



·惯性约束聚变物理与技术·

激光聚变领域高性能条纹相机研究现状与展望*

胡 昕¹, 李 晋¹, 刘慎业¹, 张昆林², 黎宇坤¹, 王 峰¹,
杨家敏¹, 丁永坤³, 江少恩¹, 张 兴¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 北方夜视技术股份有限公司, 昆明 650217;
3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 条纹相机(包括 X 射线条纹相机和可见光光学条纹相机)是一种高时空分辨的诊断设备,在激光惯性约束聚变(ICF)物理实验研究中具有非常重要的应用。介绍了当今国内外激光聚变领域获得广泛应用的两种主要类型条纹相机的技术性能以及各自的技术特点,它们分别采用了同轴电极双聚焦电子光学扫描变像管和双板电极电子光学扫描管。在技术指标方面,重点论述了条纹相机动态范围的判据,分析了激光聚变实验对条纹相机动态范围的需求,介绍了当今国际上高性能条纹相机动态范围指标的现状。文章也介绍了和条纹相机发展应用相关的几项重要技术进展,这些进展包括先进光时标、抗辐射加固记录系统和抑制相机背景噪声的阴极选通技术。

关键词: 激光聚变; 条纹相机; 扫描管; 抗辐射加固; CMOS 器件; 阴极选通

中图分类号: O463; TL65

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.200109

State of the art and future prospective of high performance streak cameras for laser fusion

Hu Xin¹, Li Jin¹, Liu Shenye¹, Zhang Kunlin², Li Yukun¹, Wang Feng¹,
Yang Jiamin¹, Ding Yongkun³, Jiang Shaoen¹, Zhang Xing¹

(1. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China;*

2. *North Night Vision Technology Co Ltd, Kunming 650217, China;*

3. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

Abstract: The streak cameras have very important applications in Inertial Confinement Fusion (ICF), including x-ray streak cameras and optical streak cameras. At present, they are still the core diagnostic devices with the highest temporal resolution in this field. This paper introduces the performance and characteristics of two main types of the streak cameras widely used in the field of laser fusion both domestic and international. They are equipped with coaxial electrode double-focus electron optics streak tube and bilamellar electron optics streak tube respectively. In terms of specifications of streak camera, the criteria of dynamic range of streak camera are emphasized, the dynamic range data of today's international high performance streak cameras are presented. The paper also introduces several important research progresses in the development of streak camera technologies, including advanced backlighting ultraviolet fiducial system, neutron radiation tolerant device and gated cathode technology.

Key words: laser fusion; streak camera; streak tube; radiation tolerant; CMOS device; gated cathode

自激光惯性约束聚变(ICF)研究诞生以来,条纹相机就一直是该领域最重要的实验诊断设备之一,其技术发展自始至终与在物理实验中的应用需求息息相关,例如,激光聚变点火物理研究非常重视对内爆靶丸内爆速度的精密测量,也需要准确测量出相对于驱动激光零时刻的靶丸自发光峰值时间(bangtime)。采用 X 射线条纹相机结合弯晶成像对靶丸内爆流线的背光照相测量^[1],可以给出随时间变化的内爆速度、壳层剩余质量等关键物理量;通过伴随测量的时标基准信号,可以知晓内爆发生的峰值时刻。除了这种高分辨时空测量应用,对研究目标能谱和时

* 收稿日期:2020-05-10; 修订日期:2020-07-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA04033);科学挑战专题项目(TZ2016001)

作者简介:胡昕(1968—),男,高级工程师,从事时间分辨超快诊断技术研究;huxin88@sina.com。

间信息的同时测量也在高能量密度物理(HEDP)研究中发挥着巨大作用。但是总体上,条纹相机的综合技术水平,尤其是扫描变像管的技术状态还不能完全满足物理实验的需求,主要原因是高性能新型扫描变像管的研发和技术创新自从20世纪90年代开始就面临技术瓶颈。ICF领域对条纹相机的技术指标要求主要有光阴极长度、时间分辨率、空间分辨率、响应灵敏度和动态范围等,而且这些主要技术指标在激光聚变领域几乎都拥有同样的权重,需要兼顾多项性能技术指标也是制约条纹相机技术发展的重要原因。经过多年的实践应用和优胜劣汰,在激光聚变研究领域,国际上基本形成了以两种综合性能优良的扫描变像管为基础研发条纹相机的格局,美国国家点火装置条纹相机采用了同轴电极双聚焦电子光学的扫描管,而法国兆焦耳激光装置(LMJ)的条纹相机则采用了板状电极结合电四极透镜电子光学(bilamellar electron optics)的扫描管。为了全面掌握当今国际上这两种主流扫描变像管的技术特点,尤其是为了研究和比较国内非常罕见的双板电极电子光学扫描管,中国工程物理研究院(简称“中物院”)激光聚变研究中心(LFRC)对于上述两种扫描管进行了设计和研制,进而研制出了多种X射线条纹相机和可见光光学条纹相机,并对这两类相机的一些主要技术指标进行了测试和比较。伴随激光聚变精密物理实验的发展,实验对相机的性能和定量化提出了更高的要求,条纹相机的研发过程中衍生了许多其他相关新技术,当前主要有光时标系统、强辐射环境下条纹相机的抗辐射加固和背景噪声抑制等。本文将在上述框架下详细介绍激光聚变领域条纹相机相关技术的国内外状况和进展,并梳理面临的挑战和机遇。

1 激光聚变领域条纹相机的主要类型和技术性能

1.1 同轴电极双聚焦电子光学扫描相机

当前,采用同轴电极双聚焦电子光学扫描变像管研发的高性能气室型条纹相机是美国国家点火装置和中国100 kJ激光装置物理实验所用的主要条纹相机类型,其特点是拥有均衡而良好的性能技术指标。1982年,英国首次报道的采用Photochron IV型扫描管研发的亚皮秒条纹相机^[2],开创了扫描变像管双聚焦的先河,后来这种管型和双聚焦理念得以广泛使用。美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)从NOVA激光器开始到国家点火装置(NIF)实验诊断一直主要采用这种管型研发和制造条纹相机。中国科学院西安光学精密机械研究所牛憨笨院士从英国工作回国后首先在国内大力推广促进了这种扫描管研发和应用^[3],使其成为中国激光聚变研究领域条纹相机诊断设备主要采用的扫描管管型。中物院激光聚变研究中心为中国100 kJ激光装置物理实验研发的这类扫描相机的电子光学仿真图如图1所示,仿真图除了显示光电子的踪迹,还通过彩条的颜色指示电场内光电子能量。图2为扫描管实物照片,显示了扫描管聚焦区、等位区和荧光屏三段结构部件。

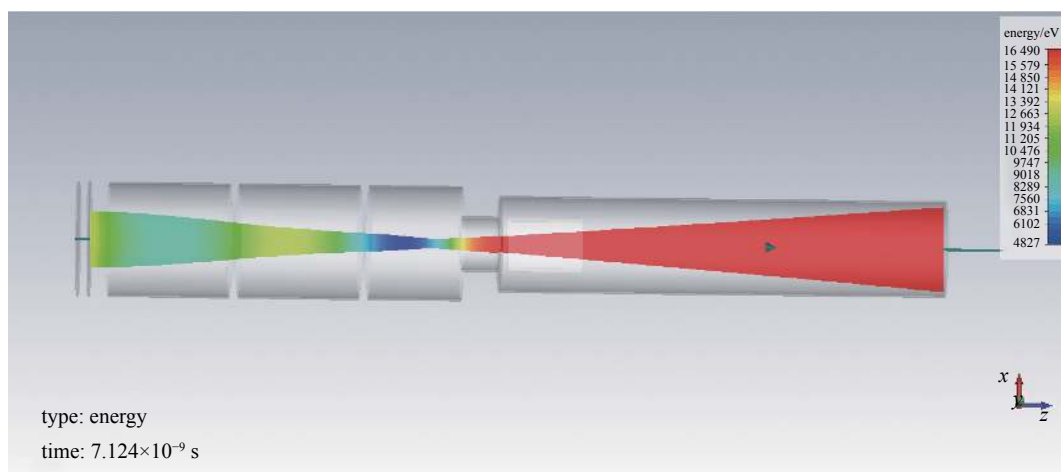


Fig. 1 Electron optics simulation map of coaxial electrode double-focus streak tube

图1 同轴电极双聚焦扫描管电子光学仿真图

采用同轴电极双聚焦扫描变像管设计和研发的气室型X射线条纹相机工程结构图如图3所示。该相机采用碘化铯光阴极,阴极对能量小于15 keV以下的X射线响应,相机前端通过紫外光纤向阴极馈入351 nm波长的梳状紫外光脉冲(该光脉冲可用于扫速定标,还可作为时间基准)。实验时,为了防止通过扫描管阳极孔直穿的X射线对像增强器和电荷耦合器件(CCD)的辐照影响,安装在前端法兰的扫描变像管设计为倾斜3.5°。相机所有组件安装在气密的圆柱形气室内,通过后面板的各类连接器件完成所需要的水、电和光的传输。气室中间可插入一个

真空密封转接法兰,相机可以直接安装在小型靶室的法兰上运行。相机总长约 1.4 m, 外径 $\phi 234$ mm, 总质量约 60 kg, 相机可整体沿气室轴心线旋转, 获得多种阴极径向方位。

为 100 kJ 激光装置物理实验研发的基于同轴电极扫描管的 X 射线条纹相机主要技术指标如表 1 所示。其中, CTF 为对比度传递函数。

需要特别强调的是, 表征条纹相机的一个关键技术指标是动态范围。目前欧美国家对条纹相机动态范围的定义和以前有很大的不同, 定义为信号强度对应的入射能量饱和阈值和探测阈值的比值。由于 X 光探测阈值测量非常困难, 美国 LLNL 将其定义为噪声均方根(RMS)值的三倍^[4]。饱和阈值定义变得非常严格, 选取造成五项技术指标恶化的最低 X 光入射能量为饱和阈值^[5], 而不是传统的仅指时间分辨率的恶化。这五项技术指标是: (1)空间扩展函数(LSF)展宽 20%; (2)因扫描管放大倍数改变而带来的空间位置偏移量等同于空间分辨的情形(主要发生在 bilamellar 电子光学扫描管, 这种扫描管的放大倍数会随入射光强度的变化而发生轻微变化); (3)时间半宽展宽 20%; (4)测量上升时间展宽 20%; (5)条纹相机整个系统的增益非线性超过 20%。根据这个严格的定义, 美国 LLNL 的 X 射线条纹相机动态范围只有 20(这是空间分辨恶化造成的), 法国原子能委员会(CEA)的 X 射线条纹相机也只有约 26。之所以这样严格定义, 是因为现在的激光聚变实验研究, 通常来说, 测量的 X 光信号脉宽远大于时间分辨, 而空间分辨往往处于应用要求的极限状态, 不允许有恶化。中国目前尚未建立这种严格的动态范围测试方法, 仅以造成时间分辨半宽展宽 20% 的入射能量作为动态范围饱和阈值。



Fig. 2 Coaxial electrode double-focus streak tube
图 2 同轴电极双聚焦扫描管

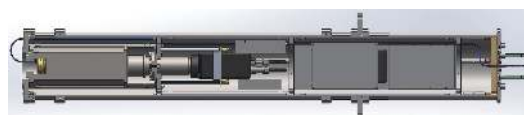


Fig. 3 LFRC's present design of X-ray streak camera based on coaxial electrode double-focus streak tube inserted inside an air box
图 3 激光聚变研究中心基于同轴电极双聚焦扫描管的气室型 X 射线条纹相机设计

表 1 同轴电极扫描管 X 射线条纹相机技术指标

Table 1 Performance of X-ray streak camera based on coaxial cylinder electrode streak tube

calibration test	Xsc1* of LFRC (coaxial cylinder electrode)	notes
temporal resolution	0.5% of full screen streak time	100 μ m slit width before cathode
spatial resolution/(lp \cdot mm ⁻¹)	20 @10%CTF	in the center of the cathode
dynamic range (5 ns sweep)	~200 : 1	variation of 20% of the measured temporal FWHM
effective cathode length/mm	30	5 lp/mm@10%CTF at the edge of the cathode
magnification	1.26	cathode high voltage at 12 kV

*Xsc1: X-ray streak camera 1

近几年同轴电极双聚焦扫描管技术进展主要有两项: 一是针对长阴极边缘空间分辨的电子光学场曲像差矫正, 二是采用阴极背照的时标系统(在文章第 2.1 节详述)。在美国国家点火装置建成早期, 其研发的 X 射线条纹相机尽管阴极长度达到了 30 mm, 但是阴极离轴边缘空间分辨只有 2 lp/mm, 中国 100 kJ 激光装置物理实验所用同轴电极条纹相机边缘空间分辨也只有 5 lp/mm@10%CTF(对比度传递函数); 这是因为同轴电极扫描变像管的电子光学成像会带来严重的 Petzval 场曲, 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)近几年为此进行了专门电子光学校正。在采用传统平面阴极和平面荧光屏的情况下, 经过优化改良后, 其长阴极离轴边缘空间分辨达到了 20 lp/mm@45%MTF(调制传递函数)^[6], 这是目前同轴电极扫描变像管重要的技术进展之一。图 4 为我国 100 kJ 激光装置采用同轴电极扫描管的 X 射线条纹相机 30 mm 长光阴极中心和边缘空间分辨率测量结果(分别达到了 20 lp/mm@10%CTF 和 5 lp/mm@10%CTF), 分辨率图案从左到右分别为 5, 10, 15, 20, 25 和 30 lp/mm, 这是这类扫描管比较标准的空间分辨率数据。图 5 为美国 LLNL 对电子光学 Petzval 场曲畸变校正后的结果(圆点为校正后的测试, 正方点为未校正前的测试, 不同的颜色代表阴极测试点偏离阴极中心的距离), 可见校正前后扫描管空间分辨差异巨大, 这样的校正技术是非常值得研发的。

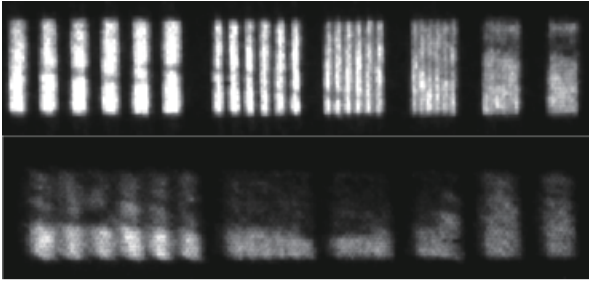


Fig. 4 Tested resolution of coaxial electrode double-focus streak tube

图 4 同轴电极双聚焦扫描管空间分辨率测试结果

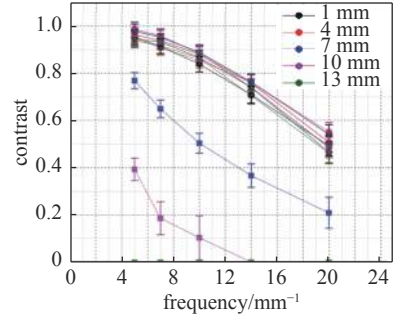


Fig. 5 MTF curves for the Petzval corrector scheme

图 5 场曲校正 MTF 曲线

1.2 双板电极电子光学扫描相机

法国 Photonis 公司在 20 世纪 90 年代推出的板状电极结合电四极透镜电子光学扫描管(简称双板电极扫描管)^[7], 是扫描管管型技术发展少有一项创新。该管型首次将扫描管的时间和空间聚焦独立起来, 分别聚焦, 这样在提高扫描管的放大倍数从而达到提高空间分辨率目的时, 并不影响时间方向的聚焦和时间分辨率, 加上电四极透镜优良的聚焦特性, 可以达到很高的时空分辨率。图 6 为激光聚变研究中心研制的双板电极扫描管电子光学仿真图和空间分辨率测试图像(阴极中心位置), 分辨率图案从左到右分别为 5, 10, 12.5, 17.5, 20, 22.5, 25 和 30 lp/mm。图 7 为双板电极扫描管内部主要结构照片。

为 100 kJ 激光装置物理实验研发的基于双板电极扫描管的 X 射线条纹相机主要技术指标如表 2。

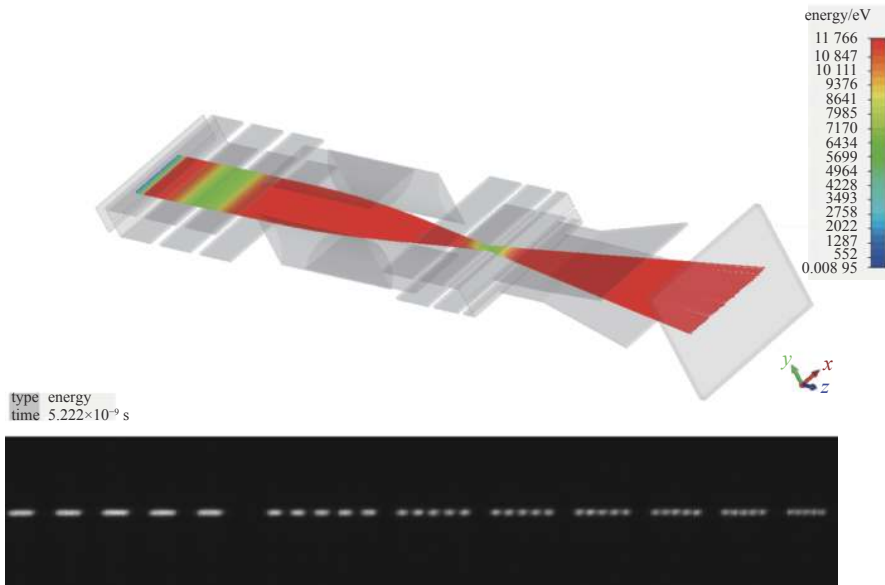


Fig. 6 Electron optics simulation image of bilamellar streak tube showing the spatial resolution

图 6 双板电极电子光学扫描管仿真图和空间分辨率测试图

双板电极电子光学采用有一个长条形窄光阑(slot)做加速电极, 在阴极面前方会形成虚拟的狭缝阴极^[8], 可以不需要安装阴极前置狭缝来获得时间分辨, 阴极实际有效宽度(扫描方向)和阴栅场强有关, 我们实验测得双板电极扫描管阴极有效宽度(FWHM)在阴栅场强为 0.5 mm/kV 时约为 145 μm (图 8), 和法国 LMJ 装置 X 射线条纹相机测试结果一致, 图 9 为法国 LMJ 装置条纹相机测得的阴栅场强和有效阴极宽度(FWHM)的关系曲线^[9]。

综上所述, 双板电极扫描管在时空分辨技术性能上高于同轴电极扫描变像管。我们同时进行了效率比对研究, 图 10 和图 11 为完全相同测试条件下采用同样的宽度为 3.5 mm 的光阴极测得到两种扫描变像管静态聚焦强度图像, 图 10 为同轴电极扫描管, 图 11 为双板电极扫描管, 双板电极扫描管计数强度是同轴电极扫描管的两倍左右, 也意味着, 在相同时间分辨率情况下, 双板电极扫描管灵敏度约是同轴电极扫描管的两倍。我们的双板电极扫描管在荧光屏上获得静态狭缝像宽度只有 72 μm , 我们的同轴电极扫描管(放大倍数 1.26)要想获得相同时间分辨率只能采用 57 μm 的阴极前置狭缝, 要想获得近乎相同的灵敏度, 约需要采用 114 μm 宽的阴极前置狭缝, 动态时间分辨率相应降低约一半。

中物院激光聚变研究中心在取得双板电极扫描相机良好技术性能基础上,利用这种扫描管的结构特点,创新设计了双阴极平板扫描变像管,每个阴极拥有和单阴极平板扫描管一样的有效长度和技术指标性能,阴极总长可以达到44 mm。不过,44 mm的阴极长度无论采用何种像管类型,如果不进行电子光学校正,都会产生严重的Petzval场曲。这种双阴极结构的扫描变像管尤其适合应用于双能段扫描晶体谱仪以及需要两种不同空间成像倍数的物理实验诊断。图12为双阴极双板电极扫描管电子光学仿真图和测得的双阴极空间分辨率图像,两段阴极中的每一段阴极的空间分辨率均达到了和单阴极双板电极扫描管一样的分辨率指标。图13为双阴极双板电极扫描管双阴极部件局部照片。

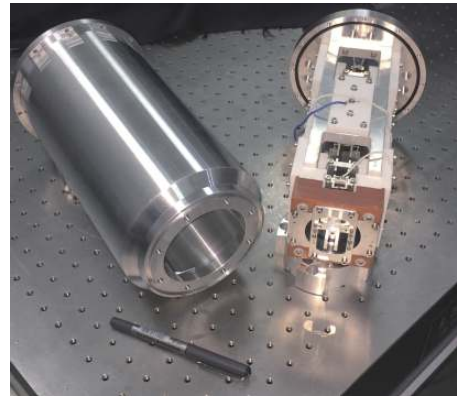


Fig. 7 Bilamellar electron optics streak tube
图7 双板电极电子光学扫描管

表2 双板电极扫描管 X 射线条纹相机技术指标

Table 2 Performance of X-ray streak camera based on bilamellar electron-optical steak tube

calibration test	Xsc2* for LFRC(bilamellar electron-optical system)	notes
temporal resolution	0.35% of full screen streak time	1 mm slit width before cathode
spatial resolution/(lp·mm ⁻¹)	30 @10%CTF	in the center of the cathode
dynamic range(5 ns sweep)	~200 : 1	variation of 20% of the measured temporal FWHM
effective cathode length/mm	22	10 lp/mm@10%CTF at the edge of the cathode
magnification	1.62	cathode high voltage at 12 kV

*Xsc2: X-ray streak camera 2

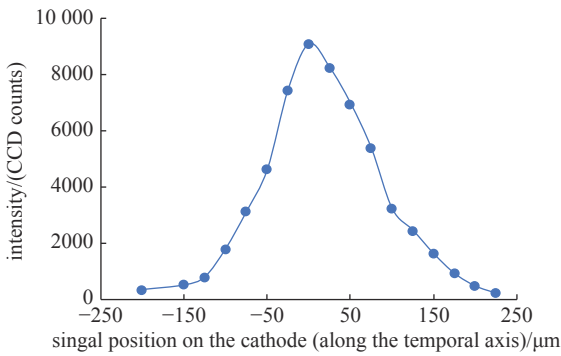


Fig. 8 Curves for signal position on the cathode vs CCD count

图8 阴极上的微点信号位置(沿时间轴)和强度计数关系曲线

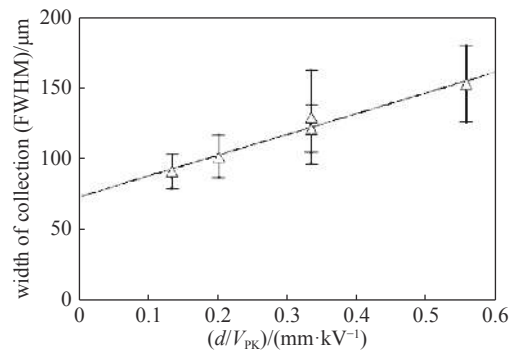


Fig. 9 Width of the collection surface as a function of the inverse of the extracting field

图9 有效阴极宽度和阴栅场强呈反比关系

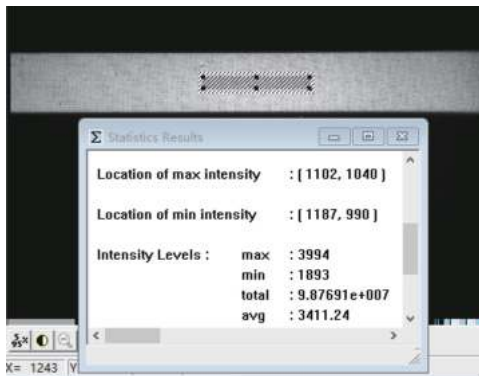


Fig. 10 Static focused image of coaxial electrode double-focus streak tube

图10 同轴电极扫描管对宽阴极的静态聚焦图像

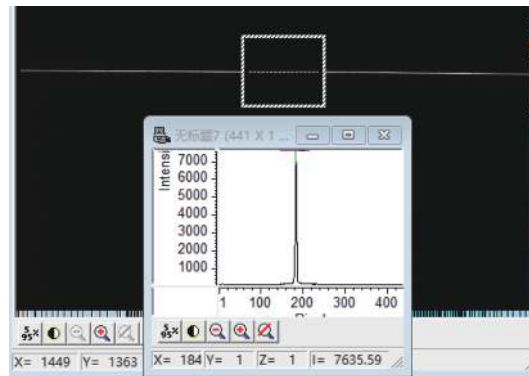


Fig. 11 Static focused image of bilamellar streak tube

图11 双板电极扫描管对宽阴极的静态聚焦图像

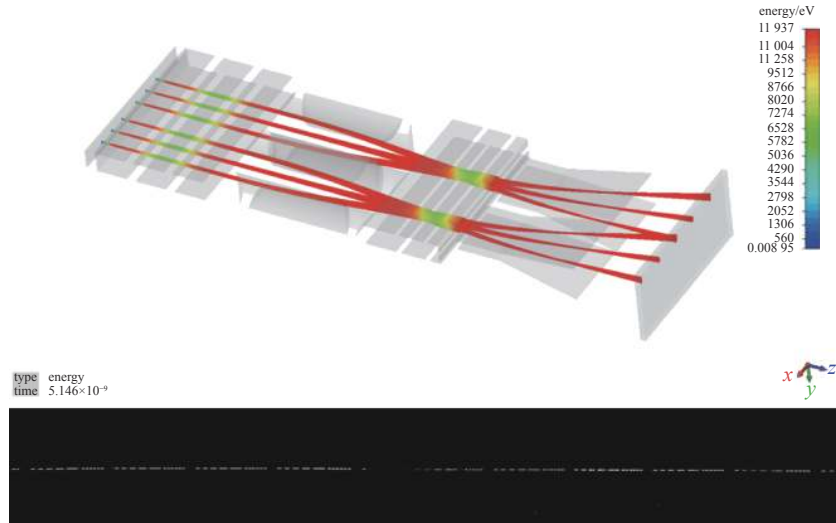


Fig. 12 Electron optics simulation map of double-cathode bilamellar streak tube and resolution chart

图 12 双阴极双板电极扫描管电子光学仿真和空间分辨率测试图像

尽管从技术指标检测看,双板电极的扫描管有一定优势,时空分辨率均高于同轴电极扫描管,同等时间分辨率条件下效率也略高于同轴电极扫描管,但是其有些使用方面也存在不足。首先,扫描管的技术性能指标对电极电压极为敏感,扫描管内的板状电极电压波动几 V 便会产生显著的影响,而电四极透镜电压波动几百 mV 就会对空间性能参数产生影响,因此在强电磁干扰工作场合,必须很好地解决电磁屏蔽和电压稳定度控制问题。我们测量了电四极透镜电压波动影响,测量了距离阴极中心 10 mm 位置的像点在荧光屏成像位置受电四极透镜电压的影响,发现当电四极透镜电压变动 1 V,光点在荧光屏上位置变动 54 μm ,相当于在阴极变动 33 μm 。其次,当入射光强变强时,由于电子束自身库仑场 (beam self-field) 对电四极透镜内部电场的影响,阴极上尤其是离轴较远的位置,放大倍数会有轻微的变化,也会导致信号空间定位的波动,这本质上也会影响相机的动态范围,需纳入动态范围的判据。

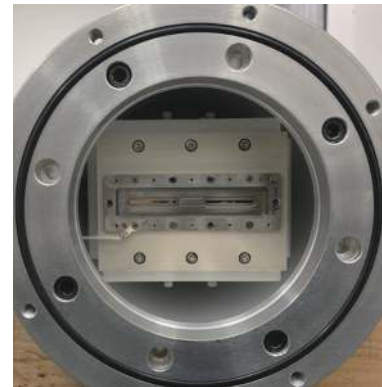


Fig. 13 Photograph of double cathode of the streak tube

图 13 双阴极双板电极扫描管局部照片

2 激光聚变领域条纹相机的主要相关技术进展

2.1 背照时标

在当前的激光聚变研究领域,条纹相机的紫外时标图像信号伴随实验图像信号同时测量,已经成为条纹相机的标准配置,紫外时标信号在处理实验数据以及确认条纹相机动态工作状态方面有着巨大的作用。近几年,紫外时标光馈入方式逐渐由阴极前照透射式转变为阴极背照反射式^[10],主要原因是:(1)紫外光背照阴极产生光电子的效率不像前照式那样易受阴极各膜层厚度影响,加上为掠入射,有利于提高二次电子发射效率,大幅度提高响应灵敏度,以数值孔径(NA)为 0.22 的紫外光纤传输 351 nm 时标光为例,前照式时标需要约 10 μJ 以上的序列脉冲总脉冲能量,而背照式时标仅需要不到 1 μJ ;(2)紫外响应灵敏度的提高有利于降低紫外激光器功率要求,同时也降低了对光纤损伤阈值的要求;(3)背照的时标组件不对阴极前方产生遮挡,有利于晶体谱仪等反射式分光元件的光路设计和排布;(4)背照型时标系统没有前端光纤干扰,有利于为条纹相机前端创造全封闭的电磁屏蔽结构,这对于当前电磁脉冲干扰异常严重的高功率激光装置来说显得尤为重要。当前美国国家点火装置和法国 LMJ 激光装置的 X 射线条纹相机均改造成了背照式时标系统,激光聚变研究中心目前正研发扫描像管的背照时标技术。图 14 为激光聚变研究中心研制的时标背照双板电极扫描管的设计图,采用紫外光纤传输 351 nm 时标光,光纤输出端面近贴光阴极面的方法获得背照时标信号。图 15 为美国 LLNL 同轴电极扫描管背照时标横断面设计图^[11],采用微型聚焦镜头对光纤输出的 263 nm 时标光成像,成像面为阴极面,以此获得微点时标信号。

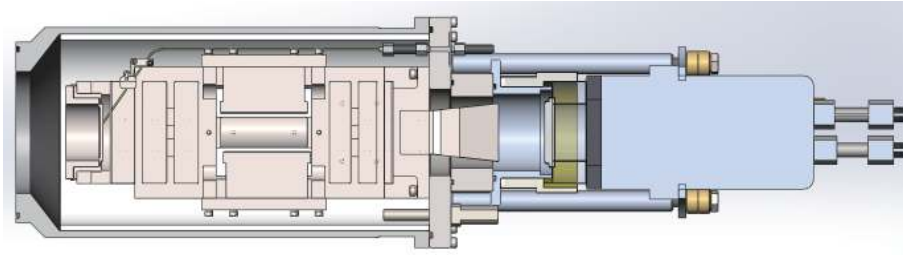
Fig. 14 Section view of bilamellar streak tube with 3ω backlighting ultraviolet fiducial

图 14 紫外光纤将 351 nm 时标传输至双板电极扫描管阴极俯视图

2.2 高产额中子辐射环境应用

高功率激光聚变物理实验会产生高产额的 DT 和 DD 中子,然而条纹相机在传统的近距离工作方式下,只能在中子产额 10^{13} 以下(中子积分通量约为 $10^7/\text{cm}^2$)进行实验诊断测量,高产额中子对条纹相机的影响主要表现在 5 个方面:(1)产生带电粒子能量沉积导致 CCD/CMOS(互补金属氧化物半导体)有非常严重噪声;(2)光纤面板(FOP)背景光(切伦科夫效应);(3)荧光屏闪烁噪声;(4)电路(主要是集成电路,即 IC)瞬间闩锁或大电流冲击导致的元件毁损;(5)各种器件累计电离损伤,包括 CCD、光纤面板、电子器件(永久性的损伤,不可逆),其中带电粒子能量沉积造成的 CCD/CMOS 噪声占据统治因素。由于承重和空间限制,近距离工作的气室型 X 射线条纹相机基本不能依靠屏蔽的方法抵御中子和 γ 射线的辐射危害,而主要依靠器件的抗辐射能力和两种时序的技术方法。时序的技术方法主要有两种,一是 CCD/CMOS 记录设备在中子消失之后才启动曝光动作^[12],二是 CCD/CMOS 记录设备在中子到达之前完成曝光动作。

2.2.1 中子消失后启动曝光

这种技术方法是条纹相机要在中子消失后才启动 CMOS 相机的曝光,在中子消失之前,CMOS 相机一直处于像元势阱内电子倒空(dump)工作模式,清除任何带电粒子能量沉积在像元势阱内产生的光电子,在中子消失的瞬间,快速启动 CMOS 相机的曝光,利用条纹相机荧光屏长余辉时间特性,同样可以捕获实验图像信号。其工作时序图如图 16 所示。

这种模式和没有采用 CMOS 相机倒空技术相比,能减少 90% 的中子背景噪声,其关键技术在于抗辐射大靶面倒空型 CMOS 相机的研制,要求这种倒空型 CMOS 相机在本身能容忍相应中子通量辐射的前提下,其工作时序中的各类时间延迟满足要求,其中最主要的技术指标是最小启动曝光时间,也就是收到倒空结束指令到真正启动曝光所需要的最小时间,以尽可能最大限度利用荧光屏的余辉时间完成曝光。

2.2.2 中子到达前曝光

由于即使在近靶点距离工作情况下,中子到达时间也晚于 X 光几十 ns 以上,因此 CMOS 相机可以先于中子到达前快速曝光并暂存信号电荷,曝光时间和条纹相机全屏扫描时间相同,并等待实验辐射效应消失后才读出,其工作时序见图 17。要实现这种工作模式,需要:(1)条纹相机直接采用 CMOS 相机代替荧光屏做记录设备,也就是这种 CMOS 相机对变像管聚焦成像的光电子直接响应;(2)CMOS 相机的电子器件本身能抗中子辐射;(3)CMOS 相机靶面必须和荧光屏面积相当,即大靶面,同时有足够的空间分辨率。美国国家点火装置简称这种 CMOS 器件为 hCMOS(hybrid CMOS)^[13],是相对于传统的前照(FSI)和背照(BSI)CCD/CMOS 相机而言的。hCMOS 由许多零组件混合而成,每个零组件可以单独优化,并且可以实现多帧的几 ns 时间快速曝光,研发难度非常高。其中,小靶面 hCMOS($25.4\text{ mm} \times 12.7\text{ mm}$)已成功应用于 Single Line of Sight(SLOS)诊断设备。我们认为由于这种 hCMOS 相机具有直接接收电子的特性,并且其转换效率随入射电子能量提高而增大,非常适合用于接收扫描管末端的高能光电子。以美国 ICARUS hCMOS 芯片为例,接收一个光电子产生的 CMOS 计数公式为^[14]

$$\frac{N_{\text{cmos,count.}}}{N_{\text{pe}}} = \frac{E_{\text{pe}} \times Q_E \times 12}{E_{\text{e-h}} N_{\text{e-h,min}}} \quad (1)$$

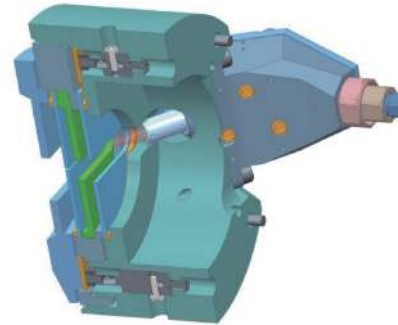
Fig. 15 Cross section of the streak tube with 4ω fiducial

图 15 4 倍频时标传输至阴极横断面图

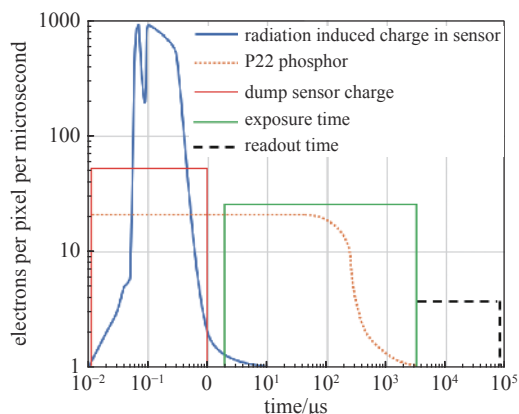


Fig. 16 Timing of the CMOS charge dump and read camera

图 16 倒空型 CMOS 相机工作时序图

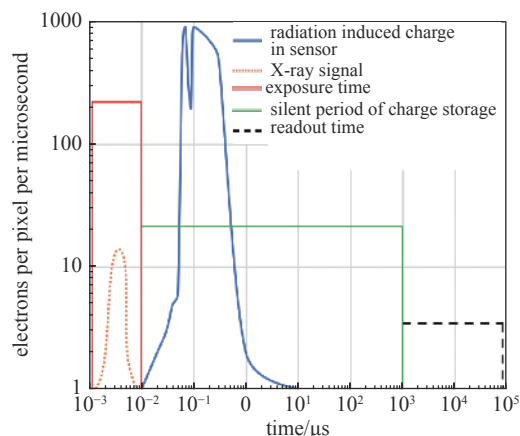


Fig. 17 Timing of the hybrid CMOS camera

图 17 hCMOS 相机工作时序图

式中, $N_{\text{cmos,count}}$ 为 CMOS 的计数; N_{pe} 为接收到光电子数目; E_{pe} 为光电子能量; Q_E 为对应光电子能量的转换效率; $E_{\text{e-h}}$ 为产生一个光电子需要的能量, 为 3.6 eV; $N_{\text{e-h,min}}$ 为电子空穴对探测电平; 12 为和满阱容量相关的系数。接收的条纹相机光电子能量按 10 keV 评估, Q_E 约为 75%, 则条纹相机一个光电子在这个 hCMOS 相机上可产生约 50 的计数, 因此如果研制出大靶面的 hCMOS 应该可以直接取代传统的荧光屏加 CCD 组合。

对条纹相机应用来说, 只需在中子到达前快速曝光等同于全屏扫描时间的一帧, 没有 SLOS 要求的多帧曝光难度。

2.3 阴极门控技术

一般来说, 条纹相机无论是 X 光条纹相机还是可见光条纹相机, 扫描管聚焦的电极是工作在直流高电压方式的, 这种配置对大部分应用来说是可行的。然而, 随着物理实验对诊断精密化要求的提高, 对条纹相机来说需要解决图像噪声控制问题, 尤其是可见光光学条纹相机对各种杂散光(包括散射光和环境光)极为敏感, 如果不进行严密的遮光处理, 会严重影响扫描图像的信噪比。为此, 美国国家点火装置(NIF)明确要求将所使用的可见光条纹相机进行改造, 使其具备选通门控能力。

控制条纹相机图像背景噪声, 目前一项有效的技术手段就是采用超快的高压门控技术, 使得条纹相机只在采集信号的很短时间曝光, 为达到控制效果, 门控脉宽需要做到几十 ns 到几百 ns 量级, 脉宽越短门控效果越好^[15]。此外, 采用高压门控技术, 如果是应用到阴栅极, 除了可以利用阴栅反向截止光电子获得干净的图像背景, 还有一个非常重要的作用是可以大幅度提高阴栅场强, 从而提高条纹相机的时间分辨率, 这也是飞秒时间分辨率条纹相机研制的重要技术手段之一。我们在可见光条纹相机阴极上采用了负高压脉冲门控技术。图 18 显示了采用的触发脉冲(黄线)、阴极高压负脉冲(绿线, 衰减 1000 倍)和测量的光信号脉冲(浅蓝线)之间的时序关系, 阴极高压门脉冲半宽约为 250 ns, 通过调节阴极高压脉冲触发延迟时间, 使得光信号脉冲落在阴极高压脉冲门宽时间内。图 19(a) 为光脉冲信号叠加环境强光同时辐照可见光条纹相机 S20 光阴极(有分辨率图案投影)情况下, 采用阴极高压门控技术测得的光脉冲信号, 光脉冲图像信噪比优良, 在高速门控模式下, 空间分辨率也达到了 15 lp/mm@10%CTF。图 19(b) 为光脉冲信号叠加微弱环境光辐照可见光条纹相机 S20 光阴极情况下, 采用传统的直流高压聚焦测得的光脉冲信号, 可以看出, 即使在微弱环境光影响下也严重干扰了光脉冲图像信号, 产生严重的背景噪声。

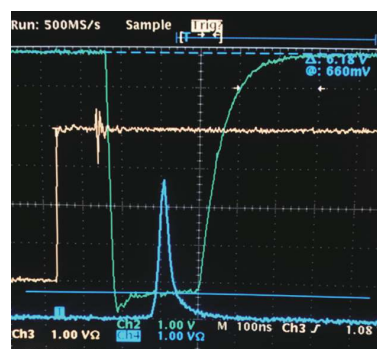


Fig. 18 Temporal relations between trigger pulse, gating pulse and optical signal pulse

图 18 触发脉冲、高压门脉冲和光信号脉冲时序关系

3 总结和展望

由于条纹相机扫描变像管的电子光学设计瓶颈, 导致条纹相机技术性能在将近 30 多年的时间里并没有取得实质性的重大进步, 因此, 我国经过多年的努力和追赶, 目前在条纹相机研发技术上基本已经与国外处于同一起跑

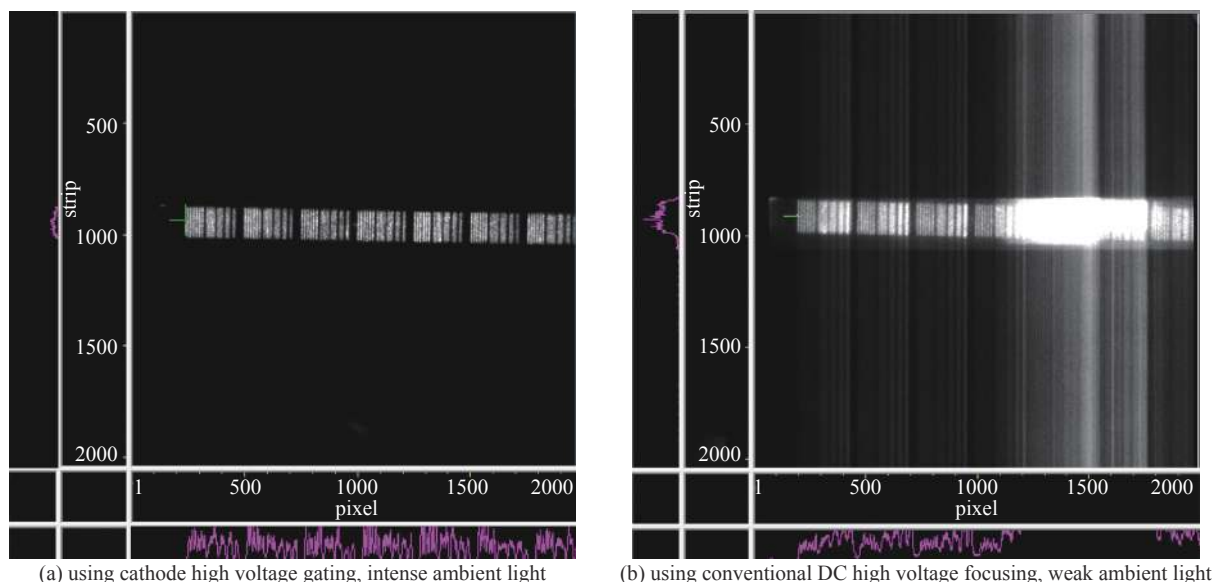


Fig. 19 Ambient noise reduction through cathode gating

图 19 阴极门控减少环境噪声效果图

线,面临着赶超的机遇。正如文中提到的,目前条纹相机的动态范围远远不能满足激光聚变研究所需。激光聚变领域要求的动态范围至少应该大于 100,而目前按照动态范围严格的定义,当今几大高功率激光装置物理实验所用条纹相机,即使采用的高性能扫描变像管,也只有 10~30 的动态范围,因此,只能设法控制信号强度,使其工作在动态范围内,其中动态范围在扫描管内的主要恶化位置位于阳极电子束汇聚处和聚焦区^[6]。在满足扫描管综合性基础上,研发下一代高动态范围扫描变像管是当前最为迫切的任务。

随着高功率激光装置聚变研究进入高产额中子阶段,如果不采取技术措施,条纹相机作为核心诊断设备将无用武之地。由于空间和承重条件限制,在高产额中子辐射环境,只能采用非常有限的中子和 γ 射线屏蔽措施,条纹相机要正常运行,必须采用新的技术手段。其中,抗辐射加固型电子器件的研发和工作时序控制技术是最主要的措施,研发满足这两个条件的条纹相机 CCD/CMOS 记录设备也变得极为迫切。抗辐射加固的电子器件主要是指条纹相机采用的 CCD/CMOS 器件的所有电子元器件都是耐强辐射的,条纹相机其余模块的电子器件也有耐辐射这一要求,但 CCD/CMOS 内电子器件对辐射最为敏感。根据仿真计算,这个容忍限度对不具备耐辐射的商业化电子器件而言辐射剂量率(dose rate)约为 10^4 rad/s^[16],而在高中子产额实验中,条纹相机工作位置的辐射剂量率峰值通常可达 10^8 rad/s 以上。由于通常无瞬时高功率脉冲辐射源可供测试,实际研发耐辐射电子器件可以一定总积分剂量(TID)的辐射源为研发测试条件,比如一定 TID 剂量的 ^{60}Co 辐射源或者额定通量的中子源。在时序控制降噪技术上,可以利用荧光屏余辉时间在中子辐射消失后曝光,也可以在中子到达前曝光(hCMOS),这两种适配条纹相机的大靶面耐辐射 CCD/CMOS 器件都是研发难度极大的器件,特别是针对入射的电子、软 X 射线,高能 X 射线而专门优化的大靶面 hCMOS,有着非常广阔的应用前景。目前在美国 NIF 上,hCMOS 结合漂移管研发的 SLOS 设备已经获得了成功应用,内部电子元器件不仅有一定程度的耐辐射能力,而且可以利用时序技术有效避开中子辐射产生的背景噪声。耐辐射的大靶面 hCMOS 器件和快速倒空型 CMOS 相机在我国条纹相机应用领域还是一片空白,如能研发成功并取代传统荧光屏加 CCD 相机的传统记录组合,将解决条纹相机在高产额中子辐射环境的应用问题。

在条纹相机相关技术上,背照时标技术由于扫描管内部狭小空间限制,必须相应改变扫描变像管的设计和装配方案,存在一定的难度,目前在国内还没有成功的应用。考虑到其重要性,今后激光聚变领域研发的 X 射线条纹相机扫描变像管都建议在扫描管内部标配背照时标组件。同样,在高速选通门控技术应用上,条纹相机尤其是可见光条纹相机应该以高速门控为目标,降低可见光条纹相机对使用环境的要求,并提高扫描图像的信噪比。

2019 年,在第十一届日本大阪惯性聚变科学技术会议(IFSA)上,LLNL 宣布联合时间分辨诊断领域的几家知名研发机构组成联合攻关团队,研发下一代高分辨元素数目和高动态范围的扫描变像管。就我们理解,这是带着颠覆性变革扫描变像管技术的使命而提出的,没有重大的技术创新难以突破现有的技术障碍,尤其是动态范围技术指标瓶颈,希望我国的相关研究团队能把握这一难得的机遇,在下一代大动态范围高性能扫描变像管研发上取得创造性成果。

参考文献:

- [1] Wang Feng, Jiang Shaoen, Ding Yongkun, et al. Recent diagnostic developments at the 100 kJ-level laser facility in China[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2020, 4: 035201.
- [2] Sibbett W, Niu H B, Baggs M R. Photochron IV subpicosecond streak image tube[J]. *Rev Sci Instrum*, 1982, 53(6): 758-761.
- [3] Niu Lihong, Yang Qinlao, Niu Hanben, et al. A wide dynamic range X-ray streak camera system[J]. *Rev Sci Instrum*, 2008, 79: 023103.
- [4] Opachich Y P, Kalantar D H, MacPhee A G, et al. High performance imaging streak camera for the National Ignition Facility[J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 125105.
- [5] Zuber C, Bazzoli S, Brunel P, et al. Performance of Laser Megajoule's X-ray streak camera[J]. *Rev Sci Instrum*, 2016, 87: 11E303.
- [6] MacPhee A G, Dymoke-Bradshaw A K L, Hares J D, et al. Improving the off-axis spatial resolution and dynamic range of the NIF X-ray streak camera[J]. *Rev Sci Instrum*, 2016, 87: 11E202.
- [7] Mens A, Dalmaso J M, Sauneuf R, et al. C 850X picosecond high resolution streak camera[C]//Proc of SPIE. 1991, 1358: 316-328.
- [8] Jaanimagi P A, Mens A, Rebuffie J C, et al. Photoelectron throughput in streak tubes[C]// Proc of SPIE. 1995, 2549: 62-70.
- [9] Bonté C, Harmand M, Dorchies F, et al. High dynamic range streak camera for subpicosecond time-resolved X-ray spectroscopy[J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, 78: 043503.
- [10] Opachich Y P, Palmer N, Homoelle D, et al. X-ray streak camera cathode development and timing accuracy of the 4ω ultraviolet fiducial system at the National Ignition Facility[J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 10E123.
- [11] Hatch B, Palmer N, Ayers S, et al. Performance and operational upgrades of X-ray streak camera photocathode assemblies at NIF[C]//Proc of SPIE. 2014: 92110H.
- [12] Kimbrough J R, Bella P M, Datte P S, et al. Characterization of a megapixel CMOS charge dump and read camera[C]//Proc of SPIE. 2013: 88500A.
- [13] Carpenter A C, Dayton M, Kimbrough J, et al. Single line of sight CMOS radiation tolerant camera system design overview[C]//Proc of SPIE. 2016: 99660H.
- [14] Nagel S R, Carpenter A C, Park J, et al. The dilation aided single-line-of-sight X-ray camera for the National Ignition Facility: Characterization and fielding[J]. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89: 10G125.
- [15] Datte P, James G, Celliers P, et al. Gated photocathode design for the P510 electron tube used in the National Ignition Facility (NIF) optical streak cameras[C] // Proc of SPIE. 2015: 95910D.
- [16] Beck T, Zuber C, Aubert D, et al. Recent advances in the development of X-ray cameras inserted inside a pressurized box for LMJ plasma diagnostics[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2867-2872.