

大电流脉冲发生器设计及应用

林楷宣, 罗秋燕, 陈嘉杰, 王佳恒, 黄峻堃, 王 东, 刘进元, 牛丽红, 蔡厚智*

(深圳大学物理与光电工程学院, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东深圳 518060)

摘要: 长磁透镜是展览型分幅相机的重要部件, 使用大电流激励长磁透镜可在漂移区产生强磁场, 从而提高相机空间分辨率. 由于焦耳热效应的影响, 长磁透镜无法长时间工作在大电流环境下. 本研究基于串并联 Marx 结构, 设计了应用于长磁透镜的电流脉冲发生器, 研究了充电电压、储能电容、负载以及电路串、并联级数对输出电流脉冲的影响. 当充电电压增大, 储能电容值增大, 负载减小, 串联级数增加时, 脉冲峰值电流增大; 并联级数增加时, 峰值电流呈先增后减的变化趋势. 当储能电容值增大, 负载增大, 串联级数减少, 并联级数增加时, 脉冲半高宽增大. 建立长磁透镜模型, 模拟了长磁透镜轴上磁场强度分布. 长磁透镜内径越大, 轴上磁感应强度越弱; 激励电流越大, 磁感应强度越强. 采用四级串联、两路并联的 Marx 脉冲电路产生了峰值 457 A, 半高宽 6.76 ms 的电流脉冲. 该电流脉冲激励长磁透镜, 获得了 53.72 μm 的空间分辨率.

关键词: 长磁透镜; 电流脉冲; Marx 发生器; 空间分辨率; 分幅相机

基金项目: 国家自然科学基金(No.11775147); 广东省基础与应用基础研究基金(No.2019A1515011474, No.2019A1515110130); 深圳市科技计划项目(No. JCYJ20210324095007020, No. JCYJ20200109105201936, No. JCYJ20190808115605501)

中图分类号: TN29; TM89

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)05-1469-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220851

Design and Application of Large Current Pulse Generator

LIN Kai-xuan, LUO Qiu-yan, CHEN Jia-jie, WANG Jia-heng, HUANG Jun-kun, WANG Dong,

LIU Jin-yuan, NIU Li-hong, CAI Hou-zhi*

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: The long magnetic lens is an important part of the dilation framing camera. It can generate a strong magnetic field in the drift region when stimulated by large current, thus improving the spatial resolution of the camera. Due to the joule heat effect, the long magnetic lens cannot work in large current environment for a long time. In this study, the current pulse generator applied to the long magnetic lens is designed based on the series and parallel Marx structure. The effects of charging voltage, energy-storage capacitance, load, circuit series and parallel stages on the output current pulse are studied. While the charging voltage and energy-storage capacitance increases, the pulse peak current becomes larger. The same is true when the number of series stages is increased or the load decreases. When the number of parallel stages increases, the peak current increases at first and then decreases. In addition, the pulse width is larger by increasing the energy-storage capacitance, the load, and the number of parallel stages. When the number of series stages increases, the pulse width decreases. A long magnetic lens model is established to simulate the magnetic field intensity distribution on the axis. The larger the inner diameter of the long magnetic lens, the weaker the magnetic induction intensity. The greater the excitation current, the stronger the magnetic induction intensity. A pulse with peak current of 457 A and full width at half maximum of 6.76 ms is generated by Marx pulse circuit with four stages in series and two in parallel. The current pulse excites the long magnetic lens, and the spatial resolution of 53.72 μm is obtained.

Key words: long magnetic lens; current pulse; Marx generator; spatial resolution; framing camera

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China(No.11775147); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(No.2019A1515011474, No.2019A1515110130); Shenzhen Science and Technology Program(No.JCYJ20210324095007020, No.JCYJ20200109105201936, No.JCYJ20190808115605501)

1 引言

微通道板(MicroChannel Plate, MCP)选通分幅相机具有皮秒量级的时间分辨能力和二维空间分辨能力,是惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)中的重要诊断工具^[1-4]. ICF聚变燃烧阶段,需要使用时间分辨率优于30 ps的分幅相机对等离子体进行诊断. MCP选通分幅相机在使用薄MCP的情况下,时间分辨率可达35 ps,但同时带来了增益差、信噪比低等缺点,无法满足测量需求^[5,6]. 2010年, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)将电子束时间展宽技术与MCP选通分幅相机相结合,成功研制了时间分辨率为5 ps的展宽型分幅相机^[7]. 展宽型分幅相机在MCP选通分幅相机的基础上,加入了信号时间放大环节. 时间放大过程:在微带阴极和阳极栅网间施加逐渐减小的时变电场,使先出射的光电子具有更高的速度. 在阳极栅网和MCP变像管之间有一段真空漂移区,电子束团通过该区域的过程可视为匀速运动. 电子间存在速度差,因此,通过漂移区的渡越时间不同. 在通过漂移区后,电子束团的时间宽度为原始时间宽度与最大渡越时间差之和,即电子束的时间宽度被展宽. 最后,展宽后的电子束团被MCP变像管采集成像. 为了提高空间分辨率,需要使用长磁透镜在漂移区产生强磁场,减小电子束的径向扩散^[8]. 长磁透镜无法在大电流环境下长时间工作,否则会产生大量焦耳热. 因此,需要使用电流脉冲对长磁透镜进行激励.

脉冲的产生方式主要有传输线、直线型变压器驱动源(Linear Transformer Driver, LTD)、磁开关压缩、Marx电路等,不同形式的脉冲发生器拓扑结构如图1所示. 传输线型脉冲发生器利用传输线进行储能,通过传输线中的波过程形成方波高压脉冲,输出脉冲的宽度由传输线长度决定^[9]. LTD型脉冲发生器具有模块化的特点. LTD模块产生的脉冲,通过变压器的感应作用同步传输到次级绕组上,并利用次级绕组串联的结构实现叠加输出^[10]. 磁开关压缩型脉冲发生器中,关键点为配合电容充放电时间和磁开关非饱和时间,使磁开关在前一级电容完成充电时饱和和导通,利用各级电容的充放电时间差异实现脉冲压缩^[11]. Marx型脉冲发生器多以电容器作为储能元件,通过控制级间转换开关的状态,实现并联充电回路和串联放电回路之间的切换,从而得到大幅值电压脉冲^[12].

本文设计了电流脉冲发生器,研究了电路参数对输出电流脉冲的影响,并模拟了电流脉冲应用于长磁透镜时获得的相机空间分辨率.

2 脉冲电流模拟结果与分析

2.1 电路结构与原理

采用串并联Marx电路结构进行电流脉冲发生器设

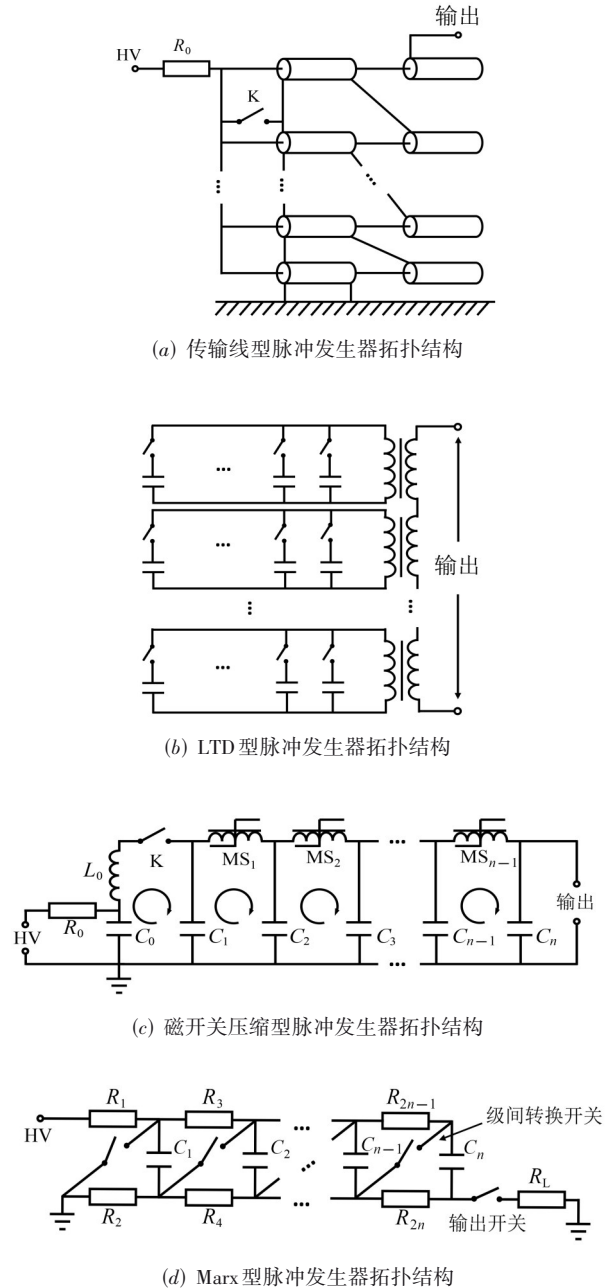


图1 不同形式脉冲发生器的拓扑结构

计,电路结构如图2所示. 电路使用型号为TN5050H-12WY的晶闸管作为开关元件,可通过小功率信号控制电路导通. 利用晶闸管的电流触发特性,将次级晶闸管的门极通过限流电阻接地,使次级晶闸管可在阴极电势变化时自动导通,省去了次级晶闸管的驱动电路设计,压缩了电路体积与成本.

以第一条支路为例,电路导通过程如下:电路充电电压为HV,充电过程中,晶闸管关断,各级储能电容并联充电. 当触发信号到来时,晶闸管 S_{11} 先导通. S_{11} 导通后, S_{11} 阳极和阴极间电势差降为0 V,第一级储能电容

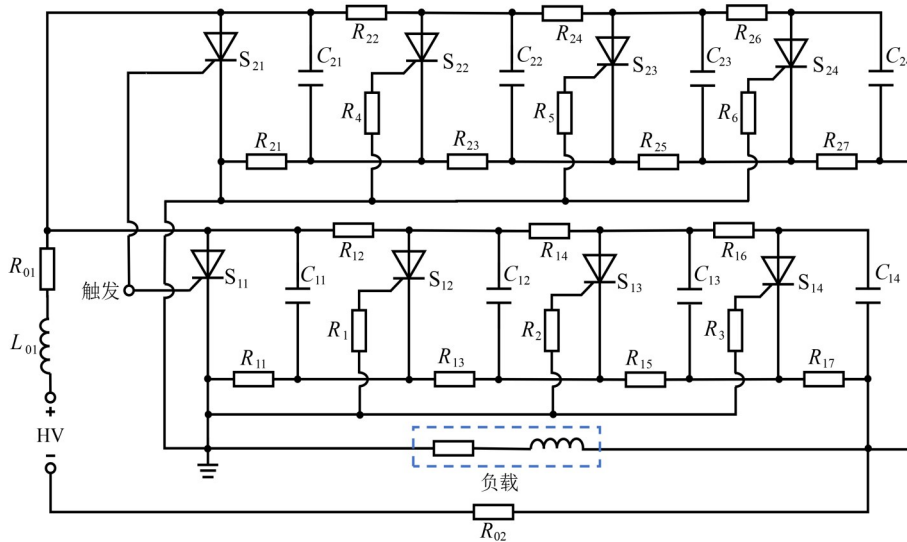


图2 串并联结构的 Marx 电路原理

C_{11} 的上极板电位下降至 0 V, 下极板电位因感应降为 $-HV$, 第二级晶闸管 S_{12} 的门极和阴极间产生电势差, 从而产生导通电流, 使晶闸管 S_{12} 导通。晶闸管 S_{12} 导通后, 同样会导致第二级储能电容 C_{12} 的下极板处于负电位, 从而产生电势差, 形成导通电流, 使晶闸管 S_{13} 导通。同理, 晶闸管 S_{14} 会在 S_{13} 导通后自动导通。 $R_{11} \sim R_{17}$ 为隔离电阻, 在设计时选用较大阻值的电阻, 所在支路可视为断路。晶闸管 $S_{11} \sim S_{14}$ 全部导通后, 晶闸管、储能电容、负载构成放电回路, 储能电容 $C_{11} \sim C_{14}$ 串联放电, 产生幅值为 $-4HV$ 的电压脉冲, 从而在负载上形成电流脉冲。

其余支路的导通过程与第一条支路一致, 触发信号同时作用于各条支路上第一级晶闸管的门极, 各条支路的次级晶闸管依次导通。同一条支路的储能电容串联后, 与其他支路并联, 共同对负载放电。

2.2 充电电压与电流脉冲关系

使用 Proteus 软件, 搭建单路四级串联 Marx 仿真电路如图 3 所示。其中, 充电电压为 500 V, 储能电容为 2 200 μF , 负载为磁透镜等效电阻 6 Ω 和等效电感 31.5 mH, 级间隔离电阻值为 5 k Ω , 次级晶闸管的门极通过 1 k Ω 的限流电阻接地。

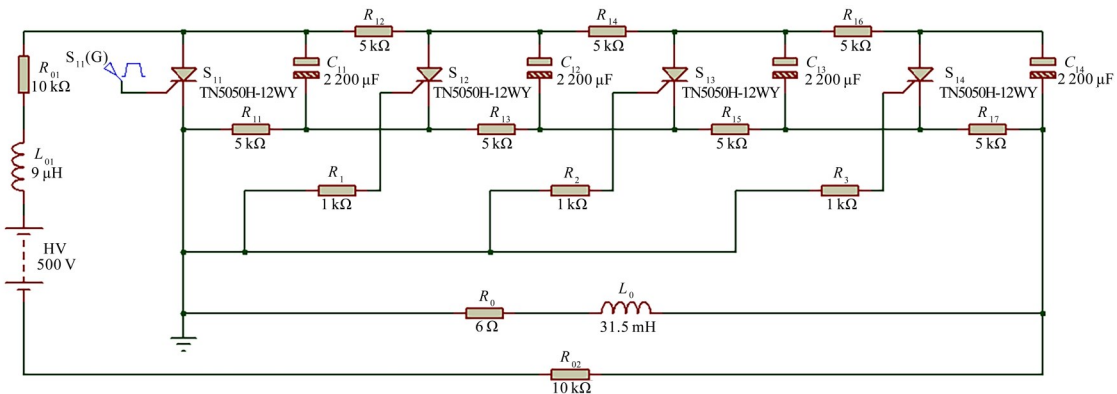


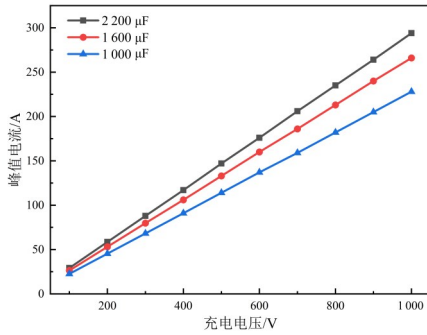
图3 单路四级串联 Marx 仿真电路

改变充电电压, 得到电流脉冲的峰值电流和半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)变化曲线如图 4 所示。当充电电压增大时, 输出的脉冲峰值电流增大, 且储能电容越大, 电流增长曲线斜率越大, 即峰值电流增长速率越快。同一储能电容条件下, 充电电压增大时, 电流脉冲半高宽几乎不变。储能电容越大, 得到的电流脉冲平均半高宽越大。这是因为回路放电时间主要由储能电容值与放电负载决定, 充电电压增大并未

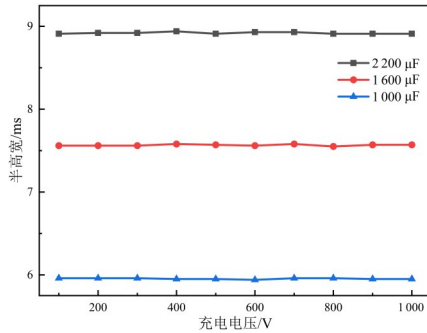
改变放电回路参数, 故改变充电电压不影响脉冲半高宽。而在放电时间确定的情况下, 充电电压增大导致电容存储电荷量增大, 从而导致单位时间释放的电荷量增多, 即脉冲峰值电流增大。

2.3 储能电容与电流脉冲关系

以磁透镜等效电阻 6 Ω 和等效电感 31.5 mH 为负载, 改变储能电容大小, 得到脉冲峰值电流和半高宽的

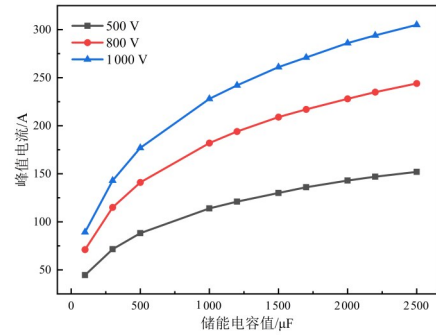


(a) 不同储能电容值下峰值电流与充电电压关系

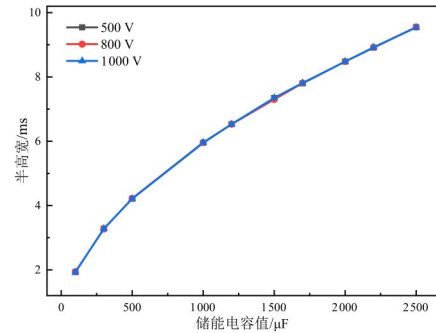


(b) 不同储能电容值下脉冲半高宽与充电电压关系

图4 充电电压对输出电流脉冲的影响



(a) 不同充电电压下峰值电流与储能电容值关系



(b) 不同充电电压下半高宽与储能电容值关系

图5 储能电容值对输出电流脉冲的影响

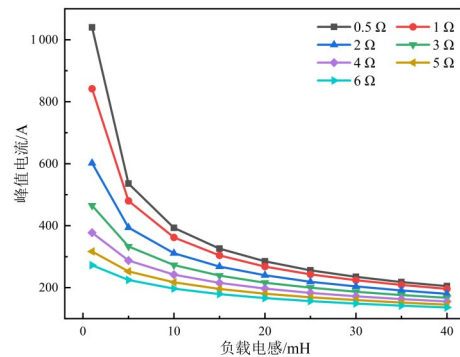
变化曲线,如图5所示.由图5(a)可知,充电电压一定时,储能电容值越大,脉冲峰值电流越大.在100~300 μF区间内,峰值电流的平均增长率为60.73%;在2000~2200 μF区间内,平均增长率为2.89%.由此可知,峰值电流的增长率在逐渐减小,通过提高储能电容值来增大脉冲峰值电流的方式有局限性.观察图5(b)可知,脉冲半高宽随储能电容值的增大而增大,半高宽增长率同样逐渐减小.不同充电电压的半高宽变化曲线基本重合,进一步证明充电电压与脉冲半高宽无关.

2.4 负载与电流脉冲关系

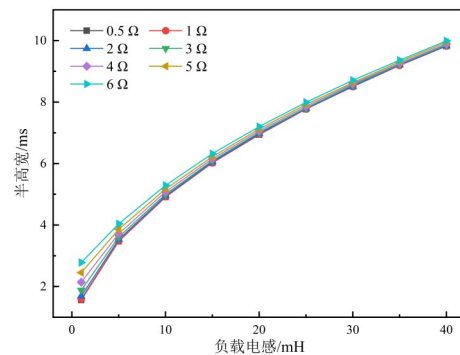
在充电电压500 V,储能电容2200 μF的条件下,分别改变负载电阻与负载电感,得到不同的电感与电阻组合,以此代表不同规格磁透镜的阻抗特性.测量不同规格磁透镜作为负载时的脉冲峰值电流和半高宽,得到变化曲线,如图6所示.由图6(a)可知,负载电阻和负载电感增大时,峰值电流均会减小,且减小幅度逐渐变小.其中,负载电阻对峰值电流的影响程度更大.在图6(b)中,负载电阻和负载电感的增大,均会引起脉冲半高宽的增大,且增长趋势逐渐变缓.其中,负载电感对脉冲半高宽的影响更大.

2.5 串联级数与电流脉冲关系

在单路 Marx 电路中,充电电压为500 V,储能电容为2200 μF,负载为两种规格的磁透镜的等效电阻和等效电感,分别为6 Ω电阻和31.5 mH电感、3.7 Ω电阻和



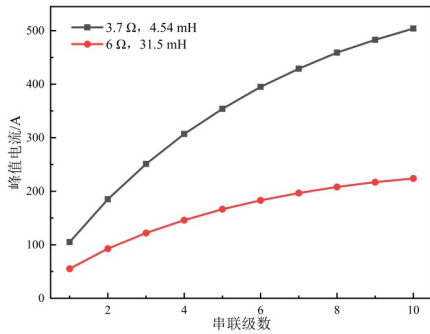
(a) 不同负载组合下峰值电流变化曲线



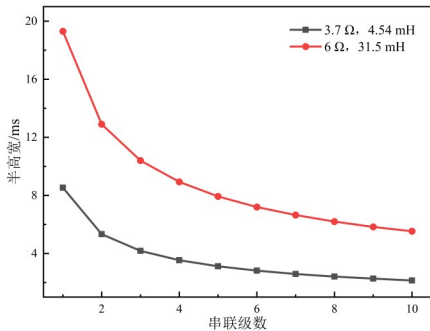
(b) 不同负载组合下脉冲半高宽变化曲线

图6 不同负载组合对输出电流脉冲的影响

4.54 mH 电感. 改变串联级数, 得到脉冲峰值电流和半高宽的变化曲线, 如图 7 所示. 由图 7(a)可知, 串联级数越多, 输出的脉冲峰值电流越大. 负载为 3.7 Ω 电阻和 4.54 mH 电感时, 增加一级串联支路, 得到的输出峰值电流最大增长幅度为 80 A, 随着串联级数增加, 增长幅度逐渐减小至 21 A. 负载为 6 Ω 电阻和 31.5 mH 电感时, 最大增长幅度为 37.6 A, 并逐渐减小至 7 A. 这是因为串联级数增加时, 脉冲发生器内阻增大, 导致输出的电压脉冲峰值无法像理论值一样呈倍数增加, 从而导致输出峰值电流的增量逐渐减小. 当串联级数为 9 时, 增加级数得到的电流增长率小于 5%. 此时, 串联级数的增加对于输出电流峰值影响较小. 此外, 电流最大增长幅度随负载的增大而减小. 由图 7(b)可知, 串联级数增加时, 电流脉冲半高宽减小, 且变化曲线趋于平缓, 这是因为放电回路的等效电容随串联级数的增加而减小.



(a) 不同磁透镜阻抗特性条件下峰值电流与串联级数关系



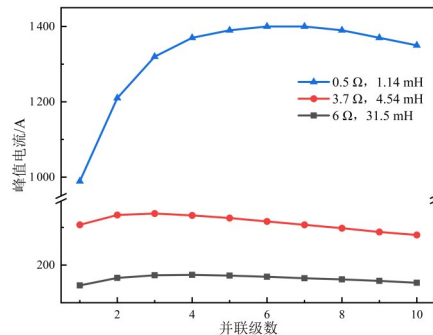
(b) 不同磁透镜阻抗特性条件下半高宽与串联级数关系

图 7 串联级数对输出电流脉冲的影响

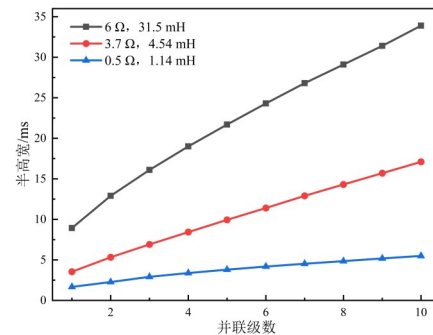
2.6 并联级数与电流脉冲关系

在充电电压 500 V, 储能电容 2 200 μF, 四级串联条件下, 分别以三种规格的磁透镜的等效电阻和电感作为负载, 改变并联级数, 得到脉冲峰值电流和半高宽的变化曲线, 如图 8 所示. 由图 8(a)可知, 并联级数增加时, 不同负载组合的峰值电流曲线均呈现先增后减的变化趋势. 负载越小, 曲线变化波动越大. 这是因

为并联的拓扑结构减小了 Marx 电路的阻抗. 充电完成时, 储能电容两端的电压减小, 使得输出的电压脉冲峰值减小, 从而导致每一路 Marx 电路的输出电流减小^[13], 如图 9 所示. 电路输出电流为每一路 Marx 电路输出电流和并联级数的乘积, 并联级数增加的同时, 单路 Marx 电路输出的电流减小, 导致输出的峰值电流呈先增后减的变化趋势. 由图 8(b)可知, 并联级数越大, 电流脉冲半高宽越大. 这是因为并联级数增加导致放电回路的等效电容增大, 与增大储能电容值对脉冲半高宽的影响效果一致. 并联级数增加时, 负载越大, 脉冲半高宽变化曲线的斜率越大.



(a) 不同磁透镜阻抗特性条件下峰值电流与并联级数关系



(b) 不同磁透镜阻抗特性条件下脉冲半高宽与并联级数关系

图 8 并联级数对输出电流脉冲的影响

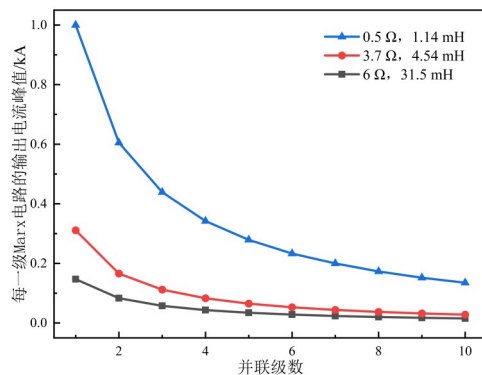


图 9 改变并联级数时,每一级输出电流峰值变化曲线

3 长磁透镜模拟结果与分析

3.1 长磁透镜的结构

长磁透镜可以等效成一个多层螺线管,实验中常用扁铜漆包线进行绕制,其结构如图10所示.螺线管长度为 l ,内半径为 r_1 ,外半径为 r_2 , z 为螺线管内某一点与中心点 o 的轴向距离.

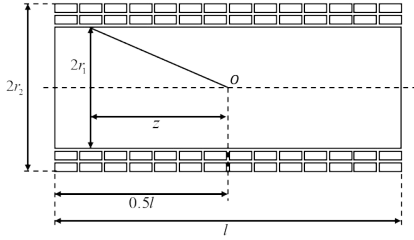


图10 螺线管长磁透镜结构示意图

设用于绕制的扁铜线的截面长度为 a ,截面宽度为 b ,螺线管层数为 N_c ,则螺线管的电感为^[14]

$$L = K\mu_0 N^2 \frac{\pi D_z^2}{4l} \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空磁导率; $D_z = (D_w - D_o) / \ln(D_w / D_o)$ 为螺线管等效直径, $D_w = 2r_2$ 为螺线管外径, $D_o = 2r_1$ 为螺线管内径; $N = N_c l / a$ 为螺线管总匝数; K 为长冈系数,是与 D_z / l 相关的函数.

螺线管的电阻为

$$R = \frac{\rho \pi l N_c (r_1 + r_2)}{a^2 b} \quad (2)$$

其中, $\rho = 1.72 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$,为铜的电阻率.

通电后,螺线管轴线上某一点的磁场强度可表示为^[15]

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} \left(\frac{z + 0.5l}{\sqrt{r_d^2 + (z + 0.5l)^2}} - \frac{z - 0.5l}{\sqrt{r_d^2 + (z - 0.5l)^2}} \right) \cdot N_c \quad (3)$$

其中, $r_d = (r_2 - r_1) / \ln(r_2 / r_1)$ 为螺线管等效半径; $n = l / a$ 为单层线圈密度; I 为激励电流.

3.2 长磁透镜轴上磁场分布

根据式(3),对不同条件下的螺线管轴上磁场分布进行计算.当螺线管长度为0.6 m,扁铜线的截面长度 $a = 4$ mm,即单层线圈匝数为150,且层数为5,激励电流为500 A时,改变螺线管内径,以螺线管左端为坐标原点,得到不同轴上位置的磁感应强度,如图11所示.可知,螺线管的轴上磁感应强度呈对称分布.对于同一轴上位置,螺线管内径越大,磁感应强度越小.不同内径的磁感应强度曲线均在靠近螺线管两端的位置出现磁感应强度下降的情况,并在螺线管两端位置取得最小

值,不同内径下的磁感应强度最小值相近.

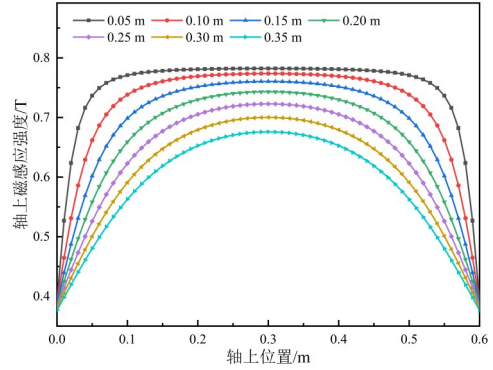


图11 不同内径的螺线管轴上磁感应强度

在螺线管内径为0.1 m,长度为0.6 m,单层匝数为150,层数为5的情况下,改变激励电流,得到不同轴上位置的磁感应强度,如图12所示.可见,对于同一轴上位置,激励电流越大,轴上磁感应强度越大.同样地,在靠近两端的位置出现了磁感应强度减小的现象.在螺线管两端位置,磁感应强度达到最小值,磁感应强度的最小值随激励电流的增大而增大.

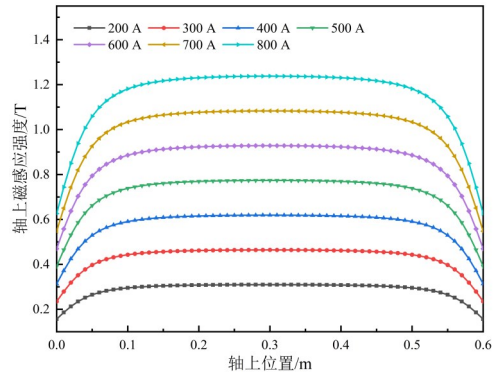


图12 不同激励电流的螺线管轴上磁感应强度

3.3 相机空间分辨率

在展宽型分幅相机中,常将微带阴极和MCP分别置于螺线管长磁透镜的两端,长磁透镜长度与漂移区长度相等,为0.5 m,如图13所示.展宽型分幅相机的空间分辨率为^[16,17]

$$\delta_{\text{instr}} = \sqrt{\delta_{\text{PC}}^2 + (\delta_{\text{MCP}} \times \text{Mag}_B)^2} \quad (4)$$

其中, $\text{Mag}_B = \sqrt{B_{\text{MCP}} / B_{\text{PC}}}$ 为成像倍率,由光电子轨迹两端的磁场决定; δ_{MCP} 为MCP的空间分辨率; δ_{PC} 为微带阴极处的空间分辨率.

在长磁透镜中,光电子的横向偏移被限制在其回旋半径的4倍之内^[18],即

$$\delta_{\text{PC}} = 4r_L = 9.5 \times 10^4 \times \frac{\sqrt{T_e}}{B_{\text{PC}}} \quad (5)$$

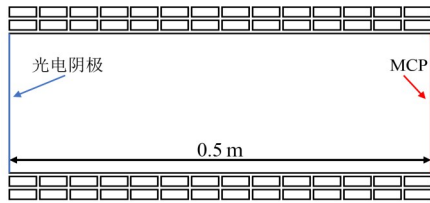


图 13 长度为 0.5 m 的长磁透镜结构

其中, B_{PC} 为微带阴极处的磁感应强度; T_e 为二次光电子的特征能量弥散, 取决于微带阴极材料. 常见的微带阴极材料有 CsI 和 Au, 两者的特征能量弥散分别为 1.7 eV 和 3.5 eV^[19].

由式(4)、式(5)可知, 相机的空间分辨率由微带阴极和 MCP 的空间分辨率共同决定. 一般情况下, MCP 变像管的参数确定时, δ_{MCP} 为恒定值. 微带阴极和 MCP 处于长磁透镜两端, 长磁透镜的轴上磁场呈对称分布, 两端的磁场相等, 从而 $Mag_B = 1$. 而对于确定的微带阴极材料, 其特征能量弥散为固定值. 因此, 相机的空间分辨率主要受微带阴极处的磁感应强度影响. 微带阴极处的磁感应强度越强, 相机的空间分辨率越好.

由图 11、图 12 可知, 螺线管长磁透镜的两端是磁感应强度最弱的位置, 将微带阴极和 MCP 放置在该位置不利于相机空间分辨率的提高. 可将长磁透镜的长度延长至 0.6 m, 并将微带阴极和 MCP 对称放置在距离长磁透镜两端 0.05 m 的位置, 如图 14 所示. 忽略微带阴极和 MCP 的厚度, 仍保留有 0.5 m 长的漂移区. 而将微带阴极和 MCP 对称放置在距离长磁透镜边界 0.05 m 的位置, 可以在相同的激励电流条件下, 在微带阴极和 MCP 处获得更大的磁场, 从而提高相机的空间分辨率. 并且两个位置的磁场相等, 可实现 1:1 成像.

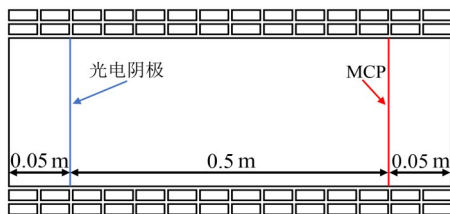


图 14 长度为 0.6 m 的长磁透镜结构

在螺线管长磁透镜长度为 0.6 m, 内径为 0.1 m, 单层匝数为 150, 层数为 5, 绕线截面规格为 4 mm × 1 mm 的情况下, 根据式(1)、式(2)计算可得到长磁透镜的电阻为 1.06 Ω, 电感为 9.37 mH. 实际应用中, 可根据实际相机分辨率需求及电路参数与输出脉冲的关系进行具体电流脉冲电路设计. 此处以图 1 所示的四级串联、两路并联的 Marx 电路为例, 将 1.06 Ω 电阻和 9.37 mH 电感作为负载进行仿真. 在充电电压 500 V,

储能电容 2 200 μF, 电路触发信号延时 5 ms 的情况下, 得到如图 15 所示的电流脉冲. 脉冲峰值电流为 457 A, 半高宽为 6.76 ms. 在微带阴极材料为金, MCP 空间分辨率为 45 μm 的条件下, 使用图 15 中的电流脉冲激励长磁透镜, 由式(3)可得微带阴极处的磁感应强度随时间变化曲线如图 16 所示. 阴极处的磁感应强度在 9.52 ms 处达到峰值, 为 0.606 T. 将得到的磁场波形曲线代入式(4)、式(5), 截取 7~12.5 ms 时间段内的相机空间分辨率, 如图 17 所示. 在磁感应强度的峰值位置, 即 9.52 ms 处, 相机的空间分辨率最好, 为 53.72 μm.

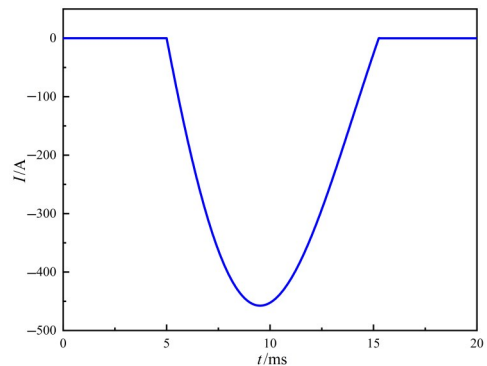


图 15 以长磁透镜作为负载, 四级串联、两路并联 Marx 电路输出的电流脉冲

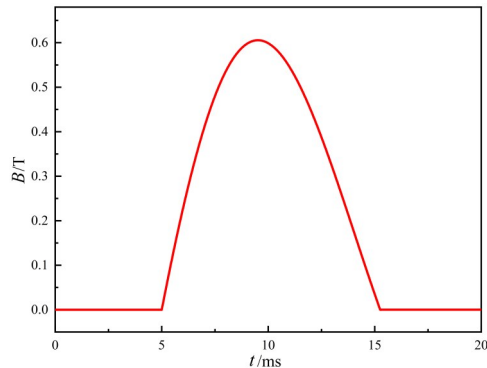


图 16 微带阴极处磁场随时间变化曲线

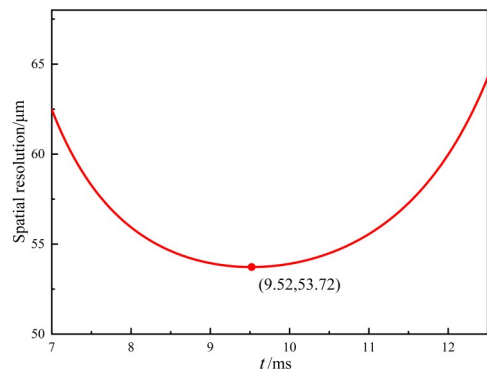


图 17 电流脉冲激励长磁透镜时, 相机空间分辨率变化曲线

相机使用时,可通过改变光路延时或者电流脉冲触发信号传输线长度的方式,使得入射光信号与电流脉冲时间同步.由图 17 可知,将入射信号同步在 9.52 ms 时刻能够获得最佳空间分辨率.由于触发晃动等原因,同步位置会略有不同,同步在 (9.52 ± 1.64) ms 时,空间分辨率为 $53.72 \times (1 \pm 5\%) \mu\text{m}$.不同的同步时间范围可获得不同的空间分辨率相对误差,入射信号同步时间范围与相对误差的关系如表 1 所示.同步时间范围越窄,得到的空间分辨率相对误差越小.实际应用中,可根据误差要求调整入射光信号的同步时间范围,获得相应的空间分辨率均匀性.

表 1 入射信号同步时间范围与相对误差的关系

同步时间范围/ms	相对误差
9.52±0.23	0.1%
9.52±0.35	0.2%
9.52±0.57	0.5%
9.52±0.79	1.0%
9.52±1.10	2.0%
9.52±1.64	5.0%

4 总结

本文研究了串并联 Marx 电路的电路工作原理,使用 Proteus 软件对电路进行模拟.改变电路参数,得到了不同电路参数对输出电流脉冲的影响.由模拟结果可知,充电电压越大,脉冲峰值电流越大,脉冲半高宽不变;储能电容越大,脉冲峰值电流越大,半高宽越大;负载越大,脉冲峰值电流越小,半高宽越大.电路串联级数越多,脉冲峰值电流越大,脉冲半高宽越小;并联级数增大时,脉冲峰值电流呈先增后减的变化趋势,半高宽则随之增大.此外,构建了螺线管长磁透镜的结构模型,计算出长磁透镜的阻抗,以及通电后轴上不同位置的磁感应强度.磁透镜内径越大,磁感应强度越小;激励电流越大,磁感应强度越大.根据长磁透镜内部的磁场分布规律,对长磁透镜结构进行调整.将长磁透镜的长度延长至 0.6 m,并保持漂移区长度为 0.5 m 不变,从而在微带阴极和 MCP 处获得更强的磁场.计算长磁透镜的阻抗,根据得到的阻抗结果,选用四级串联、两路并联的 Marx 电路产生电流脉冲.用得到的电流脉冲激励长磁透镜,最终在轴上位置获得了 $53.72 \mu\text{m}$ 的空间分辨率.

串并联 Marx 脉冲发生电路提高了输出脉冲峰值电流,但输出的电流脉冲受负载影响.在实际应用中,长磁透镜的长度、内径等参数的改变,会改变磁透镜的阻抗,从而影响脉冲发生电路的输出结果.因此,设计电路时需以负载为出发点,先确定长磁透镜的各项参数,

计算出长磁透镜的阻抗.再以得到的阻抗结果为基础,根据实际应用要求,确定电路串、并联级数,以及储能元件、充电电压的具体数值,并在实验中调整参数,从而得到所需的电流脉冲发生电路.

参考文献

- [1] FU W, LONG J, CAI H, et al. Proximity-gated X-ray framing camera with gain uniformity[J]. Journal of Instrumentation, 2021, 16(6): P06007.
- [2] WANG Q Q, CAO Z R, CHEN T, et al. Numerical study and improvement of the dynamic performance of dilation X-ray imager[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(12): 123305.
- [3] LI L L, ZHANG W H, JING L F, et al. Optimization of tungsten-doped high density carbon target in inertial confinement fusion[J]. Nuclear Fusion, 2021, 61(12): 126023.
- [4] LI S J, WANG Q Q, YAO X R, et al. Two-dimensional time- and space-resolved diagnostic method for an integrated implosion process[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 33424-33433.
- [5] BELL P M, KILKENNY J D, HANKS R L, et al. Measurements with a 35-psec gate time microchannel plate camera [C]//Proceedings Volume 1346, Ultrahigh- and High-Speed Photography, Videography, Photonics, and Velocimetry'90. San Diego: SPIE, 1991: 456-464.
- [6] 雷云飞, 刘进元, 蔡厚智, 等. 脉冲展宽分幅变像管色差特性分析[J]. 光子学报, 2021, 50(8): 0850215.
LEI Y F, LIU J Y, CAI H Z, et al. Characteristic analysis of chromatic aberration of pulse-dilation framing tube[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(8): 0850215. (in Chinese)
- [7] HILSABECK T J, HARES J D, KILKENNY J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited)[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10E317.
- [8] WANG Q Q, CAO Z R, CHEN T, et al. Theoretical study on temporal and spatial performance of magnetic solenoid used in dilation X-ray imager[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(7): 073302.
- [9] 闫军凯. 三级传输线高压脉冲发生器的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
YAN J K. Investigation of Transmission Line Based 3-Stage Pulse Generator[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] 董守龙, 王艺麟, 曾伟荣, 等. 一种全固态多匝直线型变压器驱动源的研制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7):

1584-1591.

DONG S L, WANG Y L, ZENG W R, et al. The development of all solid-state multi-turn linear transformer driver [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1584-1591. (in Chinese)

- [11] 朱雨翔, 兰生. 基于磁开关的低频高压脉冲电源的设计与仿真[J]. 电气技术, 2016(1): 42-45.

ZHU Y X, LAN S. Design and simulation of a low frequency high voltage pulse source based on the theory of magnetic pulse compression[J]. Electrical Engineering, 2016(1): 42-45. (in Chinese)

- [12] 赵鑫, 张东方, 刘进元. 一种纳秒前沿的负高压脉冲产生电路[J]. 深圳大学学报(理工版), 2014, 31(1): 30-34.

ZHAO X, ZHANG D F, LIU J Y. A design of negative high voltage nanosecond pulse circuit[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2014, 31(1): 30-34. (in Chinese)

- [13] 饶俊峰, 洪凌锋, 郭龙跃, 等. 多路 Marx 并联高压脉冲电源研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(5): 96-101.

RAO J F, HONG L F, GUO L Y, et al. Investigation of high voltage pulse generators with Marx generators in parallel[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(5): 96-101. (in Chinese)

- [14] 王林章. 螺线管电感的计算与测量[J]. 电测与仪表, 1982, 19(11): 12-16, 4.

WANG L Z. Calculation and measurement of solenoid inductance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1982, 19(11): 12-16, 4. (in Chinese)

- [15] YANG Z Y, SONG J C, CAI W, et al. Analysis of the influence of a solenoid magnetic field in the azimuth transmission system[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 16242.

- [16] ENGELHORN K, HILSABECK T J, KILKENNY J, et al. Sub-nanosecond single line-of-sight (SLOS) X-ray imagers[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10): 10G123.

- [17] NAGEL S R, CARPENTER A C, PARK J, et al. The dilation aided single-line-of-sight X-ray camera for the National Ignition Facility: Characterization and fielding[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10): 10G125.

- [18] NAGEL S R, HILSABECK T J, BELL P M, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11E504.

- [19] HENKE B L, KNAUER J P, PREMARATNE K. The characterization of X-ray photocathodes in the 0.1-10-

keV photon energy region[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(3): 1509-1520.

作者简介



林楷宣 男, 1997年出生, 广东汕头人. 2020年在深圳大学获得测控技术与仪器学士学位. 目前在深圳大学攻读电子信息专业硕士学位. 主要研究方向为脉冲发生器的设计.

E-mail: 2070456085@email.szu.edu.cn



罗秋燕 女, 1998年出生, 广东梅州人. 2020年在广东技术师范大学获得光电信息科学与工程学士学位. 目前在深圳大学攻读电子信息专业硕士学位. 主要研究方向为超快诊断技术.

E-mail: 2070456107@email.szu.edu.cn



蔡厚智 男, 1983年出生, 江西赣州人. 2004年在华中科技大学获得光信息科学与技术学士学位, 2007年在深圳大学获得物理电子学硕士学位, 2010年在深圳大学获得光学工程博士学位. 2016年起进入深圳大学物理与光电工程学院工作. 主要研究方向为超快探测与成像技术.

E-mail: hzcai@szu.edu.cn