

用于高功率铜蒸气激光器的磁脉冲压缩器

尹宪华 陶永祥 陈 林 杨 燕 于德利 李海兰

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 研制成一套用于高功率铜蒸气激光器的单级磁脉冲压缩装置。从磁材料的物理特性概述了设计过程中要注意的问题,包括材料的选择、装置的几何尺度和装置实际阻挡直流高压能力的确定。

关键词 磁脉冲压缩器,磁开关,铜蒸气激光器

1 引 言

氢闸流管在雷达调制器工作中是一种能承受高功率、高重复工作频率的长寿命放电开关。然而,当它被用于短脉冲放电激光装置中,其寿命就显得短了。主要原因是闸流管承受最大工作负载的能力和使用寿命受两个因子之一的限制^[1]:

$$(1) \quad P_b = V_k \times I_p \times f$$

$$(2) \quad \Pi_b = V_k \times dI/dt \times f$$

这里 P_b 为板压击穿因子, Π_b 为阳极加热因子, V_k 为闸流管阳极承受的工作电压, I_p 为流过闸流管的峰值电流, f 为重复工作频率, dI/dt 为闸流管放电电流上升率。目前市场上提供的性能最佳的通用型 CX1535 管子,其给定的 P_b 值为 5×10^{11} ;铜蒸气激光器专用型 CX1635 管子,其 Π_b 值为 1.5×10^{18} 。

由于铜原子的激励需要快速泵浦,通常铜蒸气激光器放电线路采用电容转移线路,如图 1 所示。单台输出功率为 100 W 的铜蒸气激光器,其工作电压 $V_0 \geq 25$ kV,峰值电流 ≥ 1200 A,电流上升时间 < 120 ns,重复工作频率为 5 kHz。显然这些值已接近或超出闸流管的工作极限了。

为了减轻闸流管的工作负担,最有效的方法是在闸流管和激光管之间加一节或几节磁脉冲压缩器(MPC),如图 2 所示。MPC 工作原理是基于磁性材料的非线性特性,即磁开关可在一定的时间内挡住直流电压,这个时间由开关内磁通量决定。一旦磁通量达到饱和,磁性材料的导磁率 μ 迅速下降几个量级, MPC 的电感量也就下降几个量级, MPC 形成一个电流开关作用。

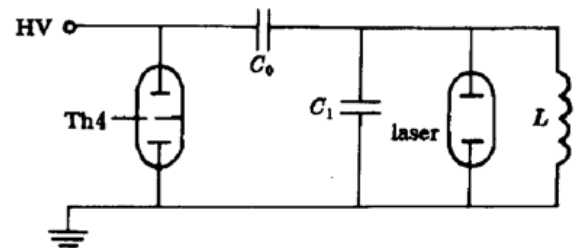


图 1 一般的铜蒸气激光放电线路

Fig. 1 A conventional CVL driver electrical circuit

2 磁开关的设计

图 2 是采用 MPC 装置的放电路径,其工作过程是:最初电容 C_0 被充电至 V_0 ,当闸流管打开后,电容 C_0 开始对电容 C_1 和电容 C_p 放电。这时 MPC 没有饱和,极大的感抗使得通过 C_p 的漏电流很小, C_0 上的大部份能量转移到 C_1 。根据文献[2],可以得到下列一组公式(1)~(7)。在 MPC 内的磁通量密度变化可以表示为

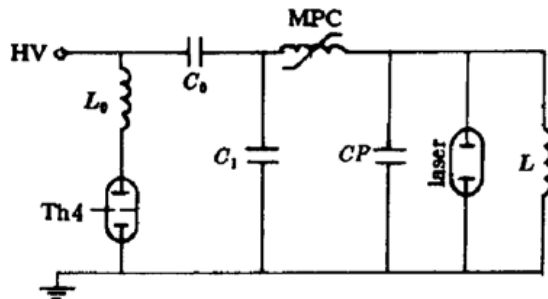


图 2 采用单级磁压缩器的铜蒸气
激光放电路径

Fig. 2 A CVL electrical circuit driver with
a single stage MPC

$$\Delta B(t) = 1/(N \times A) \int [V_{C_1}(t) - V_{C_p}(t)] dt \approx 1/(N \times A) \int V_{C_1}(t) dt \quad (1)$$

这里 $\Delta B, N, A$ 分别为磁通量变化密度、绕组圈数和磁芯截面积。一旦 MPC 内的磁通量饱和, MPC 的感抗变得很小 ($\ll L_0$)。结果,能量从 C_1 转移到 C_p ,所需的时间远小于从 C_0 转移到 C_1 所需的时间。也就是电流脉宽被压缩了。为了提高能量转移效率,理想的设计应使得 V_{C_1} 达到最大值时, MPC 才饱和。 $V_{C_1}(t)$ 表示为

$$V_{C_1}(t) = V_0 [C_1 / (C_0 + C_1)] [1 - \cos(\pi/\tau_1)t] \quad (2)$$

若 $C_0 = C_1$, 所需的 ΔB 被表示为

$$\Delta B = V_0 \times \tau_1 / (2 \times N \times A) \quad (3)$$

这里 τ_1 是 MPC 达到饱和时所需的时间,被表示为

$$\tau_1 = \pi \times (L_0 \times C_0 / 2)^{0.5} \quad (3a)$$

$V_{C_p}(t)$ 的上升时间由 MPC 的饱和电感量 L_{sat} 决定,表示为

$$\tau_2 = \pi \times (L_{sat} \times C)^{0.5} \quad C = C_1 \times C_p / (C_1 + C_p) \quad (4)$$

这里 L_{sat} 表示为

$$L_{sat} = \mu_0 \times \mu_{sat} \times A \times N^2 / l \quad (5)$$

这里 μ_0 为真空导磁率, μ_{sat} 为饱和磁性材料的相对导磁率, l 为平均磁路长度。压缩比 γ 可以表示为

$$\gamma = \tau_1 / \tau_2 \quad (6)$$

由公式(3), (5)可得到磁性材料所需体积为

$$V_{O_1} = A \times l = \pi^2 \times \mu_0 \times \mu_{sat} \times \gamma^2 \times C \times V_0^2 / (4 \times \Delta B^2)$$

而 $C = (C_1 \times C_p) / (C_1 + C_p)$ (7)

在工作中,磁性材料产生的热损耗 W 被表示为^[3]

$$W \propto \pi^2 \times \mu_0 \times \mu_{sat} \times d^2 \times \tau_1 \times f \times (C \times V_0^2) / (4 \times \rho \times \tau_2^2) \quad (8)$$

这里 f 为重复工作频率, ρ 为电阻率, d 为材料厚度(对于铁氧体磁环, $d = (OD - ID) / 2$ 。这里 OD 为磁环外径, ID 为磁环内径)。

3 设计中要注意的问题

3.1 公式(1)的物理意义是:积分项 $\int V_{C_1}(t) dt$ 代表磁脉冲压缩器阻挡直流电压的能力。它是

一个很重要的物理量。也就是说磁脉冲压缩器抗直流电压的能力是由电压和时间两个物理量的乘积来确定的,改变其中某一个变量值,必定引起另一个变量值的变化,该乘积值近似等于 $V_{c_{1max}}/2 \times \tau_1$ 。这里 $V_{c_{1max}}$ 是加在电容 C_1 两端的峰值电压,要强调的是对于一个给定参数 ($N, A, \Delta B$) 的磁压缩器其耐压值 $V_{c_{1max}}$ 不是唯一的。实验中,我们通过改变输入电压 V_0 和电感 L_0 的值来得到不同的 $V_{c_{1max}}$ 和 τ_1 值。经过几十对实验数据比较,证明后两个值的乘积基本上是一个常数,其误差小于 $\pm 5\%$ 。因此可以认为:对于一个给定参量的磁压缩器,其阻挡直流电压的能力是恒定的,与外加电压值 V_c 无关。提高电压值,必然降低耐压时间。实验中通过测量 $V_{c_{1max}}$ 和 τ_1 实验值而迅速了解第 n 节磁脉冲压缩器阻挡直流电压的能力,然后根据实验要求,修正参量 A, N 或 ΔB ,可获得一个理想的 MPC。公式(1)表明 MPC 阻挡直流电压能力与铁芯的磁通量密度变化 ΔB 成正比。在采用多级磁开关的放电线路内,其前级磁开关应选择 ΔB 尽可能大的材料制作,如非晶铁基、钴基等。而一般 ΔB 值较小的铁氧体材料则适合做末级开关。一般在磁开关上另加一个直流偏压绕组,使磁滞曲线的初始点始终处在负偏置状态,这时 $\Delta B = B_s - (-B_r)$, 比不加偏压绕组增大一倍。我们的实验结果是:对于非晶材料,加一个适度偏压可提高耐压能力 $20\sim 30\%$;而对于铁氧体材料,加偏压没有明显效果。

3.2 公式(5)表明磁开关的饱和电感正比于 μ_{sat} 。所以希望一旦磁开关饱和 μ_{sat} 值应尽可能接近 1,尤其末级磁开关,饱和电感越小,越有利于激光泵浦。因此材料的 μ_i/μ_{sat} 比值越大,开关性能越好。一般磁性材料的初始导磁率 μ_i 是在 $10^3\sim 10^5$ Hz 频率下测定的。在磁开关应用中,与短脉冲放电相关的有效充电频率为 $F = 1/(2 \times \tau) = 10^6\sim 10^8$ Hz。这时 μ_i 值很快下降,有些材料根本不能用作磁开关。这里 τ 是流过磁开关的放电电流脉宽。所以材料的频率特性、温度特性是设计 MPC 的关键参数。图 3 给出了一些材料的物理特性曲线。

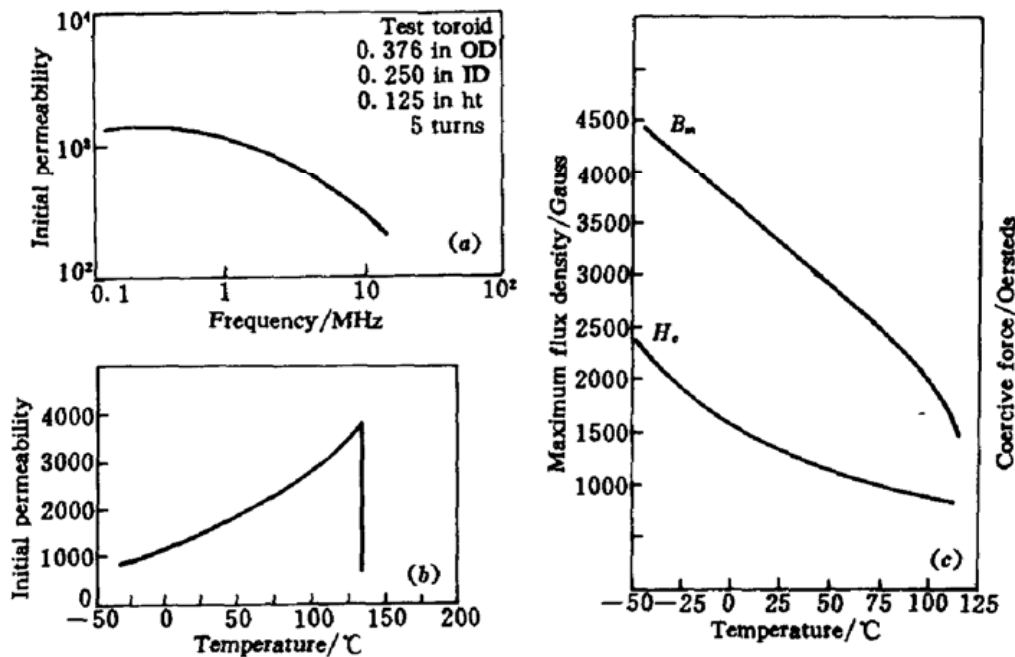


图 3 设计曲线

(a) 初始导磁率与频率的关系; (b) 初始导磁率与温度的关系; (c) 饱和通量与温度的关系

Fig. 3 Typical design curves

(a) initial permeability vs frequency; (b) initial permeability vs temperature; (c) saturation flux vs temperature

3.3 从公式(8)看到为了降低损耗,选择 μ_{sat}, d 值小, ρ 值大的材料是必须的。另外在设计中唯

一可调节的参数是 τ_1/τ_2^2 。在单节 MPC 里,这两个时间值由外部条件决定,即由闸流管的工作因子和激光管所需最小泵浦速率 di/dt 来决定。在多节 MPC 里,每节的 τ_1, τ_2 由每节的压缩比 γ 决定。因此为了降低损耗,每节的压缩比分配应最佳。公式(8)不单是材料厚度薄些,热损失就小些。了解热现象产生的本质是趋肤效应,我们可进一步认识到材料的厚度不仅与功率损耗有关,更重要的是影响磁压缩器的开关性能。因为磁开关工作在短脉冲状态,磁材料的磁化过程伴随着趋肤效应。磁化是从磁环的外表面向其内部渗透。如果磁环厚度的一半远大于材料的趋肤深度,则就失去了磁开关的性能。基于上述考虑,也就不难理解为什么电阻率 ρ 小的非晶材料必须做成微米量级的薄带,然后采取一些绝缘措施绕成磁环,而相对电阻率 ρ 很大的铁氧体就可直接做成厘米量级的厚磁环。因此我们在设计磁压缩器时必须注意材料的厚度不能超过趋肤效应的深度,即 $d < \delta$ 。

4 实验结果

采用镍-锌成份的铁氧体磁环做成单节磁压缩器,成功用于 40 W 和 100 W 铜蒸气激光器。磁芯材料的参数如下:

初始导磁率	$\mu_i = 1600$	最大磁通量变化密度	$\Delta B = 0.48 \text{ T}$
饱和磁通量密度	$B_s = 0.3 \text{ T}$	电阻率	$\rho = 10^9 \Omega/\text{cm}$
剩余磁通量密度	$B_r = 0.18 \text{ T}$	磁环外径	$OD = 152 \text{ mm}$
矫顽力	$H_c = 0.23 \text{ A/m}$	磁环内径	$ID = 102 \text{ mm}$
居里温度	$T_c = 130^\circ\text{C}$	磁环高度	$HT = 12.7 \text{ mm}$

如图 2 所示,空心电感 L_0 用来延长电容 C_0 对 C_1 的放电时间。 $C_0 = C_1 = 10 \text{ nF}$, $C_2 = 3 \text{ nF}$ 。 $L_0 = 1.9 \mu\text{H}$ 。MPC 由 8 个磁环组成,为了防止铁芯过热,整个装置浸在油箱内,油进行循环冷却。

表 1 磁开关参数

Table 1 Specifications of the magnetic switches

Cross section of core/ mm^2	time-voltage products/ $\text{V} \cdot \text{s}$	turns of coil N	V_{c_1} rise time/ns	V_{c_2} rise time/ns
2600	2.3×10^{-3} *	3	300	100
	3×10^{-3}		297*	104*

* 代表实验值。

图 4,图 5 是实验照片。照片是在直流充电电压为 10^4 V ,平均充电电流为 1.1 A 的条件下拍摄的。按预先设计:由于共振充电,电容 C_0 上的最高电压为 $2 \times 10^4 \text{ V}$,然后通过闸流管放电,对 C_1 充电至 $2 \times 10^4 \text{ V}$,时间为 300 ns。但实验结果是 $V_{c_{1\max}} = 2 \times 10^4 \text{ V}$,时间为 230 ns。由此看来磁脉冲压缩器的实际抗直流电压能力比理论估算小,其原因是最大磁通量密度下降。如图 3(c) 所示,随着工作温度上升, B_m 下降,结果 ΔB 也下降。这里 $B_m = B_s$ 。解决此问题的最有效方法是增加磁环个数,也就是增加磁芯截面积,或增加一节压缩器。从图 4 看到电容 C_1 和 C_2 电压上升时间分别为 220 ns 和 110 ns,压缩比为 2。同未加磁压缩装置的情况比较,闸流管耐压能力大大提高,连续工作 4 h 没有漏闪现象。整个激光装置的工作稳定性有了很大提高。图 5 表示激光管电压和激光管电流,经重新标定电流峰值为 1020 A,电流上升时间为 113 ns。测得激光输出功率为 92 W。激光脉宽为 50 ns。

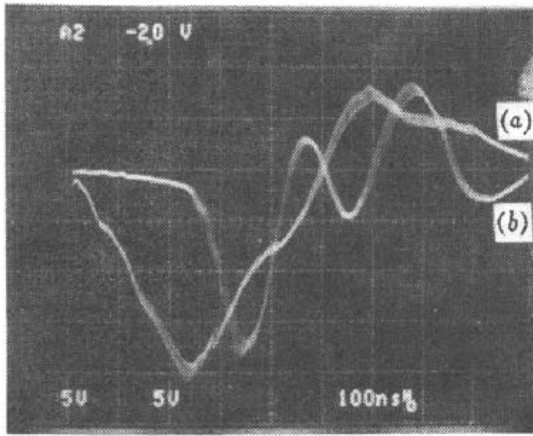


图 4 V_{c_1} 波形(a) 和 V_c 波形(b)

Fig. 4 V_{c_1} waveform (a) and V_c waveform (b)

time: 100 ns/div, voltage: 5000 V/div

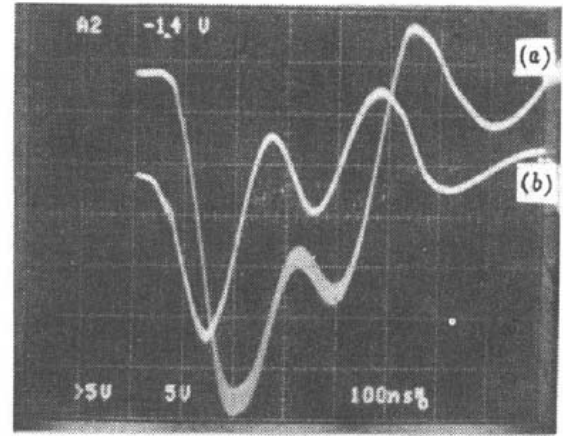


图 5 激光管的电流(a) 和电压(b) 波形

Fig. 5 Current (a) and voltage (b) waveforms of laser tube

time: 100 ns/div, voltage: 5000V/div, current: 150A/div

参 考 文 献

- 1 M. Nehmadi, Z. Kramer, Y. Ifrah *et al.*. Magnetic pulse compression for a copper vapour laser. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1989, **22**(1): 29~34
- 2 H. Deguchi, T. Hatakeyama, E. Murata *et al.*. Efficient design of multistage magnetic pulse compression. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(12): 2934~2938
- 3 C. H. Smith. Applications of amorphous magnetic materials at very-high magnetization rates. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**(9): 5556~5561

A Magnetic Pulse Compressor for High-power Copper Vapor Laser

Yin Xianhua Tao Yongxiang Chen Lin Yang Yan Yu Deli Li Hailan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A single stage magnetic pulse compression (MPC) system for High-power copper vapor laser was developed. Basing on the physical characteristic of the magnetic material, several problems noticeable are presented, including how to choose magnetic materials, and how to define the geometric dimensions of the system and the ability to resist DC high voltage.

Key words magnetic pulse compressor, magnetic switch, copper vapor laser