

文章编号:1004-4213(2010)12-2190-4

# 动态范围 2000 的皮秒时间分辨软 X 射线扫描相机\*

廖华<sup>1</sup>, 胡昕<sup>2</sup>, 杨勤劳<sup>1</sup>, 牛丽红<sup>1</sup>, 张劲松<sup>1</sup>, 周军兰<sup>1</sup>

(1 深圳大学 光电子学研究所; 光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060)

(2 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 优化设计和研制了一种旨在获得大的动态范围的皮秒时间分辨软 X 射线扫描相机系统。该相机阴极有效面积  $\Phi 30$  mm, 聚焦电压 8 kV, 有效防止了打火对动态范围的影响; 摒弃了微通道板内增强器, 引入了后加速系统, 以保证足够高的荧光屏量子效率; 采用了大动态范围的像增强器进行图像外增强。借助于皮秒激光器动态测试和标定系统对其性能进行了实验评价, 获得了动态范围大于 2 000 的结果。

**关键词:** 动态范围; 后加速; 外增强; 扫描相机

**中图分类号:** TN143; TL65

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103912.2190

## 0 引言

在惯性约束聚变和核爆模拟实验中, 变像管扫描相机是非常重要的诊断工具。靶目标区域高温等离子体产生的 X 射线辐射强度空间分布、时间演化、能谱及其时间演化等的诊断都离不开变像管扫描相机。由于 X 射线辐射强度相差很大, 没有足够动态范围的扫描相机, 即使时间分辨率再高, 实用价值也是很有限的。因此, 在变像管扫描相机的实际应用中, 动态范围是非常重要的性能指标<sup>[1-4]</sup>。

现有的变像管扫描相机的动态范围一般在 100 左右, 而且与具体的诊断对象有关, 最高能够达到 1 000。文献[5]研制了一种大动态范围的软 X 射线扫描变像管及相机系统, 按照比较严格的定义和测试, 动态范围达到了 922。在此工作的基础上, 根据现场使用情况的反馈, 对变像管及相机系统进行了重新优化设计, 降低了聚焦电压, 引入了后加速系统, 以保证足够高的荧光屏量子效率, 并采用了大动态范围的像增强器进行图像外增强。借助于钇铝石榴石(Yttrium Aluminium Garnet, YAG)皮秒激光器动态性能测试和标定系统, 对相机性能进行了实验评价, 实测动态范围达到了 2 000 以上。

## 1 扫描变像管

变像管是扫描相机的核心部件, 其性能直接影响到相机系统的整体性能。优化设计的变像管电子

光学系统见图 1。在已有研究工作和理论分析的基础上, 主要做了两方面的改进:



图 1 扫描变像管电子光学结构

Fig. 1 Electron optics configuration of our streak image tube

1) 适当降低了聚焦电压(电压及其它参量见表 1), 阳极电压控制在 8 kV。这样既有效防止了高压打火, 又有利于提高偏转系统的偏转灵敏度(76 mm/kV);

表 1 扫描变像管电压配置

Table 1 The potential configuration of streak image tube

Electrode	P/C	M	F <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	P/S
Potential/kV	0	7	4.2	7	1.1	8	18

2) 引入了后加速系统。设计的后加速系统在结构上和阴极后的加速栅网类似, 让电子通过一个狭窄的平面加速场, 在不改变电子的径向速度的情况下, 强行大幅度提高所有电子的轴向速度, 使电子以很高的速度上靶, 大幅度提高荧光屏的量子效率。通常微通道板(MicroChannel Plate, MCP)内增强变像管的荧光屏电压是 5 kV 左右, 采用后加速技术后, 电压可以提高到 10 kV 以上。

## 2 动态测试

扫描相机动态测试系统及其示意图如图 2。扫描相机系统由扫描变像管、包括扫描电路在内的控制电路、大动态像增强器和电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)读出系统组成。动态测试系

\* 国家高技术研究发展计划(2008AA8040071)资助

Tel: 0755-26538552

Email: liaoh@szu.edu.cn

收稿日期: 2010-06-29

修回日期: 2010-09-02

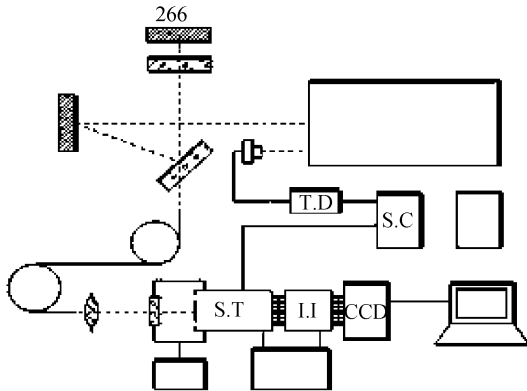


图 2 动态测试系统示意图  
Fig. 2 Sketch of the dynamic testing system

统由四倍频 Nd : YAG 脉冲激光器(中心波长 266 nm,脉冲宽度 30~40 ps)、紫外光标准具(光程 119 mm,时间间隔 393 ps)、延迟光路、真空机组等组成。

### 2.1 空间分辨特性的测量

X 光扫描相机的光阴极采用衬底为石英、带有狭缝形分辨率图案的金光阴极。分辨率图案分为 3 段,中间为 15 lp/mm,两端为 10 lp/mm。紫外光源均匀照亮光阴极,考察 CCD 读出系统获得的分划板所成的像,即可判断空间分辨率。

图 3 和图 4 分别是测得的静态空间分辨和动态空间分辨狭缝像。由图 3 可见,静态空间分辨率为 15 lp/mm。由图 4 可见,动态空间分辨率 15 lp/mm。由于受到分划板的限制,无法测到更高的空间分辨率,只能说静态空间分辨率和动态空间分辨率都在 15 lp/mm 以上。

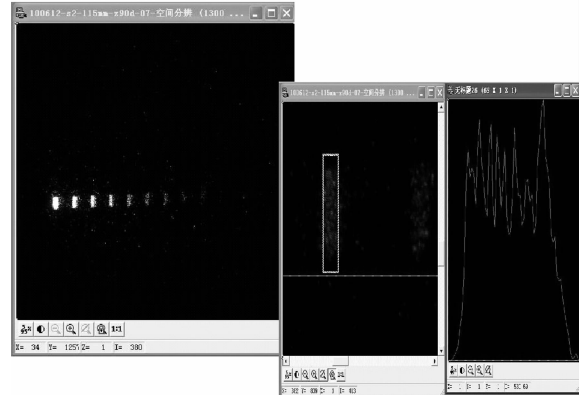


图 4 动态扫描像  
Fig. 4 Streak image of slit

### 2.2 动态范围的测量

变像管条纹相机动态范围的定义为

$$D = I_{\max} / I_{\min} \tag{1}$$

式中  $I_{\max}$  为时间展宽  $\leq 20\%$  的脉冲的最大强度,  $I_{\min}$  为最小可分辨脉冲的强度。根据输出脉冲幅度的最大与最小的比值就可确定相机的动态范围。

测试条件为:皮秒 YAG 激光器,脉冲宽度约 30 ps;标准具时间间隔 393 ps;波长:四倍频 266 nm 激光脉冲。由于标准具输出的序列光脉冲难于精确调整到光阴极狭缝的同一位置,导致输入光脉冲强度不能完全按照标准具的倍率变化,使动态范围的测量不能按标准具倍率计算。鉴于这一原因,采用分别计量最大和最小可分辨脉冲强度,并以最大和最小可分辨脉冲强度之比确定动态范围。此处最大脉冲强度仍指时间展宽  $\leq 20\%$  的脉冲的最大幅度。

由于选取扫描图像中不同位置会对测试结果有一定的影响,在图像中用方框标出了选取的区域。激光器的输出能量不够稳定,每次得到的动态范围测试结果会有所不同。这里列出了两组典型的动态范围测试结果(图 5 和图 6)。

图 5 中,强度最大的强度值为 58 685,脉冲宽度约 37 ps,没有出现展宽;最小脉冲强度为 404;背景噪音为 153,由此可知动态范围为

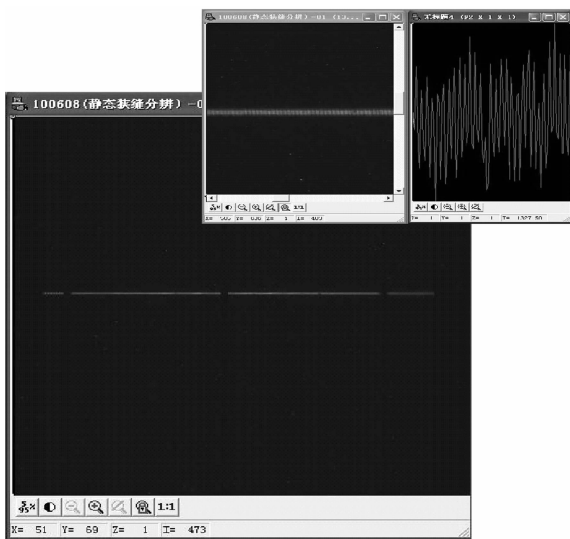


图 3 静态狭缝像  
Fig. 3 Static image of slit

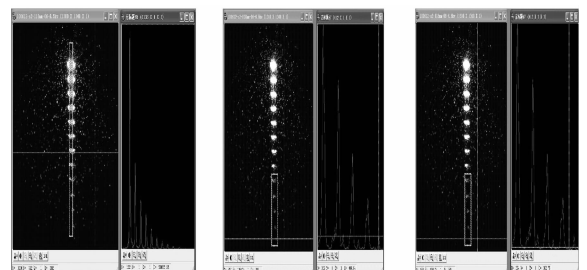


图 5 一组动态范围测试结果  
Fig. 5 A result of dynamic range testing

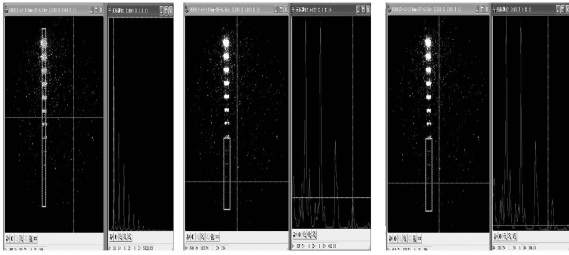


图6 第二组动态范围测试结果

Fig. 6 Another result of dynamic range testing

$$D_1 = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{(58\ 685 - 382)}{(404 - 382)} = 2\ 650 \quad (2)$$

同理,由图6可知

$$D_2 = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{(56\ 528 - 384)}{(412 - 384)} = 2005 \quad (3)$$

实验中,当动态范围达到2 650和2 005时,所测光脉冲并没有展宽.但受到实验室皮秒激光器输出光脉冲强度的限制,未能获得光脉冲展宽20%时的动态范围大小.另外,所用后加速系统视场偏小,影响了动态测试的前后端.因此只能得出该条纹相机动态范围大于2 000的结论,不能给出所能达到的最大值.

### 3 结论

在前期工作和现场测试的基础上,对扫描变像管进行了优化设计,引入了后加速系统,研制出一种新的大动态软X射线扫描相机系统.空间分辨率和动态范围的标定测量表明,动态空间分辨率为15 lp/mm、动态范围高于2 000.经过努力,各项指标仍有进一步提升的空间.

由于没有合适的短脉冲激光光源,无法测量扫描相机的另一个重要指标——时间分辨率.但有一点是可以确定的:相机的时间分辨率小于37 ps.

### 参考文献

- [1] NIU H B, DEGTYAREVA V P, PLATONOV V N, *et al.* A specially designed femtosecond streak image tube with temporal resolution of 50 fs[C]. *SPIE*, 1988, **1032**: 79-85.
- [2] LI Ji, LIAO Hua, ZHANG Huan-wen, *et al.* Design and evaluation of femtosecond streak image tube with large dynamic range[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 98-102.  
李冀, 廖华, 张焕文, 等. 大动态范围飞秒扫描变像管理论与设计与实验评价[J]. 光子学报, 2002, **31**(1): 98-102.
- [3] TIAN Jin-shou, BAI Yong-lin, LIU Bai-yu, *et al.* Theoretical design of a femto-second streak camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1786-1788.  
田进寿, 白永林, 刘百玉, 等. 飞秒条纹相机的理论设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(12): 1786-1788.
- [4] EAGLETON R T, JAMES S F. Dynamic range measurements on streak image tubes with internal external micro-channel plate image amplification[J]. *Rev of Sci Instrum*, 2003, **74**(3): 2215-2219.
- [5] LERCHE R A, MCDONALD J W, GRIFFITH R L, *et al.* Preliminary performance measurements for a streak camera with a large-format direct-coupled charge-coupled device readout[J]. *Rev of Sci Instrum*, 2004, **75**(10): 4042-4044.
- [6] GUO Bao-ping, CUNIN B, NIU Han-ben. High repetition rate trigger mode streak camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 442-444.  
郭宝平, Cunin B, 牛憨笨. 高重复频率触发模式皮秒扫描相机[J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 442-444.
- [7] LI Ji, NIU Han-ben. A new electron optics configuration for a streak image tube with large dynamic range[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2002, **13**(8): 784-786.  
李冀, 牛憨笨. 一种大动态范围扫描变像管的电子光学结构[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(8): 784-786.
- [8] YI Rong-qing, HU Xin, FENG Jie, *et al.* Study of the soft X-ray streak camera static characteristic[J]. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2000, **17**(3): 421-425.  
易荣清, 冯杰, 胡昕, 等. 软X射线条纹相机的静态性能研究[J]. 原子与分子物理学报, 2000, **17**(3): 421-425.
- [9] LIAO Hua, YANG Qin-lao, ZHANG Jin-song, *et al.* Design and testing of a streak image tube with large dynamic range for soft X ray[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 1087-1090.  
廖华, 杨勤劳, 张劲松, 等. 大动态范围软X射线扫描变像管设计与测试[J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 1087-1090.

## Soft X-ray Streak Camera with Dynamic Range of 2000 and Picosecond Temporal Resolution

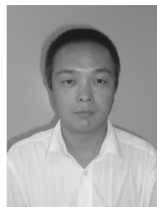
LIAO Hua<sup>1</sup>, HU Xin<sup>2</sup>, YANG Qin-lao<sup>1</sup>, NIU Li-hong<sup>1</sup>, ZHANG Jin-song<sup>1</sup>, ZHOU Jun-lan<sup>1</sup>

(1 *Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems (Ministry of Education); Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China*)

(2 *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

**Abstract:** A new streak camera with more wider dynamic range and picosecond temporal resolution for soft X-ray was developed. The photocathode's working area is 30 mm in diameter, and its focusing voltage is reduced to 8 kV to prevent electrical discharge. A post-acceleration system was introduced into the image tube for improving the phosphor screen's quantum efficiency largely, and an external image intensifier with wide dynamic range was adopted. Experimental evaluation was carried out by means of a picosecond laser, and the results show that the dynamic range of more than 2000 can be achieved.

**Key words:** Dynamic range; Post-acceleration system; External image intensifying; Streak camera



**LIAO Hua** was born in 1972, and received the Ph. D. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS. Now he works at Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, and his research interests focus on ultra-fast diagnostics.