

磁脉冲压缩器在卤化铜激光器上的应用^{*}

刘才明

(浙江大学物理系, 杭州 310027)

(2002 年 10 月 18 日收到, 2002 年 11 月 26 日收到修改稿)

在卤化铜激光器脉冲放电电源系统中, 为减轻闸流管的工作负担并同时保证电路的快放电激励, 采用了单级磁脉冲压缩器. 分析了磁脉冲压缩器的工作机理, 介绍了所采用磁脉冲压缩器的设计考虑及参数选用.

关键词: 磁脉冲压缩器, 闸流管, CuBr 激光器

PACC: 9430M, 8240P, 4255H

1. 引言

由于卤化铜激光的自终止性质, 选择合适的脉冲放电电源以产生足够的铜原子密度, 实现快放电激励是获得激光功率输出的关键所在, 亦即要求脉冲放电电源输出的电流脉冲必须具有窄脉宽、陡前沿特性. 传统的卤化铜激光器脉冲放电电源是采用电容储能电荷转移放电, 利用充氢闸流管作为放电开关而实现快放电激励. 以 6W 水平 CuBr 激光器为例, 主放电开关为最大阳极脉冲电压为 10000V、最大阳极脉冲电流为 1000A、阳极脉冲电流宽度(中心值)为 $3\mu\text{s}$ 、脉冲重复率(中心值)为 333Hz 的 ZQM2-1000/10 型陶瓷脉冲充氢闸流管, 在高重复率脉冲放电过程中, 必须承受相当大的电流上升率($di/dt = 2 \times 10^9 \text{ A/s}$, 脉冲重复率为 20kHz), 这显然已大大超过了其技术极限. 在这种状态下工作的闸流管, 其有效工作寿命及可靠性将大大降低.

如何减轻脉冲激光器核心器件之一的闸流管的工作负担以延长其使用寿命并提高系统的运行可靠性, 正逐渐成为近年来激光研究领域的一个热点课题^[1-13]. 采用磁脉冲压缩技术是实现这一目标的好方法. 磁脉冲压缩技术最早由 Melville 提出^[14], 其本质是利用可饱和电感制成控制能量流动方向的磁开关, 利用它将脉宽较大的电流脉冲压缩成为具有窄脉宽、陡前沿特性且能量更为集中的脉冲, 从而实现快激励放电. 本文介绍了在 CuBr 激光器上所采用的

磁脉冲压缩技术.

2. 磁脉冲压缩技术

2.1. 可饱和电感的磁开关特性

一般磁性材料的磁滞回线($B-H$ 曲线)及基本磁化曲线(B, μ_r-H 曲线)分别如图 1 和图 2 所示. 若分别以 μ_u, μ_s 表示磁饱和前后磁芯的相对磁导率, 以 L_u, L_s 表示磁饱和前后磁芯的电感量, 显然 $\mu_u \gg \mu_s$, 故有 $L_u \gg L_s$. 亦即磁芯在磁饱和前后其电感量会发生几个数量级的锐减. 正因为如此, 我们形象地称之为“磁开关”. 磁脉冲压缩器(MPC)正是利用了磁性材料这一开关特性从而实现了快速放电并锐化电流脉冲的作用.

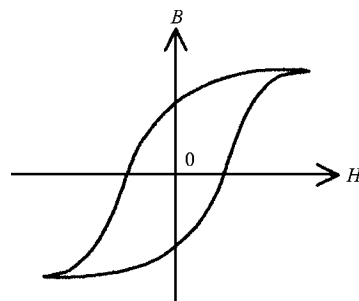


图 1 磁滞回线

根据电感的伏秒积平衡方程式^[1]

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 19974037)资助的课题.

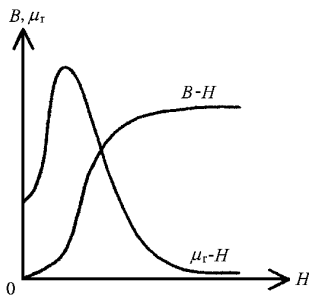


图 2 起始磁化曲线

$$\int V dt = NS \Delta B \tag{1}$$

知,电感两端承受的电压对时间的积分始终和绕组匝数 N 、磁芯截面积 S 、磁通量密度变化 ΔB 三者的乘积保持相等.故此,当电感所承受的伏秒积增大到一定值时,磁通密度不断增大,磁芯工作点进入 $B-H$ 曲线的饱和段.可见,通过控制电感两端的伏秒积,就可以控制电感的饱和与否.

2.2. 磁脉冲压缩器的工作机理

常规 CuBr 激光器激励电路如图 3 所示.当直流高压 HV 经 L_c, D, C_0, L_b 回路对储能电容 C_0 谐振倍压充电至 V_0 时,闸流管受脉冲触发器信号触发导通,储能电容 C_0 对激光管放电,同时对峰化电容 C_p 充电, C_p 充电后再对激光管放电.为了减轻闸流管工作负担,我们在闸流管支路加接充电电感 L_0 以延长闸流管支路的放电时间,并在回路中引入磁脉冲压缩器,如图 4 所示,即在原有电路基础上增加一个转移电容 C_1 ($C_1 = C_0$) 和一个可饱和磁芯电感 L_{MPC} ,其中可饱和磁芯电感 L_{MPC} 即为磁开关.全电路工作过程是:在闸流管闭合、 C_0 向 C_1 放电期间,磁脉冲压缩器尚未饱和,磁开关处于关断状态,峰化电容 C_p 上的漏电流很小, C_0 上的大部分能量转移到 C_1 .当 C_0 向 C_1 放电结束、闸流管断开之后,磁脉冲压缩器进入饱和状态,其感抗急速变小,磁开关闭合, C_1 向 C_p 放电,此时的放电时间远小于 C_0 向 C_1 的放电时间,使在闸流管支路中被延长的放电时间在激光管支路中被再度压缩,而在闸流管支路中被降低的电流脉冲幅值在激光管支路中获得再度提升,从而达到既减轻了闸流管的工作负担又能满足激光管支路对放电电流上升速度快、输入电功率较

高的要求.

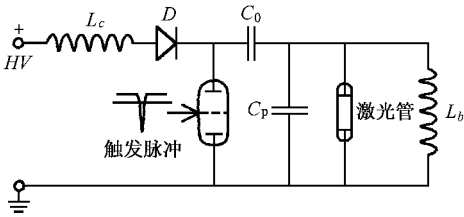


图 3 常规 CuBr 激光器放电回路

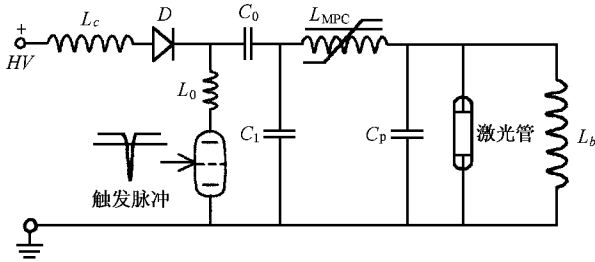


图 4 带磁脉冲压缩器的 CuBr 激光器放电回路

3. 磁脉冲压缩器的设计与应用

3.1. 设计考虑

如图 4 所示,当 C_0 向 C_1 放电时,磁芯开始被磁化.磁芯饱和时,伏秒积满足^[2]

$$\int V dt = \frac{V_0 \tau_1}{2}, \tag{2}$$

式中 V_0 为最大充电电压, τ_1 为磁芯的饱和时间.为了提高能量转换效率,理想的设计应使 C_1 上充电电压达到最大时,磁芯才饱和.即磁芯的饱和时间 τ_1 等于 C_1 的充电时间,故有

$$\tau_1 = \pi \left(\frac{1}{2} L_0 C_0 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (C_1 = C_0). \tag{3}$$

联立(1)–(3)式知,所需的磁芯截面积 S 为

$$S = \frac{\pi V_0 (L_0 C_0)^{\frac{1}{2}}}{2 \sqrt{2} N \Delta B}. \tag{4}$$

在磁脉冲压缩器的设计中,为了使可饱和电感在 C_1 充电时呈现高阻状态,磁芯材料的选用应使可饱和电感在未饱和时的电感量 $L_u \gg L_0$,且饱和时的电感量 L_s 很小(对原电路几乎没有影响).磁脉冲压缩器的饱和电感量可表示为

$$L_s = \mu_0 \mu_s N^2 S / l, \tag{5}$$

式中 μ_0 为真空中的磁导率, l 为磁芯的平均磁路长度. 由(5)式可知, 要使饱和时的电感量很小, 导线绕组的匝数 N 不能太大, 通常可选取 $N = 1$. 当磁脉冲压缩器达到饱和后, 从电容 C_1 向 C_p 充电的特征时间为

$$\tau_2 = \pi \left(\frac{L_s C_0 C_p}{C_0 + C_p} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

则电流脉冲压缩比

$$\delta = \frac{\tau_1}{\tau_2}. \quad (7)$$

由(4)–(7)式可得磁芯体积为

$$V' = \frac{\pi^2 \mu_0 \mu_s \delta^2 C_0 C_p V_0^2}{4(C_0 + C_p) \Delta B^2}. \quad (8)$$

此外, 考察磁芯饱和前后电容 C_1 和 C_p 上的电流幅值与回路参数关系并与(7)式比较可知, 电流脉冲压缩比与电流脉冲幅值增长比互为倒数^[3]

$$\delta = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (9)$$

式中 I_1 为闸流管支路最大脉冲电流, I_2 为激光管支路最大脉冲电流.

3.2. 饱和电感磁通量置零

若可饱和电感磁芯在饱和前后磁通量密度变化为 $\Delta B = 0 - B_s$. 这样, 在电感每次饱和后, 必须将磁芯的磁通量重新设置为零, 才能保证电路中的脉冲动作经常处于稳定状态. 图5为利用电流源通过复位绕组 L_r 产生一负向磁场强度 H_r , 给磁芯复位. 复位电流 I_r 由下式给出:

$$-I_r = \frac{-H_r L_r}{N_r}, \quad (10)$$

式中 H_r 为磁芯的矫顽力, N_r 为复位绕组的匝数.

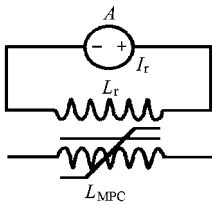


图5 磁芯复位电路

3.3. 参数选取

综合上述设计要求, 我们在 CuBr 激光器脉冲电源中的磁脉冲触发器参数选取如下: 设最大充电电

压 $V_0 = 8 \times 10^3 \text{ V}$, $C_0 = C_1 = 3 \text{ nF}$, $C_p = 1 \text{ nF}$, $L_0 = 2 \mu\text{H}$, $L_b = 100 \mu\text{H}$, 由(3)式计算得到 C_1 的充电时间(即磁芯的饱和时间) $\tau_1 = 172 \text{ ns}$, 设计压缩比 $\delta = 2$, 并选用镍锌铁氧体磁环作磁芯材料^[4], 其初始磁导率 $\mu_i = 1700$, 饱和磁导率 $\mu_s \approx 10$, 饱和磁通量密度 $B_s = 0.3 \text{ T}$, 电阻率 $\rho > 10^{11} \Omega/\text{m}$, 磁开关采用同轴单匝结构($N = 1$). 若取 $\Delta B = 0.3 \text{ T}$, 则由(4)和(8)式知所需的磁芯截面积 $S = 2293 \text{ mm}^2$, 磁芯体积 $V' = 66 \text{ cm}^3$, 由此易得平均磁路长度 $l = 2.88 \text{ cm}$. 故可选用尺寸大小为 12 mm (外径) \times 6 mm (内径) \times 5 mm (高)的若干个小磁环制成磁芯. 设磁环的叠层系数 $k = 0.9$, 由单只磁环的截面积 $S_1 = 15 \text{ mm}^2$ 可知, 组成磁芯所需的磁环总数为 170 个.

3.4. 应用情况

与未采用磁脉冲压缩技术的情况比较, 我们将满足上述设计参数要求的磁脉冲压缩器应用于 4 kV (输入直流高压) 200 mA (平均电流) 20 kHz (脉冲重复频率)的 CuBr 激光器脉冲电源系统中, 已成功实现了对激光输出平均功率的大幅度提升(约 20%, 从原先的 6 W 提升到 7 W 水平). 实验结果表明, 在未加磁脉冲压缩器时闸流管支路的电流上升时间为 60 ns , 最大脉冲电流为 120 A , 电流上升率 di/dt 为 $2 \times 10^9 \text{ A/s}$, 远大于额定值. 采用磁脉冲压缩器后闸流管支路的电流上升时间延长到 140 ns (略小于设计值, 主要因工作温度上升造成最大磁通密度下降所致^[2]), 电流峰值降为 45 A , 其 di/dt 下降为 $3.2 \times 10^8 \text{ A/s}$, 降幅近一个数量级, 而激光管支路的电流上升时间为 83 ns , 最大脉冲电流为 78 A , 实际压缩比约为 1.7. 激光器连续运转 10 多个小时, 闸流管未出现漏闪及连通现象, 且激光器工作稳定, 输出功率起伏一般不超过 10%, 获得光电转换效率最高达到 1%, 测量到的激光输出最大平均功率为 8.0 W .

4. 结 束 语

将磁脉冲压缩技术应用于卤化铜激光器脉冲电源系统中, 极大地减轻了闸流管的工作负担, 加大了阳极脉冲电流宽度, 降低了其阳极脉冲电流幅值, 从而有效地降低了其所承受的电流上升率, 因闸流管工作在安全区域内, 进而其耐压能力和负载能力也得到相应提高, 于是大大延长了闸流管这一激光器核心器件的平均寿命(从原先的 300 h 增大至 800 h),

并使激光器的工作稳定性得到很大提高.

[1] Deguchi H *et al* 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **30** 2934

[2] Yin X H *et al* 1998 *Chin. J. Lasers A* **25** 401[in Chinese][尹宪华等 1998 中国激光 A **25** 401]

[3] Provorov A S and Salmin V V 1993 *Quantum Electron.* **20** 527

[4] Kazuaki S *et al* 1995 *IEEE J. Quantum Electron.* **31** 2183

[5] Sakugawa T and Akiyama H 2002 *Electron. Eng. Japan* **140**(4) 17

[6] Pan B L *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 259[in Chinese][潘佰良等 2002 物理学报 **51** 259]

[7] Pan B L *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 719[in Chinese][潘佰良等 2000 物理学报 **49** 719]

[8] Rippon C 2000 *Nucl. Instrum. Meth. A* **445** 399

[9] Louhibi D , Ghobrini M and Bourai K 1999 *Proc. SPIE* **4016** 348

[10] Mildren R P , Jones D R and Brown D J W 1998 *J. Phys. D :Appl. Phys.* **31** 1812

[11] Deguchi H *et al* 1995 *Proc. SPIE* **2380** 183

[12] Seki H , Takemori S and Sato T 1995 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **1** 825

[13] Teranishi T *et al* 1993 *IEEE Int. Pulsed Power Conf.* **2** 791

[14] Melville W S 1951 *Proc. Inst. Electron. Eng.* **98** 185

Investigation on magnetic pulse compressor used for copper halide laser^{*}

Liu Cai-Ming

(Department of Physics , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China)

(Received 18 October 2002 ; revised manuscript received 26 November 2002)

Abstract

In copper halide lasers , the excitation of copper atoms is produced through the discharge of a storage capacitor. Performances of it were essentially linked to the type of switch used and also to its mode of operation. Thyratrons are the most common switches. Nevertheless , their technological limitations do not allow a high repetition rate and high rate of rise of current. But these limitations can be surpassed by combining the thyatron to magnetic pulse compression(MPC). The MPC driver can improve the laser excitation pulse rise time and increase the repetition rate. A single stage MPC system for CuBr laser has been developed in this paper. With this MPC , the power of laser output was increased more than 20% . The mechanism of MPC performance was analyzed. The design advisements and parameter choices of MPC were presented particularly.

Keywords : magnetic pulse compressor , thyatron , copper halide laser

PACC : 9430M , 8240P , 4255H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 19974037).