

新型高重复率脉冲固体激光电源

王又青 郭振华 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 本文介绍了一种新颖的高重复率脉冲固体激光电源, 并从理论上详细分析了其工作原理, 该激光电源具有重复频率高, 体积小, 噪音低, 效率高及调节方便等优点, 具有较大的应用价值。

关键词: 脉冲激光 电源

A new power supply for pulse solide laser with high repeated frequency

Wang Youqing, Guo Zhenhua, Li Zhaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

Abstract: This paper intruduces a new pulse solide laser power supply and analyses the operation mechanism theoretically in detail. The power supply has these features such as high repeated frequency, small size lower noise, high efficiency and convinent adjustment, and can be used in single lamp pump system as well as double lamps pump system, and other practical application.

Key words: pulse laser power supply

一、引言

目前, 脉冲固体激光器在国防, 工业, 科研等众多领域都有着广泛的应用。在某些应用领域中对脉冲固体激光器的重复频率有着特殊的要求, 如激光切割与标刻, 就要求重复频率在 150Hz 以上, 又如蓝绿激光探测, 则要求重复频率在 300Hz 左右。现在用传统的方法, 如谐振充电^[1,2]等, 要达到这样的频率, 困难较大或成本较高, 结构复杂。本文提出的新型脉冲固体激光电源, 较好地解决了这些问题, 从而能很容易地实现高重复率运转。

二、电源结构与原理分析

我们的脉冲固体激光电源如图 1 所示。它是一个双灯泵浦系统。我们假定负载氙灯始终处于小电流(100mA 左右)预燃状态下, 此时灯的等效电阻约为几千欧姆, 当 SCR₁ 或 SCR₂ 触发导通时, C₁ 或 C₂ 即对灯 1 或灯 2 进行脉冲放电, 灯的放电过程迅速从非稳放电状态过渡到

类稳定放电状态,此时灯的等效电阻保持在一个较稳定的最小值上(0.5Ω左右),为简单起见,

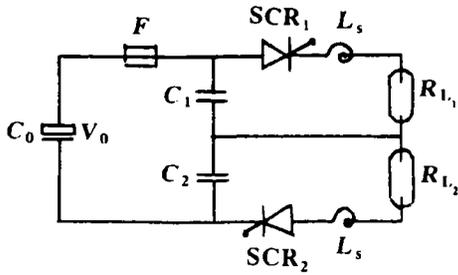


Fig. 1 Double lamp pump circuit

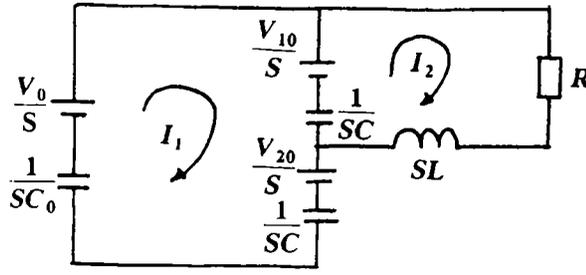


Fig. 2 Equivalent circuit while SCR₁ is on

我们分别用电阻 R_1, R_2 来等效灯 1, 灯 2 进行分析: 设滤波电容器 C_0 上充电电压为 $V_0, C_1 = C_2 = C, R_1 = R_2 = R$, 那么 C_1, C_2 上分别充有 $V_0/2$ 电压。

令 SCR_1 首先触发导通, 其拉普拉斯等效电路如图 2 所示, 此时有方程如下:

$$\begin{cases} \frac{V_0}{S} = \left(\frac{1}{SC_0} + \frac{1}{SC} + \frac{1}{SC} \right) I_1 + \frac{V_{10}}{S} + \frac{V_{20}}{S} - \frac{1}{SC} \cdot I_2 \\ \frac{V_{10}}{S} = \left(R + SL + \frac{1}{SC} \right) I_2 - \frac{1}{SC} \cdot I_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $V_{10} = V_{20} = V_0/2$ 。

因为 $C_0 \gg C$, 所以上式可简化为

$$\begin{cases} I_2 = 2I_1 \\ \frac{V_{10}}{S} = \left(R + SL + \frac{1}{SC} \right) I_2 - \frac{1}{SC} \cdot I_1 \end{cases} \quad (2)$$

解得:

$$I_1 = \frac{V_{10}}{L} \frac{1}{(S + \alpha)^2 + \omega^2}$$

式中, $\alpha = R/(2L), \omega^2 = 1/(2LC) - R^2/(4L^2) = \omega_0^2 - \alpha^2, \omega_0 = 1/\sqrt{2LC}$

为限制电流上升率 di/dt 及峰值, 可选 $L = C$ 。

此时, $\omega = \sqrt{(2 - R^2)/(4L^2)} = \sqrt{(2 - R^2)/(4LC)}$

当灯处于类稳定放电状态时, $R \approx 0.5\Omega$, 所以 $\omega > 0$, 此时

$$I_1 = \frac{V_{10}}{2\omega \cdot L} \cdot \frac{\omega}{(S + \alpha)^2 + \omega^2}$$

经拉普拉斯反变换后即得:

$$\begin{cases} i_1 = \frac{V_{10}}{2\omega \cdot L} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega t \\ i_2 = 2i_1 = \frac{V_{10}}{\omega \cdot L} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega t \end{cases} \quad (3)$$

同理可得:

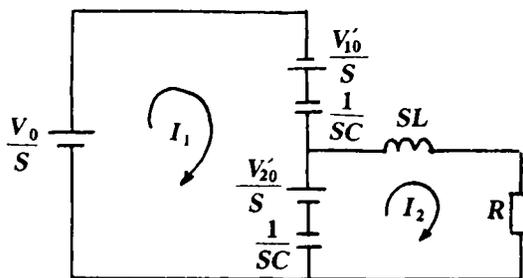
$$\begin{cases} U_1 = V_{10} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \frac{\cos(\omega t - \beta)}{\cos \beta}, \text{tg} \beta = \frac{\alpha}{\omega} \\ U_2 = V_0 - U_1 = V_0 - V_{10} e^{-\alpha t} \cdot \frac{\cos(\omega t - \beta)}{\cos \beta} \end{cases} \quad (4)$$

由(3)式可知:当 $\omega t = \pi/2 - \beta$ 时, i_1, i_2 达最大值, $i_{1\max} = \frac{V_{10}}{2\omega L} \cdot e^{-\frac{\alpha}{\omega}(\frac{\pi}{2}-\beta)} \cdot \cos\beta$ 。当 $\omega t = \pi$ 时, $i_1 = i_2 = 0$, SCR₁ 过零关断, 此时

$$\begin{cases} U_1 = -V_{10} \cdot e^{-\frac{\alpha\pi}{\omega}} = -V_{10} \cdot k = -\frac{k}{2} \cdot V_0 = U_{10}' \\ U_2 = V_0 + V_{10} \cdot e^{-\frac{\alpha\pi}{\omega}} = V_0 + k \cdot V_{10} = V_0 + \frac{k}{2} \cdot V_0 = U_{20}' \end{cases} \quad (5)$$

式中, $k = e^{-\frac{\alpha\pi}{\omega}}$ 。

当 SCR₂ 随后又导通时, (5)式即为其初始条件, 相应拉普拉斯等效电路如图 3 所示, 同理可解得:



$$\begin{cases} i_1 = \frac{V_{20}'}{2\omega L} \cdot e^{-at} \cdot \sin\omega t \\ i_2 = 2i_1 = \frac{V_{20}'}{\omega L} \cdot e^{-at} \sin\omega t \\ U_1 = V_0 - V_{20}' e^{-at} \cdot \frac{\cos(\omega t - \beta)}{\cos\beta} \\ U_2 = V_{20}' e^{-at} \cdot \frac{\cos(\omega t - \beta)}{\cos\beta} \end{cases} \quad (6)$$

Fig.3 Equivalent circuit while SCR₂ is on

当 $\omega t = \pi$ 时, $i_2 = i_1 = 0$, SCR₂ 过零关断, 此时,

$$\begin{cases} U_1 = V_0 + V_{20}' \cdot k = V_0 + \left(V_0 + \frac{k}{2} V_0\right)k = V_0 \cdot \left(1 + k + \frac{k^2}{2}\right) = U_{10}'' \\ U_2 = -k \cdot V_{20}' = -k \left(V_0 + \frac{k}{2} V_0\right) = -V_0 \cdot \left(k + \frac{k^2}{2}\right) = U_{20}'' \end{cases} \quad (7)$$

∴

同理不难求得, 当经过 n 次循环后, 有如下结果:

$$\begin{cases} U_1(\text{或 } U_2) = V_0 \left[1 + k + k^2 + \dots + k^{n-1} + \frac{k^n}{2}\right] \\ U_2(\text{或 } U_1) = -V_0 \left[k + k^2 + \dots + k^{n-1} + \frac{k^n}{2}\right] \end{cases} \quad (8)$$

∵ $0 < k = e^{-\frac{\alpha\pi}{\omega}} < 1$, ∴ (8)式为 n 的收敛级数。

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 显然有:

$$\begin{cases} U_1 = V_0 \cdot \frac{1}{1-k} \\ U_2 = -V_0 \cdot \frac{k}{1-k} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} U_2 = \frac{V_0}{1-k} \\ U_1 = -\frac{kV_0}{1-k} \end{cases} \quad (9)$$

此时放电电容器中的贮能为:

$$W_C = \frac{1}{2} C \cdot \left(\frac{V_0}{1-k}\right)^2 = \frac{CV_0^2}{2(1-k)^2} \quad (10)$$

消耗在负载 R 上的能量为:

$$W_R = \int i_2^2 \cdot R dt = R \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \left[\frac{V_0}{(1-k)\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \right]^2 dt$$

$$= 2(1-k^2) \cdot W_C \quad (11)$$

可见实际消耗在负载上的能量为单个放电电容器贮能的 $2(1-k^2)$ 倍。

激光电源供给的能量计算如下:

$$W_0 = \int V_0 \cdot i_1 dt = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} V_0 \cdot \left[\frac{V_0}{1-k} \cdot \frac{1}{2\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \right] dt$$

$$= 2(1-k^2) \cdot W_C \quad (12)$$

由(11), (12)二式可知, $W_R = W_0$, 可见, 电源提供的能量全部消耗在负载上。负载上消耗的平均功率 P 为:

$$P_R = f \cdot W_R = 2(1-k^2) W \cdot f \quad (13)$$

式中, f 为重复频率。

下面我们来计算一下阈值电容量。

设固体激光棒的阈值能量为 E_{th} , 且总的电光转换效率为:

$$\eta_P = \eta_L \cdot \eta_C \cdot \eta_{ab} \cdot \eta_0$$

式中, η_L 为光源的辐射效率; η_C 为泵浦腔的传输效率; η_{ab} 为工作物质(激光棒)的吸收效率; η_0 为荧光量子效率。

$$\text{那么, 注入氙灯的阈值电能量为: } W_{R \cdot th} = \frac{E_{th}}{(\eta_P/\eta_0)} \quad (14)$$

由(10), (11), (14)三式得阈值电容量为

$$C_{th} = \frac{E_{th} \cdot (1-k)}{(\eta_P/\eta_0) V_0^2 (1+k)} \quad (15)$$

对 Nd:YAG 棒, 阈值能量密度 $E_{th}/V = 5 \times 10^{-3} \text{J/cm}^3$, $\eta_0 = 1$, 一般有 $\eta_P = 1\%$, 对长 $80 \text{cm} \times \varnothing 5 \text{mm}$ 的 Nd:YAG 棒 $E_{th} = 7.85 \times 10^{-3} \text{J}$ 。

当 $R = 0.5$, $V_0 = 550 \text{V}$, $L = C$ 时有

$$C_{th} = 1.382 \mu\text{F}$$

若取 $L = 10 \mu\text{H}$, $C = 10 \mu\text{F}$, 则有 $W_C = 3.13 \text{J}$, $W_R = 5.68 \text{J}$ 。

当 $f = 1000 \text{Hz}$ 时, $P_R = 5.68 \text{kW}$ 。

若取 $L = 1.5 \mu\text{H}$, $C = 1.5 \mu\text{F}$, 则有 $W_C = 0.47 \text{J}$, $W_R = 0.85 \text{J}$ 。

当 $f = 7000 \text{Hz}$ 时, $P_R = 5.95 \text{kW}$ 。

因 $\eta_P = 1\%$, 故上面条件下激光输出 $P_0 > 50 \text{W}$ 。

综上所述, 上述回路具有以下几个特点:

(1) 重复频率仅受开关管工作频率和 YAG 棒的泵浦时延决定。YAG 棒的泵浦时延一般在 $100 \mu\text{s}$ 左右, 这就决定了这种电路的最高重复频率约为 10kHz 。如选用高速可控硅元件, 这一频率是不难达到的(因两只可控硅交替工作, 每只可控硅只须工作在 5kHz 即可)。这种电路之所以能实现高重复率运转, 就在于一个电容器对负载放电的同时, 也完成了对另一个电容器的充电, 这是明显优于传统谐振充电方式的一个特点, 因后者就是由于谐振充电周期太长而限制了重复频率的提高。

版权所有 © 《激光技术》编辑部