

文章编号 1004-924X(2023)17-2505-10

GaAs光阴极像增强器的选通特性

李冬*, 杨凯翔, 盛亮, 李阳, 段宝军, 张美

(强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室(西北核技术研究所), 陕西西安710024)

摘要:针对GaAs光阴极像增强器在ns级选通成像中的时空特性,通过引入传输线阻抗完善了光阴极径向RLC传输模型,更准确地描述了选通过程中光快门的变化趋势,实验证实去除防离子反馈膜有利于改善光快门,使得光快门与电快门更为一致,在驱动电脉冲宽度为17.7 ns时,光快门宽度与电快门宽度的差异仅为1.1 ns;基于蒙特卡罗模拟方法,建立了光电子在分段线性快门脉冲电压驱动下经过第一近贴后的空间弥散模型,模拟结果表明:GaAs光阴极相较于S20光阴极在选通成像中的空间分辨下降更小。在20 lp/mm时,GaAs的动态空间分辨是静态空间分辨的80%,而S20光阴极不足70%,理论模拟与实验结果相一致,所建立的模型可用来分析和优化像增强器结构参数,为优化选通成像性能提供理论依据。

关键词: GaAs光阴极;选通特性;动态空间分辨;像增强器

中图分类号: O462.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233117.2505

Gating characteristics of GaAs photocathode image intensifier

LI Dong*, YANG Kaixiang, SHENG Liang, LI Yang, DUAN Baojun, ZHANG Mei

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect(Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, China)

* Corresponding author, E-mail: lidong@nint.ac.cn

Abstract: Considering the spacetime characteristics of the GaAs photocathode image intensifier in ns-level gated imaging, this study undertakes a theoretical simulation and experimental validation. For theoretical simulation, the radial RLC transmission model of the photocathode is enhanced by incorporating transmission line impedance. This refinement enables a more accurate description of the optical shutter's behavior during the gating process. Experimental evidence confirms that removing the anti-ion feedback film enhances the optical shutter, aligning it closely with the electric shutter. Specifically, when the driving electric pulse width is 17.7 ns, the difference between the optical shutter width and the electric shutter width is merely 1.1 ns. For experimental validation, a spatial dispersion model of photoelectrons, driven by a segmented linear shutter pulse voltage after the first close attachment, is established using the Monte Carlo simulation method. Simulation outcomes indicate that the spatial resolution degradation of the GaAs photocathode in gating imaging is inferior to that of the S20 photocathode. At a spatial resolution of 20-line pairs per millimeter (lp/mm), GaAs maintains 80% of its static spatial resolution, whereas the corresponding figure for the S20 photocathode is less than 70%. Notably, the theoretical simulation aligns seamlessly with the experimental results, affirming the applicability of the model for analyzing and optimizing image

收稿日期:2023-03-02;修订日期:2023-04-04.

基金项目:卓越青年基金资助项目(No. JQZQ021901);国家自然科学基金资助项目(No. 12175183)

intensifier structural parameters. This model serves as a foundational framework for enhancing gating imaging performance.

Key words: GaAs photocathode; gating characteristics; dynamic spatial resolution; image intensifier

1 引言

对电爆炸、Z 箍缩、惯性约束聚变等超快过程的研究^[1-3],促进了超快成像的发展。根据时间、空间分辨的不同,转镜式高速摄影机、条纹相机、双近贴像增强器选通型分幅相机等应用于不同的成像场景^[4-5]。其中,双近贴像增强器选通型分幅相机具有成像尺寸大、空间分辨率高、响应波段范围大和结构简单等特点,因而应用广泛^[6-8]。其曝光时间由门控型像增强器决定,通过在光阴极与微通道板(Micro Channel Plate, MCP)输入面之间加上脉冲电压,实现对电子的高速选通,但受光阴极面电阻、光阴极和 MCP 之间电容的限制,曝光时间一般在 ns 量级^[9]。

在 ns 量级选通成像中,光快门与输入的电快门之间存在差异,并且空间分辨率相较于静态条件下明显。针对当前主要使用的 S20 光阴极像增强器,刘宁文等根据光纤阵列形成的光延时更精确地测量像增强器的曝光时间^[10]。谢红卫等根据 RLC 径向传输线模型,定性分析了选通过程中的孔栏效应^[11]。朱斌等采用超短激光脉冲扫描,实验测量了像增强器选通过程中的响应变化趋势^[12]。盛亮等根据时空可分离假设,由时空传递函数分析了像增强器的时空衰减因子^[13]。

国内近年来发展了 GaAs 光阴极技术^[14-15]。相较于 S20 光阴极, GaAs 光阴极具有电子发射角度集中^[16]、量子效率高^[17]等优点,可提高选通成像性能。本文针对 GaAs 光阴极像增强器选通成像中光快门与电快门之间的差异,在 RLC 径向传输线模型的基础上,考虑传输线对电快门的衰减以及光快门亮度与驱动电压的对应关系,更加准确地描述了像增强器选通过程中的光快门;针对选通成像中空间分辨下降的问题,建立了在分段线性快门脉冲电压驱动下,光电子经过第一近贴距离后的空间弥散模型,基于蒙特卡洛法分析了电快门脉冲和光阴极材料对

选通成像动态空间分辨的影响。本研究对优化像增强器高速选通成像性能、分析成像结果具有重要意义。

2 GaAs 光阴极像增强器时间选通特性分析

像增强器在选通过程中,实际光选通特性与电选通脉冲有差异,主要体现为延时增大、脉宽变化和光快门畸变。电脉冲从驱动电路输出传输到像增强器之间经历了传输线传输和光阴极传输两个过程。由于传输线较短,带宽很高,这里认为选通脉冲在传输线中的波形不发生变化;选通脉冲由传输线馈入光阴极时,由于介质不连续,需要考虑边界的反射现象;选通脉冲在光阴极中传输时,由于光选通是具备空间分布特性的,需采用分布参数对像增强器进行分析建模。

2.1 光阴极电脉冲传输的电路模型

电路模型采用理想电极条件,即电脉冲同时馈入光阴极边沿并从边沿向中心传输,此时器件是中心对称的。电信号在光阴极中传输时,可将光阴极和 MCP 输入面之间分为若干同心微圆环,每一微元具有 RLC 分布参数^[11],如图 1 所示。其中, ΔR , ΔL , ΔC , ΔI_p 分别为微元的电阻、电感、

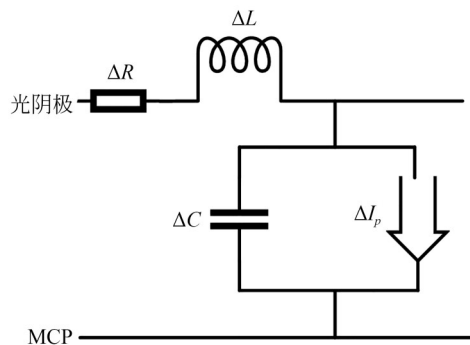


图 1 径向微元模型

Fig. 1 Radial microelement model

电容和光电流,其公式如下:

$$\begin{aligned} \Delta R(r) &= \rho \frac{\Delta r}{2\pi r} \\ \Delta L(r) &= \mu_0 d \frac{\Delta r}{2\pi r}, \\ \Delta C(r) &= \frac{\epsilon_0 2\pi r \Delta r}{d} \\ \Delta I_p &= 2\pi r \Delta r i_p \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ρ 为光阴极面电阻, d 为第一近贴距离, $i_p \approx 0 \text{ A/m}^2$ 为光电流密度, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ 为真空介电常数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 为真空磁导率。根据基尔霍夫定律,有:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial r} &= -\frac{2\pi r \epsilon_0}{d} \frac{\partial V}{\partial t} - 2\pi i_p r \\ \frac{\partial V}{\partial r} &= -\rho \frac{I}{2\pi r} - \frac{\mu_0 d}{2\pi r} \frac{\partial I}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

整理可得电脉冲在光阴极上传输的偏微分方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} &= -\frac{\rho}{\mu_0 d} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \\ &\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 r} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{\rho i_p}{\mu_0 \epsilon_0} - \frac{d}{\epsilon_0} \frac{\partial i_p}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

在光阴极边界上,考虑传输线阻抗,有:

$$V_1(t) - I_1(t) R_0 = V_s(t), \quad (4)$$

其中: V_1 为光阴极边缘电压, I_1 为光阴极边缘电流, R_0 为传输线阻抗, V_s 为快门输出电压。所以在考虑传输线之后,光阴极边缘电场满足:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_1(t)}{\partial t} &= -\frac{2\pi l R_0}{\mu_0 d} \frac{\partial V_1}{\partial r} + \frac{\rho}{\mu_0 d} (V_s(t) - \\ &V_1(t)) + \frac{\partial V_s(t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 l 为光阴极的半径长度。联立式(3)和式(5)就可以解出光阴极传输的电脉冲。

数值计算了脉宽为 10 ns,幅度为 250 V,偏压为 50 V 的理想方波,在光阴极面电阻 $\rho = 60 \Omega/\square$ 、第一近贴距离 $d = 10^{-4} \text{ m}$ (0.1 mm)、光阴极直径 $\Phi 18 \text{ mm}$ ($l = 9 \times 10^{-3} \text{ m}$)、传输线阻抗 $R_0 = 50 \Omega$ 的像增强器上的传输过程,光阴极传输的平均电脉冲如图 2 所示,开门与关门过程的孔栏效应如图 3 所示。计算结果表明:光阴极会明显衰减电选通脉冲;孔栏效应时间约为 0.12 ns。

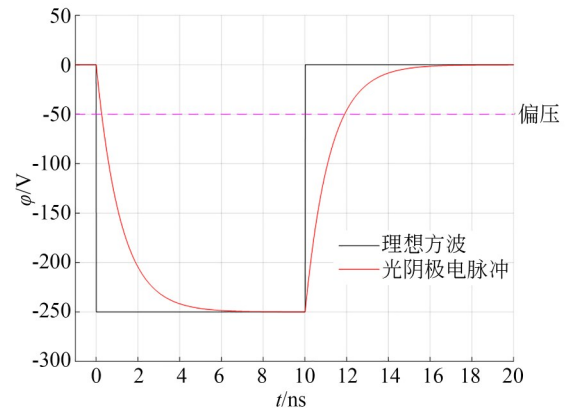


图 2 光阴极电脉冲

Fig. 2 Photocathode electrical pulse

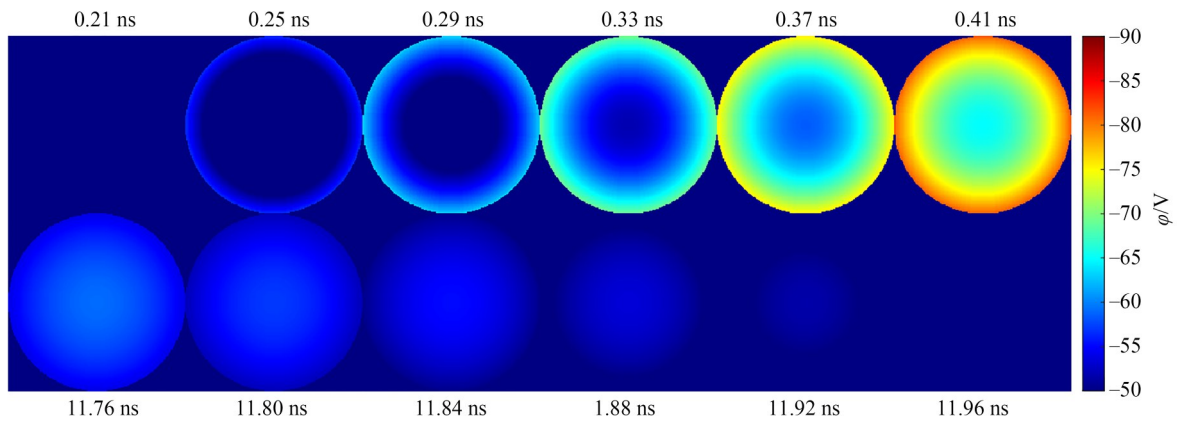


图 3 孔栏效应

Fig. 3 Hole bar effect

2.2 GaAs 光阴极像增强器选通光快门

本文采用脉冲激光作为探针,当激光的脉宽远小于像增强器的选通时间时,可以将脉冲激光视为 δ 脉冲,使用光强代表像增强器该时间的光响应,实验原理如图 4 所示。使用脉宽为 300 fs, 波长为 532 nm 的激光作为光源,均匀扩束后分别照射到光阴极和光电管。

实验中使用微光夜视技术重点实验室研制的 $\Phi 18$ mm GaAs 光阴极像增强器(Gen3),并选取 $\Phi 25$ mm S20 光阴极像增强器(Gen2)作为对照,其第一近贴距离均为 0.1 mm。MCP 的工作电压为 535 V,电脉冲宽度设定为 500 ns,激光照射脉冲平稳阶段,改变电压得到像增强器输出亮度随驱动电压的变化曲线,结果如图 5 所示,亮度不随驱动电压线性变化。

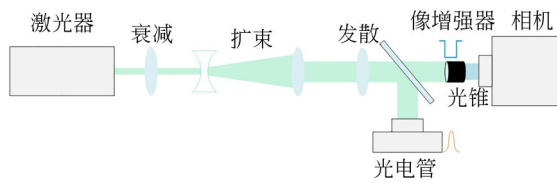


图 4 光快门特性实验原理

Fig. 4 Experimental principle for optical shutter characteristics

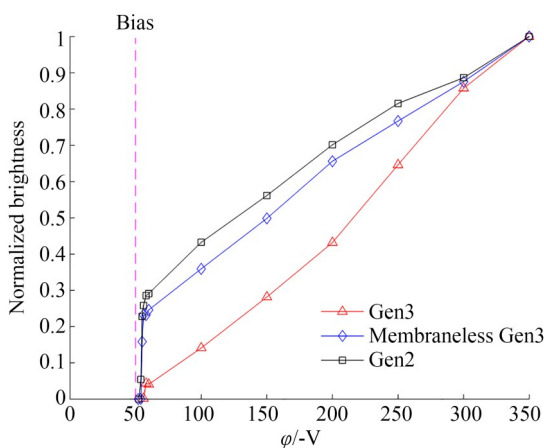


图 5 亮度随驱动电压的变化曲线

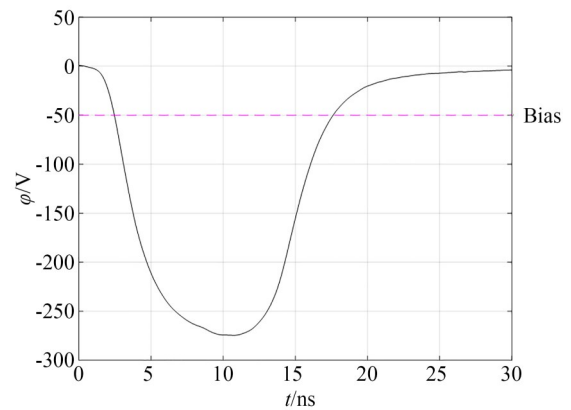
Fig. 5 Variation curves of brightness with driving voltage

GaAs 光阴极像增强器需要在 MCP 输入面镀上防离子反馈膜,会衰减光阴极产生的电子,当电子能量较低时仅有少量电子因透穿效

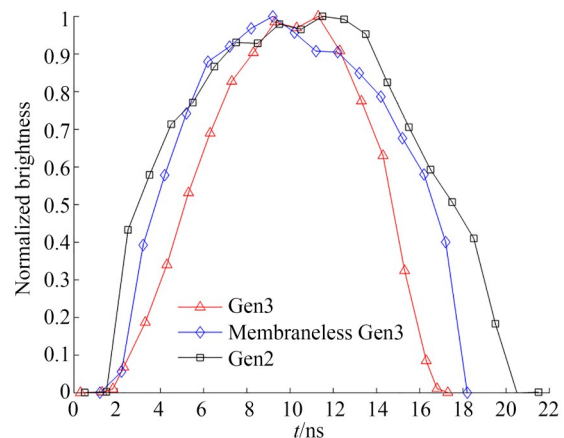
应而透过,随着能量的增加,透过电流线性增长,直至饱和^[18],GaAs 光阴极像增强器亮度与驱动电压的对应关系与防离子反馈膜衰减光电子特性相吻合。由模拟结果可得,亮度与驱动电压的关系会显著影响光快门,因此增加实验研究无膜 $\Phi 18$ mm GaAs 光阴极像增强器(无膜 Gen3)。

电脉冲宽度设定为 11.7 ns(图 6(a)),使用多通道脉冲信号源进行精密延时,不断调整电快门脉冲和脉冲激光到达光阴极的相对时间,扫描像增强器选通的全过程,将结果归一化,即可得到像增强器的光快门^[12],如图 6(b)所示。

Gen3、无膜 Gen3 和 Gen2 的光快门半高宽分



(a) 电快门脉冲
(a) Electric shutter pulse



(b) 光快门曲线
(b) Optical shutter curve

图 6 光快门特性实验结果

Fig. 6 Experimental results of optical shutter characteristics of brightness with driving voltage

别为 9.5, 12.8 和 14.5 ns, 无防离子反馈膜 GaAs 光阴极像增强器的光快门半宽与电快门 11.7 ns 最为接近, 可以通过电快门获得曝光时间。该结果证实防离子反馈膜会影响亮度与驱动电压的

关系特性, 从而显著影响光快门。在关闭过程中获得了 GaAs 光阴极像增强器孔栏效应图像, 如图 7 所示, 其孔栏效应时间在 0.1 ns 量级, 与模拟结果 0.12 ns(见图 3)相吻合。

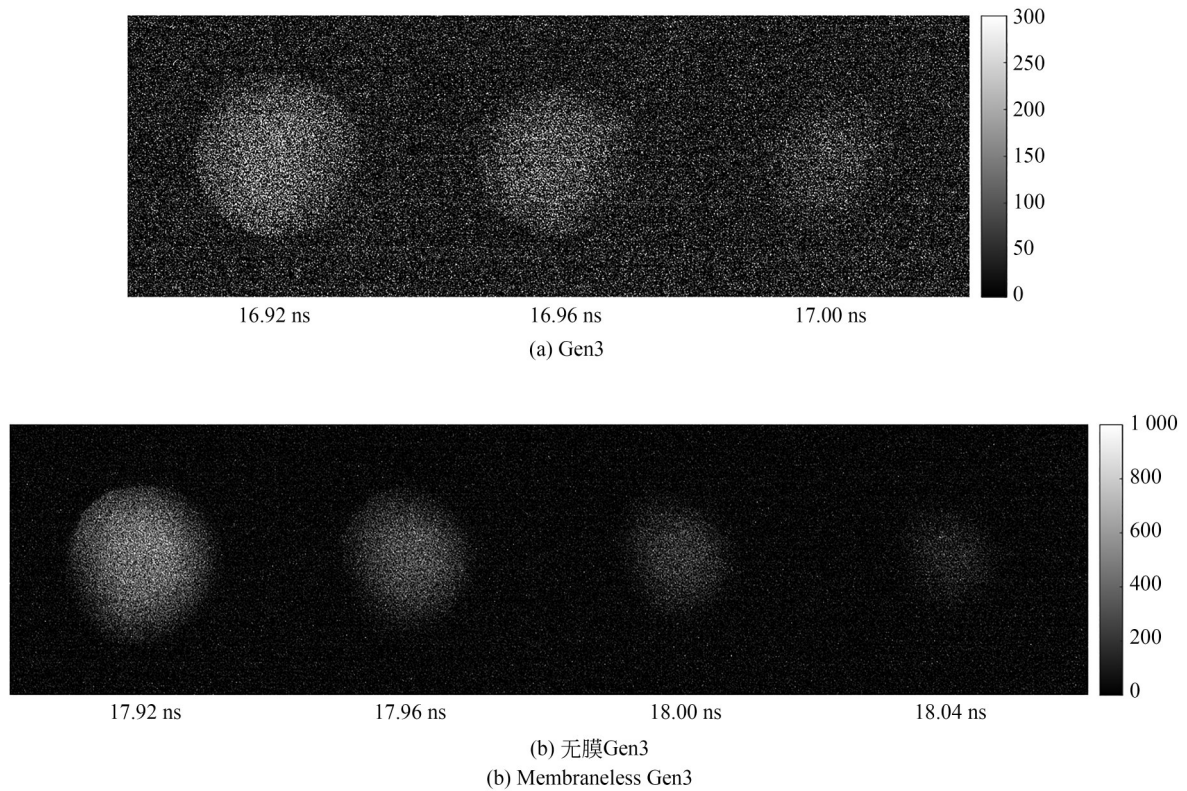


图 7 孔栏效应实验结果

Fig. 7 Results of hole bar effect experiment

根据厂家提供的结构参数, 选取光阴极面电阻 $\rho = 60 \Omega/\square$ 、第一近贴距离 $d = 10^{-4} \text{ m}$ (0.1 mm)、光阴极直径 $\Phi 18 \text{ mm}$ ($l = 9 \times 10^{-3} \text{ m}$)、传输线阻抗 $R_0 = 50 \Omega$, 根据式(3)和式(5)计算快门脉冲在光阴极传播过程中的均值电脉冲, 并根据亮度随驱动电压的变化曲线, 将光阴极电脉冲转化为光快门, 结果如图 8 所示。模拟 GaAs 光阴极像增强器光快门的整体趋势与实验一致, 验证了电路模型的准确性。

3 GaAs 光阴极像增强器空间选通特性分析

像增强器在光阴极产生光电子, 通过在光阴极和 MCP 输入面之间加入脉冲电压, 实现电子

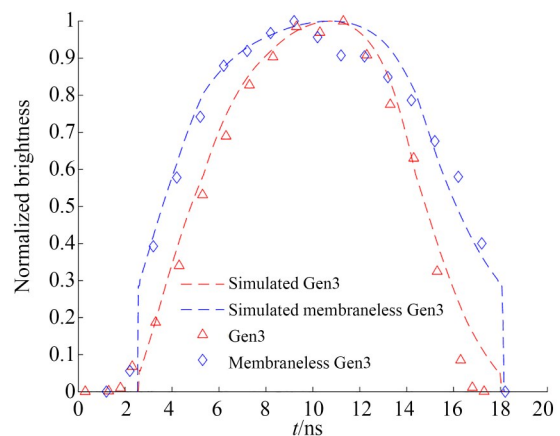


图 8 模拟光快门与实验结果比较

Fig. 8 Comparison of simulated light shutter with experimental results

的高速选通,通过MCP倍增后,电子经过第二近贴距离轰击荧光屏,转化为光快门。与静态相比,动态空间分辨率的下降与静态相比主要发生在第一近贴距离,因此本文主要考虑第一近贴距离的电子输送。

3.1 像增强器选通电子输运模型

3.1.1 光阴极出射电子模型

对于像增强器光阴极,一般假定其逸出光电子的初角度分布服从朗伯分布^[19],即在逸出角为 α 的单位立体角中逸出几率为:

$$G(\alpha) = \cos \alpha. \quad (6)$$

逸出角为 $\alpha \sim \alpha + d\alpha$ 的逸出几率为:

$$N(\alpha) = G(\alpha) d\Omega = 2\cos \alpha \sin \alpha d\alpha. \quad (7)$$

在双近贴像增强器系统中能量分布大多使用Beta分布模型^[19-20]:

$$\beta_{m,n} = \frac{(m+n+1)!}{m! n!} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_m} \right)^m \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_m} \right)^n, \quad (8)$$

式中: m 和 n 为特性参数, ϵ 和 ϵ_m 分别为电子电位和最大电子电位,受光阴极材料的影响。GaAs光阴极一般取 $\beta_{1,8}$ ^[21-22],S20光阴极一般取抛物线分布 $\beta_{1,1}$ ^[23],其最大电子电位 ϵ_m 由入射光波长和光阴极截止波长决定,其公式为^[17]:

$$\epsilon_m = hc \left(\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_f} \right), \quad (9)$$

式中: λ_i 为入射光波长, λ_f 为光阴极长波截止波长。S20光阴极的长波截止波长为850 nm,GaAs光阴极的长波截止波长为900 nm,当入射光为402 nm时,出射电子的最大电位分别为1.63 eV和1.71 eV。

3.1.2 选通运输电子模型

简化加入偏压后的光阴极脉冲为分段线性脉冲,其表达式为:

$$\phi(t) = \begin{cases} \frac{\phi_s}{t_1 - t_0} (t - t_0) & t_0 \leq t < t_1 \\ \phi_s & t_1 \leq t < t_2 \\ \frac{-\phi_s}{t_3 - t_2} (t - t_2) & t_2 \leq t < t_3 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: ϕ_s 为峰值电压,定义 $t_1 \sim t_0$ 为前沿时间, $t_2 \sim t_1$ 为峰值时间, $t_3 \sim t_2$ 为后沿时间。在峰值时间内,电子加速度稳定不变;在线性变化段,设电子加速度为:

$$a(t) = kt + b. \quad (11)$$

粒子在 t_s 时刻发射,其飞行时间 t_d 满足:

$$\frac{k}{6} t_d^3 + \left(\frac{k}{2} t_s + \frac{b}{2} \right) t_d^2 + v_{0z} t_d - d = 0, \quad (12)$$

式中 d 为第一近贴距离,其落点为:

$$r_1 = 10^3 dt \sqrt{\frac{2e}{m} \epsilon \sin \alpha}, \quad (13)$$

式中: r_1 为光电子在MCP输入面上落点半径, e 和 m 分别为电子的电量和质量。由式(13)可得电子在MCP输入面上的落点,统计单位面积内的落点数,得到中心对称的点扩散函数 $P(r)$,进行傅里叶-贝塞尔变换即可得到:

$$\text{MTF}(f) = \frac{\int_0^\infty rP(r) J_0(2\pi fr) dr}{\int_0^\infty rP(r) dr}, \quad (14)$$

式中: J_0 为零阶Bessel函数, f 为空间频率。

3.2 像增强器选通空间分辨模拟

式(12)为一元三次方程,其解受参数影响,无法得到解析解,可以使用蒙特卡洛法分析动态空间分辨。根据使用情况,选取第一近贴距离 $d=10^{-4}$ m(0.1 mm),快门脉冲前沿-峰值-后沿时间为3.3,5.3,4.9 ns,峰值电压 $\phi_s=-220$ V,逸出角分布为朗伯分布,GaAs光阴极的初能量分布为 $\beta_{1,8}$, $\epsilon_m=1.71$ eV,S20光阴极的初能量分布为 $\beta_{1,1}$, $\epsilon_m=1.63$ eV。对快门脉冲时间发射电子和峰值时间发射电子进行抽样模拟,分别代表像增强器动态选通成像和静态成像,在相同空间频率下MTF的下降比如图9(d)所示。GaAs光阴极较S20光阴极逸出电子的能量更集中于低电位,因此在第一近贴距离中的动态空间分辨下降更小。

3.3 GaAs光阴极像增强器选通空间分辨

图10所示为基于FSL500激光器(波长402 nm)设计的空间分辨率测试实验系统。激光一路照射光电管获得光的时间信息,另一路经中继透镜聚焦于光阴极,光阴极选通成像后由另一中继透镜放大2.08倍耦合至CCD相机。首先将像增强器从测试系统中移出,测量该系统的空间分辨。该系统的极限分辨率(MTF=0.02时的空间频率)大于90 lp/mm,而像增强器的极限分辨率一般在30 lp/mm左右。

使用图6(a)中的电脉冲选通成像来代表动

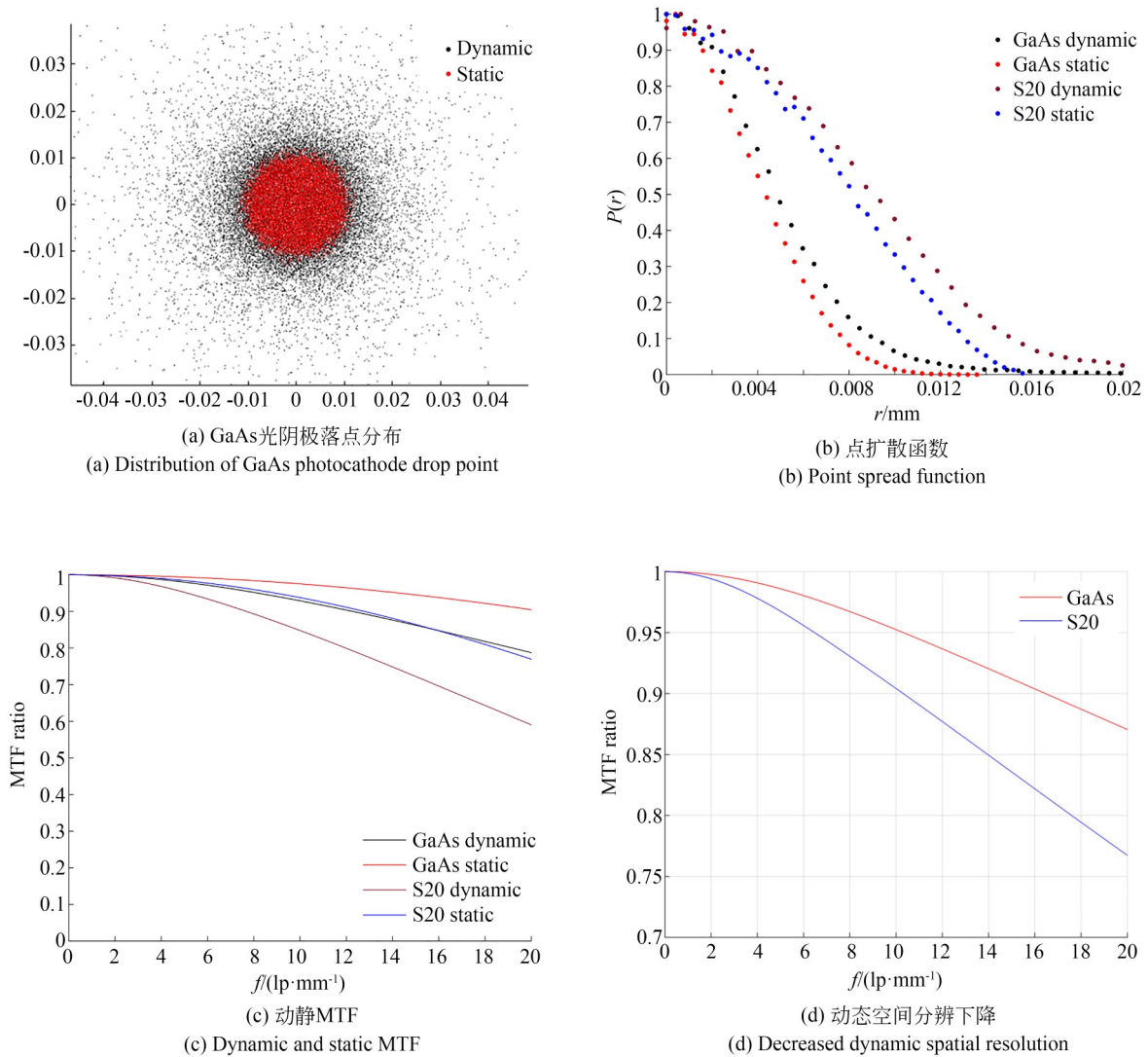


图 9 蒙特卡洛法模拟空间分辨结果

Fig. 9 Monte Carlo method simulate results of spatial resolution

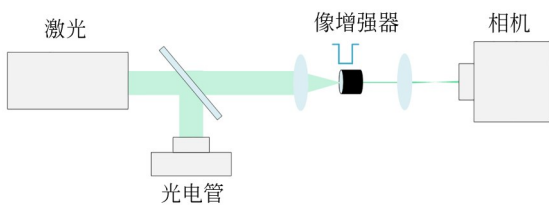


图 10 空间分辨率测量系统

Fig. 10 Spatial resolution measurement system

态成像(前沿-峰值-后沿时间为 3.3, 5.3, 4.9 ns, 峰值电压 $\phi_s = -220$ V);快门脉冲宽 500 ns, 激光 100 ns 照射快门平稳阶段代表静态成像(峰值电压 $\phi_s = -235$ V)。GaAs 光阴极像增强器样品

Gen3、无膜 Gen3 和 S20 光阴极像增强器样品 Gen2 参数与仿真一致。实验结果如图 11(a)所示,使用高斯函数拟合亮度变化(图 11(a)中曲线),以横向拟合线结果为基础,对各个样品的线扩散函数进行傅里叶变换,得到其 MTF 曲线如图 11 所示。GaAs 光阴极像增强器相较于 S20 光阴极像增强器,动态成像的空间分辨下降更小,与模拟结果一致,并且空间分析下降的 MTF 比模拟结果与实验结果整体趋势一致,验证了蒙特卡洛法分析像增强器脉冲成像空间分辨的准确性。

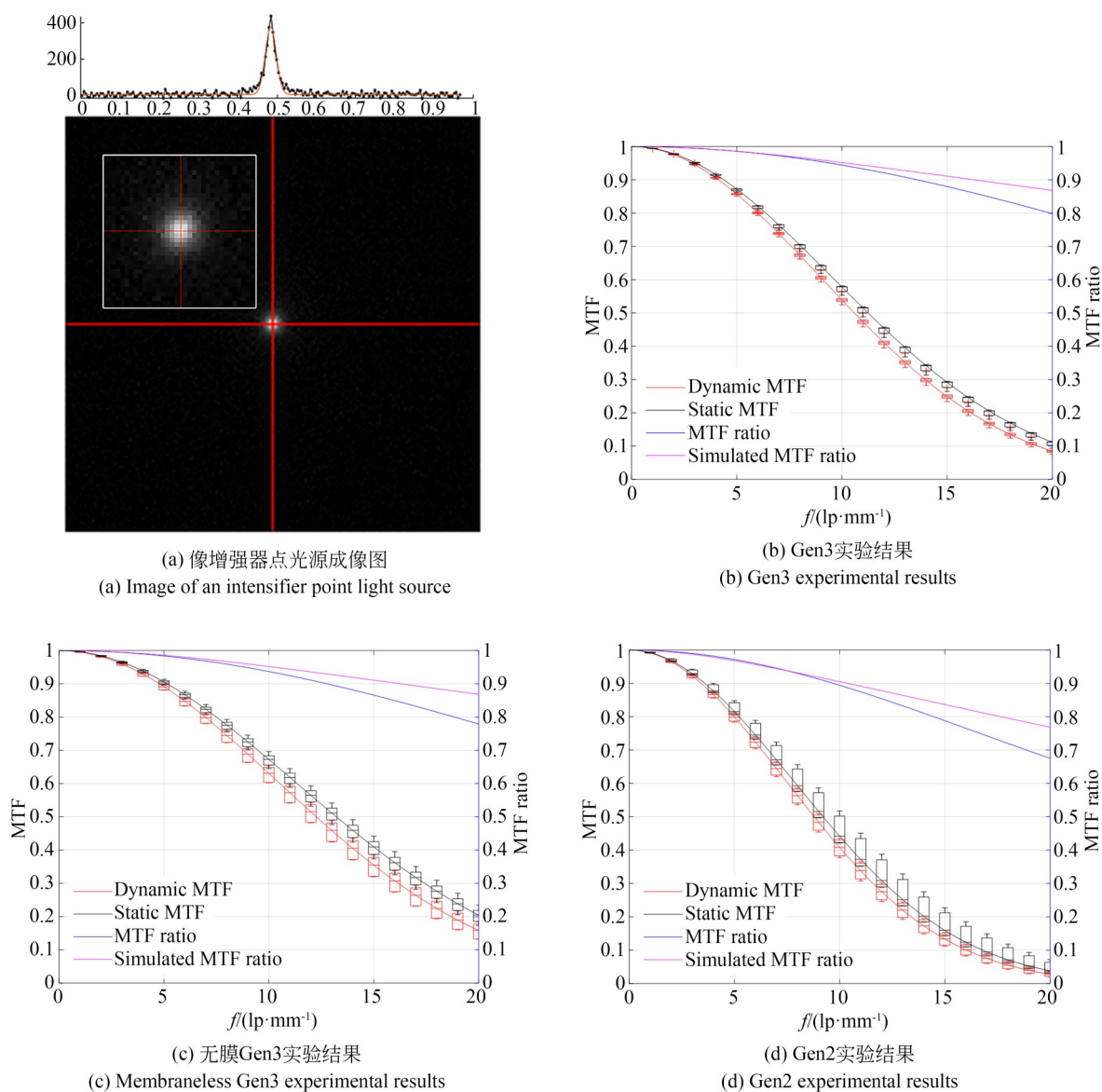


图 11 空间分辨率实验结果

Fig. 11 Spatial resolution experimental results

4 结 论

本文针对 GaAs 光阴极像增强器的时空选通特性开展了较为系统的理论模拟与实验研究。亮度随驱动电压的变化曲线会显著影响光快门的半高宽,而防离子反馈膜会改变亮度与驱动电压的关系,从而使电快门与光快门严重偏离,指出

GaAs 光阴极像增强器在选通成像中应当去除防离子反馈膜,此时快门半宽与电快门更一致。GaAs 光阴极相较于 S20 光阴极,出射电子能量更集中于低电位,在动态选通成像中的空间分辨率下降更小。通过比较模拟结果与实验结果验证了模型的准确性。本文为 GaAs 光阴极像增强器在脉冲成像中的使用与优化提供了理论模型。

参考文献:

[1] 刘永棠, 盛亮, 李阳, 等. 周期调制结构平面薄膜

电爆炸实验研究[J]. 物理学报, 2021, 70(6): 248-259.

LIU Y T, SHENG L, LI Y, *et al.* Explosion of

- thin flat foils with periodical modified structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(6): 248-259. (in Chinese)
- [2] FRENJE J. Nuclear diagnostics for inertial confinement fusion (ICF) plasmas [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, 62(2): 023001.
- [3] 江孝国, 杨礼兵, 黄显宾, 等. Z“箍缩”的时间分辨测量技术研究[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 922-925.
JIANG X G, YANG L B, HUANG X B, *et al.* Time-resolved measurement technology for Z pinch [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(5):922-925. (in Chinese)
- [4] 李景镇, 龚向东, 李善祥, 等. Miller型超高速摄影系统经典设计理论的研究[J]. 光子学报, 2004, 33(6):739-742.
LI J ZH, GONG X D, LI SH X, *et al.* Study on classical designing theory of miller type ultra high speed photographic system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(6):739-742. (in Chinese)
- [5] 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): 200119.
TIAN J SH. Introduction to development of streak and framing cameras[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(11): 200119. (in Chinese)
- [6] LEE S J, THEERTHAGIRI J, CHOI M Y. Time-resolved dynamics of laser-induced cavitation bubbles during production of Ni nanoparticles via pulsed laser ablation in different solvents and their electrocatalytic activity for determination of toxic nitroaromatics [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 130970.
- [7] ZHOU X, SUN J F, JIANG P, *et al.* Theoretical and experimental investigations on speckle suppression of dual-wavelength imaging LiDAR by vibrating the multimode fiber [J]. *Measurement*, 2022, 188: 110588.
- [8] CALVER T I, SHATTAN M B, PERRAM G P. Shock front detachment during pulsed laser ablation of graphite [J]. *Applied Physics A*, 2022, 128(1): 15.
- [9] 张天舒. 高速分幅相机光学系统设计与研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017: 2-4.
ZHANG T SH. *Optical Design and Study of High-speed Framing Camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 2-4. (in Chinese)
- [10] 刘宁文, 畅里华, 肖正飞, 等. 门控型像增强器开门时间测量[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2447-2450.
LIU N W, CHANG L H, XIAO ZH F, *et al.* Measuring gating time of gated image intensifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(10): 2447-2450. (in Chinese)
- [11] 谢红卫, 陈进川, 李宏云, 等. MCP像增强器开门/关门时间特性研究[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(10): 1196-1200.
XIE H W, CHEN J CH, LI H Y, *et al.* The study of turn on/turn off gated mcp image intensifier[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2014, 34(10): 1196-1200. (in Chinese)
- [12] 朱斌, 滕建, 吴玉迟, 等. 基于超短激光脉冲扫描法的超高速分幅相机时间响应特性测定[J]. 光子学报, 2018, 47(10): 1011001.
ZHU B, TENG J, WU Y CH, *et al.* Mensuration on the time response characteristic of ultra high speed framing camera based on scanning method with ultra-short laser pulse[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 1011001. (in Chinese)
- [13] 盛亮, 黑东炜, 邱孟通, 等. 纳秒级时间选通成像系统动态空间分辨率[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(2): 274-277.
SHENG L, HEI D W, QIU M T, *et al.* Dynamic resolution of nanosecond time-gated imaging system [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, 28(2): 274-277. (in Chinese)
- [14] 王自衡, 李诗曼, 石峰, 等. InGaAs光电阴极的Cs/NF₃激活[J]. 光学精密工程, 2023, 31(9): 1277-1284.
WANG Z H, LI SH M, SHI F, *et al.* Cs/NF₃ activation of InGaAs photocathode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1277-1284. (in Chinese)
- [15] 田慧军, 刘巧莉, 岳恒, 等. 高比探测率和高速石墨烯/n-GaAs复合结构的光电探测器[J]. 中国光学, 2021, 14(1): 206-212.
TIAN H J, LIU Q L, YUE H, *et al.* Hybrid graphene/n-GaAs photodiodes with high specific detectivity and high speed[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 206-212. (in Chinese)
- [16] REN L, CHANG B K. Modulation transfer function characteristic of uniform-doping transmission-

- mode GaAs/GaAlAs photocathode [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(8): 087308.
- [17] 赵静, 张益军, 常本康, 等. 高性能透射式 GaAs 光电阴极量子效率拟合与结构研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 107802.
- ZHAO J, ZHANG Y J, CHANG B K, *et al.* Research on quantum efficient fitting and structure of high performance transmission-mode GaAs photocathode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 107802. (in Chinese)
- [18] 朱宇峰, 张妮, 李丹, 等. 微通道板防离子反馈膜阈值电压特性研究[J]. *应用光学*, 2017, 38(3): 476-479, 498.
- ZHU Y F, ZHANG N, LI D, *et al.* Threshold voltage characteristics of ion barrier film of MCP [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(3): 476-479, 498. (in Chinese)
- [19] 程耀进, 向世明, 师宏立. 三代微光像增强器分辨力计算理论模型[J]. *应用光学*, 2007, 28(5): 578-581.
- CHENG Y J, XIANG SH M, SHI H L. Theoretical model for resolution calculation of third generation image intensifiers[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(5): 578-581. (in Chinese)
- [20] 武梅娟, 任玲, 常本康, 等. 运用蒙特卡罗方法分析像增强器分辨率[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, 32(9): 798-801.
- WU M J, REN L, CHANG B K, *et al.* Simulation of image intensifier resolution in Monte Carlo method[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(9): 798-801. (in Chinese)
- [21] 邱亚峰, 严武凌, 华桑瞰. 基于电子追迹算法的微光像增强器分辨力研究[J]. *光子学报*, 2020, 49(12): 1223003.
- QIU Y F, YAN W L, HUA S D. Resolution research of low-light-level image intensifier based on electronic trajectory tracking [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12): 1223003. (in Chinese)
- [22] REN L, SHI F, GUO H, *et al.* Numerical calculation method of modulation transfer function for preproximity focusing electron-optical system [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(8): 1641.
- [23] 冯焯焯. 像管的设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 183-186.
- FENG CH T. *Design and Analysis of Image Tube* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 183-186. (in Chinese)

作者简介:



李 冬(1998—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究实习员,2020年于西安交通大学获得学士学位,2022年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事脉冲辐射场成像的研究。E-mail: lidong@nint.ac.cn