

Al₂O₃/MgO 复合膜层对微通道板性能的影响

张正君, 邱祥彪, 乔芳建, 丛晓庆, 李婧雯, 任玲, 王鹏飞

(北方夜视技术股份有限公司, 南京 211106)

摘要: **目的** 大幅提高微通道板增益, 延长寿命。**方法** 采用原子层沉积技术 (ALD) 在微通道板 (MCP) 大长径比 (40:1) 通道内壁沉积 Al₂O₃/MgO 复合膜层材料, 对通道内壁二次电子发射层进行增强, 改善其二次电子发射特性。通过设计复合膜层结构, 采用 Al₂O₃ 膜层保护易潮解的 MgO 膜层, 提高复合膜层的稳定性。研究 MgO 膜层沉积工艺, 基于 SEM 检测, 实现在大长径比通道内制备出厚度均匀 (不均匀性为 3.8%) 的膜层。研究 MgO 膜层厚度、沉积温度对 MCP 增益以及双片叠加增益达到 10⁷ 时工作电压的影响, 确定最佳的复合膜层制作工艺。**结果** 通过采用 20 cycles Al₂O₃ 膜层进行封装保护, 使表面制备复合膜层 MCP 在氮气柜中可稳定存储 14 d。试验 MgO 最佳的膜层沉积工艺: 沉积温度为 210 °C, 膜层厚度为 50 cycles (6.1 nm)。优化的“三明治”型复合膜层结构 Al₂O₃/MgO/Al₂O₃, 沉积循环次数分别为 5/50/20。在 550 V 电压下, 复合膜层的 MCP 增益较常规 MCP 提高了 3.9 倍, 应用于微通道板型光电倍增管 (MCP-PMT) 中, 工作电压从 1880 V 降低至 1740 V, 同时能量分辨率与峰谷比性能得到提升, 寿命达到 10 C/cm² 以上。**结论** 在 MCP 上制作 Al₂O₃/MgO 复合膜层材料, 能够有效提高其增益, 降低应用器件的工作电压, 同时延长 MCP 寿命。采用 Al₂O₃ 膜层进行封装保护, 对于 MgO 材料应用于 MCP 等光电探测元器件有非常重要的作用, 同时 MgO 材料的应用可拓展 MCP 在探测活性离子等方面的应用。

关键词: 微通道板 (MCP); 氧化镁; 氧化铝; 封装; 复合膜层; 原子层沉积 (ALD); 高增益; 长寿命

中图分类号: TN223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)06-0199-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.06.021

Effect of Al₂O₃/MgO Composite Layer on the Properties of Microchannel Plate

ZHANG Zheng-jun, QIU Xiang-biao, QIAO Fang-jian, CONG Xiao-qing,
LI Jing-wen, REN Ling, WANG Peng-fei

(North Night Vision Tech Corp Ltd., Nanjing 211106, China)

ABSTRACT: To improve the performance of microchannel plate (MCP) such as gain and lifetime, in this paper, Al₂O₃/MgO composite layer materials are deposited by Atomic Layer Deposition (ALD) technique in MCP. The composite layer deposited in the channel wall with large aspect ratio (40:1) can increase the second electron emission coefficient of the channel wall. Magnesium oxide has a high secondary electron yield and has good application prospect in photoelectric detection devices. However, magnesium oxide is easy to deliquesce in air and has poor stability, which is an urgent problem to be solved. In this

收稿日期: 2020-07-17; 修订日期: 2020-09-07

Received: 2020-07-17; Revised: 2020-09-07

作者简介: 张正君 (1972—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微通道板制造技术及其应用。邮箱: julle4466@163.com

Biography: ZHANG Zheng-jun (1972—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: micro-channel plate (MCP) manufacturing technology and application. E-mail: julle4466@163.com

引文格式: 张正君, 邱祥彪, 乔芳建, 等. Al₂O₃/MgO 复合膜层对微通道板性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 199-205.

ZHANG Zheng-jun, QIU Xiang-biao, QIAO Fang-jian, et al. Effect of Al₂O₃/MgO composite layer on the properties of microchannel plate[J]. Surface technology, 2021, 50(6): 199-205.

paper, ALD-MCP with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite layer was proposed so that MgO layer can be protected by Al_2O_3 layer. The thickness nonuniformity of MgO film in the channel with large aspect ratio can reach 3.8% by optimizing the deposition process. The effects of film thickness and deposition temperature on the gain of MCP and the operating voltage of MCP-PMT (gain@ 10^7) were studied to obtain the best film fabrication process. The ALD-MCP with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite layer can be stable storage for 14 days in the nitrogen cabinet by the surface protection of 20 cycles Al_2O_3 . The optimum film deposition process of MgO: deposition temperature is 210 °C, thickness of 50 cycles (6.1 nm). The gain (@550 V) of the ALD-MCP with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (5/50/20) composite layer deposited by ALD can be increased by 3.9 times. When the ALD-MCP coated with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite layer is used in MCP-PMT, the performance of MCP-PMT improved significantly, including the operating voltage, the peak-valley ratio, pulse height resolution and lifetime. The operating voltage decrease from 1880 V to 1740 V and the output charge can reach 10 C/cm². Applied $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ composite layer in MCP can effectively improve the gain, reduce the operating voltage of the device and extend the lifetime. The use of Al_2O_3 film layer for encapsulation protection is very important for the application of MgO materials in MCP and other photoelectric detection components. At the same time, the deposition of MgO matrix composite layer in MCP can also expand the application of MCP in detecting active ions.

KEY WORDS: micro-channel plate; magnesium oxide (MgO); alumina; encapsulation; composite layer; atomic layer deposition; high gain; long life time

微通道板 (Micro-channel Plate, MCP) 是由多达数百万 (200 万~600 万) 个相互平行的通道式电子倍增器排列而成的二维电子倍增器阵列, 具有增益高、体积小、时间特性好、空间分辨能力高、耐强磁场等优点。除用于微光像增强器之外, 也作为核心放大器用于多种领域, 如空间粒子探测、离子探测、中微子探测用光电倍增管等^[1-5]。随着中微子探测用 MCP-PMT 等新应用对于 MCP 增益、寿命等性能的要求越来越高, 常规 MCP 难以满足。将原子层沉积技术 (Atomic Layer Deposition, ALD) 应用于微通道板的制造技术中, 对于提升微通道板的增益、寿命等性能有明显的作用, 是近年来 MCP 领域的研究热点。美国芝加哥大学、伯克利、阿贡国家实验室、费米国家加速器实验室、INCOM 公司等高校与研究机构联合开展的 Large Area Picosecond Photo-Detectors (LAPPDTM) 项目, 基于硼硅酸盐玻璃空心管工艺制作出不含铅 MCP 基底, 使用 ALD 技术沉积电阻层与发射层, 其中电阻层为 $\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$, 发射层材料为 Al_2O_3 、 MgO ^[6-8]。

国内也进行了相应的 ALD-MCP 的研究。在无功能 MCP 基底上同时制作电阻层与发射层方面, 开展了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ 电阻层+ Al_2O_3 发射层的研究, 但是由于存在增益较低等问题, 无法得到成熟的应用^[9-10]。关于在现有 MCP 基础上, 仅使用 ALD 技术制作高二次电子发射层以增强 MCP 性能方面, 研究者们开展了不同膜层材料二次电子发射系数的检测以及工艺条件的影响分析, 用于 MCP 中的工艺研究等相关研究^[11-15]。作为发射层材料, 研究较多的为 Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 等材料。受环境适应性、膜层制备工艺难度、二次电子发射系数的大小等各方面的综合影响, 首先实现成熟应用的是沉积 Al_2O_3 膜层材料的 ALD-MCP^[16-17]。为了进一步提升 ALD-MCP 的增益, 需要提高 ALD

制作功能层的二次电子发射能力。相较于 Al_2O_3 材料而言, MgO 材料具有更高的二次电子发射系数, 国内相关课题组针对 MgO 材料的二次发射特性进行了研究^[18-21], 但尚未应用于 MCP 中。为了进一步提升增益等性能, 基于 MgO 材料, 本文开展了沉积复合膜层 ALD-MCP 的制备以及其应用研究。

1 复合膜层 ALD-MCP 制备及测试表征

1.1 复合膜层结构设计

MgO 易吸水潮解, 使用 ALD 技术在 MCP 通道内壁单独沉积 MgO 膜层, 在产品周转及存储过程中, 无法完全避免 MgO 与空气接触, 会导致产品增益明显下降。为此, 本文设计了复合膜层结构, 如图 1 所示。

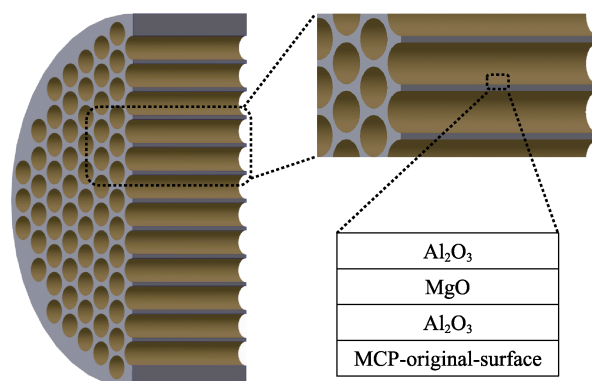


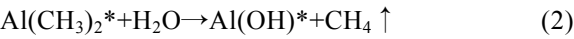
图 1 沉积复合膜层 MCP 结构
Fig.1 Structure of ALD-MCP coated by composite layer

复合膜层结构设计为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 。沉积 MgO 之前, 先沉积 Al_2O_3 作为缓冲层, 避免 MCP 通道内壁表面成分复杂, 影响 MgO 膜层的均匀性。沉积 MgO 膜层之后, 再沉积 Al_2O_3 膜层进行封装, 尽

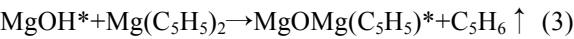
可能隔绝 MgO 与空气,提高复合膜层的环境适应性。

1.2 膜层沉积条件

复合膜层包括 Al₂O₃ 与 MgO, 其中, 沉积 Al₂O₃ 膜层使用的前驱体为三甲基铝 (Trimethylaluminium, TMA) 与水 (H₂O), 反应方程式为:



沉积 MgO 膜层使用的前驱体为双(环戊二烯基)镁 (Mg(Cp)₂) 与水 (H₂O), 反应方程式为:



试验使用 BENEQ 公司的 TFS 500 型 ALD 设备。微通道板基底尺寸: 直径 $\phi 50$ mm, 板厚 0.48 mm, 孔径 12 μm , 斜切角 12.5°, 开口面积比 70%, 单片 MCP 表面积约 $2.2 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 。单批次沉积 11 片 MCP。由于 MCP 具有 40 : 1 的长径比, 且 11 片 MCP 表面积巨大, 为实现通道内沉积厚度均匀的膜层, 沉积条件与平面基底存在较大的差异: 源的用量大, 吹扫时间长。经优化后的沉积条件: Al₂O₃ 膜层为 TMA/N₂/H₂O/N₂—1/90/0.8/90 s, MgO 膜层为 Mg(Cp)₂/N₂/H₂O/N₂—4/90/0.8/180 s。双 (环戊二烯基) 镁固态源加热温度为 80 $^{\circ}\text{C}$, 液态源温度为 24 $^{\circ}\text{C}$, 反应腔温度为 180~300 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 通道内 MgO 膜层均匀性检测

根据上述沉积工艺条件,设置沉积温度为 210 $^{\circ}\text{C}$, 沉积 Al₂O₃ 5 cycles+MgO 250 cycles。使用扫描电子显微镜 (HITACHI Regulus 8220) 检测通道内壁膜层厚度均匀性: 分别从不同位置取 2 片 MCP (A、B), 每片 MCP 上随机取 2 个位置 (1、2), 剖开后, 检测通道内膜层沉积厚度, 从上至下依次取 5 个检测点, 如图 2 所示, 检测沉积膜层厚度。根据 SEM 检测结果 (表 1), 沉积膜层厚度不均匀性为 3.8%, 生长速率为 0.122 nm/cycle。

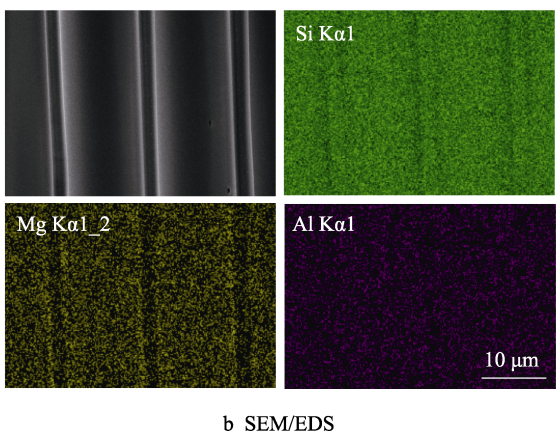
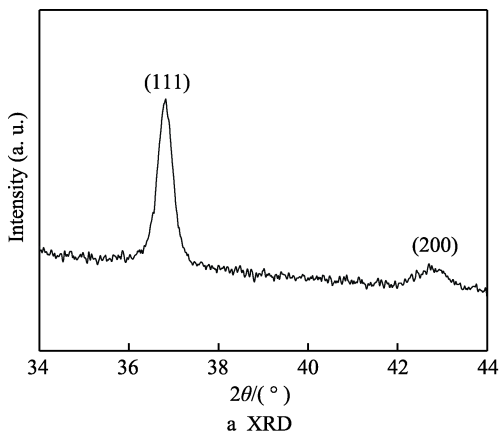


图 3 膜层结构表征
Fig. 3 Characterization of coating

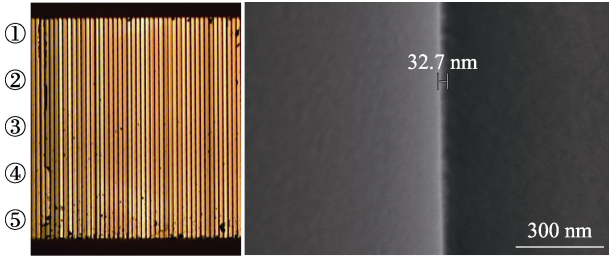


图 2 通道内检测位置
Fig. 2 Test position in MCP channel

表 1 膜层厚度
Tab.1 Film thickness

	nm				
MCP	①	②	③	④	⑤
A-1	30.8	32.7	32.7	31.8	31.8
A-2	30.3	31.8	31.7	30.8	31.4
B-1	30.8	31.7	32.7	30.7	32.4
B-2	31.8	30.6	31.4	30.5	32.1

1.4 沉积复合膜层结构表征

使用 XRD、SEM/EDS 等检测设备对沉积的膜层结构、成分进行表征分析。在硅片上沉积 2000 循环 MgO 膜层, 厚度约 244 nm, 沉积温度为 210 $^{\circ}\text{C}$, 分析其结晶情况。从图 3a 中可以看出, 其存在(111)晶面特征峰与(200)晶面特征峰, 沉积的 MgO 为多晶结构, 且具有一定的择优取向。沉积 Al₂O₃/MgO/Al₂O₃ 复合膜层的循环次数分别为 5/50/20, 使用 SEM 检测膜层结构以及元素成分分布。从图 3b 中可以看出, Mg 元素的分布与通道壁的形状非常契合。由于 MCP 基底材料中无 Mg 元素, Mg 元素以沉积膜层的状态分布于通道内壁, 而在通道壁的断面处基本无分布, 证明 Mg 元素的分布状态符合预期。Si 元素分布中, 通道壁的两个侧壁 Si 含量较少。由于 MCP 基底中本身存在 Al 元素, 与 Mg 相比, 元素分布不够清晰。

2 结果与讨论

2.1 复合膜层 ALD-MCP 环境适应性

为验证封装层 Al_2O_3 所能起到的作用, 在 MCP 基底上沉积 2 种复合膜层: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ —5/50 cycles, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ —5/50/20 cycles。沉积温度均为 210°C 。检测 2 种复合膜层 ALD-MCP 存储于洁净空气 (相对湿度为 30%~40%) 以及氮气柜 (相对湿度为 0~10%) 中, 增益 (@550 V) 随存储时间的变化, 检测结果如图 4 所示。

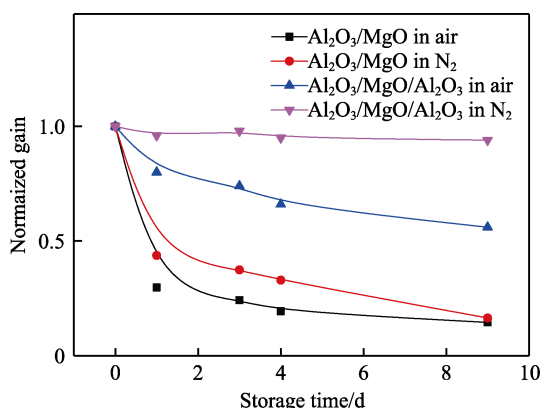


图 4 沉积复合膜层 ALD-MCP 增益随存储时间的变化
Fig. 4 Gain change with storage time of composite films coated ALD-MCP

从图 4 可以看出, 未沉积 Al_2O_3 封装层的 ALD-MCP, 即使存储在比较干燥的氮气柜中, 增益仍然出现了急剧的衰退, 不能满足 MCP 生产过程的周转需求。在 MgO 外层制作了 Al_2O_3 封装层的 ALD-MCP, 存储于干燥的氮气柜中, 随存储时间的延长, 增益变化较小。

2.2 增益与膜层厚度的关系

采用 ALD 技术沉积功能膜层的 MCP, 膜层厚度对于增益有着直接的影响。为了保证沉积复合膜层稳定可控, 且具备一定的环境适应能力, 缓冲层 Al_2O_3 膜层为 5cycles, 封装层 Al_2O_3 膜层为 20cycles。为分析不同 MgO 膜层厚度对增益的影响, 在温度为 210°C , MgO 循环次数分别为 20、30、40、50、60、70 的条件下沉积膜层, 测试 550 V 工作电压下的 MCP 增益以及双片叠加应用于微通道板型光电倍增管 (MCP-PMT) 增益达到 10^7 时的工作电压。

从图 5 测试数据中可以看出, 单片 MCP 在沉积 MgO 为 40~50 cycles 时, 增益达到最大值。相应沉积工艺的 MCP 用于 MCP-PMT 中时, 工作电压也趋于最低, 为 1700 V 左右。ALD- MgO 材料基础性能检测研究工作表明, 膜层厚度为 30 nm、入射电子能量为 550 eV 时, 可达到最佳二次电子发射系数 6.15^[15], 而在 MCP 增益性能测试中得到的最佳膜层厚度薄很

多。主要原因在于, 微通道板通道内电子级联倍增过程中, 电子入射能量较低, 仅为几十电子伏特, 入射深度有限, 增大膜层厚度并不能增大发射系数, 且膜层太厚会影响电子补充能力, 影响二次电子发射。

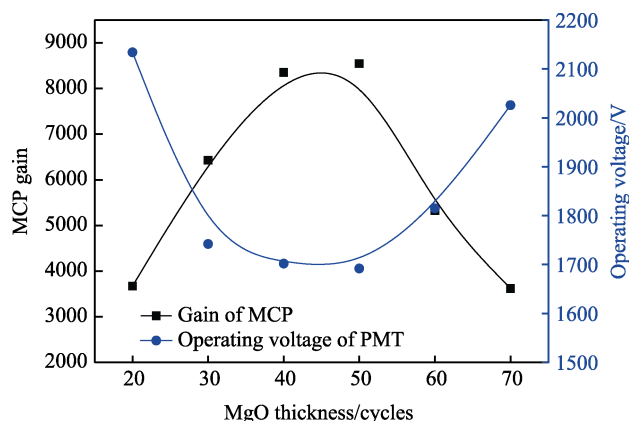


图 5 MCP 增益、MCP-PMT 工作电压与 MgO 厚度的关系
Fig. 5 MCP gain and MCP - PMT voltage vs MgO thickness

2.3 增益与膜层沉积温度的关系

沉积温度是影响膜层质量的重要因素, 需要通过实验研究最佳沉积温度。ALD 制备 MgO 与 Al_2O_3 材料, 在一定的温度窗口内, 生长速率基本保持稳定^[22]。不同沉积温度时, 复合膜层的厚度基本一致。在温度窗口内, 不同沉积温度 (180°C 、 210°C 、 240°C 、 270°C 、 300°C) 下, 沉积 MgO 循环次数 50 cycles, 厚度约为 6.1 nm, 复合膜层总厚度约为 8.6 nm。针对不同沉积温度试验板, 测试 MCP 550 V 工作电压下的增益以及双片叠加应用于 MCP-PMT 中增益达到 10^7 时的整管工作电压, 测试结果如图 6a 所示。

沉积复合膜层 MCP 增益随沉积温度而先上升、后下降, 最佳的沉积温度在 210°C 左右。相应的, MCP-PMT 工作电压在 210°C 左右达到最低。最佳沉积温度与 MgO 材料本身性能有很大的关系。沉积温度低于 200°C 时, 沉积的 MgO 膜层中含有较多的 C 和 H 杂质^[22], 对二次电子发射特性有一定的影响; 沉积温度过高时, 测得 MCP 通道内沉积的复合膜层表面粗糙度变差, 如图 6b 所示。沉积温度 300°C 时, 粗糙度上升至 0.65 nm, 从而影响了发射层的二次电子发射系数。分析认为, 是由于 MgO 具有结晶性, 在不同的沉积温度下, 氧化镁膜层晶粒状态 (如晶粒大小、分布状态、结晶程度) 存在一定的差异, 导致粗糙度变差。

2.4 复合膜层 ALD-MCP 在光电探测领域的应用

本文研究的复合膜层 ALD-MCP, 在用于微弱信号探测时, 具有比常规 MCP 和仅沉积 Al_2O_3 的

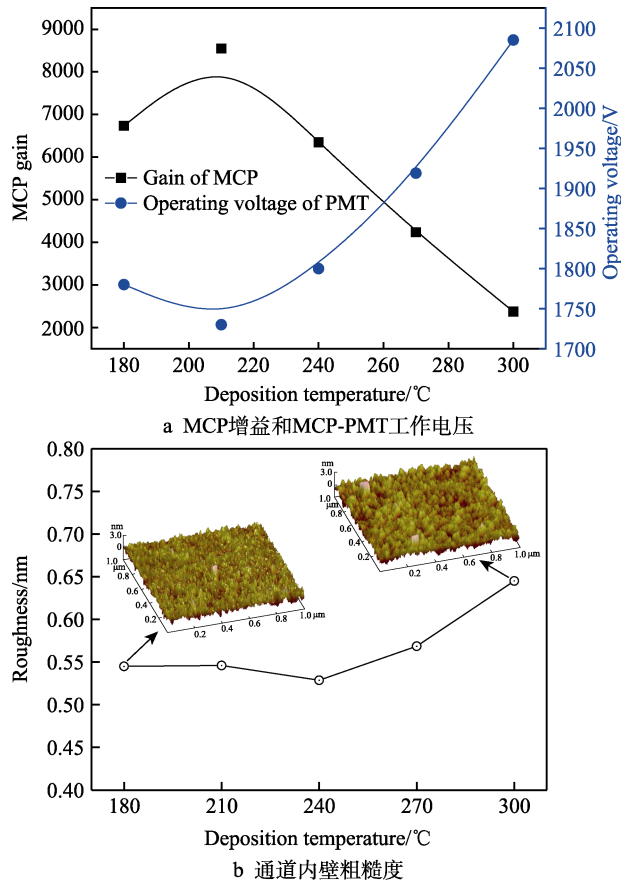


图 6 不同沉积温度下 MCP 增益、MCP-PMT 工作电压及通道内壁粗糙度
Fig. 6 (a) MCP gain and MCP-PMT operating voltage and (b) roughness of the inner wall at different deposition temperatures

ALD-MCP 更优异的性能, 工作电压低, 峰谷比高, 能量分辨率好。

2.4.1 不同种类 MCP 的性能

测试常规 MCP、沉积 Al_2O_3 ALD-MCP 以及沉积 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合膜层 ALD-MCP 的增益随工作电压的变化, 结果如图 7 所示。可以看出, 采用 ALD 技术制备功能膜层可大幅提升 MCP 的增益性能。沉积复合膜层具有最高的增益, 分别是常规 MCP、沉

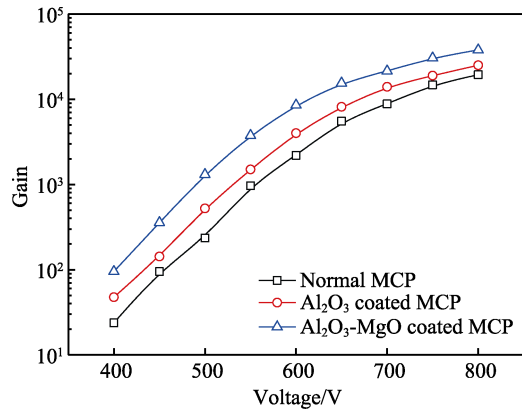


图 7 沉积不同膜层 MCP 增益随工作电压的变化
Fig. 7 Gain vs voltage of MCP coated by different films

积 Al_2O_3 ALD-MCP 的 3.9、2.5 倍 (@550 V)。
2.4.2 沉积不同膜层 ALD-MCP 制管后的性能对比
使用不同种类 MCP 进行微通道板型光电倍增管制管试验, 测试 MCP 对于 MCP-PMT 的性能影响, 测试结果见表 2。

表 2 沉积不同膜层 ALD-MCP 制管性能
Tab.2 MCP-PMT performance with ALD-MCP coated by different films

ALD-coated	H_V/V	P/V	σ
Al_2O_3	1880	3.5	35
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	1740	6.5	28

沉积复合膜层材料的 MCP 用于 MCP-PMT 时, 与单独沉积 Al_2O_3 材料的 MCP 相比, 工作电压显著降低, 峰谷比上升, 能量分辨率更好。工作电压的下降, 由 MCP 的增益上升直接决定。峰谷比以及能量分辨率性能的提升, 原因在于复合膜层材料二次电子发射系数更高, 工作状态稳定, 在整个信号放大的过程中, 前半程信号增加得更快, 使整体增益更加稳定, 减小了增益弥散程度。国外 LAPPD 项目采用 ALD 制作电阻层+MgO 发射层的 MCP 应用于 MCP-PMT, 增益达到 10^7 时, MCP 工作电压为 1850 V, 峰谷比低于 3^[23]。与国外报道结果相比, 本文研究的 ALD-MCP 增益更高, 应用于 MCP-PMT 时, 工作电压更低, 峰谷比更好。

2.4.3 环境适应性

为了验证研制的沉积复合膜层 ALD-MCP 随存储时间的变化, 试验了从沉积膜层到装管间隔时间对其性能的影响。以双片 MCP 叠加增益达到 10^7 时工作电压的变化反映 MCP 增益的变化情况, 分析 ALD-MCP 是否受到环境影响, 结果如图 8 所示。从制管数据分析, 沉积复合膜层后, 在 14 d 内, 对制管后的工作电压并无明显的影响。

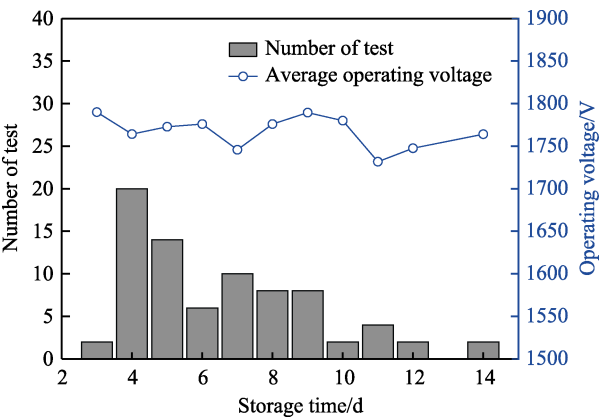


图 8 MCP-PMT 工作电压随 ALD-MCP 存储时间的变化
Fig. 8 MCP-PMT operating voltage vs storage time of ALD-MCP

2.4.4 寿命检测

针对沉积复合膜层 ALD-MCP, 制管后进行加速寿命试验, 测试数据如图 9 所示。在累计输出电荷量达到 160 C 以上时 ($>10 \text{ C/cm}^2$), 增益并无明显的下降, 整体波动范围在 $\pm 10\%$ 以内。

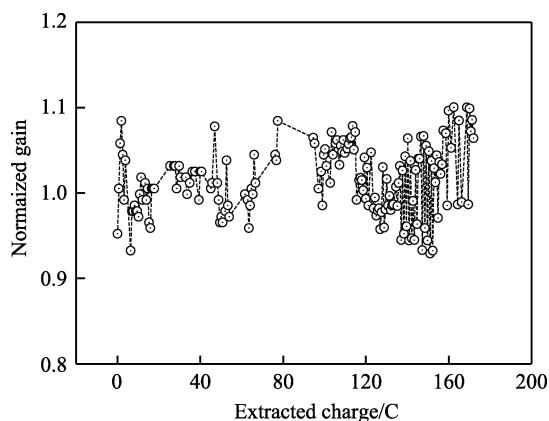


图 9 双片 ALD-MCP 寿命检测
Fig.9 Life test of ALD-MCP

3 结论

1) 采用 ALD 技术制作 Al_2O_3 膜层 (20 cycles) 对 MgO 膜层进行封装, 利用 ALD 技术极佳的三维贴合性, 将 MgO 的所有外表面进行覆盖, 隔绝空气。利用材料 Al_2O_3 的稳定性, 大幅增加了易潮解的超薄 MgO 薄膜的稳定性。

2) 设计“三明治”型复合膜层结构 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, 利用 MgO 材料的高二次电子发射特性, 大幅提高了 ALD-MCP 的增益, 从而显著降低其用于 MCP-PMT 中时的工作电压。同时, 提高 ALD 复合膜层的二次电子发射系数, 可以提高单次电子倍增的稳定性, 降低波动性, 从而可显著提高增益一致性, 提高峰谷比以及能量分辨率性能。

3) “三明治”型复合膜层结构 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, 可以实现具有更高二次电子发射能力的 MgO 材料在 MCP 中的稳定可靠使用, 为光电探测领域中其他应用 MgO 材料提供重要的借鉴。

参考文献:

- [1] 潘京生. 微通道板及其主要特征性能[J]. 应用光学, 2004, 25(5): 25-29.
PAN J S. Microchannel plates and its main characteristics[J]. J applied optics, 2004, 25(5): 25-29.
- [2] WANG Y M, TIAN Y, YANG Y G, et al. Detection efficiency evaluation for a large area neutron sensitive microchannel plate detector[J]. Chinese physics C, 2016, 40(9): 096004.
- [3] 王馨悦, 张爱兵, 孔令高, 等. 嫦娥一号卫星太阳风离

子探测器离子流量反演太阳风参数与初步结果分析[J]. 空间科学学报, 2013(2): 17-24.

WANG X Y, ZHANG A B, KONG L G, et al. In-flight experiment of solar wind ion detectors on Chang'E-1 and the solar wind near the moon[J]. Chin j space sci, 2013(2): 17-24.

- [4] 潘京生. 空间和时间灵敏的微通道板光子探测器[J]. 红外技术, 2018, 40(11): 5-12.

PAN J S. Microchannel plate photon detector with spatial and temporal sensitivity[J]. Infrared technology, 2018, 40(11): 5-12.

- [5] LUO F J, HENG Y K, WANG Z M, et al. PMT overshoot study for the JUNO prototype detector[J]. Chinese physics C, 2016, 40(9): 096002.

- [6] CRAVEN C, BENNIS D C, BOND J L, et al. Large area microchannel plates for LAPPD™[C]// Proceedings of technology and instrumentation in particle physics 2014. Amsterdam: [s. n.], 2014.

- [7] JOKELA S J, VERYOVKIN I V, ZINOVEV A V, et al. Secondary electron yield of emissive materials for large-area micro-channel plate detectors: Surface composition and film thickness dependencies[J]. Physics procedia, 2012, 37: 740-747.

- [8] MANE A U, PENG Q, ELAM J W, et al. An atomic layer deposition method to fabricate economical and robust large area microchannel plates for photodetectors[J]. Physics procedia, 2012, 37: 722-732.

- [9] YAN B, LIU S, HENG Y. Nano-oxide thin films deposited via atomic layer deposition on microchannel plates[J]. Nanoscale research letters, 2015, 10(1): 162.

- [10] 王国政, 袁云龙, 杨超, 等. 硅微通道板微加工技术研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(9): 143-149.

WANG G Z, YUAN Y L, YANG C, et al. Micro-machining processes for Si microchannel plates[J]. Acta armamentarii, 2018, 39(9): 143-149.

- [11] LIN Y, GU Y, YAN B, et al. Secondary electron emissive thin film fabricated by atomic layer deposition[J]. IOP conference series materials science and engineering, 2019, 612: 032103.

- [12] GUO J J, WANG D, XU Y T, et al. Secondary electron emission characteristics of Al_2O_3 coatings prepared by atomic layer deposition[J]. AIP adv, 2019(9): 1-7.

- [13] CAO W, ZHU B, BAI X, et al. High-sensitivity and long-life microchannel plate processed by atomic layer deposition[J]. Nanoscale research letters, 2019, 14(1): 153-172.

- [14] 丛晓庆, 邱祥彪, 孙建宁, 等. 原子层沉积法制备微通道板发射层的性能[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 217-222.

CONG X Q, QIU X B, SUN J N, et al. Properties of microchannel plate emission layer deposited by atomic layer deposition[J]. Infrared and laser engineering, 2016, 45(9): 217-222.

- [15] GUO J J, WANG D, WEN K L, et al. Theoretical and experimental investigation of secondary electron emission

- characteristics of MgO coating produced by atomic layer deposition[J]. *Ceramics international*, 2020, 46(6): 8352-8357.
- [16] 孙建宁, 任玲, 丛晓庆, 等. 一种大尺寸微通道板型光电倍增管[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 11-15.
SUN J N, REN L, CONG X Q, et al. Large-area micro-channel plate photomultiplier tube[J]. *Infrared and laser engineering*, 2017, 46(4): 11-15.
- [17] YANG Y, YAN B, LIU S, et al. MCP performance improvement using alumina thin film[J]. *Nuclear instruments & methods in physics research*, 2017, 868: 43-47.
- [18] 魏强, 吴胜利, 付马龙, 等. 电子轰击下 MgO 薄膜的二次电子效应的衰减机理[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(11): 125-129.
WEI Q, WU S L, FU M L, et al. Attenuation mechanism of secondary electron effect of MgO film under electron bombardment[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(11): 125-129.
- [19] 李洁, 胡文波, 华星, 等. MgO/Au 复合薄膜的表面形貌及其二次电子发射特性的研究[C]// 中国电子学会真空电子学会第二十届学术年会. 厦门: 中国电子学会, 2016.
LI J, HU W B, HUA X, et al. Surface morphology and secondary electron emission characteristics of MgO/Au composite films[C]// 20th annual conference of vacuum electronics branch of Chinese Society of Electronics. Xiamen: Chinese Society of Electronics, 2016.
- [20] 李雅娟, 陈学康, 王骥, 等. 离子轰击 MgO 薄膜二次电子发射的研究[J]. *真空与低温*, 2013(3): 21-26.
LI Y J, CHEN X K, WANG J, et al. Research of ion-induced secondary electron emission from mgo film[J]. *Vacuum & cryogenics*, 2013(3): 21-26.
- [21] 杜威志, 王多书, 李晨, 等. 二次电子发射系数的光电测试方法研究[J]. *真空与低温*, 2014(6): 26-28.
DU W Z, WANG D S, LI C, et al. Study of secondary electron emission coefficient by photoelectric test method [J]. *Vacuum & cryogenics*, 2014(6): 26-28.
- [22] PUTKONEN M, SAJAVAARA T, NIINISTO L, et al. Enhanced growth rate in atomic layer epitaxy deposition of magnesium oxide thin films[J]. *Journal of materials chemistry*, 2000, 10(8): 1857-1861.
- [23] SIEGMUND O H W, RICHNER N, GUNJALA G, et al. Performance characteristics of atomic layer functionalized microchannel plates[C]// Proceedings of UV, X-ray, and Gamma-ray space instrumentation for astronomy XVIII. [s. l.]: SPIE, 2013.

(上接第 198 页)

- [16] 田静. 多色系热反射型隔热涂料的制备及其性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
TIAN Jing. Preparation and performance of multi-color heat-reflective insulation coatings[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.
- [17] 刘钧, 鲍铮, 边佳燕. 空心玻璃微珠-氧化石墨烯协同增强聚氨酯泡沫的制备与压缩性能[J]. *材料导报*, 2018, 32(S2): 419-424.
LIU Jun, BAO Zheng, BIAN Jia-yan. Compressive properties and preparation of hollow glass microsphere-graphene oxide synergistic enhanced polyurethane foam[J]. *Materials review*, 2018, 32 (S2): 419-424.
- [18] LEONID A D, JAONA H R, DOMINIQUE B. Infrared radiative properties of polymer coatings containing hollow microspheres[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2006, 50(7): 1516-1527.
- [19] 章小鹏. 玻璃微珠表面改性及其应用的研究[J]. *科技创新与应用*, 2012(18): 17-18.
ZHANG Xiao-peng. Study on surface modification and application of glass microspheres[J]. *Technology innovation and application*, 2012(18): 17-18.
- [20] AN Yan-yan, ZHENG Huai-li, SUN Qiang, et al. Two-step synthesis of a single-layer grafting self-floating adsorbent for anionic dyes adsorption, surface separation and concentration[J]. *Journal of hazardous materials*, 2019, 384: 121262.
- [21] 王鹏. 空心玻璃微珠表面改性对固体浮力材料性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
WANG Peng. The influence of HGM surface modification on solid buoyancy material [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [22] 曾鑫, 南晋一, 朱文旭. 水性高光泽耐候含氟树脂的制备及其性能[J]. *上海涂料*, 2019, 57(4): 14-18.
ZENG Xin, NAN Jin-yi, ZHU Wen-xu. Preparation and properties of waterborne high gloss and weather resistant fluororesin[J]. *Shanghai coatings*, 2019, 57(4): 14-18.
- [23] 王雪, 王少凯, 黄蕊, 等. 超疏水涂料的制备及性能研究[J]. *化学与黏合*, 2017, 39(5): 313-317.
WANG Xue, WANG Shao-kai, HUANG Rui, et al. Study on the preparation and properties of super hydrophobic coatings[J]. *Chemistry and adhesion*, 2017, 39(5): 313-317.
- [24] 吕维华, 伍家卫, 甘黎明, 等. 交联型超疏水耐高温氟碳涂料制备与性能研究[J]. *中国建材科技*, 2019, 28(5): 89-91.
LV Wei-hua, WU Jia-wei, GAN Li-ming, et al. Study on preparation and properties of crosslinked super-hydrophobic and high temperature fluorocarbon coating[J]. *China building materials science and technology*, 2019, 28(5): 89-91.
- [25] 沈宇新. 低表面能氟、硅改性的树脂防污涂料的制备与表征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
SHEN Yu-xin. Preparation and characterization of anti-fouling coatings with low surface energy modified by fluorine/silicone[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.