

脉冲展宽分幅技术曝光时间的误差分析及修正

白雁力, 姚荣彬, 高海英

桂林电子科技大学教学实践部, 广西 桂林 541004

摘要 脉冲展宽技术能够有效提升分幅变像管的时间性能,但脉冲晃动引起的曝光时间抖动则使像管可靠性降低。为探讨曝光时间抖动的成因和改善方法,对曝光时间进行测试、误差分析和修正。通过对200幅动态图像进行分析,结果显示脉冲晃动和展宽斜率非一致性引起曝光时间的抖动范围为11~26 ps,根据展宽脉冲的特点和曝光时间的分布比例,采用加权均值法获得像管曝光时间评估值为~17.3 ps;采用展宽脉冲初始幅值修正同步电压,使曝光时间测量值与理论值之间的偏差从~9.8%降低到~1.7%,有效地提升了测量值的可信度。研究结果为像管曝光时间可靠性的提升提供了理论指导和技术支持。

关键词 超快光学; 惯性约束聚变; 分幅变像管; 脉冲展宽技术; 曝光时间; 脉冲晃动

中图分类号 TN143; O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.063201

Error Analysis and Modification of Exposure Time of Pulse-Dilation Framing Technology

Bai Yanli, Yao Rongbin, Gao Haiying

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

Abstract The temporal performance of framing tube can be effectively promoted by pulse-dilation technology. However, the pulse jitter causes the exposure time jitter, which reduces the reliability of the tube. In order to discuss the reason and the improvement method of the exposure time jitter, the measurement, errors analysis and modification of exposure time are carried out. The results of the analysis of 200 dynamic images show that the jitter scope of the exposure time, caused by pulse jitter and inconsistency of dilation slope, is in the range of 11-26 ps. And the evaluation value of the exposure time of the tube is about 17.3 ps by using weighted means method according to the characteristics of dilation pulse and the distribution ratio of exposure time. Using the initial amplitude of the stretching pulse to correct the synchronization voltage, the deviation between the measurement value of the exposure time measurement and the theoretical value is reduced from ~9.8% to ~1.7%, which effectively increases the credibility of the measurement value. The study results provide the theoretical reference and technical support for the improvement of the reliability of the exposure time of the tube.

Key words ultrafast optics; inertial confinement fusion; framing tube; pulse-dilation technology; exposure time; pulse jitter

OCIS codes 320.7080; 320.7160; 230.0250

1 引言

分幅变像管是具有一维时间和二维空间分辨能力的超快诊断设备,在惯性约束聚变(ICF)实验中,分幅变像管可用于测量聚变燃烧阶段持续时间和获

取内爆压缩动态图像二维空间分布^[1-2]。目前,实用化微通道板(MCP)行波选通分幅变像管的曝光时间为60~100 ps^[3-4]。随着ICF实验对高时间分辨的需求,国内外研究者将脉冲展宽技术和MCP行波选通分幅变像管相结合,研制出最短曝光时间优

收稿日期: 2017-12-25; 收到修改稿日期: 2018-01-05

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)、广西高校中青年教师基础能力提升项目(2017KY0199)

作者简介: 白雁力(1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电子技术和超快诊断方面的研究。

E-mail: bayaly@guet.edu.cn

于 10 ps 的分幅变像管^[5-13]。虽然脉冲展宽技术的应用可将分幅变像管曝光时间提升一个量级,但文献[9]中美国脉冲展宽分幅变像管(DIXI)的实验结果显示,当展宽脉冲在阴极上传输时,由于脉冲晃动及采集信号的同步电压差异,使各针孔图像曝光时间呈现出不一致的现象,这不仅降低了像管曝光时间的可信度,而且无法科学评估其时间性能。因此,分析像管曝光时间存在误差的原因和探讨其改善方法,对像管在 ICF 实验中的应用及其进一步发展具有重要的理论和实践意义。

通常评估 MCP 分幅变像管时间性能的指标是最短曝光时间^[3-4],但由于脉冲展宽分幅变像管的曝光时间与展宽脉冲斜率密切相关,且实验中展宽脉冲很难实现理想线性上升(即由不同斜率的脉冲段组成),因此只要采集信号同步在展宽脉冲不同斜率的脉冲段上,就会产生较大的测量误差,所以仅采用最短曝光时间并不能科学评价其时间性能。为此,本文通过测试和分析曝光时间,统计同步在展宽脉冲不同斜率脉冲段上的曝光时间分布比例,根据曝光时间数值和占比,采用加权均值理论降低曝光时间测量误差,科学评估变像管的时间性能。本文首先

介绍脉冲展宽型分幅技术工作原理,然后搭建实验系统测试曝光时间,最后分析曝光时间产生误差的原因,并通过测试结果采用加权均值理论和展宽脉冲初始幅值特性,修正曝光时间和理论同步电压,提升曝光时间可信度,以及理论与实验结果的一致性。以此期望能为高时间分辨分幅技术性能的优化和在实际应用中的可靠性提升提供理论指导和技术支持。

2 脉冲展宽型分幅技术工作原理

采用组合磁透镜成像的脉冲展宽型分幅变像管^[7]主要由光电阴极、栅网、光电子漂移区、双磁透镜和 MCP 选通分幅变像管组成,其结构如图 1 所示。系统阴极将入射激光脉冲转换为光电子信号,由于阴栅间加载理想线性上升的展宽脉冲,因此先产生的光电子较后产生的光电子具有更大的加速度,所以光电子信号在通过长距离传输后到达 MCP 时,其轴向宽度(即时间宽度)被展宽,最后采用 MCP 选通分幅变像管对展宽后的光电子信号进行测量,从而获得更短的曝光时间。两个磁透镜构成的组合透镜是像管成像系统,可以确保阴极微带上产生的电子图像成像在 MCP 微带阴极上。

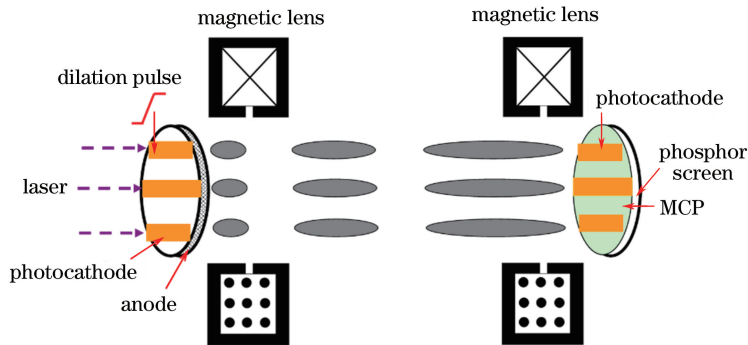


图 1 采用组合透镜成像的脉冲展宽型分幅变像管

Fig. 1 Pulse-dilation framing tube using composite lens imaging

3 系统曝光时间测试和分析

3.1 曝光时间测试系统和方法

曝光时间测试系统如图 2(a)所示,飞秒激光器产生波长为 266 nm 和 400 nm 的两路激光脉冲,其中 266 nm 紫外(UV)光脉冲通过 45°全反透镜 M1 和 M2 后,直接照射到光纤束的输入面上,然后通过平行光管将光纤束图像成像在变像管的阴极上;400 nm 红光脉冲送入 PIN 光电转换探测器,产生可触发皮秒高压脉冲发生器工作的同步

信号。通过调节延时单元,使光纤束图像与展宽脉冲到达系统阴极的时间同步,以及展宽后的光电子信号与选通脉冲到达 MCP 微带的时间同步,以此获得变像管的动态图像。光纤束由 30 根多模光纤组成,纤芯直径为 0.5 mm,其输出面如图 2(b)所示,在输出面上根据光纤长度依次排列并编号,最短的光纤编号为 1,编号增加 1,光纤长度增加 2 mm,紫外光在光纤中的传输时间就增加 10 ps,从而使得光纤束的 30 个光点到达时间均匀地增加。

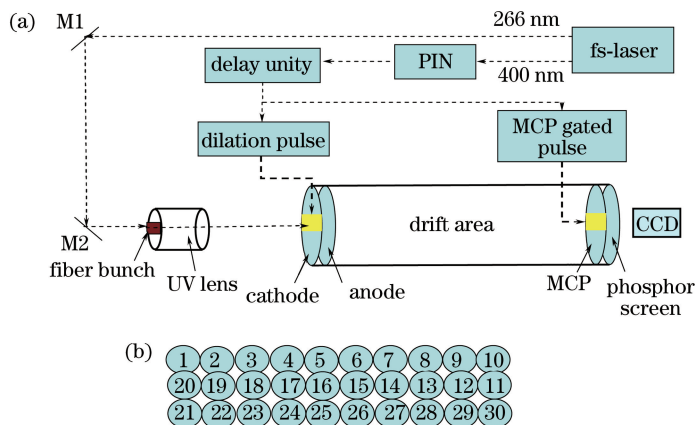


图2 测试装置。(a)测试系统;(b) 10 ps 延时光纤束

Fig. 2 Test device. (a) Test system; (b) 10 ps delayed fiber bundle

3.2 曝光时间测试结果

分幅变像管的曝光时间通常指 MCP 的某一点对电子的开通时间,通过 MCP 微带阴极“增益-时间”曲线的半峰全宽(FWHM)进行标定。测试采用的 MCP 选通脉冲如图 3(a)所示,其幅值和半峰全

宽分别为 -1.5 kV 和 ~ 220 ps;阴极展宽脉冲如图 3(b)所示,通过 6 GHz 带宽示波器的测量,展宽脉冲在 $P_{\text{pulse_start}}$ 至 $P_{\text{pulse_end}}$ 约 100 ps 区域内上升幅度最快,其局部放大如图 3(b)插图所示,在 100 ps 内脉冲幅值从 0.252 kV 上升到 0.428 kV。

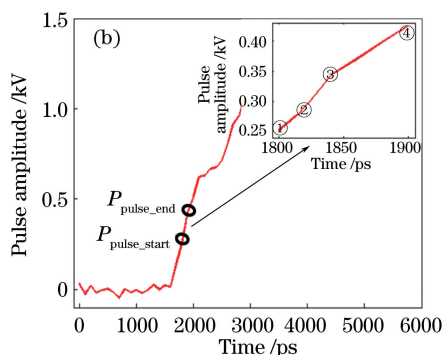
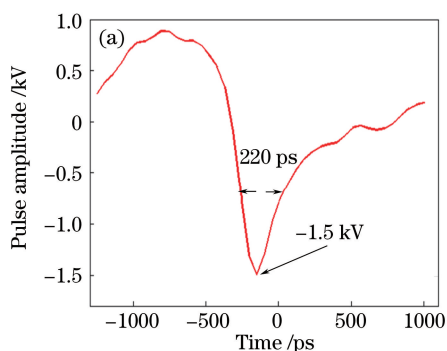


图3 电脉冲参数。(a) MCP 选通脉冲;(b)阴极展宽脉冲

Fig. 3 Electric pulse parameters. (a) MCP gating pulse; (b) cathode dilation pulse

当阴极加载电压为 -3 kV、栅网接地、MCP 和荧光屏的加载电压分别为 -500 V 和 3.4 kV 时,脉冲展宽型分幅变像管曝光时间测试结果如图 4 所示,其中图 4(a)为静态图像;图 4(b)~(d)为同步在展宽脉冲 $P_{\text{pulse_start}}$ 至 $P_{\text{pulse_end}}$ 段的三种典型动态图像,这是由于展宽脉冲的①~②段、②~③段和③~④段的展宽斜率非一致且存在脉冲晃动,在采集的 200 幅有效动态图像中,与图 4(b)~(d)获得相同光纤点个数的图像分别为 58 幅、94 幅和 48 幅。

根据静态和动态图像,采用文献[6]的方法,通过光纤束点个数估算分幅变像管的曝光时间。首先将动态和静态图像进行归一化处理;然后将归一化动态图像光强的空间分布换算成时间分布;最后采用高斯曲线拟合测量结果,将曲线半峰

全宽定义为曝光时间。三幅典型动态图像的曝光时间计算结果如图 4(e)~(g)所示,图 4(b)、(c)和 (d)的曝光时间分别为 26, 11, 19 ps, 根据三种典型动态图像在采集图像中的比例,其曝光时间的占比分别为 29%, 47%, 24%。为了降低展宽脉冲晃动引起的测量误差,本研究采用加权均值法,可以表示为:

$$\bar{T}_{\text{dilation}} = \sum_{i=1}^n T_i \times \sigma_i, \quad (1)$$

式中 $\bar{T}_{\text{dilation}}$ 为平均曝光时间; T_i 为第 i 幅动态图像的曝光时间(ps); σ_i 为该曝光时间的占比(%)。修正像管同步在展宽脉冲 $P_{\text{pulse_start}}$ 至 $P_{\text{pulse_end}}$ 段的曝光时间 $\bar{T}_{\text{dilation}}$ 为 ~ 17.3 ps。

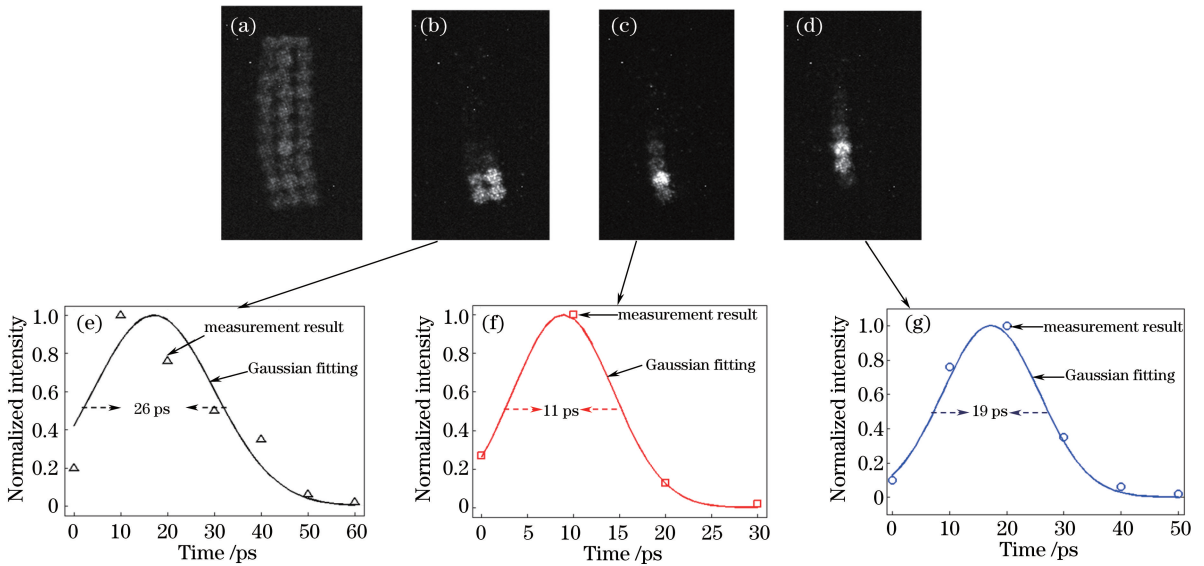


图4 测试结果。(a)静态图像;(b)~(d)三种典型动态图像;(e)~(g)三种典型动态图像的曝光时间

Fig. 4 Measurement results. (a) Static image; (b)~(d) three kinds of typical dynamic images; (e)~(g) exposure times of three kinds of typical dynamic images

3.3 曝光时间误差分析及修正

根据文献[5-6],脉冲展宽型分幅变像管曝光时间理论计算可以表示为:

$$T_{\text{dilation}} = T_{\text{MCP}}/M, \quad (2)$$

式中 T_{dilation} 为脉冲展宽型像管曝光时间, T_{MCP} 为MCP像管曝光时间, M 为脉冲展宽倍率。

假设阴极电压为 Φ (单位为 V), 展宽脉冲斜率为 α (单位为 V/ps), 漂移区长度为 L (单位为 m), 两光电子 e_{p_0} 和 e_{p_1} 进入漂移区的时刻分别为 t_0 和 t_1 , 通过漂移区后展宽倍率 M 可以表示为:

$$M = \frac{t'_1 - t'_0}{t_1 - t_0}, \quad (3)$$

$$t'_1 = L / \sqrt{2e\Phi_1/m} + t_1, \quad (4)$$

$$t'_0 = L / \sqrt{2e\Phi_0/m} + t_0, \quad (5)$$

$$\Phi_1 = |\Phi|, \quad (6)$$

$$\Phi_0 = \Phi_1 - \alpha \cdot (t_1 - t_0), \quad (7)$$

式中 t'_0 和 t'_1 分别为 e_{p_0} 和 e_{p_1} 通过漂移区的时间; Φ_0 和 Φ_1 分别为 e_{p_0} 和 e_{p_1} 的加速电压; m 和 e 分别为电子质量和电荷量。

根据(2)~(7)式, 测试时采用的参数为: 阴极电压 Φ 为 -3 kV、漂移距离 L 为 0.5 m; MCP分幅变像管曝光时间 T_{MCP} 为 ~ 105 ps, 如图5所示。展宽脉冲的平均上升斜率 α 为 1.76 V/ps [图3(b)所示的 100 ps 内脉冲幅值从 0.252 kV 上升到 0.428 kV]。计算得出像管曝光时间理论值为 ~ 19 ps, 与实际测量值 17.3 ps 的偏差为 $\sim 9.8\%$ 。

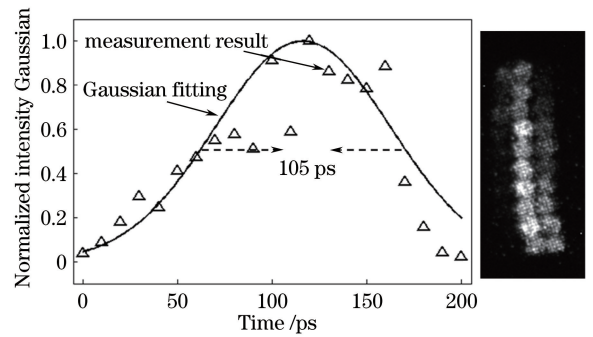


图5 MCP分幅变像管曝光时间

Fig. 5 Exposure time of MCP framing tube

通过测试和计算分析, 在同一展宽脉冲斜率下, 引起曝光时间理论值和测量值产生偏差的原因主要是电子加速能量, 即阴极电压 Φ 。由于没有考虑展宽脉冲初始幅值的动态性, 在理论计算中 Φ 设定为 -3 kV, 而在测试中, Φ 则是原阴极电压与展宽脉冲初始幅值的叠加, 假设展宽脉冲初始位置的电压幅值为 Φ' (单位为 V), 那么(6)式可修正为:

$$\Phi_1 = |\Phi| - |\Phi'|, \quad (8)$$

式中 Φ_1 为加速电压修正值; Φ 为原加速电压; Φ' 为展宽脉冲初始位置电压幅值。由于展宽脉冲 $P_{\text{pulse_start}}$ 处的电压为 0.252 kV, 所以修正后的阴极电压 Φ 为 -2.748 kV。采用(2)~(8)式计算得到修正后的曝光时间理论值为 ~ 17 ps, 与测量值 17.3 ps 的误差为 $\sim 1.7\%$ 。

4 结 论

采用 10 ps 延时光纤束测试脉冲展宽型分幅变像管的曝光时间,运用加权均值法修正测量值,分析曝光时间理论值与测量值之间存在偏差的原因,探讨降低偏差和提升曝光时间科学性的方法。研究结果表明:在 200 幅有效动态图像中,脉冲晃动和展宽斜率非一致性引起曝光时间的抖动范围为 11~26 ps,为降低抖动影响和提升曝光时间的合理性,采用加权均值定理将其修正为~17.3 ps;测试中同步电压的动态性引起曝光时间测量值与理论值产生偏差,为此结合展宽脉冲初始幅值修正理论同步电压,将两者偏差从~9.8%下降到~1.7%。研究结论为脉冲展宽型分幅变像管曝光时间可靠性的提升以及科学分析像管的不足提供理论依据。在今后的工作中要从以下两方面进行研究,一方面采用高精度器件提升电脉冲触发稳定性,减小脉冲晃动;另一方面设计具有周期性的展宽脉冲,以此降低曝光时间误差和提升变像管在 ICF 实验中的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Yuan Z, Dong J J, Li J, *et al.* Calibration of the dynamic spatial resolution of framing image-converter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(9): 095202.
袁铮, 董建军, 李晋, 等. 分幅变像管动态空间分辨率的标定[J]. *物理学报*, 2016, 65(9): 095202.
- [3] Bai X H, Bai Y L, Liu B Y, *et al.* SG diagnostic equipment: gating pinhole framing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 367-373.
白晓红, 白永林, 刘百玉, 等. 神光原型诊断设备: 门控针孔分幅相机的研制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 367-373.
- [4] Cai H Z, Liu J Y, Peng X, *et al.* Design of an X-ray framing camera with wide microstrip line [J]. *Chinese Journal of 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.

- [5] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, *et al.* Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- [6] Bai Y L, Long J H, Liu J Y, *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.
- [7] Bai Y L, Long J H, Cai H Z, *et al.* Influence of double magnetic lenses on performance of pulse-dilation framing tube [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 013201.
白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 013201.
- [8] Cai H Z, Zhao X, Liu J Y, *et al.* Dilation framing camera with 4 ps resolution [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(1): 016101.
- [9] Hilsabeck T J, Nagel S R, Hares J D, *et al.* Picosecond imaging of inertial confinement fusion plasmas using electron pulse-dilation [C]. *International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*, 2016: 103280S.
- [10] Lei Y F, Long J H, Liu J Y, *et al.* Design of framing image tube with large detection area [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904009.
雷云飞, 龙井华, 刘进元, 等. 大探测面积分幅变像管设计 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904009.
- [11] Bai Y L. The influence of magnetic field on the spatial resolution of pulse-dilation framing tube [C]. *International Conference on Management, Information and Communication*, 2017: 356-363.
- [12] Cai H, Fu W, Bai Y, *et al.* Simulation of a dilation x-ray framing camera [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2017, 26(4): 043003.
- [13] Liao Y B, Long J H, Cai H Z, *et al.* Spatial resolution performance comparison of magnetic double-lens and single-lens framing tubes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0520002.
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.