

大物面高时空分辨 X 射线条纹管成像研究

张敬金^{1,2}, 宗方轲², 雷保国², 郭宝平^{1,2}, 杨勤劳^{2*}

¹深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060;

²深圳大学光电工程学院光电子学器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 为了满足惯性约束聚变(ICF)实验对 X 射线条纹相机提出的新技术要求,设计并研制了一种大物面 X 射线条纹变像管,利用球面荧光屏减轻场曲的影响,并通过提高阳极总压、增大偏转灵敏度来提高时间分辨率。测试结果表明:阴极有效长度可达 40 mm,静态空间分辨率信息分辨总量可达 1000 lp,动态空间分辨率为 20 lp/mm,时间分辨率达 3.3 ps,动态范围可达 2281:1,能满足 ICF 实验所提出的大信息捕捉量的要求。

关键词 成像系统; X 射线条纹相机; 大物面; 时间分辨率; 空间分辨率; 动态范围

中图分类号 O463

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1211003

Imaging of Large Format High Spatiotemporal Resolution X-Ray Streak Tube

Zhang Jingjin^{1,2}, Zong Fangke², Lei Baoguo², Guo Baoping^{1,2}, Yang Qinlao^{2*}

¹College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract To meet the advanced technical requirements on X-ray streak camera in the inertial confinement fusion (ICF) experiments, a large format X-ray streak tube is designed and fabricated, in which a spherical phosphor screen is used to alleviate the influence of field curvature and also the increase of anode total voltage and deflection sensitivity is used for the improvement of time resolution. The test results show that the effective length of photocathode is 40 mm, the total static spatial resolution amount is 1000 lp, the dynamic spatial resolution is 20 lp/mm, the temporal resolution is 3.3 ps, and the dynamic range is 2281:1, which can meet the capturing requirement of a large amount of information in the ICF experiments.

Key words imaging systems; X-ray streak camera; large format; temporal resolution; spatial resolution; dynamic range

OCIS codes 110.7440; 040.7480; 340.7440

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)研究的对象是激光打靶产生的高温、高密度等离子体,其辐射可以遍布整个电磁波谱,同时还伴随发射大量的电子、中子、 α 粒子和其它粒子,对等离子体密度、温度及其变化的测量等是超快诊断技术的功能^[1-3]。由于软 X 射线条纹相机具有频谱变换功能,并且具有高的时空分辨率,因此是软 X 射线时空分辨谱诊断的重要工具^[4-5]。

研究软 X 射线的时间谱既要认识软 X 射线的

时空特性,又要了解不同谱的强度对比,因此不但要求 X 射线条纹相机具有高的时空分辨率,而且其应能同时记录 X 射线的全部谱。随着实验的进展,ICF 实验谱诊断对 X 射线条纹相机提出新的要求,即阴极有效工作直径达 50 mm,动态空间分辨率优于每毫米 20 lp,整个阴极范围内分辨线对总数达 1000 lp,时间分辨优于 5 ps,并具有大的动态范围。

目前国际上已知的高性能 X 射线条纹相机之一为美国劳伦斯利弗莫尔(LLNL)实验室的第二代 X 射线条纹相机(P2XSC)^[6],其时间分辨率一些为

收稿日期: 2018-06-05; 修回日期: 2018-07-08; 录用日期: 2018-08-17

基金项目: 深圳市基础研究自由探索项目(JCYJ20170818102618203, JCYJ20170818141616714)、国家自然科学基金青年基金(11805137)

* E-mail: qlyang@szu.edu.cn

5 ps, 动态范围达 6500:1(通道动态范围), 并且其阴极直径为 50 mm, 具有阴极线对数为 1000 lp 的动态分辨信息总量。

需要说明的是, 由于美国第二代 X 射线条纹相机的动态范围为计算单个 CCD 像素的满阱电子数 (65536) 与扣除背景噪声后的最弱信号强度 10 (CCD 制冷降温后背景暗噪声约为 400) 之比, 而非实测条纹图像的最大值和最小值(扣除噪声后)的比值, 故其计算所得值偏高; 相比较之下, 目前国内所报导的性能较优越的 X 射线条纹相机时间分辨率达 5 ps^[7-9], 动态范围优于 2000:1(实测值, 如果按照美国相机动态范围的计算方法亦可达 6500:1), 然而其阴极工作面积直径仅为 30 mm, 动态空间分辨率为 20 lp, 分辨信息总量仅为 600 lp, 无法满足 ICF 所提出的大信息捕捉量的要求。

作者曾设计出一种阴极直径为 50 mm 的类同心球系统 X 射线条纹管^[10], 整个阴极范围内其信息分辨总量可达 1500 lp; 然而目前该管型尚在研制过

程中, 仍未有相应的测试数据, 不具备相应的实用性。本文目的在于研制一种大物面高时空分辨 X 射线条纹管, 以满足 ICF 所提出的大信息捕捉量的要求。

2 大物面条纹管结构设计

X 射线条纹相机的工作原理是将人眼不可见的 X 射线辐射的时间信息转变为荧光屏上可见的空间信息。具体过程为: 1) 待表征的 X 射线脉冲经狭缝照射到光电阴极上产生光电子, 其相应的时序时间、时间间隔、强度分布等诊断信息线性传递给电子脉冲; 2) 电子束经过加速后进入聚焦区, 在聚焦电极形成的静电透镜作用下会聚; 3) 进入偏转系统, 偏转板上所加随时间线性变化的扫描电压在板间形成相应线性偏转电场, 不同时刻的电子脉冲在其中受到大小不同的偏转力, 从而在空间上展开分布, 实现将电子束所包含的时间信息投影成为空间信息; 4) 利用 CCD 器件采集电子束轰击荧光屏所得图像, 其成像原理如图 1 所示。

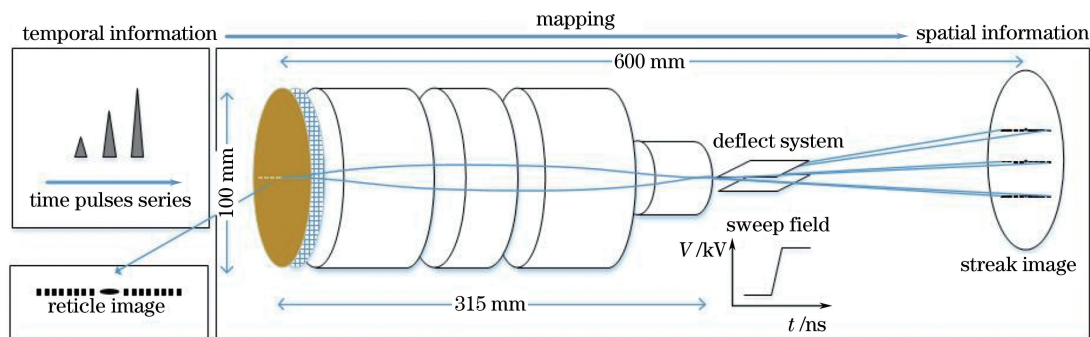


图 1 条纹相机工作原理

Fig. 1 Principle of streak camera

本课题组研制出的条纹相机^[9]时间分辨能力以及动态范围等参数均较优, 然而其阴极狭缝工作长度仅为 30 mm, 所能提供的分辨信息总量未能满足 ICF 实验所需。大物面条纹管将以此管型为原型进行优化设计所得, 在保留其优越的时间分辨能力以及大动态范围的性能前提下, 进一步提升其信息捕捉总量, 以满足 ICF 所提出的大信息捕捉量要求。

在宽束成像器件中, 尤其在探测面积较大的情况下, 场曲的影响占主要作用。场曲的形成原因是因为离轴远的电子束更容易聚焦从而使其像面呈现非平面。几何光学系统中由于透镜的折射率是可突变的, 因而可引入透镜组校正场曲等各种像差的影响; 与其不同的是电子光学系统中折射率是连续变化的, 几何光学系统中的方法无法直接应用到其中, 其替代方案是采用球面阴极或者采用球面荧光屏来

校正场曲^[11]。

原管型结构中最大电极管径为 60 mm, 若在此参数条件下将狭缝长度扩展到 50 mm, 则会使离轴远的电子束受边缘场影响较大, 成像性能恶化, 阴极狭缝有效长度受限。因此将条纹管聚焦区电极直径扩展为 100 mm, 并重新设计光电阴极。

在制备 X 射线条纹管光电阴极时, 要将作为衬底的聚对二甲苯薄膜(对 X 射线透过率高^[12])制作成球面则必须在将其弯曲的同时保证其表面的平滑性, 制作难度非常大, 所以大物面条纹管的光电阴极仍采用平面阴极; 而为了减轻场曲的影响, 荧光屏采用球面荧光屏。

此外, 由电子光学的理论^[13]可知, 电子束所会受到聚力还与其在聚焦区内任意轴向位置离轴高度成正比。此时, 为了在电子光学系统上减少场曲的形

成,应尽可能降低电子束在聚焦区内的离轴高度^[14]。若只采用薄透镜则只能改变电子束的方向而无法改变其离轴距离^[13],因此必须采用厚透镜,而这势必加大聚焦区长度,不利于时间分辨率的提升。为了提高最终的时间分辨率,可以采用增加阳极总压、缩短聚焦区的渡越时间来提升物理时间分辨率,并通过提高偏转灵敏度来降低技术时间分辨率。

在优化设计后所得大物面条纹管样管如图 2 所示,其内部电极结构示意图如图 3 所示,而表 1 为其相应的结构性能参数。

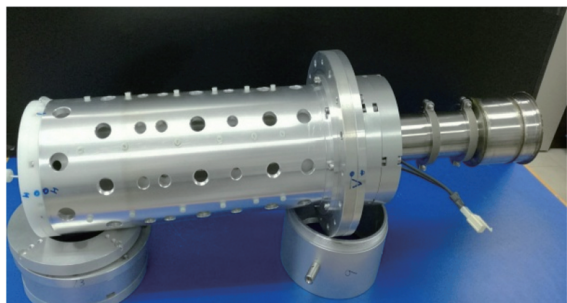


图 2 大物面条纹管实物图
Fig. 2 Photograph of large format streak tube

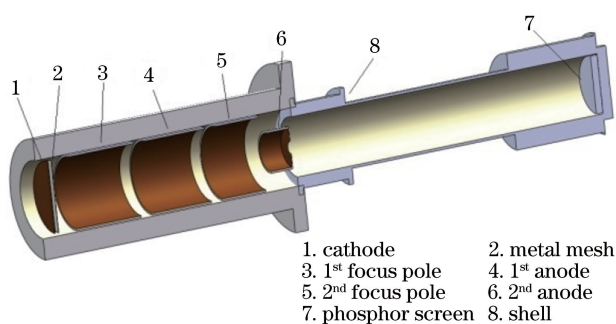


图 3 大物面条纹管内部电极结构

Fig. 3 Structural diagram of internal electrode in large format streak tube

2.1 光电阴极分划板设计

在光电阴极上有制作流程中光刻好的各种分辨线,其结构示意图如图 4 所示。

图 4 中的圆点为阴极中心标记点,便于成像时找出图像中心。每一组分辨线块(宽矩形具有分辨线,细矩形仅为通光孔)长度为 1 mm,彼此间隔为 1 mm,圆点左右两侧第一个分辨块(对应 20 lp/mm 和 15 lp/mm)之间相距为 0.5 mm。

表 1 大物面条纹管结构参数

Table 1 Structural parameters of large format streak tube

Length of tube / mm	Diameter of tube / mm	Length of photocathode / mm	Diameter of screen / mm	Magnification	Total voltage / kV	Deflection sensitivity / (mm · kV ⁻¹)	Radius of curvature of screen / mm
600	100	50	52	1.35	12	64	64

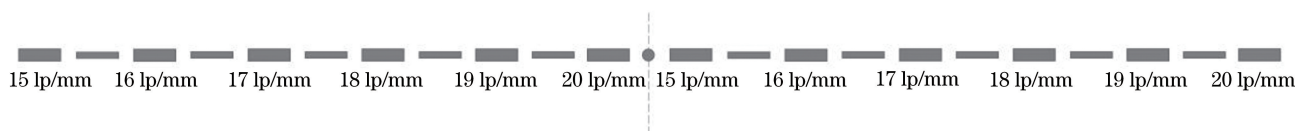


图 4 分划板结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of reticle

在中心点左右两侧对称的位置设置不同的分辨线块是为了观测在同样的离轴高度情况下所具备的最高分辨能力(若图像能同时显示中心点两侧 1~2 mm 处对应的分辨线块为 20 lp/mm 和 15 lp/mm,则说明离轴高度 1~2 mm 的范围内均可分辨至少 20 lp/mm)。

2.2 球面荧光屏曲率半径的选择

为了确定合适的球面荧光屏曲率半径,可计算各离轴高度电子束在其最佳像面上的落点分布,如表 2 所示。利用球缺公式可计算出相应的曲率半径为 44 mm^[15],然而在之前的实验中发现,采用离心沉积法制作荧光屏时,曲率半径 < 64 mm 时荧光粉

会产生脱落,因此只能选定曲率半径为 64 mm 的球面荧光屏进行测试。

表 2 不同物高电子束最佳像面位置

Table 2 Optimal image plane position of electron beam for different object heights

Item	Object height / mm					
	0.1	5	10	15	20	25
Position of image plane / mm	598	598	597	595	590	582

3 实验测试及分析

3.1 静态空间分辨率测试及分析

由表 1 可知,实验中所用阴极长度为 50 mm,条

纹管放大倍率为 1.35,亦即图像长度应为67.5 mm;然而现有荧光屏的尺寸限制,使得最多只能显示长度约为 52 mm 的像;同时,由于 CCD 尺寸(27 mm × 27 mm, 2048 pixel × 2048 pixel)的限制,单次测量时仅能测出 27 mm 的长度。为此,保持荧光屏位

置不动,可通过 2 次调整 CCD 与荧光屏的相对位置(左、右)来完成 52 mm 图像的测量。实验测试时各电极电压如表 3 所示,以紫外灯为光源时所测实验图如图 5 所示。

表 3 实验测试时各电极电压

Table 3 Each electrode voltage for experimental test

kV

Photocathode	Grid	1 st focus electrode	1 st anode	2 nd focus electrode	2 nd anode
-12	-1.474	-6	-1,474	-10,230	0

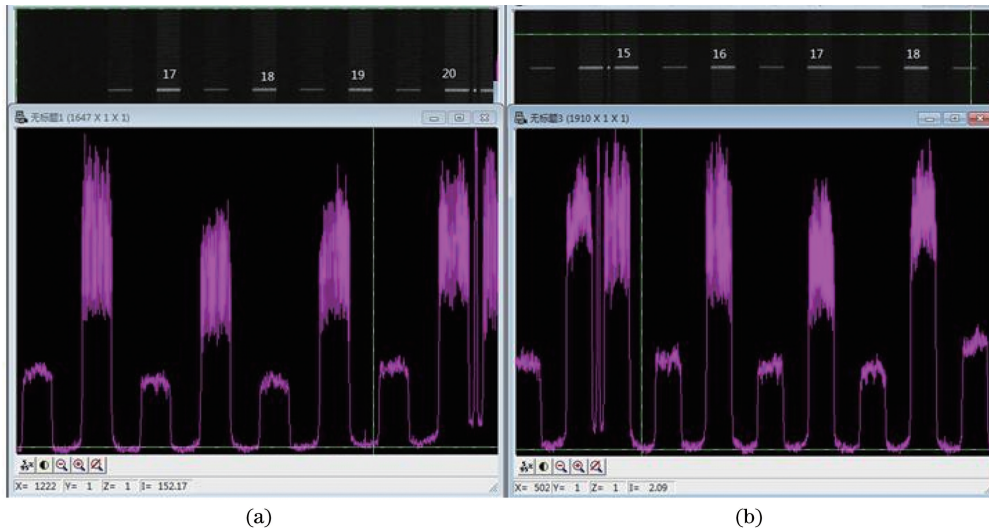


图 5 静态空间分辨率测试图。(a)阴极中心左侧实验图;(b)阴极中心右侧实验图

Fig. 5 Test results of static spatial resolution. (a) Image of left part of cathode; (b) image of right part of cathode

在图 5(a)中,最左侧为暗背景是由于装配精度的问题使得条纹管中各电极不同轴而引起的,图像整体往左侧偏移约 3 mm,所以本应显示的分辨线块(对应图 4 中最左侧的 16 和 15 lp/mm)超出荧光屏的左边界,故 CCD 仅抓取到暗背景;而在图 5(b)中,由于往右调整 CCD 与荧光屏的相对位置时未移动足够的量,使得其余分辨块(对应图 4 中最右侧的 19 和 20 lp/mm)超出 CCD 的右边界(但未超出荧光屏右边界),故图中无显示。

表 4 所示为图 5 中各分划线块对应的对比度大小,并取调制度为 5%时计算所得相应极限分辨率。

表 4 大物面条纹管条纹极限空间分辨率

Table 4 Limit spatial resolution of large format streak tube

Item	Spatial resolution / (lp · mm ⁻¹)							
	17	18	19	20	15	16	17	18
Contrast degree / %	42.1	40.1	35.1	33.3	30.2	33.1	32.6	21.4
Limit spatial resolution / (lp · mm ⁻¹)	31	33	32	33	24	26	28	25

根据在 2.1 节中所设计的分划板实际尺寸,图 4 中相邻 2 组分划板条纹像中心相距为 3 mm,加之每一分划板自身长度为 1 mm,因此可认为每一组分划板条纹(包括具有分辨线对的分划板,无分辨线对的矩形通光孔以及彼此之间的 2 组间距)的有效分辨范围为 4 mm。从图 5 可以看出,在仅观测到的范围内,阴极的工作面积有 8 组条纹,因此总成像长度至少为 32 mm。

在此阴极范围内,该条纹管可提供的分辨元数为

$$N_{\text{range}} = (31 + 33 + 32 + 33 + 24 + 26 + 28 + 25) \times 4 = 928. \quad (1)$$

此外,由表 4 可知,在离轴 15~20 mm 范围内发射的电子束,球面屏对其图像对比度的改善作用仍旧有效。因此,即便由于 CCD 尺寸的限制无法观测到 32 mm 范围外的条纹图像,但仍可以根据图 5 两侧条纹对比度及球面屏的有效范围推断出至少阴极中心最左侧的分划板(对应图 4 左侧的 15 和 16 lp/mm 分划板)具备 15 lp/mm 的极限空间分辨率,亦即至少仍旧有 9 mm 的阴极是可分辨的,可提

供至少 135 个分辨元的信息量。换言之,在静态工作模式下,大物面条纹管的阴极工作长度至少可达 40 mm,总共可提供 1000 个分辨元的信息量。

3.2 动态空间分辨率测试

动态测试中所使用的仪器包括有 3 倍频钛宝石飞秒脉冲激光器(中心波长为 266 nm,脉冲宽度为 130 fs)、像增强器、紫外光标准具、高压电源、真空机组、科学级风冷 CCD、PIN 光电二极管探头、延迟电路盒子;其中标准具是由紫外全反镜以及半反半透镜组合而成,间距为 21.2 mm,对应脉冲序列时间间隔为 141.2 ps。

测试时,令激光器输出的 266 nm 光束输入到紫外标准具中形成对应时间间隔的脉冲序列,照射到光电阴极上;同时使激光器输出的 800 nm 红光触发 PIN 光电二极管探头产生电信号,经由延迟电路盒子(T.D)后与 266 nm 紫光同步,触发扫描电路完成动态扫描,由 CCD 进行图像捕捉输入电脑中记录存储,动态测试原理图如图 6 所示,测试现场照片如图 7 所示。

由于动态测试时激光照射时间较短,光电阴极产生的信号较弱,所以在做动态测试时必须采用增强器;加之 CCD 的软硬件亦具有增益作用,为了防止采用大增益时光强使 CCD 饱和而影响测试结果,所以在测试时将 CCD 增益和增强器增益均调整为第二档;同时,扫描电路此时也设置为第二档,得到

测试结果如图 8 所示。从图 8 中可读出其相应的 I_{max} 、 I_{min} 、 I_{nos} 分别为 2276、1855、100,此时 20 lp/mm 对应的对比度为 0.107。

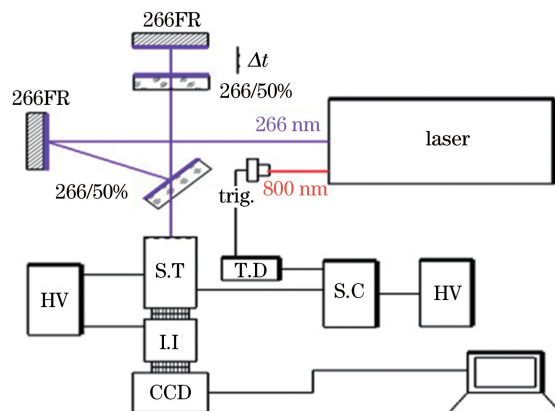


图 6 动态测试原理图

Fig. 6 Schematic of dynamic test

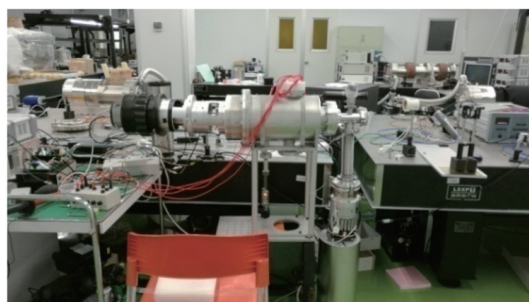


图 7 测试现场照片

Fig. 7 Photograph of test-site

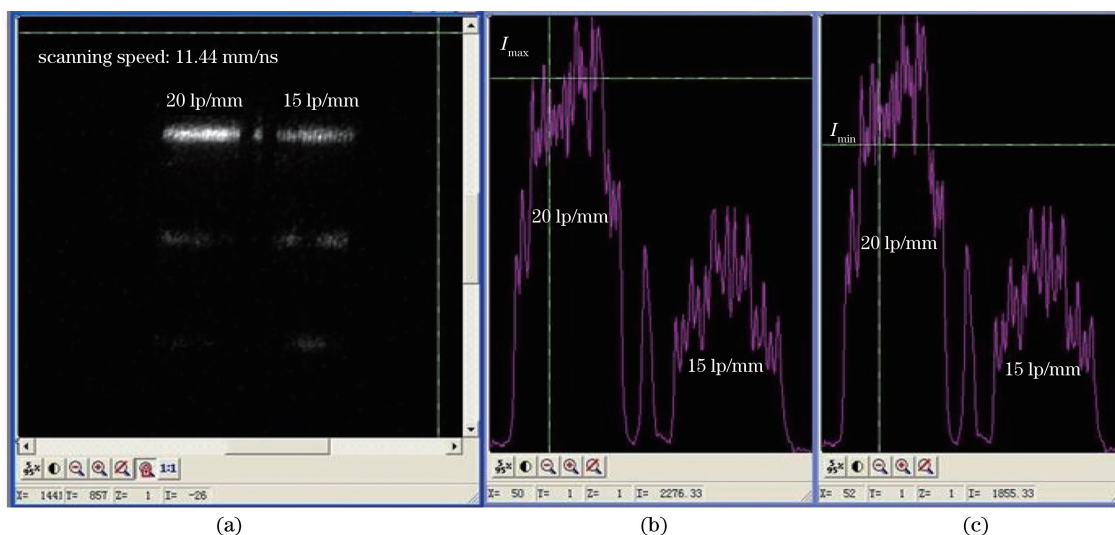


图 8 动态空间分辨率测试图。(a)动态空间分辨率实验图;(b)信号强度曲线最大值;(c)信号强度曲线最小值

Fig. 8 Test results of dynamic spatial resolution. (a) Image of spatial resolution; (b) maximum intensity of signal; (c) minimum intensity of signal

3.3 时间分辨率的测试

时间分辨率测试的目的是为测试仪器所能达

到的最佳时间分辨率。荧光屏的尺寸是有限的,意味着所对应占用的 CCD 像素数是固定的,换言

之在不同的扫描速度情况下,每个 CCD 像素所需的扫描时间亦不相同。在测试时间分辨率时,若所选择的扫描速度偏小,此时每个像素对应的时间分辨率可能较大,则由所读取的单个时间脉冲所占像素数计算出的时间分辨力并不能反应条纹相机的最佳时间分辨特性。由于扫描电路的每一

档扫全屏时间逐档增加,所以为了精确测量时间分辨率,测试时扫描电路选第一档;此外,为了防止增强器增益过大而导致 CCD 数据饱和,同时为了保证最小可探测脉冲具备一定亮度,则 CCD 增益调制为第三档,增强器增益调制为第一档。时间分辨率测试结果如图 9 所示。

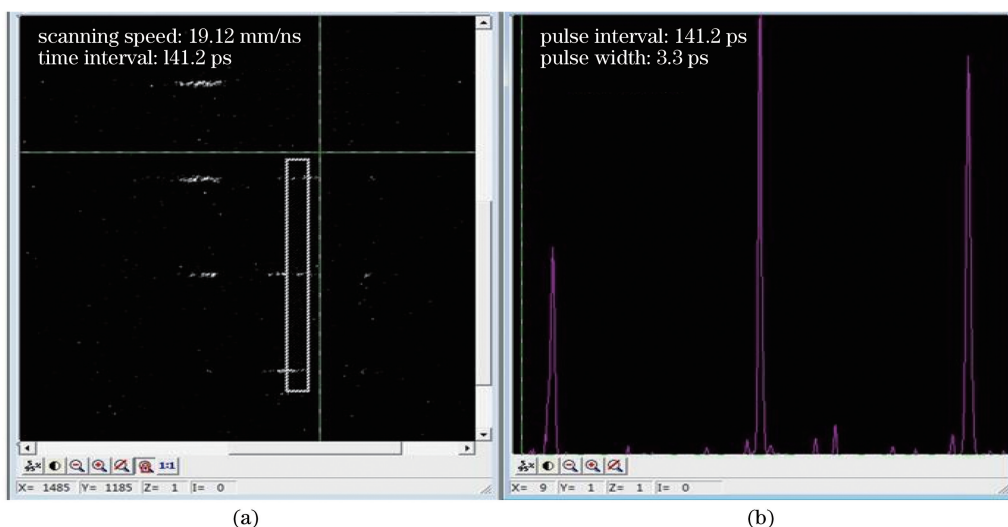


图 9 动态时间分辨测试图。(a)时间分辨实验图;(b)信号强度曲线

Fig. 9 Test results of dynamic temporal resolution. (a) Image of temporal resolution; (b) curve of signal intensity

图 9 中峰峰间距为 214 pixel,对应时间间隔为 141.2 ps,故每个像素对应时间分辨能力为 0.66 ps,单个脉冲半峰全宽占 5 pixel,因此由像宽确定的时间分辨率可以到达 3.3 ps。

3.4 动态范围测试

在进行动态范围测试时,为了保证能探测到最

小脉冲强度,同时为了避免脉冲展宽 20%,所以 CCD 增益调整为第三档,增强器增益调整为第一档,扫描电路设置在第二档;同时为了降低背景噪声,CCD 降温至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测试时先抓取无光照时的图像用于做背景噪声扣除,继而再捕捉扫描图像,已扣除背景噪声之后的动态范围测试图如图 10 所示。

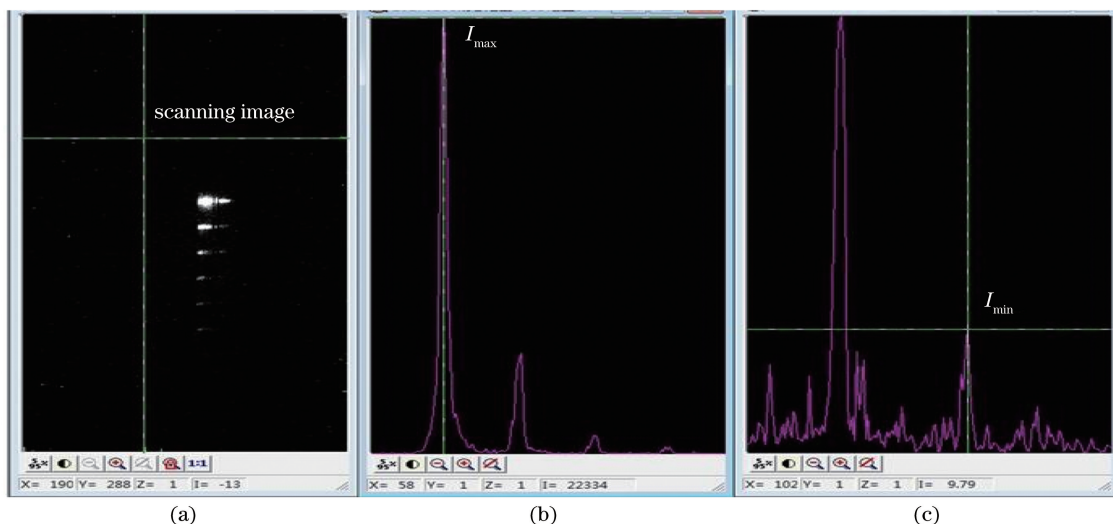


图 10 动态范围测试结果。(a)动态范围扫描图像;(b)信号强度曲线最大值;(c)信号强度曲线最小值
Fig. 10 Test results of dynamic range. (a) Image of dynamic range; (b) maximum intensity of signal;
(c) minimum intensity of signal

工程中动态范围的计算公式为

$$D = \frac{I_{\max} - I_{\text{nos}}}{I_{\min} - I_{\text{nos}}}, \quad (2)$$

式中 I_{\max} 、 I_{\min} 和 I_{nos} 分别为序列条纹图中的最大强度值、最小强度值和图像的背景噪声。

由图 10 中可读出扣除背景噪声之后的最大强度值和最小强度值分别为 22334 和 9.79, 从而由(2)式计算得出大物面条纹管的动态范围约为 2281:1。

4 实验对比

所研制的不等径大物面条纹管与 P2XSC 的测试结果如表 5 所示。需要强调的是:1)在 P2XSC 结

构中,条纹管结构是以同心球静电聚焦系统 RCA 73435 为原型的,而本实验测试用管型结构为非同心球结构,同时为了提高成像性能采用了球面荧光屏;2)P2XSC 在阴栅之间采用射电脉冲的形式,而本文中管型采用直流加压;3)在测试空间分辨率时,P2XSC 采用的是 7 lp/mm 的分划板测试,再用调制传递函数推算出其极限空间分辨率,而本文中则是采用 20 lp/mm 的分划板直接测试,得到其对比度为 10%;4)P2XSC 的动态范围可达 6500(通道动态范围),其测试方法是在单个 CCD 像元测试最大强度与噪声之后获得,而本文则采用通用方法,实测得出的动态范围优于 2000。

表 5 本文条纹管与 P2XSC 的比较

Table 5 Comparison between proposed streak tube and P2XSC

Parameter	P2XSC	Proposed streak tube
Total voltage /kV	20	12
Limit spatial resolution(5%) /lp · mm)	23	23
Magnification	1.08	1.35
Effect length of photocathode /mm	34.1	32
Dynamic range	6500(Channel)	>2000
Temporal resolution /ps	3	3.3
Number of CCD pixels /(pixel×pixel)	4096×4096	2048×2048
Area of CCD /(mm×mm)	36.9×36.9	27×27
Diameter of fluorescent screen /mm	62	52
Sweep time /ns	1.5,3.3,8.4,11	2,4,6,8
Fluorescent powder	P20	P20
Structure of screen		Spherical screen(R64 mm)
Total length of photocathode /mm	50	50

5 结 论

为了满足 ICF 实验对 X 射线条纹相机提出的新技术要求,研制了一种大物面 X 射线条纹变像管,其阴极总长度为 50 mm,有效长度可达 40 mm,静态空间分辨率信息分辨总量可达 1000 lp,动态空间分辨率为 20 lp/mm,时间分辨率达 3.3 ps,动态范围可达 2281:1,能够满足 ICF 实验所提出的大信息捕捉量的要求,是目前国内已知的具有实用价值的最大探测面积 X 射线条纹相机。

参 考 文 献

- [1] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 435-448.
- [2] Gatu Johnson M, Casey D T, Frenje J A, *et al.* Measurements of collective fuel velocities in deuterium-tritium exploding pusher and cryogenically

layered deuterium-tritium implosions on the NIF[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(4): 042707.

- [3] 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(7488): 343-348.
- [4] Bose A, Woo K M, Betti R, *et al.* Core conditions for alpha heating attained in direct-drive inertial confinement fusion [J]. *Physical Review E*, 2016, 94(1): 011201.
- [5] Hilsabeck T J, Frenje J A, Hares J D, *et al.* A stretch/compress scheme for a high temporal resolution detector for the magnetic recoil spectrometer time (MRSt) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11D807.
- [6] 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[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5920: 592008.
- [7] Liao H, Yang Q L. Novel X-ray streak camera with

- large dynamic range dedicated to initial confinement fusion facility[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(2): 250-254.
- 廖华, 杨勤劳. 神光Ⅲ主机大动态范围 X 射线扫描相机研制[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(2): 250-254.
- [8] Liao H, Yang Q L. Development of a self targeting X-ray streak camera of Shenguang-III prototype facility[J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2014, 31(6): 614-617.
- 廖华, 杨勤劳. 神光Ⅲ原型装置自瞄准 X 射线扫描相机研制 [J]. 深圳大学学报 (理工版), 2014, 31(6): 614-617.
- [9] Gu L, Zong F K, Li X, *et al.* Development of X-ray streak camera with large dynamic range and high temporal-spatial resolution [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1234001.
- 顾礼, 宗方轲, 李翔, 等. 大动态范围高时空性能 X 射线条纹相机的研制 [J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1234001.
- [10] Zhang J J, Yang Q L. Design of approximate concentric sphere large format X-ray streak tube[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051101.
- 张敬金, 杨勤劳. 类同心球大物面 X 射线条纹管设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051101.
- [11] Hui D D, Tian J S, Lu Y, *et al.* Streak tube with large work area and small size used in lidar detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1232001.
- 惠丹丹, 田进寿, 卢裕, 等. 用于激光雷达的大探测面积超小型条纹管 [J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1232001.
- [12] Zhang Z W, Li B, Wang C Y, *et al.* Preparation of parylene film by vapor deposition[J]. Materials Review, 2003, 17(6): 86-87, 83.
- 张占文, 李波, 王朝阳, 等. 气相沉积法制备聚对二甲苯薄膜 [J]. 材料导报, 2003, 17(6): 86-87, 83.
- [13] Du B C, Wang J R. Electron optics [M]. 1st ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- 杜秉初, 汪健如. 电子光学 [M]. 1 版. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [14] Zhang J J. Electro-optical designment and experiment research on large format X-ray streak tube[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
- 张敬金. 大物面 X 射线条纹管电子光学设计与实验研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [15] Zhang J J, Lei B G, Yang Q L. Improvement of imaging performance for X-ray image tube[J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2017, 34(1): 14-19.
- 张敬金, 雷保国, 杨勤劳. X 射线条纹管成像性能提升的研究 [J]. 深圳大学学报 (理工版), 2017, 34(1): 14-19.