

表 1 Nd³⁺:YAG 激光器的连续 1.32 μm 单模输出特性

谐振腔参数			输入功率	TEM ₀₀ 输出	多模输出
a	b	l	(W)	(W)	(W)
200	270	100	6200	2.8	19
130	285	145	6200	3.0	23
200	380	—	6200	—	15
150	150	—	6200	—	30

输出功率达到 30 W, 在腔内加入 φ1.5 mm 小孔进行选模, 可获得单模输出, 实验结果见表 1。图 2 示出单模和多模激光输出特性。当 TEM₀₀ 输出激光达到 3 W 时, 激光模式特性如图 3 所示。实验表明, 基模光束强度的高斯分布曲线与理论曲线符合很好。

二、调谐实验结果

在同一实验装置上, 将小孔取下, 换上 0.1 mm 厚的石英实体标准具。在适当选择腔反射镜的间距和合理放置标准具的位置相匹配的条件下, 固定输入泵浦功率, 精确调整标准具的倾斜角, 就可以改变激光振荡的光程, 逐个地选出单一激光波长输出。用 44 W 平面光栅单色仪测出每条激光谱线的位置, 并用 JGK-3 型功率计分别测出每条激光谱线的功率。

调谐出六条激光谱线, 其波长分别为 1.3188 μm、1.3200 μm、1.3338 μm、1.3350 μm、1.3382 μm 和 1.3564 μm。当器件输入 5000 W 泵浦功率时, 其输出功率分别是 9.3 W、3.6 W、3.1 W、0.7 W、7.1 W 和 2.3 W。在图 4 中给出 Nd³⁺:YAG 荧光光谱相对应调谐激光谱线。

在表 2 中列出可调谐的激光波长对应的能级跃迁和发射截面的数据。

表 2

激光波长 (μm)	能级跃迁 (⁴ F _{3/2} — ⁴ I _{13/2}) ^[1]	发射截面 (×10 ⁻²⁰ cm)	输出功率 (W)
1.3188	R ₂ →X ₁	8.7	9.3
1.3200	R ₂ →X ₂	1.9	3.6
1.3338	R ₁ →X ₁	3.0	3.1
1.3350	R ₁ →X ₂	3.4	0.7
1.3382	R ₂ →X ₃	9.2	7.1
1.3564	R ₁ →X ₄	4.4	2.3

参 考 文 献

- [1] 张秀荣, 吴光照, 《激光》, 1982, 9, No. 9, 594。
(中国科学院上海光机所 张秀荣 吴光照
1984年3月6日收稿)

一种可连续调压的阶梯充电激光器电源

Abstract: The principle of a flight of stairs charged power supply, of which voltage can be continuously adjusted, is described. The features of the circuit are analysed. This power supply has the advantages of voltage adjustability over wide range, simplicity and higher efficiency.

由于阶梯充电效率高, 人们颇感兴趣^[1]。若阶梯数为 N , 那么每次充电就由 N 步充电来完成。设每个阶梯电压为 V_0 , 则在储能电容上得到的电压间隔也为 V_0 。由于电压不能连续调节, 给实际应用带来了一定的困难。为了克服此种缺点, 我们对阶梯充电电源进行了改进, 给出了一种电压连续可调的阶梯充电电源的原理及实现途径。

一、基本原理

充电回路及充电波形分别如图 1 和图 2 所示。图 2 中 u_{g1} 、 u_{g2} 、 u_{g3} 分别为 SCR_1 、 SCR_2 、 SCR_3 的触发电压波形。 u_{CL} 为相应的充电电压波形。

充电时首先触发 SCR_1 , 外电源 V_1 通过 R_1 向

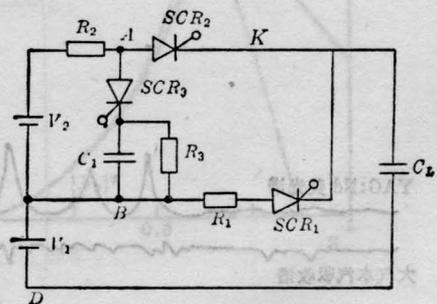


图 1 充电回路主回路

氙灯储能电容器 C_L 充电。当 C_L 的充电电压达到

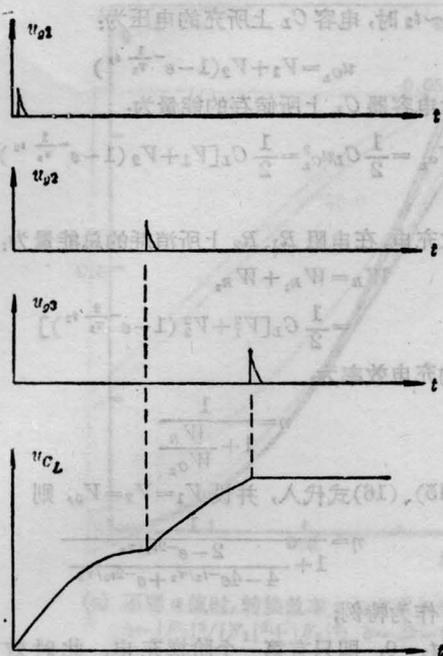


图2 可控硅触发波形及储能电容的充电波形

V_1 时, SCR_1 自然关断。然后触发 SCR_2 , 外电源 V_1 和 V_2 串联后通过 R_2 向 C_L 充电。在此次充电时, C_L 上已有电压 V_1 , 即 C_L 从 V_1 开始充电。当 V_{C_L} 充到所需电压时, 触发 SCR_3 , SCR_3 导通后, 由于外电源 V_2 通过 R_2 向 C_1 充电, 使 SCR_2 的阳极电位降低, 强迫 SCR_2 关断, 达到控制 C_L 充电电压的目的。电容 C_L 上的电压调节范围为 $V_1 \sim (V_1 + V_2)$ 。

实质上上述充电回路是阶梯数为 2 的电压可调的阶梯充电回路。

二、充电电压可调的控制方法

SCR_2 触发后的充电回路如图 3 所示, 由于第一个阶梯 SCR_1 导通后, 使 C_L 上充有电压 V_1 。其回路方程为:

$$i_2 R_2 + \left(\frac{1}{C_L} \int i_2 dt + V_1 \right) = V_1 + V_2 \quad (1)$$

式中 i_2 为充电电流。方程(1)的解为:

$$i_2 = i_{20} e^{-\frac{1}{\tau_2} t_2} \quad (2)$$



图3 SCR_2 触发导通后的充电回路

$$u_{C_L} = V_1 + V_2 (1 - e^{-\frac{1}{\tau_2} t_2}) \quad (3)$$

式中 $\tau_2 = R_2 C_L$, $i_{20} = \frac{V_2}{R_2}$ 。

由于 $R_3 \gg R_2$, 故 SCR_3 导通瞬间, 图 1 的关断回路可简化为图 4。由图 4 可列出方程:

$$i_3 R_2 + \frac{1}{C_1} \int i_3 dt_3 = V_2 \quad (4)$$

解此方程得

$$i_3 = i_{30} e^{-\frac{1}{\tau_3} t_3} \quad (5)$$

$$u_{C_1} = (1 - e^{-\frac{1}{\tau_3} t_3}) V_2 \quad (6)$$

式中 $\tau_3 = R_2 C_1$, $i_{30} = \frac{V_2}{R_2}$ 。



图4 关断回路

注意充电过程中 t_2 、 t_3 有不同的起始点。 t_3 的起始点即为关断时刻 t_0 。故:

$$t_3 = t_2 - t_0$$

于是(6)式变为:

$$u_{C_1} = [1 - e^{-\frac{1}{\tau_3} (t_2 - t_0)}] V_2 \quad (7)$$

从图 1 可知, C_1 未充电时, B 点相对于 D 点的电位为 V_1 。要使 SCR_2 关断, 必须使 SCR_2 的阳极电位低于或等于阴极电位, 即图 1 中的 A 点电位低于或等于 K 点的电位。即

$$u_A \leq u_K$$

或

$$u_{C_1} + V_1 \leq u_{C_L}$$

$$[1 - e^{-\frac{1}{\tau_3} (t_2 - t_0)}] V_2 + V_1 \leq (1 - e^{-\frac{t_2}{\tau_2}}) V_2 + V_1$$

$$[1 - e^{-\frac{1}{\tau_3} (t_2 - t_0)}] V_2 \leq (1 - e^{-\frac{1}{\tau_2} t_2}) V_2 \quad (8)$$

尽管 SCR_3 刚导通的瞬间, C_3 上的电压总是低于 C_L 上的电压, 不等式(8)似乎总能满足。但通常 C_1 总是小于 C_L , C_1 上的电压上升速度较 C_L 的上升速度快, 在 SCR_3 导通后的不长时间 Δt 内 C_1 上的电压接近或超过 C_L 上的电压。如果此段上升时间 Δt 大于 SCR_2 的关断时间 t_{off} , 则可使 SCR_2 可靠的关断, 起到控制 C_L 上的充电电压的作用。

设关断时刻为 t_0 , SCR_2 的关断时间为 t_{off} , 要使可控硅 SCR_2 可靠地关断, 则(8)式中的 t_2 、 $t_2 - t_0$ 必须满足:

$$t_2 - t_0 = t_{off}$$

$$t_2 = t_0 + t_{off}$$

于是 SCR_2 关断条件为:

$$(1 - e^{-\frac{t_{off}}{\tau_2}}) V_2 \leq [1 - e^{-\frac{t_0 + t_{off}}{\tau_2}}] V_2 \quad (9)$$

或

$$e^{-\frac{t_{off}}{\tau_2}} > e^{-\frac{t_0 + t_{off}}{\tau_2}} \quad (10)$$

为了满足(9)式或者(10)式给出的关断条件,可以选择不同的 τ_2 、 τ_3 、 t_0 及 t_{off} 的值。为了获得较宽的电压调节范围, t_0 通常选得较小(例如 $t_0 \leq 0.1\tau_2$)。当充电回路的时间常数 τ_2 确定之后,可控硅 SCR_2 的关断时间 t_{off} 越小,关断回路的时间常数越大,关断效果越好,即电压调节范围越宽。图5中的实线①、②、③及虚线④、⑤、⑥、⑦、⑧分别为不同参数时的 u_{C_1} 和 u_{C_L} 的变化情况。要使 SCR_2 可靠地关断,必须使 $u_{C_1} \leq u_{C_L}$,即图中的实线值应小于或等于虚线值。

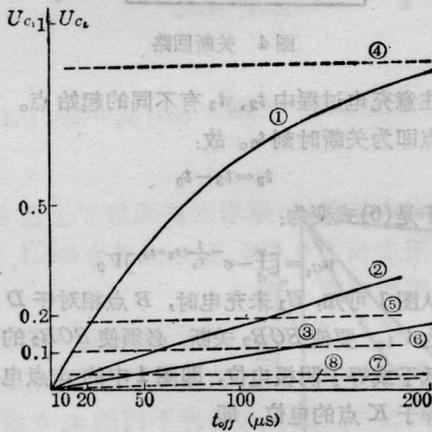


图5 调压效果和 SCR_2 的关断时间的关系

- ① $\tau_3 = 0.1 \text{ ms}$; ② $\tau_3 = 0.5 \text{ ms}$; ③ $\tau_3 = 1 \text{ ms}$;
- ④ $\tau_2 = 1 \text{ ms}, t_0 = 2 \text{ ms}$; ⑤ $\tau_2 = 10 \text{ ms}, t_0 = 2 \text{ ms}$;
- ⑥ $\tau_2 = 10 \text{ ms}, t_0 = 1 \text{ ms}$; ⑦ $\tau_2 = 50 \text{ ms}, t_0 = 2 \text{ ms}$;
- ⑧ $\tau_2 = 10 \text{ ms}, t_0 = 0.1 \text{ ms}$

三、充电效率

参看图1。第一个阶梯充电结果, C_L 上充得的电压 V_1 , 电阻 R_1 消耗的能量为 $\frac{1}{2} C_L V_1^2$ 。

第二个阶梯充电, 此时 C_L 上已充有 V_1 的电压。设第二个阶梯充电电流为 i_2 , 在充电过程中电阻 R_2 上所消耗的能量为

$$W_{R_2} = \int_0^{t_2} i_2^2 R_2 dt_2 = \int_0^{t_2} (i_{20} e^{-\frac{t_2}{\tau_2}})^2 R_2 dt_2$$

$$W_{R_2} = \frac{1}{2} C_L V_2^2 (1 - e^{-\frac{2t_2}{\tau_2}}) \quad (14)$$

从 $0 \sim t_2$ 时, 电容 C_L 上所充的电压为:

$$u_{C_L} = V_1 + V_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{\tau_2}})$$

此时电容器 C_L 上所储存的能量为:

$$W_{C_L} = \frac{1}{2} C_L u_{C_L}^2 = \frac{1}{2} C_L [V_1 + V_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{\tau_2}})]^2 \quad (15)$$

两次充电, 在电阻 R_1 、 R_2 上所消耗的总能量为:

$$W_R = W_{R_1} + W_{R_2}$$

$$= \frac{1}{2} C_L [V_1^2 + V_2^2 (1 - e^{-\frac{2t_2}{\tau_2}})] \quad (16)$$

总的充电效率为:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{W_R}{W_{C_L}}}$$

将(15)、(16)式代入, 并设 $V_1 = V_2 = V_0$, 则

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2 - e^{-2t_2/\tau_2}}{4 - 4e^{-t_2/\tau_2} + e^{-2t_2/\tau_2}}} \quad (17)$$

作为特例:

$t_2 = 0$, 即只有第一个阶梯充电, 此时效率为 $\eta_{t_2=0} = 50\%$

$t_2 = \infty$, 即第二个阶梯完全充电

$$\eta_{t_2=\infty} = 66.6\%$$

从(17)式及图6可知, 充电效率随着第二个阶梯的充电时间的增加而增加。当充电时间远大于回路的时间常数时, 其效率为66.6%, 此时的效率等于阶梯数为2的充电效率, 即

$$\eta = \frac{N}{N+1} = \frac{2}{2+1} = \frac{2}{3} = 66.6\%$$

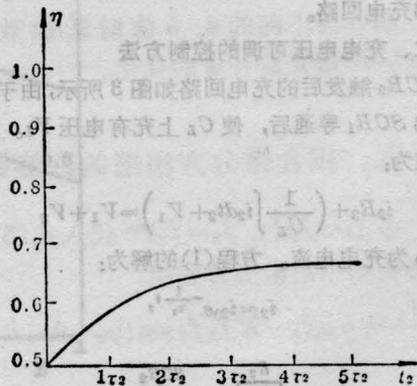


图6 充电效率和第二个阶梯的充电时间的关系

四、一种实用的电压连续可调的阶梯充电激光器电源

图7为一种实用的、电压连续可调的阶梯数为

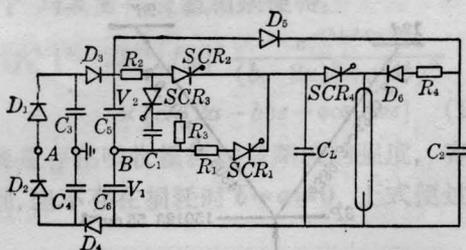


图7 一种实用的电压连续可调的阶梯充电电源主回路

2的激光器电源主回路。由 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 与 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 构成桥式倍压整流网络^[2]，供给直流电压 V_1 、 V_2 。预燃电源直接由 V_1 、 V_2 通过 D_5 向 C_2 供电构成。省去了预燃变压器和整流部分，可进一步降低体积和造价。由于充电回路中有限流电阻 R_1 和 R_2 及 C_5 、 C_6 的存在，因而此种电源在充电过程中对电网冲击极小。

另外，此种充电回路，储能电容器 C_L 的增大或减少不会影响回路的工作，因而 C_L 可在很大范围内变化，增加了此种电源对不同储能要求的适应能力。

当 $\tau_3 > (\tau_1 + \tau_2)$ 时 ($\tau_3 = R_3 C_1$)，因 R_3 的阻值由 SCR_3 的维持电流 I_H 决定，即

$$R_3 \leq \frac{V_2}{I_H}$$

故最高允许重复频率

$$f_{\max_1} \leq \frac{I_H}{5V_2 C_1}$$

为了提高重复频率，可增设一只可控硅泄放 C_3 上的电荷。此时，最高重复频率由回路时间常数 ($\tau_1 + \tau_2$) 确定。

$$f_{\max_2} = \frac{1}{5(\tau_1 + \tau_2)}$$

参 考 文 献

- [1] Robert W. Mcmillan; *Laser Focus*, 1977, 13, No. 2, 62~67.
- [2] Д. И. Панифилов, В. С. Иванов; *Приборостроение*, 1980, №7, 36—42.
- [3] 周志康, 李赤舟; «应用激光联刊», 1981, No. 2
(重庆市光学机械研究所 周志康 李赤舟
1983年10月5日收稿)

增强型光电流效应

Abstract: This paper reports the double resonance optogalvanic effect in neon. The first step is $3s3p$ transition, and followed by that from $3p$ state to a higher one. The signal of such optogalvanic effect is greatly enhanced by up to two orders of magnitude with respect to the signal produced by the second step alone. Therefore, the method can be used to detect more optogalvanic signals.

对充 Ne 放电管，相应于 $2p^53s$ 组态(其中 $^3P_{2,0}$ 是亚稳态)到 $2p^53p$ 组态的跃迁，所产生的光电流效应信号大(甚至可大到几伏)，易观察，已被研究较多^[1~4]。但从 $2p^53p$ 向更高能态的跃迁，由于信号弱，一般只有 $10^{-3} V$ 的数量级，易被气体放电噪声所掩盖，测量较困难，所以迄今对它们的测量报道很少。但用双步共振激发，可使光电流效应大大提高，如图1所示。用频率 ν_1 的光子使放电管中气态原子从低能级 A 激发到中间能级 A^* ，同时用 ν_2 的光子使该原子由 A^* 再激发到高能级 A^{**} 。由于 A^{**} 态的电离能已很低，因此碰撞电离截面 σ_{i1} 较大。此外，高激发态布居数的增加，将引起电子分布函数 $f(\epsilon)$ 变化，使电子平均能量增加。因此，在气体放电中，高能态原子将对电离起主导作用。采用

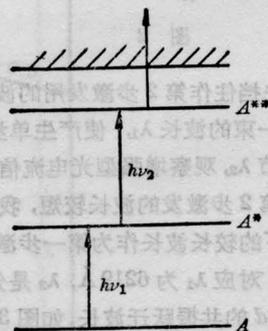


图1 双步共振激发

双步激发，使 A^{**} 的布居数 N 增加，而电离速率又随布居数 N 与电离截面 σ_{i1} 的增加而增加，从而使光电流效应的灵敏度大大增加。这种亦称作增强型