

## 高时间分辨分幅成像技术分析及其性能测试

白雁力, 姚荣彬, 高海英, 党选举, 何国民

(桂林电子科技大学 教学实践部, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为获取更多惯性约束聚变内爆运动信息和测量聚变燃烧阶段等离子体的时空特性, 以微通道板(MCP)选通分幅变像管为基础, 采用电子束时间展宽技术和组合透镜成像技术, 研制了曝光时间优于 30 ps 的分幅变像管, 并通过变像管结构、工作原理和实验测试分析了 2 类像管性能差异的原因。研究结果显示, MCP 选通分幅变像管具有良好的空间分辨性能, 而采用新技术的变像管则具有更优秀的时间分辨性能, 实验测试获得 MCP 选通分幅变像管的曝光时间和空间分辨率分别为 97 ps 和  $\sim 53 \mu\text{m}$ (调制度为 4%), 而采用新技术的分幅变像管分别为 21 ps 和  $\sim 74 \mu\text{m}$ (调制度为 3%)。高时间分辨分幅成像技术的应用可为惯性约束聚变的研究提供更多的可信数据。

**关键词:** 分幅变像管; 微通道板; 时间展宽技术; 组合透镜成像技术; 空间分辨性能; 曝光时间

中图分类号: TN143; O536 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0624002

## Analysis and performance test of the high temporal resolution framing imaging technology

Bai Yanli, Yao Rongbin, Gao Haiying, Dang Xuanju, He Guomin

(Department of Education Practice, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to obtain more implosion movement information of inertial confinement fusion and measure the temporal-spatial characteristics of plasma during fusion combustion phase, the framing tube was studied whose exposure time was better than 30 ps, using electron beam pulse-dilation and composite lenses imaging technology. The reason of performance difference between two tubes was analyzed through the tubes structure, working principle and measurement. The study result shows that the MCP gated framing tube has better spatial resolution performance and the new framing tube has more excellent temporal resolution performance. The spatial resolution and exposure time of MCP gated framing tube is  $\sim 53 \mu\text{m}$  (the modulation is 4%) and 97 ps, respectively. And, the new framing tube is  $\sim 74 \mu\text{m}$  (the modulation is 3%) and 21 ps, respectively. The mass reliable data is provided to study inertial confinement fusion through the high temporal resolution framing imaging technology.

**Key words:** framing tube; MCP; pulse-dilation technology; composite lenses imaging technology; spatial resolution; exposure time

收稿日期: 2018-01-10; 修订日期: 2018-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61263013); 广西自然科学基金重点项目(2016GXNSFDA380001); 广西高校中青年骨干教师基础能力提升项目(2017KY0199); 广西教育厅高校科学技术研究项目(YB2014131)

作者简介: 白雁力(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事超快诊断技术方面的研究。Email: bayaly@guet.edu.cn

## 0 引言

X 射线分幅变像管是具有皮秒级(ps)时间分辨和微米级( $\mu\text{m}$ )二维空间分辨能力的超快诊断设备。在惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion-ICF)研究中,分幅变像管既能测量聚变燃烧阶段的持续时间,又可获取该阶段内爆压缩动态图像的二维空间分布<sup>[1-3]</sup>。目前,基于微通道板(Micro Channel Plate,MCP)的行波选通分幅变像管广泛应用于 ICF 实验,其曝光时间为 35~100 ps 和空间分辨率为 $\sim 50 \mu\text{m}$ <sup>[4-5]</sup>。然而为了获取内爆运动过程的更多信息,以及测量聚变燃烧阶段等离子体时空特性,国内外研究者期望分幅变像管的曝光时间能优于 30 ps。为满足 ICF 实验对高时间分辨性能的需求,文中采用电子束时间展宽技术<sup>[6-10]</sup>和组合透镜成像技术,以 MCP 选通分幅变像管为基础,研制了曝光时间优于 30 ps 的分幅变像管,并通过变像管的结构、工作原理和实验测试分析和研究了 2 种分幅成像技术性能差异的原因,为高时空分幅成像技术的进一步发展提供了理论依据。

## 1 变像管结构和工作原理

传统 MCP 分幅像管主要由 MCP 和荧光屏(Phosphor Screen)组成,其中 MCP 上镀制了阴极微带,荧光屏则制作在光纤面板上。像管的结构和工作原理如图 1 所示。在工作时,MCP 输入面的微带阴极将入射光转换为光电子信号,这些信号从光电阴极的入射面射出,并进入 MCP 通道内。如果通道内存在加速电场,那么光电子就会在通道内运动并轰击通道壁产生二次电子倍增效应,即如图 1(b)所示。当 MCP 两端加载选通脉冲时,微带光阴极产生的光电子像将被 MCP 倍增,轰击荧光屏,形成可见光图像<sup>[3]</sup>。

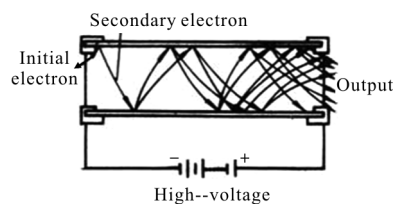
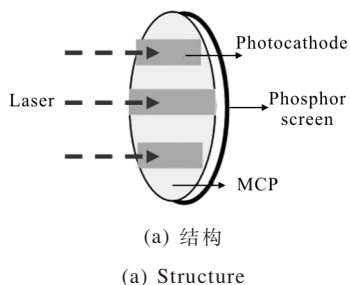


图 1 MCP 选通分幅变像管

Fig.1 MCP gated framing tube

采用电子束时间展宽技术和组合透镜成像技术的分幅变像管主要由阴极(photocathode)、阳极栅网(anode)、真空漂移区、短磁聚焦成像系统(magnetic lens)和传统 MCP 分幅像管组成,其基本结构和工作原理如图 2 所示。当入射激光脉冲照射到阴极上时,阴极将其转换为光电子信号,由于在阴-栅之间加载了展宽脉冲(dilation pulse),因此先产生的光电子具有更大的加速电压,从而具有更快的漂移速率。这些光电子信号通过真空漂移区的传输后,其时间宽度(即轴向距离)被展宽,然后使用传统 MCP 分幅像管对展宽后的光电子信号进行测量,从而使像管具有更好的时间分辨性能。短磁透镜组成的成像系统有效保证阴极图像能成在 MCP 的微带阴极上<sup>[3]</sup>。

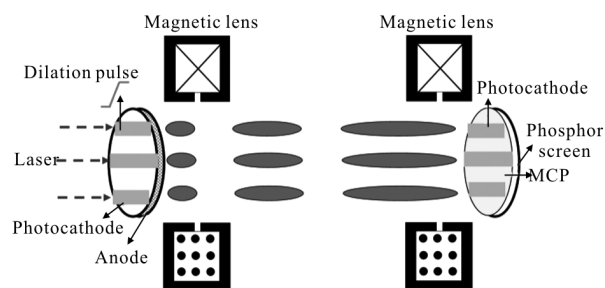


图 2 采用电子束时间展宽技术和组合透镜成像技术的分幅变像管

Fig.2 Framing tube using electron beam pulse-dilation and composite lenses imaging technology

通过对像管结构和工作原理的分析,在 MCP 选通分幅变像管中,被探测信号直接产生在 MCP 的输入面,以近贴聚焦的方式成像在荧光屏上,因此被探测信号的时间宽度和空间分布受外界影响较小;而在采用组合透镜成像系统的分幅变像管

中,被探测信号的时间宽度经过长距离漂移后被展宽,而其空间分布受到磁透镜成像(即阴极到 MCP)和近贴聚焦(MCP 到荧光屏)的二次影响,弥散程度增加。所以,MCP 选通分幅像管具有较好空间分辨性能,而电子束时间展宽技术可提升分幅像管的时间分辨性能。

## 2 实验结果

### 2.1 静态空间分辨率测试

#### 2.1.1 空间分辨率的标定方法

采用平行光管和 2 号分辨率板测试像管的空间分辨率<sup>[10]</sup>,计算方法如公式(1)和(2)所示。

$$f_{\text{tube}} = \frac{1\ 000}{2 \times M \times w} \quad (1)$$

$$\delta_{\text{tube}} = \frac{1\ 000}{f_{\text{tube}}} \quad (2)$$

式中:  $f_{\text{tube}}$  为空间频率,lp/mm;  $\delta_{\text{tube}}$  为空间分辨率,  $\mu\text{m}$ ;  $M$  为平行光管的放大倍率;  $w$  为能分辨 2 号分辨率板图像中的最小条纹宽度,  $\mu\text{m}$ 。

#### 2.1.2 像管的调制传递函数

调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)表示调制度与空间频率(lp/mm)之间的关系,是成像系统性能优劣的判断依据之一<sup>[11-12]</sup>。变像管的 MTF 指输出与输入图像的对比度比值,MTF 越大,变像管成像质量越好。假设被测目标通过像管前后的调制度分别为  $M_d$  和  $M'_d$ ,像管的 MTF 函数如公式(3)和(4)所示。

$$\text{MTF}(f) = \frac{M'_d}{M_d} \quad (3)$$

$$M'_d = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (4)$$

式中:  $I_{\text{max}}$  和  $I_{\text{min}}$  为通过像管后的图像最大和最小强度值;  $f$  为空间频率。如果假设  $M_d$  为 1,那么 MTF 值等于图像调制度  $M'_d$ ,即通过静态图像可获得变像管的 MTF 曲线。

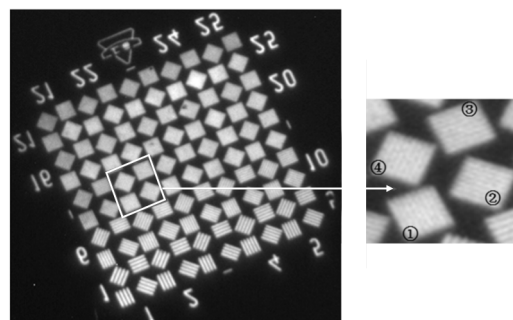
#### 2.1.3 测试结果

测试系统的 MCP 与荧光屏的近贴距离为 0.5 mm,漂移距离为 500 mm,磁透镜的孔径为 160 mm,轴向宽度为 100 mm,用于漏磁的缝隙为 4 mm。测试时,光电阴极、MCP 和荧光屏加载的直流偏置分别为 -3 kV、-700 V 和 3.4 kV,平行光管放大倍率为 2.5 $\times$ 。

两种像管静态空间分辨率测试结果如图 3 和 4

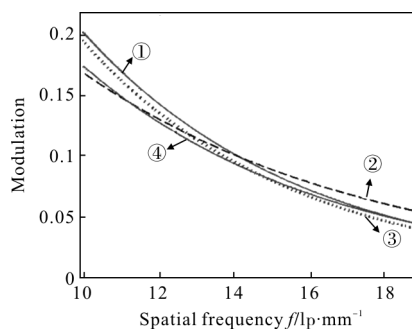
所示,MCP 选通分幅像管能分辨出分辨率板第 1~12 组 4 个方向的线对,第 12 组如图 3(b)所示(①、②、③和④分别表示条纹的 4 个方向);而新技术分幅变像管能分辨出第 1~6 组 4 个方向的线对,第 6 组如图 4(b)所示。

2 号分辨率板第 12 组和第 6 组的条纹宽度分别为 ~10.6 和 ~15  $\mu\text{m}$ ,采用公式(1)和(2)计算获得 MCP 选通分幅像管的空间频率和空间分辨率分别为 ~18.87 lp/mm 和 53  $\mu\text{m}$ ,新技术分幅像管分别为 ~13.5 lp/mm 和 74  $\mu\text{m}$ 。2 种像管在 4 个方向的 MTF 曲线分别如图 3(c)和 4(c)所示,MCP 选通分幅像管的空间频率为 10 lp/mm 时,图像调制度可达到 20%,而提升到 ~18.87 lp/mm,即空间分辨率为 ~53  $\mu\text{m}$  时,图像调制度降低到 ~4%;新技术分幅像管的空间频率为 10 lp/mm 和 ~13.5 lp/mm(即空间分辨率为 ~74  $\mu\text{m}$ ) 时,图像调制度分别为 ~19% 和 ~3%。测试结果显示,MCP 选通分幅像管的空间分辨率优于采用新技术的分幅像管。



(a) 分辨率板图像 (b) 第 12 组放大图像

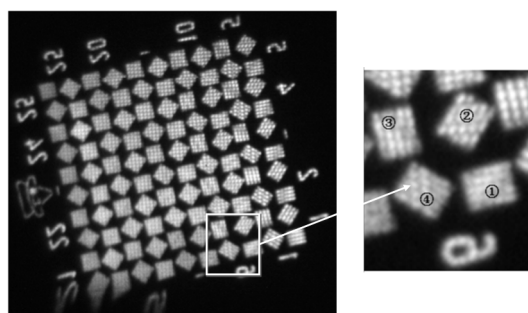
(a) Image of resolution panel (b) The 12th magnification image



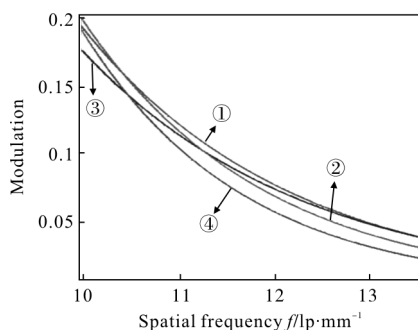
(c) 像管 4 个方向的 MTF 曲线

(c) MTF curve of tube with four direction

图 3 MCP 选通分幅像管空间分辨率测试结果  
Fig.3 Measurement result of spatial resolution of MCP gated framing tube



(a) 通过像管后的图像 (b) 第 6 组放大图像  
(a) Measurement result of tube (b) The 6th magnification image



(c) 像管 4 个方向的 MTF 曲线  
(c) MTF curve of tube with four direction

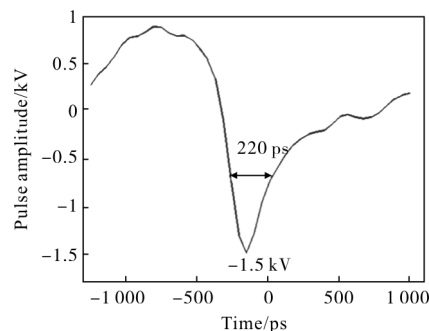
图 4 采用电子束时间展宽技术和组合透镜成像技术的分幅变像管空间分辨率测试结果

Fig.4 Measurement result of spatial resolution of framing tube using electron beam pulse-dilation and composite lenses imaging technology

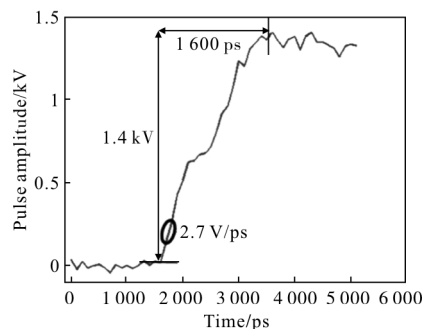
## 2.2 曝光时间测试

采用光纤传光束法测试变像管曝光时间,其装置见参考文献[5]。测试条件如图 5 和表 1 所示,其中 MCP 选通脉冲(图 5(a))的幅值为 $-1.5\text{ kV}$ ,半高宽为 $\sim 220\text{ ps}$ ;阴极展宽脉冲(图 5(b))上升部分的

斜率为 $\sim 1.4\text{ V/ps}$ 。测试结果如图 6 所示,图(a)、(b)和(c)分别为静态图像、MCP 选通和新技术分幅像管的动态图像,相邻光纤点的延时为 $10\text{ ps}$ 。将动态图像与静态图像进行归一化处理,并将归一化后的动态图像光强空间分布换算为时间分布,测试和拟合结果如图 6 (d) 所示,其中曲线半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)分别为 $97\text{ ps}$ 和 $21\text{ ps}$ ,即 2 种分幅变像管的曝光时间。



(a) MCP 选通脉冲  
(a) MCP gating pulse



(b) 阴极展宽脉冲  
(b) Dilation pulse

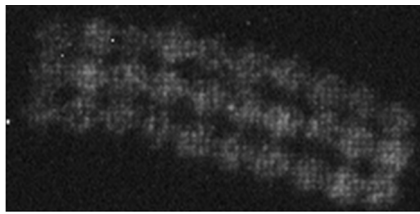
图 5 脉冲参数

Fig.5 Pulse parameters

表 1 曝光时间测试条件

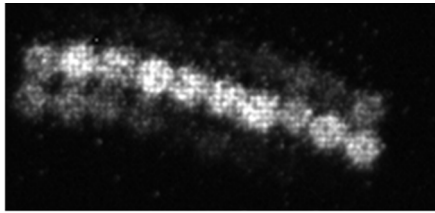
Tab.1 Measurement condition of the exposure time

Measurement object	Cathode voltage/kV	MCP voltage/V	Screen voltage/kV	MCP gating pulse	Dilation pulse/V/ps	Fiber bundle/ps	Imaging ratio
Static image	-3	-700	3.4	-	-	10	1:1
Dynamic image of the MCP gated framing tube	-3	-500	3.4	-1.5 kV, 220 ps	-	10	1:1
Dynamic image of the pulse-dilation framing tube	-3	-500	3.4	-1.5 kV, 220 ps	1.4	10	1:1



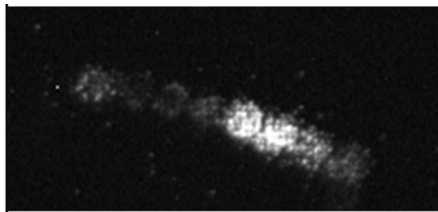
(a) 静态图像

(a) Static image



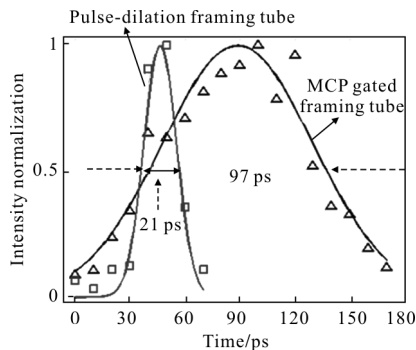
(b) MCP 选通分幅像管动态图像

(b) Dynamic image of the MCP gated framing tube



(c) 新技术分幅像管动态图像

(c) Dynamic image of the new framing tube



(d) 时间分辨率

(d) Temporal resolution

图 6 时间分辨率测试结果

Fig.6 Measurement results of temporal resolution

### 3 结论

文中在MCP选通分幅变像管的基础上,采用电子束时间展宽技术和组合透镜成像技术,研制了曝光时间优于30 ps的分幅变像管。通过变像管结构和工作原理,理论分析2种分幅变像管时空分辨

性能差异的原因,并通过搭建实验平台测试了变像管的时空性能。研究结果显示,采用电子束展宽技术和组合透镜成像技术能成倍提升变像管曝光时间,但由于光电子漂移区的存在,使像管的空间分辨率性能损失较大。测试采用电子束时间展宽技术和组合透镜成像技术前后,分幅变像管的空间分辨率分别为 $\sim 53 \mu\text{m}$ (调制度为4%)和 $\sim 74 \mu\text{m}$ (调制度为3%),曝光时间分别为97 ps和21 ps。该研究结论为高时空性能分幅变像管的研制和发展方向提供了理论指导。

### 参考文献:

- [1] Oertel P J A, Aragonz R, Archuleta T, et al. Gated X-ray detector for the National Ignition Facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 10E308.
- [2] Bell M, Bradley D K, Kilkenny J D, et al. Radiation hardening of gated x-ray imagers for the National Ignition Facility [J]. *Review of Scientific Instruments*. 2010, 81(10): 10E540.
- [3] Bai Yanli. Research on temporal and spatial resolution of pulse-dilation framing tube [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017: 20-30. (in Chinese)
- 白雁力. 时间展宽分幅变像管时空性能研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017: 20-30.
- [4] Bell P M, Kilkenny J D, Hanks R L, et al. Measurements with a 35 psec gate time micro channel plate camera[C]// SPIE, 1990, 1346: 455-464.
- [5] Cai Houzhi, Long Jinghua, Liu Jinyuan, et al. Non-gain microchannel plate picosecond framing technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (S1): 109-112. (in Chinese)
- 蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 无增益微通道板皮秒分幅技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S1): 109-112.
- [6] Hilsabeck T G, Hares J D, Kilkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- [7] 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]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E504.
- [8] Bai Yanli, Long Jinghua, Cai Houzhi, et al. Simulated and measured spatial resolution of framing converter using short magnetic focusing [J]. *Journal of Shenzhen University*

- Science and Engineering*, 2015, 32(2): 178–182. (in Chinese)  
白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 短磁聚焦分幅变像管空间分辨率的模拟与测试 [J]. 深圳大学学报理工版, 2015, 32(2): 178–182.
- [9] Bai Yanli, Long Jinghua, Cai Houzhi, et al. Demonstration of 11-ps exposure time of a framing camera using pulse-dilation technology and a magnetic lens [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(12): 124103.
- [10] Liao Yubo, Long Jinghua, Cai Houzhi, et al. Spatial resolution performance comparison of magnetic double-lens and single-lens framing tubes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0520002. (in Chinese)  
廖昱博, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜与单磁透镜分幅变像管空间分辨特性的比较 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0520002.
- [11] Gureyev T E, Mayo S C, Myers D E, et al. Refracting Röntgen's rays: Propagation based x-ray phase contrast for biomedical imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009 105(10): 102005.
- [12] Wang K, Lei H, Li J, et al. Characterization of inertial confinement fusion targets using X-ray phase contrast imaging [J]. *Optics Communications*, 2014, 332(4): 9–13.