

文章编号: 1001-3806(2013)06-0803-05

## 准分子激光电源磁脉冲压缩开关的磁芯复位研究

厉彦超, 游利兵, 王庆胜, 余吟山, 方晓东\*

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 激光技术研究中心, 合肥 230031)

**摘要:** 为了解决高重复率下准分子激光电源磁脉冲压缩开关的磁芯复位问题, 以理论分析为指导, 结合磁开关工作特性, 设计了一种磁芯精确复位电路, 该电路可快速精确复位饱和后的磁开关。将此复位系统应用于准分子激光器脉冲电源测试其性能, 复位电流在磁开关饱和后 200 $\mu$ s 内平息振荡。结果表明, 这一磁芯复位系统可满足 4kHz 重复率下脉冲电源的复位要求。此研究对今后高重复率准分子激光电源的设计是有帮助的。

**关键词:** 激光器; 复位系统; 磁脉冲压缩; 脉冲电源; 准分子激光

**中图分类号:** TN86      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.022

## Core reset in a magnetic pulse compression switch of an excimer laser power supply

LI Yan-chao, YOU Li-bing, WANG Qing-sheng, YU Yin-shan, FANG Xiao-dong

(Institute of Optics and Fine Mechanics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In order to solve the core reset problem of a magnetic pulse compression switch in a high repetition rate excimer laser power supply, the working process of the magnetic switch was analyzed. With the theoretical analysis as a guide, combined with the operating characteristics of the magnetic switch, an accurate reset circuit was designed. The saturated magnetic switch can be reset quickly and precisely by this circuit. After measuring the performance of the reset circuit, the reset current subsided in 200 $\mu$ s after the magnetic switch saturated. The results show that the design can meet the requirement of the power working at 4kHz repetition rate. The research is helpful for the design of high repetition rate excimer laser power supply in the future.

**Key words:** lasers; reset system; magnetic pulse compression; pulse power; excimer laser

### 引言

1951年 MELVILLE 首次提出用磁脉冲压缩技术来产生大功率脉冲<sup>[1]</sup>, 随后 SMILANSKI, OBARA, TANAKA 等人进行了全固态脉冲技术激励准分子激光的研究<sup>[2-5]</sup>。固态脉冲功率电源利用功率半导体开关结合多级磁脉冲压缩开关的方法产生高压快脉冲来替代闸流管。半导体开关和磁脉冲压缩开关在长期高重复频率条件下性能无明显下降, 所以这一技术几乎不用考虑寿命问题, 能满足准分子激光器在高重复频率下长期稳定运行<sup>[6-7]</sup>。

磁脉冲压缩开关利用非线性电感可饱和特性来

实现脉冲压缩的目的。磁开关工作时, 需要外加磁芯复位电路, 将磁芯复位到反向饱和区, 以此增加可利用的磁通密度摆幅<sup>[8]</sup>。磁芯复位系统的性能, 直接影响磁脉冲压缩系统的工作状态。作者针对准分子激光脉冲电源的要求, 对磁芯复位进行相关研究, 设计一套实用复位系统, 并将其应用于 4kHz 全固态脉冲激励源。

### 1 磁脉冲压缩原理

磁开关本质上为一个可饱和电感, 其使用的磁芯一般为磁滞回线高矩形比的软磁材料, 多为铁基或钴基非晶及纳米晶材料<sup>[9]</sup>。图1为高矩形比磁芯材料的磁滞回线图。图中,  $B$  为磁感应强度,  $H$  为磁场强度。磁开关饱和时磁芯工作在正向饱和区 +  $B_s$ , 若不加复位电路, 磁开关下次工作时可利用的磁通密度摆幅  $\Delta B$  非常小, 为  $B_s - B_r$ , 此处下标 s 表

作者简介: 厉彦超 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事准分子激光技术及脉冲功率电源的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xdfang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2013-01-22; 收到修改稿日期: 2013-03-14

饱和, r 表复位。如果在此种条件下, 想要获得所需的脉冲压缩比, 需要的磁芯体积非常大, 不利于实现脉冲宽度的压缩。当外加复位电路使饱和后的磁芯偏置到反向饱和区  $-B_s$ , 以此增大可利用的  $\Delta B$ , 为  $B_s + B_r$ , 即  $2B_s$ , 可减小磁开关磁芯用量, 降低磁开关饱和后的电感值, 加快磁开关饱和后能量的转移速度, 实现脉冲宽度的大比例压缩。因此, 在磁开关工作过程中对磁开关进行复位, 使可利用的工作磁通密度  $\Delta B$  达到最大, 提高磁芯的利用率, 实现脉冲宽度的最大压缩。高重复率下, 磁开关的精确快速复位尤为重要。在一些特殊应用场合, 还要求磁开关的伏秒积精确稳定, 即需要磁开关工作时, 可利用的  $\Delta B$  前后差异很小。作者针对这些问题, 对磁芯精确复位电路进行了理论分析和实验研究。

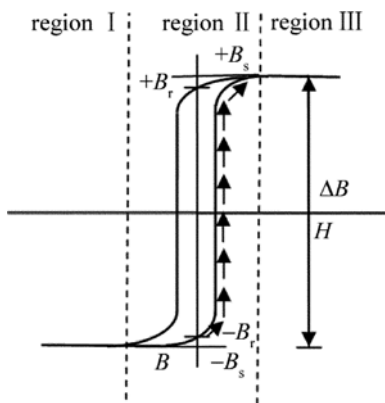


Fig. 1 Hysteresis loop of the typical soft magnetic material core

图2为典型3级磁脉冲压缩网络示意图,  $L_1, L_2, L_3$  为磁开关, 即电感。当开关  $S_1$  闭合时, 前端储能电容经电感  $L_0$  对电容  $C_1$  充电, 此时磁开关  $L_1$  未饱和, 其电感值很大, 只有很小的漏电流流过, 电路等效为断开状态。随着时间的推移, 磁开关磁芯的工作点逐渐推移到正向饱和区, 此时磁开关等效为一个电感值很小的电感, 电路呈现导通状态, 前级电容  $C_1$  储存的电荷通过饱和后的磁开关  $L_1$  向后级电容  $C_2$  转移。设计后级电容小于或等于前级电容值,

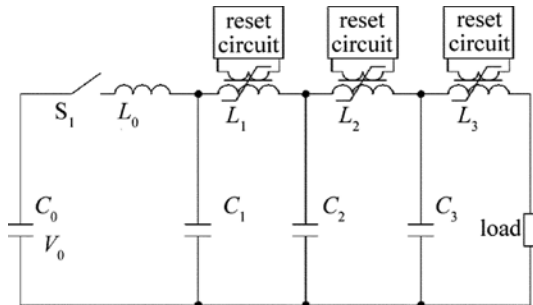


Fig. 2 Simplified circuit schematic of three-stage magnetic pulse compression

磁开关饱和后的电感量远小于饱和前的电感量。由于饱和前后电路电感量变化很大, 电路的振荡周期急剧减小, 能量以更快的速度转移到后级电容, 实现脉冲宽度的压缩。后级压缩过程与前级类似。

图3为典型3级磁脉冲压缩电容电压波形示意图。由图3可以直观地看出, 经过脉冲压缩系统后, 高压脉冲的时域宽度被大大地压缩了, 最后1级电容电压的脉冲宽度满足准分子激光放电要求, 磁脉冲压缩系统可以被应用到准分子激光器激励电源中。图中,  $t$  是时间,  $t_s$  表示饱和时间,  $t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}$  分别表示3级磁开关饱和时间。

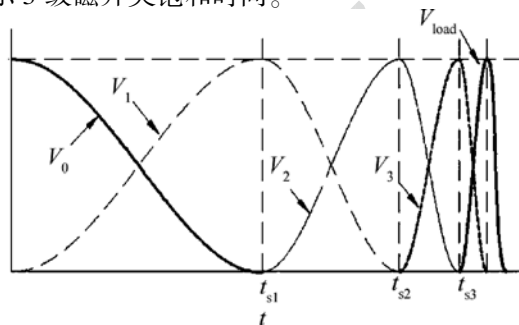


Fig. 3 Typical capacitor voltage waveforms of three-stage magnetic pulse compression circuit

## 2 磁芯复位分析

复位磁芯的方法通常为: 磁开关外加一复位绕组, 与主绕组隔离, 复位绕组通有一恒定大小的直流电流, 此电流即复位电流。图4为常用磁芯复位电路示意图。复位电流取值可由以下公式推导。

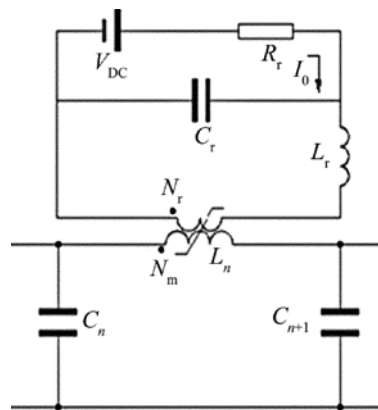


Fig. 4 Simplified circuit schematic of the common reset circuit

由麦克斯韦-安培方程:

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \int J \cdot dA = \mu_0 N_r I \quad (1)$$

$$Bl = \mu_0 N_r I \quad (2)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (3)$$

由(2)式和(3)式联合求得:

$$H_s \approx \frac{N_r I}{l} \quad (4)$$

$$I = \frac{2\pi r_0 H_s}{N_r} \quad (5)$$

式中,  $\mu_0$  为真空中的磁导率,  $J$  为导线电流密度,  $A$  为导线横截面面积,  $I$  为电流大小,  $H$  为磁声场强度;  $H_s$  为磁芯反向饱和区的磁场强度, 单位为  $A/m$ ;  $N_r$  为复位绕组匝数;  $r_0$  为磁芯平均半径, 单位为  $m$ 。  $l$  为磁路长度, 对于环形磁芯, 磁路长度可近似等于  $2\pi r_0$ 。

为了使磁芯进入深度反向饱和区, 复位电流  $I_0$  (单位为  $A$ ) 要大于此值。即:

$$I_0 \geq \frac{2\pi r_0 H_s}{N_r} \quad (6)$$

如图 2 和图 3 所示, 前端储能电容  $C_0$  初始电压为  $V_0$ , 开关  $S_1$  闭合后,  $C_0$  上的能量经  $L_0$  传递到电容  $C_1$  上<sup>[10]</sup>:

$$LC_1 \frac{d^2 V_1(t)}{dt^2} + V_1(t) = V_0(t) \quad (7)$$

$$LC_0 \frac{d^2 V_0(t)}{dt^2} + V_0(t) = V_1(t) \quad (8)$$

当  $C_0 = C_1$  时, (7) 式和(8)式联合求解得:

$$V_1(t) = \frac{V_0}{2} [1 - \cos(\omega t)] \quad (9)$$

式中,  $\omega$  为角频率。

由于主绕组与复位绕组耦合在同一磁芯上, 由匝数变比可知, 复位绕组两端电压为:

$$V_2(t) = \frac{N_r}{N_m} \frac{V_0}{2} [1 - \cos(\omega t)] \quad (10)$$

耦合在复位绕组两端的电压, 会在复位电路中产生感应电流, 此电流的大小可近似为:

$$i_1(t) = \frac{1}{2} \frac{N_r}{N_m} \frac{V_0}{L_r} \int (1 - \cos\omega t) dt \quad (11)$$

式中,  $N_m$  为主绕组的匝数。

复位回路的电流为:

$$i(t) = I_{\text{peak}} \cos\omega t \quad (12)$$

由此可求得  $L_r$  两端的电压, 并对电压求伏秒积分:

$$\langle v_r t_r \rangle = L_r I_{\text{peak}} [\cos(\omega t_r) - 1] \quad (13)$$

$$I_{\text{peak}} = I_0 - \frac{1}{L_r} \langle v_r t_r \rangle \quad (14)$$

式中,  $v_r$  为复位速度,  $t_r$  为磁开关的复位时间; 角频率  $\omega$  由回路中的  $L_n, C_n, L_r$  决定,  $L_n$  相较于  $L_r$  可忽

略不计, 因此可以认为回路的角频率  $\omega = 1/\sqrt{L_r C_n}$ ,  $n = 0, 1, 2, 3$ 。

由此可求得:

$$t_r = \sqrt{L_r C_n} \arccos \left[ \frac{L_r I_0}{L_r I_0 - \langle v_r t_r \rangle} \right] \quad (15)$$

由于复位电路中有很多寄生参量存在, 以上公式仅为磁芯复位时间的近似表达式, 可以看出, 磁芯所需复位时间与  $\sqrt{L_r}$  成正比。

### 3 实验结果及讨论

基于以上理论分析, 设计了一款磁芯复位系统, 搭载于准分子激光电源测试其性能。系统原理图如图 5 所示, 系统同时为两级磁开关提供复位电流。电感  $L_1, L_2$ , 隔离复位绕组从磁开关中耦合出的高压, 保护复位电源; 电容  $C_1$ 、电阻  $R_2$ 、二极管  $D_1$  组成衰减吸收回路, 迅速衰减吸收残余能量, 稳定复位电流。

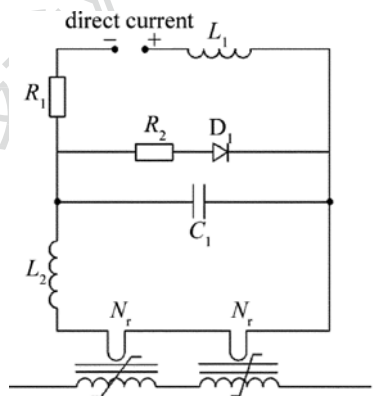


Fig. 5 Simplified circuit schematic of the designed reset circuit

由以上讨论可知复位电流取值要满足:  $I_0 \geq \frac{2\pi r_0 H_s}{N}$ 。图 6 为实验用铁基非晶材料磁滞回线。由测试的磁芯磁滞回线可以看出, 当反向磁场增大到  $-20A/m$  时, 磁芯的  $B-H$  曲线趋于平稳, 磁感应强度变化很小, 可以认为此时的磁芯充分反向偏置。计算时取  $H_s = 20A/m$ , 磁芯的磁路长度近似为  $l = 2\pi r_0$ , 结合磁芯尺寸计算可得平均磁路长度约为

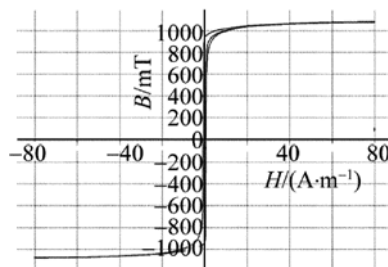


Fig. 6 Hysteresis loop of amorphous material

36.1cm, 复位绕组匝数为 2, 计算得  $I_0 \geq 3.61A$ 。设计时留出一定余量, 取复位电流为 4A。

复位电源为开关电源, 设计初期考虑使用 220V 市电经变压器降压, 整流滤波为复位电路提供电流, 但因电路负载很小, 电流很大, 使用传统的无源滤波技术无法得到波动很小的电流。实验中测得的滤波输出波形见图 7。

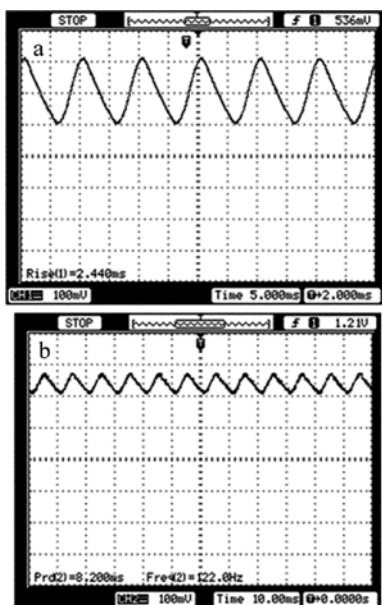


Fig. 7 Filter output waveform diagram

图 7a 为滤波电容为 6800 $\mu F$  时的滤波输出波形, 图 7b 为 20000 $\mu F$  时的滤波输出波形。滤波电容为 6800 $\mu F$  时, 输出电流平均值为 5.7A, 电流波动峰峰值为 2.1A; 滤波电容为 20000 $\mu F$  时, 输出电流为 5.5A, 电流波动峰峰值为 0.7A, 可见即使滤波电容加大到 20000 $\mu F$ , 输出电流的波动依然很大, 不利于磁芯的精确复位。选用一款抗干扰能力强的开关电源作为复位电源, 既能保证输出电流的平稳, 又能确保复位回路在磁开关运行时不被干扰。复位电路工作时开关电源两端的电流波形如图 8 所示。开关电源的输出电流波形相较于图 7 中的电流波形波动

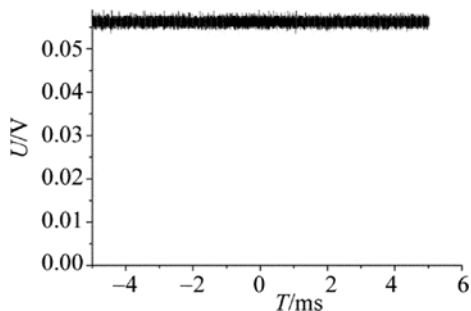


Fig. 8 Current waveform of reset power supply

很小, 避免了电源电流不稳定给磁开关复位带来的影响, 保证了磁芯复位的精确性。

图 9 为常用复位电路的复位电流波形。图中刻度 10mV 对应 1A。如图所示, 电流振荡时间超过 2ms, 振荡峰峰值为 4A, 磁开关 4000Hz 工作时, 每次工作的时间间隔仅为 250 $\mu s$ , 下一脉冲工作时电流波动为  $\pm 1A$ , 这样的电流精度会影响磁芯复位的精度, 进而使磁开关伏秒积发生偏移, 影响输出电压的稳定。

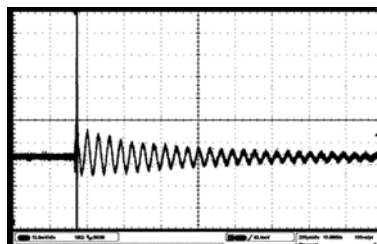


Fig. 9 The reset current waveform of the common reset circuit

图 10 为设计的复位电路的复位电流波形。当设计的复位电路工作时, 输出复位电流在磁开关饱和后能迅速恢复平稳。可见所设计的复位系统能很好地吸收耦合出的能量, 迅速衰减振荡电流, 维持复位电流的平稳, 保证磁芯复位的精度。满足磁开关 4000Hz 工作的要求。

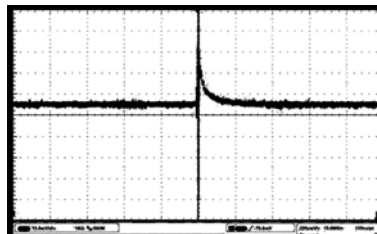


Fig. 10 The reset current waveform of the designed reset circuit

将设计的复位系统应用于高重复率准分子激光器脉冲电源, 实验结果证明, 此复位系统满足电源要求, 电源运行稳定, 激励相应的激光器可实现稳定出光。

#### 4 结 论

对于高重复率的准分子激光电源, 快速精确的磁芯复位对激光器的稳定运行有重要意义, 磁芯的精确复位取决于复位电路的设计, 合适的复位电路可有效地复位磁芯, 保证磁芯复位的速度和精度。作者所设计的磁芯复位回路, 应用于脉冲压缩网络, 进行了相关测试。测试结果显示此复位回路可快速精确复位磁芯, 且抗电磁干扰能力强, 能稳定工作于准分子激光放电的复杂电磁干扰环境中。

## 参 考 文 献

- [1] MELVILLE W S. The use of saturable reactor as discharge devices for pulse generators [J]. Proceedings of IEEE, 1951, 98(53): 185-205.
- [2] SMILANSKI I, BYRON S R, BURKES T R. Electrical excitation of a XeCl laser using magnetic pulse-compression [J]. Applied Physics Letter, 1982, 40(7): 547-548.
- [3] TANAKA H, OBARA M. An all solid-state magnetic pulse compressor with amorphous metals for pumping a repetition-rated KrF excimer laser [J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61(4): 1196-1199.
- [4] SHIMADA T, OBARA M, NOGUCHI A. An all solid-state magnetic switching exciter for pumping excimer lasers [J]. Review of Scientific Instruments, 1985, 56(11): 2018-2020.
- [5] HATANAKA H, OBARA M. High-efficiency operation of the high-repetition-rate all-solid-state magnetic pulse compressor for KrF excimer lasers [J]. Measurement Science & Technology, 1991, 2(1): 42-48.
- [6] WILLIM P, RICK S, IGPR F, *et al.* A low cost of ownership KrF excimer light source using a novel pulse power and chamber configuration [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2440:90-100.
- [7] NESS R, MELCHER P, FERGUSON G, *et al.* A decade of solid state pulsed power development at cymer INC [C]//2004 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. San Diego, USA; IEEE, 2004:228-233. .
- [8] BARRETT D M. Core reset consideration in magnetic pulse compression networks [C]//The Tenth IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque, New Mexico, USA; IEEE, 1995:1160-1165.
- [9] YOU L B. Design and experimental study of all solid state pulse power module for excimer lasers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(11):1750-1751 (in Chinese).
- [10] ZHAO J M, GAO J, LIANG X, *et al.* Study on the pulse charge power for a dual-chamber excimer laser [J]. Laser Technology, 2013, 37(1):97-100 (in Chinese).