

小型磁脉冲压缩器在铜蒸气激光器上的应用

李海兰 陶永祥 尹宪华 陈 林 杨 燕 于德利

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 介绍了一种用小镍-锌磁环组成的小型磁脉冲压缩器,并将它成功地用于铜蒸气激光器电路中。同时给出了它的基本原理和理论设计,并且对实验结果进行了分析。

关键词 磁脉冲压缩器,铜蒸气激光器,磁开关

1 引 言

由于铜原子激光上能级 $4^2P_{1/2}$ 和 $4^2P_{3/2}$ 的寿命很短,仅为 10 ns 量级,达到完全共振俘获后也不过分别为 300 ns 和 615 ns,因此需要采用快放电激励。放电线路采用电容转移线路,如图

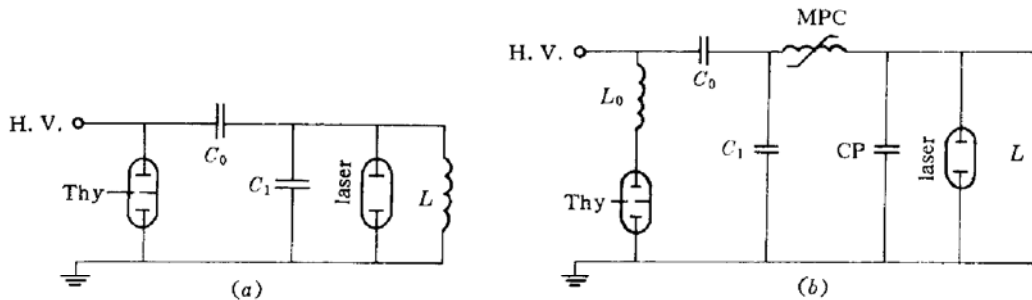


图 1 (a) 常规 CVL 激励电路; (b) 带一级磁压缩 MPC 的 CVL 激励电路

Fig. 1 (a) A conventional CVL electrical driven circuit; (b) A CVL electrical driven circuit with a single stage MPC

1 (a) 所示。铜蒸气激光器(CVL)激励电源的一个关键部件是放电主开关——充氢闸流管。以一台放电管内径为 $\phi 30$ mm,长度为 1300 mm 的 20 W 级铜蒸气激光器为例,电源给激光器提供高电压(13 kV 以上),大电流(峰值在 700 A 以上),高重复频率(6 kHz 以上)的快放电激励脉冲。激励脉冲全经闸流管开关,如此苛刻的放电条件将使闸流管不堪重负。闸流管的使用寿命和运行可靠性通常由以下两个综合参数之一决定:(1) $P_b = V_h \times i_b \times f$; (2) $\pi_b = V_h \times di/dt \times f$ 。这里 P_b 为板压击穿因子, π_b 为阳极加热因子, i_b 为流过闸流管的峰值电流, f 为重复频率, V_h 为闸流管阳极承受的工作电压。以国产 4050A 型陶瓷氢闸流管为例,说明书给出的各项极限值为:峰值正向阳极电压为 33 kV,正向阳极电流为 3000 A,峰值阳极电流上升率为 5000 A/

μs , P_i 值为 5.0×10^{10} 。单台 20 W 铜蒸气激光器, 工作电压 $V > 13 \text{ kV}$, 峰值电流 $i_b > 1000 \text{ A}$, 电流上升时间 $t < 100 \text{ ns}$, 重复频率 f 为 6.6 kHz 。工作时的 di/dt 为 $31000 \text{ A}/\mu\text{s}$, P_i 值为 1.0×10^{11} , 显然这两个值已经超出闸流管的工作极限。在这种状态下工作的闸流管, 其有效工作寿命和可靠性将大大降低。

延长闸流管使用寿命, 提高它的运行可靠性, 就必须减轻闸流管负担。采用磁脉冲压缩电路是实现这一目标的好方法。磁脉冲压缩器 (Magnetic Pulse Compressor, MPC) 的本质是一只可饱和电感。基于磁芯的非线性特性^[1], 当流过此电感的电流很小时 (峰值 $< 15 \text{ A}$), 磁通量未饱和, MPC 呈现很大的电感, 在一定时间内可以阻挡脉冲电流, 这个时间由电感内磁通量决定。当流过此电感的电流超过磁芯的饱和电流时 ($> 15 \text{ A}$), 磁通量达到饱和, 磁芯的导磁率 μ 迅速下降几个量级 (一般从 10^3 下降到 10 左右), MPC 的电感量也就下降几个量级, 此时 MPC 不再阻挡脉冲电流。所以 MPC 对于电路内传递的电流而言, 呈现了一个开关的作用。在加入 MPC 的铜激光器电路中, 通常需要在闸流管回路中加接一个电感 L_0 来降低流过闸流管的峰值电流和电流上升速率, 以明显改善闸流管的工作状态。本文讨论了一种小型磁脉冲压缩器, 并将它用于 20 W 铜蒸气激光器, 得到了比较满意的结果。

2 磁脉冲压缩器的设计

MPC 的设计基础是由 W. S. Melville 在 1951 年提出的。文献[2]已给出了有关 MPC 的设计公式。在这里作者根据实践经验, 对公式(1)~(9)的物理意义和设计中注意的一些问题作讨论。图 1 (b) 给出了带一级 MPC 装置的电路框图, 电容 C_0 被充电到 V_0 。当闸流管开启后, 贮存在 C_0 中的能量开始向 C_1 和 C_p 转移。刚开始 MPC 没有达到饱和, 极大的感抗使得通过 C_p 的漏电流很小, C_0 上的大部分能量转移到 C_1 , 在此过程中, 当 MPC 内的磁通量达到饱和时, MPC 的感抗变得很小, 能量从 C_1 迅速向 C_p 转移。由于能量从 C_1 转移到 C_p 并最终实现激光管放电的时间远小于从 C_0 转移到 C_1 所需的时间, 因而电流脉宽被压缩了。MPC 内的磁通量在饱和之前变化密度可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta B(t) &= 1/(N \times A) \int [V_{c_1}(t) - V_{c_p}(t)] dt \\ \Delta B(t) &\approx 1/(N \times A) \int V_{c_1}(t) dt \end{aligned} \quad (1)$$

这里 ΔB , N , A 分别为磁通量密度变化、绕组圈数和磁芯截面积。积分项 $\int V_{c_1}(t) dt$ 代表了磁脉冲压缩器阻挡脉冲电流的能力, 在磁通量饱和之前, $\int_0^{\tau_1} V_{c_1}(t) dt = V_{c_{1\max}} \times \tau_1/2$, $V_{c_{1\max}}$ 为最大充电电压, τ_1 为 MPC 的饱和时间。将积分值代入(1)式, MPC 达到饱和所需的时间为

$$\tau_1 = 2\Delta BNA/V \quad (2)$$

为了提高能量转换效率, 理想的设计应使 V_{c_1} 达到最大值时, MPC 才饱和。在 LC 谐振充电下, 从 C_0 到 C_1 的能量转移时间为

$$\tau = \pi(L_0 \times C_0/2)^{0.5} \quad C_0 = C_1 \quad (3)$$

为了使 C_1 最大限度充电, 令

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau \\ 2\Delta BNA/V &= \pi(L_0 \times C_0/2)^{0.5} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 MPC 达到饱和后, 从电容 C_1 到 C_p 充电特征时间为

$$\tau_2 = \pi \times (L_{\text{sat}} \times C)^{0.5} \quad C = C_1 \times C_P / (C_1 + C_P) \quad (5)$$

其中 L_{sat} 为 MPC 的饱和电感量, 表示为

$$L_{\text{sat}} = \mu_0 \times \mu_{\text{sat}} \times A \times N^2 / l \quad (6)$$

这里 μ_0 为真空导磁率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, μ_{sat} 为磁芯的饱和相对导磁率(G), l 为所用磁芯的平均磁路长度(m), 压缩比由下列关系式决定

$$\gamma = \tau / \tau_2 \quad (7)$$

在单节 MPC 中, τ_1, τ_2 两个时间值由外部条件, 即闸流管的工作因子和激光管所需的最小泵浦速度 di/dt 所决定。由公式(2) ~ (7) 可以得出所需的磁芯体积为

$$V_{\text{ol}} = A \times l = \pi^2 \times \mu_0 \times \mu_{\text{sat}} \times \gamma^2 \times C \times V^2 / (4 \times \Delta B^2) \quad (8)$$

在工作中, 磁芯产生的热损耗表示为

$$W \propto \pi^2 \times \mu_0 \times \mu_{\text{sat}} \times d^2 \times \tau \times f \times (C \times V^2) / (4 \times \rho \times \tau_2^2) \quad (9)$$

这里 f 为重复工作频率, ρ 为电阻率, d 为磁芯厚度(对于铁氧体磁环, $d = (OD - ID) / 2$)。热损耗是影响 MPC 能量传输效率的一个因素, 工作中 MPC 的热损耗产生在能量向激光管的传递过程中。热损耗会引起磁芯温度过热, 因为磁芯材料的特征参数 $\Delta B, \mu$ 等都随着磁芯温度上升而下降, 使得 MPC 性能下降。从公式(9)可以看出为了降低损耗, 选择 μ_{sat}, d 值小, ρ 值大的材料是必须的。在多级 MPC 里, 为了降低损耗, 应考虑每节的压缩比分配。材料的厚度不仅与功率损耗有关, 还影响磁脉冲压缩器的开关性能。我们在设计 MPC 过程中注意到材料的厚度不能超过趋肤效应的深度, 即 $d < \delta$, 否则磁芯不易完全饱和, 磁开关性能就下降了。我们在实验中也作了比较。对于相同铁芯体积的 MPC, 其开关性能是 d 值较小的优越于 d 值较大的。文中所介绍的小型磁脉冲压缩器开关性能更加稳定。表 1 给出了小型磁开关参数。所选磁芯的参数为一种厚度小 ($d = 5 \text{ mm}$), ρ 值大 ($\rho = 10^9 \Omega/\text{cm}$) 的低损耗小型磁环。减小压缩比可以增加 MPC 效率, 但是太小的压缩比又会使闸流管损耗增加, 通常在给定压缩比情况下考虑削减 MPC 的损耗。在实验中发现, MPC 与激光管连线越长, MPC 饱和时放电回路中电感越大。结果 MPC 的开关性能下降。因此在 MPC 电路安装中, 有必要使电路结构尽可能紧凑, 以减少 MPC 的寄生电感和提高整个线路的转换效率。

表 1 磁开关参数

Table 1 Specifications of the magnetic switches

Cross section of core/mm ²	Outer diameter/mm	Internal diameter/mm
4700	17	7
Turns of coil/N	Highness of core/mm	Maximum magnetic flow density/T
1	5	0.43
Impedance of core/ Ω/cm		
10^9		

3 MPC 的设计和实验结果

图 1 (b) 为带一级磁脉冲压缩器的 20 W CVL 激励电路。 $C_0 = C_1 = 4 \text{ nF}$, $C_P = 1.7 \text{ nF}$, $L_0 = 6 \text{ }\mu\text{H}$, $f = 6.6 \text{ kHz}$ 。与百瓦级铜激光器上所用的磁脉冲压缩器^[3]不同, 我们设计了一种小型磁脉冲压缩器。用一根外径为 6 mm 的紫铜管, 弯成 U 字形, 将 188 只外径为 17 mm, 内径为 7 mm, 高度为 5 mm 的小型镍-锌铁氧体磁环串叠在此 U 型铜管上(见图 2)。这种小型磁脉冲压

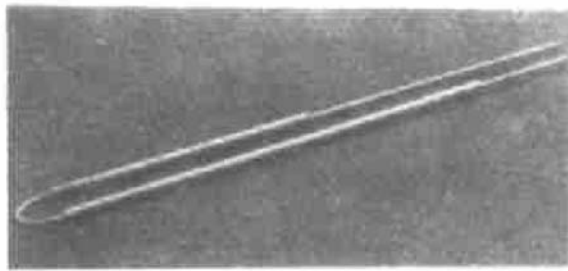


图 2 磁脉冲压缩器照片

Fig. 2 The picture of a magnetic pulse compressor

缩器结构简单而小巧,散热较快,在紫铜管中通水冷却,磁环外部采用风冷。而百瓦激光器上的 MPC 用的则是外径为 152 mm,内径为 102 mm,高度为 12.7 mm 的大镍-锌铁氧体磁环,而且磁芯需要浸在循环油中冷却。188 个小磁环穿在 U 型的紫铜管上,U 型管的两端即是绕组的两端,它的结构又使进出此绕组的电流方向平行且相反,尽可能降低 L_{ext} 。

图 3 照片是在充电电压为 7400 V,平均充电电流为 0.55 A 条件下拍摄到的闸流管、激光管的电流波形。

电流波形探测器为 Pearson410A 型,其灵敏度为 0.1 V/A。用宽带示波器显示。其中显示电流波形的 CH. 2 线的灵敏度(照片上显示为 >5 V)实际标定为 15 V/cm。因此,对电流的实际灵敏度为 150 A/cm。图 3 (a) 是未加 MPC 时闸流管的电流波形,可以看出电流上升时间只有 33 ns, di/dt 为 31000 A/ μ s,远大于额定值。由于激光管和电路间的阻抗不匹配,会有一部分放电脉冲能量返回激励电路,通过闸流管产生一个反向电流。它会延长闸流管恢复时间,缩短使用寿命。图 3 (b) 为加 MPC 闸流管和激光管的电流波形。明显看出闸流管电流峰值降低,上升时间拉宽到 150 ns,全宽近似为 300 ns。通过激光管的电流全宽近似为 180 ns。压缩比为 1.7。 di/dt 值降为 2800 A/ μ s,较未加 MPC 时降低一个量级。使关键参数返回它的允许值,闸流管工作在安全范围内。MPC 的加入还减少了返回能量,缓解了闸流管回路的振荡,反向脉冲减小,从而延长了闸流管的使用寿命。

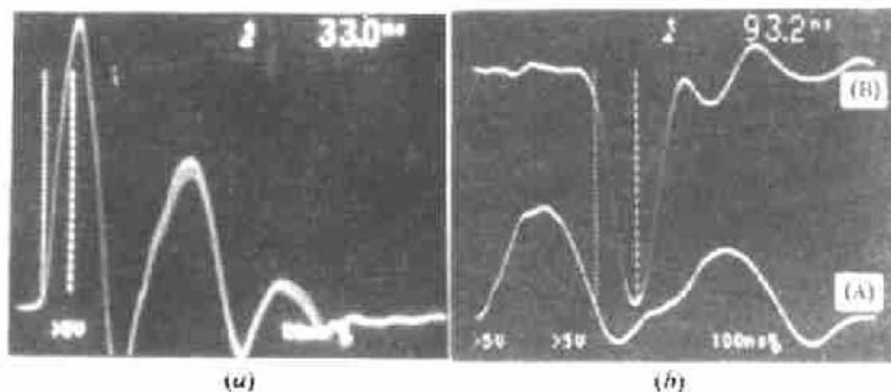


图 3 (a) 常规 CVL 激励电路的闸流管电流波形;

(b) 带 MPC 的 CVL 激励电路闸流管的电流波形 (A) 和激光管电流波形 (B)

Fig. 3 (a) Current waveform of the thyatron in the conventional CVL driven circuit

(b) Current waveforms of the thyatron (A) and the laser tube (B) in a CVL driver circuit with MPC

采用磁脉冲压缩器以后的 20 W 级铜蒸气激光器的工作特性得到了明显的改善:(1) 闸流管的平均寿命由原来的 500 h 增长至 1000 h;(2) 在常规电路中,由于阳极加热因子超标,电路阻抗失配而使功率向闸流管反馈等因素,致使闸流管的栅级过热和变形,阳极有弧光放电。长时间工作,闸流管会出现尖叫、漏闪甚至连通。在 MPC 新电路中,对闸流管就没有这些破坏性影响,电极也未受损,闸流管耐压能力大大提高,连续工作 8 h 以上也没有漏闪现象,工作可靠性明显提高;(3) 因为闸流管工作在安全区内,它的耐压能力和负载能力也相应提高。以

本小型 MPC 在 20 W CVL 中为例, 在 6~8 kHz 重复频率下, 4050 A 管的耐压能力可从 13 kV 提高到 15 kV, 相应激光输出功率从 20 W 提高到 24.5 W; (4) 缓冲气体的压力增加, 激光器的输出稳定性增强。在 20 W CVL 中, 未加 MPC 时最佳氦气压在 4.66 kPa 左右。气压超过 4.66 kPa, 输出功率下降。而加了 MPC 后由于闸流管的耐压能力提高, 激光器能够在较高电压下工作, 场强 E 值升高, 氦气压力即使增至 7.32 kPa, 激光效率不仅不下降, 而且激光稳定性进一步提高。

铜蒸气激光器激励电路还可采用多级 MPC, 关键是合理分配每一级的压缩比, 以获得最大的 MPC 转换效率。

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. Quantum Electron.*, 1994, 30(12):2934~2938
- 3 Yin Xianhua, Tao Yongxiang, Chen Lin *et al.*. A magnetic pulse compressor for high-power copper vapor laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, A25(5):401~405 (in Chinese)

A Small Magnetic Pulse Compressor Used for a Copper Vapor Laser

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

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

Abstract With the MPC circuit power losses on the thyatron reduced, an increase of the tube lifetime and input power is realized. So, the laser output power is increased. The stability of the laser operation is improved. A small magnetic pulse compressor which is made of a ZnNi magnetic core works in the CVL circuit successfully. A theoretical consideration of the MPC is presented and the experimental results are analysed.

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