

# 微通道板电子透射膜及其粒子透过特性的研究

端木庆铎, 姜德龙, 田景全, 李 野, 高延军, 王国政, 吴 奎, 富丽晨

(长春理工大学, 吉林长春 130022)

**摘 要:** 文中介绍了微光像管中微通道板电子透射膜及其形成技术, 研究了粒子(电子和离子)透过特性. 给出了死电压概念、死电压曲线、死电压与膜厚关系曲线以及半视场对比测试结果; 给出了采用 XPS 进行成分分析的结果. 介绍了电子透射膜的离子透过特性, 给出了表征膜层对离子阻止能力的离子透过率的概念, 提出了离子透过率测试的原理方案和相关技术等问题.

**关键词:** 微通道板; 电子透射膜; 免污染成膜工艺; 死电压; 离子透过率

**中图分类号:** TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 05-0904-04

## MCP Electron Transmission Film and Characteristics of Particles Transmittance

DUANMU Qing-duo, JIANG De-long, TIAN Jing-quan, LI Ye, GAO Yan-jun, WANG Guo-zheng, WU Kui, FU Li-chen

(Changchun University of science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract:** The MCP electron transmission film in low-level-light imaging tube and its process techniques were introduced in this paper. The electron and ion transmittance of this film was studied. The concept of dead voltage of MCP with film was discussed. The dead voltage curve, and the relation between dead voltage and thickness of film were tested. The results of performance testing comparisons were presented. The composition of film was analyzed by XPS. Through theoretical analysis of ion transmittance characteristics for MCP electron transmission film, we proposed the concept characterized the inhibition ability of film from ion transmitting, testing theorem and related techniques for ion transmittance measuring.

**Key words:** microchannel plates; electron transmission film; without pollution film forming process; dead voltage; ion transmittance

## 1 引言

微通道板(MCP-microchannel plates)是高性能光电子成像器件的核心部分之一<sup>[1,2]</sup>. 像管在正常工作时由于MCP输出端高密度电子云在后近贴区强电场作用下,使残余气体分子电离,所产生的正离子向其输入端运动,其中有的直接反馈到光电阴极,有的与通道壁碰撞,激发出二次电子又反向倍增;有的与通道壁碰撞电离了吸附的气体分子,所产生的正离子继续向通道输入端运动,甚至直接轰击光电阴极,总效果是引起光电阴极附加的光电发射,致使荧光屏上出现离子斑和附加噪声,尤其严重的是正离子的轰击改变了光电阴极的铯氧激活层结构,致使光电发射灵敏度下降,使用寿命变短. 近期国外文章报导,其寿命100小时左右<sup>[3]</sup>. 为此,在MCP输入面上制作一层很薄的介质膜,其能使大量电子透过,并能有效地阻止正离子进入前近贴区,所以称之为电子透射膜也称离子壁垒膜,其能保护光电阴极免受正离子轰击,致使像管延长了使用寿命,图像背景也有所改善<sup>[4]</sup>.

我们采用传统工艺<sup>[5]</sup>(直流离子溅射或磁控溅射法)在

MCP输入面上制作了一层3-4nm的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>电子透射膜,并在高性能像管的试制中得到了应用,但该工艺中存在着严重碳污染问题. 随着器件性能的提高,对膜层质量提出了更高的要求,其中电子透射膜制作工艺中防止碳对MCP的污染已成为业内人士十分关注的主要问题,在此前提下,20世纪末期我们提出了电子透射膜形成工艺中MCP免污染新技术.

## 2 传统成膜技术

**成膜工艺:**在去离子水中MCP表面附有机载膜及低温烘干;在氩气辉光放电气氛中在有机载膜上溅射铝膜和强迫氧化;在真空中高温脱除有机载膜使Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜贴附在MCP输入面上.

**污染分析:**整个工艺中有机载膜始终与MCP密切接触,工艺中有机物分解的游离碳附在通道壁上,形成所谓的碳污染,严重的影响MCP的性能. 显然污染源是有机载膜,污染途径是其与MCP密切接触,这种污染在溅射铝膜时就已开始,尤其在有机载膜高温分解脱除过程中更为显著.

**综合效果:**对有膜和无膜MCP进行了对比测试,发现在

MCP工作电压为 900V 时,MCP 电子增益下降 15 - 20%;在 MCP 工作电压为 500V 时,体电阻增加 10 - 15%;在 MCP 工作电压为 1000V 时,暗电流下降 10%左右.

### 3 免污染成膜新技术

新技术是采用了两步成膜工艺,其基本特点是 MCP 不介入铝膜形成工艺;铝膜贴附时有机膜与 MCP 不直接接触,这就最大限度的减少了 MCP 被污染的几率.

在自持有有机膜上溅射铝膜:在去离子水中,在金属环上附有有机膜;以氩气为工作气体,利用磁控溅射法在有机膜上形成铝膜,如图 1 所示.

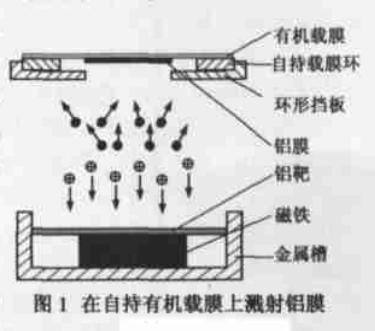


图 1 在自持有有机膜上溅射铝膜

铝膜的贴附:如图 2 所示,调节可调高度平盘使 MCP 与铝膜接触,系统抽真空,然后以氧气为工作气体,在辉光放电条件下,将铝膜贴附在 MCP 输入面上,同时完成铝膜的氧化(形成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜)和分解脱除有机载膜,生成的气态物质由真空系统排除,这样 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜层靠分子力就与 MCP 牢固地结合在一起了.

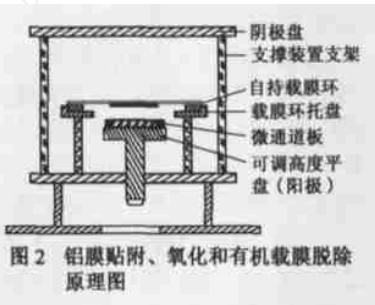


图 2 铝膜贴附、氧化和有机载膜脱除原理图

### 4 膜层的电子透过特性

#### 4.1 半视场对比实验

在 MCP 输入面上,一半带 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,另一半无膜,采用 MCP 特性测试的 UV 光电法<sup>[6]</sup>,通过实验进行观察与对比,由此可初步判断膜层厚度(d)、死电压(V<sub>e</sub>)大小、膜层均匀性、有无疵点和针孔等缺陷.图 3 和图 4 分别示出 UV 光电法装置原理和半视场对比实验中的荧光屏亮度分布与输入电子能量关系.由图 4 可见,当输入电压 V<sub>in</sub> <

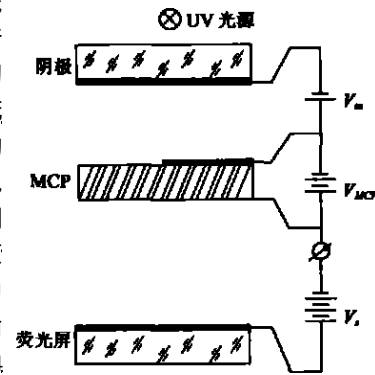


图 3 UV 光电法原理图

150V 时,有膜区对应的输出屏基本不亮;当 V<sub>in</sub> > 150V 时,输出屏的亮度随输入电子能量的增加而呈线性增加;当 V<sub>in</sub> > 700V 时,有膜区输出屏亮度与无膜区基本趋于一致.图 5 给出有膜和无膜区输出电流与输入能量间关系.由曲线可见,无膜区输出电流随输入电子能量的增加上升的很快,在 V<sub>in</sub> =

200V 左右时就达到饱和;而有膜区则截然不同,在膜厚为 3nm 时,当 V<sub>in</sub> 150V 以后开始有输出电流,至 700V 才达到饱和.

#### 4.2 全膜 MCP 电子透过特性和分析<sup>[4,5,7,8]</sup>

通过实验测量了全膜 MCP 输出电流与输入电子能量的关系,

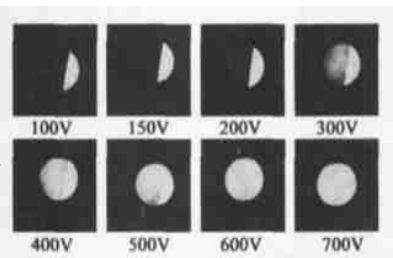


图 4 半膜 MCP 输出屏亮度分布与输入电子能量关系

如图 6 所示.此处引入死电压的概念,所谓死电压是描述电子透射膜阻止电子透过能力的物理量.这里给出的曲线直线部分延长线与电压轴的交点 V<sub>e</sub>,就是给定膜厚的死电压的数值.显而易见,如果电子能量大于死电压,其能透过膜层的几率将迅速增加.因此可以把死电压的大小作为膜层厚度的大致的量度,图 7 给出膜厚和死电压的关系.由图可见,二者呈非线性关系.其实入射电子与靶膜层的作用中,主要的是靶原子最外层电子或自由电子与入射电子发生散射,这种散射随着最外层电子数的增加而增加.从靶上射出的价电子和等离子区电子称为低能二次电子(< 50eV).每次相互作用,入射电子将失去 10 ~ 100eV 的能量.不经受散射作用的电子将穿透靶,其穿透几率有如下经验公式来描述: e<sup>-μ<sub>m</sub>t</sup>, 式中 μ<sub>m</sub> 为靶的质量衰减系数,单位为 cm<sup>2</sup>/g, μ<sub>m</sub> = 22/ E<sup>1.33/91</sup>, E 为入射电子能量,单位为 MeV, ρ 为靶的密度(g/cm<sup>3</sup>), t 为靶的厚度(cm).而经受散射的电子,在靶中经受多次散射,把能量都传给了内二次电子.由于靶很薄,这些内二次电子若发生在发射射程之内,只要其在垂直表面的动能分量大于该膜内的电子亲和势就可以脱离薄膜,与直接穿透的高能电子构成 MCP 的输入电子流,入射电子能量越高,膜越薄,或膜材料密度越低,直接穿透的几率越大,散射作用越少,所以有图 6 一组曲线.

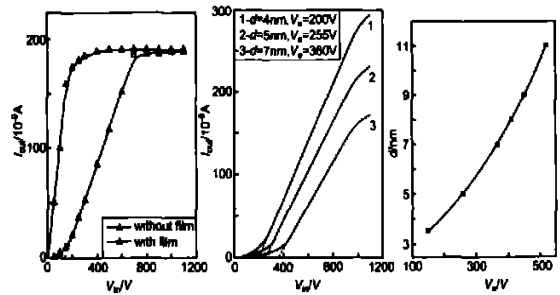


图 5 有膜区和无膜区输出电流与输入电子能量关系 图 6 全膜 MCP 输出电流与输入电子能量的关系(死电压曲线) 图 7 膜厚与死电压曲线的关系

### 5 膜层和 MCP 成分分析

#### 5.1 膜层成分分析

X 射线光电子能谱(XPS)分析结果(图 8 所示)表明:传统工艺和新工艺所制作的膜层都存在着 O、Al、C、N、Si 等元素,经 Ar 离子深度刻蚀分析,发现膜层内部和表层的成分基本一致.Al<sub>2p</sub>特征峰的位置表明,薄膜中 Al 是以 Al<sup>3+</sup> 的氧化物形式

存在的.传统方法制作的膜层中含 C 的质量数占 10.71%,新方法膜层中含 C 的质量数占 6.51%,很显然新方法含 C 量大降低了.

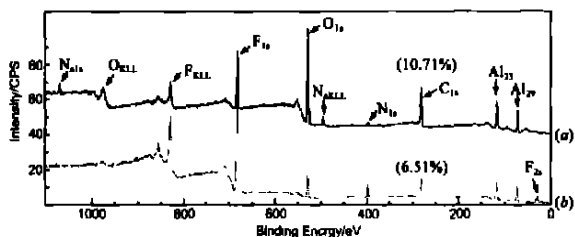


图 8 带膜 MCP 膜层表面 XPS 分析图

(a) 传统工艺样品; (b) 新工艺样品

### 5.2 MCP 成分分析

图 9 示出了 (a) 裸板 (无膜板)、(b) 新工艺成膜板和 (c) 传统工艺成膜板通道内壁微区 (110 $\mu$ m) 成分分析能谱. 从中可见,通道内富含 Na、O、F、Cs、Pb、C、Si、Ba 等元素. 其中三者含 C 的质量百分比分别为 4.54%、5.59%、6.68%. 结论是新工艺对通道壁污染 (含 C 量) 较传统工艺为小.

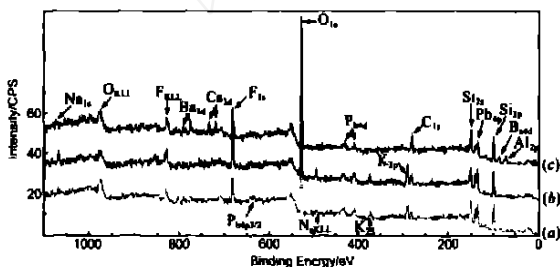


图 9 MCP 通道内壁微区 (110 $\mu$ m) XPS 分析

(a) 裸板; (b) 新工艺成膜板; (c) 传统工艺成膜板

## 6 带膜 MCP 的电特性

对新方法成膜后 MCP 的电子增益、体电阻、暗电流进行了对比测试,结果如表 1 所示 (输入电流密度 1.0  $\times 10^{-11}$  A/cm<sup>2</sup>). 总效果是  $V_{MCP} = 900$  V 时,电子增益降低 < 10%,体电阻和暗电流变化较小.

表 1 MCP 电子增益、体电阻和暗电流对比的测量结果

板号	体电阻 (M) ( $V_{MCP} = 900$ V)	电子增益 $G$ ( $V_{MCP} = 900$ V)	暗电流 $J_d$ ( $10^{-12}$ A/cm <sup>2</sup> ) ( $V_{MCP} = 1000$ V)	备注
02	321	13500	1.30	无膜
- 1	350	12850	1.20	有膜
02	299	14553	4.15	无膜
- 2	332	13852	3.98	有膜

## 7 膜层离子透过特性

### 7.1 离子透过率

关于电子透射膜离子透过特性至今无切题报导,所谓离子透过率,系指像管正常工作时,微通道板输入面带膜时反馈

到前近贴区的离子数 ( $N_2$ ) 与微通道板无膜时反馈到前近贴区的离子数 ( $N_1$ ) 之比,或指 MCP 带膜时前近贴区的离子流 ( $I_2$ ) 与无膜时前近贴区离子流 ( $I_1$ ) 之比. 但实际像管中反馈的正离子数很少 (离子流很弱),因此需接续单通道电子倍增器 (CEM Channel Electron Multiplier) 并接收记录其输出的电脉冲数.

### 7.2 测试方案及分析

如图 10 所示,UV 光透过电子透射膜激发前级 MCP-1 所产生的一次电子在通道中倍增后,进入 MCP-2 继续倍增,在其输出端形成的高密度电云在后近贴区强场作用下使残余的气体分子电离,所产生的正离子在电场作用下反向进入前级 MCP-1,或撞击 MCP-2 通道壁产生附加二次电子,产生的正离子仍向前级运动,在 MCP-1 通道中继续重复前述物理过程,整个过程产生的全部正离子仅有极少部分通过电子透射膜,由输入端带负电位的单通道电子倍增器接收,其激发出的电子经倍增后由快速响应的脉冲幅度分析器采集,计算机记录显示脉冲数为  $N_2' = G_0 N_2$ ; 现在用同样性能的 MCP 替代有膜 MCP-1,同样方法记录显示此无膜 MCP 的脉冲数为  $N_1' = G_0 N_1$ ,则  $N_2'/N_1'$  就是所求的离子透过率,其中  $G_0$  为 CEM 的电子增益. 装置中的 MCP-1 起到了像管中光电阴极的作用,两次测量中,必须调整 MCP-2 的输入电流相等;两块 MCP 间隙可适当加大,施加一定的电位差,起到准直正离子和降低电子弥散的作用.

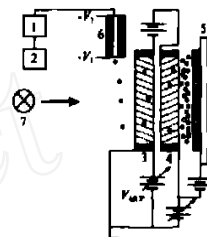


图 10 离子透过特性测量装置示意图

- 1-脉冲幅度分析器,
- 2-计算机,
- 3-前置带膜 MCP-1,
- 4-末级 MCP-2,
- 5-荧光屏
- 6-螺旋通道电子倍增器,
- 7-紫外光源

## 8 结论

通过 MCP 电子透射膜的工艺和性能研究,可以得出如下结论:

- (1) 电子透射膜的电子透过特性可用死电压描述,且死电压可作为膜厚的判据;
- (2) 电子透射膜膜层和 MCP 通道内壁成分的 XPS 分析结果表明:膜层主要成分是  $Al_2O_3$ ;免污染成膜新工艺对 MCP 和膜层的 C 污染小于传统工艺;
- (3) 制作 MCP 电子透射膜新工艺对 MCP 增益降低的影响小于 10%,对体电阻、暗电流影响更小,在这方面远远优于传统工艺;
- (4) 电子透射膜的离子透过率是表征膜层本身阻止离子透过能力的重要参数,给出的原理测试方案有实用意义;
- (5) 电子透射膜可使像管寿命延长至 10000 小时以上,但由于其对入射电子的吸收和散射,使得像管的信噪比和分辨力都有所降低,因此应在电子透射膜层的材料结构、成膜工艺等方面开展深入研究,在有效满足阻止正离子反馈的前提下,膜层再减薄、结构更致密.甚至研制无膜 MCP,探索无膜 MCP 的材料及制板工艺以及像增强技术等问题<sup>[10],[11]</sup>.

## 参考文献:

- [ 1 ] M J Iosue ,Phoenix A Z. Night vision device and method [ P ]. U S Patents ,US6198090B1 ,2001.
- [ 2 ] 邹异松编著. 电真空成像器件与理论分析 [ M ]. 北京:国防工业出版社,1989.  
Zou Yisong. Theoretical analysis on vacuum imaging devices [ M ]. Beijing :Defense Industrial Publisher ,1989.
- [ 3 ] E J Bender ,J P Estrera ,et al. High Reliability GaAs Image Intensifier with Unfilmed Microchannel plate [ J ]. SPIE ,1999 ,3729 :713 - 714.
- [ 4 ] Csorba P I. Recent advancements in the field of image intensification : the generation 3 wafer tube [ J ]. Applied Optics ,1979 ,18 ( 14 ) :2440 - 2444.
- [ 5 ] 田景全、姜德龙,等. 通道板非晶态  $Al_2O_3$  电子透射膜 [ J ]. 电子学报,1996 ,24 ( 8 ) :1 - 5.  
Tian Jingquan ,Jiang Delong ,et al. Amorphous  $Al_2O_3$  film of electron transmittance on microchannel plate [ J ]. Acta electronica sinica ,1996 ,24 ( 8 ) :1 - 5.
- [ 6 ] Tian Jingquan ,Zhang Baifu ,et al. UV-Photomethod for mesurement of MCP characteristic Parameters [ J ]. SPIE ,1990 ,1230 :228 - 230.
- [ 7 ] M I Korobov ,V I Borodenko ,et al. Passage of electrons through a dielectric film microchannel plate [ J ]. Sov J Opt Technol ,1988 ,55 :268 - 271.
- [ 8 ] A A Dyatchenko ,E A kolenko ,et al. Operating effectiveness of the barrier film of microchannel plate [ J ]. Sov J Opt Technol ,1987 ,54 :15 - 17.
- [ 9 ] 汲长松. 核辐射探测及其实验技术手册 [ M ]. 北京:中国原子能出版社,1979.  
Ji Changsong. Handbook of Nuclear Radiation Detecting and Experimental Technology [ M ]. Beijing :Publisher of Atomic Energy of China ,1979.
- [ 10 ] Timoty W Sinor Joseph P Estrare. An analysis of electron scattering in thin dielectric used as ion barriers in generation III image tubes [ J ]. SPIE ,2003 ,4096 :23 - 32.
- [ 11 ] 姜德龙,吴奎,等. 基于 BCGMCP 的四代微光像增强技术 [ J ]. 红外技术,2003 ,25 ( 6 ) :45 - 48.  
Jiang Delong ,Wu Kui ,et al. Generation 4 of low-level-light image intensifier based on BCGMCP [ J ]. Infrared technology ,2003 ,25 ( 6 ) :45 - 48.

## 作者简介:



cust. edu. cn.

端木庆铎 男,1956 年出生于吉林长春,1982 年毕业于长春精密机械学院光学材料专业,1991 年获军用光学专业硕士学位,2003 年获物理电子学专业博士学位,现任长春理工大学理学院院长,教授,博士生导师,长期以来一直从事光电子材料与器件方面的科研与教学工作。发表学术论文 50 余篇。E-mail : dmqd @ 163. com , duanmu @



姜德龙 男,1953 年出生于吉林省农安县,毕业于原长春光学精密机械学院电子技术专业,现在长春理工大学光电子技术研究所工作,高级工程师,多年来一直从事光电成像器件、光电子材料和薄膜等方面的科研和教学工作。