

用于铜蒸气激光器的可饱和电抗器

黄振国 单焕炎 陈堤 霍苑 王红 于祖哲

(中国科学院电子学所)

提要: 给出用于铜蒸气激光器的可饱和电抗器的设计考虑。实验表明, 可饱和电抗器的应用改善了闸流管的开关特性, 增加了脉冲重复率和输入的电功率。

Saturable reactor used as charging inductor in copper vapor lasers

Huang Zhenguo, Shan Huanyan, Chen Ti, Huo Yuan, Wang Hong, Yu Zuzhe

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract: Design considerations of the saturable reactor used for copper vapor lasers are given. The experiments show that the use of saturable reactor improves the switch performances of thyatron and increases the pulse repetition frequency and input electric power.

一、前言

铜蒸气激光器(OVL)是一种高重复率的脉冲激光器。充氢闸流管广泛用作它的放电开关。但是, 过去生产的各种闸流管是为雷达而设计的, 只适用于低重复率和慢的电流上升速率。现在虽然已有一些厂家在试制一些专用于OVL的闸流管, 但性能还不十分可靠, 而且价格昂贵。

在OVL中, 重复率高达4~20 kHz, 电流上升速率达20 A/ns^[1], 当输入的电功率大于几个千瓦之后, 标准的共振充电回路已不能保证闸流管的消电离时间, 闸流管常发生短路而损坏。为了使闸流管既能工作于高重复率而又有足够长的消电离时间, 曾提出过许多方案, 其中最简单而又有效的一种方法, 就是采用可饱和电抗器作为充电电感^[2,3]。

二、设计考虑

OVL的一个典型的共振充电回路如图1所示, 图中, C 是储能电容, 它的大小是由输入放电管的电功率决定的。当闸流管停止导通时, 直流电源通过充电电感 L 、充电二极管 D 和旁路电感 L_0 给电容 C 充电。由充电回

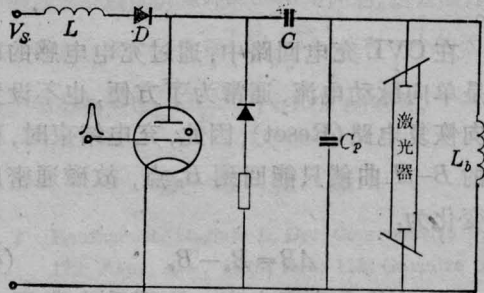


图1 铜蒸气激光器的共振充电回路

收稿日期: 1986年11月7日。

路的等效回路方程可以求出电容 C 二端, 也就是闸流管二端的充电电压为:

$$V_c = V_s \cdot (1 - \cos \omega t) = 2V_s \cdot \sin^2 \frac{\omega t}{2} \quad (1)$$

式中 V_s 为电源电压, $\omega = (LC)^{-1/2}$ 。由(1)式可见, 最短充电时间, 也就是 V_c 达到 $2V_s$ 的最短时间为 $T = \pi(LC)^{1/2}$, 故共振充电回路的脉冲重复率的上限为:

$$F_{\max} = \frac{1}{T} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (2)$$

该式表明, 共振充电回路要想工作于高重复率下, 只有减小电感。

但是, 从闸流管的消电离来考虑, 却希望电感 L 越大越好。这是因为闸流管在导通之后, 管内的氢等离子体需要一定的时间 t_r 才能恢复非导电状态, 解决对充电电感相互矛盾的要求的最好办法就是用可饱和电抗器作充电电感: 它在未饱和时具有很大的电感值, 能使电源与闸流管隔离足够长的时间, 当它饱和后, 电感值变得很小, 可以让电容 C 很快地充电。

可饱和电抗器的饱和时间, 也就是它隔离电源电压 V_s 的时间由法拉弟公式决定^[4, 5]:

$$\Delta t = NA \frac{\Delta B}{V_s} \quad (3)$$

公式采用实用单位制, N 为线圈匝数, A 为环状磁芯截面积, ΔB 为饱和前后磁通密度的变化。由(3)式可以看出, 这个饱和时间 Δt 正比于磁通密度的变化 ΔB , 而反比于电源电压 V_s 。

在 OVL 充电回路中, 通过充电电感的电流是单向脉动电流, 通常为了方便, 也不设置反向恢复电路(Reset), 因此, 充电结束时, 磁芯的 $B-H$ 曲线只能回到 B_r 点, 故磁通密度的变化为:

$$\Delta B = B_s - B_r \quad (4)$$

式中 B_s 为饱和磁通密度, B_r 是剩余磁通密度。对于 Mn-Zn 铁氧体, $B_s \sim 4000G$, $B_r \sim 1500G$, 故 $\Delta B \sim 2500G$, 很明显, 具有矩形磁

滞回线的铁氧体是不希望的。为了增加 ΔB , 可以在磁芯上切开一个 1mm 之内的气隙, 来减小 B_r , 及使磁芯不易太快饱和。图 2 给出了测得的开有气隙的铁氧体的 $B-H$ 曲线。具有气隙时, $\Delta B \sim B_s$ 。

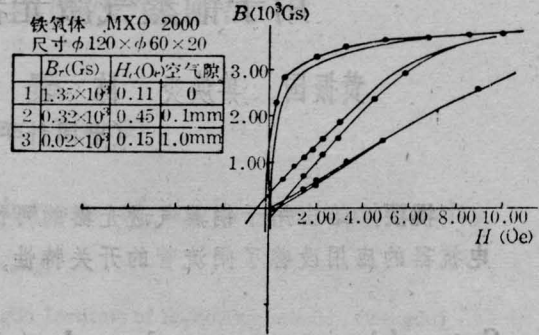


图 2 实验测出的开有气隙及未开气隙的 Mn-Zn 铁氧体 MXO-2000 的 $B-H$ 曲线

我们也采用了非晶合金 (Met Glas 2605 SC) 作磁芯, 经适当退火后, $\Delta B \sim 13000G$, 比铁氧体大得多, 可以节省许多材料, 并能减小体积。

由以上的分析可知, 采用可饱和电抗器作充电电感后, 实际最大允许的脉冲重复率由磁芯的饱和时间 Δt , 饱和电感决定的充电时间 T' 以及磁芯从饱和恢复到非饱和态的时间 (它大致等于磁芯的饱和时间 Δt) 决定:

$$F_{\max}^* = 1 / (2\Delta t + T') \quad (5)$$

式中 Δt 由(3)式确定, $T' = 1 / \sqrt{L_{sat} \cdot C}$, L_{sat} 是可饱和电抗器饱和后的电感值。

三、实验结果

我们分别用非晶合金和 Mn-Zn 铁氧体作磁芯制作了可饱和电抗器, 并将它们与线性充电电感作了对比。

所用的非晶合金磁芯环的外径为 6.5 cm, 内径为 4.0 cm, 厚 2.5 cm。设最大电源电压 V_s 为 8 kV, 所用闸流管 ZQM-4050A 的消电离时间约为 40 μs , 为保证它稳定工作, 技术上又易实现, 我们取 $\Delta t = 65 \mu s$, ΔB

$\approx 13000G$, 由(3)式可算出所需线圈匝数 $N \approx 1250$ 。这样,我们用了8个磁芯,每个绕160匝,相互串联,全部浸在变压器油中。全部线圈的非饱和电感(取 $\mu_r \sim 10^3$)可算出为480 mH,而饱和电感(取 $\mu_r \sim 1$)则为0.48 mH。因此,对于 $C = 16 \text{ nF}$ 的储能电容,由(5)式可算出最大重复率为7.5 kHz。

对该可饱和电抗器和一个300 mH的线性电感分别用作一台CVL的充电电感,测得的充电电压及电流波形如图3及图4所示。由图3可以看出,用300 mH的线性电感时,最高可以工作的重复率大约为4.6 kHz,这与用公式(2)算出的值一致。当重复率再增加时,充电电压将达不到最大值。充电电流波形很宽,这表明线性电感不能有效地隔离电源,隔离时间大约为 $\sim 20 \mu\text{s}$ (对于 $V_c = 8 \text{ kV}$)。再进一步增加电压时,因闸流管来不及消电离,常发生击穿现象,CVL不能稳定地工作。最大输入电功率难以超过3 kW。

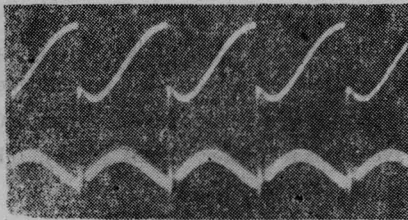


图3 一个300 mH的线性电感用作充电电感时的充电电压(上)和充电电流(下)波形
($C = 16 \text{ nF}$, $V_c = 8 \text{ kV}$)



图4 用可饱和电抗器用作充电电感时的充电电压(上)和充电电流(下)波形
($C = 16 \text{ nF}$, $V_c = 11 \text{ kV}$)

图4是用可饱和电抗器作充电电感,在11 kV共振充电电压下的充电电压和电流波形。上部的平顶部分还可以缩短,即重复率



图5 可饱和电抗器用于低的共振充电电压时的充电电压波形

还可以增加,大约可以增加到5 kHz,与由(5)式计算的理论值基本一致。这时的充电电流波形十分尖锐,表明可饱和电抗器将电源电压和闸流管隔离的时间较长,大约有 $50 \mu\text{s}$ 左右。CVL可以稳定地工作到15 kV的共振充电电压,输入电功率可达8 kW以上。

由于可饱和电抗器的饱和时间具有电压依赖性,即在高电压下变短,在低电压下变长,故在低的共振充电电压下,由于饱和时间太长,它不能工作在高的重复率下,当外加的重复率太高时,磁芯会在饱和和非饱和状态下交替工作,出现图5所示的双迹。这也是可饱和电抗器的缺点。为了克服这个缺点,在升压的过程中,重复率才能逐步升上去。

我们也用Mn-Zn铁氧体MXO-2000作磁芯,制作了可饱和电抗器,环的外径为12 cm,内径6 cm,厚2 cm,开有1 mm的气隙,用8个磁芯分别绕制,串联使用,除体积较大及饱和稍缓之外,效果与非晶合金接近。

采用可饱和电抗器作充电电感后,CVL可以稳定工作在4~8 kHz的重复率。对于 $\phi 60$ 的放电管,在输入电功率为 $\sim 8 \text{ kW}$ 时,可以获得45 W的平均输出功率。

参 考 文 献

- 1 Grove Rober E. *Laser Focus*, 1982; 18(7): 45
- 2 Karny Z et al. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980; 51(10): 1426
- 3 Nam K H, Seguin H J J. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979; QE-15(1): 44
- 4 Black Susan, Burkes T R. Proc. 2nd IEEE Int. Pulsed Power Conference, Lubbock, TX 1979, (IEEE New York), 1979; 102
- 5 Peter R A et al. 4th Int. Conf. on Pulsed Power Technology, Albuquerque NM 1983 (Texas Tech. Press, New Mexico), 1983: 236