


图 14 附加线路

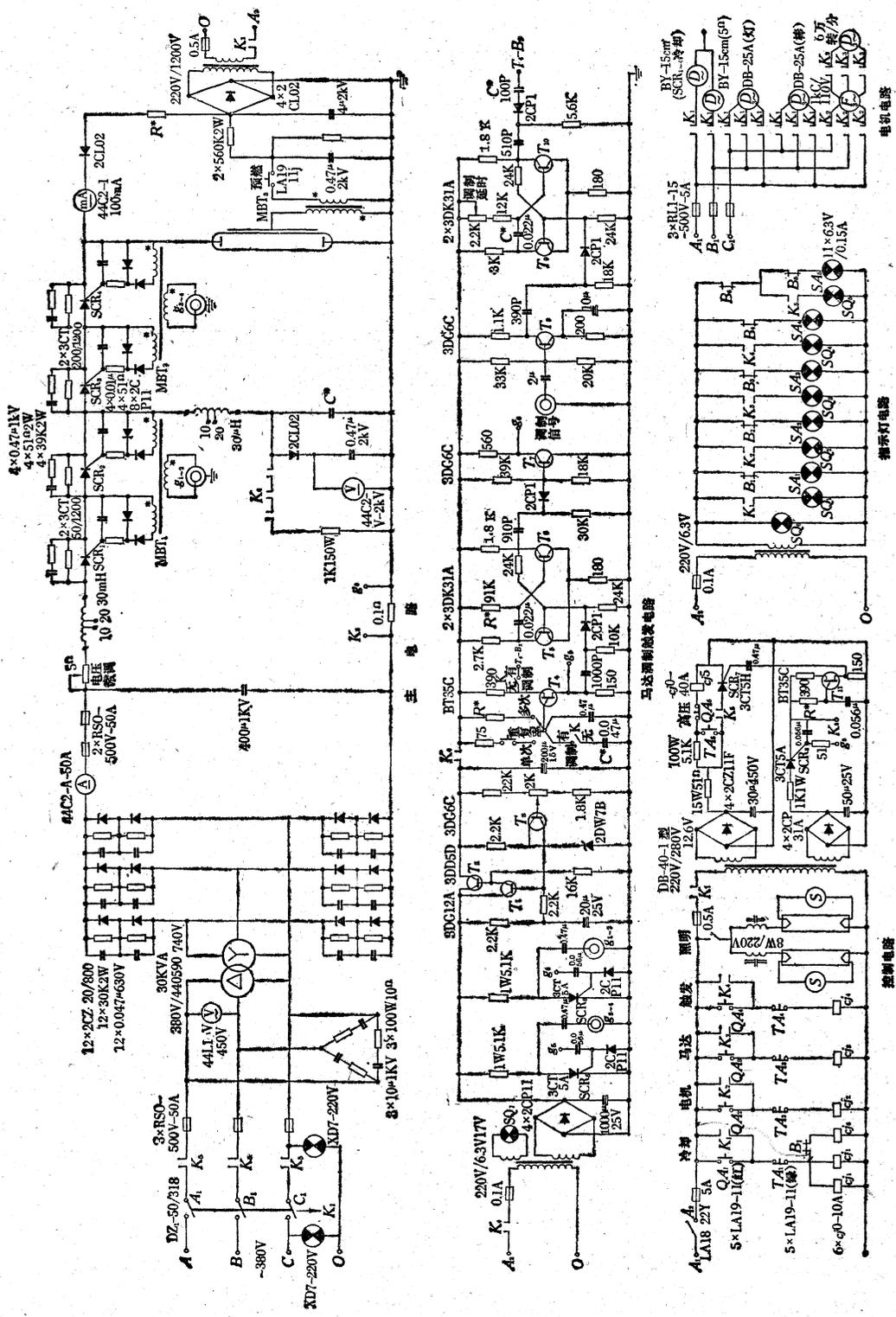
5. 附加电路

根据使用要求, 重复率电源需要峰值电压指示、充电过时保护、放电等附加电路, 简略介绍一下电路及有关原理。

直流电流表 Δ 指示值:

$$I_{A-} = CV_0 f = \frac{CV_0}{T_0}$$

此值非真正充电电流, 电流表起到监测频率和失控作用。



附图 谐振充电预引燃式重复率固体激光器电源的原理线路

硅堆 CZ 、电容 C 、直流电压表 V 上构成一个峰值电压指示表。在 $CR_V \gg T_0$ 、 $CR_2 \ll T_0$ 时 (R_V 为电压表内阻, R_2 为硅堆内阻), 这时电压表才能较真实地反映重复率工作贮能电容的充电电压值。

为保证安全, 高压切断后, 贮能电容较快地经泄放电阻 R_2 放电致安全值, 按下式验算电阻 R_2 :

$$t = 2.3 R_2 C \lg \frac{1.41V_0}{V} \text{ 秒}$$

式中: t ——放电时间, 小于 30 秒

V ——残存电压, 低于 20 伏

泄放电阻 R_2 的功率:

$$P = \frac{W_0}{t}$$

过时保护工作是这样的, 取样电阻 R_1 上电压, 触发一只可控硅 (SCR_3), 控制单结晶体管振荡器 (T_{11})。如发生失控和意外故障, 充电网络接通时间超过额定充电时间, 则振荡器输出触发另一只可控硅 (SCR_7), 切断高压, 较有效地保护氙灯和电源设备。原理线路见附图。

参 考 资 料

- [1] "Flash lamp Circuit, Proc. of the Technical Program", Electro-optical Systems Design Conference, 1971, West 20~29.
- [2] W. R. Hook *et al.*; *IEEE, Trans. Electron. Devices*, 1972, **ED-19**, No. 3, 308~314.
- [3] N. P. DePratti; *J. Phys. E, Scient. Instrum.*, 1971, **4**, No. 3, 253~256.
- [4] 《脉冲激光器电源设计》, 国外激光, 1970, No. 5.
- [5] 上海可控硅应用资料汇编 (第一、第二辑——上海科技情报研究所).
- [6] 《可控硅及其应用》, 上海科技情报研究所.
- [7] 《半导体线路》, 复旦大学.

学理论, 抓路线, 加快社会主义建设步伐

——上海市举行 1975 年激光工作经验交流会

上海市革会科技组于去年 10 月上旬召开了 1975 年激光工作经验交流会, 到会的有各有关局、公司、工厂以及科研部门、大专院校的领导干部和三结合小组的代表四百多人。市激光技术协作组负责人汇报了工作。一年来, 上海激光科学实验活动有了新的发展, 全市研究、应用激光技术的单位增长了 38%, 课题增长 70%, 从事这方面工作的三结合人数增长 61%。全市已经形成了一支专、群结合, 以工人为主体的激光科学实验队伍。常用激光器件、元件已经达得新的水平。在工业生产、交通运输、医疗卫生和科学研究等方面都取得了不少应用成果, 其中有些达到了世界先进水平, 有的在逐步推广应用。

会议认为, 与形势发展相比, 在贯彻狠抓技术改造和尽量采用新技术等方面, 全市发展是不平衡的, 步子还不够快, 尤其是激光器件、元件质量的提高, 扩大产量以及任务协调和组织管理方面还须作更多的努力。目前, 有关部门正在积极采取措施解决上述问题, 以促进全市激光技术的迅速发展, 让激光这门新技术为全面完成国民经济计划发挥更大的作用。