

**专家推介:** 本文介绍了一种“日盲”紫外 MCP 型光电倍增管的设计。采用光学增透技术,提高了 250 nm 波长的辐射灵敏度;采用 38~41 的高长径比以及 ALD 技术提高了 MCP 的增益;通过优化电子光学结构,提高了光电倍增管的响应速度,为研制更高性能的“日盲”紫外 MCP 型光电倍增管奠定了良好的基础。

## “日盲”紫外微通道板型光电倍增管研究

司曙光<sup>1,2</sup>, 金睦淳<sup>1</sup>, 王兴超<sup>1</sup>, 黄国瑞<sup>1</sup>, 金真<sup>1</sup>, 徐海洋<sup>1</sup>, 吴凯<sup>1</sup>, 王宁<sup>1</sup>, 黄之遥<sup>1</sup>,  
孙建宁<sup>1,2</sup>, 任玲<sup>1,2</sup>, 李坤<sup>1</sup>, 石梦瑶<sup>1</sup>, 张昊达<sup>1</sup>, 曹宜起<sup>1</sup>, 侯巍<sup>1</sup>, 顾莹<sup>1</sup>, 赵敏<sup>1</sup>,  
叶皓<sup>1</sup>, 汤偲晨<sup>1</sup>

(1. 北方夜视技术股份有限公司南京分公司, 江苏 南京 211106; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** “日盲”紫外光电倍增管是紫外光通信和核辐射探测的关键器件,具有高辐射灵敏度、高增益、高分辨率、低噪声等特点。因此,紫外光电倍增管一直是国内外真空器件的重要研究领域。本文从结构设计、阴极制备、微通道板和整管封接 4 方面介绍了北方夜视研制的“日盲”紫外光电倍增管。采用的是 MgF<sub>2</sub> 光窗上蒸镀有效面积为  $\phi 18$  mm 的 Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极,通过增透技术使得 250 nm 处的辐射灵敏度从 22 mA/W 提高到 26.5 mA/W;利用电子光学仿真得到信号上升时间小于 500 ps, TTS 优于 0.1 ns 的结构;采用结构优化和原子沉积技术使得微通道板增益达到  $5 \times 10^6$ ;采用玻璃/Cr/Cu/Ag 多层金属薄膜热钎封接技术,可将整管钎封合格率提升至 97%。

**关键词:** 紫外; 光电倍增管; 光电阴极; 微通道板; 钎封

**中图分类号:** TN152      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2020)-08-0722-07

## "Solar Blind" Ultraviolet Microchannel Plate Photomultiplier

SI Shuguang<sup>1,2</sup>, JIN Muchun<sup>1</sup>, WANG Xingchao<sup>1</sup>, HUANG Guorui<sup>1</sup>, JIN Zhen<sup>1</sup>, XU Haiyang<sup>1</sup>, WU Kai<sup>1</sup>,  
WANG Ning<sup>1</sup>, HUANG Zhiyao<sup>1</sup>, SUN Jianning<sup>1,2</sup>, REN Ling<sup>1,2</sup>, LI Shen<sup>1</sup>, SHI Mengyao<sup>1</sup>, ZHANG Haoda<sup>1</sup>,  
CAO Yiqi<sup>1</sup>, HOU Wei<sup>1</sup>, GU Ying<sup>1</sup>, ZHAO Min<sup>1</sup>, YE Hao<sup>1</sup>, TANG Sichen<sup>1</sup>

(1. Nanjing Branch, North Night Vision Technology Co., LTD., Nanjing 211106, China;

2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** A “solar blind” ultraviolet photomultiplier is a key detector for ultraviolet warning systems and ultraviolet communications. It exhibits the characteristics of high radiation sensitivity, high gain, high resolution, and low noise. Therefore, ultraviolet photomultipliers are an important research topic under vacuum devices worldwide. Herein, a “solar blind” ultraviolet photomultiplier developed by NVT is introduced from four aspects: structure design, cathode preparation, microchannel plate, and whole tube sealing. A  $\phi 18$  mm Cs<sub>2</sub>Te photocathode was evaporated on an MgF<sub>2</sub> window through anti-reflection technology, which resulted in a radiation sensitivity at 250 nm increasing from 22 to 26.5 mA/W. The signal rise time is less than 500 ps, and the TTS is less than 0.1 ns; these are obtained by electron optics simulation. The gain of the microchannel plate reached  $5 \times 10^6$  via structure optimization and atomic layer deposition technology. The indium sealing technology of glass/Cr/Cu/Ag multilayer metal film is adopted to improve the qualified rate of the entire tube sealing to 97%.

**Key words:** ultraviolet, photomultiplier, photocathode, microchannel plate, tube sealing

## 0 引言

“日盲”紫外光电倍增管可以应用于军用紫外光

通信等领域,紫外光通信既可以补足传统光通信不能进行非视距通信,受气候影响严重的缺陷,也可以弥补传统无线及有线通信需要部署线路和基站等

收稿日期: 2020-03-13; 修订日期: 2020-05-25.

作者简介: 司曙光 (1971-), 男, 研究员级高级工程师, 长期从事光电器件技术研究工作。E-mail: sishuguang@126.com.

灵活性差的不足，是一种极具发展潜力的军事通信手段<sup>[1-3]</sup>。紫外光通信的波段范围一般选择在日盲区域（200~300 nm），该区域内太阳的近地辐射微弱，因而即使在白天也不会有太大的自然光干扰。目前，国外光电倍增管的研制和生产厂商有日本滨松、英国 ETL、俄罗斯 BINP 和 MELZ 公司，而国内有北京滨松、中电 55 所、南京三乐和海南展创等公司，其中仅日本滨松和中电 55 所有紫外微通道板型光电倍增管产品，其产品性能如表 1<sup>[4-6]</sup>所示。

北方夜视作为国内微通道板型光电倍增管的主要生产厂家之一，为了适应国内在紫外光通信以及核辐射探测领域对“日盲”紫外光电倍增管的需求，在生产和研制 20 英寸微通道板型光电倍增管助力国家大科学装置——“江门中微子探测”的同时，也开展了“日盲”紫外微通道板型光电倍增管的研制。本文对“日盲”紫外微通道板型光电倍增管（microchannel plate photomultiplier tube, MCP-PMT）的设计和制备展开研究，重点介绍了结构设计、阴极制备、微通道板和整管封接 4 个方面。

### 1 “日盲”紫外微通道板型光电倍增管结构设计

“日盲”紫外光电倍增管采用新型微通道板作为电子倍增器，样管增益、时间性能等参数与结构直接相关，因此需要进行结构优化设计。为提高产品设计效率，利用电子光学 CST Studio Suite 模拟仿真软件，设计“日盲”紫外微通道板型光电倍增管，如图 1 所示。采用的是平板近贴式结构，主要由阴极窗、微通道板、管壳、阳极构成，阴极窗为 MgF<sub>2</sub> 材料，能够透过紫外光信号，其内表面蒸镀有 Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极，阴极窗与管壳之间通过热钢封方式进行真空密封封

接，采用双片 MCP 叠加作为电子倍增器，通过管壳保证 MCP 与阴极窗间距及平行度，采用金属片作为阳极信号接收极，阳极与管壳之间通过激光焊接进行密封封接。管壳为陶瓷-金属-陶瓷多层结构，保证各电极之间的绝缘，陶瓷与金属之间通过金属化进行密封封接。

#### 1.1 信号上升时间仿真计算

信号上升时间指在单光电子输入状态，在阳极输出的信号波形前沿，脉冲幅值的 10%和 90%的点出现的时间间隔的平均值<sup>[7]</sup>。

单光电子信号上升时间主要由光电倍增管电子倍增器、阳极以及阳极后端电子线路决定。传统的打拿级型光电倍增管每一级之间距离较大（≈5 mm），级间电压较小（≤100 V），导致电子在打拿级之间的飞行速度慢，电子团时间弥散大，导致信号上升时间变大。因此，传统的打拿级型光电倍增管信号上升时间在 3~8 ns 之间。

使用微通道板代替传统的打拿级作为光电倍增管的电子倍增器件，由于微通道板电子倍增路径短，如图 2 所示，微通道板倍增后的电子团上升时间小，因此优化信号上升时间主要是通过优化阴极和阳极到微通道板的距离来实现。通过仿真计算得出，当阴极和阳极到微通道板之间的距离均小于 1 mm 时，信号上升时间小于 500 ps。

#### 1.2 渡越时间弥散仿真计算

渡越时间弥散（time transit spread, TTS）是指光电倍增管电子渡越时间弥散，即电子达到倍增极的时间差<sup>[8]</sup>。光电阴极至第一片微通道板输入面之间的电场分布以及第二片微通道板输出面至阳极之间的电场分布均对渡越时间弥散有影响。

表 1 国内外同类型微通道板型光电倍增管对比<sup>[4-6]</sup>

Table 1 Comparison of MCP-PMT at home and abroad<sup>[4-6]</sup>

Type	Manufacturers	Photocathode	Radiant	Number of MCP stages	Gain	Rise time
R5916U-53	Hamamatsu	Cs-Te	30 mA/W	2	2×10 <sup>5</sup>	0.18 ns
R3809U-53	Hamamatsu	Cs-Te	30 mA/W	2	2×10 <sup>5</sup>	0.15 ns
GDB-601	CETC 55	Cs-Te	15 mA/W	3	4.7×10 <sup>6</sup>	0.29 ns
GDB-609	CETC 55	Cs-Te	18 mA/W	3	2×10 <sup>6</sup>	0.3 ns

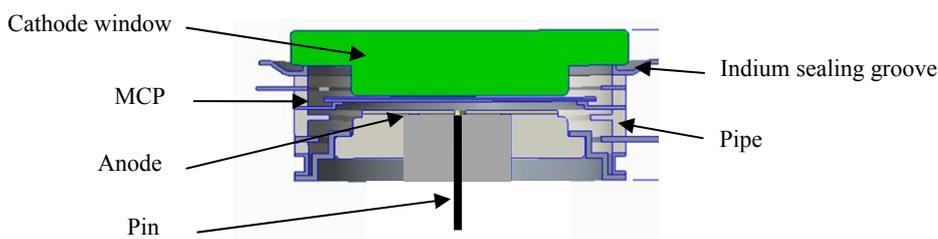


图 1 “日盲”紫外光电倍增管结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of "solar blind" ultraviolet photomultiplier tube

通过建立电子光学理论模型,改变电压、前近贴距离和电压、后近贴距离和电压等参数值,模拟从光电阴极激发的光电子在光电倍增管体内的运输轨迹,统计光电子到达阳极的时间离散值,研究光电倍增管相关结构参数对渡越时间弥散的影响。仿真发现,前、后近贴系统的电场强度越强,渡越时间弥散值越好,但加工时需兼顾光电倍增管的机械结构设计和工艺制造水平。因此,仿真优化的最终结果如表2所示,在此条件下,TTS 优于 0.1 ns。

### 1.3 管壳与阳极的机械结构设计

根据电子光学仿真设计结果,光窗阴极面到通道板输入面和通道板到阳极的距离要尽可能得小,但由于加工能力的限制,阴极与阳极表面粗糙度有一个极限值,过小的间距会导致两者局部放电,因此设计光窗阴极面到通道板输入面和通道板到阳极的距离都为 0.2 mm,如图3所示。

“日盲”紫外光电倍增管的阴极有效面积为 $\phi 18$  mm,阳极接收面直径同样设计为 $\phi 18$  mm。此外,将阳极接收面到信号输出端的结构设计成一个锥形更有利于阻

抗匹配,如图4所示,可以得到一个较好的信号波形,有利于提高性能,经过计算得到输出端阳极外径为 6.3 mm,阳极锥度为 45°。锥形阳极通过陶瓷与其他电极绝缘,陶瓷外焊接金属环用于和管壳封接。陶瓷表面金属化,阳极、陶瓷和金属环通过高温焊接密封连接。

## 2 “日盲”紫外微通道板型光电倍增管阴极制备

### 2.1 Cs<sub>2</sub>Te 紫外光电阴极制备设备

“日盲”紫外探测用光电阴极选择 Cs<sub>2</sub>Te,其光谱响应范围覆盖 120~300 nm<sup>[9]</sup>。Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极制备设备具有两个工位,可同时进行两个样品的阴极制备,内部真空腔体下方由法兰盘底座形成的梯碱座结构,法兰盘中间由环形套筒支撑起光窗罩子,保证了内部小空间范围内的碱金属浓度;光窗固定在带有小勾的夹具中,制作完成后,使用传递杆勾住光窗夹具上面的勾子,并传递到组件上方,调整位置后落下光窗完成整管封接。该高真空设备的极限真空低于  $1 \times 10^{-6}$  Pa,工作真空度为  $3 \times 10^{-6}$  Pa。

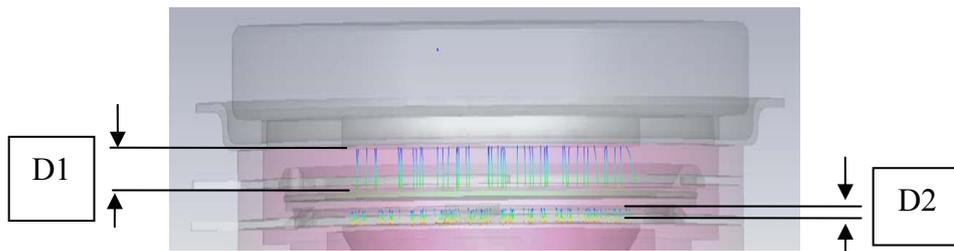


图2 “日盲”紫外光电倍增管仿真结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulation structure of "solar blind" ultraviolet photomultiplier tube

注: D1: 阴极到微通道板的距离; D2: 微通道板到阳极的距离

Note: D1: Distance from cathode to microchannel plate; D2: Distance from microchannel plate to anode

表2 结构优化尺寸 Table 2 Optimized size of the structure

No.	Performance	Parameter
1	Distance between cathode and MCP	$\leq 1$ mm
2	Distance between MCP and anode	$\leq 1$ mm
3	Potential difference between cathode and MCP	$\geq 300$ V
4	Potential difference between MCP and anode	$\geq 300$ V

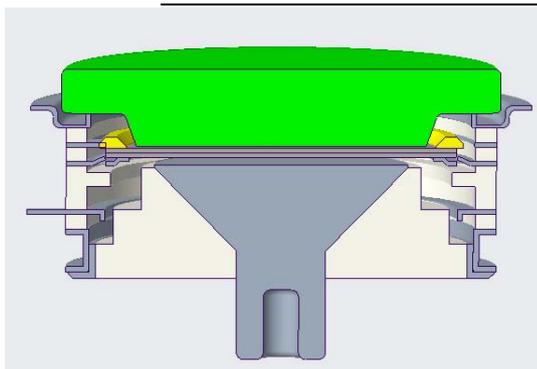


图3 管芯结构 Fig.3 Internal structure of tube

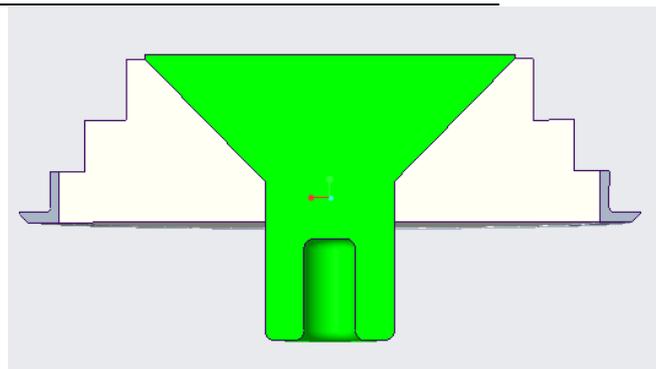


图4 阳极结构设计 Fig.4 The design of anode structure

## 2.2 Cs<sub>2</sub>Te 紫外光电阴极基底膜层设计

众所周知，阴极表面进 Cs 激活，可以有效降低光电阴极表面电子亲和势，从而将阴极灵敏度提高。对于 Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极来说，其制作过程首先是在基底上镀好 Te 层，之后再进 Cs 激活。但这种紫外阴极的材料的面电阻很高，为了使紫外光电阴极在发射电子时电子能得到及时补偿，需要在阴极的 MgF<sub>2</sub> 窗上制作一层金属导电基底。阴极的导电基底应满足以下条件：①面电阻足够小，一般导电基底的面电阻小于 10<sup>7</sup> Ω/cm<sup>2</sup> 就能满足要求；②对响应波段光辐射透过率高；③与紫外光阴极相容<sup>[10]</sup>。对于导电膜层材料首选 NiCr 合金，可采用热蒸发或者电子束蒸镀两种模式。越厚的导电膜层补充电子效果越好，却会降低入射光的透过率，因此该 NiCr 层约为 10 nm 左右。

为了增加入射光的透过率，在导电基底上还需蒸镀一层增透膜。根据光学增透膜理论，增透膜的折射率应该为  $n_0^2 = n_1 n_2$ ，MgF<sub>2</sub> 的折射率为 1.38，Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极的折射率为 1~1.8，因此增透膜的折射率范围

在 1.17~1.58 之间。

Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极的光谱响应范围在 110~350 nm，为紫外响应光电阴极，因此需要找到一种在紫外波段具有良好透过率的减反膜材料，结合折射率和透光范围，在表 3<sup>[11]</sup>中可以看到，SiO<sub>2</sub>，SiO，AlF<sub>3</sub> 和 BaF<sub>2</sub>。均符合要求，我们从中挑选了氟化钡 BaF<sub>2</sub> 作为 Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极的增透膜材料。

增透膜优化后的 Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极膜层包含了玻璃基底在内的 4 层结构：氟化镁基底、镍铬导电膜、氟化钡增透层和 Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极。然后我们利用 Essential Macleod 光学薄膜仿真软件对上述膜系进行仿真，结果如图 5 所示，可以看到，透过率在 130 nm 往后逐渐增高，并在 240 nm 达到 99.99%，光透过效果良好。

最终我们给出了利用增透膜优化的 Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极光谱响应曲线，如图 6 所示，可以看到优化后，Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极在 250 nm 的辐射灵敏度从原来的 22 mA/W 提高到 26.5 mA/W，优化效果明显。

表 3 常用增透膜材料折射率表<sup>[11]</sup>

Table 3 Refractive index of commonly used anti-reflection film materials<sup>[11]</sup>

Materials	Refractive index	Pervious to light range	Evaporating temperature
MgF <sub>2</sub>	1.38	160-8000 nm	1300°C-1600°C
SiO <sub>2</sub>	1.46	200-2000 nm	1800°C-2200°C
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.63	200-5000 nm	2000°C-2200°C
SiO	1.55	800-8000 nm	1200°C-1600°C
TiO <sub>2</sub>	2.33	400-12000 nm	2000°C-2200°C
HfO <sub>2</sub>	1.95	230-7000 nm	2300°C-2500°C
MgO	1.7	200-8000 nm	2000°C
BaF <sub>2</sub>	1.4	200-8000 nm	1280°C
AlF <sub>3</sub>	1.35	200-8000 nm	800°C-1000°C

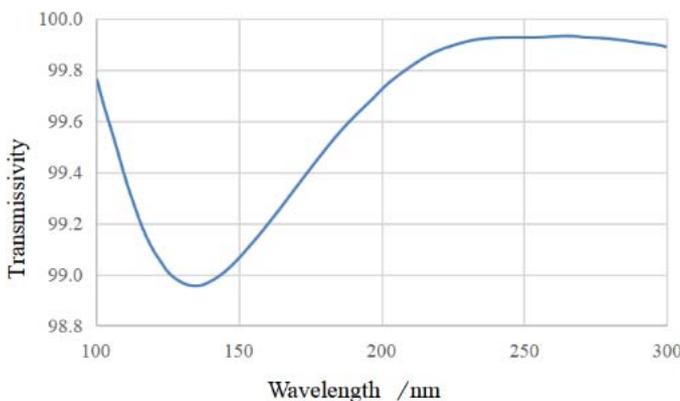


图 5 优化后 Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极透过率曲线

Fig.5 Transmission curve of Cs<sub>2</sub>Te photocathode after optimization

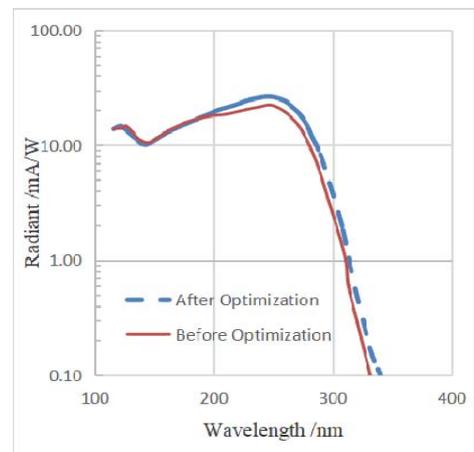


图 6 增透层优化前后 Cs<sub>2</sub>Te 光电阴极光谱响应曲线对比

Fig.6 Comparison of Cs<sub>2</sub>Te photocathode spectral response curves before and after the anti-reflection layer optimization

### 3 “日盲”紫外微通道板型光电倍增管高增益微通道板研究

微通道板是一个由上百万甚至千万个平行排列的、具有一定通道孔径和孔间距的玻璃通道融合而成的通道阵列，按一定角度斜切而成具有一定厚度的玻璃薄片。微通道板采用铅硅酸盐玻璃管和可酸溶玻璃棒制作，通过融合纤维光学制作方法并经酸蚀除芯以保留纤皮形成通道阵列，再经过特殊处理，形成二次电子发射层，蒸镀电极膜层<sup>[12]</sup>。微通道板作为大尺寸光电倍增管核心探测元器件，使用两片叠加的微通道板，并分别在微通道板表面和通道内壁沉积高二次电子发射材料，满足光电子探测需要。两片叠加微通道板，其中第一片微通道板金属电极表面以及通道内壁表面均覆盖有一层具有高二次电子发射系数的薄膜；第二片为仅通道内壁表面覆盖有一层具有高二次电子发射系数的薄膜。两片微通道板的通道以相邻端面为对称面镜像对称，使两片微通道板的相应通道成为“《”型，如图7所示。

#### 3.1 微通道板结构设计

为了提高微通道板的增益，在一定工作电压下，不同长径比对应的增益值不同，通过实验结果总结，

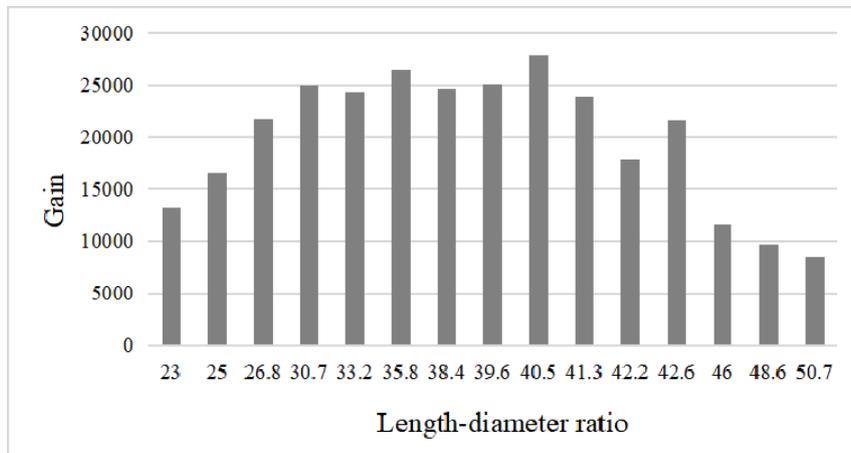


图8 长径比与增益

Fig. 8 Length-diameter ratios and gains

表4 拉丝温度与增益

Table 4 Drawing temperature and gain

Cladding	Multifilament temperature/°C	Gain
B1311	A	19228.7
	B	17284.6
	B	23895.6
B1404	A	26548.8
	A	21511.2
	B	22183.6

一定工作电压下，长径比在 41 时增益值最大，测试结果如图 8 所示。

#### 3.2 拉丝和压屏工艺的研究

微通道板制作的过程经过 3 次的热过程处理，分别是拉丝、压屏和烧氢。拉丝和压屏的高温处理过程，皮料与芯料相互渗透产生的渗透层对增益的大小及一致性有很大的影响。试验研究拉丝温度和压屏温度对增益值的影响，提高复丝拉丝温度，判断其对增益值影响，试验结果数据如表 4，表中复丝拉丝的温度用 A 和 B 表示。从结果得出，拉丝温度的改变对增益的提高效果不明显。

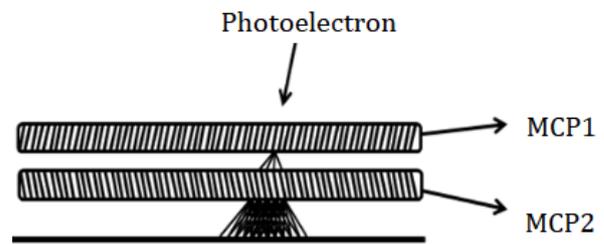


图7 微通道板两片叠加结构图

Fig.7 Superposition structure of two microchannel plates

继续提高压屏温度，试验压屏温度与增益的关系，图 9 是不同压屏温度的增益情况，压屏温度值采用了从 C1~C6 温度逐渐增加的表达形式。压屏温度在 C5 时，增益值最大。压屏工艺的改进，一定程度上提高了微通道板的增益。

#### 3.3 原子层沉积技术应用于微通道板的研究

随着纳米材料科学的发展，各种新材料新技术层出不穷，其中一种先进镀膜技术为微通道板的研制增添了助力：原子层沉积技术 (atomic layer deposition,

ALD)<sup>[13]</sup>。原子层沉积是一种特殊的化学气相沉积方法，通过将气相前驱体脉冲交替地通入反应腔并在基底上化学吸附并反应而形成沉积膜，其反应属于自限制性反应，即当一种前驱体与另一种前驱体反应达到饱和时，反应自动终止。原子层生长的自限制性特点使其制备的薄膜具有厚度精确可控、表面均匀性好、保形性优、可在高深宽比沟槽以及通道内沉积等特点，目前在科研以及商业生产上得到了广泛的应用。将原子层沉积技术应用于MCP的制作中，在MCP通道内壁沉积一层具有高二次电子发射系数的材料来增强MCP发射层的性能，以此来提升微通道板的增

益。

使用ALD在通道内壁沉积材料的MCP性能与材料的厚度有着直接的关系，使用电子束蒸镀在MCP两端镀NiCr电极后测试其电流增益。当施加于MCP两端的电压为800V时，MCP的增益随着沉积材料厚度的增加而增加，氧化铝与正常MCP的发射层材料相比有更高的二次电子发射系数，电子撞击到沉积了材料的MCP通道内壁时，二次发射产额更高，经过级联倍增，增益可以获得非常大的提升。使用ALD在通道内壁上沉积氧化铝对于提升MCP的增益非常有效。

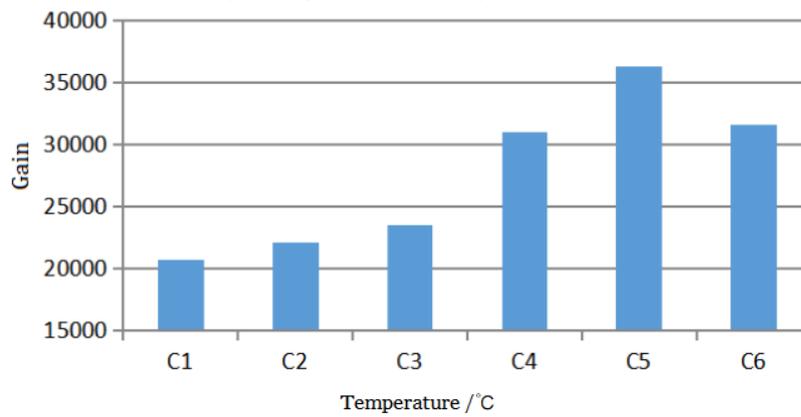


图9 压屏温度与增益

Fig.9 Press screen temperature and gain

使用原子层沉积技术在MCP通道内壁沉积纳米薄膜功能层，作为正常MCP发射层的补充，提升通道内壁的二次电子发射能力，试验结果表明，使用原子层沉积技术沉积氧化铝薄膜的MCP相比于正常的MCP增益更高，在800V的电压下，增益提升至 $5 \times 10^6$ 。因此，原子层沉积技术是一种有效提升MCP增益的方法。

#### 4 “日盲”紫外微通道板型光电倍增管封接工艺

光窗封接技术是光电倍增管研制过程中的关键技术之一，封接失败将直接导致整管制作失败，造成极大的浪费；封接出现慢漏现象，将影响光电倍增管的寿命，危害性更大。阴极坪曲线、前后脉冲比例和整管寿命都与封接息息相关。

##### 4.1 封接面金属层制备工艺

目前最普遍的封接工艺是热钎封工艺。在热钎封过程中，钎锡焊料与玻璃光窗直接接触进行密封封接时，由于二者之间的浸润性较差，封接时整管易出现漏气现象。因此，本文采用了多层金属薄膜下的热钎封接技术，由于铜银与钎锡合金具有较好的浸润性，设计玻璃光窗封接层的结构为玻璃/Cr/Cu/Ag，从而使

得玻璃-金属膜层-钎锡合金晶格相互匹配。采用电子束蒸发的方法进行金属膜层的制备，项目组现有的镀膜机为双舟蒸发模式，不能同时进行3种金属的蒸镀。因此对镀膜机设备进行改造，调整镀膜机限位开关及电机控制模式，增加蒸发舟至3个，并设计封接面金属层专用镀膜夹具。通过研究和设计合适的金属膜层蒸镀工艺，控制铬、铜、银3种金属膜层之间的最佳匹配厚度，调试膜层蒸镀真空度，避免膜层与光窗的脱落现象。通过设计不同膜层厚度的蒸镀实验，最终确定的各金属层的最佳厚度为Cr(1500nm)/Cu(5500nm)/Ag(5500nm)，镀膜真空度为 $9.0 \times 10^{-4}$ Pa，该技术可将整管钎封合格率提升至97%。

##### 4.2 钎封定位技术研究

整管制备采用的是双工位排气台。进行光窗与管壳钎封过程，需利用传递手将完成阴极制备的光窗引导至管壳顶部钎封位置，此过程对于光窗与管壳钎封位置的对位精准度要求极高，要求达到0.1mm量级。当对位精准度不够时，可能导致封接时钎锡合金从槽内流出漫延到通道板表面破坏通道板并造成短路，同时也可能使光窗与钎锡合金封接面接触存在缝隙从而导致钎封失败。因此需要合理设计钎封封接装置，

如图 10 所示, 确保光窗与管壳的精准封接, 降低钎封的失败率。

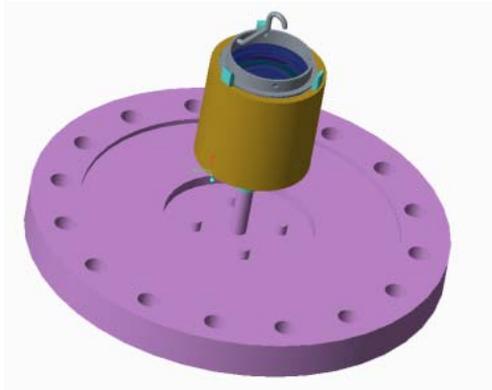


图 10 钎封定位装置

Fig.10 Indium seal positioning device

## 5 结论

本文设计了一种“日盲”紫外微通道板型光电倍增管结构, 通过光学增透设计, 将 250 nm 处的辐射灵敏度从 22 mA/W 提高到 26.5 mA/W; 微通道板采用 38~41 的长径比同时优化压屏温度, 可以在一定程度上提高微通道板增益, 而采用原子沉积 ALD 技术则可以在仅采用两片 MCP 叠加的前提下将增益大幅提高到  $5 \times 10^6$ ; 通过电子光学仿真对其时间性能进行仿真, 得到信号上升时间小于 500 ps, TTS 优于 0.1 ns 的结构。通过对比国内外同类型其他产品, 除增益外, 当前产品在辐射灵敏度和时间性能上仍有一定提升空间, 这也是我们下一步要继续开展的工作。

## 参考文献:

[1] 倪国强, 钟生东, 刘榴绵, 等. 自由大气紫外光学通信的研究[J]. 光学技术, 2000(4): 297-303.  
NI Qiangguo, ZHONG Shengdong, LIU Liudi, et al. Study on ultraviolet communication through disengaged atmosphere[J]. *Optical Technique*, 2000(4): 297-303.

[2] 鲜勇, 赖水清. 日盲紫外探测技术的军事应用[J]. 直升机技术, 2016(2): 67-72.  
XIAN Yong, LAI Shuiqing. Military applications of the blind ultraviolet detection technology[J]. *Helicopter Technique*, 2016(2): 67-72

[3] 陈薛刚, 占光. 紫外光通信的军事应用研究[J]. 国防科技, 2010, 31(3): 24-27.  
CHEN Xuegang, ZHAN Guang. A study of UV communication theory and its military application[J]. *National Defense Science and Technology*, 2010, 31(3): 24-27.

[4] 滨松公司. 滨松光电倍增管产品手册[M/OL]. [2020-07-10]. <http://www.hamamatsu.com.cn/UserFiles/DownFile/Product/R3809U-50>

\_TPMH1067E.pdf.  
Hamamatsu Corp. Hamamatsu Products Information[EB/OL][2020-07-10]. [http://www.hamamatsu.com.cn/UserFiles/DownFile/Product/R3809U-50\\_TPMH1067E.pdf](http://www.hamamatsu.com.cn/UserFiles/DownFile/Product/R3809U-50_TPMH1067E.pdf).

[5] 黄敏, 赵文锦. GDB-601 型微通道板光电倍增管[J]. 光电子技术, 1995(4): 311-315.  
HUANG Min, ZHAO Wenjin. GDB-601 Microchannel plate photomultiplier tube[J]. *Optoelectronic Technology*, 1995(4): 311-315

[6] 戴丽英, 李慧蕊, 黄敏, 等. 紫外多阳极(128×128)微通道阵列光电倍增管的研制[J]. 真空科学与技术, 2000(1): 44-48.  
DAI Liying, LI Huirui, HUANG Min, et al. Development of ultraviolet multi-anode(128×128) microchannel arrays photomultiplier tube[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2000(1): 44-48.

[7] 黄波. 毫米波磁控管热测方法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.  
HUANG Bo. The Research of Thermal Measurement Methods Millimeter Wave Magnetron[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.

[8] 李云峰. 门控分幅相机增益特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
LI Yunfeng. Study on Gain character of Gated Framing Camera. Chongqing: Chongqing University, 2010.

[9] 李晓峰, 姜云龙, 李靖雯, 等. Cs<sub>2</sub>Te 紫外光电阴极带外光谱响应研究[J]. 红外技术, 2015, 37(12): 1068-1073.  
LI Xiaofeng, JIANG Yunlong, LI Jingwen, et al. Study on spectral response beyond cut off of Cs<sub>2</sub>Te ultra violet photo cathode[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(12): 1068-1073.

[10] 李晓峰, 赵学峰, 陈其钧, 等. K<sub>2</sub>Te(Cs)日盲紫外光电阴极研究[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 155-160.  
LI Xiaofeng, ZHAO Xuefeng, CHEN Qijun, et al. Study on K<sub>2</sub>Te(Cs) solar blind ultraviolet cathode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 155-160.

[11] 百度文库. 常见增透膜材料[R/OL]. [2020-07-10]. <https://wenku.baidu.com/view/e9713aa79b89680202d8252d.html>.  
Baiduwenku. Common anti-reflection film materials[R/OL] [2020-07-10]. <https://wenku.baidu.com/view/e9713aa79b89680202d8252d.html>.

[12] 张翼. 硅微通道阵列高温氧化及整形技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.  
ZHANG Yi. High Temperature Oxidation and Shaping Technology of Silicon Microchannel Array[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015

[13] 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): 224-229.  
CONG Xiaoping, QIU Xiangbiao, SUN Jianing, et al. Properties of microchannel plate emission layer deposited by atomic layer deposition[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 224-229.