

引用格式: HU Shiyu, YANG Yang, GOU Yongsheng, et al. Research on Deterioration Mechanism of Dynamic Spatial Resolution of Picosecond Gated Image Intensifier[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(8):0823002

胡诗雨, 杨阳, 缙永胜, 等. 皮秒门控像增强器动态空间分辨率劣化机理研究[J]. 光子学报, 2026, 55(8):0823002

皮秒门控像增强器动态空间分辨率劣化机理研究

胡诗雨^{1,2}, 杨阳¹, 缙永胜¹, 徐岩¹, 冯鹏辉¹, 姚佳辉¹, 冯识谕¹, 王博¹,
刘百玉¹, 田进寿¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 超快光学与技术全国重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 像增强器在皮秒门控工作模式下空间分辨率的显著劣化, 严重制约其在超快诊断中的成像效果。针对这一问题, 研究了阴极有效电压对成像质量的影响。结合有限元电磁仿真与胞中粒子求解法, 建立了门控脉冲传输模型及像管内部电子渡越模型。仿真表明, 阴极面电阻引起的欧姆损耗与阻抗失配导致的反射畸变, 会使第一近贴区阴极有效电压发生动态退化, 进而放大光电子横向弥散, 造成空间分辨能力劣化。利用飞秒激光搭建动态时空分辨测试平台进行实验验证, 测得像增强器静态空间分辨率为 32 lp/mm (对比传递函数为 11.72%); 而在曝光时间 315 ps 的动态工作状态下, 动态空间分辨率下降至 16 lp/mm (对比传递函数为 11.28%)。随着第一近贴区有效电压从 -25 V 降低至 -5 V, 动态空间分辨率进一步下降甚至无法分辨, 曝光时间相应从 315 ps 缩短至 263 ps, 实验结果与仿真规律高度一致。本文阐明了皮秒门控下像增强器空间分辨劣化的核心物理机制, 为优化其动态工作性能提供了关键理论支撑。

关键词: 像增强器; 空间分辨率; 阴极有效电压; 电子渡越; 超快诊断

中图分类号: O462

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20265508.0823002

0 引言

在惯性约束聚变、Z 箍缩及高能等离子体物理诊断等极端物理实验中, 精确捕捉皮秒至纳秒量级的超快瞬态过程是揭示物质演化规律的核心手段^[1]。基于近贴聚焦像增强器的选通型分幅相机, 凭借其大探测面积、宽光谱响应及结构紧凑等优势, 已成为此类实验中捕捉高能粒子、伽马射线或可见光空间分布的关键探测工具^[2]。在超快诊断场景下, 时间分辨率与空间分辨率是衡量成像系统性能的重要指标, 其优劣程度直接决定了物理实验图像的定量化水平与诊断精度^[3]。因此, 针对皮秒量级选通条件下这两项指标的协同优化, 一直是超快成像技术领域的研究热点。

像增强器作为超快探测的关键器件, 在生命科学^[4]、材料科学^[5]、时间分辨光谱学^[6]、时间飞行成像^[7]等领域应用广泛。关于其空间成像质量的研究由来已久^[8-12], 前人通过大量实验发现, 像增强器在动态选通下的空间分辨率相较于其直流静态模式存在显著退化。BEHNKE 等实验表明, 当选通脉冲宽度缩短至 1 ns 时, 调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 为 50% 时对应的空间分辨率从静态 10 lp/mm 骤降至 5 lp/mm^[13]; 朱宏权等针对二代像管的研究也证实, 当门控脉宽低于 20 ns 时, 空间分辨率随脉宽减小并呈

基金项目: 国家自然科学基金(12505246), 国家重点研发计划(2024YFF0726202), 中国科学院西部之光基金(XAB2022YN12)

第一作者: 胡诗雨, 2899295236@qq.com

通讯作者: 杨阳, yangyang@opt.cn

收稿日期: 2026-04-07; 录用日期: 2026-06-05

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

现非线性迅速下降^[14]。在理论建模方面,THOMAS等利用Papp电子光学模型^[15]定量描述了近贴间隙电子弥散圆半径 r 与极间加速电压 V 的关系^[16];盛亮等进一步提出了时空传递函数理论,通过时间衰减因子与空间衰减因子的耦合模型分析了动态性能下降机理^[3]。

尽管前人已开展了大量研究,但现有的研究成果在解决皮秒级超快成像问题时仍存在局限。多数经典研究侧重于纳秒级(>10 ns)选通特性的探讨,对于物理诊断亟需的百皮秒甚至亚百皮秒量级门控过程,其动态电压演变对分辨率的影响机理尚缺乏系统的刻画^[17]。而且,现有的解析模型多为一阶近似,往往基于理想方波或线性脉冲假设,难以准确反映实际像管内部由于阻抗不匹配及阴极面电阻引起的非线性脉冲畸变。此外,白廷柱等开展的计算机仿真研究多基于时空可分离的线性滤波假设^[18],而武梅娟等的蒙特卡罗模拟则主要针对微通道板(Microchannel Plate, MCP)孔径、间距等静态结构参数的优化^[19],均缺乏针对皮秒选通条件下阴极面电场有效性的物理机制分析,且多数研究由于缺乏超快实验条件的支撑而难以验证复杂结构下的动态响应。因此,针对皮秒曝光条件,建立高度贴合实际像管结构的物理模型并进行数值分析,具有紧迫的研究必要性。

此前,本团队已围绕像增强器光学曝光时间的标定测试方法与优化展开了研究,通过对比激光脉冲步进法与光纤阵列法,确立了亚纳秒选通时间的表征标准,并量化了“虹膜效应”导致的测量误差^[20];随后提出“光阴极子区域时延标定法”,通过将阴极区域离散化标定,解决了传统的全局曝光时间定义无法反映阴极各位置时间差异的问题根据^[21]。但在研究过程中,我们发现像增强器另一核心指标空间分辨率会在皮秒门控的工作状态下大幅衰减,所以亟需明确其劣化机理。根据已有的研究基础,本文将通过有限元仿真方法,研究皮秒门控条件下像增强器阴极有效电压的空间变化规律。重点分析了门控脉冲在阴极面上传输时的电阻损耗及反射效应,如何导致光阴极与MCP间隙(第一近贴区)有效电场强度的动态退化。建立高度贴合实际复杂像管结构的物理模型,本文系统性地阐明了有效驱动电压的不足导致空间弥散圆半径增大、进而引起空间分辨劣化这一物理机制,为新一代高性能超快选通成像器件的优化设计提供关键的理论支撑。

1 模型与仿真结果

1.1 阴极波导微波传输模型建立与模拟结果

在仿真软件CST中构建的超快门控电脉冲在像增强器阴极波导微波传输模型如图1所示,其主要由门控像增强器和匹配PCB电路板构成。其中,门控像增强器的结构严格参照有效探测面直径18 mm的近聚焦门控像增强器结构进行建模,包括阴极窗口、阴极导电基底、钢封金属圈、陶瓷介电圈、MCP输入面电极。阴极导电基底覆盖像增强器整个阴极有效探测面,为直径18 mm的圆形。阴极和MCP输入面近贴距离为0.2 mm。阴极和MCP之间的空间为真空,其介电常数为真空介电常数 $\epsilon=1$ 。将阴极导电基底作为导电层、MCP输入面作为接地层、间距0.2 mm的真空层作为介电层,构成了门控脉冲在像增强器阴极上的传输波导。由于门控脉冲产生电路是一个特征阻抗 $50\ \Omega$ 的脉冲源,而像增强器阴极上的传输波导其特征阻抗经测试约为 $24\ \Omega$,为了避免由于门控脉冲传输通道中特征阻抗突变造成的门控脉冲畸变和反射^[17],采用匹配PCB电路板,在像增强器左侧将门控脉冲传输通路的特征阻抗从输入端口的 $50\ \Omega$ 渐变匹配至 $24\ \Omega$;在像增强器右侧将从像增强器输出的门控脉冲传输通路的特征阻抗从 $24\ \Omega$ 渐变匹配至输出端口的 $50\ \Omega$ 。这样输出端口可以通过 $50\ \Omega$ 的同轴电缆连接示波器对像增强器输出的门控脉冲进行测量监测。经过初期对模型的调整与多次仿真,能够得到初步结果的模型所使用的组件及其对应的材料和电学参数如表1所示。

从模型左端输入端口馈入的信号波形如图2(a)所示,其为幅值 -300 V、半高宽 200 ps的负高斯脉冲。将阴极导电基底的面电阻数值范围设置为 $5\ \Omega/\text{sq}\sim 80\ \Omega/\text{sq}$,便于进行 $15\ \Omega/\text{sq}$ 为步进的参数扫描。并将匹配PCB电路板右端设置 $50\ \Omega$ 负载以模拟将像增强器输出的门控脉冲引入示波器进行测量的情况。整体模型采用自由空间边界,以减少反射对模拟结果产生的干扰。为了定量地研究门控脉冲在阴极面上的变化情况,在阴极中心处设置了电压监视器,电压随时间的变化关系如图2(b)所示,阴极中心的电压范围明显小于输入脉冲电压。可以看到当门控脉冲经过渐变微带传输至阴极上时,在其脉冲主峰后存在一系列幅值低于主峰的次峰。这些次峰产生的原因可能是由于模型参数设置导致像增强器阴极输入输出端特征阻抗未能

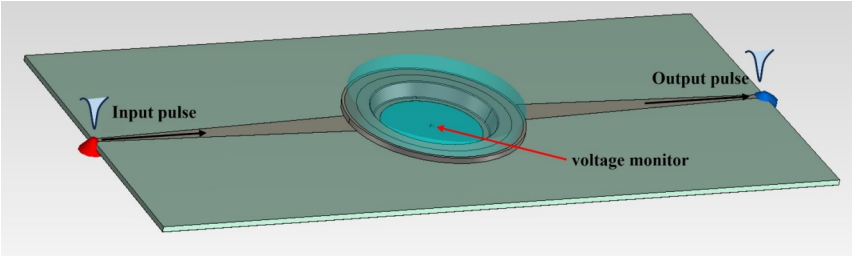


图1 阴极波导微波传输模型
Fig. 1 Photocathode waveguide microwave transmission model

表1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

Components	Materials	Epsilon or sheet resistance
Glass window	JJS1 fuse silica	$\epsilon = 3.8$
Photocathode underlayer	Ohmic sheet	$R_s = 11.74$
Metal ring	PEC	—
Ceramic ring	Alumina(96%)	$\epsilon = 9.4$
MCP front face	PEC	—
Dielectric layer (PCB)	FR-4	$\epsilon = 4.3$
Microstrip line (PCB)	PEC	—
GND (PCB)	PEC	—

实现理想匹配存在阻抗突变,导致门控脉冲在这些阻抗突变界面的反射未得到完全抑制引起的。根据图3可知,传输至阴极中心处的脉冲半高宽会随面电阻增大而发生展宽且电压幅度减小。这些结果均能说明电脉冲在传播过程中存在随时间变化的强度衰减情况,且同一时刻在阴极面上的电压强度分布是不均匀的。而此电脉冲也正是施加于阴极来控制阴极-MCP输入面间隙中电子运动状态的电压,此电压的有效值将会影响入射进MCP电子的运动速度、弥散程度等。下一部分根据电子光学理论对像管内部的电子渡越过程进行模拟。

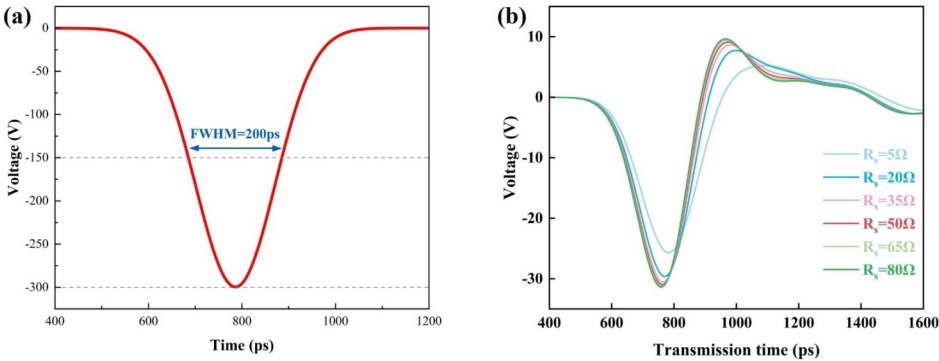


图2 脉冲波形图。(a)理想高斯脉冲;(b)仿真中阴极中心电压随时间的变化关系
Fig. 2 Pulse waveform diagram. (a) Ideal Gaussian pulse; (b) Photocathode center voltage variation versus time in simulation

1.2 像管内部电子渡越模型

空间分辨率能表征像增强器空间分辨或成像最小细节的能力,是研究像增强器性能的重要技术指标之一。双平面近贴系统是以光阴极为物面、以荧光屏为像面的电子光学系统。结合电脉冲在阴极上的传输幅值衰减,在此将借助 CST 粒子工作室对像增强器阴极-MCP 输入面间隙的有效电压对静态空间分辨率的影响进行研究。利用 CST 内置的二次电子发射 Furman 模型,可以对二次电子发射过程进行精准全面的仿真。考虑到仿真稳定性,采用胞中粒子(Particle in Cell,PIC)求解器来辅助空间分辨率的研究,它能考虑电子的空间电荷效应,使电子倍增过程的准确性提高。

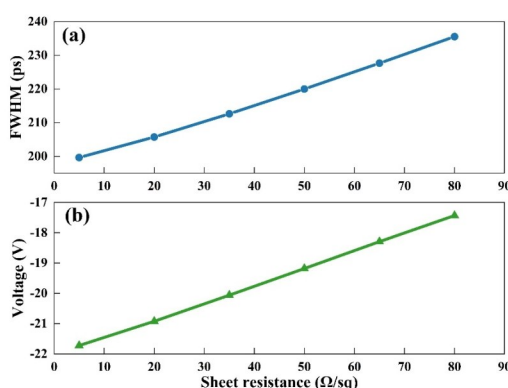


图3 阴极中心处门控脉冲随面电阻的变化趋势。(a)半高宽;(b)电压值

Fig. 3 Variation trend of the gating pulse at the photocathode center versus sheet resistance. (a)FWHM; (b) Voltage

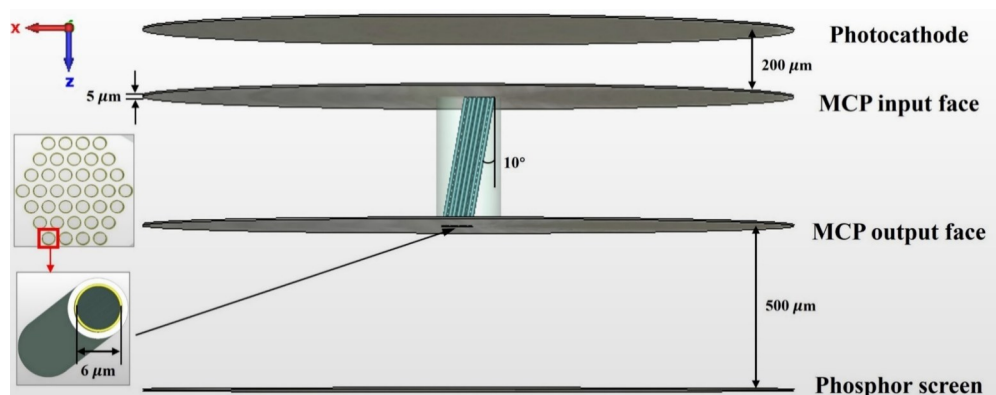


图4 像管内部电子渡越模型

Fig. 4 Image tube internal electron transition model

图4是像管内部电子渡越仿真模型,电子源发射模型采用蒙特卡洛(Monte Carlo, M-C)抽样法对光电子的初始状态进行抽样,将阴极光电子的初始能量、仰角与方位角均纳入考虑,使得模型更接近实际。已知实际中像增强器的MCP有数百万个通道,但如果模拟中也使用同数量的通道,会导致仿真时间极长,对算力要求也极高。同时,已有研究验证了基于点扩散函数得到MTF来评估空间分辨率的合理性^[19],且本文在前期准备工作中通过模拟电子从阴极出射后到达MCP输入面上的弥散斑大小来计算通道个数,发现排列个数从上至下分别为4、5、6、7、6、5、4的通道阵列大小能够覆盖这一弥散斑,故本文使用共37个通道进行仿真,从而研究相关现象与规律。本文使用的费曼(Furman)模型将二次电子发射过程中产生的真二次电子、反射电子和散射电子这三种类型的发射电子都包含在内。像增强器的前近贴距离、后近贴距离分别为200 μm、500 μm,偏置角为10°,MCP输入面与输出面的厚度均为5 μm,MCP一个通道的内径为6 μm,通道垂直长度为400 μm,两个通道中心相距7 μm。像增强器后近贴聚焦电压(荧光屏电压)为5000 V、MCP输入面电压为0 V、MCP输出面电压为800 V。保持以上各参数不变,通过改变前近贴聚焦电压的大小来探究光电阴极有效电压对像增强器空间分辨率的影响。

以光电阴极-MCP间隙的有效电压取-50 V为例,图5(a)为像增强器的电子渡越完整过程,时间小于550 ps。但在阴极与MCP输入面间隙,电子从阴极到达MCP输入面的时间不到100 ps。由于像增强器的门控方式是在阴极和MCP输入面之间加载门控脉冲,因此电子在阴极到MCP之间的渡越时间和弥散会影响门控时间,且这一时间缩短,电子渡越时的弥散程度会减小,能在一定程度上减小像增强器中的整体渡越时间。根据MCP输出电子轰击荧光屏上的位置信息,可以统计荧光屏上的电子分布从而来预测像增强器的空间分辨率。仿真在荧光屏处建立了 xy 面的正交坐标系,图5(b)为荧光屏上的电子分布情况。由于MCP通道存在沿 x 方向倾斜的偏置角,且MCP通道入口的中心处并未设置在 xy 面的中心,故MCP输出面中心位置的 x 值存在相对于输入面并不完全在中心处的情况,再加上电子渡越弥散的作用,坐标系上的电子

分布并未居中。

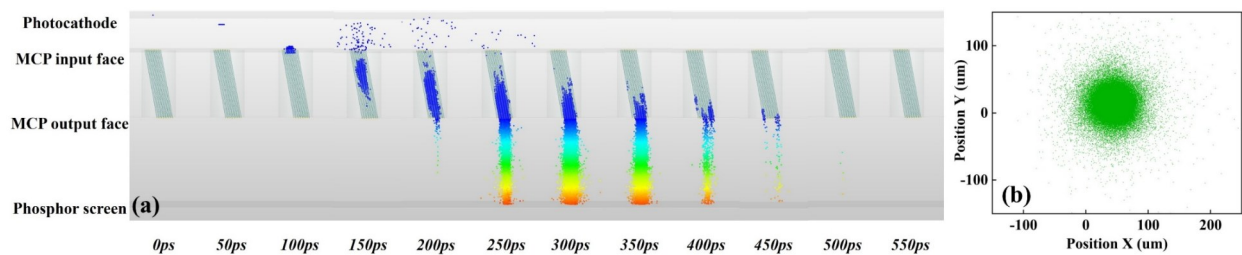


图5 有效电压-50 V时的仿真结果。(a)像管内电子渡越过程;(b)荧光屏上的电子分布

Fig. 5 The simulation results when the effective voltage is -50 V. (a) Image tube internal electron transition process; (b) Electron distribution on phosphor screen

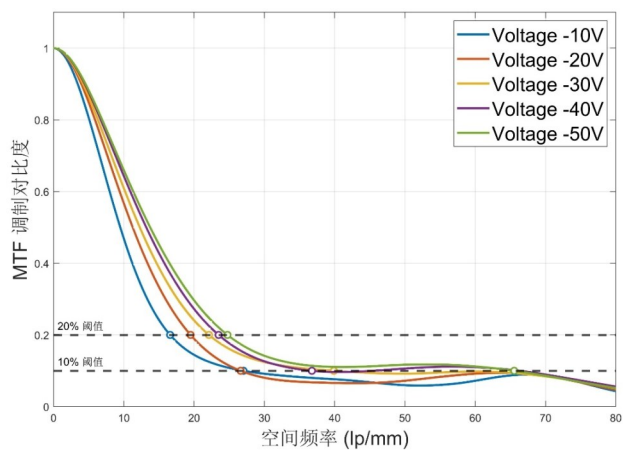


图6 不同阴极传输有效电压条件下的MTF曲线

Fig. 6 MTF curve with different photocathode transmission active voltages

图6是像增强器MTF随光电阴极至MCP输入面间有效电压变化的模拟曲线。根据该图以及表2的量化数据可以发现,有效电压对空间分辨特性的调制作用并非简单的线性递增,而是具有分段特征。在对比度较高范围($MTF > 20\%$)内,同一对比度下,分辨率与有效电压呈现出严格的单调递增关系。从微观电子动力学角度来看,这是因为阴极与MCP输入端间有效电压的增大显著增强了轴向加速电场。强电场有效抑制了光电子因初始发射动能差异、发射仰角弥散以及空间电荷效应而产生的横向扩散,缩短了渡越时间。因此,电子到达MCP输入面时形成的弥散斑直径减小,器件整体成像对比度得到显著提升。但当进入低对比度范围($MTF < 12\%$),各电压下的MTF曲线在尾端开始发生交叉与重叠。结合表2中 $MTF = 10\%$ 极限分辨阈值处,空间分辨率随电压变化呈现出非线性的振荡起伏,减小后增加,甚至在有效电压-50 V时快速升至65.54 lp/mm。产生此现象的可能原因如下:随着空间频率的升高,其空间尺寸逐渐减小至与MCP单个微通道的直径及物理间距相比拟。在此条件下,MCP孔径的离散阵列结构会对电子束弥散斑产生非线性调制效应。这种由微观几何结构引起的噪声,直接导致了低对比度(高空间频率)区域模拟数据的振荡与交叉。类似的高频波动现象在武梅娟等人基于蒙特卡罗方法计算的分辨率模拟结果中也有体现^[19]。由此推测,MTF曲线尾端的波动主要源于理论计算中对MCP离散结构进行数值采样时不可避免引入的模型局限性,而非实际像增强器测试中观察到的空间分辨能力的提升。

表2 不同有效电压对应的空间分辨率

Table 2 The spatial resolution corresponding to different effective voltages

Effective voltage /V	-10	-20	-30	-40	-50
Spatial resolution /(lp·mm ⁻¹ @MTF=10%)	27.02	26.63	38.89	36.76	65.54
Spatial resolution /(lp·mm ⁻¹ @MTF=20%)	16.59	19.50	22.12	23.49	24.79

2 门控像增强器动态空间分辨实验测试与验证

2.1 动态空间分辨和曝光时间测试系统搭建与实验

在空间分辨率测试实验中,一般采用如图7(a)所示的分辨率板作为成像靶标,通过荧光屏后端CMOS相机拍摄分辨率板上的线对数得到像增强器的空间分辨率。获得准确空间分辨率的前提是需要分辨率板在经过成像系统后的成像大小为1:1成像。本文采用了基于高斯光学理论的双镜头对称中继投影系统。该系统是由两个焦距同为 f 的镜头共轴相对放置构成,当物体位于第一镜头前 $2f$ 处,在镜头后 $2f$ 处生成等大倒立的实像;该像可作为第二镜头的物,由于其恰好位于第二镜头前 $2f$ 处,经过第二镜头再次成像于,最终在其后 $2f$ 处生成了相对于原物体正立等大的实像。该系统的总放大率为1,两镜头主平面间距近似为 $4f$ 。这种对称结构能够自动补偿慧差和畸变等部分像差,从而获得平坦的像场和良好的成像质量。在核心器件选型方面,为了渐晕地完全覆盖门控像增强器18 mm的有效探测区域,本文选用两枚同型号工业级镜头(焦距50 mm,口径55 mm,C口标准)进行对接。该镜头在可见光至近红外波段具有高透过率,且畸变小于0.1%,满足高精度测试需求;另外还选用了LBTEK(麓邦)RTR1BA-N负分辨率测试靶作为分辨率板。靶标直径为25.4 mm,内部包含USAF 1951标准的6组(+2至+7)线对图案。在系统装配中,将分辨率板与像增强器阴极面分别精准定位与第一、第二镜头的后截距17.5 mm处。将两只镜头的光圈预设设为F/4~F/5.6,焦距调节至无穷远。但由于实际镜头主平面会存在偏移,需要在实验过程中进一步微调镜头的机械间距、光圈与焦距,以确保分辨率板图案能在阴极面上呈现最清晰的投影成像。实验所使用的1:1投影光学系统如图7(b)所示。

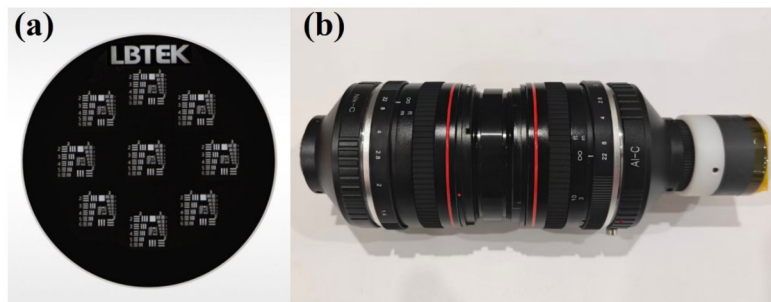


图7 成像组件。(a)RTR1BA-N分辨率负测试靶;(b)1:1投影光学系统

Fig. 7 Imaging components. (a) RTR1BA-N resolution negative test target; (b) 1:1 projection optical system

表3 USAF 1951分辨率测试靶线对表(lp/mm)

Table 3 USAF 1951 resolution test target line pairs table (line pairs per mm)

Element	Group number							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00	32.00	64.00	128.00
2	1.12	2.24	4.49	8.98	18.00	36.00	71.80	144.00
3	1.26	2.52	5.04	10.10	20.20	40.30	80.60	161.00
4	1.41	2.83	5.66	11.30	22.60	45.30	90.50	181.00
5	1.59	3.17	6.35	12.70	25.40	50.80	102.00	203.00
6	1.78	3.56	7.13	14.30	28.50	57.00	114.00	228.00

在确定好1:1光学投影系统后,搭建的实验平台如图8所示。实验采用了一台快速激光设备进行精确测量,其波长为515 nm,重复频率为1 kHz。单个激光脉冲的持续时间为220 fs。该激光器由脉冲发生器I触发以输出激光脉冲。光束经过扩束透镜进行扩束后,由分束器分为两束光。一束光进入光电二极管,另一束光透过漫射毛玻璃板,将USAF 1951分辨率板照亮后使其经过放大倍率为1的透镜系统,均匀照射在像增强器的阴极上,从而实现整个阴极的均匀照明。来自光电二极管的信号用于触发另一个脉冲发生器II,由脉冲发生器II产生的电脉冲触发门控脉冲发生器,进而打开像增强器的快门。另外,还需要高压电源

为像增强器的MCP和荧光屏提供静态高压以及阴极正偏压。为了减小触发抖动并获得强度尚可的图像,采用了一种通过单次触发产生两个具有稳定时间间隔激光脉冲的方法^[22]。这两个激光脉冲之间的时间间隔取决于所选的激光重复频率。第一个激光脉冲用作触发源,触发门控电路以采集来自第二个激光脉冲的时序图像,时序之间的延迟由脉冲发生器II进行调节。触发时序图如图9所示^[22]。

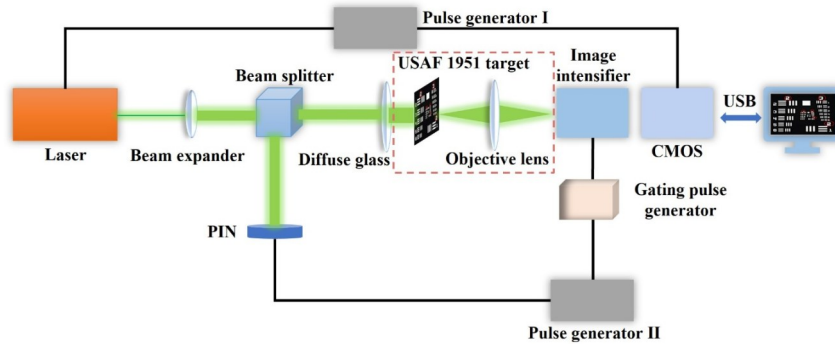


图8 空间分辨率测量原理图
Fig. 8 Spatial resolution measuring schematic diagram

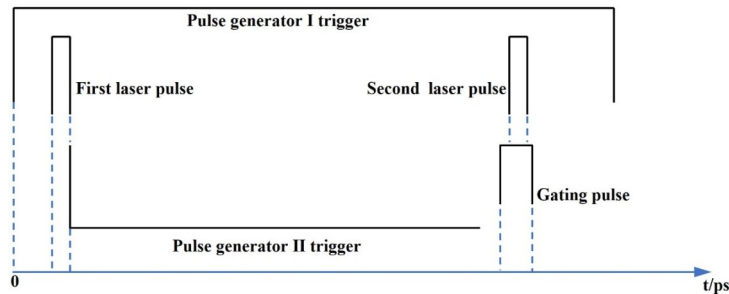


图9 触发时序
Fig. 9 Trigger timing diagram

在测试中,本文需要得到在已知某一阴极有效电压下像增强器动态空间分辨率的情况下其对应的光学曝光时间,实测中去掉空间分辨率测试平台中的分辨率板与放大倍率为1的透镜系统(图8虚线框部分)后即为光学曝光时间测试平台。本文采用被业界广泛认可的“激光脉冲步进法”对门控像增强器的最短曝光时间进行测试^[20]。该方法的基本原理是在激光同步照射像增强器时,以超快激光脉冲为标准,逐渐延迟门控电脉冲,从而获取不同延迟时间的曝光图像序列。在同组曝光图像中,针对不同时刻获取的图像,采用去暗背景与像素计数求和的方法即可获得整体归一化强度随时间的变化曲线以及曝光时间^[21]。此测试方法下曝光时间的误差主要来自电子学系统的触发晃动,且由于是使用激光作为触发,激光器本身的抖动得以消除,此电子学系统触发抖动的均方根为35 ps。

2.2 实验结果分析与讨论

将阴极导电基底面电阻为 $11.74 \Omega/\text{sq}$ 的像增强器固定在投影光学系统第二个镜头的后截距17.5 mm附近。调节高压电源,使MCP输出面的电压为800 V,荧光屏的电压为4800 V,并通过给像增强器加载静态工作偏压,使其在常通的状态下工作。在像增强器正常工作后,采用安装有显微静态的CMOS相机观察像增强器荧光屏输出图像,同时微调镜头的焦距,使像增强器荧光屏输出的分辨率板上的图案最清晰时,即可获得静态下像增强器的空间分辨率测试图像如图10所示,使用软件Image J对图像的对比传递函数(Contrast Transfer Function, CTF)进行分析,得到最大空间分辨率对应5-1组,即静态空间分辨率为 $32 \text{ lp/mm}@CTF=11.72\%$,此时虽仍能辨认出条纹对数,但对比度已趋于临界。

在动态空间分辨率测试中,为了改变阴极和MCP输入面之间的有效电压,通过在阴极和MCP输入面之间施加正偏压的方法来实现。实验时,先通过加正偏压至动态图像消失(此时正偏压正好抵消了门控脉冲有效幅值),即得到门控脉冲有效幅值是-35 V左右。而正偏压越大,阴极和MCP输入面之间的有效电压

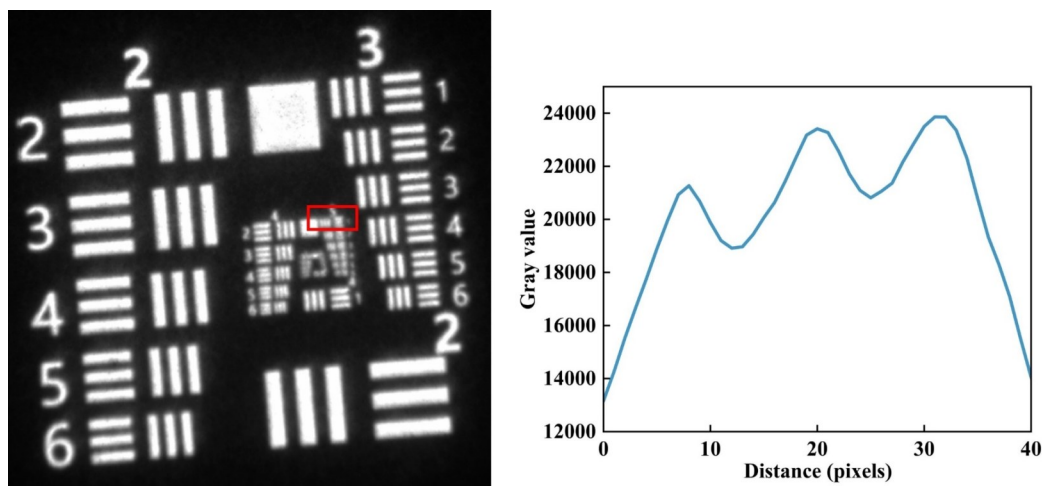


图10 静态下像增强器的空间分辨率测试图像(32 lp/mm@CTF=11.72%)
Fig. 10 Spatial resolution static test image of image intensifier (32 lp/mm@CTF=11.72%)

就越小。但因为光电阴极有效电压幅值受限于驱动脉冲的幅值和阴极导电基底的导电性能,实际阴极-MCP输入面能测到的最大幅值只有-25 V。所以在通过调节正偏压大小改变阴极有效电压时,可将有效幅值分别调至-25 V(正偏压10 V),-15 V(正偏压20 V),-5 V(正偏压30 V)来测试门控像增强器的动态空间分辨能力。

图11是USAF 1951分辨率测试靶在不同阴极有效电压下的动态成像结果。由图11可知,随着阴极有效电压从-25 V减小至-5 V,成像质量呈现出明显的规律性劣化。在-25 V有效电压下(图11(a)),图像整体清晰度与对比度最高,最大分辨率为16 lp/mm@CTF=11.28%;当电压减小至-15 V时(图11(b)),高频线对越来越模糊且边缘晕散明显;而当电压进一步降至-5 V时(图11(c)),图像质量严重下降,第4、5组线对由于严重的弥散已完全融合无法分辨,甚至低频的第2组线对也出现了边缘扩散,整体视场呈现强烈的模糊感。图12(a)给出了不同有效电压下CTF随空间频率的变化曲线。定量分析表明,随着有效电压幅度的减小,CTF曲线整体下移,尤其是有效电压降为-5 V时,CTF急剧减小且难以准确计算。以图11中分辨率板第3-6组(即空间频率为14.30 lp/mm)为例,计算得到有效电压为-25 V、-15 V、-5 V时对应的CTF分别为24.55%、19.71%和13.81%。这一实验结果的下降趋势验证了前文的仿真预测:在超快动态选通模式下,阴极与MCP间隙(第一近贴区)的有效电压直接决定了光电子的轨迹约束能力。根据Papp电子光学模型,较小的有效电压会导致光电子横向弥散半径增大,从而导致图像对比度和空间分辨率的急剧衰减。图12(b)进一步展示了不同有效电压对应的光学选通廓线(归一化强度曲线)及曝光时间(FWHM),当阴极有效电压幅值为-5 V时,光强度分布曲线最陡峭,其高斯拟合的半高宽最窄,为263 ps,曲线到达峰值的时间最快,中心位置为287 ps。随着有效电压幅度的增大,曲线开始变宽。在-25 V时,曲线明显变宽,FWHM达到315 ps,中心位置为367 ps。这说明在测试像管不变的情况下,高幅度的阴极有效电压会加强对像管内部电子渡越空间弥散的约束能力,从而改善动态空间分辨能力。但由于偏压补偿和阴极面上电场的非瞬态建立,导致门控脉冲在阴极波导上的传输过程更加复杂,此时脉冲展宽效应的凸显,直接影响像管的时间特性,即曝光时间变长。

结合微波原理,可将光电阴极面视为一个具有有限电导率的分布式阻容(RC)网络。当皮秒级超快门控脉冲从像增强器边缘的环形电极向阴极中心馈入时,由于光阴极材料本身固有的薄膜面电阻,高频脉冲在沿径向传输的过程中会经历显著的欧姆损耗^[23-24]。这种电阻损耗不仅会导致脉冲幅度的衰减,还会引起脉冲展宽(RC延迟效应),使得阴极面上不同位置处的实际加载电压产生时间梯次和明显的幅度落差。与此同时,由于光电阴极的圆形对称几何特征以及高频传输路径的阻抗不完全匹配,向中心汇聚的脉冲在到达阴极中心或遇到边界阻抗突变时,会不可避免地发生反射效应。反射波与后续の入射波在阴极面上发生复杂的干涉与叠加,这进一步加剧了瞬时电压分布的不均匀性和脉冲波形的非线性畸变。上述电阻损耗与反射的综合作用,使得光电阴极-MCP间隙的第一近贴区域内的有效电场强度发生了严重的动态退化。第一

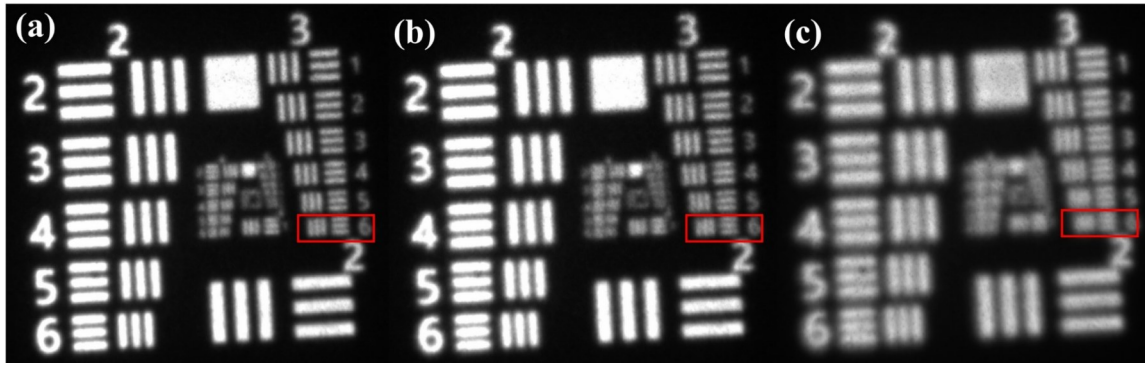


图 11 不同有效电压下动态空间分辨率图像。(a)-25 V;(b)-15 V;(c)-5 V

Fig. 11 Dynamic spatial resolution images of different positive bias pressures. (a) -25 V; (b) -15 V; (c) -5 V

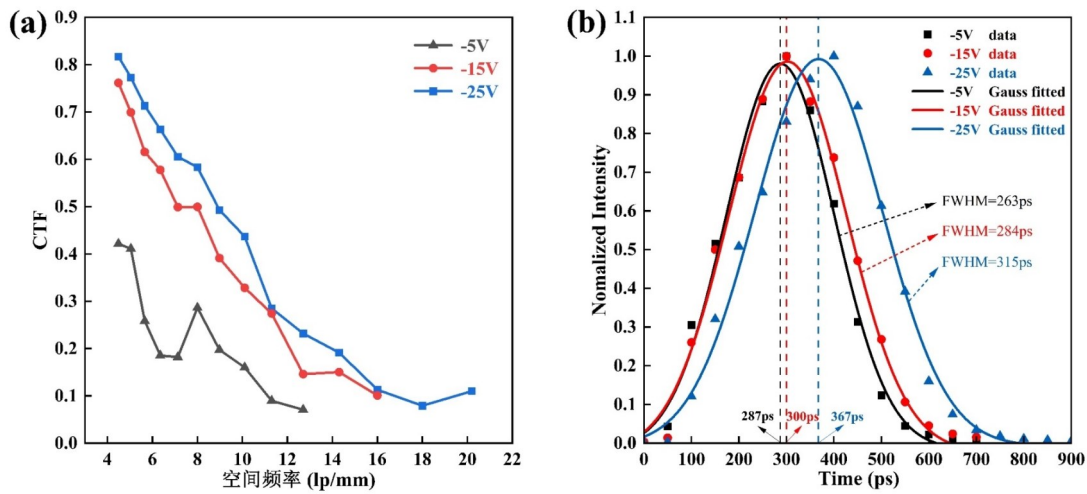


图 12 实验数据可视化结果。(a)CTF 对比度变化曲线;(b)不同有效电压下的光学曝光时间

Fig. 12 Visualization of test data. (a) CTF contrast variation curve; (b) optical exposure time at different effective voltages

近贴区域的加速电场强度严格依赖于该间隙两端的瞬时电压差。随着门控脉冲向中心推进,大幅度的电压衰减和反射畸变使得中心区域的有效建立电压远低于输入边缘区域,导致该区域的实际加速电场强度大幅低于理论预期值。这种有效电场强度的动态退化对像增强器的成像性能具有较大的影响。在第一近贴区域内,加速电场的减弱会显著增加光电子在真空间隙中的渡越时间。渡越时间的延长,将导致光电子因初始动能而产生的横向弥散被放大。这种由于脉冲传输受限引发的动态电场退化,正是导致像增强器在超快选通模式下空间分辨率急剧劣化的关键因素。因此,光电阴极的导电特性不仅决定了门控脉冲的传输保真度,更是限制了像增强器动态空间分辨率。所以需要提升光电阴极的导电性,或者门控脉冲的驱动能力(如幅值和半宽),在保证良好时间分辨能力的情况下提高空间分辨率。

3 结论

基于微波原理与电子光学理论建立了符合实际像增强器结构的电脉冲波导传输模型以及像管内部电子渡越模型并搭建实验平台进行测试。有效电压对空间分辨率影响规律的仿真与实验研究,可以进一步说明光电阴极波导结构在超快成像系统中的重要作用。本文研究也从侧面印证了在皮秒门控像增强器的研发中,仅依靠外部驱动源提升脉冲幅值是不够的,可以继续优化光电阴极的波导结构、采用先进微纳工艺降低阴极面电阻,或在现有的近贴式静电聚焦基础上引入电磁复合约束机制,采用脉冲强磁场对电子渡越过程进行约束,以最大程度提升门控脉冲的阴极面内传输效率与局部有效电压,保证像增强器在超快选通状态下依然具备优异的空间分辨能力。

参考文献

- [1] SHENG Liang, DongweiHEI. Key technologies of pulsed radiation beam imaging[J]. Chinese Science: Physical Mechanics Astronomy, 2023, 53(7): 70-83.
盛亮, 黑东炜. 脉冲射线束成像关键技术[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2023, 53(7): 70-83.
- [2] LI Dong, YANG Kaixiang, SHENG Liang, et al. Gating characteristics of GaAs photocathode image intensifier[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(17): 2505-2514.
李冬, 杨凯翔, 盛亮, 等. GaAs光阴极像增强器的选通特性[J]. 光学精密工程, 2023, 31(17): 2505-2514.
- [3] SHENG Liang, DongweiHEI, QIU Mengtong, et al. Dynamic resolution of nanosecond time-gated imaging system[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2008, (2): 274-277.
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, (2): 274-277.
- [4] GRANT M, MCGINTY J, MCGHEE E, et al. High speed optically sectioned fluorescence lifetime imaging permits study of live cell signaling events[J]. Optics Express, 2007, 15(24): 15656-15673.
- [5] BERCEGOL A, ORY D, SUCHET D. et al. Quantitative optical assessment of photonic and electronic properties in halide perovskite[J]. Nature Communication, 2019, 10(1): 1586.
- [6] KIEFT E, GROOTHUIS C, MULLEN J, et al. Subnanosecond Thomson scattering setup for space and time resolved measurements with reduced background signal[J]. Review of Scientific Instruments, 2005; 76 (9): 093503.
- [7] SEGAWA M, OOI M, KAI T, et al. Development of a pulsed neutron three-dimensional imaging system using a highly sensitive image-intensifier at J-PARC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 769: 97-104.
- [8] ZHOU Liwei, GONG Hui, ZHANG Zhiqian, et al. Paraxial electron optics and its spatial-temporal aberrations for a bi-electrode concentric spherical system with electrostatic focusing[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5459-5466.
周立伟, 公慧, 张智诠, 等. 两电极静电同心球系统的近轴电子光学及其空间-时间像差[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5459-5466.
- [9] GONG Hui, ZHOU Liwei, NI Guoqiang, et al. Study on the Root Mean Square (RMS) radius of spatial-temporal aberrations in imaging electron-optical systems[J]. Optical Technique, 2011, 37(4): 507-512.
公慧, 周立伟, 倪国强, 等. 成像电子光学系统空间和时间像差的均方根半径(RMS)研究[J]. 光学技术, 2011, 37(4): 507-512.
- [10] ZHOU Liwei, GONG Hui. On theory and verification for paraxial lateral aberrations of imaging electrostatic electron optics based on asymptotic solutions[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 619-625.
周立伟, 公慧. 基于渐近解的成像电子光学近轴横向像差理论及其验证[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 619-625.
- [11] CHENG Yaojin, SHI Feng, GUO Hui, et al. Effect of MCP parameters on resolution of image intensifier[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(2): 292-296.
程耀进, 石峰, 郭晖, 等. MCP参数对微光像增强器分辨力影响研究[J]. 应用光学, 2010, 31(2): 292-296.
- [12] LI Xiaofeng, CHANG Le, ZENG Jinneng, et al. Study on resolution improvement of microchannel plate[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 120-126.
李晓峰, 常乐, 曾进能, 等. 微通道板分辨力提高研究[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 120-126.
- [13] BEHNKE A, SAMMONS T. Resolution characteristics of an 18-mm proximity-focused MCPI tube under narrow optical gate conditions[C]. SPIE, 1993, 1801: 20-25.
- [14] ZHU Hongquan, WANG Kuilu, XIANG Shiming, et al. Dynamic modulation transfer function measurement of image intensifiers using a narrow slit[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(2): 023708.
朱宏权, 王奎禄, 向世明, 等. 狭缝法测量像增强器动态调制传递函数[J]. 科学仪器评论, 2008, 79(2): 023708.
- [15] PAPP G. Comparison of the Merits of Proximity and Magnetic Focusing in Image Tubes[J]. IRE Transactions on Nuclear Science, 1962, 9(4): 55-60.
- [16] THOMAS M, ZAGARINO P, YATES G. Dynamic modulation transfer function measurements in gated microchannel-plate image intensifiers[C]. SPIE, 1993, 1757: 32-39.
- [17] LITTLE B. Characterization of a picosecond gated optical intensifier[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10): 10E117.
- [18] BAI Tingzhu, ZHOU Liwei. Computer simulation and emulation of the dynamic imaging processes of an image tube[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003(4): 481-483+491.
白廷柱, 周立伟. 像管动态成像过程的计算机模拟仿真[J]. 北京理工大学学报, 2003(04): 481-483+491.
- [19] WU Meijuan, REN Ling, CHANG Benkang, et al. Simulation of image intensifier resolution in Monte Carlo method[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(9): 798-801.
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.
- [20] YANG Yang, GOU Yongsheng, FENG Penghui, et al. Comparative analysis of optical gating time characterization methods for ultrafast gated image intensifiers with sub-nanosecond temporal resolution[J]. Nuclear Instruments and Methods in

- Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2025, 1070: 170023.
- [21] YANG Yang, GOU Yongsheng, FENG Penghui, et al. Photocathode subdivision calibration for accurate optical exposure time measurement in ultrafast gated image intensifiers[J]. Optics Express, 2025, 33(20): 42056 – 42069.
- [22] ZHANG Mei, PENG Bodong, GUO Quan, et al. Optical gating characteristic time of measurement with 20 picoseconds resolution for an ultrafast image intensifier[J]. Journal of Instrumentation, 2024, 19(11): T11007.
- [23] YANG Yang, GOU Yongsheng, FENG Penghui, et al. Ultrafast optical gated image intensifier with a temporal resolution of 230 picosecond using uniform underlayer[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1056: 168621.
- [24] HU Shiyu, YANG Yang, GOU Yongsheng, et al. Investigation of the effects of photocathode conductivity on gating pulse propagation and the minimum exposure time in gated image intensifiers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2026, 1087: 171464.

Research on Deterioration Mechanism of Dynamic Spatial Resolution of Picosecond Gated Image Intensifier

HU Shiyu^{1,2}, YANG Yang¹, GOU Yongsheng¹, XU Yan¹, FENG Penghui¹, YAO Jiahui¹,
FENG Zhiyu¹, WANG Bo¹, LIU Baiyu¹, TIAN Jinshou¹

(1 State Key Laboratory of Ultrafast Optical Science and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

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

Abstract: Precisely capturing ultrafast transient processes is crucial in extreme physics experiments such as inertial confinement fusion and high-energy plasma diagnostics. Although temporal resolutions is the key performance metrics for proximity-focused image intensifiers, the dynamic spatial resolution under picosecond gating conditions suffers significant degradation. Current theoretical models often rely on first-order approximations, lacking accurate multidimensional descriptions of the nonlinear pulse distortions caused by impedance mismatch and photocathode sheet resistance. Therefore, this paper investigates the spatial variation of the effective voltage on the photocathode under picosecond gating and reveals its physical impact mechanism on dynamic spatial resolution. By establishing a physical model that can reflect the actual complex tube structure, this study clarifies how an insufficient effective driving voltage increases the spatial dispersion of electrons, providing critical theoretical support for optimizing ultrafast imaging devices. A comprehensive methodology organically combining 3D electromagnetic simulation, particle dynamics calculations, and high-precision optical experiments was employed. A microwave transmission model of the photocathode waveguide was built in CST software to simulate the radial propagation of a 200 ps FWHM negative Gaussian pulse, quantifying the severe temporal and spatial voltage attenuation induced by ohmic loss. Subsequently, an M-C method based PIC electron transit model utilizing the precise Furman secondary emission model was established to evaluate the mapping relationship between the effective voltage across the photocathode-MCP gap and the MTF. To verify the simulation model, an experimental platform featuring a 515 nm, 220 fs ultrafast femtosecond laser and was constructed. By actively varying the positive bias applied to the photocathode from 10 V to 30 V, the effective voltage equivalently reduced from -25 V to -5 V, the dynamic spatial resolution was experimentally and quantitatively tested using a standard USAF 1951 resolution target. Simulation results demonstrates that the limited conductivity of the photocathode sheet resistance induces severe RC delay and edge reflection effects, ultimately causing a drastic dynamic degradation of the effective electric field in the first proximity zone. Furthermore, the particle dynamics simulation reveals a piecewise modulation effect: in the high-contrast imaging range ($MTF > 20\%$), the spatial resolution strictly and monotonically decreases as the effective voltage drops, primarily due to the weakened suppression of initial transverse kinetic energy and intensified space charge effects. These experimental results are highly consistent with the simulated predictions. Under a static continuous-working state, the maximum spatial resolution of the intensifier reaches 32 lp/mm@CTF=11.72%. However, under dynamic picosecond gating at a -25 V effective voltage, the resolution noticeably degrades to 16 lp/mm@CTF=11.28% and the optical exposure time is

315 ps. As the positive bias progressively increases, effectively reducing the internal accelerating voltage, resulting in the image becoming more and more blurred and the line pairs are completely merged and indistinguishable. The intrinsic sheet resistance and the structural impedance mismatch of the photocathode are the primary impacts causing severe dynamic degradation of the effective electric field during the inward radial propagation of ultrafast gating pulses. This dynamically weakened accelerating field prolongs the electron transition time within the vacuum proximity gap and amplifies the transverse dispersion of photoelectrons representing the fundamental physical mechanism responsible for the drastic deterioration of dynamic spatial resolution in picosecond gated image intensifiers. To successfully maintain excellent spatial resolution capabilities in ultrafast gating regimes, future optimization and development of gated image intensifiers can focus heavily on improving the photocathode waveguide structure to minimize microwave transmission loss, employing advanced micro-nano manufacturing techniques to lower the intrinsic sheet resistance, or introducing electromagnetic compound focusing mechanisms. Utilizing pulsed strong magnetic fields to externally constrain the electron transit dispersion process will be absolutely critical to overcoming the current physical bottlenecks in picosecond gated high speed imaging systems.

Key words: Image intensifier; Spatial resolution; Photocathode effective voltage; Electron transition; Ultrafast diagnosis

OCIS Codes: 040.5160; 110.4100; 250.1500; 320.7080; 320.7100

CSTR: 32255.14.gzxb20265508.0823002