

引用格式: XIE Jun, LI Heng, BAI Yanli, et al. Research on Ultrafast Gating Pulse of Framing Camera Using Magnetic Pulse Compression[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(11):1111005

谢军,李姮,白雁力,等. 磁脉冲压缩的分幅相机超快选通脉冲研究[J]. 光子学报, 2023, 52(11):1111005

磁脉冲压缩的分幅相机超快选通脉冲研究

谢军,李姮,白雁力,崔逢祥

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 桂林 541004)

摘要:为拓展脉冲功率技术在超快诊断领域的发展和磁脉冲压缩技术的应用,基于磁性元件良好的开关性能和脉冲宽度压缩原理,采用具有多重压缩特性的级联磁开关,设计磁脉冲压缩电路,并将输出的皮秒选通脉冲应用于分幅相机时间分辨率研究。研究结果显示,磁脉冲压缩电路能产生适用于分幅相机的皮秒选通脉冲,当直流电源为 500 V,磁开关电感量为 1 μ H,初级线圈回路充电电容为 4 μ F,变压器匝数比为 10:1,磁开关线圈匝数比为 1:2,复位电流为 1 A,次级线圈回路和两级磁开关电路充电电容为 1 pF 时,获得幅值为 -3.2 kV 和半高宽为 149 ps 的选通脉冲,将其加载于采用蒙特卡洛法建立的微通道板通道内光电子动态倍增模型,通过计算随选通脉冲的时变增益和构建微通道板上的时间-增益曲线,可实现 87 ps 的分幅相机时间分辨率。研究结论可为应用于分幅相机的皮秒选通脉冲产生以及磁脉冲压缩电路的拓展应用提供新思路。

关键词:超快诊断设备;脉冲功率技术;分幅相机;磁脉冲压缩电路;蒙特卡洛法;皮秒选通脉冲

中图分类号: TN143

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20235211.1111005

0 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)是利用粒子的惯性作用约束粒子本身,实现核聚变反应的一种重要方法^[1-2],而皮秒分幅相机则是有效应用于聚变内爆阶段等离子体时空演化状态测量的超快诊断设备^[3]。微通道板(Microchannel Plate, MCP)分幅相机的时间分辨率为 60~100 ps,并与 MCP 厚度和皮秒选通脉冲参数密切相关^[4],采用 0.2 mm 的 MCP 能够有效减小电子在 MCP 内的渡越时间弥散,并获得 35 ps 的时间分辨率^[5],但薄 MCP 由于信噪比低且制作工艺难度高,难以获得广泛应用。所以,在分幅相机系统中,高性能皮秒选通脉冲设计逐步成为一项非常重要的研究工作。

皮秒高压选通脉冲产生是脉冲功率技术在超快诊断领域的应用,其原理是采用高耐压和大容量储能元件存储低功率能量,然后通过触发信号控制开关器件,使能量在极短时间内释放并输出高功率脉冲^[6-7]。分幅相机系统中的选通脉冲,通常基于雪崩三极管构成的 Marx 纳秒脉冲发生器和高通滤波器脉冲成型电路实现^[8-9],为获得高脉冲幅值,Marx 脉冲发生器往往采用多级雪崩三极管并联的复杂结构设计,然而由于雪崩三极管串需要较高的供电电压,因此工作中常出现高压放电打火的现象,以至于电路损坏。为避免此种现象的频繁产生,采用磁脉冲压缩技术是产生皮秒选通脉冲的另一种研究思路。在磁脉冲压缩技术研究中, NARSETTIR 等于 2006 年利用可饱和磁性材料的磁导率变化特性,产生幅值为 17.5 kV,半高宽为 178 ns 的高压短脉冲,并将其用于水中微生物的灭活^[10];李彪等于 2019 年设计了一种通过击穿水介质产生等离子放电的两级磁压缩脉冲发生器,可输出上升沿为 90 ns 和幅值为 8.5 kV 的高压窄脉冲^[11];李凯等于 2021 年利用脉冲变压器组合低压开关和两级磁压缩电路设计高压脉冲电源,产生上升沿为 760 ns 和幅值为 70 kV 的

基金项目:国家自然科学基金(No. 11865007),广西自然科学基金(No. 2022GXNSFAA035561),广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金(No. YQ22101)

第一作者:谢军,602503146@qq.com

通讯作者:李姮,leeheng@guet.edu.cn;白雁力,bayaly@guet.edu.cn

收稿日期:2023-03-14;录用日期:2023-05-04

<http://www.photon.ac.cn>

高压脉冲,实现了高效节能污染废气脱除^[12]。在上述研究中,磁脉冲压缩电路虽然能输出极高幅值的脉冲,但其半高宽仅为纳秒量级,且仅能应用于化学生物领域。因此,如何采用磁脉冲压缩技术,设计适用于分幅相机的皮秒选通脉冲,对于磁脉冲压缩电路的应用拓展具有重要意义。

为拓展脉冲功率技术在超快诊断领域的发展和磁脉冲压缩电路的应用,采用磁脉冲压缩电路设计皮秒脉冲发生器,通过提高脉冲功率密度和压缩脉冲时间宽度的方式,实现分幅相机所需的皮秒选通脉冲输出。首先,分析磁性元件产生高压脉冲的原理并设计磁开关基础电路;然后,基于级联磁开关电路具有的多重压缩脉宽特性,设计多级磁脉冲压缩电路,分析电路参数对皮秒选通脉冲的影响,研究和匹配电路系统的最优参数;最后,采用蒙特卡洛法建立MCP通道内的光电子动态倍增研究模型,并将选通脉冲应用于MCP分幅相机时间分辨率研究。

1 基于磁性元件的高压脉冲产生原理

在采用磁性元件产生高压脉冲过程中,磁开关和变压器的设计是关键^[13-15]。磁开关是一种特殊的电感器件,当电流较小时,磁开关的电感值较大,可视为开路状态,此时电源对磁开关充电;当电流超过阈值时,由于磁开关内部磁通不再随电流而线性变化,因此其电感量急剧下降,可视为短路状态,此时磁开关能量在极短时间突然释放,通过压缩脉冲宽度的方式,产生高幅值和窄半高宽的窄脉冲;而变压器则由初级线圈、次级线圈和磁芯构成,通过配置其初级和次级线圈匝数比,能够对输出电压实现升压,此外,磁芯能够减少磁感应回路中磁感线损失,增加初级和次级线圈电感量,提高变压器传输效率。

基于磁性元件的高压脉冲产生原理如图1所示,电路由直流电源 V_1 、充电电容 C_1 、磁开关 K_1 、变压器(由初级线圈 L_1 和次级线圈 L_2 构成)、延时断开开关 U_1 、延时闭合开关 U_2 和负载电阻 RL_1 构成。电路工作时,开关 U_2 闭合, V_1 对 C_1 充电,并通过 $K_1-L_1-U_2-U_1$ 回路对磁开关 K_1 充电,此时通过磁开关 K_1 的电流较小,相当于开路;随着对电容 C_1 和 K_1 的持续充电,当 C_1 两端电压达到峰值时,磁开关 K_1 内部电流的过饱和使其导通,并导致电感量急剧下降,此时,磁开关电路储存的能量在纳秒量级的时间内快速释放^[16],使初级线圈 L_1 内部迅速变化的电流产生磁场,通过磁芯耦合至次级线圈 L_2 后,断开 U_1 减少负载的能量供应使其迅速放电,最终产生高幅值的选通脉冲。在该过程当中,影响磁开关电路性能的主要因素是磁开关的电感量,通过减小磁开关的电感量,在缩短磁开关导通时间的同时,提升其开启速度,实现更好的压缩脉宽效果。根据电感器件特性和磁性元件工作原理,电路的输出计算公式为

$$V_{\text{out}} \propto \frac{n_1 S_2 \mu_0 V_1}{l_e n_2 (L_1 + K_1)} \quad (1)$$

式中, V_{out} 是输出电压, n_1 和 n_2 分别是变压器初、次级匝数, S_2 是次级线圈横截面积, μ_0 是磁导率系数, l_e 是有效磁路长度, K_1 是磁开关电感量。此外,在设计中,为避免磁开关开启时初级线圈 L_1 的电流饱和,导致能量无法传递, L_1 的饱和电流应远大于磁开关 K_1 ,同时为保证能量快速传递到负载而形成高压脉冲,充电电容 C_1 应远大于 C_2 。

当直流电源电压 V_1 为1.2 kV,高耐压充电电容 C_1 为4 μF ,磁芯为ER14_3E6,线圈 L_1 和 L_2 的匝数比(n_1 :

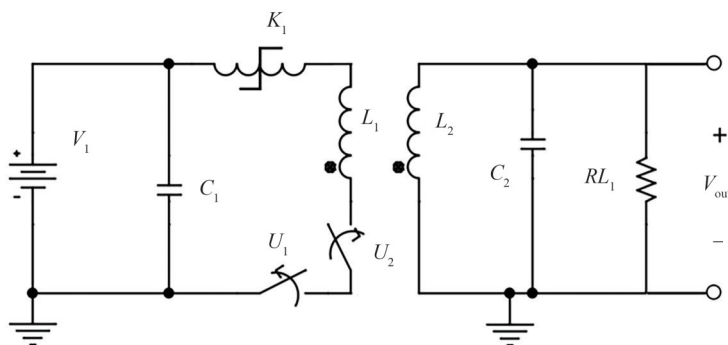


图1 基于磁性元件的脉冲产生电路原理

Fig.1 Schematic of pulse generation circuit using magnetic components

n_2)为10:1,次级充电电容 C_2 为20 pF,负载 R_{L1} 为50 Ω 时,通过Pspice分析电路参数对输出的影响如图2所示,其中图2(a)描述磁开关 K_1 对输出脉冲的影响,随着 K_1 电感量从0.5 μH 提高到5 μH ,输出幅值从-4.55 kV降低至-0.67 kV,半高宽由0.907 ns增大至1.365 ns,这是源于过大电感量使磁开关开启速度变慢导致的;图2(b)描述变压器线圈 L_1 与 L_2 匝数比($n_1:n_2$)对输出脉冲的影响,随着匝数比从10:1变化到10:7,脉冲幅值从-2.58 kV降低至-1.74 kV,半高宽则由0.968 ns增大至2.484 ns;图2(c)描述输出电容 C_2 对脉冲的影响,随着电容从10 pF提高到40 pF,脉冲幅值从-3.03 kV降低至-2.03 kV,半高宽由0.541 ns增大至1.691 ns。分析结果显示,要进一步提升脉冲幅值和半高宽等性能参数,在考虑磁性元件体积的基础上,脉冲电路的设计,一方面可以采用减小磁开关电感量的方式,通过缩短磁开关的导通时间,在提升磁开关开启速度的同时,获得半高宽更窄的输出脉冲;另一方面,可以采用提高变压器匝数比的方式,通过增加变压器输出电压的幅值,获得高幅值输出脉冲性能。此外,还可以采用减小输出电容的方式,通过加快电容的充电过程,实现对输出脉冲性能的优化。

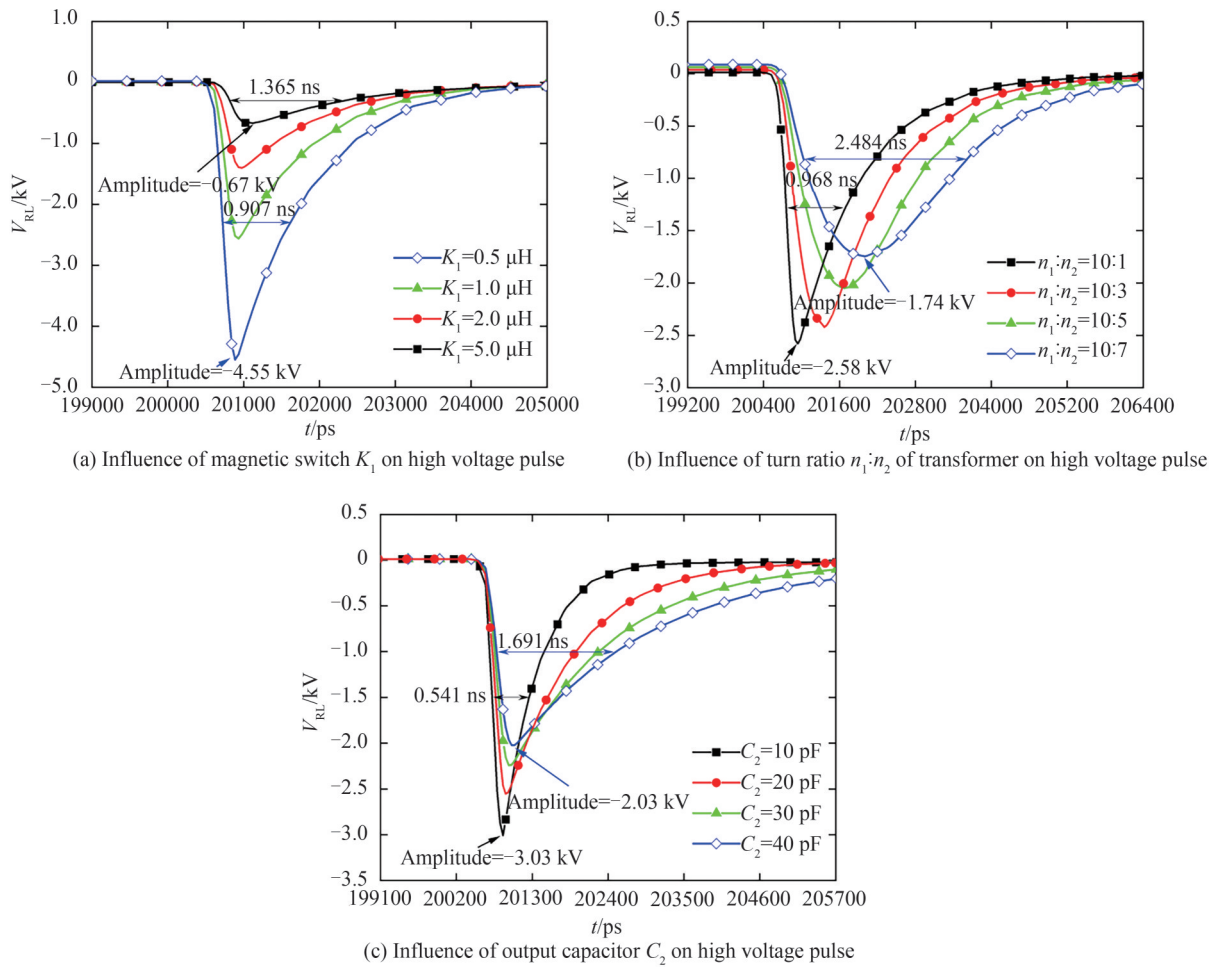


图2 电路参数对高压脉冲的影响
Fig.2 Influence of circuit parameters on high voltage pulse

2 磁脉冲压缩电路的设计与分析

由于单级磁开关电路的脉冲宽度压缩倍率较低,且对磁开关的耐压要求较高,因此只能产生纳秒高压脉冲,所以要获得适用于分幅相机的皮秒选通脉冲,需要通过级联磁开关电路的方式实现。根据磁开关电路的工作原理,级联磁开关电路具有脉宽多重压缩和降低单个磁开关耐压要求的作用,但随着级数的增加,整个电路体积的增大会附带更多的线路电阻,导致电路损耗显著增加,所以为降低对磁开关的耐压要求并提高电路的级联效率,采用两级磁开关电路级联的方式,设计的应用于分幅相机的皮秒高压选通脉冲电路

如图3所示,系统由基础、一级和二级磁开关电路构成,其中基础磁开关电路由直流电源 V_1 、初级线圈回路(包括充电电容 C_1 、磁开关 K_1 、开关 U_1 和 U_2 ,以及初级线圈 L_1)和次级线圈回路(次级线圈 L_2 和充电电容 C_2)构成;一级磁开关电路由线圈 L_3 、线圈 L_5 、复位电流源 I_1 和充电电容 C_3 组成;二级磁开关电路则包括线圈 L_4 、线圈 L_6 、复位电流源 I_2 、充电电容 C_4 和负载电阻 R_{L1} 等部分。当电路接收到触发信号时,首先变压器开关 U_2 闭合,磁开关 K_1 将储存能量传递给次级线圈 L_2 ,并对电容 C_2 快速充电;然后,当 C_2 充电电压达到最大值,磁开关 L_3 因电流达到饱和而开启,此时电容 C_2 将自身储存的能量通过一级磁开关电路的线圈 L_3 快速释放给下一级磁开关电路;最后,采用相同的工作方式,通过二级磁开关电路的负载输出半高宽极窄的高压脉冲。根据文献[17]的电路设计理念,通常将充电电容 $C_2 \sim C_4$ 设置为相同值,以此提高电路传输效率。此外,由于考虑到磁脉冲压缩电路能应用于高频率重复脉冲的产生,因此一级磁开关电路的线圈 L_3 必须在通电后能够迅速复位,所以特为一级磁开关电路设计了由线圈 L_5 和电流源 I_1 构成的复位电路,这样在工作中,电流源 I_1 通过 L_5 将产生经过 L_3 的反向磁场,并与原来磁开关电路产生的磁场抵消,以此实现磁开关电路能够快速复位到初始状态。复位电流的饱和值计算公式为^[18]

$$I \geq \frac{2\pi r_a H_s}{N_r} \quad (2)$$

式中, r_a 为磁芯平均半径, H_s 为负向饱和时的磁场强度, N_r 为复位端的绕组匝数。如果设置的复位电流值超过饱和电流值 I ,其产生的反向磁场效果将会明显减弱,并导致磁开关电路不能快速复位。

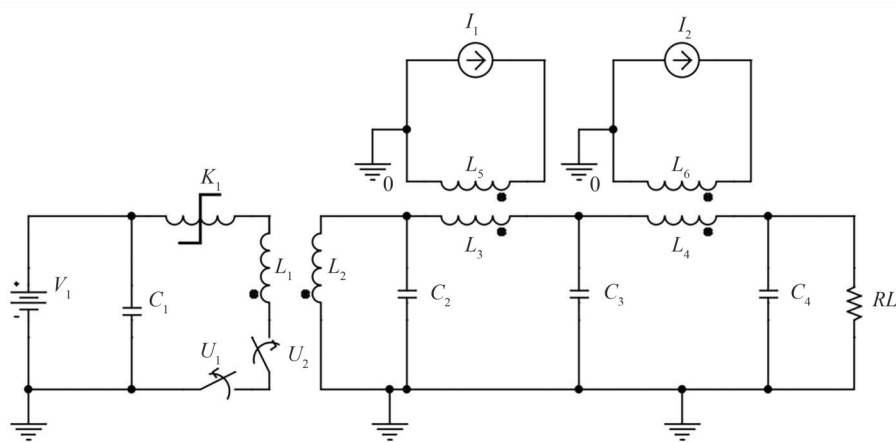


图3 磁脉冲压缩电路
Fig.3 Compression circuit of magnetic pulse

当充电电容 C_1 为 $4 \mu\text{F}$, 初级磁开关 K_1 的电感量为 $1 \mu\text{H}$, 变压器线圈 L_1 与 L_2 的匝数比 ($n_1:n_2$) 为 $10:1$ 时, 直流电源 V_1 , 复位电流源 I_1 和 I_2 , 充电电容 $C_2 \sim C_4$, 一级和二级磁开关电路变压器匝数比对皮秒选通脉冲的影响如图4所示。图4(a)描述直流电源 V_1 对输出的影响, 随着 V_1 从 300 V 提高到 1200 V , 输出电压幅值从 -1.59 kV 提高到 -8.02 kV , 脉冲半高宽由 129 ps 增加至 166 ps , 由于在分幅相机应用中, 选通脉冲幅值达到 -3 kV 即可满足要求, 因此将 V_1 设定为 500 V ; 图4(b)描述 I_1 和 I_2 对输出的影响, 随着 I_1 和 I_2 从 0.2 A 提高到 10 A , 脉冲幅值从 -2.004 kV 提高到 -3 kV , 但由于复位电流超过饱和值后, 产生的反向磁场无法完全抵消磁开关电路的磁场, 因此根据文献[18]和式(2), I_1 和 I_2 取值 1 A 较为合适; 图4(c)描述充电电容对输出脉冲的影响, 根据磁压缩电路工作原理和电路传输效率的要求, 当充电电容 C_2 、 C_3 和 C_4 同时从 1 pF 增加到 15 pF 时, 脉冲幅值从 -3.2 kV 下降至 -2.2 kV , 半高宽从 149 ps 增加至 697 ps , 这是由电容增大导致负载放电速度减缓引起的; 图4(d)描述一级和二级磁开关电路匝数比对输出脉冲的影响, 在匝数比(线圈 L_3 与 L_5 , L_4 与 L_6) 从 $1:2$ 增加至 $4:2$ 的过程中, 脉冲幅值从 -3.12 kV 下降至 -1.064 kV , 半高宽由 147 ps 变宽为 396 ps 。分析结果显示, 在磁脉冲压缩电路, 脉冲输出幅值随着直流电源和复位电流的增大, 以及充电电容和磁开关电路匝数比的减小而逐渐提高; 脉冲半高宽则随直流电源、复位电流、充电电容和磁开关电路匝数比的减小, 而逐渐变窄。

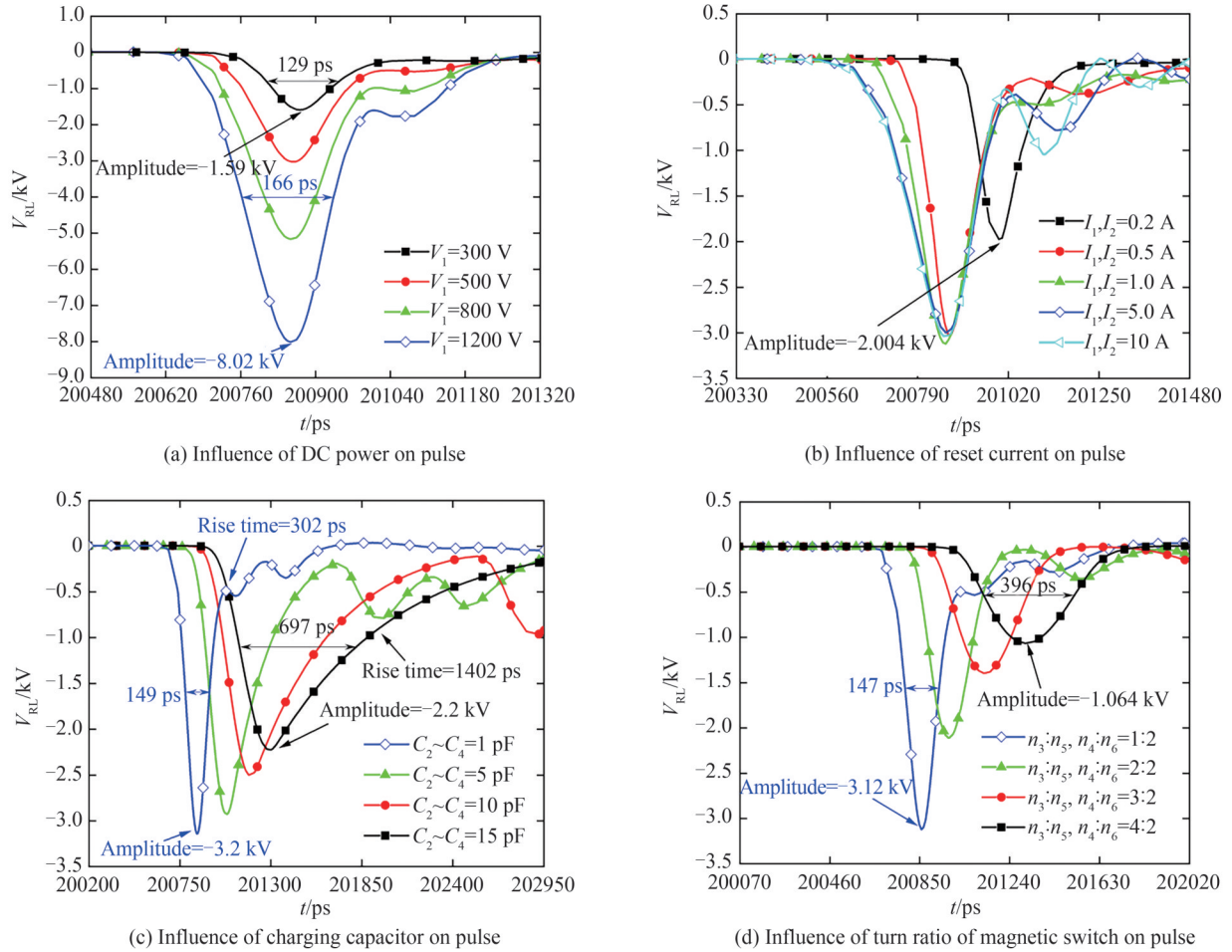


图4 电路参数对皮秒选通脉冲的影响

Fig.4 Influence of circuit parameters on picoseconds gating pulse

3 选通脉冲应用于分幅相机时间分辨率分析

时间分辨率是MCP分幅相机的重要技术指标,通常采用MCP上时间与增益曲线的半高宽进行标定,为将选通脉冲应用于对时间分辨率的分析,首先,采用蒙特卡洛法建立MCP通道内的光电子动态倍增模型;然后,将选通脉冲加载于研究模型,分析光电子在MCP通道内,经过碰撞通道壁后产生的二次电子数目、轴向位移和传输时间等动态参数,并计算出对应光电子通过MCP通道后所产生的增益;最后,通过统计选通脉冲不同时刻的MCP增益,建立MCP上的时间-增益曲线,并计算出MCP分幅相机的时间分辨率。

MCP结构如图5所示,其中 L_M 为通道长度, h 为通道直径, α 为斜切角, L_p 为MCP与荧光屏(phosphor)

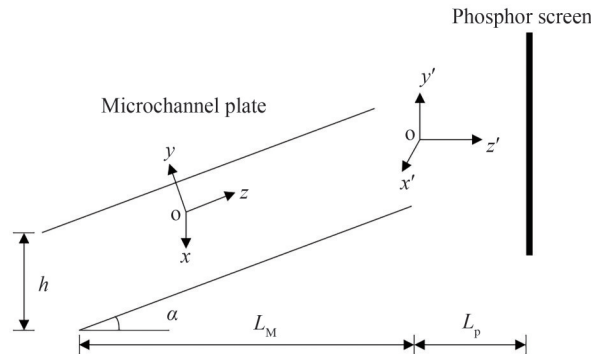


图5 MCP通道模型

Fig.5 Model of the MCP channel

screen)的间距。由于MCP与水平面间斜切角 α 的存在,因此MCP是非轴对称的,为便于计算,在MCP通道的轴向建立 xyz 坐标系,在MCP与荧光屏间垂直方向建立 $x'y'z'$ 坐标系。基于该结构,采用蒙特卡洛法建立MCP通道内光电子动态倍增模型^[19]。

光电子在通道内的碰撞时刻可描述为

$$t_i = t_{i-1} + h/\sqrt{2E_{or(i)}/m} \quad (3)$$

式中, t_i 和 t_{i-1} 分别为第 i 和 $i-1$ 次的碰壁时刻, $E_{or(i)}$ 为第 i 次发射能量的径向分量, m 为电子的质量。

光电子初始的发射能量和发射角分布分别表示为

$$f(E) = \frac{250 \times E}{(E + 3.7)^4} \quad (4)$$

$$f(r) = \begin{cases} \frac{1}{2}, & r \in [-1, +1] \\ 0, & r \in (-\infty, -1) \cup (+1, +\infty) \end{cases} \quad (5)$$

式中, E 为光电子能量, r 为各向同性粒子散射角余弦值。

第 i 次碰撞的轴向位移 Z_i 描述为

$$Z_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \sqrt{\frac{2E_{oz(i-1)}}{m}} dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{e \int_{t_{i-1}}^{t_i} V_{RL} dt}{mL} dt \quad (6)$$

式中, $E_{oz(i-1)}$ 为第 $i-1$ 次发射能量的轴向分量, V_{RL} 为皮秒选通脉冲幅值, e 和 m 分别为电子的电荷量和质量。

第 $i+1$ 次光电子发射能量 $E_{o(i+1)}$ 描述为

$$E_{o(i+1)} = E_i/4\beta^2 \quad (7)$$

式中, β 为能量损耗比例常量,与MCP材料和制作工艺有关; E_i 为光电子第 i 次碰撞的总能量,表示为

$$E_i = \sqrt{E_{or(i-1)}^2 + \left(\frac{1}{2} \times m \times \sqrt{\frac{2E_{oz(i-1)}}{m}} + \frac{2}{500} \times \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{e \int_{t_{i-1}}^{t_i} V_{RL} dt}{mL_M} dt \right)^2} \quad (8)$$

其径向分量 $E_{r(i)}$ 表示为

$$E_{r(i)} = E_{or(i-1)} \quad (9)$$

所有抽样光电子产生的增益 G 描述为

$$G = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^j (E_i/E_c)^k \right] \quad (10)$$

式中, n 为抽样光电子个数, E_c 为二次电子发射系数为1时的碰撞能量, k 为与MCP材料和制作工艺相关的常数^[19]。

基于磁脉冲压缩电路,当直流电源 V_1 为500 V,初级磁开关电路的 K_1 为1 μ H,充电电容 C_1 为4 μ F,变压器线圈匝数比为10:1,一级和二级磁开关电路的线圈匝数比 $n_3:n_5$ 和 $n_4:n_6$ 都为1:2,复位电流源 I_1 和 I_2 为1 A,充电电容 C_2 、 C_3 和 C_4 为1 pF,输出的选通脉冲如图6(a)所示,脉冲幅值为-3.2 kV,半高宽为149 ps,达到目前采用Marx发生器和脉冲成型电路获得的结果。当MCP的参数 $d=12 \mu$ m、 $L=0.5$ mm、 $\theta=6^\circ$ 、 $\beta=2.47$ 、 $E_c=29.4$ eV、 $k=0.75$ 和MCP直流偏置电压为-300 V时,将选通脉冲加载于MCP通道内的光电子动态倍增模型,通过式(3)~(10)计算的MCP上归一化时间-增益曲线如图6(b)所示,其半高宽为87 ps,即MCP分幅相机的时间分辨率。

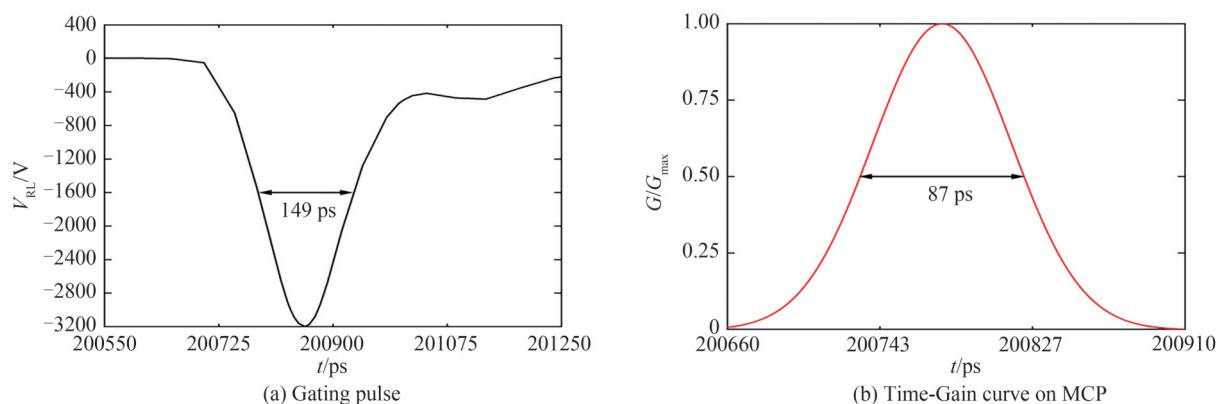


图6 MCP分幅相机时间分辨率分析
Fig.6 Temporal resolution analysis of MCP framing camera

4 结论

基于磁性元件良好的开关性能和压缩脉宽原理,采用磁开关和变压器等元件设计磁脉冲压缩电路,通过分析磁开关电路的电感值和变压器线圈匝数比值等参数对脉冲性能的影响,实现高幅值和窄半高宽的选通脉冲输出,并将其加载于采用蒙特卡洛法构建的MCP通道内光电子动态倍增模型,构建MCP上的时间-增益曲线,实现MCP分幅相机时间分辨率的计算。研究结果显示,采用磁性元件设计的磁脉冲压缩电路能产生适用于分幅相机的皮秒选通脉冲,而直流电源、磁开关电路的变压器特性、输出电容和复位电流是影响皮秒选通脉冲幅值和半高宽等性能指标的重要电路参数。基于皮秒选通脉冲幅值、半高宽和线性度考虑,当直流电源为500 V,初级磁开关电感量为 $1\ \mu\text{H}$,初级线圈回路充电电容为 $4\ \mu\text{F}$,初级变压器匝数比为10:1,一级和二级磁开关电路的线圈匝数比为1:2,复位电流为1 A,次级线圈回路和两级磁开关电路的充电电容为1 pF时,可获得幅值为 $-3.2\ \text{kV}$ 和半高宽为149 ps的选通脉冲,将其加载于光电子动态倍增模型,通过分析不同时刻光电子在MCP通道内,经过碰撞通道壁后产生的二次电子数目、轴向位移、传输时间和增益等动态参数,构建MCP上的时间-增益曲线,计算获得87 ps的MCP分幅相机时间分辨率。研究结论可为应用于分幅相机的皮秒高压选通脉冲产生以及磁脉冲压缩技术的应用拓展提供一种新思路。在后期研究中,将基于理论研究,通过设计和绘制印制电路板展开实验工作,同时也将从变压器磁芯材料和电路拓扑等方面进行电路系统的优化和创新,并就电路系统的传输效率进行探索。

参考文献

- [1] SHAN Lianqiang, WU Fengjuan, YUAN Zongqiang, et al. Research progress of kinetic effects in laser inertial confinement fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(1): 012004.
单连强, 吴凤娟, 袁宗强, 等. 激光惯性约束聚变动理学效应研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(1): 012004.
- [2] KRITCHER A L, YOUNG C V, ROBEY H F, et al. Design of inertial fusion implosions reaching the burning plasma regime[J]. Nature Physics, 2022, 18(3): 251-258.
- [3] BENEDETTI L R, HOLDER J P, PERKINS M, et al. Advances in X-ray framing cameras at the national ignition facility to improve quantitative precision in X-ray imaging[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(2): 023511.
- [4] TIAN Jinshou. An overview of the development of streak and framing camera technology [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 112003.
田进寿. 条纹及分幅相机技术发展概述[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(11): 112003.
- [5] BELL P M, KILLKENNY J D. Measurements with a 35 psec gate time microchannel plate camera [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1990, 456: 1346.
- [6] YAO Chenguo, ZHAO Dongyang, MI Yan, et al. Design and realization of high-voltage picosecond pulse generator[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1698-1703.
姚陈果, 赵东阳, 米彦, 等. 高压皮秒脉冲发生器的设计与实现[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1698-1703.
- [7] ULMASKULOV M R, SHUNAILOV S A, SHARYPOV K A, et al. Picosecond high-voltage pulse measurements[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(3): 034701.
- [8] LIU Jinyuan, NIU Lihong, PENG Wenda, et al. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(5): 055104.

- [9] CUI Fengxiang, BAI Yanli, WU Siqi, et al. Research on the picoseconds gating pulse of framing camera using pulse steepening technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(1): 0125001.
崔逢祥,白雁力,伍思其,等.基于脉冲陡化技术的皮秒分幅相机选通脉冲研究[J].*光子学报*, 2023, 52(1): 0125001.
- [10] NARSETTI R, CURRY R D, MCDONALD K F, et al. Microbial inactivation in water using pulsed electric fields and magnetic pulse compressor technology[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(4): 1386-1393.
- [11] LI Biao, LI Zi, RAO Junfeng, et al. Simulation and research of magnetic compression pulse generator[J]. *University of Shanghai for Science and Technology*, 2019, 41(4): 374-380.
李彪,李孜,饶俊峰,等.磁压缩脉冲发生器的仿真与研究[J].*上海理工大学学报*, 2019, 41(4): 374-380.
- [12] LI Kai, HU Wenbin, LIU Yufang, et al. Research on nanosecond high voltage pulse power supply [J]. *Power Electronics*, 2021, 55(3): 71-73.
李凯,胡文斌,刘宇芳,等.纳秒级高压脉冲电源的研究[J].*电力电子技术*, 2021, 55(3): 71-73.
- [13] ZHANG D D, ZHOU Y, WANG J, et al. A compact, high repetition-rate, nanosecond pulse generator based on magnetic pulse compression system[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(4): 1151-1157.
- [14] DRIESSEN A B J M, BECKERS F J C M, HUISKAMP T, et al. Design and implementation of a compact 20-kHz nanosecond magnetic pulse compression generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(12): 3288-3299.
- [15] RHEE J H, CHO Y M, KIM S H, et al. Design for compression improvement of a magnetic pulse compressor by using a multiwinding magnetic switch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(12): 3252-3257.
- [16] MI Yan, WAN Jialun, BIAN Changhao, et al. Design of DBD high-frequency bipolar nanosecond pulse generator based on magnetic pulse compression system and its discharging characteristics [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(24): 244-256.
米彦,万佳仑,卞昌浩,等.基于磁脉冲压缩的DBD高频双极性纳秒脉冲发生器的设计及其放电特性[J].*电工技术学报*, 2017, 32(24): 244-256.
- [17] AN Ran. Study on discharge excitation technology of TEA CO₂ laser [D]. Beijing: Institute of Electrics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
安然. TEA CO₂激光器放电激励技术研究[D].北京:中国科学院电子学研究所, 2008.
- [18] YANG Yinhui, ZHENG Yijun, TAN Rongqing, et al. Simulation analysis of magnetic pulse compression circuit [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(1): 13-18.
杨银辉,郑义军,谭荣清,等.磁脉冲压缩电路的仿真分析[J].*激光技术*, 2021, 45(1): 13-18.
- [19] KRUSCHWITZ C A, WU M, MOY K. Performance of microchannel plate based detectors for <25 keV X-rays: Monte Carlo simulations and comparisons with experimental results[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(4): 043101.

Research on Ultrafast Gating Pulse of Framing Camera Using Magnetic Pulse Compression

XIE Jun, LI Heng, BAI Yanli, Cui Fengxiang

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The picoseconds framing camera is an ultrafast diagnostic device, which effectively measure the spatio-temporal evolution of plasmas at the implosion stage of fusion in the inertial confinement fusion experiments. The temporal resolution of the Microchannel Plate (MCP) framing camera is 60~100 ps, that closely related to the thickness of the MCP and the parameters of picoseconds gating pulse. Although the temporal resolution is improved using the 0.2 mm MCP, the thin MCP is difficult to widely apply due to the poor signal-to-noise ratio and high fabrication requirements. Therefore, for the MCP framing camera, the higher performance of the picoseconds gating pulse is gradually became an important research work. Currently, the picoseconds gating pulse is generated by the Marx generator and the pulse shaping circuit, however, due to the complex multistage structure and the higher voltage discharge ignition, the maintenance work is tedious, therefore, it is necessary to design picoseconds gating pulse using the a method of the simple topological circuits and the high voltage device.

In order to explore the new technology and expand the development of high-power pulse technology of the ultrafast diagnostics, in the course of studies of the gating pulse of the MCP framing camera, firstly,

the basic characteristics of the magnetic switches and transformers are introduced, the working principle and topology structure of the circuit of magnetic element are sketched, the influence of circuit parameters on output performance is analyzed; Secondly, the multilevel magnetic pulse compression circuit is designed based on the excellent switching performance of the magnetic components and the principle of the pulse compression, which included foundation, first and second level. The influence of circuit parameters on the amplitude and the Full Width at Half Maximum (FWHM) of the gating pulse are analyzed, that included the DC power supply, the reset current, the charging capacitor and the turns ratio of magnetic switch. The optimal output of the gating pulse is discussed; Lastly, according to structure of the MCP, the dynamic multiplication model of photoelectron in the MCP channel is built using the Monte Carlo method, and the optimal output of the gating pulse is loaded on the model, the number of secondary electrons, the axial displacement and the transport time are analyzed, the corresponding gain of the photoelectron through the MCP channel is calculated, and the temporal resolution of the MCP framing camera is achieved by the curve of the time and gain on the MCP.

The picoseconds gating pulse is realized by the multilevel magnetic pulse compression circuit. With increasing the DC power supply and reset current, and decreasing the charging capacitor and the turns ratio of magnetic switch, the amplitude of the gating pulse is gradually improved. With decreasing the DC power supply, reset current, the charging capacitor and the turns ratio of magnetic switch, the FWHM of gating pulse is gradually narrowed. When the DC power supply is 500 V, the reset current is 1 A, the inductance of the magnetic switch is 1 μH , the charging capacitance of the primary coil circuit is 4 μF , the turns ratio of the transformer is 10:1, the turns ratio of the magnetic switch coil is 1:2, and, the charging capacitance of the secondary coil circuit and the two-stage magnetic switch circuit is 1 pF, the amplitude and the FWHM of the gating pulse are ~ 3.2 kV and 149 ps, respectively. As the gating pulse is loaded on the dynamic multiplication model of photoelectron, the temporal resolution is achieved to about 89 ps by calculating the corresponding gain of the photoelectron through the MCP channel and constructing the curve of the time and gain on the MCP.

Based on the excellent switching performance of the magnetic components and the principle of the pulse compression, the multilevel magnetic pulse compression circuit is designed using the magnetic switches and transformers, the gating pulse with the high amplitude and the narrow FWHM is realized by optimizing and matching the circuit parameters. While the gating pulse is loaded on the dynamic multiplication model of photoelectron, the curve of the time and gain on the MCP is constructed and the temporal resolution of the MCP framing camera is calculated. The research results show that, it is feasible to utilize the magnetic pulse compression circuit generated the gating pulse, which is appropriate for the MCP framing camera. And the higher performance is realized by adjusting the direct current power supply, the reset current, the charging capacitor and the turns ratio of magnetic switch. In conclusion, this research can provide a new idea for the picoseconds gating pulse of the MCP framing camera.

Key words: Ultrafast diagnostic device; Pulse power techniques; Framing camera; Magnetic pulse compression circuit; Monte Carlo method; Picoseconds gating pulse

OCIS Codes: 040.1490; 320.7160; 260.7120