

宽微带 X 射线分幅相机的研制

蔡厚智^{1,2} 刘进元^{1*} 彭翔^{1,2} 李文飞¹ 叶艳平¹ 吴剑锋¹
张桃华¹ 邓祁军¹ 牛丽红¹ 牛憨笨¹ 刘慎业³ 杨国洪³

¹深圳大学光电工程学院, 光电子器件与系统(教育部/广东省)重点实验室, 广东 深圳 518060
²天津大学精密仪器与光电工程学院, 天津 300072
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 研制了应用于平焦场光栅谱仪系统的宽微带 X 射线分幅相机, 微通道板(MCP)微带阴极的宽度为 20 mm, 由四路选通脉冲同时驱动。分幅相机采用模块化设计, 由气室、MCP 变像管、电控系统、光学 CCD 记录系统和内嵌式计算机组成, 内嵌 PC104 模块实现相机的远程控制。对相机进行联调实验, 测得该相机的时间分辨率为 71 ps, 空间分辨率为 20 lp/mm, 垂直于选通脉冲传播方向的微带均匀性为 1.5:1, 平行于选通脉冲传播方向的微带均匀性为 5.1:1。

关键词 X 射线光学; 分幅相机; 微通道板选通; 变像管; 光栅谱仪; 曝光时间

中图分类号 TN143; O536 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0117001

Design of an X-Ray Framing Camera with Wide Microstrip Line

Cai Houzhi^{1,2} Liu Jinyuan¹ Peng Xiang^{1,2} Li Wenfei¹ Ye Yanping¹ Wu Jianfeng¹
Zhang Taohua¹ Deng Qijun¹ Niu Lihong¹ Niu Hanben¹ Liu Shenye³ Yang Guohong³

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China
²College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
³Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract An X-ray framing camera with wide microstrip line is described. It is designed for the flat field grating spectrograph. The microstrip line cathode deposited on the microchannel plate (MCP) with width of 20 mm is driven by four gating electrical pulses. The camera with modular design is made up of five basic components; the airbox, the MCP imager, the electric control system, the CCD camera system and the embedded computer. The camera is remote controlled by the embedded computer PC104. The camera is tested and the results show that the exposure time of the camera is 71 ps, the spatial resolution is 20 lp/mm, the gain uniformity of the microstrip line photocathode transverse to the pulse propagation direction is 1.5:1, and the gain uniformity along the pulse propagation direction is 5.1:1.

Key words X-ray optics; framing camera; microchannel plate gated; image converted tube; grating spectrograph; exposure time

OCIS codes 040.1490; 040.5160; 040.7480; 320.7120; 250.0040

1 引言

X 射线分幅相机具有良好的时间分辨、二维的

空间分辨和能谱分辨、画幅数多、动态范围大、抗干扰能力强、灵敏度高优点, 被广泛应用于 X 射线

收稿日期: 2011-08-10; 收到修改稿日期: 2011-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(10875080)资助课题。

作者简介: 蔡厚智(1983—), 男, 博士, 博士后, 主要从事超快电子学及高速摄影技术等方面的研究。

E-mail: caihzrobby@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: ljj@szu.edu.cn

超快现象诊断,如 X 射线激光、惯性约束聚变(ICF)、同步辐射、Z 箍缩等离子体、直线加速器的光束测量等方面^[1~11]。若将分幅相机的光电阴极更换成近红外或可见光光电阴极,则对光物理、光化学、光生物、激光等瞬态光学现象的研究有着广阔的应用前景^[12]。

随着微通道板(MCP)的发展及皮秒高压电脉冲技术的突破,MCP 行波选通 X 射线分幅相机逐渐成为国际上研究的热点。1986 年,M. J. Eckart 等^[13]提出把微带线直接镀在 MCP 的输入面,MCP 输出面镀电极,使得 MCP 的两个端面形成微带传输线结构。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)于 1988 年研制出曝光时间为 150 ps 的微带选通型 X 射线分幅相机,并将分幅相机成功应用于 NOVA 装置上进行惯性约束聚变研究^[14];1990 年,研制出曝光时间为 35 ps 的门控 MCP 分幅相机,该相机采用薄的 MCP,厚度仅为 0.2 mm^[15];1992 年,又研制出带反射镜滤片组的 12 分幅相机,每幅图像曝光时间约为 100 ps^[16]。1994 年,我国研制了单弯曲型微带 X 射线皮秒分幅相机,并在此基础上研制出曝光时间为 58 ps 的四通道 X 射线分幅相机^[17]。上述分幅相机

的微带阴极宽度为 6~15 mm,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)于 2004 年研制了大尺寸行波选通 X 射线分幅相机,其微带阴极的宽度为 13 mm^[18]。

为了满足平焦场光栅谱仪系统的要求,本文研制了宽微带 MCP 行波选通 X 射线分幅相机,微带阴极的宽度达到 20 mm。宽微带阴极对驱动电路的要求较高,设计了四路选通脉冲同时驱动微带阴极的方案。此外,该相机应用的环境特殊:相机整体处于高真空靶室内部,整个诊断过程均在高真空环境下进行,靶室远大于相机的诊断距离,靶室内部电磁干扰大且要求相机的热量辐射小。因而,该相机在结构和性能上和以往的分幅相机有较大的不同,在结构上采用工程化、模块化设计,并利用 PC104 对相机进行远程控制。为了提高 MCP 变像管的安全性,加载在荧光屏上的高压可选择脉冲电压形式。

2 X 射线分幅相机的结构设计

X 射线分幅相机由气室、MCP 变像管、电控系统、光学 CCD 记录系统和内嵌式计算机组成,各模块间有相对独立的结构且连接和拆卸简便易行,其系统结构框图如图 1 所示。

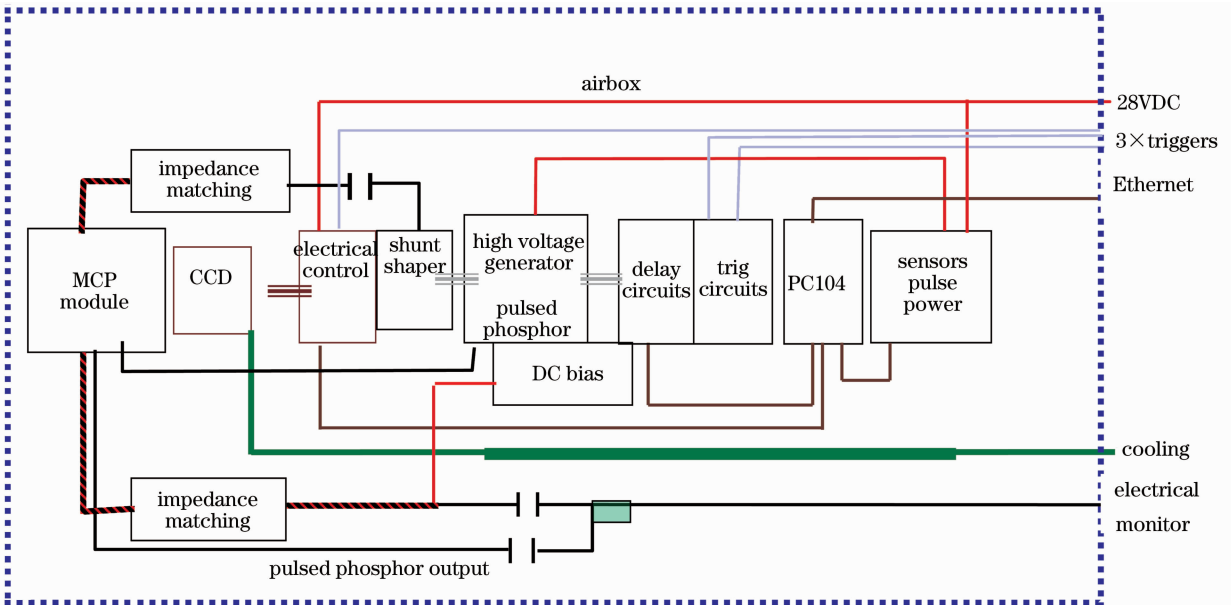


图 1 X 射线分幅相机系统结构框图

Fig. 1 Structure diagram of the X-ray framing camera

2.1 气 室

气室采用方箱结构,内部为大气环境,整体处于高真空靶室。它具有密封功能,能够将分幅相机的非真空组件与靶室的高真空环境隔断;且具有法拉第罩功能,能够防止电磁场的进入或者散出,屏蔽靶场的瞬时电磁干扰。气室前端与 MCP 变像管耦

合,后端与输入输出接口耦合。电控系统、CCD 和内嵌式计算机安装于气室内部,使它们工作于大气环境中,以便散热。

2.2 MCP 变像管

MCP 变像管背面接气室,正面接光栅谱仪模块。MCP 变像管为分幅相机进行光电转换的重要

元器件组合,它的基本功能是将 X 射线图像转换为有足够亮度的可见光图像并提供足够的空间和时间分辨,其主要由阻抗变换的微带渐变线、镀有微带阴极的 MCP 和制作在光纤面板上的荧光屏组成,实物图如图 2 所示(彩图见电子版)。MCP 外径为 56 mm,厚度为 0.5 mm,通道直径为 12 μm ,斜切角为 6°。MCP 输入面蒸镀单条宽度为 20 mm 的黄金

微带阴极,黄金阴极性能稳定,对 0.1~10.0 keV 范围内的 X 射线都有较高的量子效率。0.5 mm 厚的印制电路板(PCB)上印有阻抗渐变线,通过金箔和 MCP 微带阴极连接。微带阴极的输入端与 4 条阻抗渐变线相连,输出端与一条阻抗渐变线相连。MCP 输出面距离荧光屏 0.5 mm,P20 荧光粉使用离心法制作在光纤面板上。

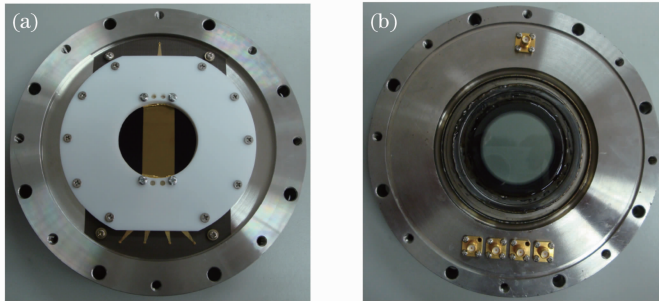


图 2 MCP 变像管实物图。(a)正面图:微带阴极、MCP、印制在 PCB 板上的阻抗渐变线;(b)背面图:荧光屏、SMA 插头
Fig. 2 Physical map of the MCP imager. (a) Front view, microstrip line cathode, MCP, tapered transmission line etched onto the printed circuit board, (b) rear view, phosphor screen, SMA

2.3 电控系统

电控系统由选通脉冲发生器、MCP 静态及偏置电源、荧光屏电源、延时控制器等组成。

选通脉冲电路由斜坡脉冲电路和二极管脉冲成形电路组成^[19]。该电路的难点一是同时产生 4 路脉冲及减小脉冲源间的串扰;难点二是获得一致性较好的选通脉冲,包括波形一致性较好和触发晃动较小。采用的方案是用一个斜坡脉冲电路产生的高压斜坡脉冲来驱动两个脉冲成形电路,每个脉冲成形电路有两路皮秒脉冲输出,最终产生 4 路皮秒高压选通脉冲。由于 MCP 微带阴极较宽,为了使其具有较好的增益均匀性,MCP 微带阴极由 4 路选通脉冲同时驱动,4 路选通脉冲经同轴电缆送入 MCP 变像管外端的射频连接器(SMA)插头,SMA 插头连接 PCB 板上的微带线,再经一段阻抗渐变线后在微带阴极输入端汇合同时加载在 MCP 微带阴极上,通过 MCP 微带阴极后,再经输出端的阻抗渐变线与 MCP 变像管输出端的 SMA 插头连接。4 路选通脉冲到达微带阴极的时间要基本一致,否则将造成分幅相机的时间分辨率大,甚至同一位置重复曝光。用示波器观测每路选通脉冲到达的时间,通过调节同轴电缆的长度,使得 4 路选通脉冲到达微带阴极的时间相差不大,尽量控制在 20 ps 以内。

MCP 的静态电压为 -600 V,偏置电压为 ± 300 、 ± 200 、 ± 100 、0 V 共 7 档。荧光屏可加载直流电压(3.5 kV 或 4.0 kV)或脉冲电压(3.5 kV 或

4.5 kV)。延时控制器包括 0.05、0.1、0.2、0.4、0.8、1.6、3.2、6.4、12.8 ns 共 9 档。

2.4 内嵌式计算机

分幅相机组件中内嵌了计算机控制系统,内部计算机(嵌入式工控机 PC104)通过以太网和远程计算机进行通信。计算机控制系统的具体功能是:1)对 CCD 的控制:触发、采集和数据存贮;2)对 MCP 模块的功能控制:MCP 模块电源供给和开关、屏压加载和档位选择控制、MCP 偏压档位控制、选通脉冲的延时调控;3)环境参数监视:气室内气压、温度和湿度监视、脉冲屏压和高压选通脉冲触发状况监视;4)光栅谱仪支撑与瞄准调节机构控制:靶靶和狭缝位置调节。分幅相机远程控制软件的界面图如图 3 所示。

3 实验结果

3.1 时间分辨率测量

曝光时间(即时间分辨率)定义为分幅相机增益-时间曲线的半峰全宽,是相机最重要的性能指标之一。曝光时间的测量采用光纤传光束测试系统,光纤传光束由 30 根多模光纤组成,光纤长度依次递增,光纤束输出面按照光纤的长度依次排列并编号,如图 4 所示。最短的光纤编号为 1,编号每增加 1,光纤中紫外光的传输时间就增加 30 ps,从而使得这 30 个光点的到达时间均匀递增。

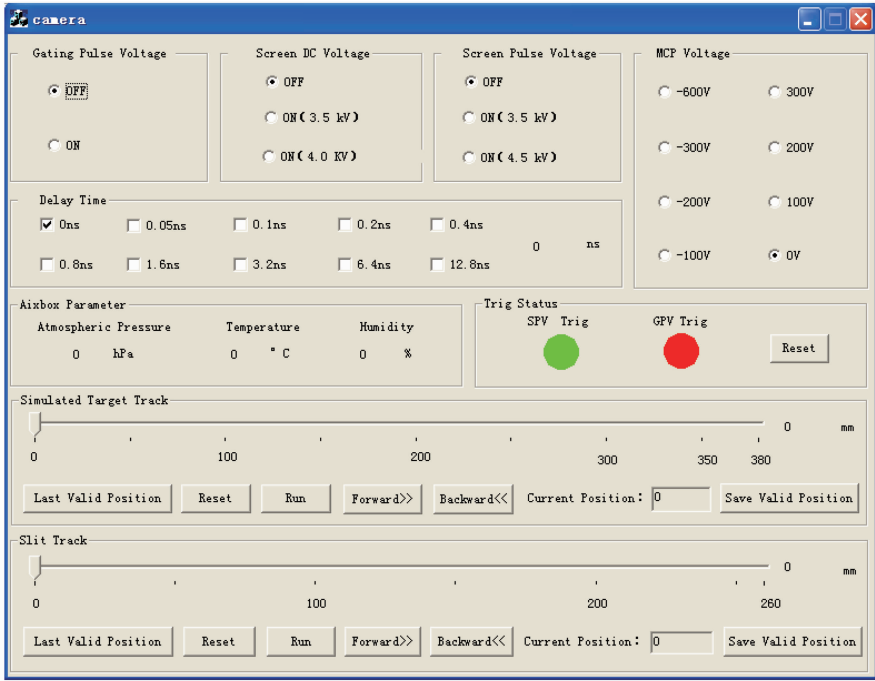


图 3 分幅相机远程控制软件界面图

Fig. 3 Diagram of the remote controlled software for the framing camera

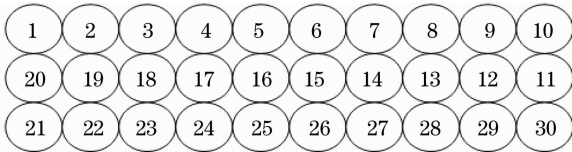


图 4 光纤传光束输出面光纤排列示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the array of the fiber bunch output end

实验时,首先在 MCP 上加直流电压,测量光纤在微带上的静态像,得到入射光在微带上的静态分布。曝光时间测量装置如图 5 所示,激光器输出的波长为 266 nm 的紫外光延时后均匀照射光纤束输入面,紫外光经光纤束形成相邻时间间隔为 30 ps 的 30 个光点,这些光点经平行光管(即图 5 中 L_1 、 L_2)成像在 MCP 微带阴极上。主光路另一束波长

为 532 nm 的绿光送入 PIN 探测器,产生一个触发脉冲,触发选通脉冲发生器,调节电路延迟,使得光信号和选通脉冲到达微带阴极的时间同步,从而产生动态图像,用 CCD 读出系统记录动态图像,得到光点像的动态分布,把光点像的动态分布和静态分布进行归一化处理,消除光脉冲的空间不均匀性对测量造成的影响,再由光点的时间延迟差,将归一化的动态像光强空间分布换算成时间分布,从而得到相机的曝光时间。

图 6 为光纤束静态图像。当 MCP 上加幅度为 -1.57 kV、半峰全宽为 220 ps 的选通脉冲和 -300 V 的直流偏置后获得的动态图像如图 7 所示。对动态图像和静态图像进行归一化处理,将归一化的动态像光强空间分布换算成时间分布,结果如图 8 所示。图中高斯拟合曲线的半峰全宽为 71 ps,因此相机的最短曝光时间为 71 ps。

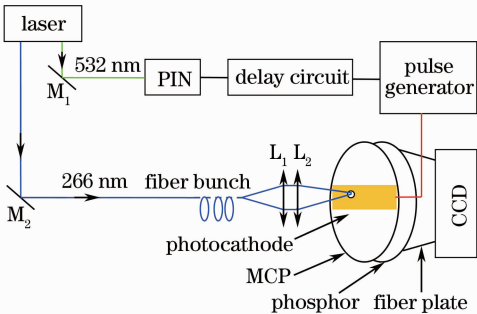


图 5 曝光时间测量装置

Fig. 5 Experimental setup of the exposure time measurement

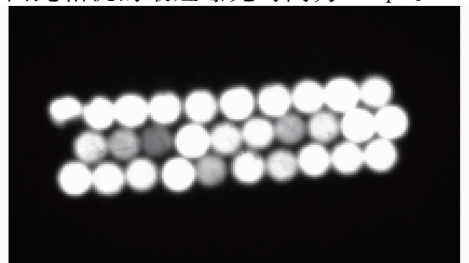


图 6 光纤束静态图像

Fig. 6 Static image of the fiber bunch

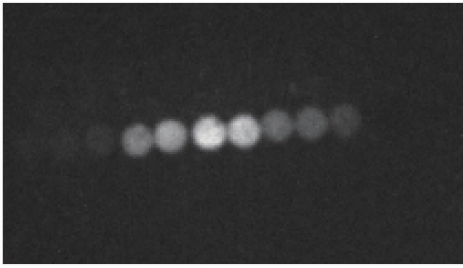


图 7 动态图像

Fig. 7 Gating image

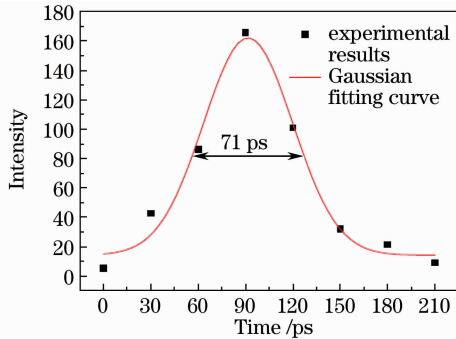


图 8 曝光时间测量结果

Fig. 8 Measured result of the exposure time

3.2 静态空间分辨率测量

用紫外盘形灯作为光源照射石英分辨率板,通过平行光管的光学系统将石英分辨率板的图像成像在黄金阴极的工作区域内,设置相机工作在静态模式,阴极产生的光电子经 MCP 倍增,倍增电子经屏压加速后轰击荧光屏形成可见光图像,用 CCD 观测采集荧光屏上所成的分辨率板图像,并在计算机上观测分辨率线对数,观察 4 个方向都清晰的单元组,再将对应的组数换算成空间分辨率线对数。

当 MCP 电压为 -600 V,屏压为 4.0 kV 时,获得的静态空间分辨率图像如图 9 所示。图 9 中第 1~13 单元组的 4 个方向都较清晰,石英分辨率板单元号为 13 时,条纹宽度为 10.0 μm,由于使用的平行光管放大倍数为 2.5 倍,则静态空间分辨率为

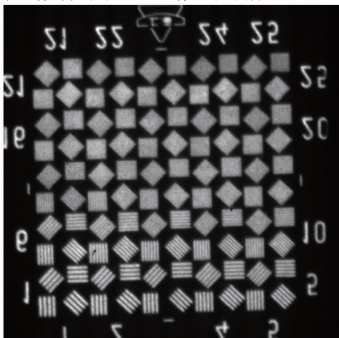


图 9 静态空间分辨率测量结果

Fig. 9 Measured result of the static spatial resolution

$$\frac{1000}{10.0 \times 2 \times 2.5} = 20 \text{ (lp/mm)}$$

3.3 微带均匀性测量

MCP 的增益与电压成指数关系,则选通脉冲在 MCP 微带阴极上传输时的幅值衰减将影响微带增益的均匀性。在 ICF 实验研究中,对测量精度要求的提高,使得微带均匀性成为分幅相机的一个重要性能指标。国外曾利用 1 ps 的 X 射线脉冲对 MCP 微带均匀性进行过测量,得到微带均匀性为 6:1 的实验结果^[20]。实验中采用了脉冲宽度为 20 ns 的紫外准分子激光器,实验装置与分幅相机曝光时间的测量装置近似,区别在于均匀性测量装置中没有使用光纤束,而是使用扩束镜对紫外光脉冲进行扩束并均匀照明整个微带阴极进行动态均匀性测试。实验时,首先在 MCP 上加直流电压,测量微带的静态图像,得到入射光在微带上的静态分布。然后进行微带动态均匀性测试,激光器产生的另一束绿光送入 PIN 探测器,产生一个触发脉冲,触发选通脉冲发生器,调节电路延迟,使得紫外光信号和选通脉冲到达微带阴极的时间同步,从而产生动态图像,用 CCD 读出系统记录动态图像,得到微带的动态分布,把动态分布和静态分布进行归一化处理,消除光脉冲的空间不均匀性对测量造成的影响,从而得到微带的均匀性。实验时,选通脉冲由下往上传输,微带的静态图像和动态图像分别如图 10 和 11 所示。

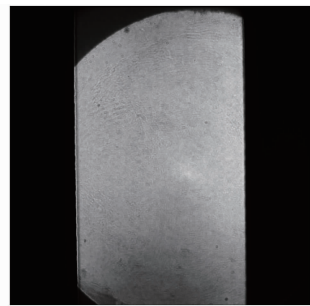


图 10 微带静态图像

Fig. 10 Static image of the microstrip line

归一化强度定义为动态图像强度减去本底后的值除以静态图像强度减去本底后的值。垂直微带方向上,归一化强度与垂直方向位置的关系如图 12 所示,归一化强度最大值在微带轴线附近,最小值在微带边缘,且最大值与最小值的比值为 1.5:1,表明选通脉冲幅值在微带轴线附近稍大于微带边缘。平行微带方向上,随着选通脉冲在微带上传输距离的增加,归一化强度逐渐减小,即选通脉冲幅值沿着传输方向逐渐降低,如图 13 所示,归一化强度最大值与

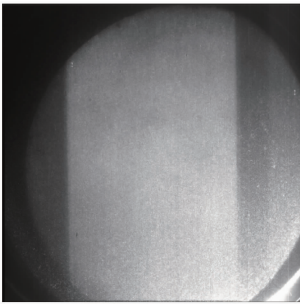


图 11 微带动态图像

Fig. 11 Gating image of the microstrip line

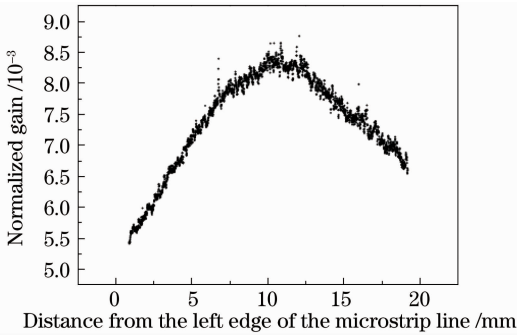


图 12 垂直于选通脉冲传输方向微带均匀性的测量结果

Fig. 12 Measured result of the gain uniformity of the microstrip line transverse to the pulse propagation direction

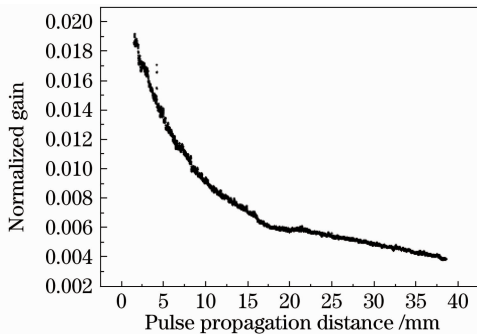


图 13 平行于选通脉冲传输方向微带均匀性的测量结果

Fig. 13 Measured result of the gain uniformity of the microstrip line along the pulse propagation direction

最小值的比值为 5.1:1。

4 结 论

研制了单通道宽微带 MCP 行波选通 X 射线分幅相机,相机内嵌 PC104 模块,通过以太网完成相机的远程控制。相机由气室、MCP 变像管、电控系统、光学 CCD 和内嵌式计算机组成,采用密闭气室结构,气室内保持大气环境,电控系统、CCD 和内嵌式计算机均安装于气室内部。宽度为 20 mm 的单条微带阴极蒸镀在 MCP 输入面,由四路一致性较

好的选通脉冲同时驱动。实验测得该相机的时间分辨率为 71 ps;空间分辨率为 20 lp/mm;垂直于微带方向的动态图像归一化强度最大值与最小值的比值为 1.5:1,平行微带方向的比值为 5.1:1,表明选通脉冲幅值沿着传输方向逐渐降低且选通脉冲的幅值在微带轴线附近稍大于微带边缘。

参 考 文 献

- 1 Lin Zunqi, He Xingfa, Lin Kangchun *et al.*. Successful application of X-ray picosecond framing camera first time in China [J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **18**(8): 639~640
林尊琪, 何兴法, 林康春 等. 我国首台皮秒级 X 射线分幅相机试用成功[J]. *中国激光*, 1991, **18**(8): 639~640
- 2 D. K. Bradley, P M. Bell, J. D. Kilkeny. High-speed gated X-ray imaging for ICF target experiment [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10): 4813~4817
- 3 Bing Shan, Takeshi Yanagidaira, Katsuji Shimoda *et al.*. Quantitative measurement of X-ray images with a gated microchannel plate system in a Z-pinch plasma experiment [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, **70**(3): 1688~1693
- 4 Jiang Shaoen, Zheng Zhijian, Liu Zhongli *et al.*. A study of pinhole arrays canning imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 573~574
江少恩, 郑志坚, 刘忠礼 等. 针孔阵列扫描成像系统研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(4): 573~574
- 5 Jinyuan Liu, Lihong Niu, Wenda Peng *et al.*. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(5): 055104
- 6 Houzhi Cai, Jinyuan Liu, Lihong Niu *et al.*. Monte Carlo simulation for microchannel plate framing camera [J]. *Opt. Eng.*, 2010, **49**(8): 080502
- 7 Niu Lihong, Liu Jinyuan, Peng Wenda *et al.*. Microchannel plate gated X-ray nanosecond framing camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1274~1278
牛丽红, 刘进元, 彭文达 等. 微通道板选通 X 射线纳秒分幅相机的研制[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1274~1278
- 8 John A. Oertel, Robert Aragonéz, Tom Archuleta *et al.*. Gated X-ray detector for the national ignition facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E308
- 9 Feng Jie, Ding Yongkun, Wang Hongbin *et al.*. Application of the X-ray picosecond framing camera in intense X-ray pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12): 1738~1740
冯 杰, 丁永坤, 王红斌 等. X 射线皮秒分幅相机在强 X 射线情况下的应用研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(12): 1738~1740
- 10 Jiang Xiaoguo, Wang Yuan, Zhang Kaizhi *et al.*. Calibration method for non-uniformity between multiple images from a high-speed multi-frame CCD camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 531~535
江孝国, 王 远, 张开志 等. 高速分幅成像系统中多路图像性能不一致的校正方法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 531~535
- 11 Houzhi Cai, Jinyuan Liu, Lihong Niu *et al.*. Non-gain microchannel plate gated framing camera [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, **82**(5): 056102
- 12 Shan Bing, Chang Zenghu, Liu Jinyuan *et al.*. MCP gated picosecond X-ray framing camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(5): 449~456
山 冰, 常增虎, 刘进元 等. 四通道 X 射线 MCP 行波选通分幅相机[J]. *光子学报*, 1997, **26**(5): 449~456
- 13 M. J. Eckart, R. L. Hanks, J. D. Kilkeny *et al.*. Large-area 200-ps gated microchannel plate detector [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, **57**(8): 2046~2048

- 14 J. D. Kilkenney, P. Bell, R. Hanks *et al.*. High-speed gated X-ray imagers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(8): 1793~1796
- 15 P. M. Bell, J. D. Kilkenney, R. Hanks *et al.*. Measurements with a 35 psec gate time microchannel plate camera[C]. *SPIE*, 1990, **1346**: 456~464
- 16 F. Ze, R. L. Kauffman, J. D. Kilkenney *et al.*. A new multichannel soft X-ray framing camera for fusion experiments [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10): 5124~5126
- 17 Cheng Jinxiu, Yang Cunbang, Wen Tianshu *et al.*. Gated MCP soft X-ray picosecond multi-framing camera [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5): 596~600
成金秀, 杨存榜, 温天舒 等. 门控 MCP 软 X 射线皮秒多分幅相机[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(5): 596~600
- 18 J. A. Oertel, T. Archuleta, M. Bakeman *et al.*. A large-format gated X-ray framing camera[C]. *SPIE*, 2004, **5194**: 217~222
- 19 Cai Houzhi, Liu Jinyuan. Investigation and application of ultrafast pulse circuitry [J]. *Journal of Shenzhen University Science & Engineering*, 2010, **27**(1): 33~36
蔡厚智, 刘进元. 超快脉冲电路的研制及应用[J]. *深圳大学学报理工版*, 2010, **27**(1): 33~36
- 20 T. McCarville, S. Fulkerson, R. Booth *et al.*. Gated X-ray intensifier for large format simultaneous imaging[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2005, **76**(10): 103501

栏目编辑:宋梅梅