

用于软 X 射线光谱探测的双 MCP 近贴单幅相机*

桂建保¹ 赵宝升¹ 张小秋¹ 邹远鑫¹ 刘宏波¹ 程元丽² 赵永蓬²

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要 研制了一种双 MCP 近贴单幅相机, 相机用于软 X 射线光谱探测. 采用开放式无窗结构, 利用第一块通道板进行选通, 有效探测面积 $\Phi 26$ mm. 相机时间分辨率 5 ns, 静态空间分辨率 25 lp/mm, 动态空间分辨率 7 lp/mm, 控制电路固有延时小于 20 ns. 主要介绍了该相机的结构、工作原理、快门脉冲发生器电路、应用情况及其性能特点.

关键词 X 射线; 单幅相机; MCP; 近贴聚焦; 快门选通

中图分类号 TB872 **文献标识码** A

0 引言

MCP (Microchannel plate) 的发展最开始是作为像增强器, 现在人们已经把它用到质谱仪、电子显微镜和摄谱仪中. 近贴相机用 MCP 作像增强设备, 它有很多优良的性能: 尺寸小; 结构简单; 图象空间分辨率高且畸变小; 增益高; 低的电磁干扰和高的快门比^[1-4]. 由于这些性能, 它被广泛用于高速摄影领域. 在高能物理、核物理、光化学、光生物学等方面发挥重要的作用.

单 MCP 像增强器能获得 10^4 的增益, 而人字型排列的双 MCP 的增益能达到 10^7 ^[2]. 70 年代以来, 由于制造上采用了真空转移光电阴极-冷压钢封技术以及研制了耐高场强的荧光屏而使它的分辨率大幅度提高, 可达 50 lp/mm^[3].

对于等离子体发射光谱的研究, 可以探测等离子体的一些重要参数, 如密度、温度、成分等. 具有时间分辨的探测器可以监测出等离子体的动态变化过程. 最方便的方法就是用具有快门选通 MCP 像增强器作为探测器.

提高相机的时间分辨率, 无疑是高速相机发展的一个重要目标. 在美国 Lawrence Livermore National Laboratory 实验室, H. A. Koehler 和 S. Thomas 介绍的皮秒选通双近贴像增强器, 被选通的像增强器为 $\Phi 18$ mm, 选通电压脉冲加在阴极与 MCP 输入面之间. 为了减小两电极间的 RC 时间常数, 采用特殊工艺降低了阴极间电阻. 曝光时间为 100 ~ 200 ps^[5]. 在西安光机所制造的 SJX25-1A 近贴管在半峰值宽度 (FWHM) 为 2 ns 时, 空间分辨率为 4.7 lp/mm^[1]. 近年来, 行波选通幅相机成为研

究热点, 它有更高的时间分辨率, 国际上时间分辨率达 35 ps, 国内时间分辨率达 60 ps^[6,7], 不足之处是它的成像画幅小, 像质不是太均匀.

本相机用于毛细管放电 Z 箍缩等离子体软 X 射线的探测, 整个现象持续时间为 100 ns 左右, 所要探测的光谱大约在 40 ns 时出现, 为了从比激光弱的多但发射时间长 (大于 100 ns) 的等离子体自发辐射中分辨出 0.7 ns 宽的激光脉冲, 要求选通时间小于 5 ns, 相机固有延时小于 20 ns. 相机采用 MCP 选通, 克服了 MCP 大电容给快门电路设计带来的困难, 时间、空间分辨率达到比较满意的指标.

1 主要性能指标

相机采用无窗敞式双 MCP 近贴结构, 黄金阴极直接镀于第一块 MCP 输入面. 因为光谱信号强度很弱, 采用双级 MCP 结构, 通道板有效直径 $\Phi 26$, 总增益 $10^5 \sim 10^6$, 静态分辨率 25 lp/mm, 动态分辨率 7 lp/mm. 荧光粉采用 P20, 输出通过光纤面板耦合到 CCD 相机或近贴相机上. 门控宽度分 5 ns, 10 ns, 20 ns, 30 ns 四档, 上升时间小于 4 ns, 脉冲宽度由电缆长度决定. 门控单幅相机的内部延时小于 20 ns, 门控宽度的漂移及内部延时的漂移均小于 0.5 ns.

2 结构设计及基本工作原理

相机用于对类氦氩毛细管放电泵浦 46.9 nm 单脉冲强激光进行测量, 该波长位于真空紫外波段, 在这个波段范围, 因无合适的窗口材料而只好做成无窗口反射式阴极^[3]. 阴极直接蒸镀在第一块 MCP 的输入面, 相当于反射式阴极. 阴极面位于平焦场谱仪的焦面上, 经光栅谱仪形成的光谱图像聚焦在阴极上. 相机系统包括两部分: 控制电源和近贴像管. 近贴像管工作原理如图 1.

*国家自然科学基金(60038010)、国家 863 计划项目资助
Tel: 029-88498712 Email: gjbstar@163.com
收稿日期: 2003-09-16

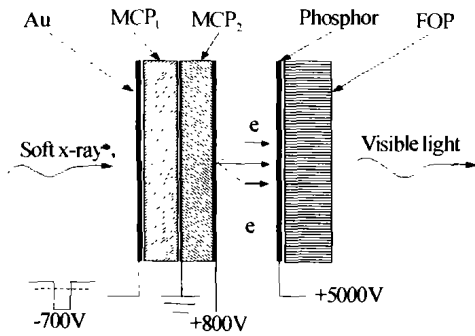


图1 双MCP相管工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram a double-MCP image converter tube

软 X 射线打在金阴极上,当第一块 MCP 加上快门电压时,从阴极发射出光电子,光电子密度分布对应于入射光强分布,光电子经两块 MCP 加速、电子倍增,再打到荧光屏上,电子激发荧光粉,产生可见光图像.图像通过光纤面板耦合,记录到近贴相机或 CCD 相机上.两块 MCP 装架成人字型结构.第一块 MCP 输入加门控负脉冲,输出端接地;第二块 MCP 输入端接地,输出端接 800 ~ 1000 V 正电压.在文献[2]中,两块 MCP 之间留有一个小的间隙,在两相邻面之间加上几十伏的电压,能够加速和准直电子束,这有利于相机空间分辨率的提高,但中间多了一个电极,增加了制作和工艺上的难度,在此,我们直接将两块 MCP 之间用短路接地. MCP 外型尺寸 $\Phi 33$,有效直径 $\Phi 26$,丝径 $\Phi 10 \mu\text{m}$,面电阻 $\leq 100 \Omega$,斜切角 12° .第二块 MCP 与荧光屏之间的间距为 0.5 mm,荧光粉为 P20,发射峰值波长为 560 nm 的绿光,与人眼视觉最匹配.快门脉冲直接加于第一块通道板上,选通电压幅度 $-700 \sim -1000 \text{ V}$,通道板有很大的电容(120 pF 左右),这也是快门电路设计需解决的一个最关键难题.图 2 为带法兰盘的相管实物照片.



图2 带法兰盘的相管实物照片

Fig.2 Picture of a double-MCP image converter tube with flange

3 控制电路

所有静态、动态电源和触发、指示、延时电路都装在一个电源箱内,使用时只需把像管电极引线插入对应的插孔内,触发信号接入,非常方便.

电控系统原理如图 3. 触发信号来自 Marx 发生

器的微分电路或光电触发器,进入电源控制箱,经整形、延时,触发快门发生器.快门宽度由终端开路充电电缆长度决定,雪崩晶体管串作为高速开关,产生快门脉冲幅度 $-500 \sim -900 \text{ V}$.此脉冲加于第一块 MCP 上控制选通时间,直流偏置电压根据实际需要调节,背景不好可加正的截止电压,快门幅度不够可加负的预偏电压叠加,一般在 $-200 \sim +200 \text{ V}$ 之间.

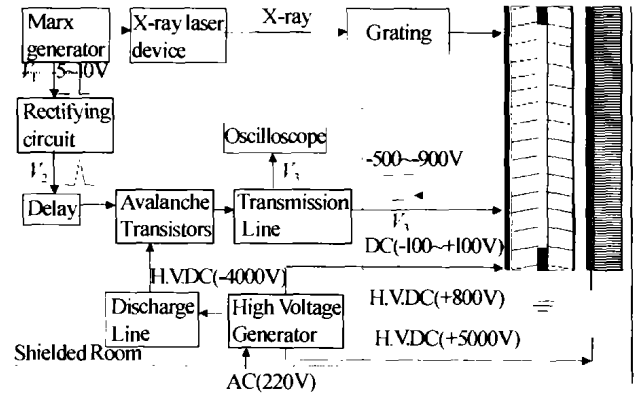


图3 电控系统原理图

Fig.3 Principle diagram of electric controller

方波宽度由成形电缆长度决定, $t = 2L/v$, t 为脉冲宽度, L 为电缆长度, v 是电波沿电缆传播的速度.一般来说,1 m 长电缆单程传输时间约为 5 ns,但由于 MCP 存在大的电容,另外连接电路存在分布电容和电感,脉冲将被展宽,实际使用的电缆长度往往比理论长度短一些.快门脉冲发生器电路如图 4 所示,该电路中,快门脉冲的获得是通过 1 根 75 Ω 的同轴电缆放电得到.快门开关使用的是 10 只高压雪崩管串联,雪崩管采用美国 2N 系列的高压晶体管,我们选用的管子雪崩电压在 350 V 左右,它具有高的雪崩电压和高的稳定性,在大幅值快脉冲产生电路中所需的管子数较少,有利于减少串联电感且减小了挑选管子的工作量.

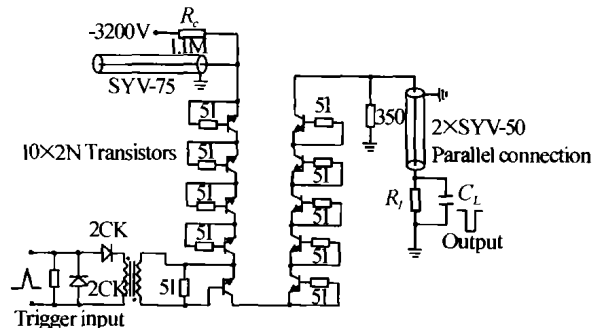


图4 快门脉冲发生器

Fig.4 Gating pulse generator

由于 MCP 有很大的电容,约 120 pF,要在这么大的电容器件上产生 5 ns 的脉冲,要求电路必须有很小的输出阻抗,一般上升时间定义为脉冲峰值的 10% 升至 90% 的时间,设输出阻抗为 z_0 ,MCP 电容为 C ,由 RC 动态电路的性质,有如下近似关系

$t_r(\text{ns}) = 2.2 z_0 C(\text{nF})$, t_r 为上升时间. 鉴于小输出阻抗的要求, 选用两根 50Ω 的电缆并联, 匹配电阻选用 25Ω 的高频低感电阻. 因此, 总的输出阻抗为 $z_0 = 12.5 \Omega$, 设 MCP 电容为 120 pF , 则有: $t_r = 2.2 \times 12.5 \times 0.12 = 3.3 \text{ ns}$. 前沿稍有些慢, 若还需加快前沿, 则需进一步减小输出阻抗, 但这样的话, 脉冲幅度也减少了很多, 必须提高电源电压, 同时增多雪崩管的串联个数, 这给管子的挑选带来麻烦, 且管子越多, 电路的分布电感也越大, 导致快门脉冲波形的展宽和变坏.

要进一步缩短通道板曝光时间, 可有如下几种方案: 1) 减小 MCP 有效直径; 2) 减小 MCP 单位面积的电容和面电阻; 曝光时间可以做到 1 ns 以下, 最终 MCP 的饱和空间电荷效应将影响系统速度极限^[8].

4 主要性能测试

经测试, 电源系统主要性能指标为: 成型电缆长度为 350 mm 时, 得最短门控半峰值宽度 (FWHM) 为 5.2 ns , 负脉冲下降前沿为 3.5 ns , 脉冲幅值 -850 V , 测试采用 TEK7104 数字荧光示波器, 60 dB 大功率同轴衰减器 (带宽 2 GHz), 负载电容 120 pF , 因所用通道板总电容近 120 pF , 故采用等值电容代替 MCP 进行测试. 快门脉冲波形如图 5 所示. 动、

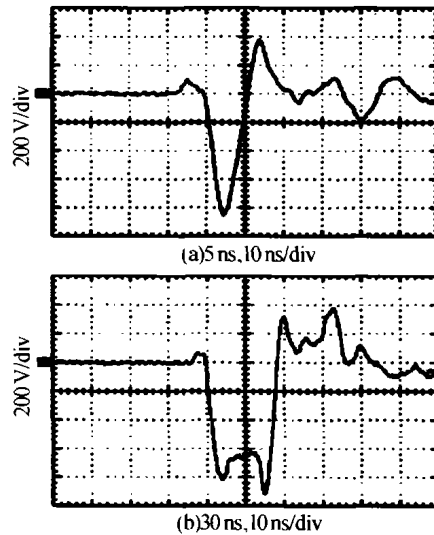


图 5 (a) 5 ns, (b) 30 ns 快门脉冲波形

Fig. 5 (a) 5 ns, (b) 30 ns gating pulse waveforms

静态实验采用普通紫外灯管和紫外鉴别率板放于真空光具座里实验, 测得分辨率约为静态 25 lp/mm , 动态 7 lp/mm .

5 应用情况

相机用于哈尔滨工业大学的毛细管放电软 X 射线激光装置上, 放电实验装置如图 6, 它由四部分组成, 第一部分是储能部分, 是一个快速高压电脉冲 (Marx) 发生器, 输出电压 $240 \sim 300 \text{ kV}$, 为下一级电

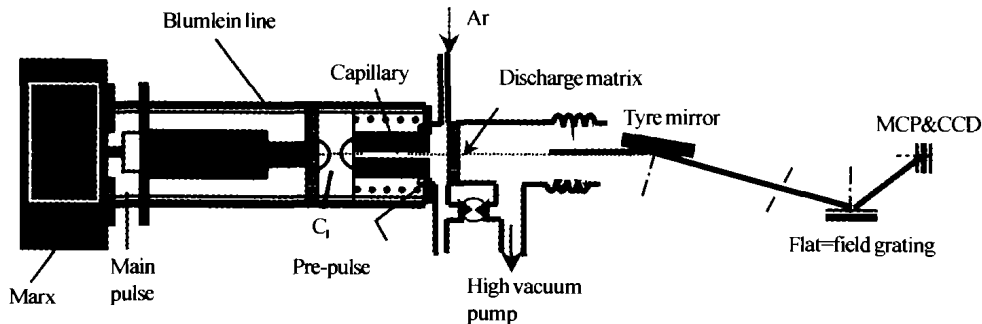


图 6 毛细管放电实验装置

Fig. 6 Capillary discharge setup

路提供几百焦耳的能量. 第二部分是一低电感回路, 采用水电容或 Blumlein 传输线. 第三部分是毛细管及预脉冲电路. 毛细管内充入一定气压的气体或金属蒸气. 先由预脉冲电离成 $+1, +2$ 价均匀等离子体; 在随后的快脉冲大电流 (主脉冲) 作用下, 进行箍缩, 形成高密度、高温、高电离度、均匀的等离子体柱, 在适当的条件下其中的电子碰撞过程形

成相应能级的粒子数反转, 即可产生软 X 射线的激光. 第四部分是真空及检测系统. 激光从毛细管放电软 X 射线激光器输出后, 经曲率半径为 60 cm 的镀铍曲面反射镜 (轮胎镜) 和平面摄谱仪后打在光探测器上^[9].

图 7 为用近贴胶片记录的探测光谱图片, 因为扫描下来的, 图片比实际胶片图象模糊了许多.

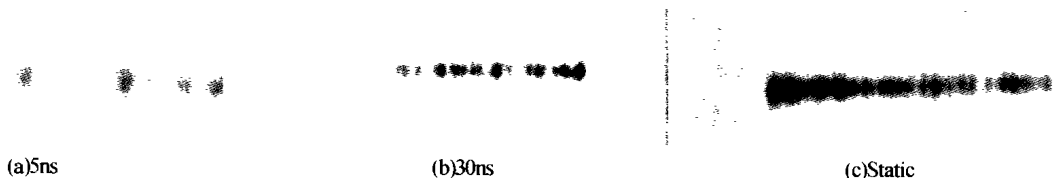


图 7 探测光谱图片

Fig. 7 Pictures of detected spectrum

如果采用 CCD 相机记录,效果会好得多. 实验条件:主电流峰值 30 kA, 上升沿 26 ns. 预脉冲 20 A, 在主脉冲前 12 μm . 毛细管长 10 cm, 内径 3 mm, 充入 70 Pa 的 N_2 气. 钨电极. 谱线范围 25 ~ 50 nm.

6 结论

双 MCP 软 X 射线单幅相机具有高的电子增益 ($10^5 \sim 10^6$). 空间分辨率稍小于单 MCP 像管, 5 ns 门控宽度时约 7 lp/mm. 由于采用 MCP 选通, 电容比阴极选通时大很多 (约 120 pF), 导致时间常数增大, 时间分辨率也就不如阴极选通. 这里最小门控宽度为 5 ns, 因 MCP 的增益随电压增大陡峭上升, 实际时间分辨率由增益曲线半宽度决定, 这个半宽度约为电脉冲宽度的一半^[8], 也就是说, 该相机的实际时间分辨率小于 3 ns, 它能够满足毛细管放电软 X 射线光谱探测的要求. 若要进一步提高时间分辨率, 应设法减小相管的时间常数 RC 或改变相管结构, 采用小直径, 薄 MCP 选通. 另外, 该相机固有延时小 (< 20 ns), 时间漂移小 (500 ps), 是这相机又一个重要特点. 相机已经交付哈尔滨工业大学光电技术短波长激光实验室使用, 获得很好的探测效果, 性能稳定可靠, 操作简单方便.

参考文献

- 1 Li Yuan, Li Tongmin, Hou Xun, *et al.* Nanosecond single frame camera using proximity focused microchannel plate intensifier tube. *SPIE*, 1988, **1032**: 86 ~ 90
- 2 Marconi M C, Rocca J J, Krausse G J. Fast gating of a windowless dual-multichannel-plate-intensified array detector. *J Phys E: Sci Instrum*, 1989, **22**(10): 849 ~ 852
- 3 徐大纶. 变相管高速摄影. 北京: 科学出版社, 1990. 222 ~ 227
Xu D L. Image converter tube high-speed photography. Beijing: Science Publishing Company, 1990. 222 ~ 227
- 4 Lundy A S, *et al.* Ultrafast gating of proximity focused microchannel-plate intensifiers. *Proc of SPIE*, 1982, **348**: 178 ~ 188
- 5 常增虎. 变相管高速摄影的最新进展. 光子学报, 1990, **19**(3): 312 ~ 315
Chang Z H. The current progress of image converter tube high-speed photography. *Acta Photonica Sinica*, 1990, **19**(3): 312 ~ 315
- 6 Shiraga H, Heya M, Fujishima A, *et al.* Laser-imploded core structure observed by using two-dimensional X-ray imaging with 10 ps temporal resolution. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(1): 722 ~ 724
- 7 山冰, 常增虎, 等. 四通道 X 射线 MCP 行波选通分幅相机. 光子学报, 1997, **26**(5): 449 ~ 456
San B, Chang Z H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(5): 449 ~ 456
- 8 Nahrath B, Shakhatre M, Decker G. Nanosecond x-ray pictures recorded with a pulsed channel plate. *Rev Sci Instrum*, 1976, **47**(1): 88 ~ 89
- 9 程元丽, 赵永蓬, 王骥. 毛细管放电软 X 射线激光研究进展. 激光与光电子学进展, 2003, **40**(7): 16 ~ 17
Cheng Y L, Zhao Y P, Wang Q. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(7): 16 ~ 17

A Soft X-ray Double-MCP Proximity Focused Single Frame Camera

Gui Jianbao¹, Zhao Baosheng¹, Zhang Xiaoqiu¹, Zou Yuanxin¹, Liu Hongbo¹, Cheng Yuanli², Zhao Yongpeng²

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an China, Xi'an 710068

² Harbin Institute of Technology, Harbin China, Harbin 150001

Received date: 2003-09-16

Abstract A windowless soft x-ray double-MCP single frame camera is developed. The first MCP ($\Phi 26$ mm) is used to control the pass of electrons. The camera has a temporal resolution of 5 ns, a static spatial resolution of 25 lp/mm, a dynamic spatial resolution of 7 lp/mm. The controller has an intrinsic delay time of less than 20 ns and 500 ps time jitter. The camera's configuration, work principle, time gating pulse generator, applied condition and its performance are introduced mostly in this paper.

Keywords X-ray; Single frame camera; MCP; Proximity focus; Time gating



Gui Jianbao was born in 1978, in Jiangxi Province, and received his B. S. degree from the Dept. of Chemical Machine, Xi'an Jiaotong University in 2001. Now he is pursuing master degree of physical electronics in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interest is high speed photography of image converter tube camera and the design of high speed pulse circuit.