

双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响

白雁力^{1,2} 龙井华^{3*} 蔡厚智¹ 廖昱博¹ 雷云飞¹ 刘进元¹

¹深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518060

²桂林电子科技大学教学实践部, 广西 桂林 541004

³深圳大学物理学院, 广东 深圳 518060

摘要 采用双磁透镜设计时间展宽分幅变像管,对其空间分辨特性进行模拟和测试。采用2[#]分辨率板测试像管空间分辨率,以及大面积阴极测试像管在离轴位置的空间分辨能力。测试结果表明,双磁透镜像管的空间分辨率为74 μm;在图像缩小1倍时,能有效分辨阴极距离中心轴位置30 mm的信息。像管的空间分辨率和在阴极离轴位置的分辨能力都优于单磁透镜像管。因此,双磁透镜能有效提高时间展宽分幅变像管的空间分辨特性。

关键词 超快光学;分幅变像管;时间展宽技术;微通道板;空间分辨率;超快现象;磁透镜

中图分类号 TN143; O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.013201

Influence of Double Magnetic Lenses on Performance of Pulse-Dilation Framing Tube

Bai Yanli^{1,2} Long Jinghua³ Cai Houzhi¹ Liao Yubo¹ Lei Yunfei¹ Liu Jinyuan¹

¹Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

²Department of Education Practice, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

³College of Physics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract The pulse-dilation framing tube using the double magnetic lenses is designed and the performance of spatial resolution is simulated and measured. The spatial resolution of tube is measured through the 2[#] plate. The spatial resolution at the off-axis position is tested through a large cathode. The measurement results show that the spatial resolution of tube is 74 μm, and the 30 mm off-axis position on the cathode is resolved while the image is demagnified 1 times. The spatial resolution and the spatial resolving power at the off-axis position are better than the tube using the single magnetic lens. Therefore, the spatial resolving performance of pulse-dilation framing tube is improved by the double magnetic lenses.

Key words ultrafast optics; framing tube; pulse dilation technology; micro-channel plate; spatial resolution; ultrafast phenomena; magnetic lens

OCIS codes 230.0250; 320.7080; 320.7160

1 引言

惯性约束聚变(ICF)即靶丸聚变,其原理是利用高功率的脉冲能束均匀照射微球靶丸,由靶面物质的消融喷离产生的反冲力使靶内氘氚燃料快速地爆聚至超高密度和热核温度,从而实现高效率释放聚变能的微型热核爆炸^[1-3]。由于X射线分幅相机具有较高时间分辨和二维空间分辨能力,因此是ICF实验中有效的超快诊断设备之一^[4-10]。传统X射线分幅相机是基于微通道板(MCP)的近贴聚焦设备,可以获得约50 μm的空间分辨率和35~100 ps的时间分辨率^[11-14]。2010年,Hilsabeck等^[15]成功将脉冲展宽技术应用到分幅相机中,经测试,相机的时间分辨率在10 ps之内,称为“时间展宽分幅相机”。近两年,研究者在国家点火装置(NIF)上应用时间展宽分幅相机研究激光等离子体等超快现象,在实验中获得优于10 ps的时间分辨率和优于300 μm的空间分辨率^[16-17]。

收稿日期:2014-07-20;收到修改稿日期:2015-08-15;网络出版日期:2015-12-23

基金项目:国家自然科学基金(11305107),广西教育厅科研项目(LX2014125)

作者简介:白雁力(1979—),男,博士,主要从事超快诊断方面的研究。E-mail: bayaly@szu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: jhlong@szu.edu.cn

时间展宽分幅管在结构上与传统MCP分幅管不同,其主要由阴极,阳极,漂移区和传统MCP门控分幅管4个部分组成,其工作原理如图1所示。当入射信号照射到阴极上时,阴极将其转换为光电子,由于阴极上加有负直流电压和斜坡正脉冲,使先产生的光电子具有较大的漂移能量和加速度,所以,当光电子信号在通过漂移区传输到达MCP时,在时间上被展宽。最后,通过传统的MCP分幅管选择展宽后的部分光电子信号从而提高时间分辨率。文献[16-17]提到像管时间分辨率由电子束放大倍率和MCP门控时间确定,而电子束放大倍率则与斜坡脉冲,漂移距离和阴极电压三者相关。另外指出,在均匀磁场下,阴极空间分辨率由阴极材质(Au或CsI)和阴极磁场强度决定。采用Au作为阴极,当阴极磁场强度为300 G时,空间分辨率约为500 μm ;而采用CsI作为阴极,当阴极磁场强度为500 G时,空间分辨率优于300 μm 。

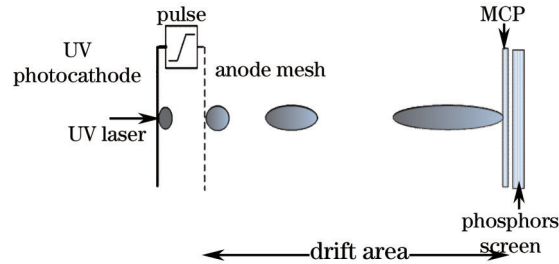


图1 时间展宽分幅变像管工作原理

Fig.1 Working principle of pulse-dilation framing tube

在采用均匀磁场成像的分幅管基础上^[15-17],本课题组在文献[10]中提出一种短磁聚焦分幅管。采用单透镜成像时,其空间分辨率约为80 μm ,但该像管在阴极离轴距离较大时,空间分辨特性不理想。因此,对提高短磁聚焦时间展宽分幅管空间分辨特性的研究,具有重要的理论和实践意义。在本文中,针对单磁透镜像管在离轴位置空间分辨率特性不理想的问题,采用双磁透镜设计像管,通过对空间分辨特性模拟和测试,详细分析双磁透镜对时间展宽分幅管性能的影响。

2 主要研究内容与结果

2.1 双磁透镜时间展宽分幅管的空间分辨率模拟与测试

2.1.1 磁透镜和像管模型描述

在时间展宽分幅管中,磁透镜用于电子成像。图2是磁透镜结构,由软铁壳和线圈组成,其参数^[10]如下:软铁壳外径 $\Phi=256\text{ mm}$,内径 $\Phi=160\text{ mm}$,磁透镜轴上距离是100 mm,狭缝宽度为4 mm。载流线圈产生的磁场从狭缝漏到变像管中,在漂移区内形成轴对称磁场。在像管成像比例为1:1时,单透镜像管模型已经在文献[10]提到,双透镜像管模型如图3(a)所示。阴极和阳极之间的加速距离为1 mm,其加速电场强度为3 kV/mm,从阳极到成像面的漂移距离为500 mm。在阴极中心达到最佳成像时,两个模型在漂移区中的轴上磁场分布图3(b)所示。

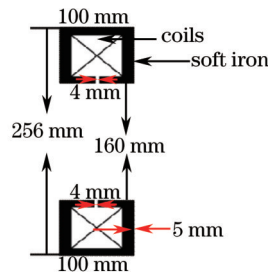


图2 磁透镜及其参数

Fig.2 Magnetic lens and its parameter

2.1.2 空间分辨率模拟和测试

像管空间分辨率模拟采用方法^[10]如下:首先,从阴极上某一点同时发射若干个光电子,由于光电子的初始参量存在差异,并经过加速和长距离漂移,因此在成像面观察到的是一个电子分布;然后,根据成像点位置,计算成像分布的均方根半径;最后,通过调制传递函数(MTF)计算调制度和空间频率的关系。通常将

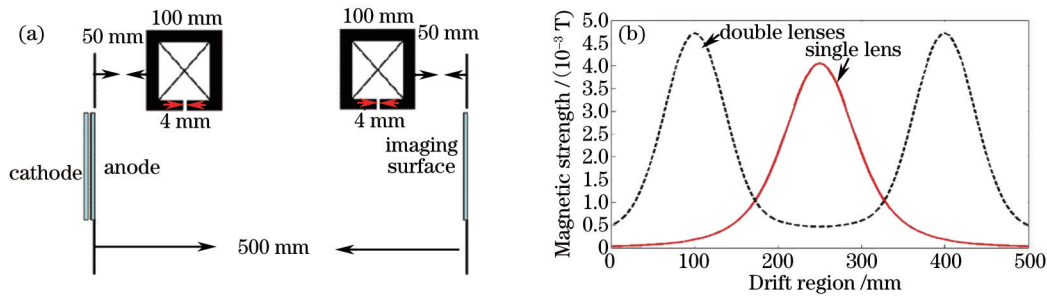


图3 像管模型和磁场强度。(a) 双透镜像管; (b) 轴上磁场强度

Fig.3 Model of tube and magnetic strength. (a) Tube using double magnetic lenses; (b) magnetic strength along axis

MTF 曲线强度下降至 0.1 时, 对应的空间频率定义为变像管的空间频率。调制传递函数表达式为

$$M = \exp[-(\pi \overline{\Delta r} f)^2], \quad (1)$$

$$\overline{\Delta r} = \sqrt{(\overline{\Delta x})^2 + (\overline{\Delta y})^2}, \quad (2)$$

式中 $\overline{\Delta r}$ 是系统均方根半径, f 为空间频率, Δx , Δy 分别为在像面上的落点距理想像点在 x, y 方向的距离。

阴极产生的光电子初始参量为: 初能服从 $0 \sim 1$ eV 的 $\beta(1,4)$ 分布, 发射仰角服从余弦分布, 方位角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 上均匀分布, 初始位置服从均匀分布, 具体模拟过程参照文献[10]。

空间分辨率模拟结果如图 4 所示, 其中图 4(a) 是阴极中心调制传递函数曲线。当 MTF 下降到 0.1 时, 单透镜空间频率为 16.61 lp/mm, 双透镜空间频率为 22 lp/mm。通过空间频率与系统均方根半径的关系, 可知单透镜像管阴极中心的空间分辨率为 $60 \mu\text{m}$, 双透镜为 $45 \mu\text{m}$ 。图 4(b) 是阴极轴上空间分辨率。由于单透镜像管在离轴距离大于 15 mm 后, 空间分辨率已大于 $1000 \mu\text{m}$, 因此在模拟中不考虑。由轴上空间分辨率对比可知, 双透镜像管的空间分辨优于单透镜。

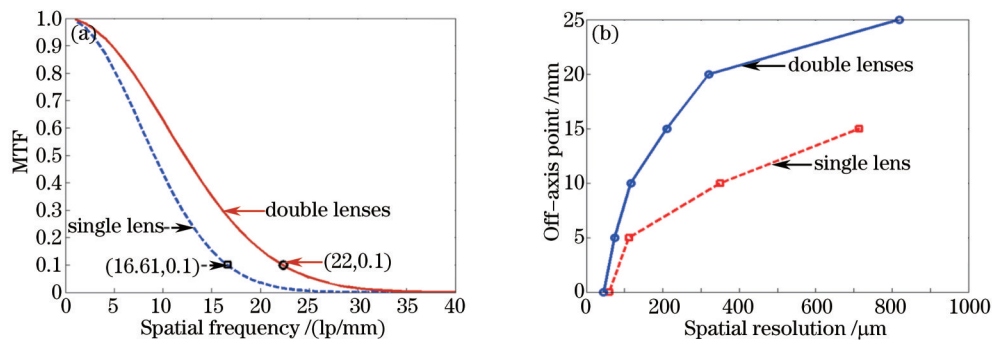


图4 空间分辨率模拟。(a) 阴极中心点的调制传递函数曲线; (b) 轴上空间分辨率

Fig.4 Spatial resolution simulation. (a) Curve of MTF at centre of cathode; (b) spatial resolution of off-axis points

时间展宽分幅管的空间分辨率测试装置和测试过程在文献[10]中已经介绍。测试条件如下: 阴极电压为 -3 kV, MCP 电压为 -560 V, 屏压为 3.4 kV, 采用 $2''$ 石英分辨率板。图 5(a) 为文献[10]的单透镜测试结果, 能清晰观察到第 5 组的 4 个方向; 图 5(b) 为双透镜测试结果, 能清晰观察到第 6 组的 4 个方向。 $2''$ 石英分辨率板单元号为 5 时, 条纹宽度为 $15.9 \mu\text{m}$; 单元号为 6 时, 条纹宽度为 $15 \mu\text{m}$ 。平行光管放大 2.5 倍, 采用文献[10,18]的方法计算空间分辨率, 单透镜为 12.5 lp/mm, 即 $80 \mu\text{m}$; 双透镜为 13.5 lp/mm, 即 $74 \mu\text{m}$ 。测试结果表明, 双透镜像管的空间分辨率优于单透镜。

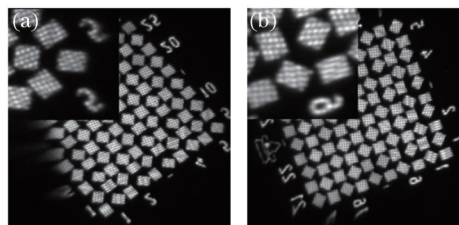


图5 空间分辨率测试结果。(a) 单透镜像管; (b) 双透镜像管

Fig.5 Measured result of spatial resolution. (a) Single lens; (b) double lenses

2.2 时间展宽分幅管在离轴位置的空间分辨特性测试

随着分幅像管时间分辨率的提高,对画幅尺寸和事件时间记录长度的要求也不断提高。传统MCP分幅管为增大画幅尺寸和增加时间记录长度,采用宽微带或大面积的MCP实现^[12,18-20],由于时间展宽分幅管的阴极与MCP分离,因此只有采用大面积阴极,才能实现画幅尺寸的增大。

采用大面积阴极的像管测试系统结构如图6(a)所示。紫外灯直接照射在阴极上,阴极将紫外光转换为光电子,光电子经加速和漂移区传输,成像在MCP上,MCP再将光电子倍增,倍增后的光电子经屏压加速轰击荧光屏形成可见光图像。用图像传感器(CCD)采集荧光屏上所成的阴极图像,并在计算机上观测,测试条件同空间分辨率测试时相同。MCP是尺寸为40 mm×8 mm的微带结构,阴极是尺寸为72 mm×12 mm的微带结构。阴极由6组分辨率板组成,每组包含16个小方块,每个小方块边长为3 mm,每两个方块表示线对的横向和纵向。线对分别为2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30和35 lp/mm。

由于MCP的尺寸小于阴极,所以为保证阴极图像能完全成像在MCP微带上,在测试中通过缩小1倍阴极图像来实现。测试结果如图6所示,图6(b)为单透镜缩小1倍时的图像,以黑点为中心,左右分辨出4.5个分辨率板,即阴极上能探测到的最大离轴点位置是:4.5×3 mm=13.5 mm。图6(c)为双透镜缩小1倍时的图像,以黑点为中心,左右分辨出现10个分辨率板,因此,在双透镜图像缩小1倍时,阴极上能探测到的最大离轴点位置是:10×3 mm=30 mm。经测试结果对比,双透镜具有更大的探测范围,且离轴位置的空间分辨率也优于单透镜。

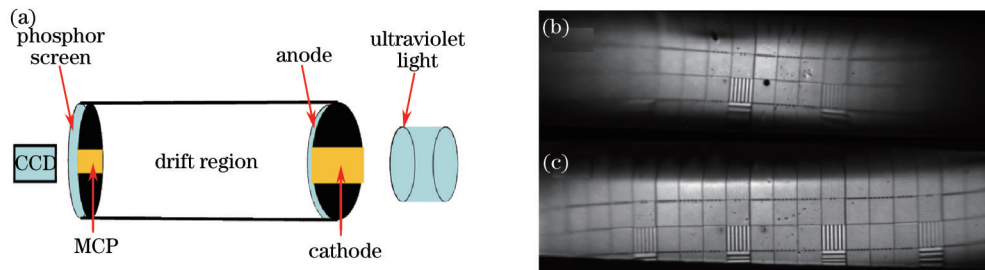


图6 实验系统和测试结果。(a) 实验装置;(b) 单透镜像管测试结果;(c) 双透镜像管测试结果
Fig.6 Experimental system and results. (a) Experimental setup; (b) testing result of single lens;
(c) testing result of double lenses

3 结 论

研究了采用双磁透镜时间展宽分幅变像管的空间分辨特性。对单、双磁透镜时间展宽分幅管的空间分辨率进行模拟和测试,并采用大面积阴极测试像管在阴极离轴位置的空间分辨能力。测试结果表明,在像管成像比例为1:1时,采用双磁透镜的时间展宽分幅管空间分辨率为74 μm,优于单透镜像管。在采用大面积阴极和像管成像缩小1倍时,双磁透镜的时间展宽分幅管可分辨到距离阴极中心点30 mm处的图像,远远优于单透镜的离轴距离13.5 mm,因此双透镜像管比单透镜像管更易于实现画幅尺寸增大。综上所述,采用双磁透镜设计能显著提高时间展宽分幅变像管的空间分辨特性。

参 考 文 献

- 1 S H Glenzer, B J MacGowan, P Michel, *et al.*. Symmetric inertial confinement fusion implosions at ultra-high laser energies[J]. *Science*, 2010, 327(5970): 1228-1231.
- 2 Shaoen Jiang, Longfei Jing, Yunbao Huang, *et al.*. Novel free-form hohlraum shape design and optimization for laser-driven inertial confinement fusion[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(10): 102710.
- 3 A N Simakov, D C Wilson, S A. Yi, *et al.*. Optimized beryllium target design for indirectly driven inertial confinement fusion experiments on the national ignition facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(2): 022701.
- 4 Oertel 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.
- 5 Bell P 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.

- 6 Xiong Gang, Hu Zhimin, Li Hang, *et al.*. One-dimensional space resolving flat-field holographic grating soft X-ray framing camera spectrograph for laser plasma diagnostics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(4): 043109.
- 7 Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Niu Lihong, *et al.*. Non-gain microchannel plate gated framing camera[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(5): 056102.
- 8 Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, *et al.*. Investigation of picosecond X-ray framing camera[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2012, 29(2): 123-128.
蔡厚智, 刘进元, 彭翔, 等. X射线皮秒分幅相机的研[J]. *深圳大学学报理工版*, 2012, 29(2): 123-128.
- 9 Bai Yanli, Zhang Chi, Zhang Jingjin. X-ray framing camera review[J]. *Video Engineering*, 2013, 37(19): 254-257.
白雁力, 张驰, 张敬金. X射线分幅相机发展研究[J]. *电视技术*, 2013, 37(19): 254-257.
- 10 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.
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.
- 11 D K Bradley, P M Bell, O L Landen, *et al.*. Development and characterization of a pair of 30-40 ps X-ray framing cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66 (1): 716-718.
- 12 J A Oertel, T N Archuleta, L S Schrank. The large format X-ray imager[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 701-704.
- 13 J P Holder, K W Piston, D K Bradley, *et al.*. Further development of a single line of sight X-ray framing camera[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 2191-2193.
- 14 Jinyuan Liu, Lihong Niu, Wenda Peng, *et al.*. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(5): 055104.
- 15 T J Hilsabeck, J D Hares, J D Kilkenny, *et al.*. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- 16 S R Nagel, T J Hilsabeck, P M Bell, *et al.*. Dilation X-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10E116.
- 17 S R Nagel, T J Hilsabeck, P M Bell, *et al.*. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E504.
- 18 Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, *et al.*. Design of an X-ray framing camera with wide microstrip line[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0117001.
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.
- 19 Houzhi Cai, Jinyuan Liu, Xiang Peng, *et al.*. Large-format microchannel plate gated framing camera [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2012, 677: 14-17.
- 20 Cai Houzhi, Long Jinghua, Liu Jinyuan, *et al.*. Investigation of large-format microchannel plate gated X-ray framing camera[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2013, 30 (1): 30-34.
蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 大面积 MCP 选通 X 射线分幅相机的研制[J]. *深圳大学学报理工版*, 2013, 30(1): 30-34.

栏目编辑: 宋梅梅