

无增益微通道板皮秒分幅技术研究

蔡厚智^{1,2}, 龙井华³, 刘进元¹, 谢维信², 牛憨笨¹

(1. 深圳大学 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. 深圳大学 信息工程学院, 广东 深圳 518060; 3. 深圳大学 物理科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 研制了无增益微通道板(Microchannel plate, MCP)选通 X 射线分幅相机, 由无增益 MCP 变像管、成像针孔阵列、皮秒选通脉冲发生器及 CCD 构成。对相机时间分辨率进行了测量, 当无增益 MCP 加载-1.5 kV、145 ps 的选通脉冲和-300 V 的直流偏置时, 测得相机的时间分辨率为 59 ps。改变 MCP 直流偏置电压, 获得了时间分辨率、输出信号强度与 MCP 偏置电压的关系。实验结果表明, 随着 MCP 偏置电压的减小, 时间分辨率提高, 但输出信号强度降低。

关键词: X 射线光学; 分幅相机; 无增益微通道板; 时间分辨率; 惯性约束聚变
中图分类号: TN143; O536 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0109-04

Non-gain microchannel plate picosecond framing technology

Cai Houzhi^{1,2}, Long Jinghua³, Liu Jinyuan¹, Xie Weixin², Niu Hanben¹

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. College of Physics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: A non-gain microchannel plate (MCP) gated X-ray framing camera was reported. It is made up of four basic components, the non-gain MCP imager, the pinhole array, the picosecond gating pulse generator, and the CCD camera system. The temporal resolution was measured by using a fiber bunch. While the gating pulse with width of 145 ps and amplitude of -1.5 kV plus -300 V bias were applied on the non-gain MCP, the measured temporal resolution of this camera was about 59 ps. Furthermore, the relationship between the temporal resolution and the MCP bias voltage was obtained. The variation of the temporal resolution with the intensity of the output signal was also provided. The experimental results show that the temporal resolution is improved while the MCP bias voltage is decreased. However, the intensity of the output signal is reduced while the MCP bias voltage is decreased.

Key words: X-ray optics; framing camera; non-gain microchannel plate; temporal resolution; inertial confinement fusion

收稿日期: 2015-05-13; 修订日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(11305107); 中国博士后科学基金(2014M552228); 深圳市科技计划项目(JCYJ20140418182819143)

作者简介: 蔡厚智(1983-), 男, 博士后, 主要从事超快诊断技术等方面的研究。Email: caihzlvzf@163.com

通讯作者: 龙井华。Email: jhlong@szu.edu.cn

0 引言

微通道板(Microchannel plate, MCP)选通 X 射线分幅相机具有较高的时间分辨率和空间分辨率,是惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)和 Z-pinch 实验中最重要诊断设备之一^[1-6]。由于 MCP 中电子渡越时间弥散的限制,时间分辨率的提高难以取得突破性进展。目前实用化分幅相机的时间分辨率为 60~100 ps^[7],采用薄 MCP(厚度为 0.2 mm)技术,可将时间分辨率提高至 35 ps 左右^[8],但这种相机的信噪比差,且薄 MCP 脆弱。最近几年,美国 Lawrence Livermore National Laboratory 采用电子束时间放大系统,研制出时间分辨率优于 10 ps 的时间展宽型 X 射线分幅相机^[9],该相机包括两个部分,电子束时间展宽系统和传统的 MCP 选通分幅相机。文中研究重点在于 MCP 选通分幅相机这一部分。为了减小电子的渡越时间弥散,提高时间分辨率,可采用无增益 MCP 代替传统的有增益 MCP 来研制 MCP 选通 X 射线分幅相机^[10]。无增益 MCP 只做通道使用,不具有增益作用,即无增益 MCP 通道壁无二次电子发射层,电子与无增益 MCP 通道壁碰撞后将会被吸收而不会产生二次电子,只有发射能量和方向均合适的光电子才能不碰撞通道壁,从无增益 MCP 出射。理论分析表明,当 MCP 两端面间的电压为 1 kV 时,无增益 MCP 中电子的渡越时间弥散为 3.9 ps,而有增益 MCP 中电子的渡越时间弥散为 42.3 ps^[10],因而无增益 MCP 可以减小电子的渡越时间弥散,获得更好的时间分辨率。

文中研制了无增益 MCP 选通分幅相机,并对相机的时间分辨率进行了测量。

1 相机结构

无增益 MCP 选通 X 射线分幅相机由无增益 MCP 变像管、成像针孔阵列、皮秒选通脉冲发生器及 CCD 构成,其结构示意图如图 1 所示。

无增益 MCP 变像管由微带阴极、阻抗渐变线、无增益 MCP 和荧光屏组成。选通脉冲发生器产生的皮秒高压脉冲经 50 Ω 同轴线缆传输至 MCP 变像管

外侧的射频接头,射频接头和 MCP 微带阴极的阻抗不同,因此射频接头和微带阴极间需要一段阻抗渐变线,保证选通脉冲传输过程中传输线的阻抗匹配,阻抗渐变线采用指数式渐变线。微带阴极具有两方面的作用,一是具有光电阴极的功能,将入射 X 射线(或紫外光)转换为光电子;二是具有微带线的作用,传输选通脉冲。MCP 斜切角 6°,厚度 0.5 mm,通道直径 12 μm ,MCP 输入面蒸镀 4 条微带阴极(由 150 nm Au 和 200 nm Cu 组成),微带阴极宽度 6 mm、2 条微带阴极间间隔 2 mm,整个 MCP 输出面蒸镀与输入面相同厚度的 Cu 和 Au,输出面与荧光屏距离 0.5 mm。

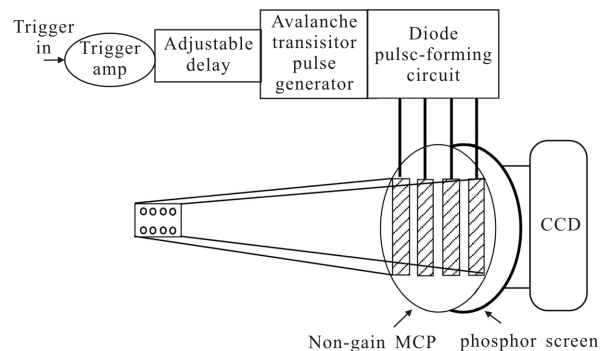


图 1 无增益 MCP 选通分幅相机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the non-gain MCP gated framing camera

选通脉冲发生器由雪崩三极管电路及二极管削波电路组成。其工作原理是级连的雪崩三极管产生超快阶跃高压脉冲,再通过高压雪崩二极管对其削波,输出皮秒选通脉冲^[11]。

2 实验结果

无增益 MCP 选通分幅相机时间分辨率的测量采用光纤传光束法,测量装置见参考文献[7]。当无增益 MCP 仅加载 -700 V 的直流电压时,获得光纤的静态图像如图 2(a)所示。当无增益 MCP 加载幅值为 -1.5 kV、宽度为 145 ps 的选通脉冲和 -300 V 的偏置电压时,光纤动态图像如图 2(b)所示。将动态图像和静态图像进行归一化处理,再根据光纤延时差,将归一化的动态像光强空间分布换算成时间分布,获得的结果如图 3 所示。图 3 中高斯拟合曲线的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 59 ps,即相机的时间分辨率为 59 ps。

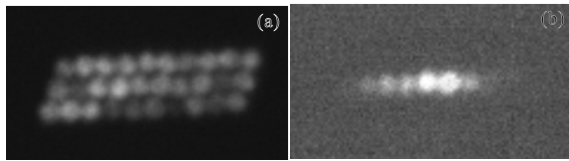


图 2 (a)当无增益 MCP 仅加载-700 V 的直流电压时静态图像;
(b)当无增益 MCP 加载选通脉冲和-300 V 的偏置电压时动态图像
Fig. 2 (a) Static image while -700 V is applied on the non-gain MCP;
(b) Gating image while gating pulse plus -300 V dc bias are applied on the non-gain MCP

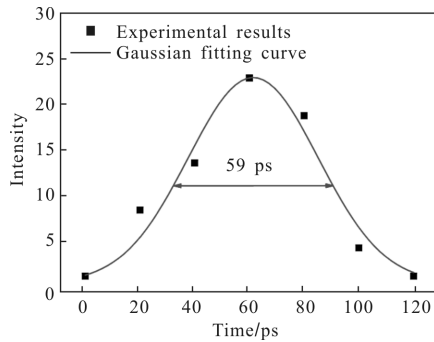


图 3 时间分辨率测量结果

Fig. 3 Measured result of the temporal resolution

当无增益 MCP 上加幅值为-1.5 kV、宽度为 145 ps 的选通脉冲和-300 V 的直流偏置时,获得的增益时间曲线的理论结果如图 4 所示,理论模型见参考文献[10]。时间分辨率的理论结果为 50 ps,比实际测量的结果 59 ps 要好,原因之一是在实验时,选通脉冲在传输过程中被不断衰减,在 MCP 微带阴极上的选通脉冲幅值要小于-1.5 kV,限于实验条件,目前尚无法测量微带阴极上的选通脉冲幅值。

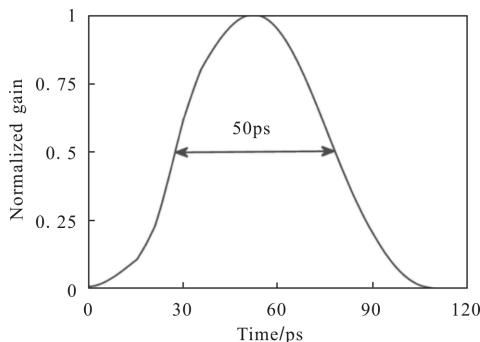


图 4 时间分辨率理论结果

Fig. 4 Theoretical result of the temporal resolution

测得相机的时间分辨率、输出信号强度与无增益 MCP 所加直流偏置电压的关系如图 5 所示。由图可得,无增益 MCP 所加负的直流偏置电压越小,时

间分辨率越好,但输出信号强度降低。

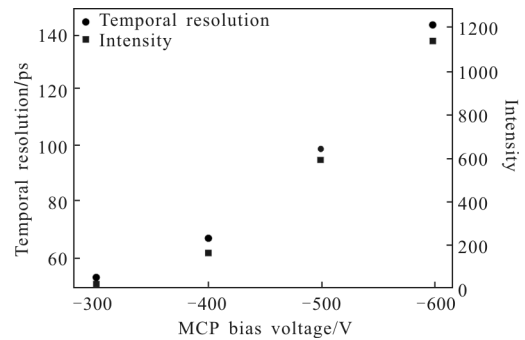


图 5 时间分辨率、输出信号强度与无增益 MCP 所加直流偏置电压的关系

Fig. 5 Temporal resolution and output signal intensity versus MCP dc bias voltage

3 结论

研制了无增益 MCP 选通 X 射线分幅相机。当无增益 MCP 加载幅值-1.5 kV、宽度 145 ps 的选通脉冲和-300 V 的直流偏置时,获得相机的时间分辨率为 59 ps,比理论时间分辨率 50 ps 略差。改变 MCP 直流偏置电压,获得了时间分辨率、输出信号强度与 MCP 偏置电压的关系。由实验结果可得,随着偏置电压的减小,时间分辨率提高,但增益降低。因此,需要选择合适的偏置电压,使得时间分辨率和增益均能满足要求。后续工作将研制新型的选通脉冲电路,获得宽度很窄、幅值很高的选通脉冲,进一步提高无增益 MCP 选通 X 射线分幅相机的时间分辨率。二是将电子束时间放大系统与无增益 MCP 选通 X 射线分幅相机相结合,提高整个系统的时间分辨率。

参考文献:

[1] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. *Nature*, 2014, 506: 343-348.
[2] Park H -S, Hurricane O A, Callahan D A, et al. High-adiabat high-foot inertial confinement fusion implosion experiments on the national ignition facility [J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 112(5): 055001-1-055001-5.
[3] Town R P J, Bradley D K, Kritcher A, et al. Dynamic symmetry of indirectly driven inertial confinement fusion capsules on the National Ignition Facility [J]. *Phys Plasmas*, 2014, 21(5): 056313-1-056313-9.

- [4] Michel D T, Craxton R S, Davis A K, et al. Implosion dynamics in direct-drive experiments [J]. *Plasma Phys Control Fusion*, 2015, 57(1): 014023.
- [5] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. The high-foot implosion campaign on the national ignition facility [J]. *Phys Plasmas*, 2014, 21(5): 056314-1-056313-14.
- [6] Shengzhen Yi, Baozhong Mu, Xin Wang, et al. A four-channel multilayer KB microscope for high-resolution 8-keV X-ray imaging in laser-plasma diagnostics [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(1): 013401-1-013401-4.
- [7] Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, et al. Design of an X-Ray framing camera with wide microstrip line [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (1): 0117001 -1 - 0117001-7. (in Chinese)
- 蔡厚智,刘进元,彭翔,等. 宽微带 X 射线分幅相机的研制 [J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0117001-1-0117001-7.
- [8] Bell P M, Killkenny J D, Hanks R, et al. Measurements with a 35 psec gate time microchannel plate camera [C]// SPIE, 1990, 1346: 456-464.
- [9] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Dilation X-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF[J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83(10): 10E116-1-10E116-3.
- [10] Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Niu Lihong, et al. Monte Carlo simulation for microchannel plate framing camera[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(8): 080502-1-080502-3.
- [11] Liu Jinyuan, Niu Lihong, Peng Wenda, et al. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, 78(5): 055104-1-055104-4.