

用于激光聚变的 X 射线条纹相机阴极检测系统

顾礼^{1,2,3}, 宗方轲^{1,2}, 李翔^{1,4}, 周军兰¹, 杨勤劳¹, 郭宝平¹

1. 深圳大学 光电工程学院 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 光电中心, 广东 深圳 518060;
4. 深圳大学 高等研究院, 广东 深圳 518060)

摘要: 研制了一套 X 射线条纹相机光电阴极检测系统, 用于激光惯性约束聚变中阴极的快速标定和检测。通过三位一体的条纹变像管设计, 条纹变像管电子光学系统的优化, 真空室、控制系统的制备, 系统的装调、集成和测试, 研制了光电阴极检测系统。组建了阴极系统静态测试平台, 标定了其静态特性, 测试结果显示: 3 条条纹像中心的偏移率在狭缝方向为 2.8%, 在垂直于狭缝方向为 6.6%, 平均放大倍率 1.29, 误差在 0.8%, 边缘空间分辨率大于 10 lp/mm。该系统可以满足激光聚变诊断研究对于 X 射线条纹相机光电阴极的检测需求。

关键词: X 射线探测器; 条纹相机; 条纹变像管; 光电阴极; 空间分辨率

中图分类号: O536; TN143 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0817002

Photocathode detection system of X-ray streak camera for laser fusion

Gu Li^{1,2,3}, Zong Fangke^{1,2}, Li Xiang^{1,4}, Zhou Junlan¹, Yang Qinlao¹, Guo Baoping¹

1. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
3. Photonics Research Centre, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
4. Institute for Advanced Study, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Photocathode detection system of X-ray streak camera was developed for the rapid calibration and detection of the cathode in laser inertia confinement fusion. Through the design of the trinity streak tube, the optimization of electronic optical system of the streak tube, the preparation of vacuum chamber and control system, the system was installed, integrated and tested, and the photocathode detection system was developed. A static test platform for the cathode system was set up and static characteristics were calibrated. The test results show that the excursion ratio of the three slits is 2.8% in the direction of the slit, 6.6% in the direction perpendicular to the slit, and the average magnification is 1.29 with the error in the range of 0.8%, edge spatial resolution better than 10 lp/mm. The newly developed system of X-ray streak camera photocathode detection can be used for the diagnostic study of laser fusion.

Key words: X-ray detector; streak camera; streak tube; photocathode; spatial resolution

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ230659); 国家自然科学基金(11705119); 广东省自然科学基金(2017A030310142); 深圳市科技计划(JCYJ20170302152748002); 深圳市科技计划项目(JCYJ20170818141442145)

作者简介: 顾礼(1983-), 男, 博士后, 主要从事超快诊断方面的研究。Email: flutelad@126.com

通讯作者: 杨勤劳(1953-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事超快诊断方面的研究。Email: qlyang@szu.edu.cn

0 引言

激光惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)是获取氢核聚变信息的重要来源,也是获取丰富氢能的重要途径^[1-3]。X 射线条纹相机是获取高温、高密度等离子体辐射连续时空变化图像的重要诊断仪器^[4-6]。光电阴极通过光电转换,把超快待测的光脉冲转换成电子脉冲,电子脉冲在时间、空间和强度上携带了光脉冲信息,这是条纹相机诊断成像的第一步^[7]。常用于 X 射线条纹相机的光电阴极有 Au 和 CsI,这两种薄膜阴极都会因长时间、高强度的 X 射线轰击而性能衰退或失效,尤其是 CsI 虽光电转换的量子效率高,但易潮解结晶,在空气环境下暴露若干小时就会失效^[8-9]。此外阴极制作工艺的差别、膜层厚度的大小,也影响相机成像稳定性^[10]。随着国内激光 ICF 研究中激光器数量和功率的增大^[11],每次核爆辐射 X 射线能量和强度也在增大^[12],打靶试验成本也不断增加,定期检测光电阴极的有效性,筛选性能稳定的光电阴极成为新的研究内容。

文中为激光聚变研制一套 X 射线条纹相机光电阴极检测系统。该检测系统具有三位一体的条纹变像管、共用荧光屏和 CCD,还具有真空室、真空计、控制系统、高压输入法兰。系统前端具有高真空闸板阀和阴极更换窗,能在不破坏靶室真空,不拆卸标定系统的情况下快速更换阴极。该系统结构紧凑,可以实现 3 个阴极的同时检测和快速更换。组建了阴极系统静态测试平台,标定了静态特性,测试结果显示:3 条条纹像中心偏移率在狭缝方向为 2.8%,在垂直于狭缝方向为 6.6%;平均放大倍率 1.29,误差在 0.8%;边缘空间分辨率大于 10 lp/mm。该系统的研制成功,可以满足激光聚变对 X 射线条纹相机光电阴极的检测需求。

1 系统设计

三位一体的条纹变像管是 X 射线条纹相机阴极检测系统的核心部件。根据理论设计和工程实现的要求,兼顾并均衡大工作面积、小体积、高耐压等参数之间相互制约问题,优化设计了条纹变像管电子光学系统和电极结构。七电极静电聚焦型条纹变像管设计如图 1 所示,各电极电压和结构参数如表 1

所示。F1 和 A1, F2 和 A2 分别组成预聚焦和聚焦电子光学透镜,有利于精确控制电子的空间分布。该管型阳极电压 8 kV,长度 285 mm。

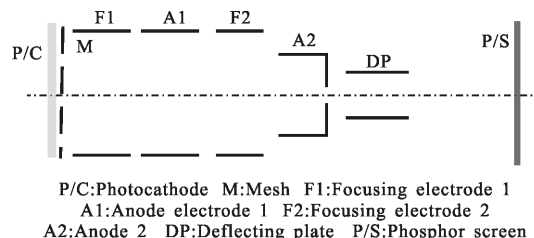


图 1 条纹变像管电极设计

Fig.1 Design of streak tube electrodes

表 1 条纹变像管电压和结构参数

Tab.1 Streak tube voltage and structure parameters

Electrode and voltage/kV							Length /mm	Magnification
P/C	M	F1	A1	F2	A2	P/S	Z	Mr
0	7	4	7	1.34	8	8	285	1.30

在实际制作过程中,还需改进影响条纹变像管性能的技术因素,要保证阴极插入件的快速更换,还要保证阴极和栅网之间严格平行,实现光电子的均匀加速场不被破坏。电极之间既有共用的接地电极,又要保证各自聚焦和阳极电极的彼此独立性,静电场之间不互相干扰。使用精密装架胎具,使各电极既悬空又保持精确的对称结构。制作完成的三位一体的 X 射线条纹变像管如图 2 所示。3 个条纹变像管 T1、T2、T3 彼此并列由上下夹板固定,电极引线由上夹板引入,下底板固定于真空室内壁。精确调整每个条纹管的相对位置,以及整体在真空室中的位置,使得条纹管所成条纹像置于同一荧光屏内。荧光屏外具有耦合 CCD 的结构件。外部真空室上方具有可打开的真空密封板,密封板下方对应着条纹变像管的阴极基座,打开密封板,通过使用阴极插件工具,可以方便快捷更换 3 个光电阴极。

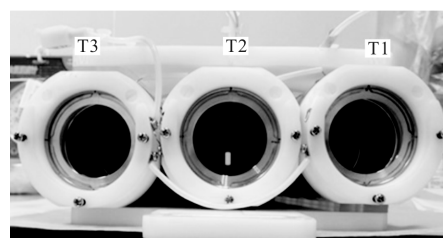


图 2 新研制的三位一体条纹变像管

Fig.2 Newly developed trinity streak tube

2 静态测试

为获得光电阴极检测系统静态性能参数，制作了测试用分化阴极。该分化阴极的石英衬底上，镀有狭缝形分辨率图案的 Au 阴极，同时镀有 Al 膜保证良好的电导通性。分化阴极的狭缝总长 30 mm，中心左右两侧长 3 mm，宽 0.1 mm 的区域具有 20 lp/mm 和 22 lp/mm 分辨率图案，分辨率以 4 lp/mm 和 0.5 mm 间隔递减，阴极边缘 4 mm 处分辨率图案为 10 lp/mm。同时保证分辨率图案线条的误差均在 1 μm 范围内。

光电阴极检测系统静态测试原理如图 3 所示。紫外盘形灯发射的紫外光同时照射在 3 个条纹变像管的 Au 阴极上，阴极发射光电子，分别在 3 个管内加速并聚焦，成像到同一个 P20 荧光屏上，转换成可见光，通过光锥耦合进 CCD 转换成数字信号。通过获取分化条纹的数字图像，可以标定和检测光电阴极的有效性。高压电源和分压器用于给条纹变像管各个电极提供稳定直流高压。正在静态测试的系统如图 4 所示。荧光屏 Φ50 mm，P11300 型 CCD 尺寸为 1 300 pixel×1 340 pixel，像素尺寸为 20 μm×20 μm 自带 1.5:1 的耦合光锥。数字真空计后方为真空密封板，打开密封板，即可对 3 个光电阴极快速更换。

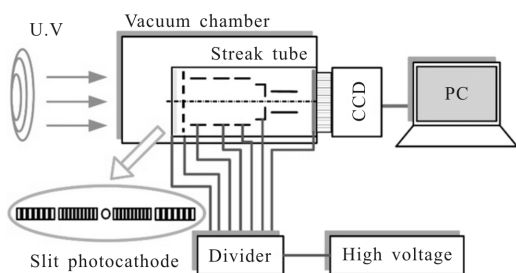


图 3 阴极检测系统静态测试原理图

Fig.3 Static test diagram of photocathode detection system

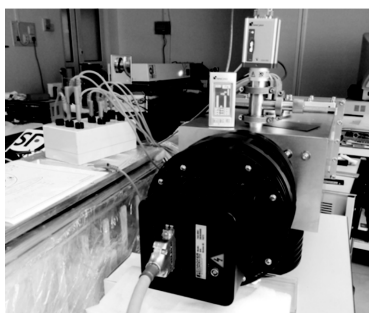


图 4 阴极检测系统静态测试

Fig.4 Static test of photocathode detection system

光电阴极检测系统静态测试图像如图 5 所示。三位一体的条纹变像管形成了 3 条长度约 39 mm 的条纹像，条纹像置于 40.2 mm×39 mm 的 CCD 中心区域。条纹像相互无重叠和干扰，整体相互平行无明显弯曲，条纹像间距左侧略宽于右侧，T2 条纹完全在荧光屏成像区域，T1 与 T3 条纹像上端略有超出成像区域，分辨率图案区域整体清晰。

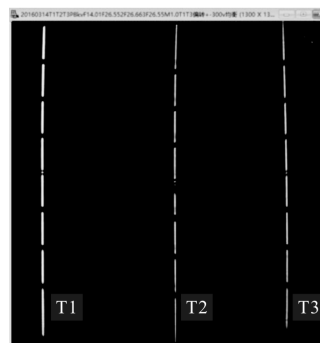


图 5 阴极检测系统静态测试

Fig.5 Static test of photocathode detection system

3 个条纹图像中心在狭缝方向的位置分别为 619、656、621 pixel，最大偏差 37 pixel，则狭缝方向图像的最大偏移率为：

$$\delta_y = \frac{(656 - 619)}{1340} \times 100\% = 2.8\% \quad (1)$$

同样方法可以得出垂直于狭缝方向图像的偏移率 6.6%，数据如表 2 所示。

表 2 图像偏移率测试数据

Tab.2 Image excursion ratio test data

Position	T1	T2	T3	Max excursion	Excursion ratio
Slit direction/ pixel	125	667	1 123	86	6.6%
Vertical slit direction/pixel	619	656	621	37	2.8%

T1 图像中间 3 mm 图案区域，起始点和末点为 480、688 pixel，长度为 128 pixel，光锥倍率 1.5:1，则条纹像放大倍率为：

$$M_1 = \frac{(688 - 480) \times 1.5 \times 20 \mu\text{m}}{3 \text{ mm}} = 1.28 \quad (2)$$

条纹变像管 T1 放大倍率为 1.28，同样方法可以测出 T2、T3 的放大倍率为 1.29、1.29。系统放大倍率测试数据如表 3 所示。3 个条纹变像管成像放大倍率

误差最大为 0.8%, 系统放大倍率具有较好的一致性。

表 3 系统放大倍率测试数据

Tab.3 System magnification test data

Parameter	T1	T2	T3
Slit direction/pixel	480	517	484
Vertical slit direction/pixel	688	646	612
Length/pixel	128	129	128
Magnification	1.28	1.29	1.29

T1、T2、T3 图像边缘 10 lp/mm 分辨率如图 6 所示, 3 条条纹像均可以看到明暗相间的分辨率图案, T2 最为清晰, 其次是 T1 和 T3, 由明暗图案的灰度值可以计算出图像的对比度。

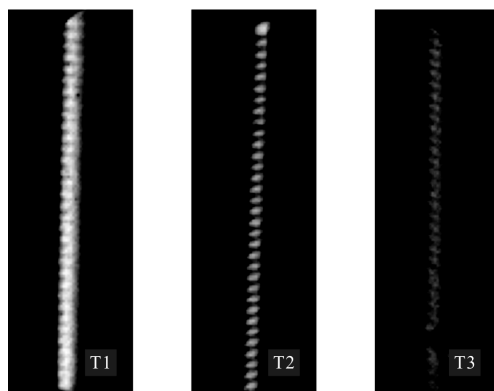


图 6 静态空间分辨率测试图像

Fig.6 Static spatial resolution test image

T1 明暗条纹最大值 10 547.33, 最小值 8 619.47, 背景强度 1 921.6, 因此对比度为:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{(10547.3 - 1921.6) - (8619.5 - 1921.6)}{(10547.3 - 1921.6) + (8619.5 - 1921.6)} = 0.13 \quad (3)$$

同样方法可以得出 T2 和 T3 对比度为 0.29 和 0.06, 10 lp/mm 静态分辨率图像对比度数据如表 4 所示。

表 4 静态空间分辨率图像对比度

Tab.4 Image contrast of static spatial resolution

Parameter	T1	T2	T3
Max intensity	10 547.3	9 849.8	7 272.5
Min intensity	8 619.5	6 238.9	6 648.5
Back intensity		1 921.6	
Contrast ratio	0.13	0.29	0.06

表中可以看出位于中心 T2 图像对比度最高为 0.29, T1、T3 图像对比度小于 T2, 仍然超过了 0.05 的判别标准。检测系统的静态空间分辨率达到 10 lp/mm, 超过了 8 lp/mm 的检测需求值。3 条条纹像对比度的差别除了来源于系统装架微小的机械误差外, 还由于条纹变像管电子光学系统固有的球差和场曲决定的。

3 结论

为实现 X 射线条纹相机光电阴极的同时快速检测, 设计了三位一体的条纹变像管。在系统的静态测试中, 通过反复调节三位一体条纹变像管的电压、结构和相对位置, 3 条狭缝同时成像在 CCD 可探测的中心区域, 图像中心偏移率在两个方向分别为 2.8% 和 6.6%, 条纹像放大倍率 1.29, 具有较好的一致性, 边缘空间分辨率大于 10 lp/mm。对于中心 22 lp/mm 的分化阴极, 用于测试系统空间分辨率还太大, 同时荧光屏上 30 μm×30 μm 的分辨元对空间分辨率测试也不利, 系统静态测试结果显示, 边缘空间分辨率 10 lp/mm 仍超过了 8 lp/mm 的诊断要求。该系统可以满足激光聚变对光电阴极的检测需求。

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] Town R P, Bradley D K, Kritcher A, et al. Dynamic symmetry of indirectly driven inertial confinement fusion capsules on the National Ignition Facility [J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(5): 056313.
- [3] Cai Houzhi, Long Jinghua, Liu Jinyuan, et al. Picosecond framing camera based on electron pulse time-dilation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45 (12): 1206001. (in Chinese)
- [4] Benstead J, Moore A S, Ahmed M F, et al. A new streaked soft X-ray imager for the National Ignition Facility [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5): 055110.
- [5] Zuber C, Bazzoli S, Brunel P, et al. Picosecond X-ray streak camera dynamic range measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(9): 093501.
- [6] Wang Qiaoli, Bai Yonglin, Zhu Bingli, et al. A new design of seed source used in optical streak camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2122-2126. (in Chinese)

- [7] Gu Li, Zong Fangke, Li Xiang, et al. Designment of a femtosecond streak camera with a novel accelerating structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1134001. (in Chinese)
- [8] Wang Chuanke, Li Jin, Hu Xin, et al. Realization of a flat-response photocathode for X-ray streak cameras [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 241751.
- [9] Li Jin, Hu Xin, Fan Long, et al. Fabrication and absolute calibration of X-ray streak camera cathode [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(8): 082003. (in Chinese)
- [10] Li Xiang, Gu Li, Zong Fangke, et al. Temporal resolution limit estimation of X-ray streak cameras using a CsI photocathode [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(8): 083105.
- [11] Pu Yudong, Huang Tianxuan, Lei Haile, et al. Direct-drive cryogenic-target implosion experiments on SGIII prototype laser facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(4): 042704.
- [12] Wang Hongjian, Yang Qingguo, Ye Yan, et al. Multi-keV X-ray conversion efficiencies of laser-irradiated nano-velvet Cu targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1106008. (in Chinese)