

〈微光技术〉

一种用于 MCP 的新型防离子反馈膜

张 妮^{1,2}, 孙 超^{1,2}, 杨凯莉^{1,2}, 朱宇峰^{1,2}, 焦岗成^{1,2}, 邱洪金^{1,2},
李朋博^{1,2}, 郝子恒^{1,2}, 黄武军^{1,2}, 王江浩^{1,2}

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 传统技术制备的 MCP 防离子反馈膜在一定程度上会影响像管的信噪比, 长时间的工作条件下也会降低像管的可靠性, 基于传统防离子反馈膜缺陷导致的像管信噪比和可靠性性能亟需改善和提高的迫切需求, 开展一种用于 MCP 的新型防离子反馈膜研究。采用原子层沉积技术 (Atomic Layer Deposition, ALD) 在有较高长径比的 MCP 通道内壁及输入端的通道孔处制备一层连续的高质量 U 型结构的防离子反馈膜, 经 MCP 综合检测装置测试, 与传统技术制备的 MCP 部件性能相比, 新型防离子反馈膜致密, 增益值较高, 部件含碳量低, 新型防离子反馈膜的 MCP 部件经制管后像管信噪比高, 寿命可靠性高, 此技术制备的新型防离子反馈 MCP 部件对与像增强器信噪比和可靠性性能的提升具有重要意义。

关键词: 新型防离子反馈膜; 原子层沉积技术; 高长径比; 信噪比; 长寿命

中图分类号: TN223 文献标志码: A 文章编号: 1001-8891(2025)01-0115-06

A New Ion Barrier Film for Micro-channel Plates

ZHANG Ni^{1,2}, SUN Chao^{1,2}, YANG Kaili^{1,2}, ZHU Yufeng^{1,2}, JIAO Gangcheng^{1,2}, QIU Hongjin^{1,2},
LI Pengbo^{1,2}, HAO Ziheng^{1,2}, HUANG Wujun^{1,2}, WANG Jianghao^{1,2}

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;

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

Abstract: The microchannel plate (MCP) ion barrier film produced by traditional technology affects the signal-to-noise ratio (SNR) of the image tube to a certain extent, and long-term working conditions reduce the reliability of the image tube. Due to the urgent need to improve and enhance the SNR and reliability of image tubes caused by defects in traditional ion barrier films, a new type of ion barrier film for MCP must be developed. In this study, a continuous high-quality U-shaped ion barrier film was prepared using atomic layer deposition on the inner wall of MCP channels with high aspect ratios and channel holes at the input end. The film quality and electrical performance were tested using an MCP comprehensive detection device and compared with the performance of MCP components prepared by traditional technology. The new ion barrier film is dense, with high gain values and low carbon content in the components. The new MCP components exhibit a high SNR and high lifespan reliability after tube preparation. New MCP components produced using this technology are of great significance for improving the SNR and reliability of image intensifiers.

Key words: new type Ion Barrier Film, atomic layer deposition (ALD) technology, large aspect ratio, signal-to-noise ratio, long-life

0 引言

微通道板 (Micro-channel Plate, MCP) 应用于微光电真空器件中, 其具有增强电子图像的作用, 是微

光夜视设备的核心器件, 更是负电子亲和势光阴极像增强器的关键部件之一。由于负电子亲和势光阴极灵敏度很高, 其表面原子的电子态最易受到像增强器中残余气体分子尤其是正离子的轰击而破坏, 从而影响

了像增强器工作寿命^[1]。在 MCP 的输入端制备防离子反馈膜后可以阻止 MCP 电子倍增过程中产生的残余气体分子和正离子的反馈，从而保护了光阴极。

目前国内制备 MCP 防离子反馈膜技术是在 MCP 的输入面上制备纳米级薄膜，而在具有上百万个微米级通孔的 MCP 上制备纳米膜就需要有临时载体，通常选用的临时载体是有机膜。具体步骤为首先在 MCP 的输入面上贴附一层有机膜做载体，然后在这层有机膜上镀膜，最终需要把有机膜烘烤去除掉^[2-3]。整个过程中，有机膜只是作为制备防离子反馈膜的临时衬底，但是在此过程中，有机膜与 MCP 密切接触，尤其是在有机膜高温分解去除过程中有机物分解的游离碳附在通道壁上，形成所谓的碳污染，严重影响 MCP 性能。其次由于防离子反馈膜的存在，自然会损失掉输入电子的部分能量，导致 MCP 增益有所降低，降低了像管的信噪比性能。为了保证像管的信噪比性能，MCP 部件的防离子反馈膜制备得较薄，仅为纳米数量级，膜层强度较差，在经历电子清刷和老化后，防离子反馈效果变差，膜层容易受损，导致通孔增加，防离子反馈作用减弱，降低了像管的可靠性。

针对现有技术中存在的防离子反馈膜制备工艺中存在的碳污染问题以及因反馈膜强度不够导致的不耐清刷问题，采用原子层沉积镀膜技术在高长径比、孔径为 5 μm 微通道板的通道内壁和输入端口处制备一层连续的 U 形 Al₂O₃ 薄膜来实现高质量防离子反馈膜的制备，一种采用原子束沉积技术制备的高增益低噪声长寿命防离子反馈 MCP 部件，以满足长寿命负电子亲和势光阴极像增强器需求。

1 新型防离子反馈膜结构设计

本论文描述的新型防离子反馈 MCP 部件采用的是在 MCP 通道内壁及输入端口处制备一层连续的 U 型结构的氧化铝膜，不同于传统的 MCP 输入面的防离子反馈膜(如图 1 所示)，U 型结构的反馈膜在 MCP 输入端的每个通孔上的膜层都是独立的，且每个独立的膜层都与 MCP 通道内壁上的薄膜成为一体，呈 U 型结构，如图 2 所示，这每个独立的 U 型结构的薄膜不仅加固了膜层与 MCP 输入端的牢固性，也增加了独立区域膜层的连续性和致密性，相比传统防离子反馈膜的制作工艺和膜层结构，U 型反馈膜牢固度增强，不容易被破坏；同时由于在 MCP 通道内壁沉积一层致密连续的高二次电子发射材料 Al₂O₃ 作为二次电子发射层，大幅提高二次电子发射率，使通道内壁具有更高的二次电子发射特性^[4-5]，提高了 MCP 的增益性能，有利于像管信噪比的进一步提升。

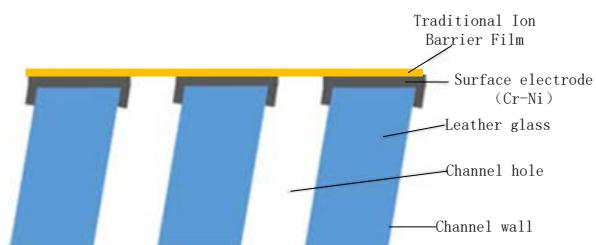


图 1 传统防离子反馈膜结构示意图

Fig.1 Structure diagram of traditional ion barrier film

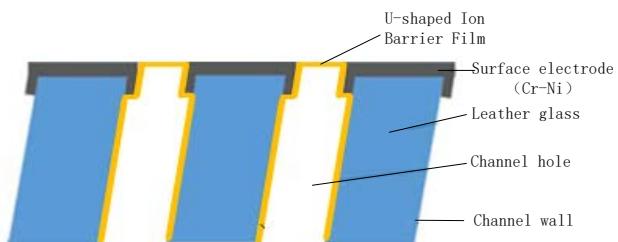


图 2 新型 U 型防离子反馈膜结构示意图

Fig.2 Structural diagram of new U-type ion barrier film

考虑到 MCP 多孔的特点，为能形成连续超薄膜，与传统防离子反馈膜的前期制备工艺一致，仍然需要贴附一层连续致密的有机膜做为临时衬底，镀制完反馈膜后还需要将这层有机膜烘烤去除掉。不同的是，传统的制备工艺是将防离子反馈膜镀制在有机膜的上方，即有机膜在反馈膜和 MCP 表面之间，如图 3 所示；而新型反馈膜是采用原子层沉积的方式在 MCP 通道内壁及输入端口处制备一层连续的 U 型反馈膜，即有机膜裸露在 MCP 表面上，没有被反馈膜覆盖住，如图 4 所示。

新型结构防离子反馈膜的优势是由于 MCP 输入面的有机膜没有被反馈膜覆盖，有机膜去除时气体挥发更自由、更完全，不会对通道内壁产生碳污染，可实现防离子反馈 MCP 低噪声特性，有利于像管信噪比的提升。

由于 MCP 具有很高的长径比(约为 48)，一般的镀膜技术很难在通道内壁上制备一层均匀、致密的薄膜。ALD (atomic layer deposition) 技术^[6-8]是精确控制沉积厚度、台阶覆盖和保型性的新技术，能够在通道内壁进行镀膜；由于 ALD 反应为层状生长方式，生长的薄膜是连续的，几乎没有针孔^[9-11]，能够精确控制沉积厚度，满足负电子亲和势像增强器用纳米级厚度 MCP 防离子反馈膜的制备要求。

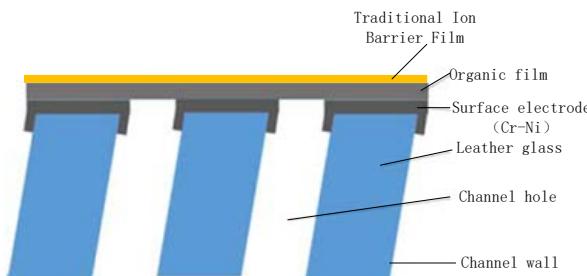


图3 传统防离子反馈膜制备有机膜结构图

Fig.3 Organic membrance structure diagram of traditional ion barrier film

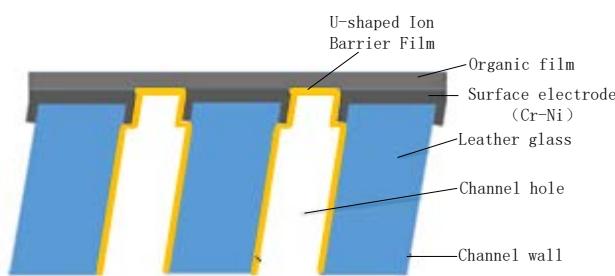


图4 新型防离子反馈膜制备有机膜结构图

Fig.4 Organic membrance structure diagram of new type ion barrier film

2 新型防离子反馈膜技术研究

根据 U 型结构薄膜及 ALD 镀膜工作原理知,首先需要考虑沉积温度的设计。有机膜和 ALD 反应沉积对沉积温度都有要求,有机膜对沉积温度比较敏感,温度过高容易分解,而 ALD 沉积也有一定的温度反应窗口,温度过低又不易成膜,因此要综合考虑 ALD 沉积温度以及有机膜承受温度均需要达到最优状态。第二,根据 MCP 防离子反馈膜高电子透过率和高离子阻挡率的要求,需要对防离子反馈膜厚度及沉积循环数进行设计,这个主要是根据部件的电性能和膜层质量两方面对沉积工艺进行设计优化。综上本论文根据 MCP 防离子反馈膜特殊要求,主要从 ALD 沉积温度和沉积循环数对防离子反馈膜质量的影响两个方面进行研究。

2.1 ALD 沉积温度参数设计

氮气流量、反应腔压强和前驱体反应时间为 ALD 沉积比较成熟的工艺参数,根据前期实验的初步摸索,设计 ALD 方法在 MCP 通道壁沉积防离子反馈膜的通用工艺参数为: 氮气流量为 90 sccm, 反应腔压强为 800 Pa, 前驱体反应时间为 18 s, 氮气冲洗时间为 40 s。

根据有机膜对温度的要求和前期经验值对 ALD 沉积温度进行初步设计,沉积温度分别设计为 T_1 、 T_2 、

T_3 和 T_4 四个点。对于每一个沉积温度下,首先进行循环数较多的镀膜工艺,在保证 U 形膜成膜的基础上,根据具体的死区电压值再进行循环数的优化。具体镀膜工艺如表 1 所示。

表 1 不同 ALD 参数下 MCP 部件性能比较

Table 1 Performance comparison of MCP components with different ALD parameters

Sample	Sample quantity	Reaction temperature/°C	Number of cycles	Average dead zone voltage/V
1	4	T_1	C1	396
2	4	T_2	C1	435
3	4	T_3	C1	488
4	4	T_4	C1	Negative value

Note: $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$

对此工艺下制备的 MCP 部件在 MCP 综合性能检测装置上进行 MCP 部件的反馈膜质量测试和电性能检测。进行膜质量测试时发现大部分样品的反馈膜均出现了成片的通孔和条纹状的亮线,如图 5 所示。推测是沉积循环数太多,样品在腔室内的停留时间过长,在这期间样品的热积累非常严重,使得有机膜发生分解,造成 Al_2O_3 薄膜没有沉积依附,而出现成片的通孔和亮线,导致反馈膜质量不合格。因此应适当降低沉积循环数。

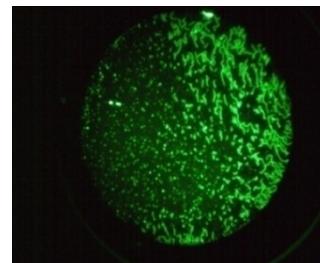


图5 MCP 部件膜质量测试图

Fig.5 Test diagram of MCP components film quality

对样品的死区电压值进行分析,对于同样的循环数,首先可以看到在反应温度 T_4 的条件下, MCP 死区电压值为负值,说明防离子反馈膜不存在,透射电子直接入射到通道内,分析是由于反应温度过高,在制备 Al_2O_3 薄膜过程中,有机膜发生分解,导致 MCP 输入面没有形成防离子反馈膜,使得其没有死区电压,所以 T_4 的反应温度不能制备防离子反馈膜。在反应温度为 T_1 、 T_2 和 T_3 时,随着温度的升高,相同的循环数条件下,死区电压值反而越大,这说明 T_3 条件下的膜层更致密,具有更高的离子阻挡能力。结合理论知识,反应温度决定了对前驱体扫除的干净程度,温度越高,扫除越干净,膜层越均匀致密。

2.2 ALD 沉积循环数参数设计

根据 ALD 镀膜摸索实验, 后续镀膜工艺采用 T_1 、 T_2 和 T_3 三个反应温度做实验, 根据第一轮的死区电压值推测 C1 循环条件下的防离子反馈膜厚度过大, 根据防离子反馈膜厚度要求, 应减少沉积循环数, 减薄 Al_2O_3 薄膜厚度, 实验采用的循环数设计为 C2、C3 和 C4 (其中 $C1 > C2 > C3 > C4$)。本实验使用 ALD 法制备防离子反馈膜, 其它工艺参数不变: 氮气流量为 90 sccm; 反应腔压强为 800 Pa; 前驱体反应时间为 90 s, 氮气冲洗时间为 40 s。具体镀膜工艺如表 2 所示。

使用 MCP 综合性能测试装置对样品进行测试, 样品的死区电压均为正值, 说明 MCP 表面存在防离子反馈膜, 透射电子在膜层中发生了能量损耗, 继续验证了 T_1 、 T_2 和 T_3 沉积温度下可以沉积薄膜。对 Al_2O_3 薄膜进行膜质量检测, 样品通孔数量较少, 分布较为均匀, 没有再出现成片通孔和亮线的情况, 说明 C2、C3 和 C4 的沉积循环数可以制备连续的质量合格的反馈膜。

表 2 Al_2O_3 薄膜制备工艺参数Table 2 Parameters of Al_2O_3 film preparation

Sample	Sample quantity	Reaction temperature/°C	Number of cycles	Average growth rate of thin film Å/C	Average dead zone voltage/V
1	3	T_1	C4	3.83	267
2	3		C3	3.86	291
3	3		C2	3.63	320
4	3	T_2	C4	3.17	284
5	3		C3	3.00	313
6	3		C2	3.00	339
7	3	T_3	C4	2.50	307
8	3		C3	2.57	332
9	3		C2	2.50	368

结合表 2 中数据及反馈膜质量测试图 6 可知, 首先对于不同温度下相同的循环数, 死区电压均值不同, 在 T_1 、 T_2 和 T_3 三个反应温度条件下, 温度越高, 死区电压均值越大, 说明膜层通孔数越少, 膜层越致密。第二, 在相同的反应温度条件下, 在 C2、C3 和 C4 条件下, 循环数越多死区电压值越大, 说明膜层通孔数越少, 膜层越致密, 这也符合了 ALD 薄膜沉积原理。根据上述分析, 结合 MCP 部件死区电压需求 (<400 V), 确定 T_3 的沉积温度和 C2 沉积循环数是较为合理的 ALD 镀膜工艺。

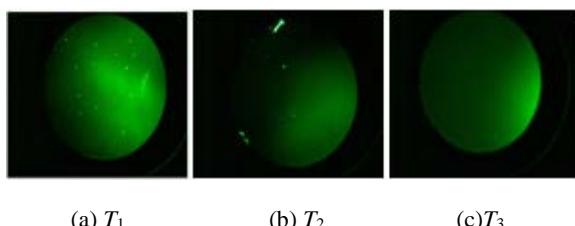


图 6 不同沉积温度下 MCP 部件反馈膜质量测试图

Fig.6 Test diagram of MCP component' film quality under different deposition tempetures

3 新型防离子反馈 MCP 部件性能测试

MCP 部件的主要技术指标是 MCP 部件的电性能、膜质量和含碳量, 对于相同技术状态的 MCP 和相同厚度的防离子反馈膜, 高增益、低含碳量以及致密的反馈膜是表征高性能 MCP 部件的重要参数, 这些高性能对于像管的信噪比和可靠性的提升具有重要意义。

3.1 新型 MCP 部件膜质量及电性能测试

电性能主要是通过在 MCP 检测台上对体电阻、增益和膜质量进行测试。在上述的 ALD 工艺参数下, 制备了一批防离子反馈 MCP 部件, 部件测试值如表 3 所示, MCP 部件增益值分布在 5900~7500 之间, 均值 6647; 而同批次 MCP 采用正常镀膜工艺制备同样厚度的防离子反馈膜后, 增益值分布在 3500~6000 之间, 均值 4800, 可见新型 MCP 部件具有一定的增益优势。

表 3 MCP 部件增益性能检测

Table 3 Gain performance testing of MCP components

Sam- -ple	New MCP components		Traditional MCP components		
	Resistor/ MΩ	Gain	Sam- -ple	Resistor/ MΩ	Gain
1	186	6001	1'	146	4408
2	184	5989	2'	157	4609
3	179	6231	3'	162	5200
4	182	6879	4'	154	4699
5	169	6496	5'	178	4863
6	168	6104	6'	164	4613
7	182	7302	7'	159	5019
8	159	7029	8'	186	4987
9	173	7456	9'	180	4639
10	184	6981	10'	192	4966

合格部件的反馈膜质量如图 7 所示。

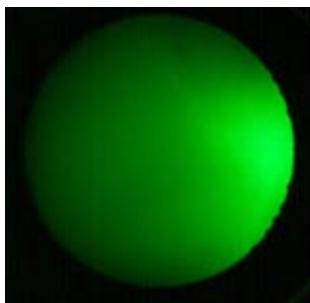


图 7 合格 MCP 部件反馈膜质量测试图

Fig.7 Test diagram of qualified MCP components film quality

采用 ALD 技术制备的防离子反馈 MCP 部件的膜层质量、电阻、增益和死区电压性能满足技术指标要求。

3.2 新型 MCP 部件含碳量测试

将新型防离子反馈 MCP 部件的输入面和输出面进行了含碳量测试。采用扫描电子显微镜对 MCP 输入/输出面原子百分比测试，并与传统防离子反馈 MCP 部件的含碳量进行了对比。MCP 输出面测试点如图 8 标示 spot1 所示，测试数据如表 4 所示。

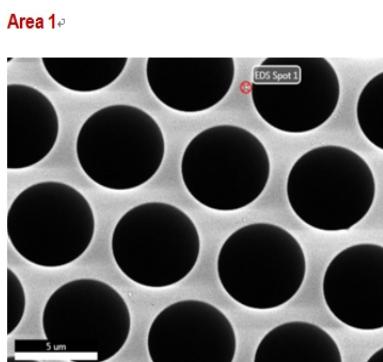


图 8 MCP 输出面测试点

Fig.8 Test point of MCP output surface

表 4 SEM 测试 MCP 输出面原子百分比

Table 4 Test percentage on MCP output surface tested by SEM

Element	Quality percentage/%	Atomic percentage/%
C	3.46	8.81
O	25.07	47.91
Ni	0	0
Na	0	0
Al	0	0
Si	3.93	4.28
Pb	1.57	0.23
Bi	0.01	0
K	0	0
Ba	0	0
Cr	65.95	38.77

MCP 输入面测试点如图 9 标示 spot1 所示，测试数据如表 5 所示。

Area 4

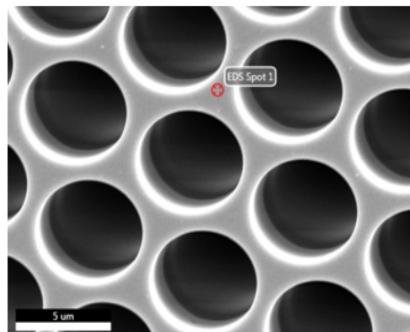


图 9 MCP 输入面测试点

Fig.9 Test point of MCP input surface

表 5 SEM 测试 MCP 输入面原子百分比

Table 5 Test percentage on MCP input surface tested by SEM

element	Quality percentage/%	Atomic percentage/%
C	2.84	9.76
O	8.3	21.4
Ni	0.17	0.12
Na	0.02	0.03
Si	2.87	4.21
Pb	4.14	0.82
Bi	0.16	0.03
Pd	0.09	0.03
K	0.43	0.45
Ba	2.19	0.66
Cr	78.78	62.48

新型防离子反馈 MCP 部件输入面含碳量为 9.76%，输出面含碳量为 8.81%，较传统防离子反馈

MCP 部件(分别为 25.54% 和 15.08%)含碳量低得多,对于像管信噪比的提升具有重要意义。

3.3 新型 MCP 部件制管后的性能测试

新型防离子反馈 MCP 部件制管后,对 36 支灵敏度满足要求的像管进行信噪比(Signal to noise ratio)测试,其中 33 支像管信噪比 ≥ 28 ,信噪比达标率高达 91.7%,高于同期传统像管的信噪比达标率(80%),可见新型防离子反馈 MCP 部件确实提升了像管信噪比性能。

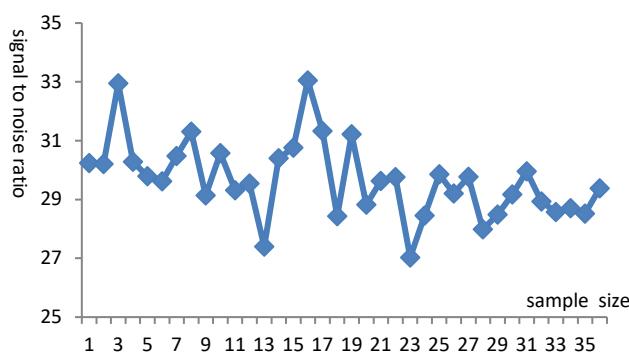


图 10 新型防离子反馈 MCP 部件制管后信噪比分布

Fig.10 Signal to noise ratio distribution diagram of new type ion barrier film of MCP components

从中选取了 4 支像管进行可靠性寿命试验,4 支像管均满足寿命试验要求。

4 结论

使用原子层沉积镀膜技术在具有高长径比的 MCP 的通道内壁和输入端口处制备一层连续的 U 形 Al_2O_3 薄膜来实现防离子反馈的目的,它比传统的反馈膜具有较大的优势,新型 U 型结构可以降低碳污染,有利于像管信噪比的提升;U 型结构使膜层的牢固度更好,有利于像管可靠性的提高,采用此技术制备的防离子反馈 MCP 部件是解决负电子亲和势光阴极像增强器高信噪比长寿命的有效途径之一。但由于 MCP 部件防离子反馈膜特殊的制备要求,对工艺参数要求苛刻,对设备的稳定性要求较高,工艺的稳定性有待进一步提升以满足批量化生产的需求。

参考文献:

- [1] 向世明, 倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 270-275.
- [2] Pollehn H K. Performance and reliability of third generation image intensifier[J]. Advance in Electronics and Electron Physics, 1985, **64A**(1): 57-61.
- [3] 闫金良, 赵银女, 朱长纯. 无碳污染微通道板电子透射膜[J]. 电子学报, 2000, **28**(8): 100-101.
- [4] YAN Jinliang, ZHAO Yinnv, ZHU Changchun. Electron transmission film of carbon free MCP[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, **28**(8): 100-101.
- [5] 高秀敏, 蔡春平. 微通道板玻璃的二次电子发射系数[J]. 应用光学, 1998, **4**: 9-17.
- [6] GAO Xiumin, CAI Chunping. Secondary electron emission coefficient of MCP glass[J]. Journal of Applied Optics, 1998, **4**: 9-17.
- [7] 刘术林, 邓广绪, 严诚, 等. MCP 增益与首次碰撞时电子能量关系的试验研究[J]. 红外技术, 2011, **33**(6): 354-356.
- [8] LIU Shulin, DENG Guangxu, YAN Cheng, et al. Experiment research on relation between MCP gain and electron energy while first collision[J]. Infrared Technology, 2011, **33**(6): 354-356.
- [9] 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): 101-106.
- [10] CONG Xiaoqing, QIU Xiangbiao, SUN Jianning, et al. Properties of micro-channel plate emission layer deposited by atomic layer deposition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, **45**(9): 101-106.
- [11] Ritala M, Kukli K, Rahtu A, et al. Atomic layer deposition of oxide thin films with metal alkoxides as oxygen sources[J]. Science, 2000, **288**(5464): 319-321.
- [12] Gordon R G, Hausmann D, Kim E, et al. A kinetic model for step coverage by atomic layer deposition in narrowholes or trenches[J]. Chemical Vapor Deposition, 2003, **9**(2): 73-78.
- [13] Kucheyev S O, Biener J, Baumann T F, et al. Mechanisms of atomic layer deposition on substrates with ultrahigh aspect ratios[J]. Langmuir the ACS Journal of Surfaces & Colloids, 2008, **24**(3): 943-948.
- [14] SHANG Shuzhen, LIAO Chunyan, YI Kui, et al. Experimental study of annealing effects on electron-beam evaporated Al_2O_3 films[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, **11**(4): 511-514.
- [15] 沈伟东, 刘旭, 叶辉, 等. 确定薄膜厚度和光学常数的一种新方法[J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 885-888.
- [16] SHEN Weidong, LIU Xu, YE Hui, et al. A new method for determination of the optical constant and thickness of thin film[J]. Acta Optica Sinica, 2004, **24**(7): 885-888.