

大动态范围高时空性能 X 射线条纹相机的研制

顾 礼^{1,2}, 宗方轲^{1,2}, 李 翔³, 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深圳大学高等研究院, 广东 深圳 518060

摘要 为了满足激光驱动惯性约束聚变(ICF)的诊断需求,研制了一台大动态范围高时空性能 X 射线条纹相机系统;通过优化电子光学设计、改进条纹变像管的制作工艺,以及制作和使用高效器件来达到提高条纹相机动态范围以及时间和空间性能的目的;设计相机的阴极工作长度为 30 mm,聚焦电压为 12 kV;借助飞秒和皮秒激光器组建相机的静态和动态标定测试系统。结果表明:该相机系统的空间分辨率大于 20 lp/mm,时间分辨率达到 5 ps,动态范围达到 2237:1,扫描速度非线性小于 3%;相机具有 4 个挡位,可以实现 4 个扫描速度下的超快信号获取;该相机性能优良,可以满足激光聚变研究中时间、空间、能谱分辨的精密化诊断要求。

关键词 X 射线光学; 条纹相机; X 射线探测器; 空间分辨率; 时间分辨率; 动态范围

中图分类号 O436; TN143 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1234001

Development of X-Ray Streak Camera with Large Dynamic Range and High Temporal-Spatial Resolution

Gu Li^{1,2}, Zong Fangke^{1,2}, Li Xiang³, Zhou Junlan¹, Yang Qinlao¹, Guo Baoping¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

³Institute for Advanced Study, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract To satisfy the diagnosis requirement of laser driven inertial confinement fusion (ICF), an X-ray streak camera system with large dynamic range and high temporal-spatial resolution is developed. By optimizing the design of electronic optics, improving the production process of streak image converter tube, as well as producing and using the efficient devices, we improve the dynamic range and temporal-spatial resolution of the streak camera. The photocathode working length of the camera is designed to be 30 mm, and the focus voltage is designed to be 12 kV. Static and dynamic calibration systems are set up with the help of femtosecond and picosecond lasers. The results show that the spatial resolution of the camera system is greater than 20 lp/mm, the temporal resolution reaches 5 ps, the dynamic range reaches 2237:1, and the sweep speed nonlinearity is smaller than 3%. Ultra-fast signals can be achieved by four gears of the camera with four sweep speeds. The camera has good performance and can be used for precise diagnosis of temporal-spatial and energy spectrum resolution in laser fusion research.

Key words X-ray optics; streak camera; X-ray detector; spatial resolution; temporal resolution; dynamic range

OCIS codes 320.2250; 320.7160; 110.7440; 340.7440

1 引 言

激光驱动惯性约束聚变(ICF)是获取氢核聚变信息的重要来源,也是获取氢能的重要途径^[1-2]。X 射线

收稿日期: 2017-07-12; 收到修改稿日期: 2017-07-23

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

作者简介: 顾 礼(1983—),男,博士后,助理研究员,主要从事超快诊断方面的研究。E-mail: flutelad@126.com

* 通信联系人。E-mail: qlyang@szu.edu.cn

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^[3-4]。随着我国激光驱动 ICF 研究的不断深入,对时间、空间、能谱分辨诊断提出了“精密化”的要求^[5-6]。在时间、空间、能谱的组合测量中,完整记录不同辐射强度的示踪谱线,要求 X 射线条纹相机不仅要具有高时间、空间特性,还要具有大动态范围^[7-10]。动态范围为 2000:1、时间分辨率为 5 ps、空间分辨率大于 20 lp/mm 的 X 射线条纹相机对测量聚变中等离子体的强度空间分布、时间演化和能谱变化等具有重要作用,对推动我国激光驱动 ICF 的研究具有重要意义。发达国家在条纹相机的研制中使用了不同的技术,动态范围的标定也采用了不同的标准。日本 Hamamatsu 公司的大动态可见光条纹相机通过增大电子的加速电压至 15 kV 来缩短空间电荷效应的作用时间,同时利用狭缝代替栅网来减少杂散电子,当最小信号选为背景噪声的均方根时,动态范围达到 10000:1^[11-12]。美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的第二代 X 射线条纹相机使用峰值取样法对图像数据处理进行改进,通道动态范围可达到 6500:1^[13-14]。法国 Photonis 公司和德国 Optronis 公司的条纹相机使用平板电极聚焦系统,抑制了空间电荷效应,相机具有高时间分辨率和高空间分辨率两种性能模式,动态范围达到了 3700:1^[15-16]。

为了研究大动态范围高时空性能的 X 射线条纹相机,本文通过分析条纹相机中限制性能改善的物理因素来优化条纹变像管设计,改进工艺方法,以提高相机系统的动态范围和时空性能;研制了一台 X 射线条纹相机,使用飞秒和皮秒激光器组建实验测试平台,并标定了 X 射线条纹相机的性能。

2 相机设计

条纹变像管是条纹相机的核心部件,根据理论设计和工程实现的要求,条纹变像管应兼顾并均衡大工作面积、高时空分辨率、大动态范围等参数之间相互制约的问题。优化设计条纹变像管的电子光学结构,增大放大倍率,有利于提高空间分辨率;提高偏转灵敏度有利于降低技术时间分辨率;适当减小阳极光阑直径,减少杂散电子和大角度电子,有利于提高时空分辨率;增大轴上分布的电压,减小聚焦区长度,有利于抑制空间电荷效应导致的时空弥散,全面改善相机的性能。

七电极静电聚焦型条纹变像管的电极设计如图 1 所示,各电极电压和结构参数如表 1 所示。F1、A1 与 F2、A2 分别组成预聚焦和聚焦电子光学透镜,以精确控制电子的空间分布。该条纹变像管阳极电压为 12 kV,长度为 484 mm,偏转灵敏度为 60.71 mm/kV。聚焦区轴上电位分布如图 2 所示,轴上分布的电位整体增大,空间电荷效应的作用时间缩短。

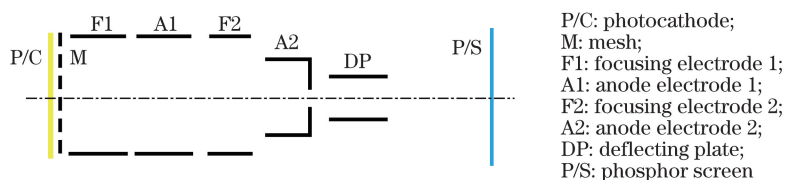


图 1 条纹变像管的电极设计

Fig. 1 Electrode design of streak image converter tube

表 1 条纹变像管的电压和结构参数

Table 1 Voltage and structure parameters of streak image converter tube

Electrode voltage /kV							Length /mm	Magnification	Deflection sensitivity / $(\text{mm}\cdot\text{kV}^{-1})$
P/C	M	F1	A1	F2	A2	P/S			
0	10.42	6.15	10.42	1.89	12	12	484	1.60	60.71

在实际制作过程中,还需要优化影响条纹变像管性能的技术因素,包括管内电极间的耐压强度、绝缘强度,以及整管的结构精度。耐压强度小以及结构精度不高,不仅会使变像管达不到设计性能,而且易使整管因打火击穿而报废。为了改进制作工艺,在管内使用高温陶瓷绝缘体,同时在管外采用高绝缘强度的材料进行密封填充;使用精密装架胎具,使各电极悬空和相互独立的同时又保持精确的对称结构。制作完成的 X 射线条纹变像管如图 3 所示。

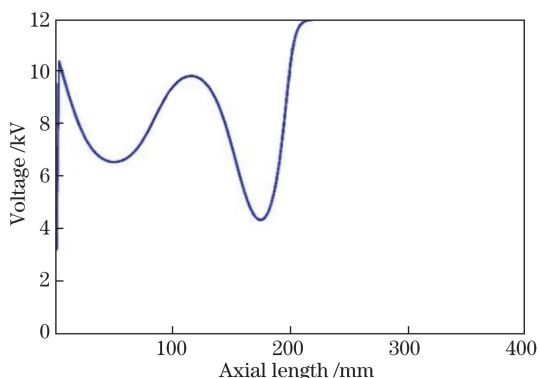


图 2 条纹变像管轴上电位分布

Fig. 2 Axis potential distribution of streak image converter tube



图 3 新研制的条纹变像管实物图

Fig. 3 Newly developed streak image converter tube

为了研究提高相机系统动态范围的因素,尽可能增大相机系统可探测信号阈值的最大值,同时减小可探测信号阈值的最小值。在条纹变像管内部,根据阴栅之间的电位差(10.42 kV),合理确定导电层铝膜的厚度和光电子发射层金膜的厚度,制作高量子效率的金光电阴极。制作光纤面板基底与 CCD 量子效率匹配度高的 P20 离心法荧光屏,根据加载电压(12 kV)合理确定 P20 粉层的厚度,并改进制屏工艺,以提高荧光屏的量子转换效率。在条纹变像管外部,使用门控式微通道板(MCP)外增强器,以避免直流增益模式的暗噪声积累,减小背景噪声,拓展动态范围的下限。条纹变像管、增强器与 CCD 之间使用光纤面板耦合,以提高光能传导率。

3 条纹变像管静态测试

为了获得条纹变像管的分辨率信息,制作测试用分划阴极。在该分划阴极的石英衬底上镀有狭缝形分辨率图案的金阴极,同时镀有铝膜以保证良好的电导通性。分划阴极的狭缝总长度为 30 mm,中心左右两侧 3 mm×0.1 mm 的区域具有分辨率为 20,22 lp/mm 的图案,该图案长为 3 mm,分辨率以 4 lp/mm 和 0.5 mm 间隔递减到阴极边缘。分辨率图案线条的误差均小于 1 μm。

条纹变像管静态测试原理如图 4 所示。紫外盘形灯(U.V)发射的紫外光照射在条纹变像管的金阴极上,分划条纹的金阴极发射光电子,光电子加速并聚焦成像到荧光屏上,转换成可见光后被 CCD 接收,并转换成数字信号。通过获取和考察分划条纹的数字图像可以得到条纹变像管成像的空间分辨率。高压电源(H.V)和分压器为条纹变像管各个电极提供稳定的直流高压。

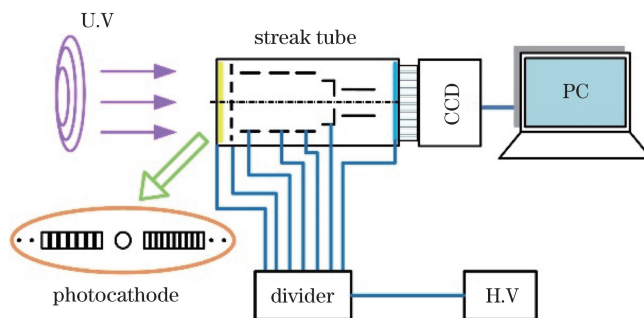


图 4 条纹变像管静态测试原理图

Fig. 4 Schematic of static testing for streak image converter tube

荧光屏(φ52 mm)耦合 1.3:1 的缩小光锥。PI2048F 型 CCD 的尺寸为 27.6 mm×27.6 mm,无法覆盖荧光屏的全部区域。在 CCD 全覆盖一侧,条纹变像管的静态空间分辨率测试图像如图 5 所示。由图 5 可知,随着分辨率减小,分划条纹从中心到边缘的对比度逐渐增大。由测试图像得到的条纹对比度如表 2 所示。由表 2 可知,在离轴中心附近 1.2 mm 处及以 3.5 mm 为间隔均匀取样的 4.7,8.2,11.7 mm 处,对比度分别为 0.206、0.305、0.653、0.753,以对比度传递函数(CTF)为 0.05 时的静态空间分辨率为极限静态空间分辨率,条

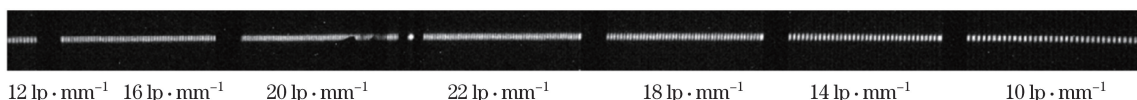


图 5 条纹变像管静态空间分辨率的测试图像

Fig. 5 Static spatial resolution image of streak image converter tube

表 2 条纹变像管静态空间分辨率的测试数据

Table 2 Static spatial resolution data of streak image converter tube

Resolution / (lp·mm ⁻¹)	Distance / mm	CTF
22	1.2	0.206
18	4.7	0.305
12	8.2	0.653
10	11.7	0.753

纹变像管的中心分辨率已大于 22 lp/mm。

4 条纹相机动态测试

条纹相机动态性能测试原理如图 6(a)所示。测试系统中需要的设备包括光学平台、钛宝石飞秒激光器、法布里-珀罗(F-P)标准具、真空室(V.C)、真空机组、高压电源(H.V)、高压分压器、延时电路(T.D)、扫描电路(S.C)、PIN 光电探测器、MCP 像增强器(I.I)、CCD、紫外反射镜(M1、M2、M3、M4)、条纹管(S.T)等。以钛宝石飞秒激光平台为例,激光脉冲有 2 束,其中 1 束波长为 800 nm 的光被送往 PIN 光电探测器转换成电脉冲触发信号,电信号经时间延迟电路适当延迟后用于触发扫描电路工作。另外 1 束光的波长为 266 nm,脉冲时间宽度为 130 fs,经 M1 和 M2 反射延迟后被送往 F-P 标准具,紫外光经过若干次反射和出射后形成一系列标准时间间隔为 Δt 的光脉冲序列,在条纹相机内转换成光电子。光电子经过加速、聚焦和偏转,完成携带时间、空间信息的映射。荧光屏上的光信号被 MCP 像增强器 I.I 增强,通过光锥耦合进 CCD 转换成数字信号。图 6(b)所示为正在进行动态测试的条纹相机。门控 MCP 像增强器的型号为 MCP140,其快门阴极选通时间为 20 ns;CCD 型号为 PI2048F,半导体风冷制冷,温度设置为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,曝光时间为 2 s。

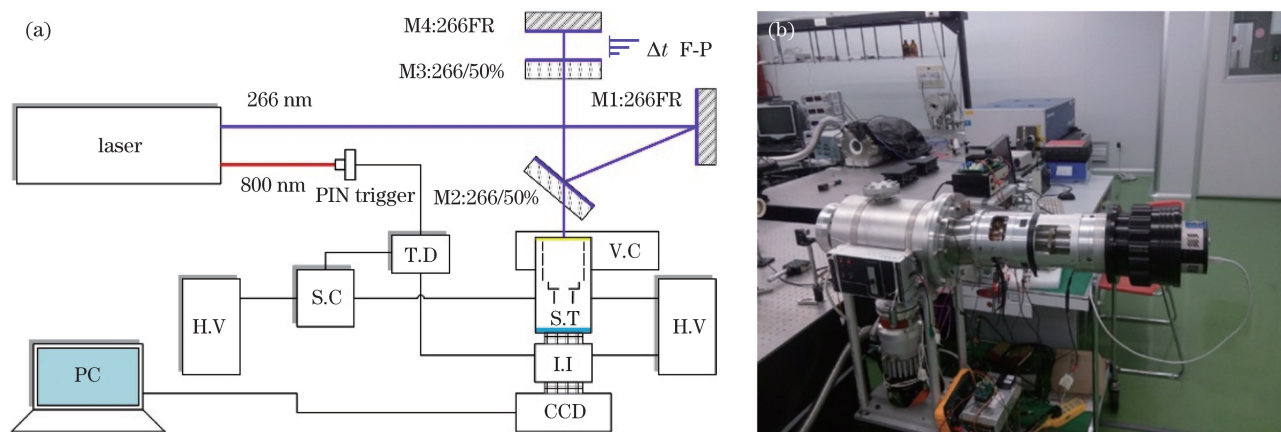


图 6 条纹相机动态测试的(a)原理图和(b)实物图

Fig. 6 (a) Schematic and (b) photo of dynamic testing for streak camera

4.1 动态空间分辨率测试

激光分别入射分划阴极的不同区域,相机工作在动态模式第 2 挡,得到不同分辨率图案和不同离轴距离的成像。动态空间分辨率测试结果如图 7 所示。由测试图像得到的条纹对比度如表 3 所示。由表 3 可知,在离轴中心附近 1.2 mm 处及以 3.5 mm 为间隔均匀取样的 4.7, 8.2, 11.7 mm 处,对比度分别为 0.162、0.253、0.536、0.620,以 CTF 等于 0.05 时的静态空间分辨率为极限动态空间分辨率,相机的中心分辨率已大于 20 lp/mm。

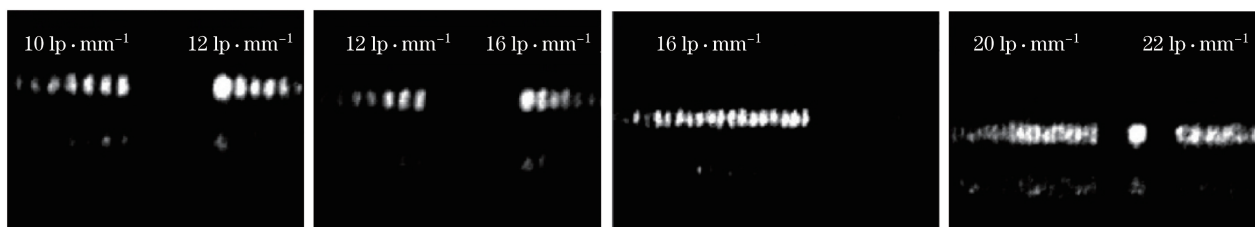


图 7 条纹相机动态空间分辨率测试图像

Fig. 7 Dynamic spatial resolution images of streak camera

表 3 条纹相机动态空间分辨率测试数据

Table 3 Dynamic spatial resolution data of streak camera

Resolution / (lp·mm ⁻¹)	Distance /mm	CTF
20	1.2	0.162
16	4.7	0.253
12	8.2	0.536
10	11.7	0.620

4.2 动态时间分辨率测试

相对于 ps 量级时间分辨率的条纹相机,脉冲时间宽度为 130 fs 的激光脉冲约等于点时间脉冲,测量其时间展宽即可得到相机的极限时间分辨率。动态时间测试中标准具的光程差为 36 mm,时间间隔为 120 ps。相机置于动态工作模式第 1 挡(即最快挡)。动态时间分辨率测试结果如图 8 所示。由测试图像得到的数据如表 4 所示。由表 4 可知,狭缝像峰的峰间距为 125 pixel,条纹平均宽度为 5.25 pixel,由时间展宽确定相机的时间分辨率为 5.04 ps。

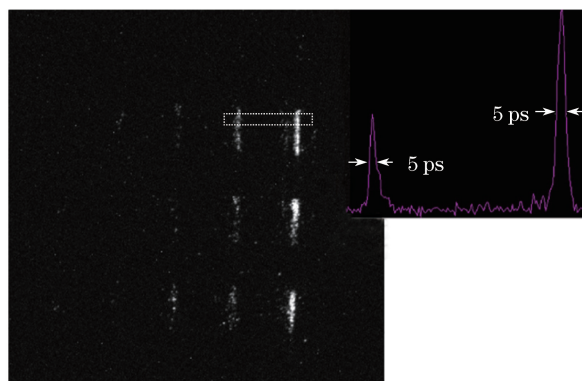


图 8 条纹相机动态时间分辨率测试图像

Fig. 8 Dynamic temporal resolution images of streak camera

表 4 条纹相机动态时间分辨率测试数据

Table 4 Dynamic temporal resolution data of streak camera

Optical path difference /mm	Time interval /ps	Interval /pixel	Width 1 /pixel	Width 2 /pixel	Average width /pixel	Time resolution /ps
36	120	125	5.50	5.00	5.25	5.04

4.3 扫描速度与非线性测试

条纹相机分别置于动态工作模式第 1 挡(S1)、第 2 挡(S2)、第 3 挡(S3)和第 4 挡(S4),测试扫描速度与扫描速度非线性。标准具长度分别为 35,75,150,150 mm,产生的标准时间光脉冲序列为 233,500,1000,1000 ps。由荧光屏上条纹的间距可计算得到扫描速度,由条纹间距的标准差可计算得到扫描速度非线性。激光入射测试结果如图 9 所示,测试数据如表 5 所示。由表 5 可知,相机 4 个挡位的扫描速度非线性均小于 3%。

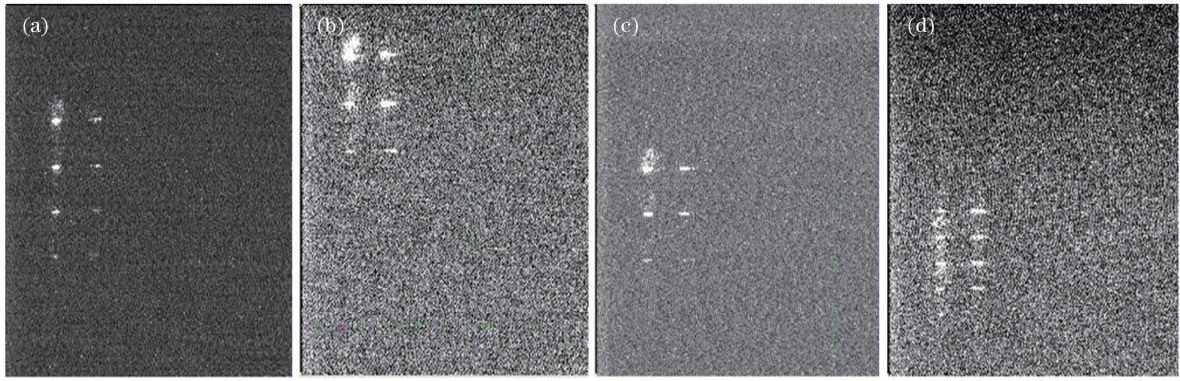


图 9 条纹相机扫描速度测试图像。(a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

Fig. 9 Sweep speed images of streak camera. (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

表 5 条纹相机扫描速度测试数据

Table 5 Sweep speed data of streak camera

Range	Etalon distance /mm(ps)	Average interval /pixel	Standard deviation /pixel	Sweep speed nonlinearity /%	Sweep speed /($\text{mm}\cdot\text{ns}^{-1}$)
S1	35(233)	252.3	5.8	2.3	11.2
S2	75(500)	262.7	4.7	1.8	5.5
S3	150(1000)	257.7	6.8	2.6	2.7
S4	150(1000)	140.9	2.5	1.8	1.5

4.4 动态范围测试

动态范围测试使用 Nd:YLF 的激光器(8 ps),相机置于动态工作模式第 2 挡。动态范围测试结果如图 10 所示。由图 10 可知,最大信号强度为 24701.28,最小信号强度为 15.16,背景强度为 4.12,所测光脉冲序列没有发生展宽。

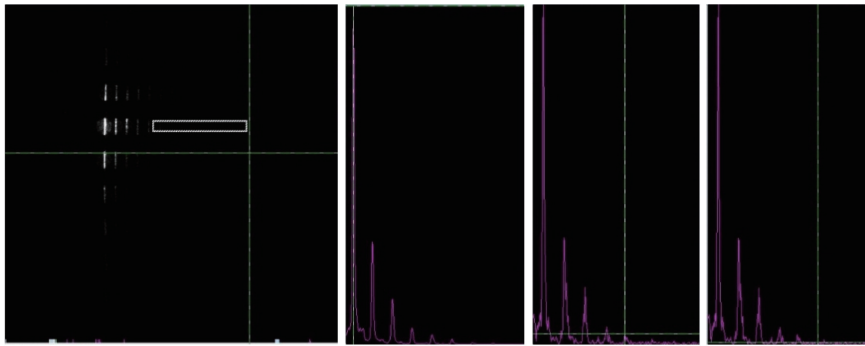


图 10 条纹相机动态范围测试图像

Fig. 10 Dynamic range image of streak camera

动态范围采用实测最大信号强度 I_{\max} 和可记录的最小信号强度 I_{\min} 来计算,即

$$D = \frac{I_{\max} - I_{\text{back}}}{I_{\min} - I_{\text{back}}} = \frac{24701.28 - 4.12}{15.16 - 4.12} = 2237.1 : 1, \quad (1)$$

式中 I_{back} 为背景强度。动态范围要求相机光脉冲展宽率不大于 20%,受皮秒激光器输出激光强度的限制未能获得进一步增大的最大信号强度,因此可以得出相机的动态范围大于 2237:1。

国内外通常使用不同的标准来测量条纹相机的动态范围。关于最小信号的判定,考虑到国内用户的需要,信号最小值使用比较严格的系统可以记录的信号强度,而日本 Hamamatsu 公司条纹相机的最小信号使用背景噪声的均方根;关于最大信号的判定,国内一般使用最大信号的平均值,而美国 LLNL 的 P2XSC 条纹相机使用记录信号通道内的最大值,因此国外相机的动态范围普遍大于国内相机的标定值^[11-14]。

5 结 论

为了满足我国激光驱动 ICF 研究诊断精密化的要求,研制了一台大动态范围高时空性能的 X 射线条纹相机。通过分析条纹变像管和相机系统性能的制约因素,优化电子光学设计,改进制作工艺,制作和使用高效器件,综合多种新技术提升了相机性能。条纹相机标定测试显示,相机的动态和静态空间分辨率大于 20 lp/mm,时间分辨率达到 5 ps,动态范围达到 2237:1,扫描速度非线性小于 3%。该相机可以满足目前我国激光驱动 ICF 研究精密诊断的需求。

参 考 文 献

- [1] Zhang Bo, Peng Zhitao, Lü Jiakun, *et al.* Multi-beams time-synchronization measurement for inertial confinement fusion laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0208003.
张波, 彭志涛, 吕嘉坤, 等. 惯性约束核聚变激光驱动器多路光束时间同步测试方法[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0208003.
- [2] Cheng Ningbo, Li Fuquan, Feng Bin, *et al.* Research on route optimization for laser beam alignment at target area of an ICF laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202005.
程宁波, 李富全, 冯斌, 等. ICF 激光装置靶场光束引导路径的优化研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202005.
- [3] Zong Fangke, Lei Baoguo, Gu Li, *et al.* Design of traveling-wave deflector for high speed streak camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 043201.
宗方轲, 雷保国, 顾礼, 等. 应用于高速条纹相机的行波偏转器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 043201.
- [4] 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.
顾礼, 宗方轲, 李翔, 等. 一种新型加速结构飞秒条纹相机的设计[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1134001.
- [5] Hui Dandan, Tian Jinshou, Lu Yu, *et al.* Temporal distortion analysis of the streak tube[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(15): 158502.
惠丹丹, 田进寿, 卢裕, 等. 条纹变像管时间畸变的分析[J]. 物理学报, 2016, 65(15): 158502.
- [6] Yuan Zheng, Deng Keli, Li Jin, *et al.* Diagnostic equipment calibration platform based on sub-picosecond ultraviolet laser[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0614002.
袁铮, 邓克立, 李晋, 等. 基于亚皮秒紫外激光器的诊断设备标定平台[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0614002.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Wlotzko V, Uhring W, Summ P. Impact of laser phase and amplitude noises on streak camera temporal resolution[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(9): 094703.
- [10] Town R P J, 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.
- [11] Lumpkin A H, Ruan J, Thurman-Keup R. Synchroscan streak camera imaging at a 15-MeV photoinjector with emittance exchange[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2012, 687(6): 92-100.
- [12] Takahashi A, Nishizawa M, Inagaki Y, *et al.* New femtosecond streak camera with temporal resolution of 180 fs[C]. SPIE, 1994, 2116: 275-284.
- [13] Sun K X, Marlett K. Time-frequency analysis using peak-value sampling of spatial-temporal image data from streak camera[C]. SPIE, 2004, 5559: 443-455.
- [14] Sun K X, Nishimura W, Perry T, *et al.* A second-generation X-ray streak camera with true large format, high dynamic range, and high reliability[C]. SPIE, 2005, 5920: 592008.
- [15] Mens A, Gontier D, Huilizen J C, *et al.* New developments and results on high-spatiotemporal-resolution X-ray streak cameras[C]. SPIE, 1992, 1539: 40-51.
- [16] Schirmann D, Mens A, Sauneuf R, *et al.* Performance of the ultra fast streak camera C850X[C]. SPIE, 1993, 1757: 8-18.