

阴极门控光学条纹相机

李 晋, 杨志文, 胡 昕*, 张 兴, 王 峰

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为满足惯性约束聚变 (ICF) 物理实验诊断中对高信噪比低噪声光学条纹相机的需求, 基于六电极同轴型扫描变像管发展了一种阴极门控光学条纹相机。该相机通过阴极预置直流高压叠加门控脉冲电压的方法, 使相机变像管电压只有在门控脉冲加载时间内处于正常工作状态, 才能对阴极发射的电子进行正常聚焦扫描, 而在非加载门控脉冲时间内, 变像管的第二聚焦电极处电压低于阴极电压, 从而使阴极发射的光电子被反向截止, 因此相机只对门控脉冲加载时间内到达的有用信号进行测量, 从而有效抑制了光学条纹相机受环境光辐照而引入的背景噪声, 提升了相机的信噪比。验证实验表明, 通过在阴极上加幅-5.5 kV、脉宽 203 ns 的门控脉冲电压, 即可较大程度降低相机噪声, 同时可维持相机的空间分辨率。

关键词: 光学条纹相机; 扫描变像管; 阴极门控; 噪声

中图分类号: O434.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210402

Optical streak camera with gated photocathode

Li Jin, Yang Zhiwen, Hu Xin*, Zhang Xing, Wang Feng

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to meet the demand for high signal-to-noise ratio and low-noise optical streak camera in inertial confinement fusion (ICF) physical experiment diagnosis, a cathode-gated optical streak camera with six electrodes streak image tube was developed. To suppress the camera noise, a method that loading DC high voltage while superimposing gated high voltage pulse to the photocathode was used. In this way, the streak image tube of the camera was in the normal working state only during the gated pulse loading time, and the electrons emitted by the cathode could be normally focused and scanned. When the control pulse was not loaded, the voltage at the second focusing electrode could be lower than the cathode voltage, so that the photoelectrons emitted by the cathode would be reversely cut off. Therefore, the camera only measured the useful signals that arriving within the gated pulse loading time, thereby effectively suppressing the background noise introduced by the optical streak camera irradiated by ambient light, and improving the camera's signal-to-noise ratio. The verification experiment shows that by loading the gated pulse voltage with amplitude of -5.5 kV and pulse width of 203 ns on the cathode, the camera noise can be greatly reduced, and the spatial resolution of the camera can be maintained.

Key words: optical streak camera; streak image tube; gated cathode; noise

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-10-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0403300)

作者简介: 李晋, 男, 工程师, 硕士, 主要从事时间分辨超快诊断技术研究。

通讯作者: 胡昕, 男, 高级工程师, 主要从事时间分辨超快诊断技术研究。

0 引言

光学条纹相机^[1-6]是一种具有一维连续高时间分辨和一维高空间分辨的光学探测仪器,其时间分辨可以达到皮秒甚至飞秒量级,空间分辨可以达到微米量级,测量时间窗口可以覆盖纳秒到微秒时间尺度。通过光学条纹相机自身可以对光脉冲的时间波形进行测量,也可以与光学成像镜头相结合而对光脉冲的时空演化过程进行精密测量,还可以与光谱仪进行耦合而对光脉冲的能谱变化过程进行测量。因此,光学条纹相机广泛应用于各种超快瞬态现象研究领域^[7-11],尤其在激光惯性约束聚变研究中是必不可少的诊断设备之一,无论是在神光系列激光器的激光脉冲测量,还是在物理实验中的冲击波测速和黑腔等离子体状态探测研究中,都有着十分重要的应用。

然而,当前激光惯性约束聚变研究中所用的光学

条纹相机的阴极通常为多碱阴极^[12],谱响应范围较宽(230~850 nm),对可见光波段的各种环境光(包括散射光和周围环境杂散光)都会有响应,从而产生较强噪声而淹没待测物理信号或严重影响所测物理信号的信噪比。为解决这一问题,文中通过预置阴极直流高压叠加门控脉冲电压的方法,发展了一种阴极门控光学条纹相机,有效抑制了相机的背景噪声,提升了相机的信噪比。

1 阴极门控方案设计

当前国内光学条纹相机所用的扫描变像管通常为轴对称型六电极扫描变像管^[13-14],其结构如图 1 所示,主要由阴极(C)、栅极(M)、第一聚焦极(F1)、第一阳极(A1)、第二聚焦极(F2)、第二阳极(A2)、偏转电极(D)和荧光屏(P)组成,这种变像管阴极高压最高可达到-16.5 kV,此时栅极高压可设置为-3.5 kV。

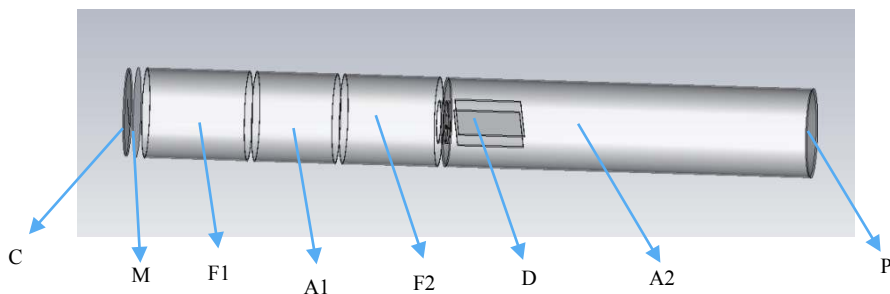


图 1 六电极扫描变像管结构

Fig.1 Structure of the streak image tube with six electrodes

为降低环境杂散光引入的噪声,可使变像管阴极发射电子在无待测信号时处于反向截止状态,而在有用信号到达变像管时,阴极发射电子可被正常聚焦成像和扫描,并到达荧光屏。如此,应使变像管在无待测信号到来时,阴极处电压高于变像管后端某处位置电压,此时变像管的电压加载情况会使各种杂散光引起的阴极发射电子不能到达变像管的荧光屏;而在有用信号到达变像管时,通过在阴极上作用矩形脉冲高压,使变像管的各电极电压达到正常工作时的电压值,可对待测信号辐照光阴极而发射的光电子进行正常聚焦扫描。通常情况下,为使杂散光导致的阴极发射电子处于反向截止状态,一般使阴极电压高于栅极电压,如可将阴极电极电压设置为-3 kV,而为使待测信号使阴极发射的光电子能够正常到达荧光屏并聚焦成像,需要在阴极上施加的矩形门脉冲幅度需高达

-13.5 kV,如此高幅度的矩形门脉冲制作难度较大,因此当前条纹相机扫描变像管只加载直流电压,无法有效抑制环境杂散光产生的噪声。

通过对变像管各电极电压加载情况进行详细分析,发现只需使阴极轴心位置处电压高于后端电极 F2 轴心处电压即可实现对阴极发射电子的反向截止。图 2 为计算得到的变像管轴心上电压分布情况,可以看出当阴极电压为-16.5 kV 时,阴极处轴心位置电压为-16.5 kV,而后端 F2 电极位置处轴心电压约为-11.79 kV,因此,为使阴极电子能够反向截止,只需使阴极位置处电压高于-11.79 kV 即可,如可将阴极电压设置为-11 kV,此时阴极出射的电子就将在 F2 电极处截止。而为使变像管正常工作,只需施加-5.5 kV 的门控高压脉冲即可,显然这种幅度的门控高压脉冲制作相对容易。

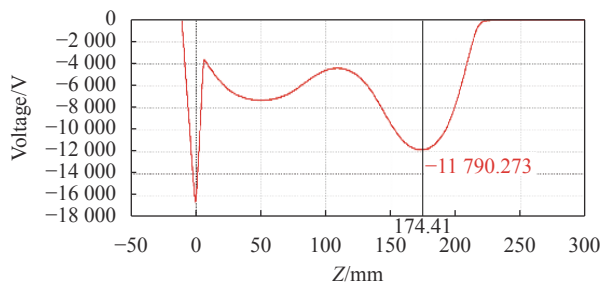


图 2 变像管轴心上电压分布

Fig.2 Voltage distribution on the axis of the streak tube

为验证变像管的电子截止情况,分别对阴极加载 -16.5 kV 和 -11 kV 电压时变像管的电子运动轨迹进行了计算,如图 3 所示,图 3(a) 为变像管阴极加载 -16.5 kV 时的电子运动轨迹,可以看到此时变像管为正常工作状态,电子能够正常聚焦成像到荧光屏上;图 3(b) 为阴极电压 -11 kV 时的电子运动轨迹,可以看出,电子运动到 F2 电极位置时即被截止,无法到达荧光屏。因此,根据变像管的这一特性制定了如图 4

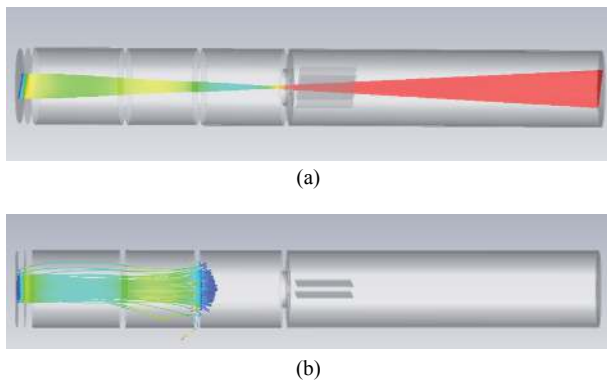


图 3 变像管电子运动轨迹

Fig.3 Electron trajectory of the streak tube

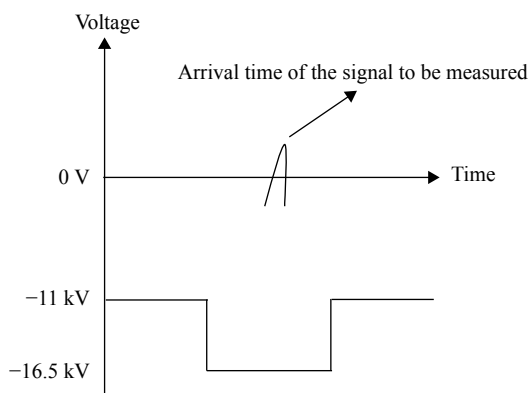


图 4 门控技术方案时序

Fig.4 Time sequence of the gated photocathode technology

所示的门控技术方案,首先在阴极上施加 -11 kV 直流电压,其他电极施加正常工作电压,而在待测信号到达阴极时间段内,在阴极上叠加 -5.5 kV 的矩形门控脉冲,即可使环境光辐照光阴极发射的电子无法到达荧光屏,而降低变像管噪声水平。

当扫描变像管阴极叠加矩形门控脉冲时,变像管将类似于一种高速快门,此时需要考虑变像管的开启时间 τ 。如果变像管不能快速开启,会难以同步待测信号到达阴极的时间与矩形门脉冲加载时间,导致待测信号到达相机阴极时,相机依然处于截止状态而无法对有用信号进行测量。理论上扫描管的开启时间 τ 与阴极面电阻 R 以及阴栅极间电容 C 有如下关系:

$$\tau = RC/\pi$$

通过增加多碱导电层薄膜厚度的方法可降低面电阻,但会较大程度上降低入射信号的透过率而降低阴极光谱响应灵敏度。因此,为进一步降低开启时间 τ ,需要降低阴栅极间电容 C 。由于阴栅间类似于平板电容器,电容可按下述公式计算:

$$C = Q/U = \epsilon \cdot S/4\pi kd$$

式中: C 为板间电容值; ϵ 为两板间相对介电常数; k 为静电力常数; S 为阴栅正对面积; d 为阴栅间距。介电常数主要为真空介电常数,难以改变,而阴栅间距 d 的增大会降低变像管的时间分辨率,因此减少阴栅正对面积是主要方法。如图 5 所示,通过对变像管阴栅电极结构的优化,将阴栅面积减少了 5 倍以上。最后,为获得超快的阴极高压门控,需尽可能减少传输线长和寄生电感,采用从阴极位置处就近引出高压线

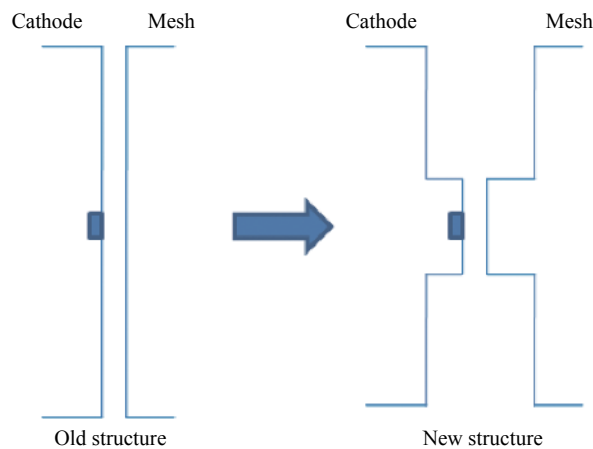


图 5 阴栅结构

Fig.5 Structure of the photocathode and mesh

的方式使得阴极脉冲高压引出线缩短到了 100 mm 以下。

2 阴极门控技术验证

2.1 验证实验排布

为验证阴极门控技术的可行性以及研究采用阴极门控技术后对相机性能的影响,设计了如下排布的验证实验,如图 6 所示。以一台阴栅改进型光学条纹相机 (OSC) 作为实验测试对象,分别测量 OSC 在门控模式和常规模式下的成像效果,以验证阴极门控技术对于背景噪声的抑制效果。所用的负高压门控脉冲如图 7 所示,其幅度为 -5.5 kV,脉宽约 203 ns。此外,实验采用一台 DG535 脉冲发生器提供三路触发脉冲,其中两路分别用于触发门控脉冲和激光器,并通过调节触发脉冲的延时使激光信号到达阴极时间在门控脉冲加载时间内,另外一路提供给示波器作为

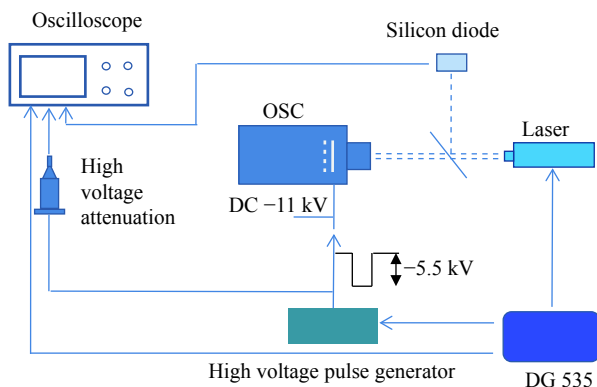


图 6 阴极门控技术实验排布

Fig.6 Experimental arrangement of the gated photocathode technology

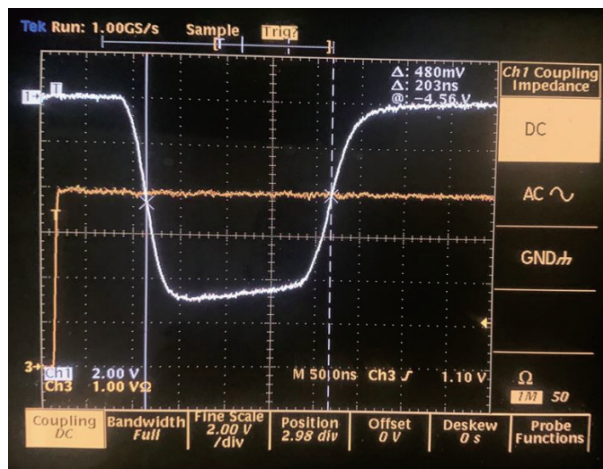


图 7 门控脉冲波形

Fig.7 Waveform of the gated pulse

触发时间基准。同时,一个光电二极管用于接收短脉冲激光器分束的小部分激光能量,并将波形送到示波器监视激光与门控高压脉冲的时序。

2.2 验证实验结果

为验证阴极门控技术对于环境噪声的抑制效果,以及研究阴极门控技术对于扫描变像管的成像效果影响,分别在有无门控高压加载阴极情况下(阴极加载门控高压成像时,称为门控模式;阴极加载直流高压成像时,称为常规模式)对相机的噪声水平和空间分辨率进行了测量。在自然环境光照条件下,对施加传统直流高压和采用阴极门控技术两种情况的相机分辨率板图像进行了测量,以验证阴极门控技术对噪声的抑制效果,此时相机处于静态工作模式下,测试结果如图 8 所示。可以看出,当变像管只加载直流高

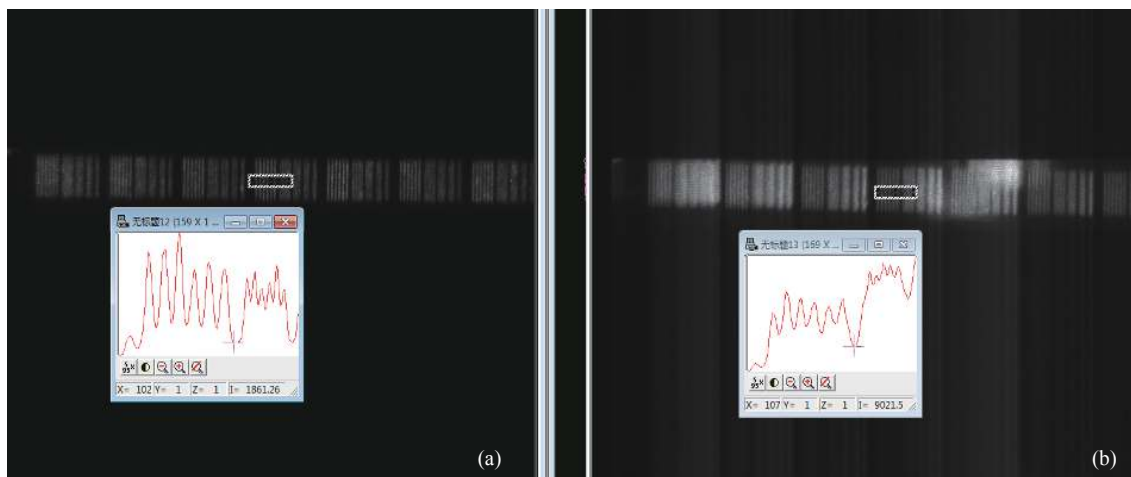


图 8 (a) 门控和 (b) 常规模式下的测试图像

Fig.8 Tested images in (a)gated and (b)normal mode

压时,测试结果如图 8(b) 所示,环境光给条纹相机的成像带来很强的噪声,测试图像受强环境光影响而变得模糊,严重影响实验数据获取。作为对比,采用 203 ns 脉宽的阴极高压门控技术做了同样的测试,测试结果如图 8(a) 所示,测试图像非常干净,可以正常获取相机的分辨率图像,表明 203 ns 的阴极门控很好地抑制了环境噪声。定义图像信噪比为测量信号计数强度与相邻位置非信号区域强度计数的比值,如图 8 所示,对白色方框位置处的信噪比作了初步计算比较,在门控模式下,信号强度计数约为 6200,噪声计数约为 1861,CCD 本底计数约为 850,计算得出信噪比约为

5.29;而在无门控情况下,信号强度计数约为 15500,噪声计数约为 9000,CCD 本底计数约为 850,信噪比约为 1.80。可见采用阴极高压门控技术在较大程度上降低了背景噪声,提升了相机信噪比,初步的实验结果表明,信噪比至少提升了近 2 倍。

为验证条纹相机在阴极高压门控下的成像效果,在门控模式下对相机的空间分辨率图像进行了细致处理,如图 9 所示,可以看出相机依然可以获得 15 lp/mm 的空间分辨率。而施加传统直流高压时,在黑暗环境下测试得到的相机空间分辨率图像如图 10 所示,可以看出,不使用门控技术时,相机的空

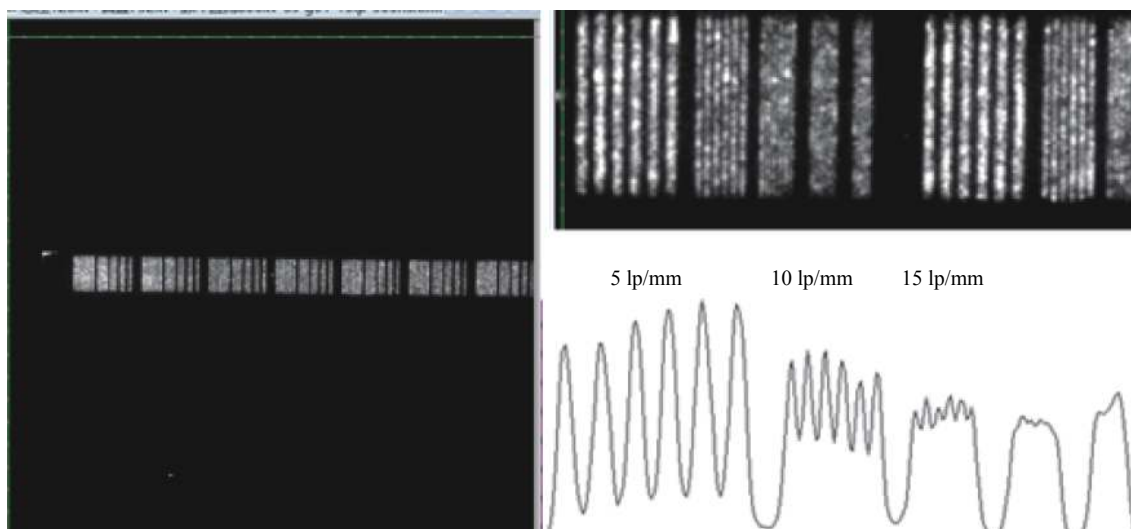


图 9 门控模式下的静态空间分辨率

Fig.9 Static spatial resolution in gated mode

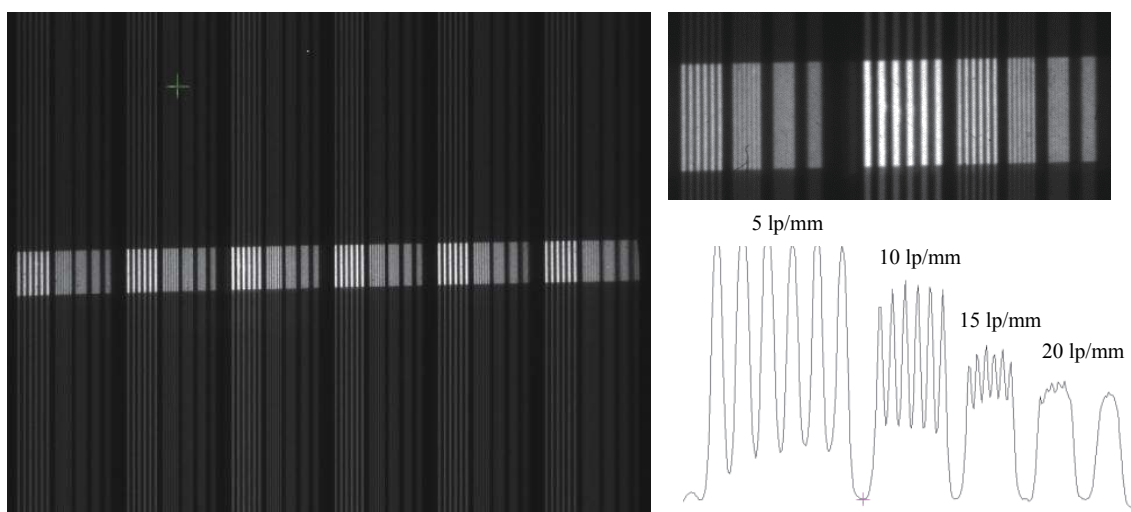


图 10 常规模式下的静态空间分辨率

Fig.10 Static spatial resolution in normal mode

间分辨率最高可以达到 20 lp/mm。阴极门控技术的使用给空间分辨带来了一定影响,但影响较小,这是由于门控脉冲的纹波导致在门控时间内阴极电压产生波动造成的。

为证明阴极施加高压门控脉冲对条纹相机动态扫描未产生干扰影响,在采用阴极高压门控的情况下,在动态模式下对相机的动态扫描空间分辨率进行了测试,此时采用激光器发射的激光脉冲辐照光阴极。测试结果如图 11 所示,可以看出,在动态模式下

相机依然获得了清晰的动态空间分辨率图像,最高空间分辨率也达到了 15 lp/mm,与静态空间分辨率相同,表明采用阴极高压门控技术没有影响相机的成像效果。

通过以上的验证实验表明,针对当前传统的六电极扫描变像管,通过设计的阴极门控技术,只需采用较低幅值的门控脉冲即可大幅度降低光学条纹相机受环境光辐照而引入的背景噪声,同时,结果表明门控脉冲技术对相机的成像性能影响较小。

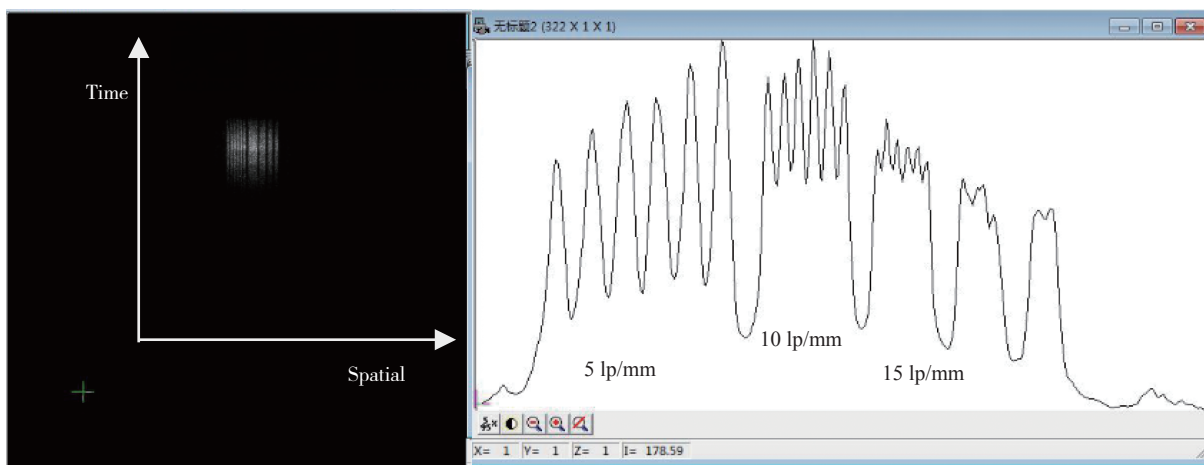


图 11 门控模式下的动态空间分辨率

Fig.11 Dynamic spatial resolution in gated mode

3 结 论

为了抑制环境光辐照光学条纹相机阴极而引入的背景噪声,基于同轴型六电极变像管,通过在相机变像管阴极上预置阴极直流高压叠加门控脉冲电压的方法设计了阴极门控技术方案,并优化了变像管阴极栅电极结构。对门控技术进行了实验验证,结果表明,采用 203 ns、-5.5 kV 的矩形门控高压脉冲可使相机的信噪比至少提升 2 倍,同时可使相机的空间分辨达到 15 lp/mm。总之,完成了阴极门控技术的可行性验证,将该技术应用于光学条纹相机,可在较大程度上降低光学条纹相机受环境光辐照而引入的背景噪声,从而提升相机的信噪比。

参考文献:

[1] Teruo Takeshita, Kazutaka Suzuki, Katsuyuki Kinoshita, et al. Development of a high dynamic range streak camera [C]//SPIE, 2001, 4183: 255-262.

[2] Donaldson W R, Boni R, Keck R L, et al. A self-calibrating, multichannel streak camera for inertial confinement fusion applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(7): 2606-2615.

[3] Jaanimagi P A. Breaking the 100-fs barrier with a streak camera [C]//SPIE, 2004, 5194: 171-182.

[4] Lerche R A, McDonald J W, Griffith R L, et al. Preliminary performance measurements for a streak camera with a large-format direct-coupled charge-coupled device readout [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 4042-4044.

[5] Peng Xiaoshi, Liu Yonggang, Zhang Huige, et. al. Experimental calibration of sweep speed for optic streak camera [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, 28(4): 841-844. (in Chinese)

[6] Pei Chengquan, Wu Shengli, Luo Duan, et al. Traveling wave deflector design for femtosecond streak camera [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2017, 855: 148-153.

[7] Masayuki Komura, Shigeru Itoh. Fluorescence measurement by

- a streak camera in a single-photon-counting mode [J]. *Photosynth Res*, 2009, 101: 119-133.
- [8] Clément Chollet, Dominique Gontier, Céline Zuber, et al. Recent advances in streak tube characterization for multichannel laser pulse shape measurements on the LMJ facility [C]//SPIE, 2009, 7126: 712610.
- [9] Wang Zhebin, Yang Dong, Zhang Huige, et al. Sweep time performance of optic streak camera [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(8): 1836-1840. (in Chinese)
- [10] Manuel A M, Millot M, Seppala L G, et. al. Upgrades to the VISAR Streaked Optical Pyrometer (SOP) system on NIF [C]//SPIE, 2015, 9591: 959104.
- [11] Gregor M C, Boni R, Sorce A, et al. Absolute calibration of the OMEGA streaked optical pyrometer for temperature measurements of compressed materials [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 114903.
- [12] Li Xiaofeng, Li Li, Yan Wenbo, et al. Study on sensitivity of different thickness of multi-alkali photocathode [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(7): 422-426. (in Chinese)
- [13] Li Jin, Hu Xin, Yang Pin, et al. Double focusing lens streak tube with wide dynamic range [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2616-2620. (in Chinese)
- [14] 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 Photonics Sinica*, 2017, 37(12): 1234001. (in Chinese)