

一种双 MCP 选通型 30~40 ps 软 X 射线分幅相机*

白晓红^{1,2}, 白永林¹, 刘百玉¹, 田进寿¹, 杨文正^{1,2},
赵军平¹, 欧阳娴¹, 秦君军¹, 曹柱荣³

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘 要:研制了一种双微通道板(Microchannel Plate, MCP)双选通型软 X 射线分幅相机. 该相机采用两块厚度为 0.5 mm 的 MCP, 近贴放置成“V”形结构, 用两列高压脉冲依次选通两块级联的 MCP, 通过控制两列脉冲之间的延迟时间, 利用微通道板的电子渡越时间效应和非线性增益的相互作用, 以损失一部分电子为代价获得比单 MCP(60 ps)选通相机更短的曝光时间, 并且可以降低直穿 X 射线造成的背景光噪音.

关键词:选通; 分幅相机; 惯性约束聚变; 级联

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)07-1351-5

0 引言

激光驱动惯性约束聚变中需要研究纳秒级单次激光与亚毫米尺寸等离子体相互作用. 纳秒级 X 射线辐射照亚毫米级 DT 靶丸的作用过程中, 为使 DT 小丸压缩到高密度, 并在中心达到高温, 必须实现靶丸的均匀照明, 这样才能避免流体力学不稳定性增长和壳层物质与 DT 燃料的混合. 所以, 在研究过程中要求提供不同时刻靶等离子体辐射的动态二维空间分布图像. 高时空分辨的 X 光分幅相机正是为了达到这一目标而研制的, 当图像幅数足够多时, 就可以把激光与等离子体, X 光与靶相互作用的过程形象逼真地按时间先后顺序一幅幅地展示出来. 由于等离子体的高速运动(速度约为 10^7 cm/s), 在曝光时间内将造成图像的模糊(100 ps 内等离子体的空间位移为 $10 \mu\text{m}$), 这就需要尽可能地缩短分幅相机的曝光时间.

国外由于具有高速电子元件, 使得选通电压脉冲的宽度可以缩短到 80 ps; 并且研制出厚度为 0.2 mm 的薄 MCP, 80 ps 选通脉冲加载在薄 MCP 上, 获得 30~40 ps 的曝光时间^[1-2]. 国内由于没有必需的超快电子元件和薄 MCP, 选通型分幅相机的最短曝光时间仍然保持在 60 ps 左右^[3-5]. 受纯电子学技术的限制, 不能够单纯依靠减小选通脉冲的脉宽来达到提高时间分辨的目的, 也不能够只靠提高选通脉冲的幅度来提高相机的增益. 本文采用级联双 MCP 双选通的方法放宽了对选通脉冲的脉宽和

幅度的高要求, 同时仍可以提高相机的增益和时间分辨能力. 实验结果表明, 通过调整加载在双 MCP 上的两列选通电压之间的延迟时间, 可以降低相机级联曝光时间.

1 相机结构及原理

1.1 相机结构

双 MCP 双选通分幅相机主要由分幅管和控制电源两部分构成. 其中分幅管主要由两块 MCP、阴极微带和荧光屏组成. 图 1 是分幅管的内部结构示意图.

图 1 中法兰盘固定荧光屏和两块 MCP 并用来传输选通电压脉冲线路板的位置. 其中荧光屏被焊接在法兰盘上, 它和 MCP II 之间的间距为 0.8 mm. 这一近贴距离由绝缘氟橡胶垫圈的厚度来决定. 由于氟橡胶不包含塑料和其它有机污染物, 所以没有放气和污染, 不会影响真空度和 MCP 的增益. 经试验, 当两块 MCP 之间的距离为 $30 \mu\text{m}$ 时, 电子通过两块级联通道的效率最高. 所以为方便装架, MCP I 的输出面和 MCP II 的输入面由 $30 \mu\text{m}$ 厚的 Au 箔相隔, 但通过表面所镀 Au 膜连接并接地. MCP I 的输入面上和 MCP II 的输出面上镀有 Au 微带线, MCP I 输入面上的微带线一方面作为反射式光电阴极, 将输入的 X 射线图像转化为电子图像, 另一方面作为负高压选通脉冲的传输线, 使微带线上的图像被高压脉冲依次选通并增强. 而 MCP II 输出面上的 Au 微带线只起正高压选通脉冲传输线的作用. 线路板 PCB I 和 PCB II 的输入

* 国家 863 高技术研究发展计划(2005AA843130)资助

Tel: 029-83011478 Email: bxh@opt. ac. cn

收稿日期: 2007-03-14

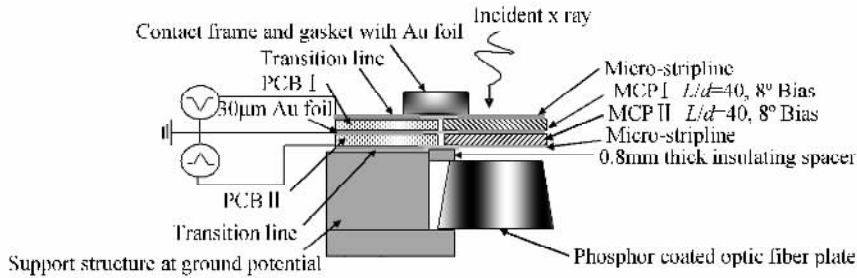


图 1 分幅管结构

Fig. 1 Schematic diagram of the double MCP gated imaging tube

面镀有 Au 微带渐变线, 实现 $50 \sim 17 \Omega$ 的阻抗变换, 以便与 MCP 微带线的阻抗匹配耦合. 两块 MCP 参量一致, 均选用长径比 $L/d = 40$, 厚度 0.5 mm , 斜切角 8° , 孔径 $12 \mu\text{m}$ 的 MCP. 两块 MCP 的微通道呈“V”形结构. 微带线长 40 mm , 宽 6 mm , 上下两块 MCP 上的微带完全一致, 且平行对称对齐. 图 2 是分幅管的内部实物照片.

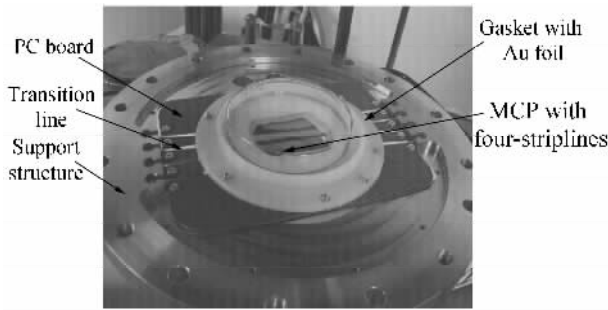


图 2 分幅管内部结构

Fig. 2 Inner structure of framing tube

用于双 MCP 选通的快门脉冲是由一对延时固定、极性相反的高压窄脉冲组成. 首先用特殊设计的雪崩晶体管电路在 50Ω 负载上产生快前沿的类阶跃脉冲, 然后用陡化二极管组成的脉冲成形电路进一步减小脉冲前沿, 同时进行脉冲成形, 最后在 50Ω 负载上产生半宽为 250 ps 、幅度为 2 kV 的正负高压窄脉冲组合, 正负组合快门脉冲的系统触发晃动值优于 10 ps , 多路快门脉冲之间的时间晃动低于 50 ps ^[6]. 波形如图 3.

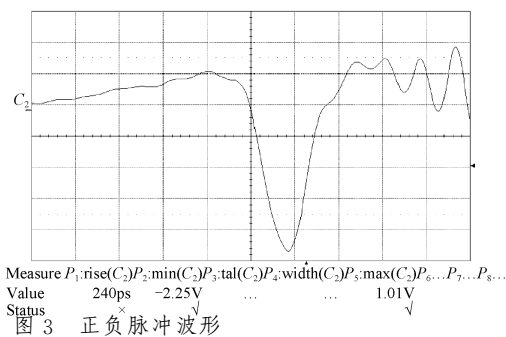
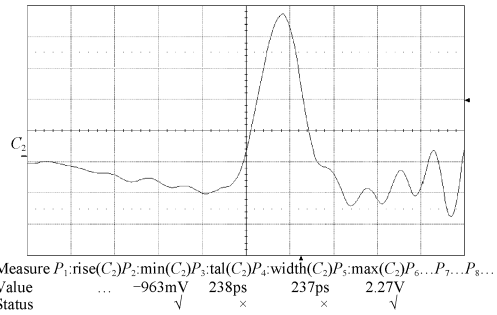


图 3 正负脉冲波形

Fig. 3 Oscilloscope traces of the voltage pulse

1.2 双 MCP 双选通原理

当“V”结构的双 MCP 工作在皮秒脉冲级联选通模式时, 其级联曝光特性将受到电子在微通道板



中的渡越时间及其弥散特性, 以及选通脉冲的峰值、脉宽和脉冲之间延迟时间的综合影响. 由于加脉冲电压, MCP 两端是一个交变电场, 电子在通道内渡越时, 每次碰撞时的加速电场是变化的, 因此不能够像直流增益模型那样认为 MCP 上加电压可类似连续的打拿级作用. 电子在通道内每次碰壁能量, 加速能量, 总碰壁次数, 渡越时间均与选通脉冲的形状有关, 而且两个脉冲之间的延迟时间决定了第二块 MCP 级联选通的时刻, 又与电子在第一块 MCP 中的渡越时间及其弥散特性紧密相关.

常增虎等人对双 MCP 双选通技术进行模拟^[7-8], 从理论上验证了该技术可以缩短分幅相机曝光时间, 如图 4. 两块 MCP 均工作在选通状态时, 级联增益和曝光时间随两个选通脉冲的延迟时间的变化曲线分别如图 5 和图 6. 随着两个选通脉冲之间延迟时间的增加, 级联曝光时间呈现缩短趋势. 可以做如下的解释: 当两块 MCP 加相同脉宽的电脉冲时, 如果选通脉冲之间的延迟时间稍大于或等于电子在单块 MCP 内的渡越时间, 当电子开始从 MCP I 渡越出来时, MCP II 开始选通. 从 MCP I 渡越出来

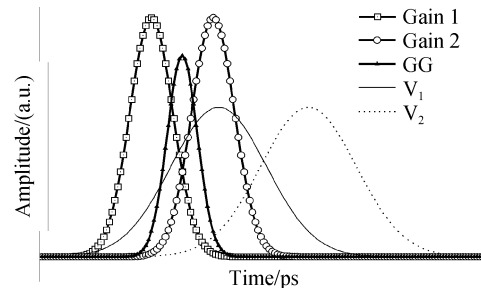


图 4 双 MCP 双选通相机的原理模型

Fig. 4 Principle model of the Gated Two MCPs

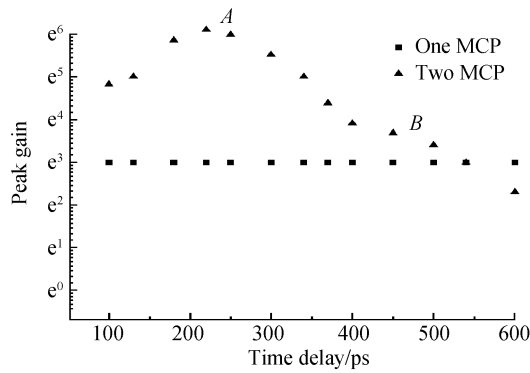


图 5 总增益和延迟时间之间的关系
Fig. 5 Total gain vs. the time delay between two gating pulses

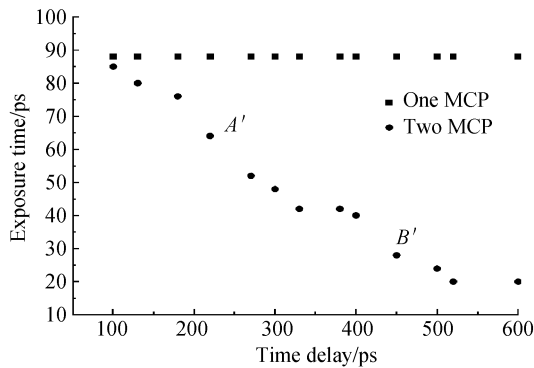


图 6 曝光时间和延迟时间之间的关系
Fig. 6 Exposure time vs. the time delay between two gating pulses

的电子几乎全部被 MCP II 接收并倍增,且从 MCP I 上渡越出来的电子增益峰值与 MCP II 上选通脉冲的峰值同步,则级联增益大于单块 MCP 选通时的增益,并达到最大值,如图 5 中的 A 点. 级联曝光时间小于单个 MCP 选通的曝光时间,如图 6 中的 A' 点. 这是因为电子倍增的非线性效应^[7-8]造成总的级联增益曲线相对“瘦高”,而单 MCP 选通的增益曲线相对“矮胖”,导致级联增益曲线的峰值半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)(即级联曝光时间)小于单个 MCP 选通增益曲线的 FWHM(即单 MCP 的曝光时间). 相反,如果选通脉冲之间的延迟时间小于或大于电子在单块 MCP 内的渡越时间,都会造成级联增益的下降,因为 MCP II 上选通脉冲的峰值也会提前或落后于 MCP I 上渡越出来的电子强度的峰值. 这种“失谐”效应最终导致级联增益的下降,但不会低于单块 MCP 选通时的增益,因为两块 MCP 对电子都具有倍增作用. 双 MCP 双选通分幅技术正是利用这种“失谐”效应,利用 MCP II 通过对从 MCP I 中渡越出来的电子进行选择倍增来达到缩短级联曝光时间. 当 MCP II 上加载选通脉冲的时间滞后于 MCP I 中快电子渡越出来的时间时,那些从 MCP I 上渡越出来的快电子由于没有被 MCP II 上选通脉冲的倍增而从接地

线流失. 加在 MCP II 上的选通脉冲越滞后,流失的快电子也越多,级联曝光时间也就越短. 如果 MCP I 微通道内的所有电子全部渡越出来而 MCP II 上的选通脉冲还没有到达时,则所有的电子都会被流失,将得不到任何图像,级联曝光时间也降低到零. 换言之,双 MCP 选通技术是通过损失部分快电子来缩短级联曝光时间,因此要在缩短曝光时间和保存有用的电子信号中找到比较合理的平衡点,如理论模拟的图 5 中 B 点和图 6 中的 B' 点.

2 实验结果

在真空度为 1×10^{-3} Pa 的靶室上安装分幅管,利用西北核技术研究所的氟化氮紫外激光器作标定光源,其输出波长为 248 nm,重复频率 1 Hz,单脉冲能量 2~4 mJ,脉宽 500 fs. 测试系统原理如图 7,测试实验现场见图 8. 激光通过一个半透半反的镜片被分成两束,一束经延迟并扩束后,均匀照射在分幅管阴极微带上,另一束触发电控箱产生高压

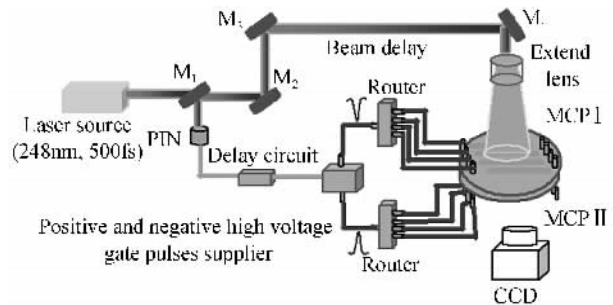


图 7 测试系统装置
Fig. 7 Testing system setup

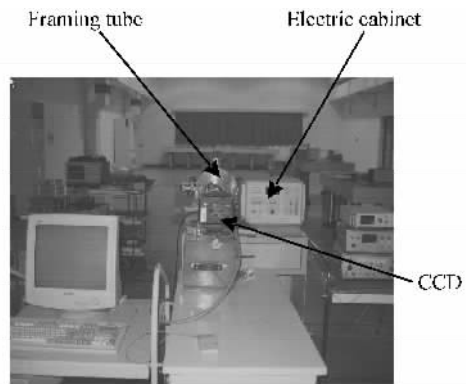


图 8 测试实验现场
Fig. 8 Experimental arrangement field

选通电脉冲. 调节电控箱上的电路延迟,使光信号和电脉冲到达阴极微带的时间同步,然后调节两列电脉冲之间的延迟时间获得最短的级联曝光时间.

实验中,在分幅管的两条微带上进行测试. 为在同激光条件下进行比较计算,在上微带分别加正负直流电压,在下微带上加正负选通电脉冲. 图 9 是级联选通脉冲之间的延迟时间不同时获得的不同动态结果. 其中每幅图上微带是静态图像,下微带是

级联选通的动态曝光图像. 通过所得增益区域的宽度和像素之间的比例计算曝光时间. 图 10 是图 9 中两个动态曝光时间结果的计算曲线. 根据静态时电脉冲在微带上的传输时间是 200 ps, 微带对应的像素是 120 pix. 可求得图 10 中曝光区域即级联增益曲线的 FWHM 对应像素分别为 47 pix 和 21 pix, 相应的级联曝光时间是 78 ps 和 35 ps. 35 ps 是两列电脉冲之间的延迟时间为 450 ps 时得到的最短曝光时间, 并且级联增益大于单块 MCP 选通时的增益. 实验中的两个级联增益结果与理论模拟结果图 5 中的 A 点和 B 点吻合, 而曝光时间也与图 6 中的 A' 和 B' 点吻合, 随着所加两列电脉冲之间延迟时间的改变, 分幅相机的曝光时间也随之变化.

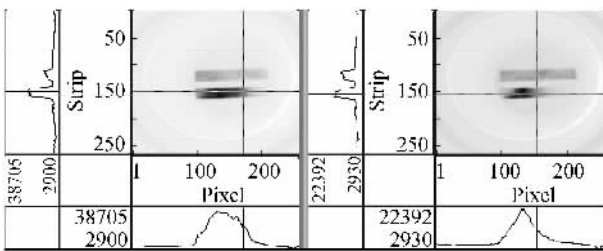


图 9 双 MCP 的曝光时间和增益结果

Fig. 9 Gain and exposure time of two MCPs

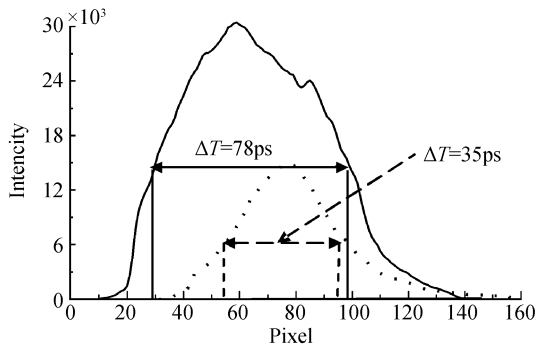


图 10 分幅相机的计算结果比较

Fig. 10 Calculated exposure time of the framing camera

图 11 是双 MCP 双选通分幅管静态测试结果: MCP I 加直流电压 -650 V, MCP II 加直流电压 +600 V, 荧光屏电压 +3 500 V, 可以看出该分幅管

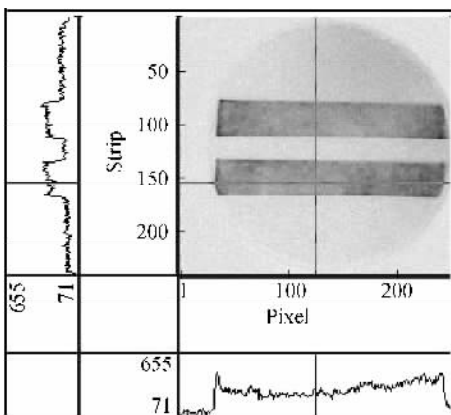


图 11 分幅相机的静态结果

Fig. 11 Static result of framing camera

静态的增益和均匀性都比较好. (图 9 和图 11 实验结果图均作了反色处理, 以便能看清楚微带的增益变化情况.)

3 结论

采用双 MCP 双选通的方法, 首先可以提高增益, 入射 X 光经过级联双 MCP 的倍增后, 增益远大于单块 MCP 的倍增效率. 第二可以缩短曝光时间, 在两块 MCP 的非线性增益效应和电子渡越时间效应联合作用下, 通过适当地损失一部分快电子或慢电子来换取短的曝光时间. 第三由于双 MCP 的“V”形结构阻挡了直穿光, 背景噪音比只用单块 MCP 时大大减小. 总之, 双 MCP 级联双选通分幅相机与单块 MCP 选通分幅相机相比, 降低了对电脉冲宽度和幅度的要求, 同时, 在研制短曝光时间分幅相机时, 降低了对 MCP 厚度的苛刻限制.

两块 MCP 均加选通脉冲时, 处于中间位置的 MCP II 和荧光屏之间场强会发生变化, 引起空间分辨率下降; 并且两块 MCP 级联后空间分辨率本身也会降低. 因为空间分辨率是分幅相机重要参量之一, 所以目前需要解决的问题是如何提高空间分辨率.

参考文献

- [1] BRADLEY D K, BELL P M. Development and characterization of a pair of 30 ~ 40 ps X-ray framing cameras[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66** (1): 716-718.
- [2] OSWALD H W, SIEGMUND, WURZ P, *et al.* 6 μm pore microchannel plate detectors for the experiment[C]. *SPIE*, 2000, **4140**: 229-236.
- [3] CHANG Zeng-hu, SHAN Bing, LIU Xiu-qin, *et al.* Gated MCP framing camera with 60 ps exposure time[C]. *SPIE*, 1995, **2549**: 53-59.
- [4] SHAN Bing, CHANG Zeng-hu, LIU Jin-yuan, *et al.* Gated MCP framing camera system[C]. *SPIE*, 1997, **2869**: 182-188.
- [5] CHANG Zeng-hu, SHAN Bing, LIU Xiu-qin, *et al.* Picosecond X-ray framing camera using gated MCP[C]. *SPIE*, 1995, **2549**: 106-111.
- [6] SHI Li-yong, LIU Bai-yu, OU-YANG Xian, *et al.* High-speed and high-voltage electrical pulse generation for electro-optical switch[J]. *Acta Photonics Sinica*, 2006, **35**(10): 1501-1504. 时利勇, 刘百玉, 欧阳娴, 等. 一种用于电光开关的高速高压电脉冲的产生[J]. *光子学报*, 2006, **35**(10): 1501-1504.
- [7] CHANG Zeng-hu. A new way of reducing exposure time of framing camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **5**(2): 280-286. 常增虎. 一种缩短分幅相机曝光时间的新方法[J]. *光子学报*, 1995, **5**(2): 280-286.
- [8] CHANG Zeng-hu. Two MCPs gated in cascade for picosecond framing photography[C]. *SPIE*, 1995, **2513**: 119-125.

A Kind of 30~40 ps Cascade Gating X-ray Framing Camera with Chevron MCPs

BAI Xiao-hong^{1,2}, BAI Yong-lin¹, LIU Bai-yu¹, TIAN Jin-shou¹, YANG Wen-zheng^{1,2},
ZHAO Jun-ping¹, OU-YANG Xian¹, QIN Jun-jun¹, CAO Zhu-rong³

(1 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photons Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(3 *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China*)

Received date: 2007-03-14

Abstract: A soft X-ray framing camera with two micro-channel plates was developed. It consists of two MCPs in V-configuration, of which the thickness is 0.5 mm respectively. Two columns of high voltage pulse are used in gating two cascade MCPs. By controlling the pulse delay-time and using the interaction between time effect of electron transition through micro-channel and nonlinear gain, 35 ps exposure time is obtained which is shorter than a single MCP camera's by losing a number of electrons. And the background noise caused by straight X-ray can be reduced.

Key words: Gating mode; Framing Camera; Inertial Confinement Fusion; Cascade connection



BAI Xiao-hong was born in 1975 and received the B. S. degree from Physics Department of Northwest University in 1998. Now she is studying for her M. S. degree at the State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her research interests are the image tube designing and production.