

# 磁约束脉冲放电电路分析\*

李 军 陈清明 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: 在已进行的实验研究的基础上, 对所设计的磁约束脉冲放电电路进行了理论分析, 获得了有关磁约束放电情况下的电路特性的认识。作者的研究为应用于磁约束放电的电路的进一步研究和改进打下了基础。

关键词: 磁约束放电 电路分析

## Analysis on pulsed magnetically confined discharge circuit

Li Jun, Chen Qingming, Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: Based on the experimental research, the simulation analysis of magnetically confined discharge circuit has been made. The characteristics of the discharge current and voltage are experimentally analyzed. The results will put the base for designing this discharge circuit.

Key words: magnetically confined discharge circuit analysis

### 引 言

近年来, 我们提出了应用磁约束放电方式于金属蒸气激光器的思想<sup>[1]</sup>。所谓磁约束放电, 是在气体放电中引入横向磁场(方向与电场方向垂直)、利用正交电磁场对放电过程中电子运动的约束来影响放电过程的一种放电方式。我们设想: 通过磁场的约束作用使电子产生足够的电离碰撞, 即获得较高的电离度, 从而可在低气压放电中得到高效率的阴极溅射、得到金属原子蒸气; 同时, 在放电过程中实现对金属原子的激励。由于采用放电激励的金属原子激光器一般工作在脉冲放电方式<sup>[2, 3]</sup>, 因此, 我们设计了用于磁约束放电的脉冲电路(如图 1 所示)。L<sub>0</sub> 为主充电电感, D 是二极管, L<sub>p</sub> 为旁路并联充电电感, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 分别为储能电容器和峰值电容器, T 为闸流管, L<sub>1</sub> 为闸流管支路的电感。

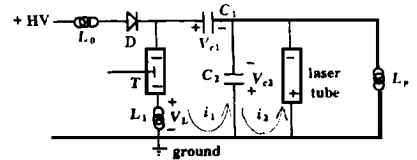


Fig. 1 The pulse discharge circuit

我们通过实验得到, 与普通的脉冲放电激励金属激光器中的放电特性<sup>[4-7]</sup>不同的是, 磁约束放电具有较低的放电电压(低于 1kV)、较大的阻抗(约 10Ω)。

由于磁约束放电电压较低, 为保证一定的电脉冲能量, 需采用较大的储能电容。在实验中, 在 C<sub>1</sub> = 1μF, C<sub>2</sub> = 1μF, L<sub>p</sub> = 892μH 的参数情况下, 电路稳定工作, 但此时流过激光管的电流上升缓慢, 上升时间近 3μs。为了得到较短的电流上升时间, 电容器 C<sub>2</sub> 必须取小容量, 为此, 我们用 21nF 的电容器替代 1μF 的电容器。但在此条件下的实验中, 单次触发即出现闸流管连通短路(即直流充电电流通过闸流管)、电源的过流保护器工作的现象。这说明, 此时闸流

\* 国家自然科学基金资助。

管未及时关断。当  $L_p$  容量为 109μH 时, 未出现以上现象, 电源能工作, 但电感  $L_p$  发热厉害。

为了分析以上实验现象, 为了对磁约束放电情况下的电路特性有清楚的认识, 我们特别进行了电路模拟分析。

### 一、电路分析

#### 1. 电路方程

图 2 是用于模拟计算的等效放电电路。  $R_d$  是激光管的阻抗, 在计算过程中假设其为常数( 10Ω)。在实际电路中, 在闸流管支路串入了一个 0. 8μH 的电感, 因此, 我们近似取闸流管支路的电感量  $L_1$  为 0. 8μH。在实验的基础上, 我们估算激光管支路的电感量  $L_d$ , 在计算中取其为 0. 6μH。在这里, 为了准确地分析放电过程, 不忽略并联充电电感  $L_p$  支路, 全面考察整个回路的状况。

我们将实际的放电过程分为三个阶段, 分别列出三个阶段的电路方程。

(1) 闸流管导通,  $C_1$  向  $C_2$  转移能量, 此时激光管未放电, 假设有电流  $i_1$  和  $i_3$ ,  $i_3$  流经  $L_p$ ,  $C_2$ 。

$$di_1/dt = (V_{C_1} - V_{C_2})/L_1 \tag{1}$$

$$di_3/dt = V_{C_2}/L_p \tag{2}$$

$$dV_{C_1}/dt = -i_1/C_1 \tag{3}$$

$$dV_{C_2}/dt = (i_1 - i_3)/C_2 \tag{4}$$

(2)  $V_{C_2}$  达到激光管的着火电压( 假设为 300V), 激光管放电, 该支路导通。此时有电流  $i_1, i_2, i_3$ , 如图 2 所示。

$$di_1/dt = (V_{C_1} - V_{C_2})/L_1 \tag{5}$$

$$di_2/dt = [(L_d + L_p)/(L_d L_p)] V_{C_2} + (R_d/L_d)(i_3 - i_2) \tag{6}$$

$$di_3/dt = V_{C_2}/L_p \tag{7}$$

$$dV_{C_1}/dt = -i_1/C_1 \tag{8}$$

$$dV_{C_2}/dt = (i_1 - i_2)/C_2 \tag{9}$$

(3) 假设  $i_1 < 0$  以后, 闸流管关断, 仅有电流  $i_2, i_3$ , 电流回路如图 2 所示。

$$di_2/dt = [(L_d + L_p)/(L_d L_p)] V_{C_2} + (R_d/L_d)(i_3 - i_2) \tag{10}$$

$$di_3/dt = V_{C_2}/L_p \tag{11}$$

$$dV_{C_2}/dt = -i_2/C_2 \tag{12}$$

电路的初始条件为:  $V_{C_1}|_{t=0} = V_0 = 0. 6kV, V_{C_2}|_{t=0} = 0, i_1|_{t=0} = 0, i_2|_{t=0} = 0, i_3|_{t=0} = 0$ 。

#### 2. 模拟结果及分析

图 3~ 图 6 是由模拟计算得到的不同的电路参数条件下的电流、电压与时间的关系曲线。从图 3a(  $C_1 = 1μF, C_2 = 1μF, L_p = 892μH$ ) 看到, 在整个过程中, 电流  $i_3 = 0$ 。在  $i_2 \neq 0$  的初始阶段,  $C_1$  对  $C_2$  充电(  $i_1 > 0$ ), 同时  $C_2$  在放电(  $i_2 > 0$ ),  $C_2$  总的

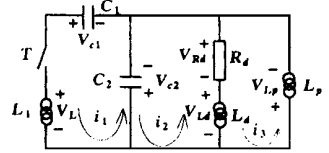


Fig. 2 The equivalent circuit of Fig. 1

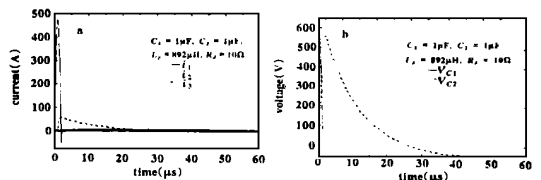


Fig. 3 The Current (a) and voltage (b) during the process of discharging

表现为处于充电状态( $i_1 > i_2$ , 或见图 3b 的电压波形)。在后期( $i_2 > i_1$ ),  $C_2$  处于放电状态, 在这阶段的一开始, 仍有  $C_1$  对  $C_2$  的充电过程, 但此过程很快结束( $i_1 = 0$ )。从全过程来看,  $i_1$  持续时间较短, 激光管后期的放电完全由  $C_2$  维持。这说明  $C_2$  吸收  $C_1$  很大部分能量, 使  $C_1$  的能量转移过程很快结束。由于流经激光管的电流的上升时间与  $C_2$  的容量有关, 而在此放电条件下的  $C_2$  容量较大, 因此, 激光管的放电电流上升不够快。

当减小  $C_2$ , 使  $C_2 = 21\text{nF}$  时, 我们看到, 电流、电压波形有了变化(图 4), 电流上升时间缩短, 波形前沿出现了振荡。这说明,  $C_2$  在激光管导通放电初期发挥作用, 对激光管放电, 由于其容量小, 因而电流上升较快。另外, 从图 4 中看到, 电流  $i_3 \neq 0$ ,  $i_1$  持续较长时间。在放电后期,  $i_1 \approx i_2$ ,  $V_{C_1} \approx V_{C_2}$ , 激光管的放电电流  $i_2$  主要由  $C_1$  提供。由于  $C_1$  放电缓慢, 电感  $L_p$  支路有电流流过( $i_3$ )。电感  $L_p$  在  $C_1$  放电时, 同激光管分流并储能; 在  $i_1 = 0, i_2 = 0$  以后,  $i_3$  由电感  $L_p$  维持。 $i_3$  由激光管的阴极流向阳极, 这部分电流对于磁约束溅射放电来说是无用的。由于  $C_2$  仅在放电开始阶段分担了  $C_1$  的很小一部分能量( $C_2$  容量太小),  $C_1$  的大部分能量由激光管和  $L_p$  吸收, 这主要的能量转移过程持续时间很长, 较长的  $i_1$  持续时间(即闸流管长时间闭合), 是导致实验中出现直流充电电流流过闸流管、造成电源过流工作的原因。

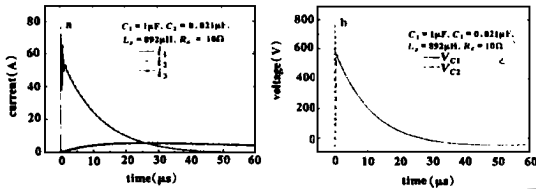


Fig. 4 The Current (a) and voltage (b) during the process of discharging

从图 5 看到, 当  $L_p$  的电感量降低时( $L_p = 109\mu\text{H}$ ),  $i_1$  的持续时间缩短, 即闸流管闭合时间缩短。在实验中, 在此参数条件下没有出现电源过流工作现象。我们看到, 此时的  $i_3$  较大。这说明,  $C_1$  放电加快是由于电感  $L_p$  的分流加大。同时, 我们认识到,  $L_p$  越小, 其分流效应越显著。

作为对比, 我们计算了激光管阻抗为  $2\Omega$ (假设)的情况。所得结果如图 6 所示。同图 5 比较, 此时的  $L_p$  分流减小, 但  $C_1$  的放电时间没有因此延长, 反而缩短了。这说明, 激光管的阻抗大小对放电特性具有重要影响。阻抗小, 则放电快, 同时使  $L_p$  的分流减弱。

## 二、结 论

由于磁约束放电电压较低, 为保证一定的脉冲能量, 只有选用较大的储能电容。由于对流经激光管的脉冲电流的上升时间有较高要求, 要求短的上升时间, 因此, 需要选用较小的峰值电容。

通过模拟分析我们认识到, 在磁约束放电中, 较大储能电容( $\sim \mu\text{F}$ )与较小峰值电容( $\sim \text{nF}$ )的组合, 使得放电主要由储能电容器  $C_1$  维持, 从而使电容器  $C_1$  的放电时间过长, 闸流管

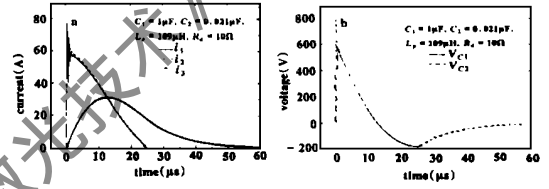


Fig. 5 The Current (a) and voltage (b) during the process of discharging

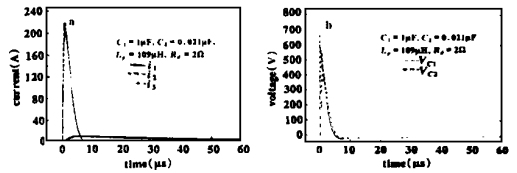


Fig. 6 The Current (a) and voltage (b) during the process of discharging

## 气体激光器的可靠性和可靠性试验

杨之昌 马秀芳 王建华

余宏宇

(复旦大学物理系, 上海, 200433) (第二军医大学病理研究室, 上海, 200433)

**摘要:** 气体激光器的可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。He-Ne 激光器是我国主要的气体激光器产品, 在 70 年代末已具备一定的规模, 从 1981 年起, 由南京工学院主持, 组织二十多个单位, 进行了该激光器的可靠性试验。经过几年的努力, 找到了它的失效物理模型、加速因子和加速寿命试验方法。作者主要介绍复旦大学所做的工作。

**关键词:** 可靠性 失效物理模型 加速因子

## Reliability of gas laser and its reliability test

*Yang Zhichang, Ma Xiufang, Wang Jianhua*

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai, 200433)

*Yu Hongyu*

(Department of Pathology, Second Military Medical University, Shanghai, 200433)

**Abstract:** The reliability of gas laser refers to the ability of finishing stipulated function in stipulated condition and time. He-Ne laser is a main product of gas lasers in our country, and has fairly scale at the end of 70's. Since 1981, more than 20 units had been organized to take part in reliability test research of gas lasers in the charge of Nanjing Institute of Technology. After several years, the lost efficiency physical model, accelerated factors and the way of accelerated life test were found. This paper introduces the Fudan University's work.

**Key words:** reliability lost efficiency physical model accelerated factor

易出现连通现象, 电路不能稳定工作; 同时, 由于  $C_1$  的缓慢放电, 使旁路并联电感  $L_p$  参与分流, 消耗能量。此外, 磁约束放电区的较大的阻抗, 导致在这种电路中的  $L_p$  分流非常显著。通过减小电感  $L_p$  可以缩短  $C_1$  的放电时间。但这是以增大  $L_p$  的分流、增大损耗为代价的。

在这里, 我们获得了磁约束脉冲放电电路特性的有关认识。适用于磁约束放电的脉冲电路, 还有待于进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 Li J, Chen Q M, Zhang W *et al.* Magnetically confined discharge for metal vapor lasers. Proceedings of 1995 International Conference on Optoelectronics and Lasers, Hangzhou, China, 1995: 283
- 2 Walter W T, Plitch M, Solimene N *et al.* Bull A P S, 1966; 11: 113
- 3 Markova S V, Cherezov V M. Soviet J Q E, 1977; 7: 339
- 4 Astadjov D N, Isaev A A, Petrash G G *et al.* IEEE J Q E, 1992; 28(10): 1966
- 5 Smilanski I, Erez G, Kenman A *et al.* Opt Commun., 1979; 30: 70
- 6 Blau P. IEEE J Q E, 1994; 30(3): 763
- 7 陈建文, 夏康民, 刘妙宏 *et al.* 中国激光, 1982; 10(7): 399

作者简介: 李 军, 男, 1968 年出生。博士研究生。从事新型气体激光器件的研究工作。