

引用格式: ZHANG Yuchi, TIAN Jinshou, XUE Yanhua, et al. High-gain Ultra-small Streak Camera and Its Integrated Control System[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1032003

张宇驰,田进寿,薛彦华,等.一种高增益超小型条纹相机及其集成控制系统[J].光子学报,2022,51(10):1032003

一种高增益超小型条纹相机及其集成控制系统

张宇驰^{1,2},田进寿^{1,3},薛彦华¹,李知兵¹,李少辉¹,王俊峰¹,
刘百玉¹,高贵龙¹,陈萍¹,王兴¹,赵卫^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 超快诊断技术重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 极端光学协同创新中心, 太原 030000)

摘 要:针对机载激光雷达对小型化、高灵敏度、高增益及高时空分辨条纹相机的需求,研发了一种高亮度增益超小型条纹相机及其新型集成控制系统。该相机相较现役条纹相机体积与重量减小 2/3 以上,具备高灵敏度、大探测视场、高亮度增益、高时空分辨率等特点。测试得到阴极积分灵敏度为 268 $\mu\text{A}/\text{lm}$,亮度增益高达 20.1,时间分辨率优于 36 ps,其搭载的新型控制系统具备集成化程度高、抗电磁干扰能力强、兼容性高等特点,同时可将条纹相机扫描档位拓展至 12 路以上,并成功应用于西安光机所研制的 5200、6200 型等 5 款相机中。所研制的条纹相机已成功应用于激光雷达及激光聚变实验物理诊断中,运行良好。

关键词:条纹相机;控制系统;阴极灵敏度;亮度增益;集成度;兼容性

中图分类号: TN16

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20225110.1032003

0 引言

条纹相机作为有超高时间精度的诊断工具^[1-2],广泛应用于超快光学、材料学、生物医学等基础研究领域,还可应用于惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)、同步辐射光源、爆轰物理等大科学工程以及国防领域。近年来,基于条纹相机的激光雷达系统逐渐被应用于国土防御(导弹的导航与追踪、敌方伪装载具侦查、水雷探测以及障碍物的规避),海事安全(追踪非法船只、侦查失事船只、鱼群探测),地形地貌探测(3D 海底地貌勘察、海洋波谱分析、水下矿产探测、森林普查)等。此类应用场景要求条纹相机具备高探测灵敏度与高亮度增益,以便探测到更远距离或信号更弱的目标。同时作为水下重要区域目标识别以及副载波调制激光雷达等系统的重要探测设备,为方便无人机载、星载应用,要求条纹相机具备便携化、功能灵活、稳定性高等特点^[3-5]。

国际上,目前从事条纹相机研制的单位有日本滨淞(Hamamatsu)、德国 Optronis、美国 Sydor、加拿大 Axis Photonique 等;国内的研究单位有西安光机所、深圳大学、中国工程物理研究院等。前期各研究单位也都推出了各自型号的条纹相机,但是现役条纹相机普遍都因为体积大、笨重的缘故,不适合激光雷达、无人机载/星载等应用场景:如日本滨淞的 C10910(体积约为 741 mm×345 mm×300 mm,质量约 30 kg);德国 Optronis 的 SC-10(体积约为 794 mm×240 mm×250 mm,质量约 24 kg),且空间分辨率较低(5 lp/mm);西安光机所通用皮秒条纹相机 5 200(体积约为 750 mm×260 mm×350 mm),质量约 22 kg,具有较大的探测视场及高时空分辨率。为此本文主要针对机载激光雷达系统应用,开发一种高灵敏度、高时空分辨的便携化条纹相机。

基金项目:国家自然科学基金(No.12075311),中国科学院科研仪器设备研制项目(No.GJSTD20190004),中国科学院战略性先导科技专项 A 类(No.XDA25030900),中国科学院青年创新促进会(No. 2021402)

第一作者:张宇驰(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为超快诊断技术。Email: zycpower@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者):田进寿(1970—),男,研究员,博士,主要研究方向为超快诊断技术。Email: tianjs@opt.ac.cn

薛彦华(1984—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为超快诊断技术。Email: xueyanhua@opt.ac.cn

收稿日期:2022-01-12;录用日期:2022-03-28

<http://www.photon.ac.cn>

条纹变像管是条纹相机的核心器件,西安光机所惠丹丹、陈正凯等^[6]已为此类应用场景研制出大探测面积超小型条纹变像管;田丽萍、李立立等^[3]也研制出像缩小型小型条纹管,其中7 200型条纹管因其体积小、阴极灵敏度高、亮度增益强的特点,满足上述场景的应用需求。

同时针对机载激光雷达对条纹相机小型化、高可靠性的要求,需要研制一种高集成度、高可靠性的工控系统。前期西安光机所潘宝毅已开发了控制系统V1.0,吕斌开发研制了分布式控制系统V2.0版本^[7-9]。这两个版本已经逐步采取模块化设计,可完成对条纹相机的测控功能,但存在如下不足:高压控制模块需要手动控制,系统集成度低、兼容性及扩展性差、抗干扰能力差,且系统体积庞大,无法适用于超小型条纹相机。因此需要开发一套应用于超小型条纹相机的新工控系统。

本文在7 200型条纹变像管电子光学设计的基础上,通过理论模拟计算建立了合理多碱阴极结构模型,使得变像管阴极灵敏度突破 $268 \mu\text{A}/\text{lm}$,亮度增益突破20.1;通过模块化设计开发了一套具备集成度高、抗干扰能力强、多设备兼容扩展强等特点的新型控制系统,集成度相比工控V2.0提高了2.36倍。综合以上研究开发了一种高亮度增益超小型条纹相机,实现了条纹相机在弱光超快过程下高探测灵敏度、高增益、高时间分辨率,以及便携化与小型化的需求。

1 高亮度增益超小型条纹相机

高亮度增益超小型条纹相机由前端输入狭缝光学系统、高亮度小型化条纹变像管、像增强器、电源模块、工控系统、扫描模块、后端光学耦合系统及读出相机等部分组成,其中输入镜头、条纹管、像增强器、输出镜头和CCD位于一条轴线上,工控模块放置于独立的盒子,实现了机箱的紧凑型设计,结构总体布局如图1。各部分功能及工作原理为:超快现象(光学信号)通过光学系统成像在变像管的光电阴极面上,然后转换为光电子束,光电子在变像管中通过加速、聚焦、扫描后轰击荧光屏,将时间变化的电子像转化成空间分布的光学信号,后经由像增强器增强、CCD采集输出至上位机进行保存分析。

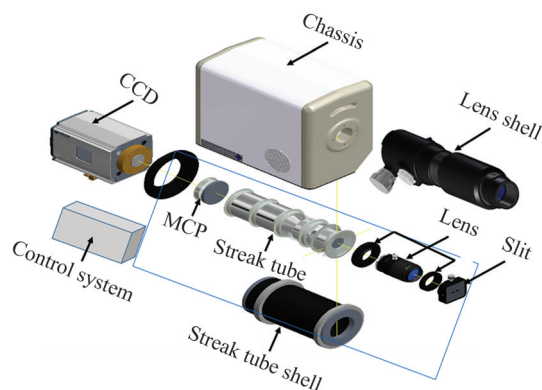


图1 高亮度增益超小型条纹相机总体架构

Fig.1 Overall architecture of ultra-compact streak camera with high brightness gain

1.1 超小型条纹变像管电子光学设计

条纹变像管是条纹相机的核心部件,其特性是影响条纹相机性能的最关键因素。本文采用三维电磁仿真软件CST对高增益小型化条纹管进行了数值模拟计算及优化设计。为了减小像差、提高边缘空间分辨率并增大阴极有效面积,设计上采用球面光电阴极和球面荧光屏,采用CST模拟计算确定最佳阴极及荧光屏曲率半径及各电极电压。条纹变像管的亮度增益与放大倍率的平方成反比,与电子透过率成正比,为提高条纹管亮度增益:1)将条纹管设计为像缩小型结构,其放大倍率 $0.7\sim 0.8$;2)采用狭缝加速栅极,与传统超精细栅网相比可将光电子的透过率提升 $30\%\sim 40\%$;3)将阴极负高压提升为 -15 kV ,即阴极产生的光电子以高达 -15 keV 的能量轰击荧光屏,提升荧光屏发光效率。

在光电阴极内表面沿狭缝方向每隔 1 mm 位置发射服从一束初始能量、方位角、仰角、初位置服从特定分布^[10]的电子束,每束电子束包含 $3\ 000$ 个光电子。利用CST Tracking求解器追踪电子运动轨迹,得到电子空间点扩展函数,从而计算条纹管的动态空间调制传递函数。图2是全屏时间为 50 ns (扫描速度为

$1.667 \times 10^{-3}c$)时狭缝方向的动态空间调制函数,由图可知,距离阴极中心9 mm时,荧光屏上动态空间分辨率为 $30.26 \text{ lp/mm@MTF}=5\%$,所设计变像管的放大倍率为 0.76,可以计算得条纹变像管光阴极的动态空间分辨率为 $23 \text{ lp/mm@MTF}=5\%$ 。若取空间分辨率高于 20 lp/mm 时的探测面积为有效成像面积,则所设计条纹管的阴极有效长度大于 18 mm,是传统条纹管的两倍。从光电阴极中心发射一束电子束,图 3 为其时间调制传递函数曲线,可知,当归一化强度值降低至 10% 时对应的时间频率为 41.53 ns^{-1} ,则条纹管的极限物理时间分辨率 $t=1/41.53 \text{ ns}=24.1 \text{ ps}$ 。

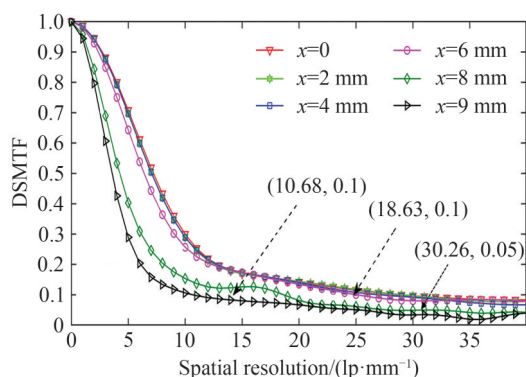


图 2 动态空间调制传递函数
Fig.2 Dynamic spatial modulation transfer function

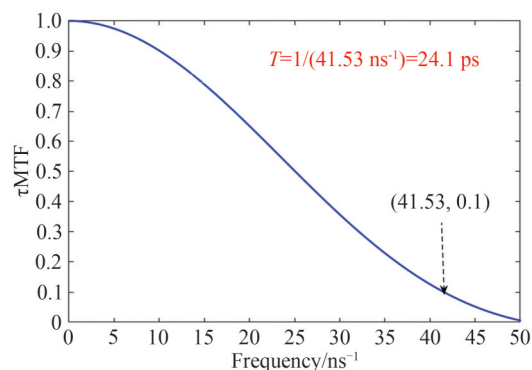


图 3 阴极中心点对应的的时间调制传递函数
Fig.3 Time modulation transfer function corresponding to the center point of the cathode

1.2 条纹变像管研制

条纹变像管是条纹相机的核心部件,其特性是影响条纹相机性能的最关键因素。所研制的变像管输入窗为石英玻璃,采用多碱光电阴极;输出窗为光纤面板,采用 P43 荧光粉,发光中心波长在 500 nm 附近,荧光屏有效直径 Φ 为 25 mm。

光电阴极的灵敏度决定着条纹变像管的探测灵敏度,为提高光电阴极灵敏度,进行了理论模拟设计及工艺实验研究。条纹管采用了多碱光电阴极 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$,为三层结构: $\text{Na}_2\text{KSb}+\text{K}_2\text{CsSb}+\text{SbCs}$ 。吸收层为重掺杂的 p 型 Na_2KSb ,为立方晶格结构,主要起吸收光子并产生电子的作用;表面为富 Cs 的强 n 型 K_2CsSb 过渡层及 SbCs 激活层,主要起降低表面电子亲和势的作用,能有效地提高整个阴极灵敏度并使长波阈值发生一定的“红移”。光电转换的过程可由三步光电子发射模型解释,价带内的电子吸收光子能量后,激发到导带,光电子经散射输运至真空交界面,能量较高的电子克服表面势垒向真空发射,形成光电子。光阴极结构模型和三步光电子发射模型如图 4。

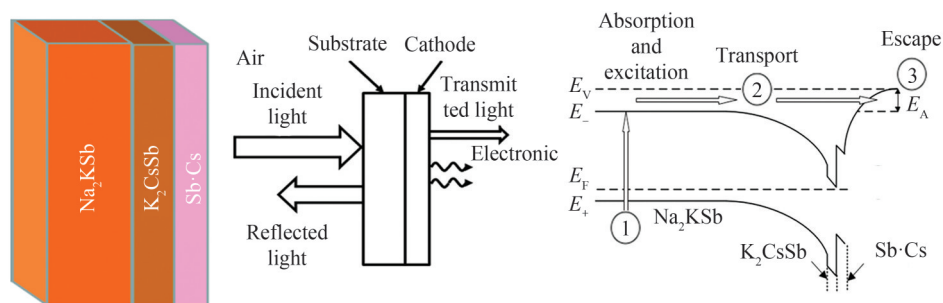


图 4 光电阴极结构模型和光电子三步发射示意
Fig.4 Schematic of photocathode structure model and photoelectron three-step emission

多碱光电阴极利用多次蒸镀法制备,配合膜厚及弱电流监控系统,精确控制阴极厚度以及各元素配比。新的激活工艺使光电子逸出概率更高,从而提升阴极性能,保证了高阴极灵敏度,优化的工艺过程为:1)常温下制备导电基底;2)在 180°C 同时蒸发 Sb 和 K,生成 K_3Sb ,在 230°C 时蒸发 Na,当光电流超过极大值并下降

一定百分比时,停止蒸发Na;3)在180℃同时蒸发Sb和K,直至光电流达到极大值;4)重复多次配给Na、Sb、K交替直至达到合适的厚度;5)在160℃下,Sb、Cs反复沉积,直至获得最大光电流。过程采用转阴极制备,真空度始终保持在 10^{-7} ,减少了系统对阴极材料的污染。

图5为研制的高亮度增益超小型条纹管实物。其外形尺寸仅为158.7 mm×Φ82.3 mm,质量为1.8 kg,相比传统条纹管减小了75%以上。条纹管关键参数如表1。



图5 超小型条纹管实物

Fig.5 Physical picture of ultra-small streak tube

表1 条纹管性能参数

Table 1 Streak tube performance parameters

Index	Parameter
Size	158.7 mm×Φ82.3 mm
Weight	1.8 kg
Input window material	Quartz glass
Photocathode materials	Multi-alkali cathode
Cathode effective size	18 mm×3 mm
Spectral response range	200 ~850 nm
Output window material	Fiber optic panel
Phosphor	P43

1.3 条纹相机电控模块及其可视化系统

综合分析旧控制系统的缺陷,新控制系统需要在保证各项功能稳定工作的基础上大幅度优化电路集成度,增强长距离通信过程中的抗电磁干扰能力,提高电路的兼容性与拓展性,以便更灵活地应用于紧凑型条纹管^[11-13]。图6为设计的集成控制系统总体架构图。控制功能包括相机总电源、高压电源、增强器选通快门模块的开启关闭,工作模式、扫描模式、扫描档位的选择,延时控制及增益调节;监测功能包括实时反馈条纹管的偏转电压、MCP板电压、触发信号、脉冲源信号等。系统各功能如表2。

表2 测控系统功能概述

Table 2 Overview of the functions of the measurement and control system

Module	State	Operate	Characterization	Application
Power	On/off	Manual switch	Control system run/not run	
CCD	On/off	Manual switch	Capture images/do not collect	
Streak tube	High voltage/no voltage	Software	Streak tube runs/does not run	
	Static	Software	No scan voltage	Optical circuit commissioning
	Dynamic	Software	Scan voltage	Capture images
MCP	Variable voltage	Software	The image brightness changes	Optimize the image
Delay	Variable time	Time-lapse box		The optical-electric time scale is uniform
Scan circuit	Variable slope voltage	Software	The scan time range changes	

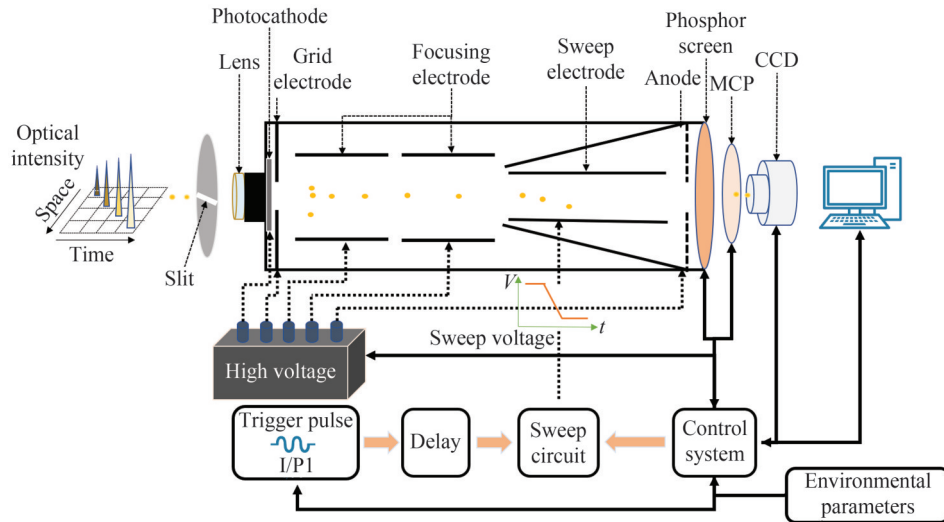


图6 集成控制系统总体架构
Fig.6 Integrated control system overall architecture

1.3.1 硬件电路架构

系统硬件采取底层划分与功能复用的设计方式^[14-15],现役系统板级总面积为402.85 cm²,新工控系统板级总面积为170.94 cm²,电路集成化程度相比提高2.36倍。电路-物理层信息交互采用24 pin接口复用,根据不同功能调整下位机软件,提高了工控系统兼容性。工控系统-上位机信息交互采用光纤通讯,避免了环境中电磁干扰对传输线的影响,可以进行长距离信息传输。工控系统的硬件电路架构如图7,可划分为电源模块、主控模块、A/D模块、D/A模块及数字I/O模块。

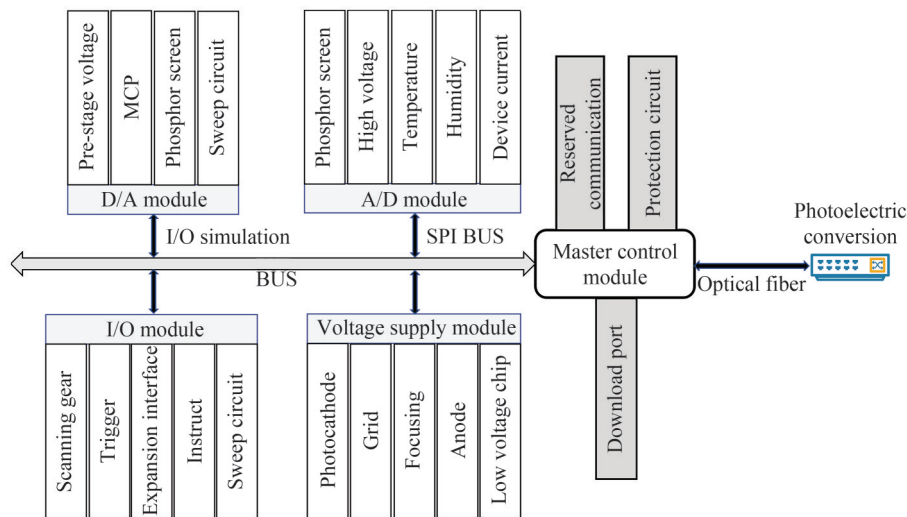


图7 系统的硬件架构
Fig.7 Architecture of hardware system

硬件电路预留了8路GPIO通讯口,便于拓展外设。在I/O模块、A/D模块、D/A模块中使用晶体管阵列、ESD芯片组成保护电路。最后使用屏蔽机箱进一步减少外界的电磁干扰,保证了控制系统的稳定性与抗电磁干扰能力。

1.3.2 可视化系统

上位机软件在Qt、OpenCV环境下编写,只有在相机正常、下位机正常、通讯连接正常情况下,软件监测控制功能才会开启,否则一致置“0”。

如图8所示,可视化系统工作流程如下:1)相机初始化、软件初始化、监测连接状态;2)若连接正常,软件

正常工作,反之锁死功能区进入保护状态;3)连接正常、工作稳定后控制相机物理层,包括电压、工作模式、扫描模式、触发模式、CCD参数等;4)软件实时采集图像反馈到软件预览区。

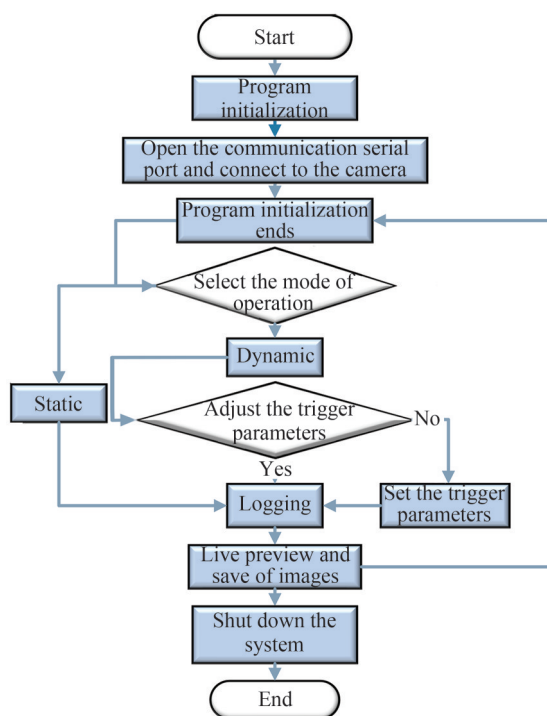


图8 可视化系统工作流程
Fig.8 Visualization system work flow

整个界面功能区分为相机控制界面、图像预览及连接状态监测区、CCD控制界面,保证了即时监控与控制的需求。图9为上位机的可视化界面。

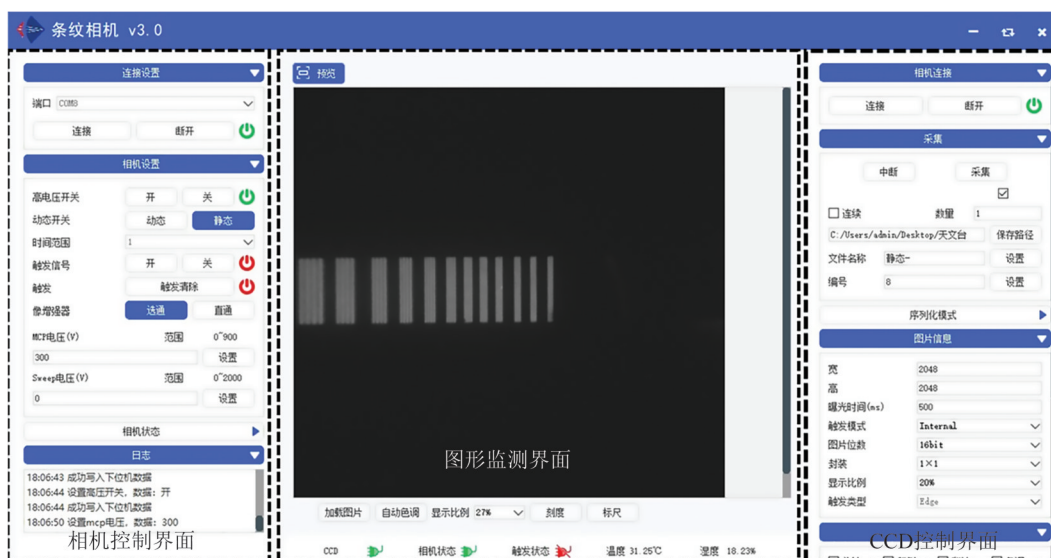


图9 上位机可视化界面
Fig.9 Host computer visual interface

2 测试结果

图10是所研制的高亮度增益超小型条纹相机实物,与现役的皮秒相机相比体积及质量均减少约60%,整机尺寸仅为450 mm×190 mm×240 mm,质量为10 kg。

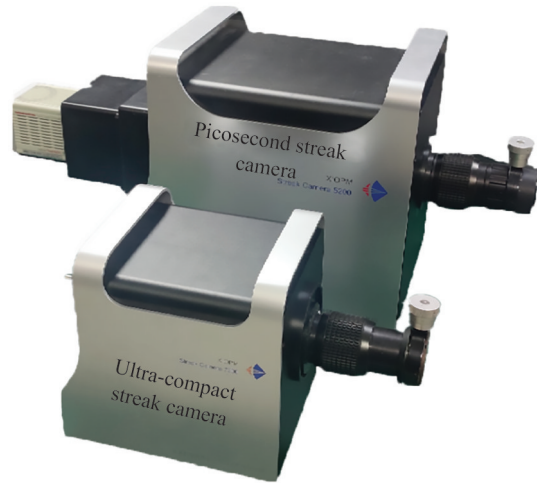


图10 超小型条纹相机与通用皮秒相机实物对比
Fig.10 Comparison of the ultra-compact streak camera and the active picosecond camera

采用条纹管静态测试系统(Streak Tube Static Test System,STR)对响应波长、阴极灵敏度、亮度增益、静态空间分辨率进行了测试。另外采用飞秒激光器、F-P标准具、DG645延时器、毛玻璃、反射镜、光阑片、示波器等搭建了条纹相机动态测试系统,对条纹相机的动态性能指标时间分辨率、动态空间分辨率等进行了测试。

2.1 阴极灵敏度

光电阴极是系统的光电转换器件,其性能直接影响系统探测灵敏度和精度。阴极灵敏度 S 是标准光源(色温为2856K)照射下,光电阴极规定面积产生的饱和光电流与照射到该面上的光通量之比,定义为

$$S = (I_B - I_D) / \Phi \quad (1)$$

式中, I_B 为光源输出稳定时阴极电流值, I_D 为关闭光源时阴极暗电流值, Φ 为光通量。

测试过程为:1)开启条纹管静态测试系统,在系统测试平台出光口处放置直径为 $\Phi 16\text{ mm}$ 的光阑片,将条纹管垂直放置于光阑片之上,调节条纹管位置使得光电阴极与 $\Phi 16\text{ mm}$ 光阑孔同心;2)连接条纹管栅极电极和高压电源输出端、条纹管阴极电极和PA电流计红色探针、系统地线和PA电流计黑色探针;3)开启高压电源,设置输出电压为200V;4)设置光源照度为5lx,此时阴极面处的光通量 Φ 为0.001lm;5)待光源输出稳定后,读取PA电流计读数,记录此值为测条纹管阴极电流值 I_B ;6)关闭光源,待PA电流计读数稳定后读取其读数,记录此值为阴极暗电流值 I_D ,根据式(1)计算得出阴极灵敏度为 $268\text{ }\mu\text{A/lm}$,如图11。

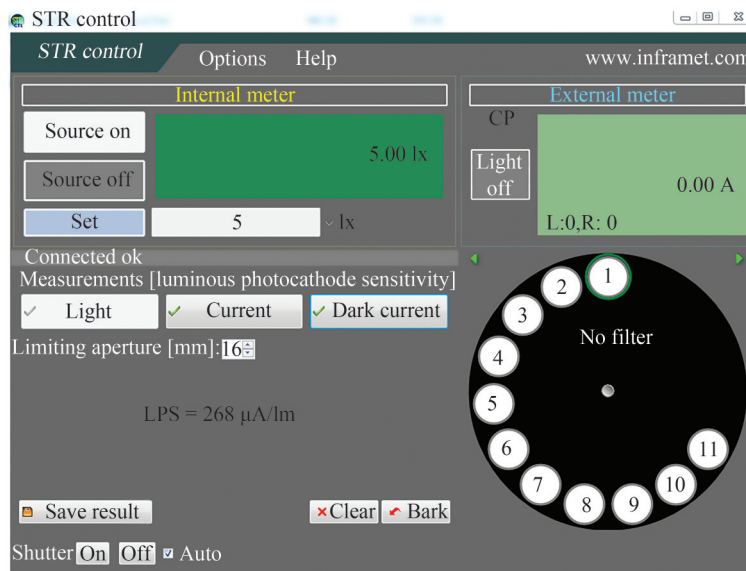


图11 阴极灵敏度测试结果
Fig.11 Cathode sensitivity test results

2.2 亮度增益

荧光屏输出合适亮度的图像将大大提升条纹变像管的分辨能力,亮度增益作为反映变像管的重要指标,定义为

$$G=M/E \quad (2)$$

式中, G 为条纹变像管亮度增益, M 为在2 856 K标准色温光源的照射状态下条纹变像管荧光屏图像的法向亮度, E 为光阴极面的入射照度。

测试过程为:1)开启条纹管静态测试系统,将条纹管垂直放置在测试平台上,调节条纹管使得光电阴极与光源同心;2)将条纹管电极与高压电源连接,设置输出电压值为 $-15\ 000\text{ V}$ 、光源照度为 10 mlx ;3)待光源稳定后,读取系统内LP1亮度计读数,记录此值为条纹管阳极输出值 M ,由式(2)计算出亮度增益为20.1,相比现役条纹相机,亮度增益提高10倍以上,测试结果如图12。

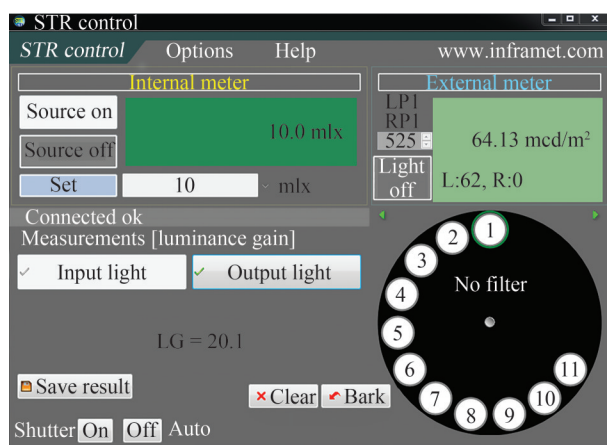


图12 亮度增益测试结果

Fig.12 Brightness gain test result

2.3 光电阴极响应波长

响应波长是条纹变像管对单色入射辐射的探测能力,通过单色光辐照光电阴极,检测其是否产生光电流值。选取 $400\sim 850\text{ nm}$ 光谱段得到的光谱响应曲线,如图13。

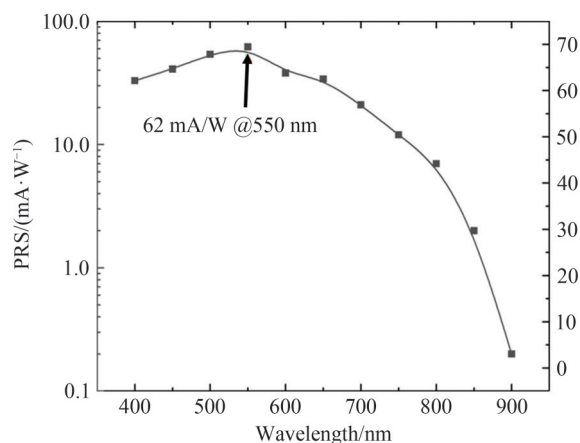


图13 高增益超小型条纹相机光谱响应曲线

Fig.13 High gain ultraminiature streak camera spectral response curve

2.4 时间分辨率

时间分辨率是条纹相机的核心技术指标,由物理时间分辨率和技术时间分辨率组成,可表示为

$$\tau = \sqrt{\tau_p^2 + \tau_e^2} \quad (3)$$

式中, τ_p 和 τ_e 分别代表物理时间分辨率和技术时间分辨率。物理时间分辨率由条纹管的电子光学系统决定,

从1.1节中CST模拟计算中可知该值为24.1 ps。技术时间分辨率主要由扫描电路决定,其表达式为

$$\tau_e = (K \cdot P \cdot \sigma)^{-1} \quad (4)$$

式中, K 为扫描电压斜率, P 为条纹管偏转灵敏度, σ 为条纹管在扫描方向的动态空间分辨率。因全屏时间为600 ps,扫描电压为600 V,则 $K=1.00 \times 10^9$ kV/s。实验测得 $P=16$ mm/kV,假设 $\sigma=20$ lp/mm,计算得技术时间分辨率理论值 $\tau_e=3$ ps,可得理论极限时间分辨率 $\tau=24.3$ ps。

采用实验方法对所研制条纹相机实际时间分辨率进行了测试。采用脉冲半高全宽法标定时间分辨率,试验中采用飞秒激光(脉宽为290 fs,波长532 nm)作为标定光源,不计激光脉宽对时间分辨率的影响,飞秒激光经过F-P标准具后产生的100 ps等间隔脉冲进入条纹相机狭缝,经条纹相机转换成脉冲空间分布图像,读取最窄脉冲的时间坐标的半高全宽,计算得时间分辨率为36 ps,如图14。

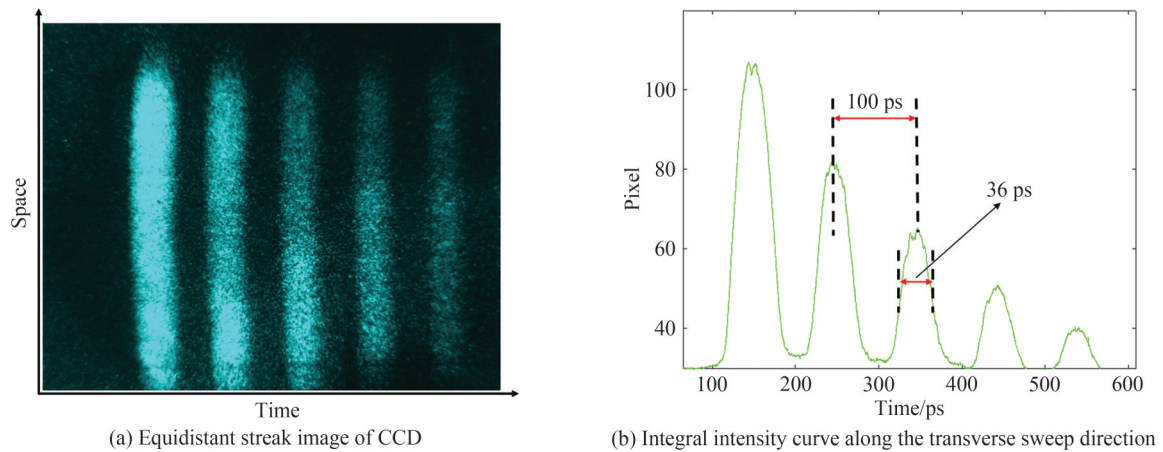


图14 时间分辨率条纹图像
Fig.14 Temporal resolution streak image

由于条纹相机装配精度等原因导致实验测得的时间分辨率略高于理论值。

2.5 空间分辨率

利用分划板来测量相机的空间分辨率,分划板沿狭缝方向呈周期排列,每个周期包含8组宽度不同、占空比为50%的亮暗条纹,对应的空间分辨率分别2、4、6、8、10、12、14、16 lp/mm,得到的静态空间扫描图像与X轴方向强度积分曲线如图15。计算得在分辨率条纹12 lp/mm处对比度CTF=17.5%,在分辨率条纹16 lp/mm处对比度CTF=16.9%,前端输入光学系统放大倍率为0.6,因此相机光电阴极处的静态空间分

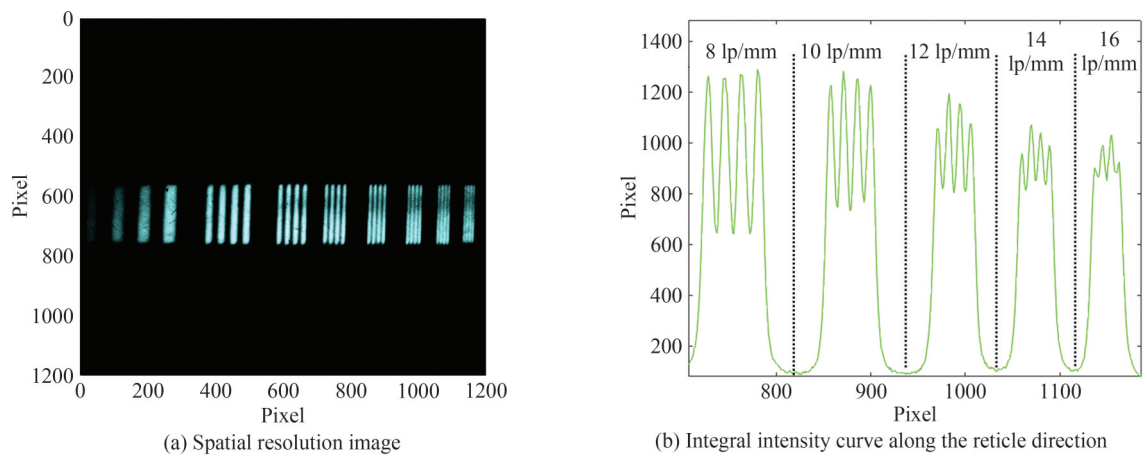


图15 静态空间分辨率图像及其强度积分
Fig.15 Static spatial resolution images and its intensity integrals

分辨率高于 26 lp/mm。采用 30 ns 挡标定动态空间分辨率,图 15(a)为分刻板通过相机所成的图像,图 16(b)为图 16(a)框选部分沿 X 轴方向强度积分。计算得到分辨率条纹 10 lp/mm 处对比度 $CTF=13.2\%$,因此相机光电阴极处的动态空间分辨率高于 16 lp/mm。

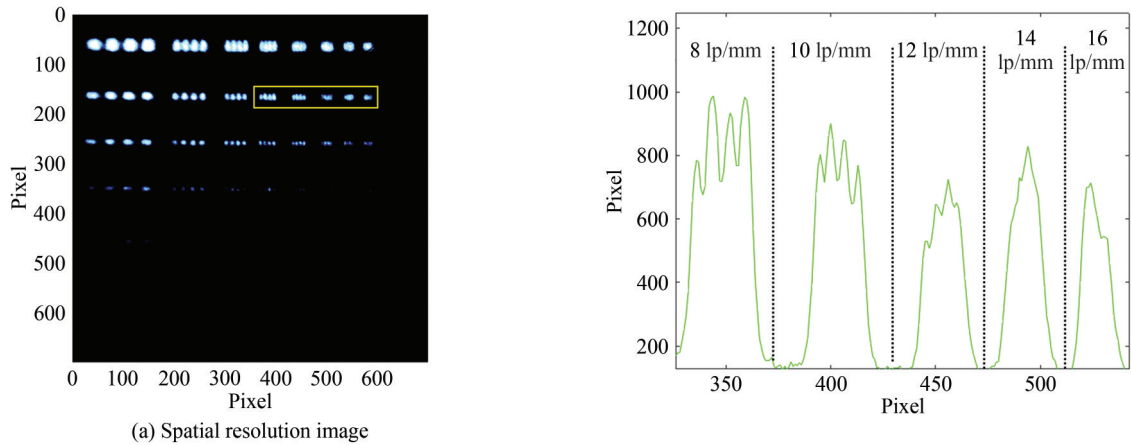


图 16 动态空间分辨率图像及其强度积分

Fig.16 Dynamic spatial resolution images and its intensity integrals

经过各项标定实验,超小型条纹相机各性能指标满足各种场景下的应用需求,包括光谱响应频率 200~850 nm、全屏扫描时间 600 ps 等。关于超小型条纹相机的详细参数如表 3。

表 3 相机标定实验数据

Table 3 Camera calibration experimental data

Item	Test results
Spectral response range	200~850 nm
Space resolution	Static: ≥ 26 lp/mm Dynamic: ≥ 16 lp/mm
Temporal resolution	36 ps@600 ps
Cathode sensitivity	268 $\mu\text{A}/\text{lm}$
Brightness gain	20.1
Full screen scan time	600 ps
Effective diameter of phosphor screen	$\Phi 25$ mm

3 结论

本文针对激光雷达机载、星载应用场景,研制了一款高灵敏度、高亮度增益、高时间分辨率的超小型条纹相机,其体积与质量相比现役条纹相机减少 66% 以上。该相机的条纹变像管采用阴极半导体理论模拟研究、优化工艺的方式大幅度提高了阴极灵敏度与亮度增益,亮度增益为现役相机的 10 倍以上。同时,针对该相机开发设计了一套高集成度新型控制系统,充分消除了之前版本集成度低、可靠性及兼容性差等缺陷,板级集成化程度提升了 2.36 倍,并具有 24 路复用接口、12 路扫描挡位等功能,实现了多设备兼容。测试结果表明,所研制小型化条纹相机的阴极积分灵敏度高达 268 $\mu\text{A}/\text{lm}$,亮度增益为 20.1,动态空间分辨率优于 20 lp/mm,时间分辨率优于 36 ps。相机实时通讯、控制、监测功能可靠有效,稳定性、抗干扰能力均有明显提升,在机载激光雷达等研究中有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] TIAN Jinshou. Technology development of streak and framing camera [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 36-52.
田进寿. 条纹及分幅相机技术发展概述 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(11): 36-52.
- [2] LV Bin, PEI Chengquan, TIAN Jinshou, et al. Design and implementation of the intelligent streak camera control system

- based on internet of things [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(5):86-93.
- 吕斌,裴承全,田进寿,等.基于物联网的智能化条纹相机控制系统的研制[J].*光子学报*, 2017, 46(5):86-93.
- [3] TIAN Liping, LI Lili, WEN Wenlong. Numerical calculation and experimental study on the small-size streak tube. [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(18): 188501.
田丽萍,李立立,温文龙,等.小型条纹管数值模拟及实验研究[J].*物理学报*, 2018, 67(18): 188501.
- [4] TIAN Liping, WEN Wenlong, WANG Xing, et al. Research on the spatio-temporal and gain performances on the small-size streak tube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(7):723002.
田丽萍,温文龙,王兴,等.小型条纹管时空分辨及增益特性研究[J].*光子学报*, 2019, 48(7): 723002.
- [5] TIAN Liping, SHEN Lingbin, CHEN Lin, et al. Spatio-temporal resolution studies on a synchronous streak tube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4):0404002.
田丽萍,沈令斌,陈琳,等.同步扫描管时空分辨特性研究[J].*光子学报*, 2021, 50(4): 0404002.
- [6] HUI Dandan. Research on ultra-small streak camera with large detection area[D]. Xi'an : University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
惠丹丹.大探测面积超小型条纹相机的研究[D].西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2019.
- [7] HOU Honglu, ZHANG Huchang, TIAN Jinshou. Design of remote control system for streak camera[J].*Journal of Xi'an Technological University*, 2010, 30(2):121-125.
侯宏录,张户昌,田进寿.条纹相机远程控制系统设计[J].*西安工业大学报*, 2010, 30(2):121-125.
- [8] JOSHI M J, UPADHYAY J, DESHPANDE P P. Design of microcontroller based system for automation of streak camera [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(8):697.
- [9] ZENG Guojiang. Measurement and control system of streak camera based on DSP [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.
曾国江.基于DSP的条纹相机测控系统[D].深圳:深圳大学, 2016.
- [10] PAN Baoyi. Research on distributed control technology of streak camera [D]. Xi'an : Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics), 2012.
潘宝毅.条纹相机分布式控制技术研究[D].西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2012.
- [11] TIAN Jinshou, ZHAO Baosheng, WU Jianjun. Theoretical calculation of the modulation transfer function in a femoto-second electron diffraction system[J]. *Physica Sinica*, 2006, 55(7): 3368-3374.
田进寿,赵宝升,吴建军,等.飞秒电子衍射系统中调制传递函数的理论计算[J].*物理学报*, 2006(7):3368-3374.
- [12] DONG Hui, TONG Hui, WANG Yanan. STM32-based smart glove machine motion control system design and development[J].*Computer Measurement and Control*, 2019, 27(2):102-105.
董辉,童辉,王亚男.基于STM32的智能手套机运动控制系统设计与开发[J].*计算机测量与控制*, 2019, 27(2):102-105.
- [13] WEI Yuhan. Design of mobile communication system based on embedded technology[J].*Modern Electronic Technology*, 2020, 43(20):23-25.
卫昱含.基于嵌入式技术的移动通信系统设计[J].*现代电子技术*, 2020, 43(20):23-25.
- [14] XIONG Yi. Design of single-phase online uninterruptible power supply based on STM32 [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1802: 032065.
- [15] LEI Xiaoya, SHAHID H, WU Shengli. A novel algorithm to improve image reconstruction quality for 2D streak camera [J]. *Nuclear Instruments. and Methods in Physics Research A*, 2021, 991:165023.

High-gain Ultra-small Streak Camera and Its Integrated Control System

ZHANG Yuchi^{1,2}, TIAN Jinshou^{1,3}, XUE Yanhua¹, LI Zhibing¹, LI Shaohui¹, WANG Junfeng¹,
LIU Baiyu¹, GAO Guilong¹, CHEN Ping¹, WANG Xing¹, ZHAO Wei^{1,2}

(1 Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Taiyuan 030000, China)

Abstract: As a diagnostic instrument with ultra-high temporal and spatial resolution and spectral resolution, the streak camera is widely used in basic research fields such as physics, life sciences, and materials science, as well as in national strategic fields such as detonation physics, lidar, and inertial confinement fusion. Aiming at the requirements of airborne lidar for miniaturized, high-sensitivity, high-

gain, and high spatiotemporal resolution streak camera, a high-brightness-gain compact streak camera and its new integrated control system are developed.

Compared with the general picosecond visible light streak camera, the volume and weight of the camera are reduced by more than 2/3. The selected streak camera adopts the theoretical simulation research of cathode semiconductor and the method of optimizing the process to greatly improve the sensitivity of the cathode. Using a slit acceleration grid improves the photoelectron transmittance, enhances the photoelectron energy to give the fluorescent screen higher luminous efficiency, and optimizes the cathode process to improve the brightness gain. The streak image tube has the characteristics of high sensitivity, large detection field, high brightness gain, and high temporal and spatial resolution.

Starting from the principle and control requirements, combined with the theoretical analysis of the defects of the active control system, a new type of high-integration control system is developed for the camera, which fully eliminates the low integration, poor reliability and compatibility of the previous version. The hardware of the new control system adopts the design method of modularization and function reuse, and the PCB adopts the multi-layer board design. Compared with the current version, the degree of integration is increased by 2.36 times to achieve multi-device compatibility. The bottom layer of the system hardware is divided into main control module, power supply module, A/D module, D/A module, digital I/O and extended scan switching module: the main control module takes STM32F107VCT6 as the core and is responsible for the information between each module and the host computer Interaction; the power supply module is divided into a high-voltage power supply part and a low-voltage power supply part, which provide corresponding voltages for the stripe tube and each element of the circuit; the A/D module takes ADS1256 as the core, adds anti-static protection and digital-analog isolation to entirely eliminate noise interference, and uses SPI The protocol communicates with the host computer; the D/A module takes DAC8534 as the core to control the output of analog devices such as MCP and high-voltage power supply; the digital I/O and expansion scan switching module use the microcontroller GPIO as the control, and the 24 pins programmable interface supports function multiplexing. The PC-side visualization system realizes human-computer interaction and has functions such as camera control, instant feedback of collected images and data, and operation logs. The interface is concise and optimized, which greatly enhances the operability and maintainability of the camera.

Finally, the streak tube static test system is used to test the parameters of the streak image tube: the cathode integral sensitivity is 268 $\mu\text{A}/\text{lm}$, the brightness gain is 20.1, and the time resolution is 36 ps; femtosecond laser, F-P etalon, DG645 delay, oscilloscope, etc. built a dynamic test system for streak camera, and tested the static/dynamic spatial resolution, time resolution, control system function, etc. of the whole machine. The static spatial resolution is higher than 26 lp/mm, the full-screen scanning time is 600 ps, and the functions of control, monitoring and information exchange of the control system are normal. The developed streak camera works well in the laser radar and Inertial Confinement Fusion (ICF) picosecond laser targeting experiments.

Key words: Streak camera; Control system; Cathode sensitivity; Brightness gain; Integration; Compatibility

OCIS Codes: 320.7080; 320.7100; 150.6044; 220.4830