

CALO-IsCMOS 用微通道板性能测试与模拟仿真

胡泽训¹, 丛晓庆^{1*}, 李 涛², 林焱剑¹, 孙建宁¹, 王 健¹, 顾 燕¹, 祝佳祺¹, 程 岩¹, 张 欢¹,
常 乐³, 刘倍宏³, 何治丽³, 王志刚⁴, 权 征⁴, 曹伟伟⁵, 李 然⁵, 黎龙辉¹

- (1. 北方夜视科技(南京)研究院有限公司, 江苏 南京 211106;
2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;
3. 北方夜视技术股份有限公司, 云南 昆明 650500;
4. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
5. 中国科学院西安光学精密机械研究所 超快光科学与技术全国重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘 要: 微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 是高能宇宙辐射探测设施 (High Energy Radiation Detection facility, HERD) 中增强型科学级互补金属氧化物半导体相机 (Intensified Scientific Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, IsCMOS) 的核心电子倍增器件。通过采用原子层沉积 (Atomic Layer Deposition, ALD) 技术与扩口技术, 研制出高增益、长寿命、大开口、低光晕的 MCP, 用于满足空间探测的严苛技术要求。结合扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM)、X 射线光电子能谱仪 (X-ray Photoelectron Spectrometer, XPS)、原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM)、3D 轮廓测量仪表征 MCP 的表面形貌和微观结构; 通过增益、寿命及成像测试分析评估电子倍增及成像特性; 利用 CST Studio Suite 构建仿真模型, 验证二次电子发射系数 (Secondary Electron Emission, SEE) 以及开口面积比 (Open Area Ratio, OAR) 对 MCP 性能的影响。测试结果表明, ALD 技术在 MCP 通道内壁形成均匀致密的 Al_2O_3 薄膜, 粗糙度从 0.55 nm 降低至 0.43 nm, 变形量降低了 71%。增益从 372@800 V 提升至 743@800 V, 在总输出电荷量 30 C 时, 工作寿命相对提升 6.5 倍。扩口技术使得 MCP 的 OAR 从 67% 提升至 87%, 增益从 743@800 V 提升至 945@800 V, 光晕 10% 峰高全宽直径 (Full Width at Maximum, FWM) 从 378 μm 降低至 288 μm 。模拟结果表明, 更高的 SEE 和 OAR, 可有效提高 MCP 的增益, 抑制入射电子的散射以及光晕的产生。测试结果与模拟仿真基本吻合, 为空间探测需求用高性能 MCP 提供了重要实验与理论依据。

关键词: 微通道板; 电子倍增; 原子层沉积; 扩口; CST 仿真

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20250495

引用格式: HU Zexun, CONG Xiaoqing, LI Tao, et al. Performance testing and simulation of microchannel plates for CALO-IsCMOS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2026, 55(3): 20250495.

胡泽训, 丛晓庆, 李涛, 等. CALO-IsCMOS 用微通道板性能测试与模拟仿真[J]. 红外与激光工程, 2026, 55(3): 20250495.

0 引 言

微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 是一种基于

通道内壁二次电子发射原理的高灵敏度二维电子倍增器件, 能够实现对微弱带电粒子信号 (如电子、离子) 的级联放大。相比打拿级型电子倍增器, MCP 在

收稿日期: 2025-10-19; 修订日期: 2026-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12573105, U2541225); 江苏省自然科学基金面上项目 (BK20241716)

作者简介: 胡泽训, 男, 工程师, 硕士, 主要从事电子倍增元器件方面的研究。

通信作者: 丛晓庆, 女, 正高级工程师, 硕士, 主要从事电子倍增元器件方面的研究。

尺寸、时间响应、空间分辨率方面展现出显著优势^[1]。凭借这些优异特性, MCP 被广泛应用于像增强器、飞行时间质谱仪、扫描电镜、X 射线成像、光电倍增管等领域^[2-5]。

作为计划搭载于中国空间站的大型空间天文与粒子天体物理实验装置, 高能宇宙辐射探测设施 (High Energy Radiation Detection facility, HERD) 肩负着破解暗物质属性、宇宙线起源等前沿科学难题的使命。其核心科学目标的实现, 如对暗物质湮灭迹象的高灵敏度搜寻、对膝区宇宙线能谱的成分分辨以及高能伽马射线的精细巡天, 从根本上依赖于其核心探测器——量能器 (CALO) 的卓越性能。其中关键读出单元为增强型科学级互补金属氧化物半导体相机 (Intensified Scientific Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, IsCMOS)^[6-7]。在该系统中, MCP 作为一体化像增强器的核心器件, 承担着对数千条光纤传输的超快微弱光子信号进行高灵敏度、二维级联放大的关键作用。由于 HERD 载荷处于复杂的空间环境, 因此对 CALO-IsCMOS 用 MCP 的寿命及光晕的抑制提出了更高的技术要求。

为了提高微通道板的工作寿命, 主要采用原子层沉积技术 (Atomic Layer Deposition, ALD), 国外 Argonne 国家实验室、芝加哥大学 INCOM 公司, 国内北方夜视技术股份有限公司、中国科学院高能物理研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国建筑材料科学研究院、长春理工大学等都有开展相关工作。国外 LAPPD 团队利用 ALD 技术完成了大面积 MCP 制作, 增益大于 1×10^7 , 且不均匀性小于 15%, 电子清刷时增益保持稳定, 未出现传统 MCP 的增益快速衰减现象^[8-9]。CONNELLY^[10] 使用 ALD 技术在传统 MCP 上制作了发射层, 有效提高了 MCP 寿命, 且在 MCP 输出电荷量 $5.16 \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$ (增益下降 35%) 的情况下, 阴极量子效率无明显变化。LEHMANN^[11] 的研究表明, ALD-MCP 输出电荷量超过 $10 \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$, 寿命是传统 MCP 的 50 倍。国内闫宝军^[12]、丛晓庆^[13] 等的研究均表明 ALD 技术可提高 MCP 增益和寿命。为了更好的抑制光晕, 主要采用新型的扩口技术。ASHKHOTOV^[14]、邱祥彪^[15] 分别研究了氢氟酸、干法刻蚀两种方式。FEHRE K^[16] 发现漏斗形 MCP 探测效率提高到 90%, 在五重离子探测中探测效率是常规 MCP 的 24 倍。CHEN P^[17] 发现碗形 MCP 收集效率接近 100%, 延迟

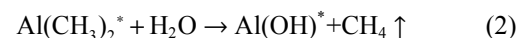
脉冲比例低于 2%。上述 MCP 的制备技术已经得到较为广泛的应用, 并取得重要的研究成果。然而在空间探测领域, ALD 技术仅在木星冰月探测器紫外光谱仪 (JUICE-UVS)^[18]、紫外波段光子计数^[19] 有部分报导, 扩口技术暂无相关研究。文中围绕国家大科学装置 HERD 载荷的 CALO-IsCMOS 的空间探测需求, 拟结合 ALD 技术和扩口技术, 开展 MCP 的制备、性能测试和模拟仿真, 系统性分析各项结构参数、倍增性能以及成像特性, 为高性能微通道板的研究提供相关的理论依据和研究基础, 有望填补国内相关研究领域空白。

1 微通道板的结构及表征

1.1 结构设计

文中研制了三种不同规格的 MCP 样品, 分别为 MCP-I、MCP-II 和 MCP-III, 具体参数见图 1 和表 1。这三种 MCP 参数相同的项目如下: 外径 $\Phi 50 \text{ mm}$, 有效区 $\Phi 30 \text{ mm}$, 孔径 $12 \mu\text{m}$, 孔间距 $14 \mu\text{m}$, 厚度 0.48 mm 。其中, MCP-I 如图 1(a) 所示, 为传统的 MCP 样品, 未采用 ALD 技术, 未采用扩口技术, 开口面积比 (Open Area Ratio, OAR) 为 67%。MCP-II 如图 1(b) 所示, 采用了 ALD 技术, 发射层材料以蓝色框图显示, 与 MCP-I 的绿色框图不同。具体设计膜层功能材料为 Al_2O_3 , 膜层厚度为 5.5 nm 。MCP-II 未采用扩口技术, OAR 为 67%。MCP-III 如图 1(c) 和 (d) 所示, 在 MCP-II 的 ALD 技术基础上叠加了扩口技术, 输入面为漏斗状, OAR 为 87%。

文中使用的 ALD 技术主要使用 BENEQ 公司的 TFS500 型设备进行制作, 腔体温度为 $180 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$, 载气为高纯度 N_2 (纯度 99.99%), 前驱体为三甲基铝 (Trimethylaluminium, TMA) 和水 (H_2O), 化学反应方程式如公式 (1)、(2) 所示。每个循环的沉积参数为 $\text{TMA}/\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$ — $0.8/30/0.6/30 \text{ s}$, 每个循环生长的 Al_2O_3 膜厚为 0.1 nm , 共进行了 55 个循环。为减少 MCP 变形对光晕的影响, 在 55 个循环 Al_2O_3 生长完成后, 进行 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 5 h、然后随 ALD 设备冷却的 MCP 退火工艺。



扩口采用湿法刻蚀制作, 针对 CALO-IsCMOS 用

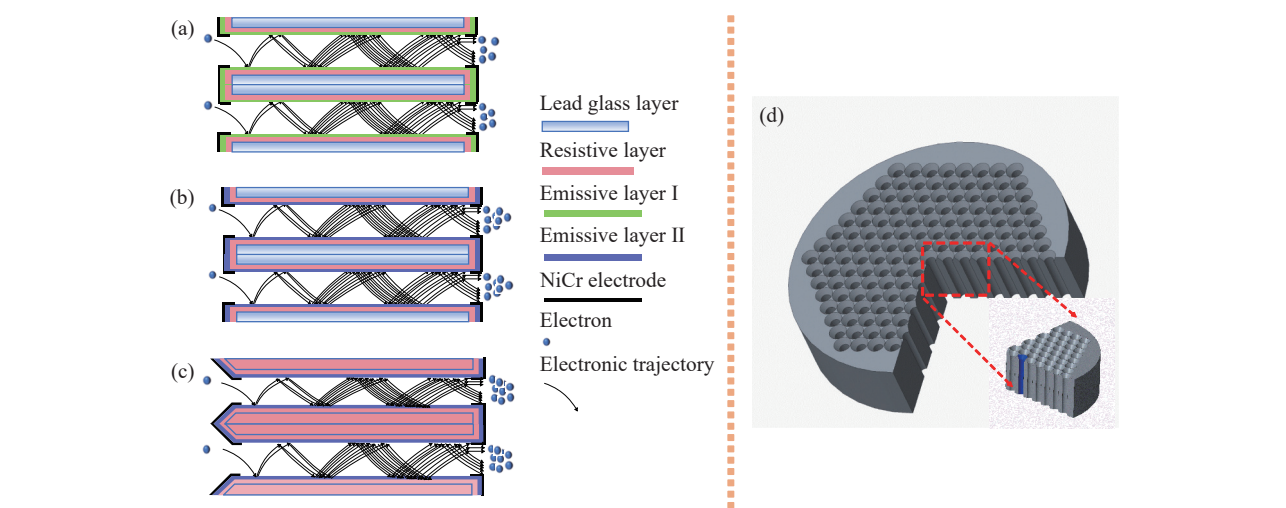


图 1 MCP 示意图。(a) 无沉积、无扩口的 MCP-I；(b) 沉积、无扩口的 MCP-II；(c) 沉积、扩口的 MCP-III；(d) 扩 MCP 三维示意

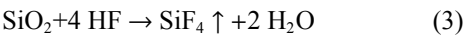
Fig.1 Schematic of MCP. (a) MCP- I : Without expansion or ALD; (b) MCP- II : With ALD and no expansion; (c) MCP- III : With ALD and expansion; (d) 3D schematic of expanded MCP

表 1 MCP 设计

Tab.1 Design of MCP

Model	ALD film	Thickness of the ALD film/nm	OAR
MCP- I	-	-	67%
MCP- II	Al ₂ O ₃	5.5	67%
MCP- III	Al ₂ O ₃	5.5	87%

MCP 铅含量高、表面质量要求严的特点，确定了以下工艺：环境温度为 25 ℃，首先将 MCP 单侧放在 0.2 mol/L 的 HCL 溶液中 20 min，去除芯料形成深度超过 36 μm 的通道。接着使用频率为 40 kHz、功率为 300 W 的超声波纯水超声清洗 30 s，然后将该单侧放在 0.1 mol/L 的 HF 溶液中 15 min。MCP 中的 SiO₂ 在 HF 溶液中的化学反应方程式如公式 (3)、(4) 所示，SiO₂ 先与 HF 反应生成 SiF₄，SiF₄ 继续与 HF 反应生成易溶解的 H₂[SiF₄]，由此提高 MCP 的 OAR。最后使用频率为 40 kHz、功率为 300 W 的超声波乙醇超声清洗 30 s。



按照上述方法完成了 MCP-I、MCP-II 和 MCP-III 的制作，实物如图 2 所示。进行图 2 照片拍摄时，将灯管垂直放置于 MCP 上方，因此在 MCP-I 中实物图和 MCP-II 实物图中采集到了灯管的反射图像。而 MCP-III 由于采用了扩口技术，输入面为薄壁结构，

抑制了灯光的反射，因此未能在扩口区域采集到灯管的反射图像。

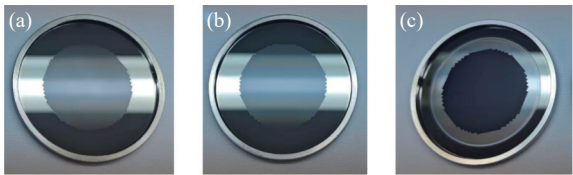


图 2 MCP 实物。(a) MCP-I；(b) MCP-II；(c) MCP-III

Fig.2 Physical object of MCP. (a) MCP- I ; (b) MCP- II ; (c) MCP- III

1.2 形貌和元素表征

利用扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 分别对 MCP-I 和 MCP-III 的形貌进行了测试，结果如图 3 所示。采用扩口技术后，通道直径 12.0 μm 提升至 13.7 μm，通道间距均为 14 μm，开口面积比从 67% 提升至 87%。从图 3(c) 和 (f) 可知，扩口后的 MCP 在输入面呈现锥形形状，与预期结果基本一致，并且内壁与传统的微结构形貌类似，均呈现光滑、连续的形貌，内部并未出现损伤或裂纹。

利用 X 射线光电子能谱仪 (X-ray Photoelectron Spectrometer, XPS) 分别对 MCP-I 和 MCP-II 的通道内的元素进行了测试，结果如图 4 所示。从图中可以看出，MCP-I 在整个结合能 (Binding Energy, BE) 70~80 eV 的扫描范围内未观察到任何明显的峰形信号，其强度与背景噪声水平一致，表明 MCP-I 通道内壁不含或仅含微量铝元素。MCP-II 在 BE 为 74.3 eV 处

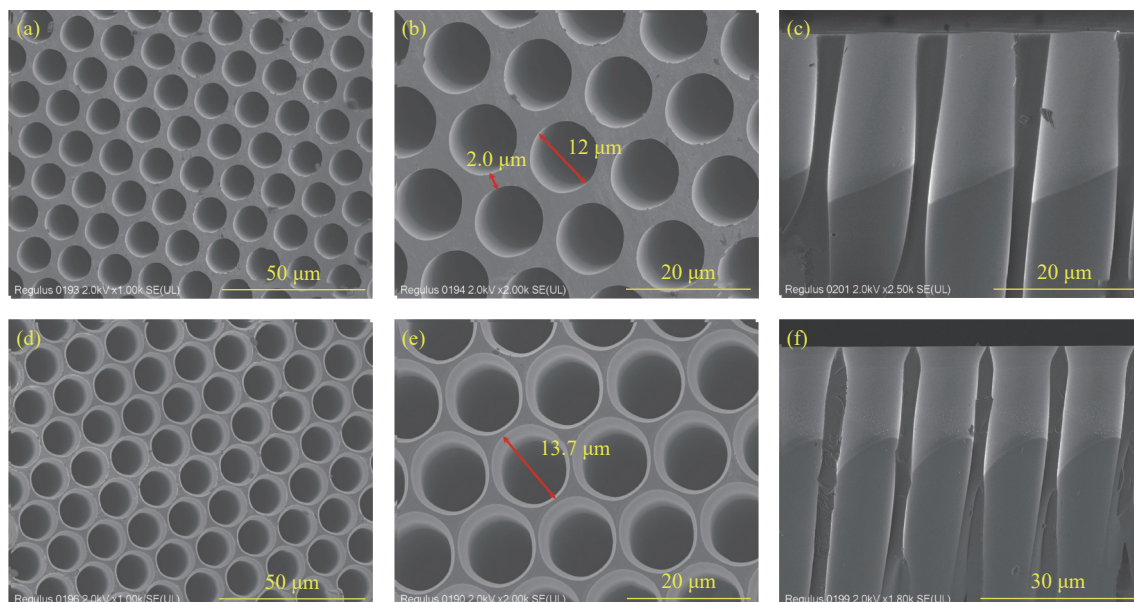


图 3 SEM 测试结果。(a) MCP-I 表面形貌; (b) MCP-I 表面形貌放大图; (c) MCP-I 截面形貌; (d) MCP-III 表面形貌; (e) MCP-III 表面形貌放大图; (f) MCP-III 截面形貌

Fig.3 SEM test results. (a) Surface morphology of MCP-I; (b) Magnified surface morphology of MCP-I; (c) Cross-sectional morphology of MCP-I; (d) Surface morphology of MCP-III; (e) Magnified surface morphology of MCP-III; (f) Cross-sectional morphology of MCP-III

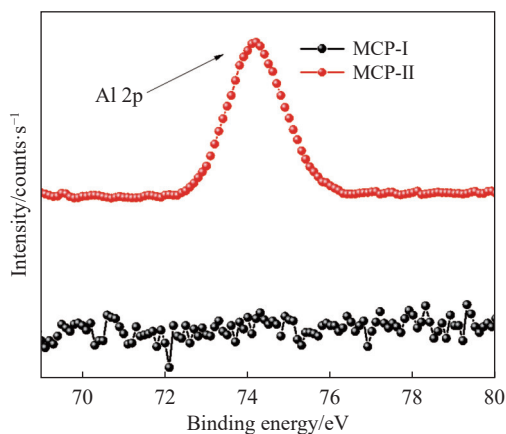


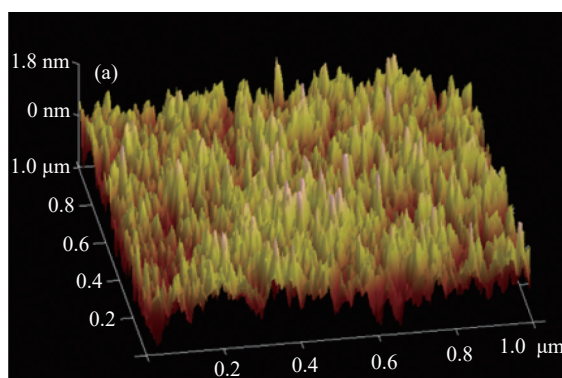
图 4 XPS 测试结果

Fig.4 XPS test results

出现一个强而尖锐的特征峰。该峰位与化学计量 Al_2O_3 中 Al^{3+} 的 Al 2p 标准结合能相吻合,说明 MCP-II 在 74.3 eV 处的信号完全源于 ALD 工艺所沉积的铝元素。MCP-II 的 Al 2p 峰不仅强度高,而且峰形对称、狭窄。这表明铝元素以一种均匀且单一的化学态 (即 Al^{3+}) 存在,由此可以说明利用 ALD 技术在 MCP-II 的通道内制作出了连续、致密且覆盖均匀的膜层。

由于 ALD 技术在微通道内壁沉积了纳米级别厚

度的功能膜层,为了研究其对内壁粗糙度的影响,文中利用原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 分别对 MCP-I 和 MCP-II 的通道内的粗糙度进行了破坏性测试,结果如图 5 所示。图 5(a) 展示了 MCP-I 通道表面的三维形貌图,可以观察到,其表面存在起伏,呈现出不均匀、不连续的凹凸结构。与之对应的图 5(b) MCP-II 通道表面起伏得到了缓解,内壁粗糙度从 0.55 nm 下降到 0.43 nm。测试结果表明,采用 ALD 技术在通道内壁沉积一层 5.5 nm 的薄膜,以一种保形的方式均匀地覆盖了凹凸结构,从而有效地“填充”了谷底,“削平”了峰顶,在一定程度上对 MCP 的内壁粗糙度有改进和优化作用。



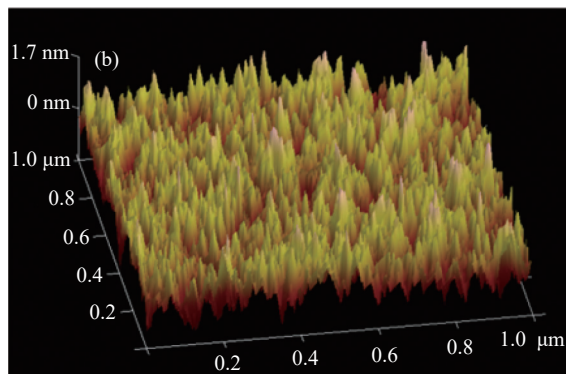


图 5 AFM 测试结果。(a) MCP- I 粗糙度; (b) MCP- II 粗糙度

Fig.5 AFM test results. (a) Roughness of MCP- I ; (b) Roughness of MCP- II

1.3 面形表征

利用基恩士 3D 轮廓测量仪 (型号 VR-5000) 分别对 MCP- I 、MCP- II 、MCP- III 面形进行了表征。测试时相机放大倍数为 12 倍。由于扩口 MCP 输入面为薄壁结构,无法有效反射光信号,因此选择输出面进行测试,测试结果如图 6 所示。三种 MCP 的面形都

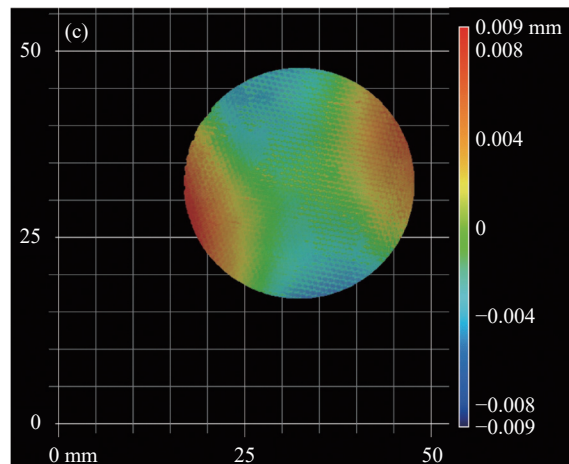
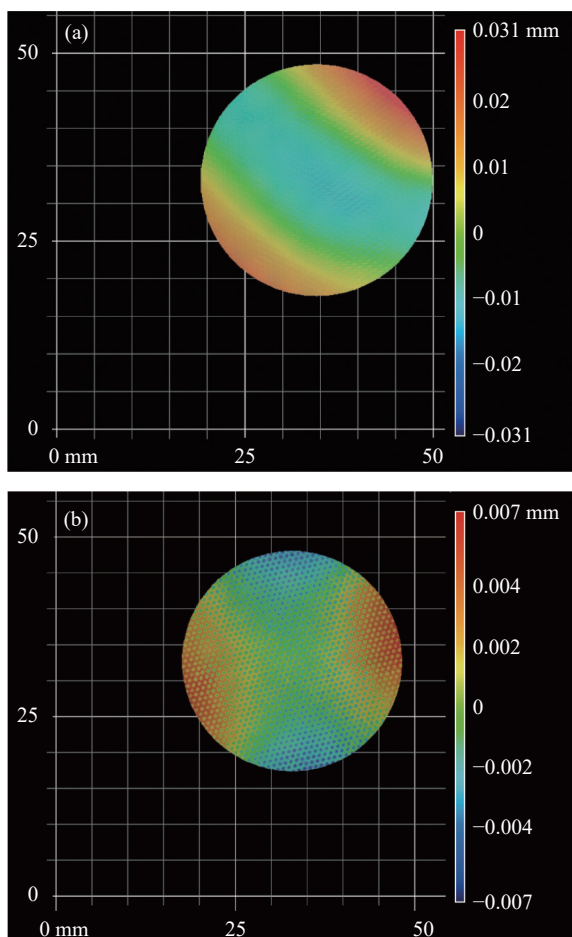


图 6 面形测试结果。(a) MCP- I 面形; (b) MCP- II 面形; (c) MCP- III 面形

Fig.6 Surface figure test results. (a) Surface figure of MCP-I; (b) Surface figure of MCP- II ; (c) Surface figure of MCP- III

是两边翘起、中间凹陷的马鞍形,该测试结果与赵冉^[20]使用乾曜激光干涉仪的测试结果一致。MCP- I 、MCP- II 、MCP- III 的变形量分别为 0.062、0.014、0.018 mm,说明使用了 ALD 退火工艺的 MCP- II 、MCP- III 变形得到了缓解,变形量至少降低了 71%。两边翘起、中间凹陷的马鞍形的结构会导致 MCP 出射电子的角度增加^[21],进而导致光晕增加。因此使用了 ALD 退火工艺的 MCP- II 、MCP- III 变形量的缓解会导致光晕的降低。

2 微通道板电子倍增特性测试及结果分析

2.1 倍增原理

微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 是一种大阵列、高空间分辨率与时间分辨率的电子倍增探测器,广泛用于高性能夜视像增强器及其他多个科研领域。其结构以含铅玻璃薄片为基底,在该基底上复丝按六边形周期排列,每个微通道为圆形,通常为数微米至十几微米。单个 MCP 包含数百万条微通道。MCP 倍增原理的工作机制与光电倍增管类似。如图 1(a)所示,微弱粒子撞击通道壁激发出二次电子,二次电子在电场作用下向前运动撞击通道壁激发出更多二次电子,如此多次倍增实现粒子信号的放大。

2.2 增益特性

增益 G 指 MCP 单位面积上的输出电流和输入电

流之比,是一项评估 MCP 电子倍增能力的重要指标。文中 MCP 增益测试主要参照《GJB 1608A-2002 微通道板试验方法》,具体如下,将 MCP 封装在一体化像增强器中,固定阴极电压为 -200 V ,通过调节钨灯光源电流和中性衰减滤光片组合使阴极电流为 0.1 nA ,即 MCP 输入电流 I_{in} 为 0.1 nA 。MCP 输入电压为 0 V ,MCP 输出电压为变化值 V_{out} ,荧光屏电压为 $V_{\text{out}}+200\text{ V}$,测试不同 V_{out} 下荧光屏的电流作为 MCP 输出电流 I_{out} 。增益计算如公式 (5) 所示,为 MCP 输出电流 I_{out} 与 MCP 输入电流 I_{in} 的比值。

$$G = \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} \quad (5)$$

式中: G 为增益; I_{out} 为 MCP 输出电流; I_{in} 为 MCP 输入电流。

不同工作电压下 MCP 的测试结果如图 7 所示。由图可以看出,三种规格的 MCP 的增益均随工作电压的增加而呈指数增长趋势,与理论模型基本一致。其中 MCP-I、MCP-II 以及 MCP-III 的增益依次增加,电子倍增能力更强,如 800 V 下 MCP-I、MCP-II、MCP-III 的增益依次为 372、743 和 945。MCP-II 增益高于 MCP-I,与 CAO^[22] 的研究一致,这是因为通道内壁沉积的 Al_2O_3 膜层二次电子发射系数 (Secondary Electron Emission, SEE) 峰值为 3.95^[23],高于传统的铅玻璃的 2.75^[24]。MCP-III 的增益高于 MCP-II,这是因为 MCP-III 的 OAR 是 MCP-II 的 1.30 倍,更高的 OAR,提高了入射电子的捕获效率^[25],使更多的电子能够进入通道并触发倍增过程,从而输出更多二次电子。总的来说,ALD 膜层的高二次电子发射系数、扩

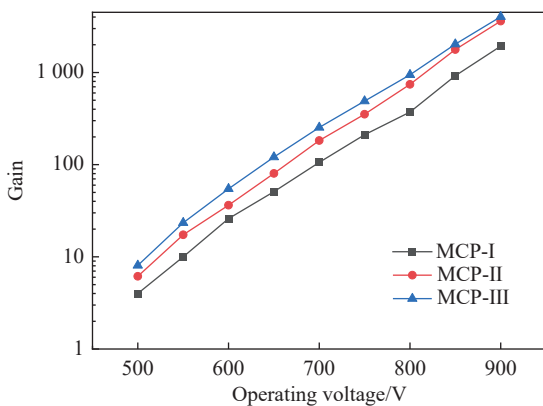


图7 增益随电压变化的测试结果

Fig.7 Measurement results of variation of gain with operating voltage

口产生的高 OAR 使 MCP-III 的增益达到了 MCP-I 的 2.54 倍。

2.3 寿命特性

MCP 的寿命与 HERD 载荷在轨运行时间直接相关,是空间探测领域核心技术指标。文中将 MCP 封装成光电倍增管进行寿命测试,如图 8 所示。固定光电倍增管的阴极电压为 -200 V ,通过调节钨灯光源电流和中性衰减滤光片组合使阴极电流为 1 nA ,即 MCP 输入电流 I_{in} 为 1 nA 。MCP 输入电压为 0 V ,MCP 输出电压为 900 V ,阳极电压为 1100 V 。按上述条件使光电倍增管长时间工作,每隔一段时间测试阳极电流作为输出电流 I_{out} 。按公式 (5) 计算增益,按公式 (6) 计算总输出电荷量。以总输出电荷量为横坐标,相对增益 (首次增益值为基准) 为纵坐标绘制出寿命测试曲线。

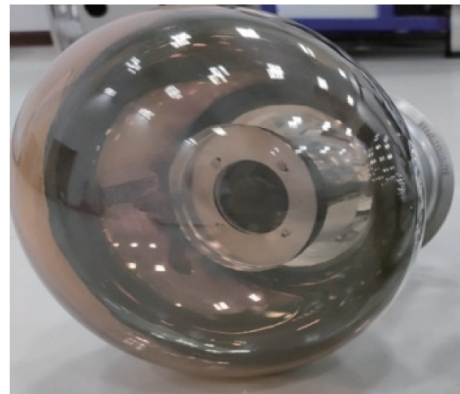


图8 寿命测试用光电倍增管

Fig.8 Photomultiplier tube for life test

$$Q = I_{\text{out}} \times T \quad (6)$$

式中: Q 为总输出电荷量; I_{out} 为 MCP 输出电流; T 为光电倍增管累计工作时间。

MCP 的工作寿命测试结果如图 9 所示。由图可知,未沉积的 MCP-I 其相对增益随总输出电荷量的增加呈现出快速下降的趋势,实验与拟合数据表明,在总输出电荷量达到 30 C 时, MCP-I 的相对增益已衰减至 12%。沉积的 MCP-II 相对增益随总输出电荷量的增加虽然仍然在下降,但下降趋势明显减缓。在总输出电荷量为 30 C 时,相对增益保持在 90%,远高于 MCP-I,工作寿命相对 MCP-I 提升 6.5 倍;即使总输出电荷量达到 100 C , MCP-II 相对增益仍保持在

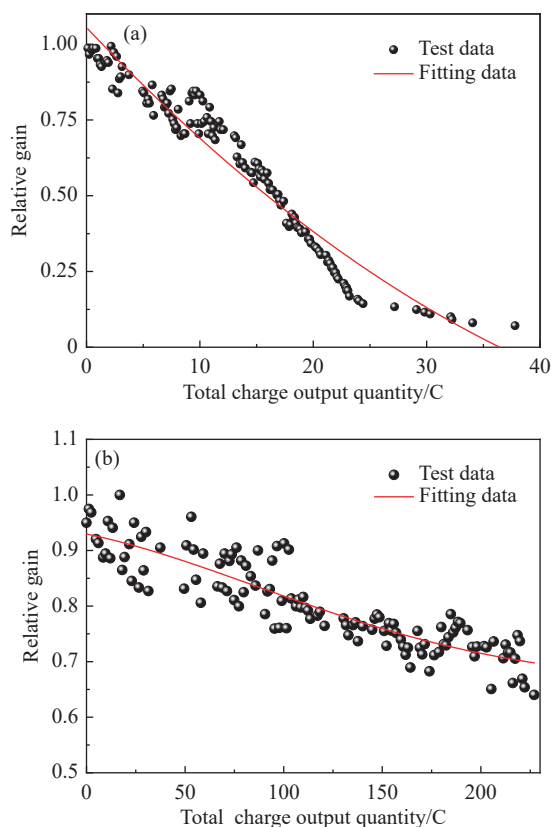


图9 寿命测试。(a) MCP-I 相对增益与总输出电荷量变化关系;(b) MCP-II 相对增益与总输出电荷量变化关系

Fig.9 Lifetime test. (a) Relative gain as a function of total charge output quantity for MCP-I; (b) Relative gain as a function of total charge output quantity for MCP-II

82%。MCP-II 的寿命高于 MCP-I 的测试结果与 SIEGMUND^[9]、LEHMANN^[11] 研究结果一致,这主要是因为 MCP-II 通过 ALD 技术制作了连续、致密、光滑的 Al_2O_3 功能膜层,如图 4 和图 5 所示。分析认为, Al_2O_3 功能膜层的坚固性和清洁性^[9]抑制了通道表面碱金属元素的流失和碳污染,延缓了增益衰减^[26],从而提高了寿命。

2.4 光晕特性

为研究 MCP 成像特性,在中国科学院西安光学精密机械研究所搭建了专门的测试系统,如图 10 所示^[27]。该测试系统中,直径 300 μm 的波长转移光纤上的 500 nm 的光经前级光锥传输至像增强器,照射像增强器的阴极转化为电子,电子经 MCP 倍增大后撞击荧光屏成像,荧光屏上的像随后被 CMOS 相机捕获用于数据分析。由于光纤经前级光锥传导到光阴极存在一定的缩放因子。经过校准测试,入射到 MCP 的表面的光斑有效 10% 峰高全宽 (Full Width at Maximum, FWM) 直径约为 225 μm ,缩放因子为 1.33。

MCP-II 和 MCP-III 成像测试结果如图 11 所示。图 11(a) 和 (b) 的三维强度分布显示 MCP-II 和 MCP-III 均呈现典型的中央亮斑结构,且 MCP-III 的最大峰值强度 3641 显著高于 MCP-II 的 2135,约为 1.7,表明 MCP-III 电子倍增能力更强,集中度更高,与增益测

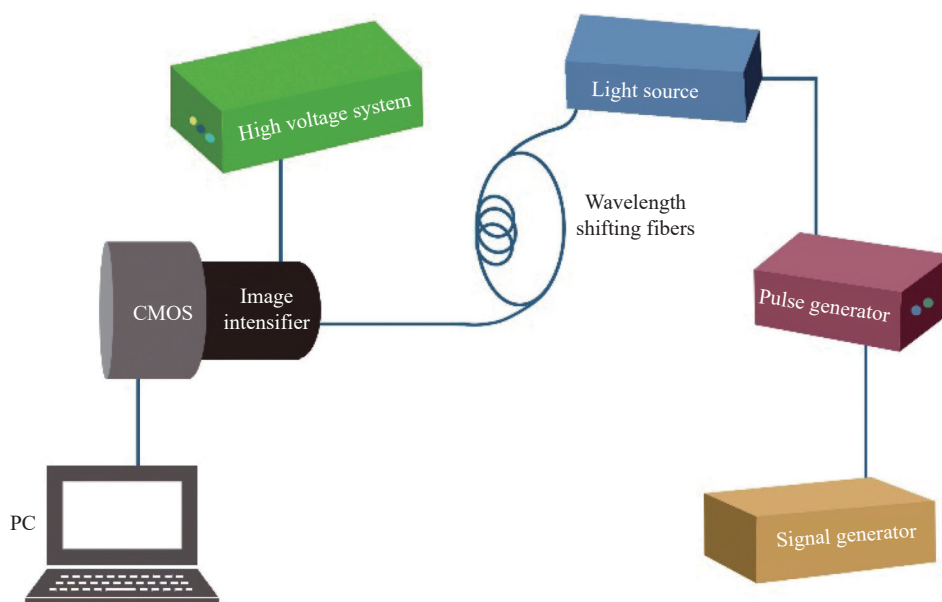


图 10 成像测试系统

Fig.10 Imaging test system

试结果基本一致。图 11 (c) 和 (d) 的对数强度分布进一步揭示了细节特征: MCP-II 周边区域存在大量弥散电子, 而 MCP-III 弥散电子数量减少 40%, 且中央亮区边界更为锐利。经过对数据进行高斯拟合, MCP-II 和 MCP-III 出射光斑直径 FWM 的数值分别为约为 $378\text{ }\mu\text{m}$ (约 21 pixel) 和 $288\text{ }\mu\text{m}$ (约 16 pixel), 光斑直径

FWM 降低了 24%。出射光斑的 FWM 相对入射表面 FWM 的 $225\text{ }\mu\text{m}$, 放大倍率从 1.68 下降至 1.28。测试结果表明, 采用扩口设计能有效抑制光晕现象的产生。分析认为, 扩口技术通过提高 OAR 可有效抑制输入面电子散射至相邻通道^[28], 从而抑制光晕, 具体抑制情况在后续章节会通过仿真进一步分析。

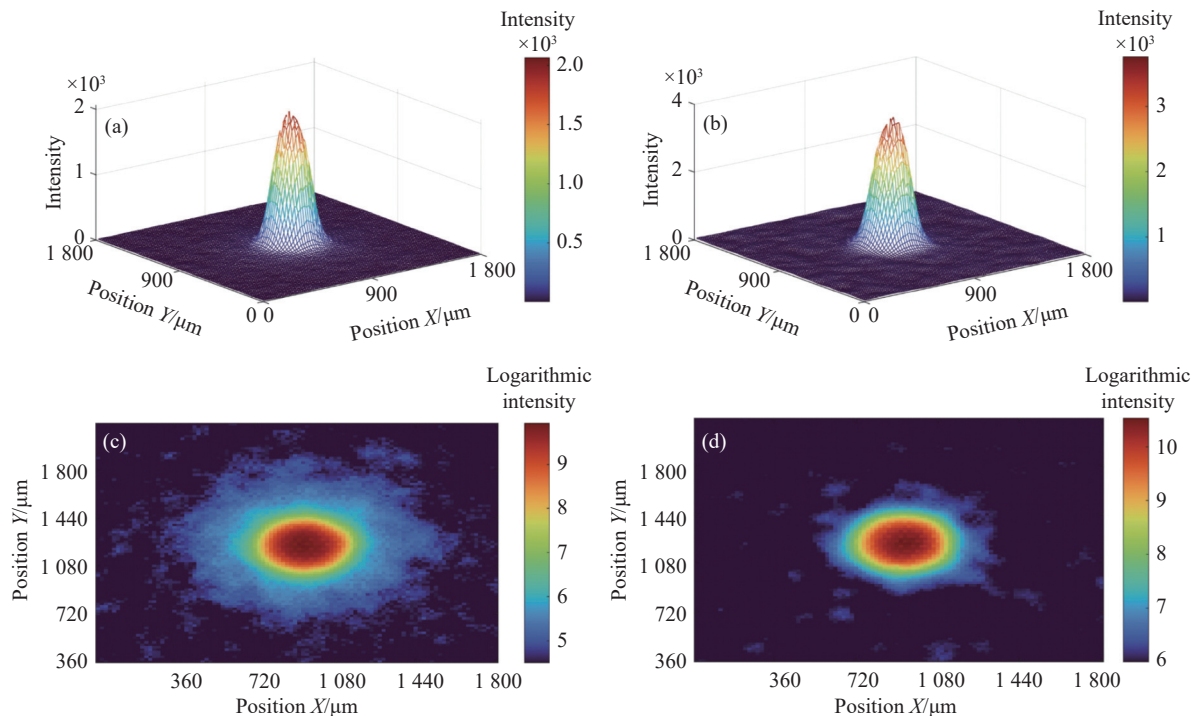


图 11 MCP 成像结果。(a) MCP-II 三维强度分布; (b) MCP-III 三维强度分布; (c) MCP-II 对数强度分布; (d) MCP-III 对数强度分布

Fig.11 MCP imaging results. (a) Three-dimensional intensity distribution of MCP-II; (b) Three-dimensional intensity distribution of MCP-III; (c) Logarithmic intensity distribution of MCP-II; (d) Logarithmic intensity distribution of MCP-III

3 仿真结果与讨论

3.1 模型的构建

利用专业电磁仿真软件 CST Studio Suite 中粒子追踪工作室进行了仿真。文中拟通过建立 MCP 电子倍增的三维模型, 基于有限积分技术和蒙特卡罗方法, 计算 SEE、OAR、荧光屏距离对 MCP 倍增性能和成像特性的影响。

MCP 的二次电子倍增仿真采用相对成熟且具有广泛应用的 Furman 模型^[29]:

1) 该模型中考虑了三种二次电子, 分别为背散射二次电子、再扩散二次电子和真二次电子。

2) 出射电子能量遵循能量守恒定律, 即背散射二

次电子、再扩散二次电子和真二次电子的能量之和不超过初始入射电子能量。

3) 出射电子角度与初始入射电子能量和入射角度无关。出射电子极角在 $(0, 2\pi)$ 间服从均匀分布, 出射电子方位角在 $(0, \pi/2)$ 间服从余弦分布。

4) 出射电子产额为背散射二次电子、再扩散二次电子和真二次电子之和。

仿真模型如图 12 所示。由于 MCP 具有数百万个通道, 直接进行三维模型的仿真难以实现, 所以建立了 352 通道的 MCP 简化模型。由于 MCP 的马鞍形难以建模, 所以模拟时假定 MCP 无变形, 为理想的平面。为了避免边缘电场畸变影响到电子轨迹, 建立了直径为 $3000\text{ }\mu\text{m}$ 的电子倍增 CST 模型, 该模型远

大于阴极光斑直径、MCP 通道区域和荧光屏上电子斑直径。阴极中心处光斑直径为 $100\ \mu\text{m}$ 。MCP 的通道直径为 $12\ \mu\text{m}$ ，通道间距为 $14\ \mu\text{m}$ ，斜切角为 7° 。MCP 输入面进行扩口处理，开口面积比为可调参数 OAR，输入面镀膜深度为 $24\ \mu\text{m}$ 。MCP 输出面不进行扩口处理，输出面镀膜深度为 $24\ \mu\text{m}$ 。MCP 输出面和输入面间的电压差为 $800\ \text{V}$ 。MCP 输入面与阴极间的距离为 $200\ \mu\text{m}$ 、电压差为 $200\ \text{V}$ 。荧光屏距离为可调参数 L 、电压差为 $5000\ \text{V}$ 。

仿真计算的模型如表 2 所示。未采用 ALD 技术的 MCP 的 SEE 峰值为 $2.75^{[24]}$ ，采用 ALD 技术的 MCP 的 SEE 峰值为 $3.95^{[23]}$ ，通过分析 Model 1($L=500\ \mu\text{m}$)、Model 2、Model 4 的结果研究 ALD 技术、扩口技术对增益的影响。通过改变 Model 1 中参数 L ，研究荧光屏距离对荧光屏上成像的影响。通过分析 Model 2、Model 3、Model 4 的结果研究扩口技术对成像性能的影响。

表 2 计算模型

Tab.2 Computational models

Model	ALD film	Thickness of the ALD film/nm	SEE	OAR	$L/\mu\text{m}$
Model 1	-	-	2.75	67%	Adjustable parameters
Model 2	Al_2O_3	5.5	3.95	67%	500
Model 3	Al_2O_3	5.5	3.95	77%	500
Model 4	Al_2O_3	5.5	3.95	87%	500

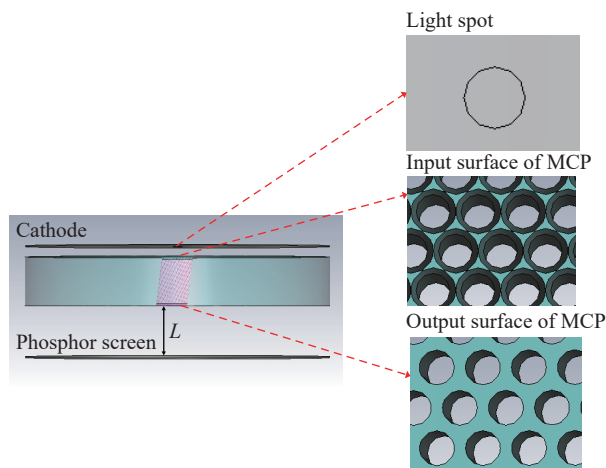


图 12 MCP 电子倍增的 CST 三维模型示意图

Fig.12 Schematic of the 3D CST model for MCP electron multiplication

3.2 模拟结果与讨论

图 13 给出了 Model 1($L=500\ \mu\text{m}$)、Model 2、Model 4 三种 MCP 增益随电压的模拟结果。Model 1、Model 2、Model 4 的增益依次增加，说明更高的 SEE 和 OAR，可有效提高 MCP 的增益。以图 7 测试的 MCP-I 增益为基准，计算 MCP-II、MCP-III 的相对增益，以图 13 中模拟的 Model 1 增益为基准，计算 Model 2、Model 4 的相对增益，分别将 ALD-MCP、ALD 叠加扩口 MCP 相对增益的测试与模拟结果绘制在图 14(a)、

(b) 中。从图 14(a) 中可以看出，ALD-MCP 相对增益的测试值的平均数为 1.69，均方根为 1.70，模拟值的平均数为 1.60，均方根为 1.63。从图 14(b) 中可以看出，ALD 叠加扩口 MCP 相对增益的测试值的平均数为 2.23，均方根为 2.24，模拟值的平均数为 2.56，均方根为 2.69。可以认为测试结果与模拟结果基本一致。

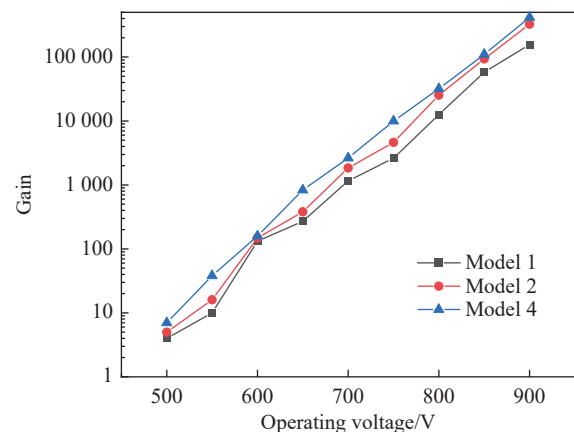


图 13 增益随电压变化的模拟结果

Fig.13 Simulation results of variation of gain with operating voltage

图 15 给出了 Model 1 中，荧光屏距离 L 对电子收集数量 (直接关联增益) 的影响。随着荧光屏距离 L 从 $200\ \mu\text{m}$ 增加至 $800\ \mu\text{m}$ ，收集到的电子数量从 37460 显著降至 19872，降幅达 47.0%。这主要是因为是在荧

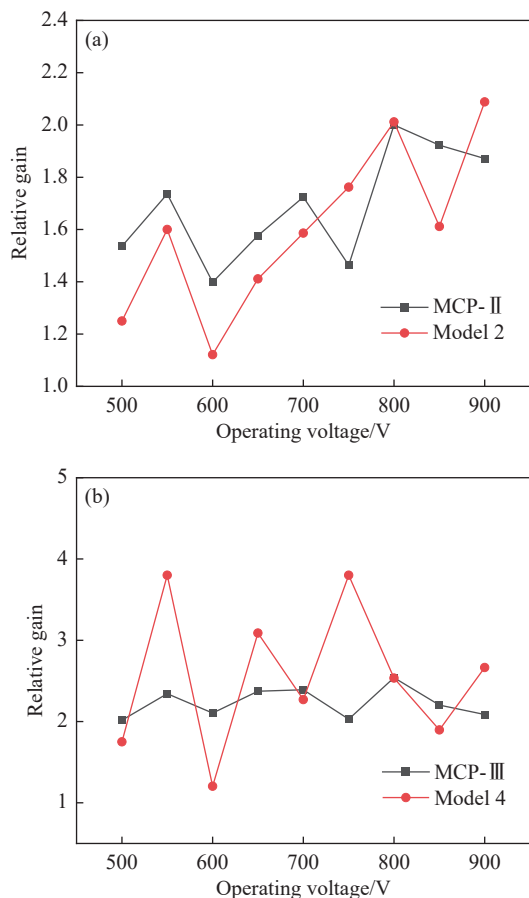


图14 相对增益的测试与模拟结果。(a) ALD-MCP; (b) ALD 叠加扩口 MCP

Fig.14 Comparison of measured and simulated relative gain. (a) ALD-MCP; (b) ALD and flaring MCP

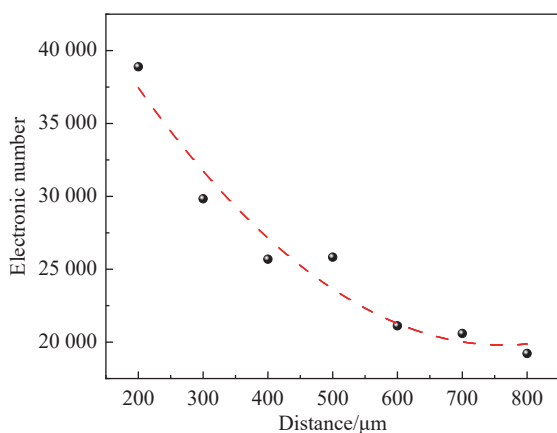


图15 荧光屏上电子数与荧光屏距离的关系

Fig.15 Electronic number as a function of distance from the phosphor screen

光屏电压差为 5000 V 不变的情况下, 荧光屏距离 L 从 200 μm 增加至 800 μm , 场强从 2.50×10^7 V/m 降

低至 6.25×10^6 V/m。场强的降低导致 MCP 末端许多电子未能获得足够能量“逃离”末端坏死区域(输出电极), 从而导致荧光屏收集到的电子数量减少。

图 16 为电子云在不同荧光屏距离的三维散点分布云图, 给出电子在 MCP 传输过程中空间分布与传输距离的分布规律。模拟结果表明, 当荧光屏的安装距离从 200 μm 增至 800 μm 时, 电子落点由高度集中逐步演变为显著弥散, 电子云的出射有效直径从 158 μm 变大为 254 μm , 增加了 61%, 导致一体化像增强器分辨率下降。综合图 15 和 16 的模拟结果可知, 适当降低荧光屏距离, 可提高一体化像增强器增益和分辨率。

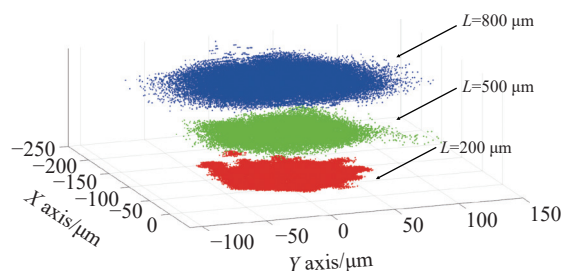


图16 荧光屏上电子落点分布与荧光屏距离的关系

Fig.16 Electron impact point distribution as a function of distance from the phosphor screen

图 17 给出了 Model 2、Model 3 和 Model 4 三种 OAR 条件下的输入面电子落点(蓝色圆点)分布情况, 红色圆线标识出 MCP 初始电子入射光斑直径为 100 μm , 入射电子数量约为 235 个。模拟结果表明, 随着 OAR 从 67% 增加到 77% 和 87%, 在有效直径之外, 散射电子的数量分别为 27, 13 和 2, 散射电子的占比从 11.5% 下降为 0.8%。模拟结果表明, 随着 OAR 的增加, 抑制了入射电子的散射特性对光晕的影响。

图 18 给出了 Model 2、Model 3 和 Model 4 三种 OAR 条件下的荧光屏上电子云落点分布结果。其中红线为入射光斑, 直径为 100 μm , 绿线为高斯拟合的出射电子的 FWM 直径。模拟结果表明, OAR 为 67% 条件下, 电子落点空间分散度较高, FWM 的直径为 178 μm , 大量点状信号分布于红色有效区外围, 存在明显的边缘散射效应。OAR 为 77% 时, 电子分布集中度提升, FWM 的直径为 132 μm , 红色有效区内信号密度显著增加。OAR 为 87% 条件下, FWM 的直径为 115 μm , 电子落点高度集中于有效区域核心区, 空

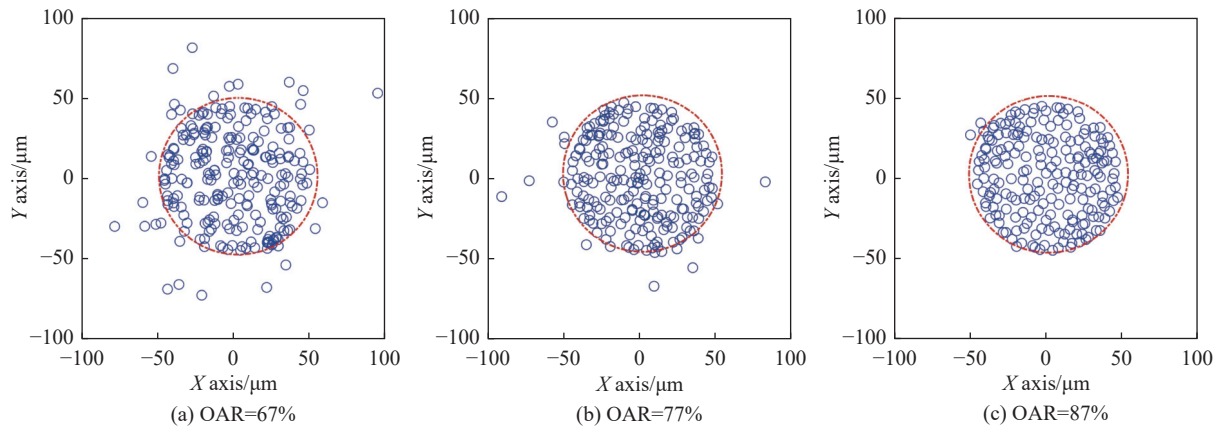


图 17 MCP 输入面电子落点分布。(a) Model 2; (b) Model 3; (c) Model 4

Fig.17 Electron impact point distribution on the MCP input surface. (a) Model 2; (b) Model 3; (c) Model 4

间分布均匀性达到最优。模拟结果表明,随着 OAR 从 67% 增加 87%, 出射电子云的 FWM 直径从 178 μm 下降为 115 μm , 下降了 35%。与图 10 相比, CST 的模拟结果比实测结果 (24%) 偏高, 主要因为模

拟时假定 MCP 为理想平面, 而实际制作的 MCP 呈现两边翘起、中间凹陷的马鞍形, 如图 6 所示。该结构会导致 MCP 出射电子的角度增加^[21], 进而抑制 FWM 直径的降低。

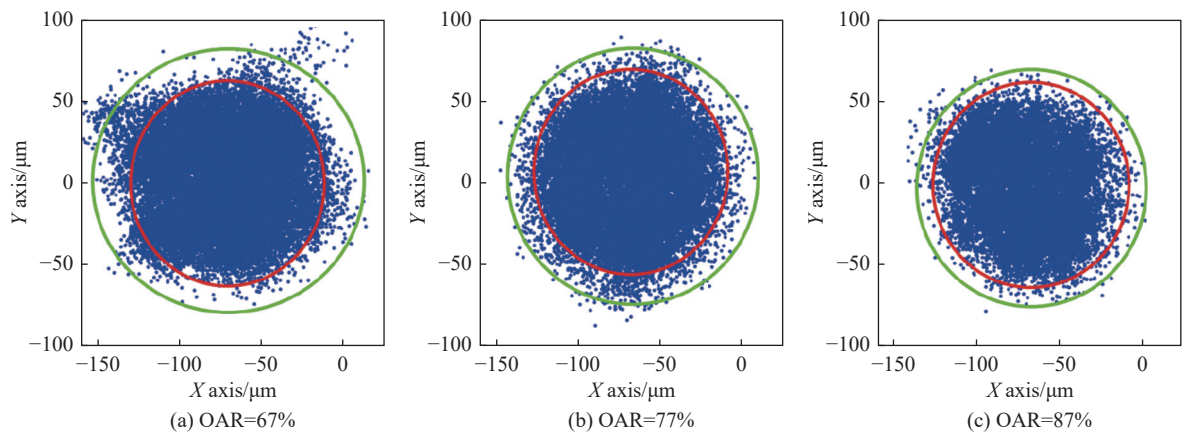


图 18 荧光屏上电子落点分布。(a) Model 2; (b) Model 3; (c) Model 4

Fig.18 Electron impact point distribution on the phosphor screen. (a) Model 2; (b) Model 3; (c) Model 4

4 结 论

围绕 HERD 载荷 CALO-IsCMOS 对高性能 MCP 的需求, 文中基于 ALD 技术和扩口技术, 在微通道内壁沉积一层 5.5 nm 的 Al_2O_3 , 内壁粗糙度从 0.55 nm 下降 0.43 nm, OAR 从 67% 提升为 87%, 变形量降低了 71%, 成功研制出高增益、长寿命、大开口、低光晕 MCP, 并完成了相关结构参数的表征和性能测试, 基于 CST Studio Suite 软件, 开展了多项结构参数的模拟和分析。研究表明, 采用 ALD 技术以及扩口技术, 可有效提高 MCP 的增益, 在轨运行的工作寿

命以及降低电子散射对于光晕的影响。测试结果与模拟仿真的结果基本一致, 为空间探测需求用高性能 MCP 提供了实验与理论依据。

参考文献:

- [1] YAO W, LIU S, YAN B, et al. Linear dynamic range of low resistance microchannel plate in DC mode [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(3): 310-314. (in Chinese)
- [2] XIE Y, ZHANG Y, WANG X, et al. Study on short pulse signal amplification of a microchannel plate in a saturation mode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1204005. (in Chinese)

- Chinese)
- [3] KOBAYASHI H, HONDO T, TOYODA M. Evaluation of microchannel plate gain drops caused by high ion fluxes in time-of-flight mass spectrometry: A novel evaluation method using a multi-turn time-of-flight mass spectrometer [J]. *J Mass Spectrom*, 2021, 56(3): e4706.
 - [4] YANAGIHARA Y, YAO Y Z, YAMAMOTO H, et al. Detection of low-energy backscattered electron in scanning electron microscopy using microchannel plate detector [J]. *Microscopy*, 2025, 75(1): 70-73.
 - [5] YANG Y, ZHU B L, GOU Y S, et al. A sealed X-ray microchannel plate imager with CsI photocathode to improve quantitative precision of framing camera [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2021, 1005: 8.
 - [6] ZHU J Y, SU Y Z, YANG H B, et al. Design and prototyping of the readout electronics for the transition radiation detector in the high energy cosmic radiation detection facility [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, 35(4): 82.
 - [7] QUAN Z, DONG Y W, XU M, et al. Calibration of the HERD calorimeter with an IsCMOS camera readout system with the CERN SPS test beam [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2026, 1084: 171222.
 - [8] ADAMS B W, ATTENKOFER K, BOGDAN M, et al. A brief technical history of the large-area picosecond photodetector (LAPPD) collaboration [EB/OL]. (2016-03-06) [2025-09-15]. <https://arxiv.org/abs/1603.01843>.
 - [9] SIEGMUND O H W, MCPHATE J B, JELINSKY S R, et al. Development of large area photon counting detectors optimized for cherenkov light imaging with high temporal and sub-mm spatial resolution [C]//2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011: 2063-2070.
 - [10] CONNEELY T M, MILNES J S, HOWORTH J. Extended lifetime MCP-PMTs: Characterisation and lifetime measurements of ALD coated microchannel plates, in a sealed photomultiplier tube [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2013, 732: 388-391.
 - [11] LEHMANN A, BRITTING A, EYRICH W, et al. Tremendously increased lifetime of MCP-PMTs [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2017, 845: 570-574.
 - [12] YAN B J, LIU S L, WEN K L, et al. Research on the application of new thin film material in electron multipliers [J]. *Space Electronic Technology*, 2022, 19(4): 85-92. (in Chinese)
 - [13] CONG X, QIU X, SUN J, et al. Properties of microchannel plate emission layer deposited by atomic layer deposition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 224-229. (in Chinese)
 - [14] ASHKHOTOV O G, ASHKHOTOVA I B, MAGKOEV T T. Formation of an inlet funnel in the channels of microchannel plates [J]. *Glass Ceram*, 2024, 81(7-8): 306-308.
 - [15] QIU X, MIN X, JIN G, et al. Theoretical model of funnel microchannel plate fabricated through dry etching [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(8): 818-823. (in Chinese)
 - [16] FEHRE K, TROJANOWSKAJA D, GATZKE J, et al. Absolute ion detection efficiencies of microchannel plates and funnel microchannel plates for multi-coincidence detection [J]. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89(4): 045112.
 - [17] CHEN P, TIAN J S, YUAN X H, et al. A novel bowl-shaped microchannel plate with high electron collection efficiency and good time performance [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2019, 936: 534-536.
 - [18] DAVIS M W, GLADSTONE G R, GILES R S, et al. Ground calibration results of the JUICE ultraviolet spectrograph [C]//SPIE, 2021, 11444: 1144404.
 - [19] FARINA S, USLENGHI M C A, TOSO G, et al. Microchannel plate based photon counting at UV wavelengths for astronomy applications [C]//SPIE, 2025, 13525: 1352509.
 - [20] ZHAO R, WANG J W, ZHANG X, et al. Application of image spherizing algorithm in deformation detection for micro-channel plate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(11): 137-145. (in Chinese)
 - [21] NI Q L, HAN S L, CHEN B, et al. Quantum detection efficiency of spherical microchannel plate in extreme ultraviolet [J]. *Opt Precis Eng*, 2011, 19(11): 2596-2602. (in Chinese)
 - [22] CAO W W, ZHU B L, BAI X H, et al. High-sensitivity and long-life microchannel plate processed by atomic layer deposition [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(153): 1-8.
 - [23] ZHU Xiangping. High-performance microchannel plates based on functional nano films design and performance modulation [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. (in Chinese)
 - [24] MIAO H, PENG H, YAN B, et al. MCPSim: A Geant4-based generic simulation toolkit for electron multipliers represented by Microchannel Plate [EB/OL]. (2023-10-08) [2025-09-17]. <https://arxiv.org/abs/2310.05122>.
 - [25] CAI H, MA J, LIU H, et al. Tip discharge of funnel-shaped microchannel plate with a large open area ratio [C]//SPIE, 2023: 12617: 1261733.

- [26] YAN J L, MENG S Y, XIANG S M. The study of gain fatigue mechanism of MCP [J]. *Applied Optics*, 1996(4): 25-28.
- [27] XU S H, BAI Y L, LI R, et al. Characterization of the crosstalk properties of image intensifier spot energy [J]. *Phys Scr*, 2025, 100(2): 10.
- [28] PING G. The research of a funnel shaped micro-channel plate [C]//IEEE, 2004: 365-367.
- [29] FURMAN M A, PIVI M T F. Probabilistic model for the simulation of secondary electron emission [J]. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2002, 5(12): 18.

Performance testing and simulation of microchannel plates for CALO-IsCMOS

HU Zexun¹, CONG Xiaoqing^{1*}, LI Tao², LIN Yanjian¹, SUN Jianning¹, WANG Jian¹, GU Yan¹, ZHU Jiaqi¹, CHENG Yan¹, ZHANG Huan¹, CHANG Le³, LIU Beihong³, HE Zhili³, WANG Zhigang⁴, QUAN Zheng⁴, CAO Weiwei⁵, LI Ran⁵, LI Longhui¹

(1. North Night Vision Technology (Nanjing) Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

3. North Night Vision Technology Co., Ltd., Kunming 650500, China;

4. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

5. 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)

Abstract:

Objective Microchannel plate (MCP) serves as the core electron multiplication devices in the intensified scientific complementary metal-oxide-semiconductor (IsCMOS) of the high energy radiation detection facility (HERD). This study develops high gain, long lifetime, large open area, low halo MCP using atomic layer deposition (ALD) and flaring technology to meet the stringent requirements of space exploration.

Methods The surface morphology and microstructure of the MCP are characterized through scanning electron microscopy (SEM), X-ray photoelectron spectrometer (XPS), atomic force microscopy (AFM) and three-dimensional profilometer. Electron multiplication and imaging characteristics are evaluated through gain, lifetime, and imaging tests. A simulation model was constructed using CST Studio Suite to validate the effects of secondary electron emission (SEE) and open area ratio (OAR) on MCP performance.

Results and Discussions Test results demonstrate that ALD technique forms a uniform and dense Al_2O_3 film on the MCP channel wall, reducing surface roughness from 0.55 nm to 0.43 nm, resulting in a 71% reduction in the amount of deformation and increasing gain from 372@800 V to 743@800 V. The lifetime improves by 6.5 times at a total output charge of 30 C. The flaring technology enhances the OAR from 67% to 87%, and increases the gain from 743@800 V to 945@800 V. Concurrently, this process reduces the full width of 10% maximum (FWM) of the halo diameter from 378 μm to 288 μm . The simulation results indicate that higher SEE and OAR are effectively enhancing the MCP gain and suppressing electron scattering along with the halo effects.

Conclusions The test results are in good agreement with the simulation results, providing a significant experimental and theoretical basis for high-performance MCP used in space exploration.

Key words: microchannel plate; electron multiplication; atomic layer deposition; flaring; CST simulation

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (12573105, U2541225); General Program of Jiangsu Provincial Natural Science Foundation (BK20241716)