

利用可饱和电感延长准分子激光器中 闸流管的使用寿命

周卫东 王永红 余吟山 汪建业

(中国科学院安徽光机所 合肥 230031)

提要 在分析影响闸流管寿命诸因素的基础上,讨论了利用磁助器延长闸流管使用寿命的原理和方法,并在准分子激光器中设计和使用磁助器,较好地解决了高压快放电中开关器件——闸流管使用中存在的问题,从而有利于延长其使用寿命。

关键词 磁助器, 闸流管, 使用寿命

准分子激光器在激光光谱学、激光化学、激光医学、大气遥感以及材料处理、LCVD 等基础和应用研究中得到了越来越广泛的应用。由于准分子激光工作介质上能级寿命短(几十纳秒),缺少在介质中储存能量的能力,若要产生激光振荡,泵浦源必须具有足够高的功率和相当快的电压和电流上升前沿,这严重制约了放电电路中主放电开关——闸流管的寿命,为了改善闸流管的工作条件,延长其使用寿命,近年来广泛采用在电路中加入可饱和电感的方法。

根据可饱和电感在电路中所起作用的不同,可分为磁脉冲压缩工作方式和磁助器工作方式^[1]。磁脉冲压缩技术的使用,可以显著降低闸流管中峰值电流、电流上升速率,并能抑制反向电流,从而把闸流管寿命提高了一个数量级以上。但是,在磁脉冲压缩工作方式下,磁开关饱和时间长,要求的磁芯体积大,能量损失比较高,其能量传输效率通常为 80% 或更低^[2,3],限制了其使用范围。与此相反,磁助器的作用主要是延迟闸流管中电流的上升,减少导通时管中的能量耗散,同时也能抑制反向电流,其效率比较高,在中小功率激光器中应用较广。本文介绍我们实验研究的新进展。

1 闸流管阳极电蚀和能量耗散

氢闸流管使用时,阳极受到浸蚀。首先,受反向电压加速的阳离子轰击阳极,以溅射方式损伤阳极表面;其次是高能电子轰击。闸流管导通过程与电极设计、气体压力、放电电路密切相关,准分子激光快放电产生的电流、电流上升率都很大,受高压加速的高能电子轰击阳极造成的损伤是相当显著的,表现为阳极表面出现凹坑以及阳极材料受热气化后沉积在闸流管管壁内表面。

实验表明^[4] 闸流管长时间地工作,在有反向电流和无反向电流两种情况下对阳极表面的

损伤显著不同,反向电流对阳极的损害很大,应尽量减小;闸流管导通过程中不可避免地存在高能电子轰击造成的损害,但通过延迟闸流管导通电流,使较大的放电电流出现在阳极电压“跌落”之后,则可使大量电子能量减少到低于产生电蚀的范围。

闸流管中的能量沉积强烈依赖于其导通过程^[1],在典型的 RLC 放电电路中,闸流管阳极电压和放电电流可描述为

$$V_T = V_{PT} - A e^{-t/t_a} \tag{1}$$

$$I_T = I_{\max} \sin \omega t \tag{2}$$

式中, V_T 为阳极两端瞬态电压, V_{PT} 为峰值阳极电压, A 为常数, t 为时间, t_a 为阳极电压降落常数, I_T 为管中瞬态电流, I_{\max} 为管中电流最大值。图 1 是美国 Quertek 公司在电路中加入磁助器前后闸流管中的电压、电流和消耗的功率,该图清楚地表明,磁助器的使用可以减少闸流管吸收的能量。

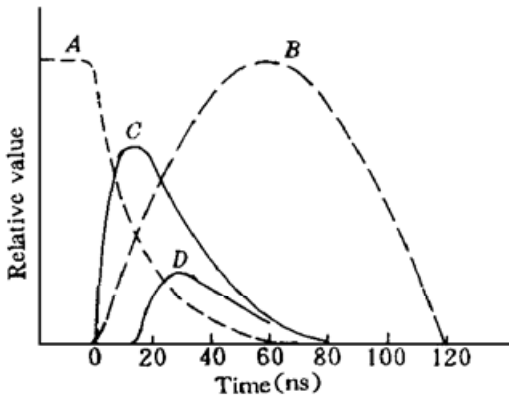


图 1 闸流管中的能量损耗

A: 阳极电压; B: 典型的准分子激光器中流经闸流管的放电电流;
C: 典型准分子激光器闸流管中的能量损耗(无磁助器时); D:
利用磁助器延时 15 ns 时闸流管中的能量损耗

Fig. 1 Thyatron dissipation during commutation with and without magnetic assist

A: Anode potential; B: Current in typical excimer laser; C: Tube dissipation in typical excimer laser; D: Tube dissipation with magnetic delaying current 15 ns

以上分析表明,通过延迟闸流管中放电电流和抑制反向电流可以减少电子、阳离子轰击对阳极的电蚀,降低闸流管吸收的电功率,从而延长闸流管的使用寿命。

2 磁助器工作原理和设计

磁助器是利用铁磁材料的非线性特性制成的可饱和电感,当通过电感线圈的电流上升到某一值时,磁性材料进入饱和状态,出现电感感抗从高阻值到低阻值状态的跃变,磁助器就是利用这种感抗突变起到“开关”的作用。

电路中磁性元件的电感 L 正比于它的磁导率,即

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l} \tag{3}$$

式中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ wb/A} \cdot \text{m}$, μ_r 为相对磁导率, N 为线圈匝数, S 为磁芯截面积(m^2), l 为平均磁路长度(m)。磁芯未饱和时,相对磁导率 μ_r 很大,电感 L 呈高阻抗状态,磁芯饱和后,相对磁导率 μ_r 等于 μ_s ,接近于 1,电感 L 值很小,呈低阻抗状态。只要合理地选择磁性材料和电感参数,就能实现感抗从高阻抗到低阻抗的跃变。

在磁助器的设计中,主要要考虑下列问题:饱和时间、电感和磁芯设计、磁芯复位。

磁助器工作时,饱和时间通常是用伏秒乘积关系式表示,且与磁性材料和磁通量有关。由法拉第定律和高斯定理

$$V(t) = - N(d\Phi/dt) \tag{4}$$

$$\Phi = \int_s \beta ds \tag{5}$$

可导出
$$\int_0^{T_{SAT}} V(t) dt = N \times \Delta B \times S \tag{6}$$

式中 $V(t)$ 为磁助器两端电压, Φ 为磁通量, ΔB 为磁芯饱和前后磁感应强度的变化, T_{SAT} 为饱和时间。对按正弦规律变化的磁助器两端电压 $V(t)$, 若最大值为 V_{max} , 则

$$V_{max} \times T_{SAT} = 2N \times \Delta B \times S \tag{7}$$

该式是设计磁助器的重要依据。

磁助器的另一个重要参数是非饱和电感 L_{UNSAT} 。如果 L_{UNSAT} 太小, 则磁助器在闸流管导通过程中不能起“开关”的作用。因此, 磁性材料未饱和时的相对磁导率 μ_r 应远大于 μ_s 。

为了使磁助器能重复、稳定地工作, 磁芯必须在每次脉冲后复位到相同的起始磁化状态。因而, 必须有脉冲或直流电流加到磁助器两端, 且电流流向同开关作用期间相反。复位电流 I_{reset} 由下式决定

$$I_{reset} = \int_l H dl = H_{SAT} l \tag{8}$$

这里 H_{SAT} 为磁芯饱和磁场强度, l 为平均磁路长度。实验中我们选用合适的充电电路, 使充电电流兼作复位电流, 很好地解决了这个问题。

3 实验装置和结果

图 2 是我们使用的激光器剖面图, 图 3 是我们实验中采用的电路原理图。SI 为磁助器, C_s 为储能电容, C_p 为峰值电容, L 为充电电感。

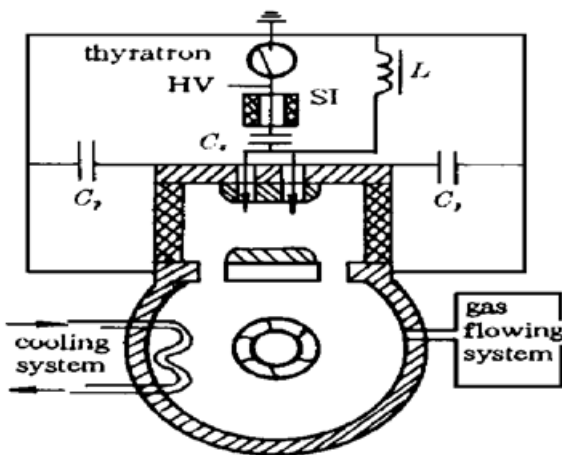


图 2 准分子激光器剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing a cross-sectional view of the excimer laser

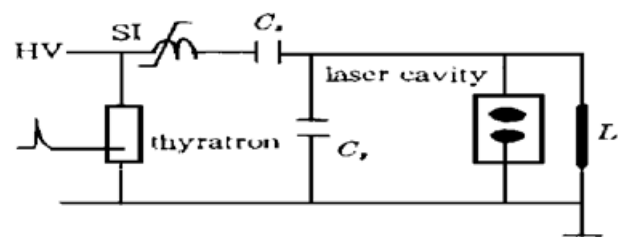


图 3 准分子激光器放电电路

Fig. 3 Schematic diagram of the discharge circuit with magnetic assist

高压电源给储能电容 C_s 充电, 充电电流使可饱和电感 SI 反向饱和, 触发闸流管后, SI 呈高阻抗状态, 只有很小的漏电流通过。在漏电流的作用下, 闸流管导通。在导通期间, 由于非饱和电感 L_{UNSAT} 的作用, 流经闸流管的电流很小, 这样积分式 $\int_T V_T \times I_T dt$ 也小, 从而降低了导通

时闸流管中的功率损耗和峰值功率。随后,流经 SI 的电流逐渐增大, SI 正向饱和导通呈低阻抗状态,电路中出现从 $C_s \rightarrow C_p$ 的快速电荷转移, C_p 上的电压迅速上升到腔中的气体击穿电压,对激光腔中气体放电,产生激光振荡。由于 SI 的饱和电感在 nH 量级,对整个电路的快放电影响甚微,具有较高的效率。

我们使用的磁助器是用厚 $30 \mu\text{m}$ 的非晶态合金卷绕成环形,其外径为 80 mm ,内径为 50 mm ,高为 20 mm ,该材料具有很大的电阻率。

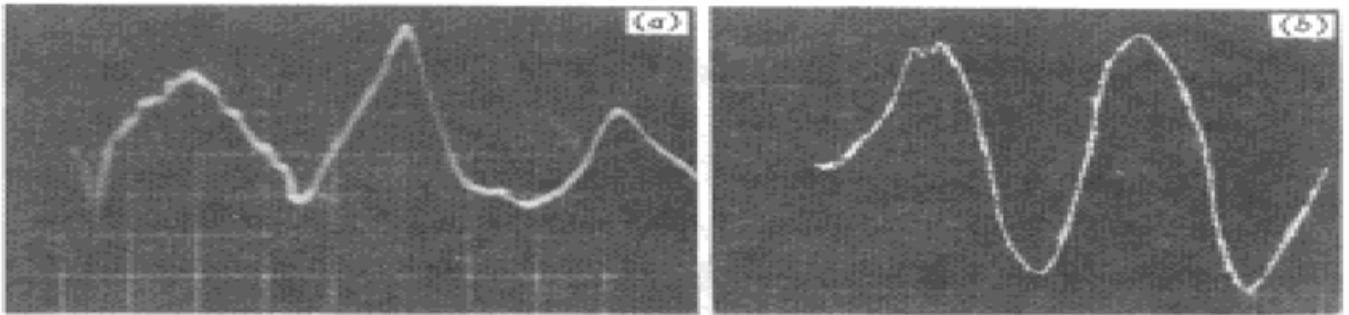


图 4 电路中加入磁助器前后流经闸流管的放电电流

(a) 带磁助器; (b) 不带磁助器(纵坐标: 200 mV/div ; 横坐标: 50 ns/div)

Fig. 4 Discharge current through thyatron with (a) and without (b) magnetic assist

(The vertical scale is 200 mV/div . The horizontal scale is 50 ns/div)

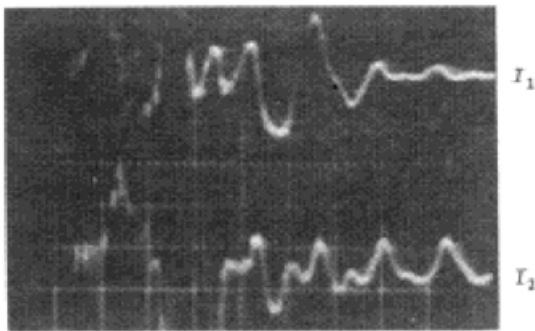


图 5 同步记录的流经同一闸流管的两路放电电流波形

I_1 曲线——电路中没有磁助器; I_2 曲线——电路中加入了磁助器(横坐标: 50 ns/div)

Fig. 5 Discharge currents of two circuits with and without magnetic assist through

the same thyatron using a single triggering pulse. The horizontal scale is 100 ns/div . I_1 : the upper curve, I_2 : the lower curve

图 4 是我们在电路中加入磁助器前后,用 Rogowski 线圈和快速示波器记录的流经闸流管的放电波形,从图中可以看出,电路中加入磁助器前后,对主放电脉冲前沿影响很小,从而保证了激光器具有较高的效率。同时我们还可以看到,加上磁助器后,闸流管中的反向电流大大减小,因而减少了阳离子对阳极的轰击,延长了使用寿命。

图 5 是我们同时记录的流经闸流管的两路电流波形,其中 I_1 是电路中没有磁助器时流经闸流管的电流, I_2 是在电路加入了磁助器后流经闸流管的电流,很显然,加入磁助器的那路电流波形延迟导通约 50 ns 。如前所述,这样闸流管导通时的 $\int V_T \times I_T dt$ 减小,闸流管中的能量损耗降低,有助于闸流管寿命的提高。

我们用 LPT-1B 型激光能量计测量了在放电电路中加入磁助器前后 XeCl 激光输出能量,开始时单脉冲激光输出能量为 120 mJ ,加入磁助器后激光输出

能量为 116 mJ ,基本保持不变。这是由于加入磁助器后,尽管磁芯上要耗散一定能量,降低效率,但它同时也有利于电容向激光工作气体中的能量转移,提高了激光器的效率,因而总体效率基本维持不变。

致谢 感谢李 会高级工程师在实验中的大力协助。

参 考 文 献

- 1 D. Basting, K. Hohla, E. Albers *et al.*. Thyratrons with magnetic switches: the key to reliable excimer laser. *Laser & Optoelektronik*, 1984, **2**: 128
- 2 I. Smilanski, S. R. Byron, T. R. Burkes. Electrical excitation of an XeCl laser using magnetic pulse compression. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**(7): 547
- 3 Tsutomu Shimada, Minoru Obara, Akira Noguchi. An all solid-state magnetic exciter for pumping excimer laser. *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, **56**(11): 2018
- 4 K. Rust, G. McDuff. Life extension of thyratrons in short pulse circuit with the use of saturable magnetic sharpeners, Los Alamos National Laboratory Report, 1990, LA-UR-90-2084

Life Extension of Thyatron in Excimer Laser Generator with Use of Magnetic Assist

Zhou Weidong Wang Yonghong Yu Yinshan Wang Jianye

(Auhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract The anode erosion in a thyatron during operation is analyzed. The design of magnetic assist to extend thyatron lifetime is presented. Addition of the magnetic assistor reduces anode dissipation and mitigates reverse current, hence reducing thyration cooling requirement and anode erosion. The experimental results are presented.

Key words life extension, thyatron, magnetic assistor