【光电工程／Optoelectronic Engineering】

后加速内增强技术条纹相机及其非线性强度修正

顾礼[1]，杨方[2]，杨勤劳[3]

1）深圳信息职业技术学院中德机器人学院，广东深圳 518172；2）深圳大学电子与信息工程学院，广东深圳 518060；
3）深圳大学物理与光电工程学院，光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室，广东深圳 518060

摘　要：为实现X射线条纹相机大动态范围性能和精密化诊断，从光子密度探测阈值出发，研究条纹相机后加速内增强技术理论．降低记录系统灵敏度限制的光子密度探测阈值，有利于提高动态范围性能．研制后加速内增强技术条纹相机，组建超快实验标定系统，实验显示相机动态范围达2 578∶1．相比具有饱和效应的微通道板内增强技术，该技术扩展了动态范围性能．方向角各不相同的电子入射栅网时，电子的透过率不同，从而导致电子在荧光屏上信号强度的非线性．给出成像区域强度误差分布及其修正方法，相比较未修正的动态范围，误差在7.7%．后加速内增强技术系统结构紧凑，有利于提高条纹相机动态范围，有助于实现中国激光惯性约束核聚变定量测量和精密化诊断目标．

关键词：光电子学与激光技术；核仪器；惯性约束聚变；条纹相机；后加速技术；动态范围
中图分类号：TB872；TL62.8　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3724/SP.J.1249.2024.05542

Post-acceleration internal enhancement technology for streak camera and its nonlinear intensity correction

GU Li[1], YANG Fang[2], and YANG Qinlao[3]

1) School of Sino-German Robotics, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, Guangdong Province, P. R. China
2) College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China
3) College of Physics and Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: To achieve high dynamic range performance in X-ray streak cameras and precision diagnostics, the theory of post-acceleration internal gain technology in streak cameras is investigated from photon density detection threshold. The reduction of threshold limited by system sensitivity is beneficial for expanding the dynamic range. The streak camera incorporating post-acceleration internal gain technology is designed and an ultra-fast laser calibration system is established. Experiments show that the camera′s dynamic range reaches 2 578∶1. Compared to microchannel plate internal gain technology with the saturation effects, the technology significantly expands the dynamic range performance. The nonlinear sources of signal intensity on the screen are identified by the different transmittance of electrons with different directional angles, and the intensity error distribution in the imaging area and its correction methods are provided. The dynamic range error is 7.7% compared with the uncorrected one. The

Received: 2024-04-29; **Accepted:** 2024-05-20; **Online** (CNKI)**:** 2024-06-17
Foundation: National Natural Science Foundation of China (11705119); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2017A030310142); Research and Cultivation Project of Shenzhen Institute of Information Technology (SZIIT2021KJ021); Key Platforms and Scientific Research Project in Universities of Guangdong Province (2024ZDZX1056)
Corresponding author: Associate professor GU Li (guli@sziit.edu.cn)
Citation: GU Li, YANG Fang, YANG Qinlao. Post-acceleration internal enhancement technology for streak camera and its nonlinear intensity correction [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(5): 542-547. (in Chinese)

http://journal.szu.edu.cn

system structure of the post-acceleration internal enhancement technology is compact, which is conducive to improving the dynamic range of the streak camera, and helps to realize the goal of quantitative measurement and precision diagnosis of laser driven inertial confinement fusion in China.

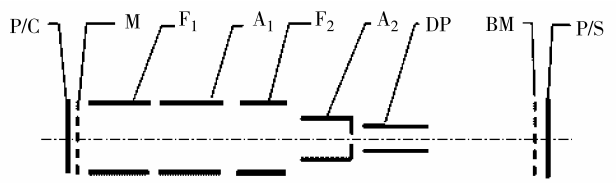
Key words: optoelectronics and laser technology; nuclear instrumentation; inertial confinement fusion; streak camera; post-acceleration technology; dynamic range

X 射线条纹相机是激光驱动惯性约束聚变(inertial confinement fusion，ICF)中研究内爆动力学及内爆压缩规律，获取等离子辐射连续时空变化图像的重要诊断仪器[1-7]．随着ICF激光驱动器数目的增多与功率的增大，在等离子体辐射的时间、空间和能谱综合测量中，X射线辐射强度相差很大，因此，动态范围成为相机的重要性能指标[8-13]．动态范围为相机系统探测的最大和最小信号强度值之比，但最小信号强度值尚没有一致定义．国际上极限最小信号强度值等于标定图像中背景噪声的均方根，得到的动态范围为极限动态范围，相对偏大；而在中国最小信号强度值取标定图像中获得的最小信号强度值，得到的动态范围为工程动态范围，相对偏小．MACPHEE等[14]通过改进条纹相机和图像数据处理算法，使动态范围达到6 500∶1．法国Photonis公司的条纹相机使用平面聚焦电子光学系统抑制空间电荷效应，相机具有高时间和空间分辨率两个性能模式，动态范围最大达到3 700∶1[15]．在国内，深圳大学超快诊断技术研究组通过优化设计条纹变像管的电子光学设计，改进工艺方法，使相机动态范围达到2 237∶1[16]．

为提高条纹相机动态范围性能，本研究分析了光电子后加速内增强技术的理论依据，设计后加速技术条纹变像管．该技术提高了信号强度，降低相机系统光子密度探测阈值，提高了条纹相机的动态范围．提出后加速技术条纹相机的线性强度修正方法，为推动实现我国激光ICF定量测量和“精密化”诊断目标起到积极作用．

1　后加速技术变像管设计

考虑聚焦区长度、轴上电压调制及放大倍率等因素，循环计算并设计了8电极条纹变像管的电压和结构参数．多电极结构的优势在于易于调整成像面位置及系统放大倍率，以达到电子光学设计要求．模拟大量光电子发射及其在变像管中的运动轨迹，考察电子到达成像面的调制传递函数，均衡确定最优成像面位置，即条纹变像管长度．8电极静电聚焦型条纹变像管设计如图1，各电极电压和结构参数如表1．被测信号在阴极P/C完成光电转换和光电子发射，在阴极与栅网M之间加速．第1聚焦电极F_1和第1阳极A_1、第2聚焦电极F_2和第2阳极A_2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．电子穿过偏转板DP，在后加速栅网BM和荧光屏P/S之间再次加速，轰击荧光屏后变成可见光图像．A_2管和BM(33线)间的电压为8.02 kV，整管长度为427 mm，偏转灵敏度为76 mm/kV．后加速技术组件如图2，其中，图2(a)为整体外观；图2(b)为33线后加速栅网显微图．该设计一方面保证扫描偏转板后的电子漂移区为等位区，确保了一定的电子飞行距离；另一方面，栅网和荧光屏之间可以引入1个达14 kV加速电压，使电子通过1个狭窄的均匀加速场．这种设计结构简单，不改变电子的径向速度，大幅度提高了电子的轴向速度．与通常采用5 kV的微通道板内增强技术相比，本设计大大提高了电子动能．高能量电子轰击荧光粉，提高了荧光屏的量子效率，光子产额变大．



P/C为光阴极；M为栅网；F_1为第1聚焦电极；A_1为第1阳极；F_2为第2聚焦电极；A_2为第2阳极；DP为偏转板；BM为后加速栅网；P/S为荧光屏

图1　后加速技术条纹变像管设计

Fig. 1　Design of post-acceleration technology streak tube.

2　条纹相机动态测试

X射线条纹相机的动态性能测试方法如图3．Nd∶YAG皮秒激光器输出两束脉冲，其中，一束光波长为1 064 nm被送往PIN(positive-intrinsic-negative)光电探测器，转换成电脉冲触发信号，电信号经过时间延迟电路后触发扫描电路工作；另一

http://journal.szu.edu.cn

表1 后加速技术条纹变像管电压和结构参数

Table 1 Post-acceleration technology streak tube voltage and structure parameters

电极电压/kV								长度Z/mm	倍率M	偏转灵敏度D_s/(mm·kV^{-1})
P/C	M	F_1	A_1	F_2	A_2	DM	P/S	427	1.29	76
0	6.98	4.07	6.98	1.02	8.02	8.02	14.00			

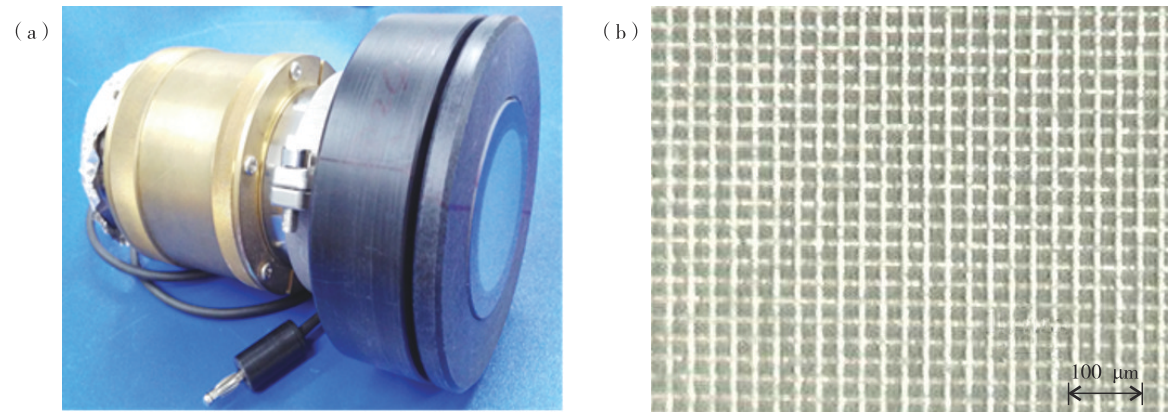


图2 后加速技术组件 (a) 整体外观;(b) 33线栅网显微图

Fig. 2 (a) Overall appearance and (b) 33-line mesh micrograph of post-acceleration technique components.

束光波长为266 nm，脉冲时间宽度为30 ps，经过M_1和M_2紫外反射镜反射延迟后被送往法布里-珀罗(Fabry-Pérot，F-P)标准具，紫外光在M_3和M_4中经过若干次反射后，形成一系列标准时间间隔Δt的光脉冲序列，经光电转换后被条纹相机内扫描电路同步并偏转完成时间和空间信息映射．荧光屏上的光信号被微通道管(microchannel plate，MCP)像增强器增强，通过光锥耦合进入电荷耦合器件(charge-coupled device，CCD)转换成计算机可以处理的数字信号．实验采用普林斯顿仪器PI-SCX1300型科学级CCD，方形像素边长为20 μm，阵列为1 300×1 340，前端耦合一个1.5∶1.0的放大光锥，工作在−10 ℃制冷环境中．条纹相机的动态范围标定图像如图4，按从强到弱、从上到下的顺序依次记录光脉冲序列．

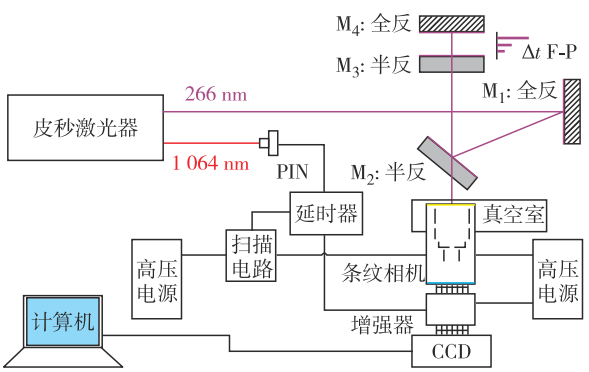


图3 条纹相机动态测试原理

Fig. 3 Schematic diagram of streak camera dynamic experiment.

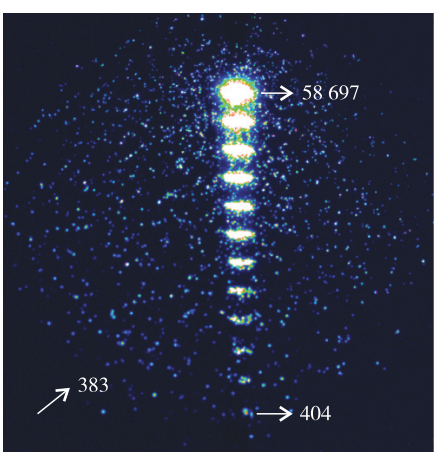


图4 条纹相机动态范围测试结果(最大信号、最小信号及背景噪声强度值分别为58 697、404及383)

Fig. 4 Streak camera dynamic range test results. The maximum signal, minimum signal and background noise intensity are 58 697, 404, and 383, respectively.

3 讨论

3.1 信噪比限制的光子密度探测阈值

光电阴极、次级电子发射及荧光屏的量子噪声

http://journal.szu.edu.cn

概率函数分布为泊松分布．理论上临界信噪比是1，实验中科学级制冷 CCD 的背景噪声强度值约为380，通常最小信号可达 390 以上，即信噪比为1.03时视为1个实用信号，在计算极限信噪比时，比值相对保守但保证了最小信号的实用性．经过理论分析和推导，条纹相机在某量程1个时间分辨下，信噪比限制的光子密度探测阈值 J_{sn} 为[17]

$$J_{sn}=\frac{0.63(\eta_c+1)\cdot 2FM^2}{T_r H\eta_c T^2(F)}\int_0^{\infty}\left[\frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2F}\right)}{\frac{\pi f}{2F}}T(f)\right]^2 \mathrm{d}f \quad (1)$$

其中，η_c 为金光电阴极量子效率，Nd:YAG 激光器 266 nm 紫外光激发下的光电子量子效率为 0.02[18]；M 为条纹相机电子光学系统的放大倍率；H 为屏上分划条纹的高度；F 为屏上分划条纹的空间频率；对于阴极空间频率为 15 lp/mm 的分划条纹，高度 0.1 mm，透光区域宽度为 0.03 mm；T_r 为变像管中的电子经过前后加速栅网、屏蔽栅网和光阑的总透过率，有后加速系统时 T_r 平均为 0.13，无后加速系统时 $T_r=0.26$；$T(f)$ 为电子光学系统的调制传递函数；$T(F)$ 为电子光学系统对空间频率 F 图像的调制度[19]．

信噪比限制的光子密度探测阈值与荧光屏上图案的空间分辨率相关．具有和不具有后加速技术的条纹相机，其光子密度探测阈值分别为 9.4×10^{11} 光子/m² 和 4.8×10^{11} 光子/m²．由于后加速技术条纹变像管中多使用了1层栅网，其对电子的拦截更多，考虑到信噪比限制，被测光子密度更大才能被探测到，因此，相机对最小信号探测能力下降了．

3.2　记录系统灵敏度限制的光子密度探测阈值

记录系统灵敏度限制的光子密度探测阈值由条纹相机的 CCD 性能决定．一定时间分辨下，单位面积内记录系统灵敏度限制的光子密度探测阈值 J_{rs} 为

$$J_{rs}=\frac{n_e\varepsilon_o}{\eta_c\eta_s\eta_f\eta_d T_r S_c(E_e-E_d)} \quad (2)$$

其中，n_e 为 CCD 单个像素的电子数，PI-SCX1300 型 CCD 单一像素满阱电子数为 3×10^5，动态范围为 16 bit，线性度优于 2%，因此，10 个计数对应 45.78 个电子；ε_o 为 P20 荧光粉激发的光子平均能量，$\varepsilon_o=2.14$ eV；η_s 为荧光屏的量子产额，P20 荧光粉的 $\eta_s=0.063$ 光子/eV[20]；η_f 为 CCD 光锥的光子透过率，$\eta_f=0.267$；η_d 为 CCD 的量子效率，$\eta_d=0.32$；S_c 为 CCD 单一像素对应到阴极的面积；E_e 为电子入射荧光屏的能量；E_d 为电子轰击荧光屏时在铝膜层中的能量损失，$E_d=2.5$ keV．

计算得到具有和不具有后加速技术记录系统灵敏度限制的光子密度探测阈值为 11.1×10^{11} 光子/m² 和 10.4×10^{11} 光子/m²，可见，具有后加速技术的条纹相机在记录系统灵敏度限制下的光子密度探测阈值变小了，提高了最小信号的探测能力．

对比信噪比限制和记录系统灵敏度限制的光子密度探测阈值，是否具有后加速技术，条纹相机均受限于记录系统灵敏度．后加速栅网的加入拦截了部分电子，但将电子的轰击能量提高到 14 keV，充分利用了荧光屏的量子效率，降低了条纹相机系统的光子密度探测阈值，从而提高了相机对最小信号的探测能力．此外，后加速技术还克服了微通道板的增益饱和效应，增强了条纹相机最大信号的强度值，因此，根据动态范围计算方法，有利于提高动态范围．

3.3　图像信号修正

后加速技术中的电子轨迹示意如图5．电子穿过阳极孔，径向速度与狭缝方向 x 所成角度为 α，与扫描方向 y 所成角度为 β，电子以不同角度入射栅网，被栅网金属孔拦截，电子穿过栅网到达荧光屏的数量有细微差别．电子透过率和两个方向的角度值成反比，和方向角的余弦值成正比，角度越小透过率越大．

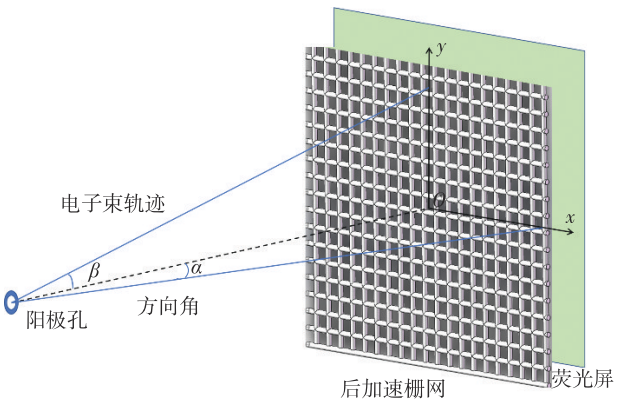


图5　后加速技术电子轨迹示意

Fig. 5　Schematic diagram of the electron trajectory of post-acceleration technology.

电子垂直穿过栅网中心时的透过率最大，等于33线栅网的开口率 0.510；电子斜穿栅网边缘时的透过率最小为 0.505．CCD 成像区域对应的栅网矩

http://journal.szu.edu.cn

形区域电子相对透过率函数分布如图6，电子在栅网中心透过率最高，在4个边角方向透过率最低．电子透过率的不同导致荧光屏发光强度不同，为了保证条纹相机的线性测量性能，需要对图像信号进行强度非线性修正．强度误差分布如图7，由电子透过率误差函数的倒数可以得到强度修正函数，对动态范围标定图的光脉冲序列进行强度修正，底部为曲面分布，最大强度误差为105．由图4中最大信号值I_{max}、最小信号值I_{min}所在区域强度修正系数及背景噪声值I_{back}，标定并计算条纹相机的动态范围为2 578∶1，计算方法见式(3)．相比较未进行强度线性修正，动态范围误差为7.7 %．

$$D=\frac{I_{max}-I_{back}}{I_{min}-I_{back}}=\frac{58\,697\times 1.0\,036-383}{404\times 1.0\,042-383}\approx 2\,578 \tag{3}$$

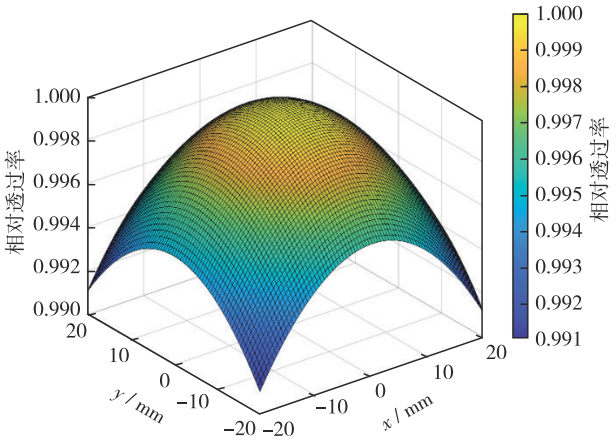


图6 后加速栅网电子相对透过率

Fig. 6 Relative electron transmittance of post-acceleration mesh.

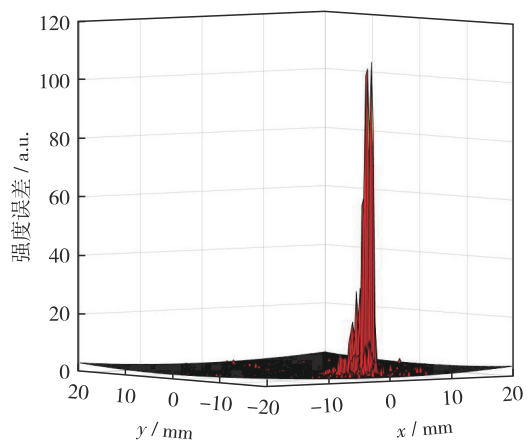


图7 动态范围标定结果的强度误差分布

Fig. 7 Intensity error distribution of dynamic range calibration result.

http://journal.szu.edu.cn

结 语

随着激光约束ICF的深入研究，X射线条纹相机要求实现“精密化”诊断，大动态范围性能是获取精密谱线的基础．本研究基于光子密度探测阈值，分析后加速技术扩展条纹相机动态范围的理论依据，提出后加速技术的非线性因素来源和修正方法．组建实验系统，标定了使用后加速技术的X射线条纹相机，其动态范围达2 578∶1；同时对使用该技术的条纹相机进行图像信号强度修正，与未修正情况相比，相机动态范围误差为7.7%．后加速技术研究有利于实现条纹相机大动态范围参数，同时保证了其线性测量性能，为推动实现我国激光约束ICF定量测量和“精密化”诊断目标具有积极作用．

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(11705119)；广东省自然科学基金资助项目(2017A030310142)；深圳信息职业技术学院科学研究资助项目(SZIIT2021KJ021)；广东省普通高校重点科研平台和项目资助项目(2024ZDZX1056)．

作者简介： 顾礼(guli@sziit.edu.cn)，深圳信息职业技术学院副教授、博士．研究方向：超快诊断技术与精密测量仪器．

引　　文： 顾礼，杨方，杨勤劳．后加速内增强技术条纹相机及其非线性强度修正[J]．深圳大学学报理工版，2024，41(5)：542-547.

参考文献 / References：

[1] HU S X, BISHEL D T, CHIN D A, et al. Probing atomic physics at ultrahigh pressure using laser-driven implosions [J]. Nature Communications, 2022, 13: 6780.

[2] CAI Houzhi, DENG Xuan, NIU Lihong, et al. Design and experimental study of a large beam waist streak tube in an ICF experiment [J]. Sensors, 2023, 23(6): 3158.

[3] 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)：112003.
TIAN Jinshou. Introduction to development of streak and framing cameras [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 112003. (in Chinese)

[4] LIAO A, HARTIGAN P, FIKSEL G, et al. Using the ROSS optical streak camera as a tool to understand laboratory experiments of laser-driven magnetized shock waves [J]. High Power Laser, 2018, 15(5): 241751.

[5] MURPHY T J, ALBRIGHT B J, DOUGLAS M R, et al. Results from single-shock Marble experiments studying thermonuclear burn in the presence of heterogeneous mix on the National Ignition Facility [J]. High Energy Density

Physics, 2021, 5: 100929.

[6] TIKHONCHUK V, GONG T, JOURDAIN N, et al. Studies of laser-plasma interaction physics with low-density targets for direct-drive inertial confinement fusion on the Shenguang III prototype [J]. Matter and Radiation at Extremes, 2021, 2: 54-66.

[7] CHEN H, VANDENBOOMGAERDE M, JONES O S. Advances in mapping of x-ray emission from NIF hohlraums [J]. High Energy Density Physics, 2020, 36(7): 100793.

[8] BAKSHT R B, TKACHENKO S I, ZHIGALIN A S, et al. A study of the foil explosion in vacuum using spectral streak camera diagnostics [J]. Physics of Plasmas, 2021, 28(6): 062706.

[9] TIKHONCHUK V T, GONG T, JOURDAIN N, et al. Studies of laser-plasma interaction physics with low-density targets for direct-drive inertial confinement fusion on the Shenguang III prototype [J]. Matter and Radiation at Extremes, 2021, 6(2): 025902.

[10] GU Li, CAI Houzhi, ZONG Fangke, et al. Femtosecond x-ray streak camera based on photoelectron filter technology for laser fusion [J]. Applied Optics, 2019, 58(17): 4714-4719.

[11] RABASOVIC M S, RABASOVIC M D, MARINKOVIC B P, et al. Laser-induced plasma measurements using Nd∶YAG laser and streak camera: timing considerations [J]. Atoms, 2019, 7(1): 6.

[12] SMALYUK V A, WEBE C R, LANDEN O L, et al. Recent and planned hydrodynamic instability experiments on indirect-drive implosions on the National Ignition Facility [J]. High Energy Density Physics, 2020, 36(7): 100820.

[13] KRAUS B F, GAO L, HILL K W, et al. Streaked sub-ps-resolution x-ray line shapes and implications for solid-density plasma dynamics [J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(10): 103527.

[14] MACPHEE A G, BELL P M, BOYLE D, et al. Performance of a hardened x-ray streak camera at Lawrence Livermore National Laboratory′s national ignition facility [J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(8): 083519.

[15] FILKINS T, ROSENBERG M J, BAHR R E, et al. Calibration of the sub-aperture backscatter system on OMEGA EP [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(5): 053504.

[16] 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.
GU Li, ZONG Fangke, LI Xiang, 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. (in Chinese)

[17] 顾礼. X射线飞秒条纹变像管设计与性能提高研究[D]. 深圳：深圳大学，2015：77-85.
GU Li. Research on X-ray femtosecond streak tube design and performance improvement [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015: 77-85. (in Chinese)

[18] 袁铮，刘慎业，曹柱荣，等. 金阴极的选择性光电效应[J]. 物理学报，2010，59(7)：4967-4971.
YUAN Zheng, LIU Shenye, CAO Zhurong, et al. Selective photoemission of Au photocathode [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 4967-4971. (in Chinese)

[19] CSORBA I P. Modulation transfer function of image tube lenses [J]. Applied Optics, 1977, 16(10): 2647-2650.

[20] BASS M. Geometrical and physical optics, polarized light, components and instruments [M]. New York, USA: McGraw-Hill Companies, 1995: 2116-2117.

【中文责编：方圆；英文责编：溯心】

http://journal.szu.edu.cn