

# 准分子激光器脉冲磁压缩开关的设计分析

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:** 本文从理论上详细分析了高功率准分子激光器中脉冲磁压缩开关的工作机理, 并在此基础上归纳出脉冲磁压缩开关的设计原则, 对实际应用有一定的参考价值。

**关键词:** 脉冲磁压缩 磁开关

## Design of magnetic switch for excimer laser

Wang Youqing, Guo Zhenhua, Li Zaiguang

(National Lab. of Laser Tech., HUST)

**Abstract:** This paper analyzes theoretically the mechanism of magnetic switch for excimer laser, in detail, and points out that the main factors of effecting of operating characteristics of multistage LC magnetic switch are the match of saturation inductance and unsaturation inductance of stages, properly selecting of capacitors and section area of magnetic switch. Corresponding to this analysis, the principles of designing of magnetic switch are concluded. A new magnetic switch is developed, which has high output power over 1kW, effectiveness 88.6%, pulse width 80ns.

**Key words:** magnetic pulse compression magnetic switch

### 一、引言

准分子激光器是大体积、高气压脉冲放电型激光器件, 准分子激光介质的能级寿命较短(几十纳秒), 缺乏在介质中贮存能量的能力, 只有生成准分子的速度大于其减小的速度, 激光振荡才能实现, 所以要得到效率高、功率大的准分子激光器, 就要求激励源的泵浦功率大, 电流与电压的上升时间短。用大功率闸流管作为主放电开关, 基本上可满足这些条件, 但是, 在峰值电流很高的准分子激光器激励源中, 闸流管的寿命受到了严重影响, 约在  $1 \sim 5 \times 10^7$  个脉冲范围内, 比它在雷达系统中寿命要短得多。磁开关的出现使这一问题得到了根本解决。它不仅降低了闸流管上的峰值电流, 使其寿命延长了约两个数量级, 而且还可以得到上升时间很短 ( $< 50\text{ns}$ ), 功率及重复率较高的电脉冲输出。

### 二、磁开关工作机理分析

磁开关的核心是可饱和磁芯。铁氧体和铁磁金属玻璃, 由于其优良的高频特性及低的损耗等优点被广泛用作磁开关的磁性材料。它在电路中的性能可以用磁滞回线加以描述, 如图 1 所示。它可划分为两个区域: 饱和区 I 和 II, 非饱和区 III。当磁性元件的工作点一旦从非饱和区进入饱和区, 则其磁导率将显著下降。

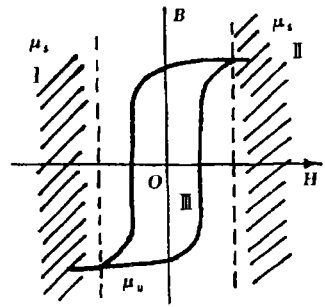


Fig. 1 Hysteresis loop of magnet core

由于磁性元件的电感正比于它的磁导率,

$$L = \frac{\mu \times N^2 A \cdot SF}{l} = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A \cdot SF}{l} \quad (1)$$

式中,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Wb/A} \cdot \text{m}$ ;  $\mu_r$  为相对磁导率;  $N$  为电感匝数;  $A$  为磁芯的截面积( $\text{m}^2$ );  $l$  为平均磁路长度( $\text{m}$ );  $SF$  为填充因子, 取  $SF = 0.9 \times (d_m + d_i)/(d_m)$ , 其中,  $d_i$  为绝缘材料厚度,  $d_m$  为磁芯厚度。所以这两个区域对应着不同的电感值, 并且分别由饱和磁导率  $\mu_s$  与非饱和磁导率  $\mu_u$  决定, 由于  $\mu_s \ll \mu_u$ , 因此非饱和区中的电感值  $L_u$  比饱和区中的电感值  $L_s$  要大得多, 即可饱和磁芯电感在区域 III 中呈高阻抗状态, 在区域 I 与 II 中呈低阻抗状态。所以只要合理选择磁性材料及电感参数, 就能实现电感从高阻抗到低阻抗的跃变。

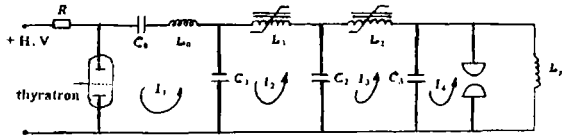


Fig.2 Circuit of pulse magnetic compressing in eximer laser

下面详细分析一下磁开关在准分子激光压器中的工作机理。图 2 为一典型的脉冲磁压缩电路。设  $C_0$  开始时经  $R \rightarrow C_0 \rightarrow L_0 \rightarrow L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$  回路充至电压  $V_0$ , 当闸流管触发导通时,  $C_0$  即开始对  $C_1$  充电, 此时设  $L_1$  处于非饱和区, 呈大阻抗状态且  $L_1 \gg L_0$ , 那么  $L_1$  对  $C_1$  充电过程的影响可忽略, 此时不难求得  $C_1$  上的充电电压与电流如下:

$$\begin{cases} u_1 = -V_0 \frac{C_0}{C_0 + C_1} (1 - \cos \omega_1 t) \\ i_1 = V_0 \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_0(C_0 + C_1)}} \sin \omega_1 t \end{cases} \quad \text{式中, } \omega_1 = \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_0 C_0 C_1}}$$

显然, 当  $C_0 = C_1 = C$  时, 电荷的转移效率最高, 即  $C_0$  全部贮能都能转移到  $C_1$  上, 上式可变为:

$$\begin{cases} u_1 = -\frac{V_0}{2} (1 - \cos \omega_1 t) \\ i_1 = V_0 \sqrt{\frac{C}{2L_0}} \sin \omega_1 t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_{1m} = -V_0 \\ i_{1m} = V_0 \sqrt{\frac{C}{2L_0}} \end{cases} \quad (2)$$

$u_{1m}$ ,  $i_{1m}$  分别为  $u_1$  及  $i_1$  的最大值, 其中  $u_1$  达到  $u_{1m}$  的时刻为  $t = \tau_1 = \pi/\omega_1$ 。若通过选择磁开关参数, 使  $t = \pi/\omega_1$  时,  $L_1$  达到饱和, 那么  $C_1$  将通过  $L_1$  的饱和电感  $L_{1s}$  对  $C_2$  充电, 若令  $L_2 \gg L_{1s}$ , 同理可得到  $C_2$  上充电电流与电压方程为:

$$\begin{cases} u_2 = -V_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} (1 - \cos \omega_2 t) \\ i_2 = V_0 \sqrt{\frac{C_1 C_2}{L_{1s}(C_1 + C_2)}} \sin \omega_2 t \end{cases} \quad \text{式中, } \omega_2 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_{1s} C_1 C_2}}$$

设  $C_2 = C_1 = C$ , 则上式即为:

$$\begin{cases} u_2 = -\frac{V_0}{2} (1 - \cos \omega_2 t) \\ i_2 = V_0 \sqrt{\frac{C}{2L_{1s}}} \sin \omega_2 t \end{cases} \quad (3)$$

显然, 当  $t = \tau_2 = \pi/\omega_2$  时,  $C_1$  上贮能全部转移到  $C_2$  上,  $u_2$  达到最大值  $u_{2m} = -V_0$ , 同

理可令  $L_2$  在此时达到饱和, 且  $L_{2s} \ll L_p$ , 那么  $C_2$  将通过  $L_{2s}$  对  $C_3$  充电, 充电电压和电流分别为:

$$\begin{cases} u_3 = -\frac{V_0}{2}(1 - \cos\omega_3 t) \\ i_3 = V_0 \sqrt{\frac{C}{2L_{2s}}} \sin\omega_3 t \end{cases} \quad \text{式中, } \omega_3 = \sqrt{\frac{2}{L_{2s}C}} \quad (4)$$

这里,  $C_3 = C_2 = C$ , 当  $t = \tau_3 = \pi/\omega_3$  时,  $C_2$  贮能全部转移到  $C_3$  上,  $u_3$  达到最大值  $u_{3m} = V_0$ 。此后,  $C_3$  即可直接对主电极放电, 将能量全部释放在主放电区中。放电电流由主放电回路的等效电阻与电感决定, 由于其数值均很小(分别为零点几欧与几十纳亨), 因此放电峰值电流将高达几十千安, 且放电过程很快结束( $< 100\text{ns}$ ), 然后即可进行下一轮循环。

可见,  $C_1$  上充电上升时间为:  $\tau_1 = \pi/\omega_1 = \pi \sqrt{L_0 \cdot C/2}$ , 由  $L_0, C$  决定, 其放电时间为  $\tau_2 = \pi \sqrt{L_{1s} \cdot C/2}$ 。

$C_2$  上充电上升时间为  $\tau_2 = \pi \sqrt{L_{1s} \cdot C/2}$ , 由  $L_{1s}, C$  决定, 其放电时间为  $\tau_3 = \pi \sqrt{L_{2s} \cdot C/2}$ 。加到主电极两端的脉冲电压的上升时间实际上即为:  $\tau_3 = \pi/\omega_3 = \pi \sqrt{L_{2s} \cdot C/2}$ , 由  $L_{2s}, C$  决定。充放电全过程如图3所示。

若  $C_1$  直接对电极放电而不用磁开关, 见图4, 且要求电极电压上升时间为  $\tau = 100\text{ns}$ 。那么流过闸流管的最大电流为:

$$I_{1m} = V_0 \sqrt{\frac{C}{2L_0}} = V_0 \cdot \frac{\pi \cdot C}{2\tau_1} = V_0 \frac{\pi \cdot C}{2\tau} \quad (\text{这里 } \tau_1 = \tau) \quad (5)$$

如采用磁开关后, 设  $\tau_3 = \tau = 100\text{ns}$ , 令  $\tau_2 = n_1 \cdot \tau_3$ ,  $\tau_1 = n_1 \cdot n_2 \cdot \tau_3$ , 式中,  $n_1, n_2$  为每级磁开关的脉宽压缩倍数, 那么,  $\tau_1 = n_1 \cdot n_2 \cdot \tau_3$ , 此时有:

$$I_{1m} = V_0 \frac{\pi C_1}{2\tau_1} = \frac{V_0}{n_1 \cdot n_2} \frac{\pi C_1}{2\tau_3} = V_0 \frac{\pi C}{2n_1 \cdot n_2 \cdot \tau} \quad (6)$$

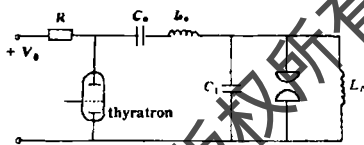


Fig. 4 The direct discharge circuit for main gap with thyatron

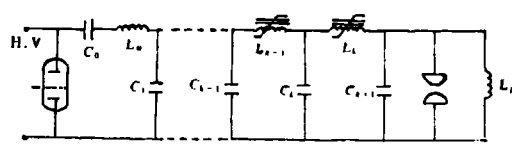


Fig. 5 The circuit with polystep magnetic compressor

显然, 由(5)和(6)二式可见闸流管中电流峰值降低了  $n_1 \cdot n_2$  倍, 此时,  $L_{1s} = n_1 \cdot n_2 \cdot L_{2s}$ 。通过上述分析, 可归纳出如下磁开关应满足的条件(见图5):

(1)  $L_k \gg L_{(k-1)s}$ , ( $L_1 \gg L_0$ ),  $k = 1, 2, 3 \dots$ , 即后一级磁开关的非饱和电感远大于前一级的饱和电感, 以保证  $C_k$  充电时,  $L_k$  呈高阻状态。

当  $L_k/L_{(k-1)s} \geq 20$  时, 即可认为满足上述条件。

(2)  $L_{(k-1)s} \gg L_{ks}$ , 即前一级饱和电感值远大于后一级饱和电感值, 以保证每一级有较大压缩倍数  $n_k$ , 表示如下:

$$n_k = \frac{\tau_k}{\tau_{k-1}} = \frac{\pi \sqrt{L_{(k-1)s} \cdot C/2}}{\pi \sqrt{L_{ks} \cdot C/2}} = \sqrt{\frac{L_{(k-1)s}}{L_{ks}}} \quad (7)$$

总压缩倍数  $n_{\text{总}}$  为:

$$n_{\text{总}} = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdots n_k = \tau_1 / \tau_{k-1} = \sqrt{L_0 / L_{ks}} \quad (8)$$

当  $L_{(k-1)s} / L_{ks} \geq 20$  时,即可以认为满足上述条件。

(3)  $L_k$  在  $C_k$  充电达到最大值时必须饱和,以确保能量的有效转移。

(4)由(1)式可知,当磁开关磁材料相同且匝数相等时,其电感值均由截面积与饱和状态决定。

(5)  $C_0 = C_1 = C_2 \cdots = C_k = C, k = 1, 2, \cdots$ ,以保证电荷转移效率最高。

(6)依 Maxwell 方程,磁开关输入端电压为:

$$u_k = N_k \cdot \Delta B \cdot A_k / \Delta t$$

这里  $\Delta B = B_r + B_s$ ,式中  $B_r$  为剩余磁通,  $B_s$  为饱和磁通。

设磁开关饱和时间为  $\tau_{ks}$ ,那么有:

$$\int_0^{\tau_{ks}} u_k \cdot dt = N_k \cdot \Delta B \cdot A_k$$

将  $u_k = V_0(1 - \cos \omega_k t) / 2$  代入得:

$$\tau_{ks} = 2 \cdot \Delta B \cdot N_k \cdot A_k / V_0 \quad (9)$$

可见,当磁材料及匝数相同时,磁开关饱和时间由磁开关截面积决定。

### 三、磁开关设计原则

至此,我们可总结出如下磁开关设计原则:

#### 1. 磁芯选择

磁芯选择应满足下列条件:频特性好,高频损耗小,初始磁导率高,饱和磁通  $B_s$  大,电阻率高等。研究表明:要得到窄的脉宽及较快的开关速度,  $B_s$  及磁导率要尽量大,而  $B_s$  所对应的磁场强度  $H_c$  应尽可能小,即磁滞回线越窄越高越好,理想情况下,磁滞回线最好呈窄矩形。目前,软磁铁氧体及金属玻璃能较好地满足上述要求,是较理想的磁开关材料。

#### 2. 压缩级数的确定

我们由(8)式已知,总压缩倍数由  $\tau_1 / \tau_k$  决定,当用一级磁开关达不到总压缩倍数时,就必须采用多级磁开关。

对于准分子激光器,一般要求  $\tau_k < 100\text{ns}$ ,而  $\tau_1 = \pi \sqrt{L_0 \cdot C / 2}, I_{1m} = V_0 \sqrt{C / (2L_0)}$ ,联立求得:

$$\tau_1 = \frac{\pi V_0 \cdot C}{2I_{1m}} \quad \text{那么有: } n_{\text{总}} = \frac{\tau_1}{\tau_k} = \frac{\tau \cdot V_0 \cdot C}{2I_{1m} \cdot \tau_k} \quad (10)$$

即  $n_{\text{总}}$  由闸流管的通流能力确定,如选择  $I_{1m}$  为闸流管最大允许峰值电流  $I_p$  的一半,那么,

$$n_{\text{总}} = \frac{\pi \cdot V_0 \cdot C}{I_p \cdot \tau_k} \quad (11)$$

我们已经知道,磁开关电感值应满足下面条件:

$$20L_{ks} \leq L_{(k-1)s} \leq \frac{1}{20}L_k$$

即

$$20 \leq \frac{L_{(k-1)s}}{L_{ks}} \leq \frac{1}{20} \frac{L_k}{L_{ks}} \quad (12)$$

又因  $n_k = \frac{\tau_k}{\tau_{k+1}} = \sqrt{\frac{L_{(k-1)s}}{L_{ks}}}$  代入得:

$$\sqrt{20} \leq n_k \leq \sqrt{\frac{L_k}{20L_{ks}}} = \sqrt{\frac{\mu_k}{\mu_{ks}}} \quad (13)$$

$\mu_k$  为初始磁导率;  $\mu_{ks}$  为饱和磁导率; 对铁氧体, 一般有  $\mu_k = 2000\mu_0$ ,  $\mu_{ks} = \mu_0$ , 上式即为:

$$4.5 \approx \sqrt{20} \leq n_k \leq 10 \quad (14)$$

因为  $n_{\text{总}} = n_1 \cdot n_2 \cdots n_k$ , 故有:

$$20^{k/2} \leq n_{\text{总}} \leq 10^k \quad (15)$$

显然, 若当  $k=1$  时, 上式成立, 即可用一级磁开关实现脉冲压缩, 当  $k=m$  时, 上式成立, 则须用  $m$  级磁开关实现脉冲压缩。

如对 EG & G 公司的 HY5031 闸流管, 最大阳极电压为 70kV, 峰值电流 6kA, 平均电流 8A, 那么

$$\tau_1 = 471\text{ns} \quad (C = 30\text{nf}, V_0 = 30\text{kV})$$

$$\therefore n_{\text{总}} = \frac{\tau_1}{\tau_k} \geq \frac{471}{100} = 4.71$$

显然,  $k=1$  时, (15) 式成立, 故采用一级磁压缩即可达到要求。

### 3. 磁开关截面确定

由(9)式并考虑填充因子后可得:

$$A = \frac{\tau_s \cdot V_0}{2 \cdot \Delta B \cdot N \cdot SF} \quad (16)$$

即磁开关尺寸是由饱和时间决定的。

磁开关一般采用一匝的同轴结构, 这时若选用环形铁氧体, 且单个磁芯的截面积为  $S$  时, 所需磁芯个数即为:

$$n = A/S \quad (17)$$

我们用上述方法成功地设计了一个输出功率  $> 1\text{kW}$  的磁开关, 其效率达 88.6%, 输出脉宽  $< 80\text{ns}$ , 实验结果与理论计算能很好地吻合。

### 参 考 文 献

- 1 Smilanski, Byron S R, Burkes T R. A P L., 1982;40(7):1
- 2 Birx D L, Lauer E J, Reginato L L *et al.* Basic principles governing the design of magnetic switches. Lawrence Livermore National Laboratories, 1980;Nov. UCID-1831
- 3 Edmond Y Chu. Design consideration of magnetic switching modulator. Pro. of 4th Int'l Pulsed Power Conf., 1983;242
- 4 Birx D L, Cook E, Hawkins S *et al.* Magnetic switching. Proceedings, 4th IEEE Pulsed Power Conf., 1983;231~235

\* 作者简介:王又青,男,1963年7月出生。讲师。现主要从事脉冲固体与脉冲气体激光器的研究工作。

收稿日期:1994-11-28

