

## 电子束时间展宽皮秒分幅相机

蔡厚智<sup>1,2</sup>, 龙井华<sup>3</sup>, 刘进元<sup>1</sup>, 谢维信<sup>2</sup>, 白雁力<sup>1</sup>, 雷云飞<sup>1</sup>, 廖昱博<sup>1</sup>

(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:** 研制了基于电子束时间展宽技术和微通道板(microchannel plate, MCP)选通技术的时间展宽分幅相机。相机有三条厚度 80 nm、宽度 8 mm 的微带阴极, 阴极上加载斜率为 2.1 V/ps 的高压斜坡脉冲, 使得先发射的电子较后面的电子速度快, 经过 50 cm 的漂移区后, 电子束产生时间展宽, 从而提高相机时间分辨率。阴极和 MCP 均加载了脉冲电压, 因此, 需要精确同步光脉冲、阴极脉冲和 MCP 选通脉冲, 分析了完整的同步过程。当阴极仅加直流电压, 无电子束时间展宽时, 获得相机的时间分辨率为 78 ps。当阴极加载高压斜坡脉冲时, 电子束时间展宽技术将系统的时间分辨率提高至 12 ps。改变延时, 将光脉冲分别同步在斜坡脉冲不同位置, 获得了时间分辨率与同步位置的关系。

**关键词:** 分幅相机; 时间展宽; 时间分辨率; 惯性约束聚变; Z 箍缩

**中图分类号:** TN143; O536 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1206001

## Picosecond framing camera based on electron pulse time-dilation

Cai Houzhi<sup>1,2</sup>, Long Jinghua<sup>3</sup>, Liu Jinyuan<sup>1</sup>, Xie Weixin<sup>2</sup>, Bai Yanli<sup>1</sup>, Lei Yunfei<sup>1</sup>,  
Liao Yubo<sup>1</sup>

(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 dilation framing camera based on the gated microchannel plate (MCP) technology and the time-dilation technology was reported. In the camera, the photo-cathode (PC) was applied with a high voltage fast step pulse with gradient of 2.1 V/ps. The electron pulse generated at the PC was accelerated by a time varying electric field between the PC and the anode mesh, which leads to an energy dispersion of the electron signal. The electrons generated early in time obtain a larger energy. Therefore, the initial electrons transit the drift space between the mesh and the MCP at a higher velocity than those coming later. While the electrons travel through the 50 cm drift space to the MCP, the temporal shape of the electron signal was dilated or temporally magnified due to the time-dilation system. Then, the dilated electron pulse was detected by the gated MCP framing camera. Therefore, the temporal resolution of the framing camera was improved. The camera has three transmission photo-cathodes coated with 80 nm Au.

收稿日期: 2016-04-17; 修订日期: 2016-05-20

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, 副研究员, 博士, 主要从事超快诊断技术等方面的研究工作。Email: caihzlvzf@163.com

通讯作者: 龙井华(1972-), 女, 讲师, 博士, 主要从事超短激光脉冲测量和全固态激光技术方面的研究。Email: jhlong@szu.edu.cn

The width of each PC is 8 mm. Both the PC and the MCP were applied with pulse, therefore the laser pulse, the PC pulse, and the MCP pulse should be synchronized accurately. The synchronized process was analyzed. While the PC was applied with dc bias only, the measured temporal resolution of the camera without time-dilation was about 78 ps. While the high voltage fast step pulse was applied on the PC, the temporal resolution was improved to 12 ps. The relationship between the temporal resolution and the synchronized point was also provided.

**Key words:** framing camera; time dilation; temporal resolution; inertial confinement fusion; Z-pinch

## 0 引言

在激光惯性约束聚变 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 及 Z-pinch 等实验研究中,需要对持续时间为 ns 及亚 ns 量级的超快物理过程及物理参数进行研究, MCP 选通 X 射线分幅相机是重要的诊断工具之一,它具有二维的空间分辨能力和优于亚纳秒的时间分辨率<sup>[1-5]</sup>。

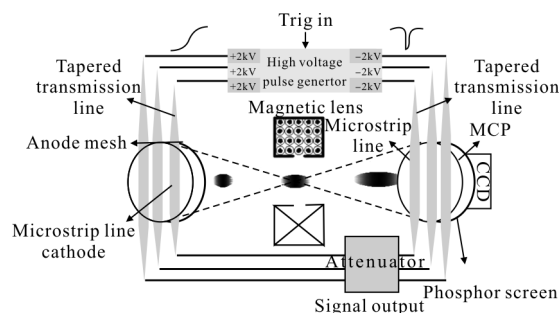
近年来,随着 ICF 研究的深入,对分幅相机时间分辨率的要求不断提高。由于 MCP 中电子渡越时间、渡越时间弥散的限制,分幅相机时间分辨率的提高难以取得突破性进展,国际上实用化分幅相机的时间分辨率为 60~100 ps<sup>[6-7]</sup>。采用薄 MCP(0.2 mm),可以减小电子渡越时间和渡越时间弥散,将时间分辨率提高至 35 ps 左右<sup>[8]</sup>。但这种相机的信噪比差、增益低、MCP 脆弱,难以通过进一步减小 MCP 厚度的方法来提高时间分辨率。最近几年,美国 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)采用电子束时间展宽系统与 MCP 选通分幅相机相结合的方法,研制出时间分辨率优于 10 ps 的时间展宽 X 射线分幅相机<sup>[9-10]</sup>。该相机利用电子束时间展宽系统对电子束的时间宽度进行展宽,实现电子束的时间放大,然后使用 MCP 选通分幅相机对展宽后的电子束进行测量,从而提高时间分辨率<sup>[11]</sup>。

为了满足国内 ICF 研究的需求,文中研制了时间展宽分幅相机,并对相机的时间分辨率进行了测量。相较于美国 LLNL 的相机,文中相机在设计 and 结构上有以下两点区别:一是美国采用的是长磁聚焦透镜,文中采用的是短磁聚焦透镜;二是美国相机中,磁场将微带阴极上的光电子成缩小的像在 MCP,成像倍数为 3:1,文中成等大的像,成像倍数为 1:1。在相机时间分辨率的测量方法上也有不同,美国由六幅动态图像获得相机的时间分辨率<sup>[11]</sup>,由于实验中

存在触发晃动使得这种方法存在测量误差,文中采用光纤束法,一次测量就能获得相机的时间分辨率,避免了触发晃动带来的测量误差。

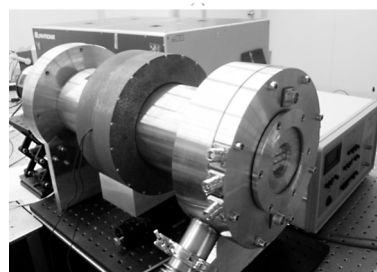
## 1 相机结构

时间展宽分幅相机的结构示意图、实物照片分别如图 1(a)、1(b)所示,由微带阴极、阳极栅网、磁聚焦透镜、MCP 变像管、CCD 和高压脉冲发生器组成。其工作原理是:入射光照射在微带阴极上产生光电子,微带阴极加负直流偏置电压并叠加上高压斜坡脉冲,阳极栅网接地,光脉冲同步在高压斜坡脉冲的上升沿,这样,先发射的光电子较后面的光电子获得更大的能量,从而使得前面的电子速度更快,通过阳



(a) 时间展宽分幅相机的结构示意图

(a) Schematic diagram of the dilation framing camera



(b) 时间展宽分幅相机的实物照片

(b) Photograph of the dilation framing camera

图 1 时间展宽分幅相机的结构示意图实物照片

Fig.1 Schematic diagram and photograph of the dilation framing camera

极栅网到 MCP 输入面这段漂移区的传输后,电子束的时间宽度被展宽,实现电子束的时间放大,由于漂移区传输距离较大,电子束将在空间发散,为了提高空间分辨率,采用磁聚焦透镜将展宽后的电子束成像在 MCP 输入面对应的微带线上,当选通脉冲沿微带线在 MCP 上传输时,电子束被 MCP 选通、增强,并打到荧光屏上形成可见光图像,输出的可见光图像用 CCD 进行记录处理。由于电子束在时间上展宽,通过使用较低时间分辨率的 MCP 选通分幅相机,就可以获得很高的系统时间分辨率。

微带阴极由三条蒸镀在石英玻璃上,厚度 80 nm 的金阴极组成,每条阴极宽度 8 mm,间隔 2.8 mm。微带阴极具有两方面的作用:一是具有光电阴极的功能,将入射光转换为光电子;二是具有微带线的作用,传输高压斜坡脉冲,使得微带阴极和栅网间存在时变电场,实现电子束的时间放大。

圆环形状的磁聚焦透镜由软铁和 1 200 匝铜线圈组成,外径 256 mm,内径 160 mm,轴线方向长度 100 mm,圆环内侧有一圈宽度 4 mm 的缝隙,磁场经 4 mm 狭缝进入漂移区。磁聚焦透镜使阴极面上的光电子成像在 MCP 输入面,成像倍数为 1:1。

MCP 变像管由阻抗渐变线、蒸镀在 MCP 上的微带线、MCP 和制作在光纤面板上的荧光屏组成。MCP 外径 56 mm,厚度 0.5 mm,通道直径 12  $\mu\text{m}$ ,斜切角 6°。微带线(500 nm Cu+100 nm Au)宽 8 mm、间隔 2.8 mm。MCP 与荧光屏距离 0.5 mm。

高压脉冲发生器产生加载在微带阴极上的高压斜坡脉冲和加载在 MCP 上的选通脉冲,其结构示意图如图 2 所示,雪崩三极管线路产生的高压斜坡脉冲分成两部分:一部分通过阻抗渐变线直接输入到微带阴极;另一部分用于驱动二极管脉冲成形电路产生 MCP 选通脉冲。

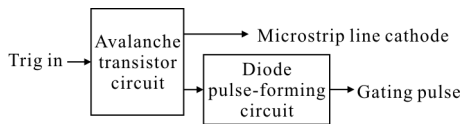


图 2 高压脉冲发生器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the high voltage pulse generator

## 2 实验系统及测量结果

时间分辨率定义为分幅相机增益-时间曲线的半高全宽,是相机最重要的性能指标之一。时间分辨率的测量采用光纤传光束测试系统。实验中使用

的光纤传光束由 30 根多模光纤组成,光纤束长度按等差数列递增,最短的光纤长 300 mm,等差数列公差为 2 mm,则紫外光在光纤束中的传输时间按 10 ps 递增。光纤束输出面按照光纤的长度依次排列并编号,如图 3 所示,最短的光纤编号为 1,编号增加 1,光纤长度增加 2 mm,光纤中紫外光的传输时间就增加 10 ps,从而使得这三十个光点的到达时间均匀地增加。

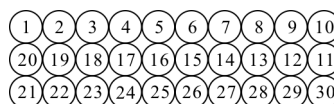


图 3 光纤传光束输出面光纤排列示意图

Fig.3 Schematic diagram of the array of the fiber bunch output end

实验时,首先在微带阴极、MCP 上加直流电压,测量光纤的静态像,得到入射光的静态分布。时间分辨率测量装置如图 4 所示,激光器输出的波长为 266 nm、宽度为 130 fs 的光脉冲经延时后均匀照射光纤传光束输入面,紫外光经光纤传光束形成相邻时间间隔为 10 ps 的三十个光点,这些光点经平行光管(即图 4 中  $L_1$ 、 $L_2$ )成像在 MCP 微带上。主光路另一束波长为 800 nm 的光脉冲送入 PIN 探测器,产生一个触发脉冲,用于触发高压脉冲发生器。由于微带阴极和 MCP 均加载了脉冲电压,因此,需要同步光脉冲、阴极脉冲和 MCP 选通脉冲才能获得电子束时间被展宽后的动态图像。实验时,先同步光脉冲和阴极脉冲(MCP 仅加直流电压),然后同步光脉冲和 MCP 选通脉冲(微带阴极仅加直流电压),由上述的同步结果可获得阴极脉冲和 MCP 选通脉冲间的延时时间,最后同步光脉冲、阴极脉冲和 MCP 选通脉冲。

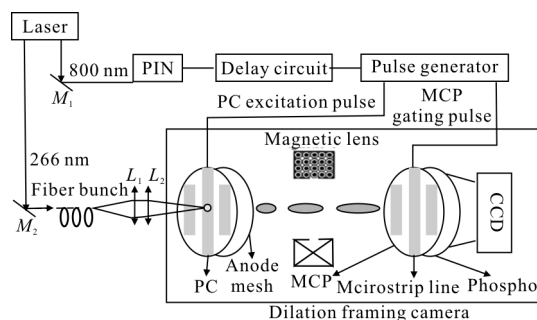


图 4 时间分辨率测量装置示意图

Fig.4 Experimental setup of the temporal resolution measurement

### 2.1 光脉冲和阴极脉冲的时间同步

MCP 仅加 -700 V 直流电压, 保持阴极电压 -3 kV 和磁透镜电流 0.33 A (此电流使 3 keV 的电子清晰成像在 MCP 输入面) 不变, 调节电路延迟, 使得光脉冲和高压斜坡脉冲到达微带阴极的时间同步。实验时, 加载在微带阴极上的高压斜坡脉冲如图 5 所示, 上升沿斜率最大处约 2.1 V/ps。当延时电路延时为 21.6 ns 时, 光纤图像如图 6(a) 所示, 只有第一排光纤成像。第二、三排光纤由于同步在斜坡脉冲上升沿的较高位置甚至平顶部分, 光电子获得的能量比 3 keV 小得多, 因此磁透镜无法使这部分电子成像在 MCP 微带线。当延时分别为 22、22.4 ns 时, 光纤图像分别如图 6(b)、6(c) 所示, 第二排、第三排光纤依次成像。

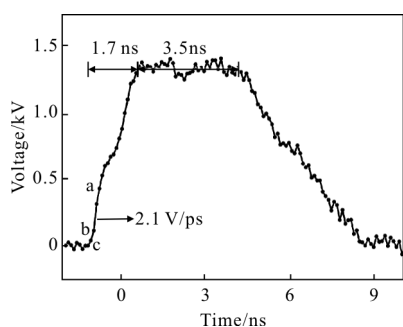


图 5 加载在阴极上的高压斜坡脉冲波形

Fig.5 Waveform of the high voltage fast step pulse applied on the photo-cathode (PC)

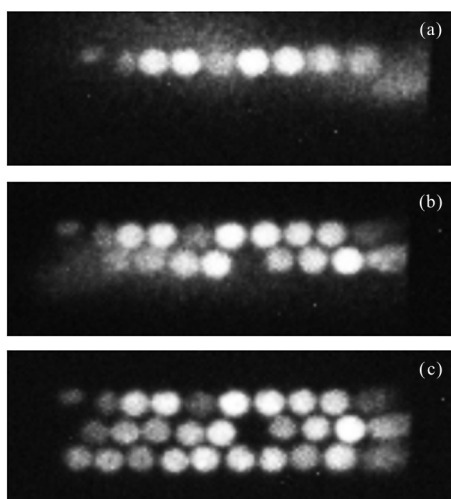


图 6 延时分别为 21.6 ns(a), 22 ns(b), 22.4 ns(c) 时光纤图像

Fig.6 Fiber image while the delay time is 21.6 ns(a), 22 ns(b), 22.4 ns(c)

光纤与阴极脉冲的同步位置示意图分别如图 7(a)、7(b)、7(c) 所示。由以上结果可得, 延时 21.6 ~ 22.4 ns 时, 第一排至第三排光纤点图像依次出现, 延时 22.4 ns 时光纤点图像同步在上升沿最大斜率处。由于阴极高压斜坡脉冲的上升沿时间较大, 为了便于观察同步现象, 此处采用的是相邻时间间隔为 30 ps 的光纤束。后续时间分辨率测量时, 为了使测量结果更精确, 采用的均是 10 ps 间隔的光纤束。

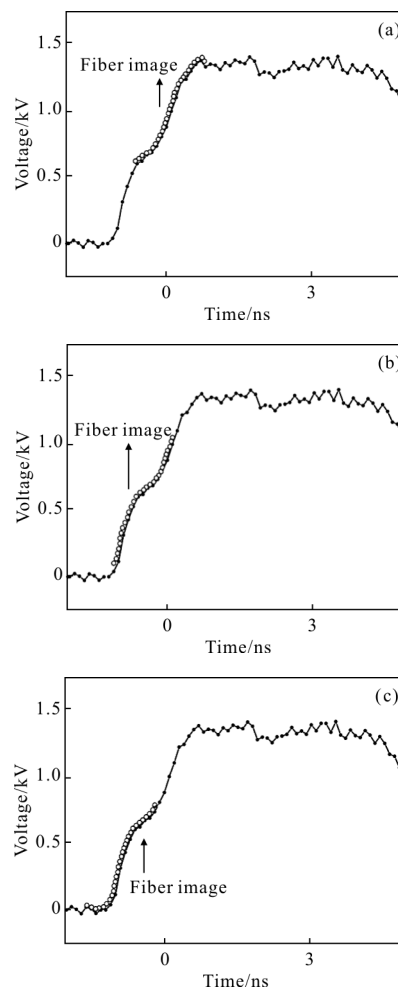


图 7 延时分别为 21.6 ns(a), 22 ns(b), 22.4 ns(c) 时, 光纤输出光点与阴极脉冲的同步位置示意图

Fig.7 Synchronized point of the fiber image with PC pulse while the delay time is 21.6 ns(a), 22 ns(b), 22.4 ns(c)

### 2.2 光脉冲和 MCP 脉冲的时间同步

获得了光脉冲和阴极脉冲的同步时间后, 需要获得光脉冲和 MCP 选通脉冲的同步时间。微带阴极仅加 -3 kV 直流电压, MCP 加载 -300 V 直流偏置电压和幅值 -1.8 kV、宽度 225 ps 的选通脉冲, 调节延时电路延迟, 使得电子脉冲和选通脉冲到达 MCP

微带线的时间同步,从而产生动态图像,如图 8(a)所示。对动态图像和静态图像(图 8(b))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 9 所示,图中高斯拟合曲线的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 78 ps,此为无电子束时间展宽时相机的时间分辨率。

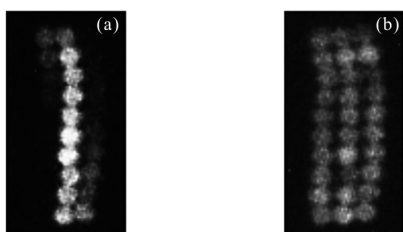


图 8 阴极仅加直流电压时动态图像及 10 ps 间隔光纤静态图像

Fig.8 Gating image while PC is applied with dc bias only and static image of fiber bunch with 10 ps delay time

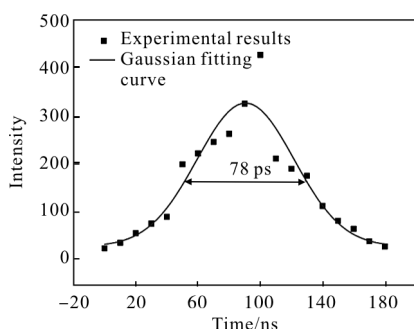


图 9 阴极未加脉冲时,时间分辨率测量结果

Fig.9 Measured temporal resolution while PC is not pulsed

### 2.3 光脉冲、阴极脉冲和 MCP 脉冲的时间同步

获得了光脉冲和阴极脉冲的同步时间、光脉冲和 MCP 选通脉冲的同步时间后,计算阴极脉冲和 MCP 选通脉冲的延时差,根据延时差选择合适长度的选通脉冲的延时线,将延时电路延时设置在 22.4 ns 左右,即可同步光脉冲、阴极脉冲和 MCP 选通脉冲。当阴极加载 -3 kV 直流电压和斜坡脉冲, MCP 加载 -300 V 直流电压和选通脉冲,延时电路延时分别设置在 22.275(图 10(a))、22.337 5(图 10(b))、22.4 (图 10(c))、22.462 5(图 10(d))、22.525(图 10(e))、22.587 5 ns(图 10(f))时,光纤将依次同步在阴极斜坡脉冲的不同位置,获得的一组动态图像如图 10 所示。对延时为 22.4 ns 的动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 11 所示,图中高斯拟合曲线的 FWHM 为 12 ps,此为时间展宽分幅相机的时间分辨率。

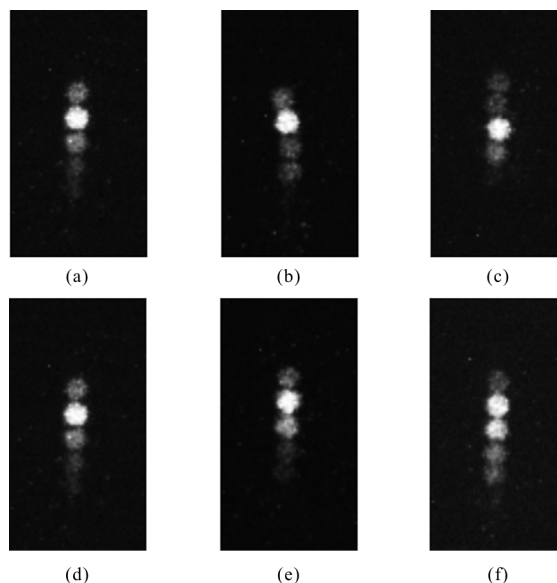


图 10 阴极加载脉冲时动态图像

Fig.10 Gating image while PC is applied with pulse

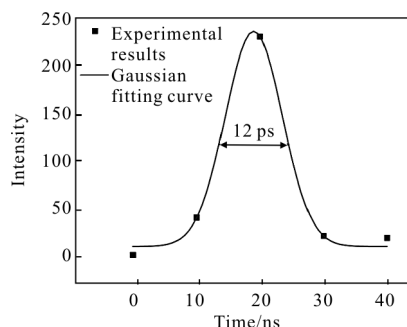


图 11 阴极加载脉冲时,时间分辨率测量结果

Fig.11 Measured temporal resolution while PC is pulsed

将其他延时的动态图像进行处理,即可获得其他同步位置的系统时间分辨率,时间分辨率与延时的关系如图 12 所示。图中,相邻两点间的延时为 62.5 ps,前面四点约同步在图 5 的 a、b 两点之间,阴极脉冲斜率

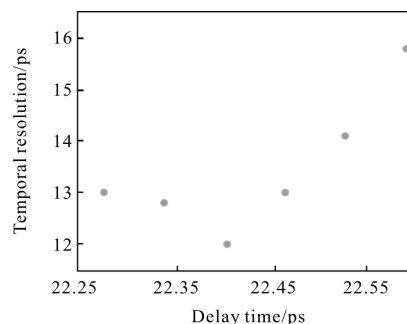


图 12 时间分辨率与延时的关系

Fig.12 Relationship between the temporal resolution and the delay time

较大,因而时间分辨率较高,后面两点约同步在  $b$ 、 $c$  两点之间,斜率较小,因而时间分辨率稍差。

### 3 结 论

将电子束时间展宽技术和 MCP 选通技术相结合,研制了时间展宽分幅相机。相机中,阴极和 MCP 分离,且阴极上加载高压斜坡脉冲使得光电子产生较大的能量分布,前面电子的速度较后面电子的大,在栅网和 MCP 间存在 50 cm 的电子漂移区,经过漂移区后电子的时间宽度被展宽,然后使用 MCP 选通分幅相机对展宽后的电子束进行测量,从而提高时间分辨率。对光脉冲、阴极脉冲和 MCP 选通脉冲的同步过程进行了分析。当阴极仅加直流电压,无电子束时间展宽时,相机的时间分辨率为 78 ps。当阴极加载斜坡脉冲后,电子束时间被展宽,系统的时间分辨率被提高至 12 ps。改变延时,将光脉冲分别同步在阴极斜坡脉冲的不同位置,获得了时间分辨率与同步位置的关系,同步位置斜率较大时,时间分辨率较高。时间展宽分幅相机的时间分辨率与阴极的直流偏置电压、阴极加载的高压斜坡脉冲的斜率、漂移区长度、MCP 选通脉冲关系密切。后续工作将研究时间分辨率与上述参数的关系,增大斜坡脉冲的斜率提高时间分辨率,及测量时间展宽分幅相机的空间分辨率。

#### 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.
- [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.
- [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.
- [6] 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.
- [7] Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, et al. Non-gain microchannel plate gated framing camera [J]. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82(5): 056102.
- [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: 455-464.
- [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.
- [10] 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]. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85(11): 11E504.
- [11] Hilsabeck T J, Hares J D, Killkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution [J]. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81(10): 10E317.