

## 阴极制备工艺对高温光电倍增管性能的影响

严仕凯<sup>1,2</sup>, 司曙光<sup>1,2\*</sup>, 王兴超<sup>1,2</sup>, 任玲<sup>1,2</sup>, 金睦淳<sup>1,2</sup>, 江涛<sup>1</sup>, 王亮<sup>1,2</sup>, 吴凯<sup>1,2</sup>, 金真<sup>1,2</sup>, 黄国瑞<sup>1,2</sup>, 涂蕴超<sup>1</sup><sup>1</sup>北方夜视科技(南京)研究院有限公司, 江苏 南京 211106;<sup>2</sup>微光夜视技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065

**摘要** 高温光电倍增管是石油测井的关键器件,介绍了两种制备高温Na-K-Sb光电阴极的工艺,并比较了制备工艺对光电倍增管性能的影响。从测试结果可以看出,同蒸工艺制备的光电倍增管具有更高的量子效率、阴极积分灵敏度、能量分辨率以及更优异的坪特性,通过分析光谱响应曲线和高低温曲线可以得到性能提升的根本原因,即同蒸工艺制备的光电阴极的光电发射能力更强、热电子发射能力更弱,借助微观形貌表征分析得出同蒸工艺制备的光电阴极厚度更均匀、膜层更致密平滑、均匀性更好。针对高温光电倍增管的实际应用场景,测试评估高温光电倍增管的高温性能,并与国外同类产品性能进行对比。

**关键词** 探测器; 光电倍增管; 高温; 光电阴极; 制备工艺; 石油测井

中图分类号 O462.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231312

## 1 引言

光电倍增管(PMTs)是一种真空型光电器件,能将微弱光信号转换为可测量电信号并将其放大约100万倍,在很多极微弱光探测领域,例如高能物理、医疗诊断、分析仪器、资源探测、环境监测等,PMTs都有着不可替代的地位<sup>[1]</sup>。根据功能和应用的不同,可以将PMTs分为常规PMTs、高温PMTs、低温PMTs、位置敏感PMTs等。其中高温PMTs在石油测井领域具有重要应用,为社会创造了巨大的价值。目前,国内极度缺乏高温PMTs的研制和生产能力,且其性能与世界先进水平存在明显差距,因此亟须开展自主可控的高温PMTs研制技术,实现国产替代。

石油测井仪所采用的高温闪烁探测器主要由闪烁体、高温PMTs、高压电源及信号处理电路组成。高温PMTs是石油测井仪的核心部件,其结构包括光窗、光电阴极、倍增级、阳极和管壳,主要功能是接收并探测岩层中发射出的微弱伽马射线,从而获取地层下的石油的沉积位置和储量信息。地下温度会随着深度不断升高,每深入100 m温度升高约3 °C,我国石油层的位置一般位于地下3500 m,该深度温度高达175 °C,对PMTs各个部件的耐高温能力要求苛刻,特别是光电阴极<sup>[2]</sup>。常见的光电阴极包括Cs-I、Cs-Te、Cs-Sb、Rb-Cs-Sb、K-Cs-Sb、Na-K-Sb、Na-K-Cs-Sb、Ag-O-Cs、半导体阴极等,普通阴极在高温环境下性能变差甚至分解,而Na-K-Sb双碱阴极可以耐高温,且在高温下的噪

声较小,有利于探测微弱光,常被应用于高温PMTs的光电阴极、粒子加速器中的真空电子源等领域<sup>[3-5]</sup>。

光电阴极的质量对PMTs的性能起到决定性的作用,为了获得高质量的光电阴极膜层,往往需要不断优化阴极的制备工艺<sup>[6]</sup>。目前,国内外主流的光电阴极的制备方法包括单蒸法(顺序沉积法)和同蒸法(共沉积法)两种。基于单蒸工艺制备Na-K-Sb高温阴极多见于真空电子源领域的报道,如Cultrera等<sup>[7]</sup>在2013年报道一种制备Na-K-Sb高温阴极的单蒸工艺,即依次蒸镀Sb、K和Na源,最后为了弥补表面Na过量,需要通过交替蒸发非常薄(小于1 nm)的Sb和K以恢复甚至提高光电阴极的量子效率,532 nm光照下的量子效率约为5%。2018年,Xiao等<sup>[8]</sup>采用上述方法制备了Na-K-Sb双碱阴极,Na-K-Sb双碱阴极代替GaAs光电阴极并应用于太赫兹自由电子激光装置中。而基于同蒸工艺制备Na-K-Sb高温阴极鲜有单独报道,仅存在于Na-K-Cs-Sb多碱阴极Cs敏化工艺的前道工序中<sup>[9]</sup>。因此,为了研制出能应用于高温PMTs的Na-K-Sb阴极,并进一步提高其光电性能,本文将对比利用基于单蒸和同蒸两种工艺制备的Na-K-Sb高温阴极制作的高温PMTs的性能,并揭示影响性能的内在机理。此外,本文还测试评估了所制备高温PMTs在实际应用场景中的性能。

## 2 实验方法

如图1(a)所示,单蒸法制备Na-K-Sb高温阴极:

收稿日期: 2023-07-26; 修回日期: 2023-09-11; 录用日期: 2023-10-07; 网络首发日期: 2023-10-17

通信作者: \*sishuguang@126.com

1) 常温下先在衬底上蒸镀一层初始 Sb 膜, 其厚度一般通过反射率变化的绝对值控制; 2) 升温后, 蒸 K 与铟 Sb 反应形成  $K_3Sb$  层; 3) 最后蒸 Na, 从而实现 Na-K-Sb 高温阴极的制备。单蒸法的方法简单高效, 适合批量生产, 有利于降低成本。

如图 1(b) 所示, 同蒸法制备 Na-K-Sb 高温阴极:

1) 在高温下先蒸 K, 形成 K 的氛围; 2) 一定时间后, 打开 Sb 源电流, 同时通过蒸发 K 和 Sb 制备  $K_3Sb$  层; 3) 之后蒸镀 Na, 使  $K_3Sb$  与 Na 反应生成 Na-K-Sb 高温阴极; 4) 重复 K-Sb 同蒸和进 Na 过程, 得到理想的 Na-K-Sb 高温阴极厚度。同蒸法的制备工艺相对复杂, 但过程可控性强, 易获得均匀性好、光电转换能力强的光电阴极。

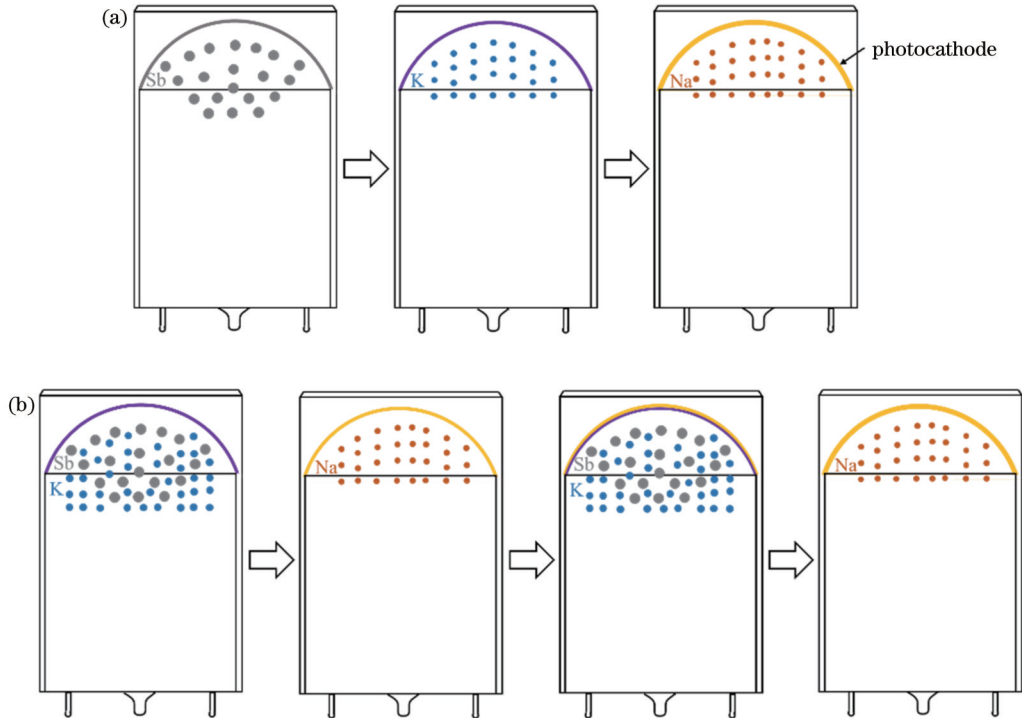


图 1 制备高温光电阴极的示意图。(a) 单蒸工艺; (b) 同蒸工艺

Fig. 1 Schematic diagrams of preparation of high temperature photocathodes. (a) Mono-evaporation technique; (b) co-evaporation preparation technique

### 3 分析与讨论

#### 3.1 不同工艺制备的 PMTs 性能测试与对比

为了比较两种制备工艺对 Na-K-Sb 光电阴极特性的影响, 对两组 PMTs 样品 (每组 50 只) 进行了量子效率和阴极灵敏度测试, 测试结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 同蒸工艺制备的 PMTs 的量子效率和阴极灵敏度都得到了一定的提高, 量子效率的中位数从单蒸工艺的 9.45% 提升至同蒸工艺的 14.69%, 提高了 55.4%; 阴极灵敏度的中位数从单蒸工艺的 26.53  $\mu A/lm$  提升至同蒸工艺的 49.96  $\mu A/lm$ , 提高了 88.3%。此外, 从图 2 中还可以看出单蒸工艺的量子效率分布较宽, 这说明单蒸工艺的重复性较差, 而同蒸工艺的量子效率分布较窄, 呈较对称的正态分布, 说明同蒸工艺的重复性相对较好, 这是因为同蒸工艺制备光电阴极的过程的可控性更强。

从上述 100 只 PMTs 样品中选取了两种不同工艺制备的具有代表性的管子各一只, 两只 PMTs 均处于量子效率均值附近, 这样能较好地体现两种不同工艺

制备的 PMTs 的光电探测能力。对这两只高温管样品的能量分辨率进行评估, 使用多道分析仪测量 PMTs 与 NaI(Tl) 闪烁晶体耦合后的  $^{137}Cs$  能谱, 如图 3 所示。根据能量分辨率的定义  $R = \Delta P / P$  (其中  $R$  为能量分辨率,  $P$  为峰值,  $\Delta P$  为半峰全宽), 可以计算出单蒸工艺、同蒸工艺制备的高温 PMTs 的能量分辨率分别为 8.9% 和 7.5%, 能量分辨率越低, 分辨不同能量峰的能力就越强, 因此同蒸工艺制备的高温 PMTs 的能量分辨率相比单蒸工艺制备的高温 PMTs 提升了 15.7%。在倍增系统结构和倍增能力同等的条件下, 能量分辨率的大小与阴极积分灵敏度以及阴极均匀性有关。阴极均匀性的测试结果如图 3(b) 和 (c) 所示, 其中图 3(b) 为单蒸工艺制备的高温阴极, 其阴极面中间的量子效率低, 边缘量子效率高, 量子效率的均匀性较差。而对于图 3(c) 所示的同蒸工艺制备的高温阴极, 其绝大部分的量子效率在 15% 附近, 更高的阴极积分灵敏度和更优异的阴极均匀性是导致其能量分辨率更高的主要原因。

接着, 测试上述两种不同工艺制备的高温 PMTs

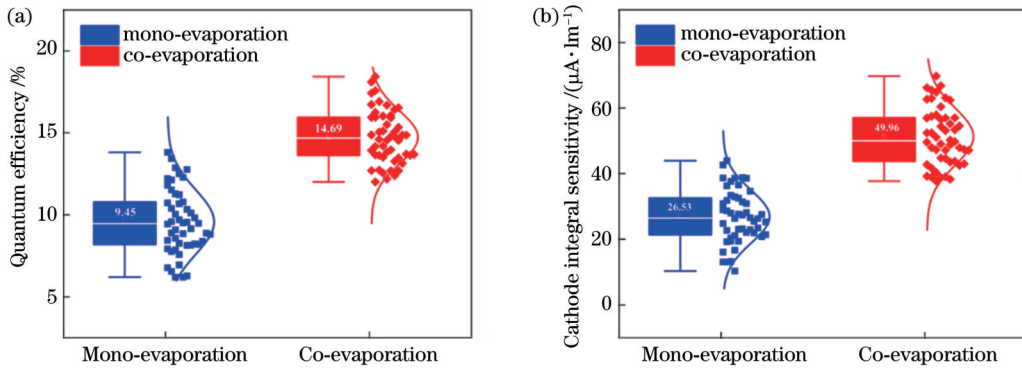


图 2 两种制备工艺制备的高温 PMTs 性能对比。(a)量子效率;(b)阴极积分灵敏度

Fig. 2 Performance comparison for high temperature PMTs prepared by two different techniques. (a) Quantum efficiency; (b) cathode integral sensitivity

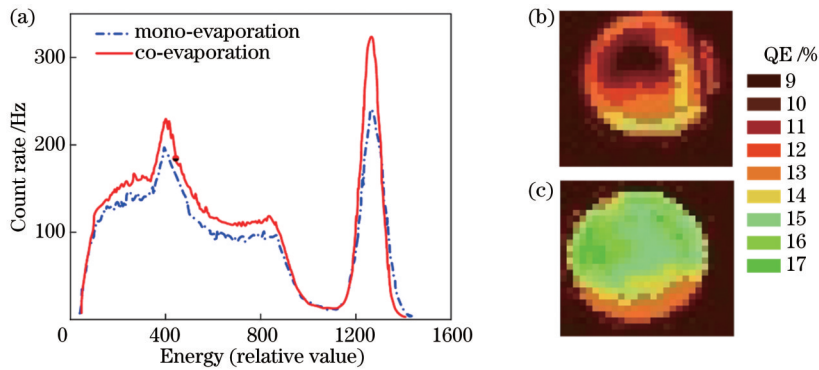


图 3 两种制备工艺制备的高温 PMTs 能量分辨率曲线和量子效率均匀性对比。(a)能量分辨率曲线;(b)单蒸和(c)同蒸制备的高温 PMT 量子效率均匀性图

Fig. 3 Energy resolution and quantum efficiency uniformity for high temperature PMTs prepared by two different techniques. (a) Energy resolution curves; quantum efficiency uniformity comparison of (b) mono-evaporation and (c) co-evaporation preparation techniques

的坪特性曲线如图 4 所示。坪特性的测试原理是在阈值一定时,提高 PMTs 的工作电压,甄别并记录超过阈值的脉冲数。如图 4 所示,同蒸工艺制备的 PMTs 计数率更高,这是因为同蒸工艺制备的阴极积分灵敏度更高,光电转换效率更高,单位时间内管子能收集到的光子数更多。坪曲线的高压部分反映了管子噪声特性,噪声大的管子使得计数率快速上升,坪曲线更容易上翘,从而使得坪区变窄<sup>[10]</sup>。从图 4 中可以看出,单蒸工艺制备的 PMTs 在 1900 V 后变化较大,而同蒸工艺制备的 PMTs 计数率则变化较小,因此,后者的坪区更长。坪斜公式为  $\eta = 10^4 \times (N_2 - N_1) / [N_{ave} \times (V_2 - V_1)]$ ,其中  $N_1$  和  $N_2$  为坪区起点和终点处的计数率,  $V_1$  和  $V_2$  为坪区起点和终点处的电压,  $N_{ave}$  为坪区内计数率的平均值。在起始电压为 1600 V、坪长为 200 V 的条件下,计算得到同蒸和单蒸工艺制备的高温 PMTs 的每百伏坪斜分别为 2.5%、5.8%,坪斜越小,在实际应用过程中给出的计数越稳定,同蒸工艺制备的高温 PMTs 的计数稳定性相比单蒸工艺制备的高温 PMTs 提升了约 56.9%。

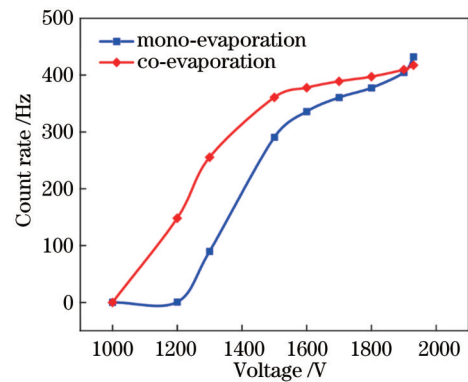


图 4 两种制备工艺制备的高温 PMTs 坪特性曲线对比

Fig. 4 Plateau characteristic curves for high temperature PMTs prepared by two different techniques

### 3.2 不同工艺制备的 PMTs 性能差异的原因分析

为了探究不同工艺带来不同性能的深层原因,对这两只高温管样品进行光谱响应曲线测试,如图 5 所示。光谱响应曲线能够反映光电阴极对不同波长的响应大小,有利于挖掘阴极丰富的信息<sup>[11]</sup>。由图 5 可见,与单蒸工艺制备的光电阴极相比,同蒸工艺制备的样



品的光谱响应在所有波段均有一定程度的提高。值得注意的是,在长波响应上,同蒸和单蒸的截止波长不同,光谱响应特性的长波段一般由光电阴极材料决定<sup>[12]</sup>。由图 5 可知:同蒸工艺制备的 PMTs 的长波截止波长比单蒸工艺长约 80 nm,根据逸出功公式  $W = 1240/\lambda$  ( $W$  为功,  $\lambda$  为波长),同蒸工艺制备的高温光电阴极的逸出功降低了 0.24 eV,逸出功越低,电子克服表面势垒所需要做的功就越少,电子就越容易逸出,电子发射能力就越强。因此,从光谱响应曲线测试结果可以得出,同蒸工艺制备的 Na-K-Sb 高温光电阴极具有更好的电子发射能力。

接着测试了不同工艺制备的 PMTs 在相同增益下的暗计数率,如表 1 所示,采用去阴极的分压器测得 PMTs 除去阴极后的噪声,两只管子去阴极暗计数率都为 0 Hz,说明本文制备的高温 PMTs 最核心的噪声来源是阴极噪声,这也是本文将高温 PMTs 的研究重心集中在光电阴极的原因。而热电子发射噪声是阴极噪声最重要的组成部分,可以通过高低温曲线衡量光电阴极的热电子发射能力。从 30 °C 到 0 °C,以 5 °C 为间隔,每个温度保温 2 h,用于稳定暗计数率,测试了两只 PMTs 暗计数率随温度的变化情况如图 6 所示,在相同温度下单蒸工艺制备的 PMTs

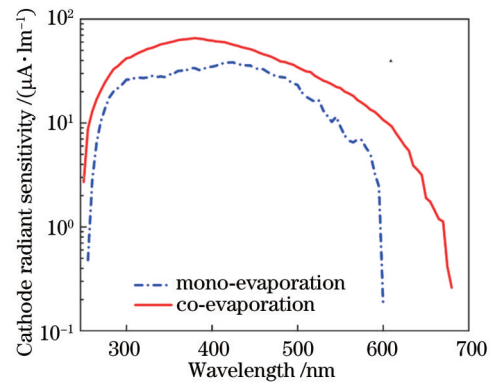


图 5 两种制备工艺制备的高温 PMTs 的光谱响应曲线对比  
Fig. 5 Comparison of spectral response curves for high temperature PMTs prepared by two different techniques

暗计数率相比于同蒸制备的 PMTs 要高很多。温度从 30 °C 降至 0 °C,单蒸工艺制备的 PMTs 的暗计数率从 582 Hz 降至 20 Hz,而同蒸工艺制备的 PMTs 的暗计数率从 72 Hz 降至 7.4 Hz,单蒸工艺的单位温度暗计数率变化量 (18.7 Hz/°C) 远大于同蒸工艺 (2.15 Hz/°C),说明单蒸工艺制备的光电阴极对温度更敏感。因此,从高低温实验数据分析得出,同蒸工艺制备的 Na-K-Sb 高温光电阴极热电子发射能力更弱。

表 1 两种制备工艺制备的高温 PMTs 去阴极前后测试暗噪声数据对比

Table 1 Dark noise comparison for high temperature PMTs prepared by two different techniques before and after removing cathode

Parameter	Voltage /V	Gain /10 <sup>5</sup>	Total noise /Hz	Noise after cathode removal /Hz	Cathode noise ratio /%
Mono-evaporation	1750	6.77	120	0	100
Co-evaporation	1645	6.79	1150	0	100

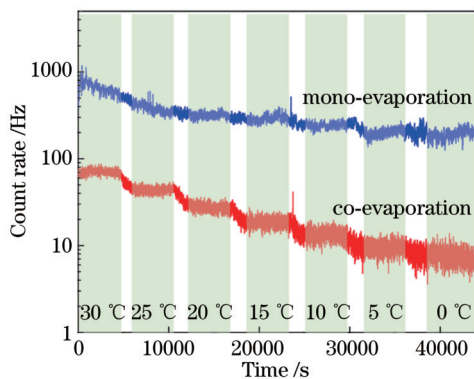


图 6 两种制备工艺制备的高温 PMTs 的高低温曲线对比  
Fig. 6 Comparison of high and low temperature curves for high temperature PMTs prepared by two different techniques

### 3.3 高温光电阴极微观形貌表征

从上文得出不同的阴极制备工艺会导致高温光电阴极电子发射能力和热电子发射能力的差异。在已报道的文献中,X 射线光电子能谱(XPS)和 X 射线衍射(XRD)被用来挖掘光电阴极的化学成分、晶格结构的信息,从材料层面揭示了光电阴极的生长机理<sup>[13-16]</sup>。

本文将利用扫描电子显微镜(SEM)表征两种工艺制备的光电阴极的形貌,从微观形貌结构的角度探究光电阴极光电发射和热发射的影响规律和调控机制。SEM 能够提供光电阴极膜层的微观形貌、孔隙率、晶粒结构、厚度、均匀性和表面粗糙度等信息,这些信息能帮助我们理解高温阴极特性差异的原因,并为优化阴极制备工艺指明方向<sup>[17]</sup>。

首先测试了高温阴极截面的 SEM,得到了两种工艺制备的 Na-K-Sb 高温阴极在 3 个不同位置的膜层厚度信息,如图 7 所示。从图 7 中可以清晰地看出,同蒸工艺制备的 Na-K-Sb 高温阴极厚度在 3 个位置的差异较小,而单蒸工艺制备的高温阴极厚度均匀性较差,特别是边缘位置的厚度仅为中心位置的一半。厚度均匀性差会导致碱金属激活程度差异性大,较厚区域激活不透彻,较薄区域则会激活过量,从而导致不同位置的光电发射能力相差较大<sup>[18]</sup>。厚度的分布与上文提到的量子效率分布相互印证,同蒸工艺制备出来的厚度均匀的高温阴极,其量子效率均匀性也会更好,而单蒸法这种一步到位制备出来的高温阴极,往往存在 Na、K、

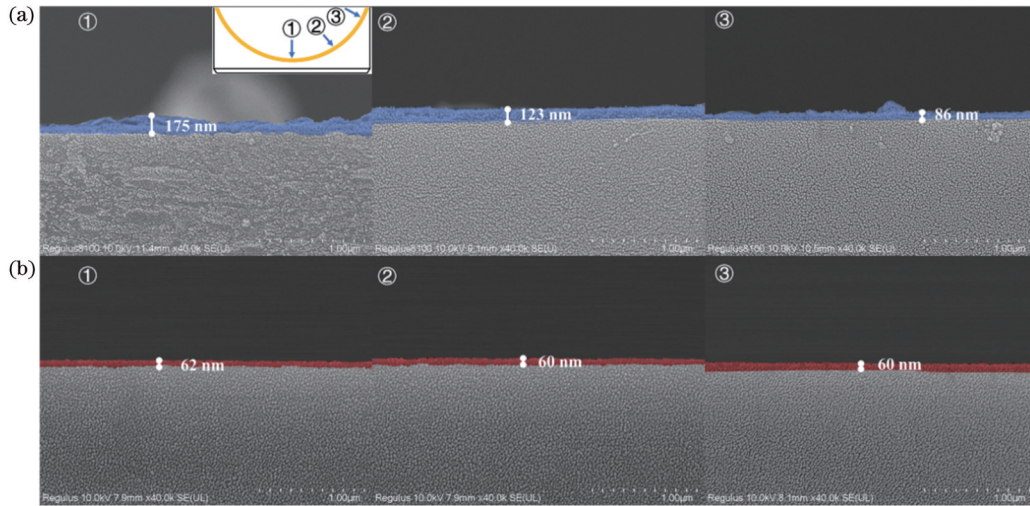


图 7 高温光电阴极在光窗 3 个不同位置的厚度对比。(a)单蒸工艺;(b)同蒸工艺

Fig. 7 Thickness comparison at three different positions in light window of high temperature photocathode window. (a) Mono-evaporation preparation technique; (b) co-evaporation preparation technique

Sb元素分布不均匀的问题,光电转换能力的大小分布也很不均匀,从而使得量子效率分布不均匀<sup>[19]</sup>,所制备的高温PMTs的能量分辨率较低。

对比图8(a)、(c)的表面形貌图可以看出,单蒸工艺制备的处于光窗中心位置的光电阴极膜层疏松多孔、表面粗糙且晶界较多,这会带来大量的表面缺陷,而同蒸工艺制备的处于中心位置的光电阴极膜层致密平滑,表面缺陷相对较少。表面缺陷会缩短光生电子寿命、生成缺陷能级<sup>[20]</sup>,从而导致光电阴极的光电子发

射能力变弱,热电子发射能力变强。通过分析比较图8(a)和(b),以及图8(c)和(d),可以看出单蒸工艺的光电阴极均匀性较差,边缘的光电阴极膜层的表面形貌与中心区域差异性较大,而同蒸工艺制备的光电阴极膜层均匀性较好,光电阴极均匀性好有利于获得更高的能量分辨率。同蒸过程的K氛围可增加Sb蒸气与基底间的浸润性,避免了Sb在基底上成核不均匀,从而形成厚度均匀和Na、K、Sb配比恰当的Na-K-Sb高温阴极膜层,提高了阴极膜层的均匀性<sup>[21-22]</sup>。

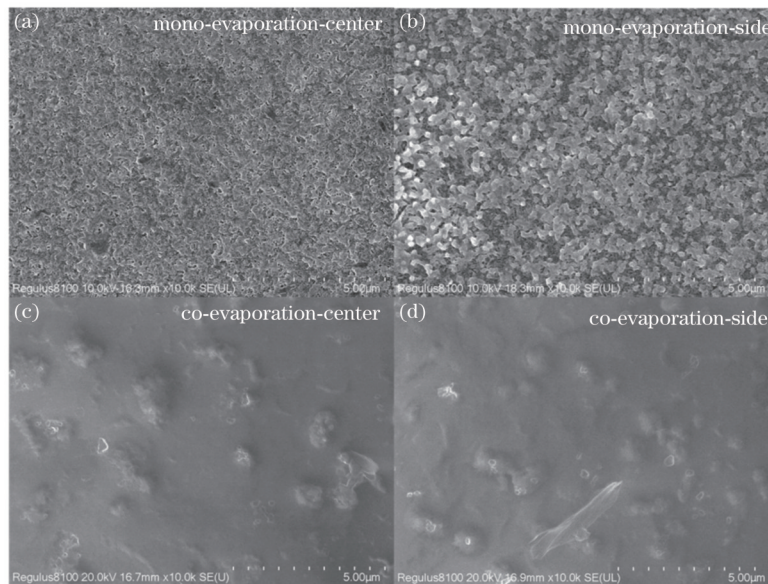


图 8 高温光电阴极光窗中心和光窗边缘两处位置的表面形貌对比。(a)(b)单蒸工艺;(c)(d)同蒸工艺

Fig. 8 Surface morphology comparison at center and edge of high temperature photocathode window. (a)(b) Mono-evaporation preparation technique; (c)(d) co-evaporation preparation technique

综上,通过SEM微观形貌的分析,可以看出同蒸工艺制备的高温阴极厚度更均匀,膜层更致密平滑,形貌均匀性更好,这是造成同蒸工艺制备的高温阴极电

子发射能力更强、热电子发射能力更弱的微观机理。

### 3.4 实际应用中的高温PMTs性能测试与评估

高温光电倍增在实际应用中需要处于高温状态,



因此需要评估其在高温情况下的性能变化,如坪特性、能量分辨率等。将同蒸工艺制备的高温 PMTs 和国外同类产品分别与高温闪烁体耦合放入高低温测试箱,测试了 20~175 °C 范围内能量分辨率随温度变化的曲线,如图 9(a)所示。在 20 °C 测试条件下,本文制备的高温 PMT 的能量分辨率与国外同类产品相当。随着温度的升高,阴极的噪声会变大,同时倍增极的倍增效果变差,因此导致能量分辨率变低,175 °C 下本文制备的高温 PMT 的能量分辨率相比 20 °C 降低约 37%。国外同类产品在相同测试条件下,当温度 20 °C 升温至 175 °C,能量分辨率仅降低约 28%。接着,对比了本文制备的高温 PMTs、国外同类产品在 25 °C 和 175 °C 温度下的坪特性曲线,如图 9(b)所示。在坪长为 200 V、起始电压为 1600 V 的

条件下,根据计算公式得到本文制备的高温 PMTs 在 25 °C 和 175 °C 下的每百伏坪斜分别为 2.5% 和 7.9%,而国外同类产品在 25 °C 和 175 °C 下的每百伏坪斜分别为 2.86% 和 3.13%,坪斜变化越大则产品对信号的计数稳定性越差,在实际应用中本文制备的高温 PMTs 的计数功能不如国外同类产品稳定。此外,可以看到在 175 °C 下,本文制备的高温 PMTs 的起坪电压从 1000 V 增大到 1200 V,且计数率相比于 25 °C 最大降幅超过 78.6%,而国外同类产品的起坪电压和计数率变化不大,这说明本文制备的高温 PMTs 增益在 175 °C 下有较大幅度的减小。为了缩小国内与国外同类产品的差距,仍需要进一步改进阴极降噪、铜铍合金敏化等工艺,提高高温 PMTs 在高温下的阴极稳定性、增益稳定性等。

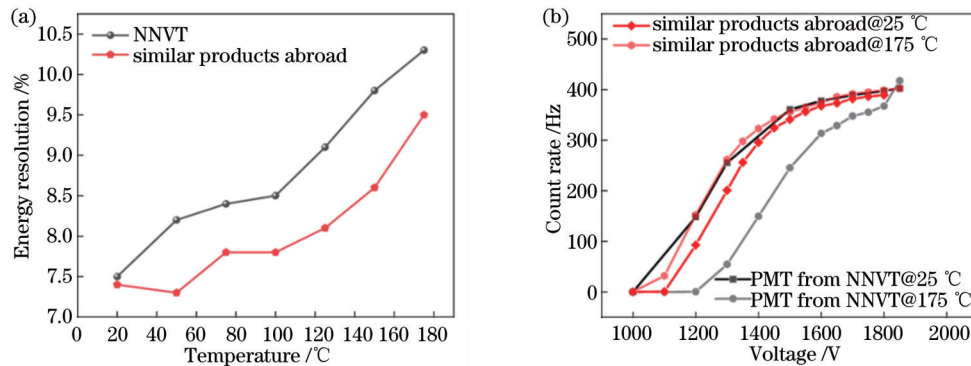


图 9 实际应用场景下高温 PMTs 的性能测试结果。(a)北方夜视科技(南京)研究院有限公司(NNVT)研制的高温 PMTs 和国外同类产品的能量分辨率随温度的变化曲线;(b)NNVT 研制的高温 PMTs 和国外同类产品在 25 °C 和 175 °C 温度下的坪特性曲线对比

Fig. 9 Test results of high temperature PMTs in practical applications. (a) Energy resolution varying with temperature for high temperature PMTs from NNVT and similar products abroad; (b) plateau characteristic comparison at 25 °C and 175 °C for high temperature PMTs from NNVT and similar products abroad

## 4 结 论

本文对比了单蒸和同蒸两种阴极制备工艺对高温 PMTs 性能的影响,从测试结果可以看出,同蒸工艺制备的高温 PMTs 表现出更优异的性能,相比于单蒸工艺制备的 PMTs,量子效率提高了 55.4%,阴极灵敏度提高了 88.3%,能量分辨率提升了 15.7%,计数稳定性提升了约 56.9%,这些结果表明本文中的同蒸工艺更适合用于制备高性能的高温 PMTs。通过分析光谱响应曲线和高低温曲线,发现同蒸工艺制备的 PMTs 性能大幅提升的本质是同蒸工艺制备的 Na-K-Sb 高温光电阴极具有更好的电子发射能力和更弱的热电子发射能力。本文通过微观表征进一步揭示了高温阴极电子发射能力和热电子发射能力差异的微观机理,即同蒸工艺制备的 Na-K-Sb 高温光电阴极的厚度更均匀,膜层更致密平滑,形貌均匀性更好。该机理可推广应用于其他类型的光电阴极制备,有助于指导高性能 PMTs 的研制。在实际应用场景中,本文制备的高温 PMTs 与国外同类产品仍存在差距,具体表现为在

175 °C 下高温 PMTs 的计数稳定性较差、增益有较大幅度的降低,因此阴极降噪、铜铍合金敏化等工艺仍需进一步改进,以达到国际先进水平。

## 参 考 文 献

- [1] March S D, Jones A H, Campbell J C, et al. Multistep staircase avalanche photodiodes with extremely low noise and deterministic amplification[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(6): 468-474.
- [2] 陈兴焱. 高温光电倍增管[J]. *物理*, 1986, 15(10): 625-626.  
Chen X Y. High temperature photomultiplier tube[J]. *Physics*, 1986, 15(10): 625-626.
- [3] 李晓峰, 李燕红, 石峰, 等. Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb 光电阴极与 GaAs 光电阴极比较研究[J]. *红外技术*, 2013, 35(3): 173-179.  
Li X F, Li Y H, Shi F, et al. Study on the difference between GaAs cathode and Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb cathode[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(3): 173-179.
- [4] Musumeci P, Navarro J G, Rosenzweig J B, et al. Advances in bright electron sources[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 907: 209-220.
- [5] 刘燕文, 张耿民, 刘惟敏, 等. 激光驱动的钠钾铍光电阴极的稳定性研究[J]. *中国激光*, 1996, 23(3): 255-259.  
Liu Y W, Zhang G M, Liu W M, et al. Investigation on the

- stability of Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb photocathode stricken by laser pulses[J]. Chinese Journal of Lasers, 1996, 23(3): 255-259.
- [6] Zhang F, Li X P, Li X S. Development of preparation systems with K<sub>2</sub>CsSb photocathodes and study on the preparation process [J]. Chinese Physics Letters, 2019, 36(2): 022901.
- [7] Cultrera L, Karkare S, Lillard B, et al. Growth and characterization of rugged sodium potassium antimonide photocathodes for high brilliance photoinjector[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(10): 36-44.
- [8] Xiao D X, Pany Q, Wang H B, et al. Design of multi-alkali photocathode preparation system for CTFEL facility[C]//9th International Particle Accelerator Conference, April 29-May 4, 2018, Vancouver, Canada. Vancouver: IPAC, 2018: 1571-1573.
- [9] 赵恒, 常乐, 李廷涛, 等. 多碱光电阴极的 Cs-O 激活技术研究 [J]. 红外技术, 2018, 40(7): 695-700.  
Zhao H, Chang L, Li T T, et al. Study on Cs-O activation technology of multi-alkali photocathode[J]. Infrared Technology, 2018, 40(7): 695-700.
- [10] 杨雷, 王辉. 光电倍增管选择及使用[J]. 中国化工贸易, 2014 (13): 114.  
Yang L, Wang H. Selection and use of photomultiplier tube[J]. China Chemical Trade, 2014(13): 114.
- [11] 傅江涛, 张松春, 常本康. 反射式非均匀掺杂负电子亲和光电阴极量子效率研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1492-1496.  
Fu J T, Zhang S C, Chang B K. Study on the quantum efficiency for non-uniform doping negative electron affinity photocathode with reflection mode[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1492-1496.
- [12] 张益军. 半导体光电阴极的研究进展[J]. 红外技术, 2022, 44 (8): 778-791.  
Zhang Y J. Progress in research on semiconductor photocathodes [J]. Infrared Technology, 2022, 44(8): 778-791.
- [13] Ding Z H, Karkare S, Feng J, et al. Temperature-dependent quantum efficiency degradation of K-Cs-Sb bialkali antimonide photocathodes grown by a triple-element codeposition method [J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2017, 20(11): 113401.
- [14] Schubert S, Ruiz-Osés M, Ben-Zvi I, et al. Bi-alkali antimonide photocathodes for high brightness accelerators[J]. APL Materials, 2013, 1(3): 032119.
- [15] Ruiz-Osés M, Schubert S, Attenkofer K, et al. Direct observation of bi-alkali antimonide photocathodes growth via in operando X-ray diffraction studies[J]. APL Materials, 2014, 2 (12): 121101.
- [16] Schubert S, Wong J, Feng J, et al. Bi-alkali antimonide photocathode growth: an X-ray diffraction study[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 120(3): 035303.
- [17] Yusof Z, Attenkofer K, Demarteau M, et al. Development of an alkali transfer photocathode for large area microchannel plate-based photodetectors[J]. Physics Procedia, 2012, 37: 733-739.
- [18] 李晓峰, 陆胜林, 杨文波, 等. Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb 膜层组份均匀性对多碱阴极灵敏度的影响研究[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1171-1175.  
Li X F, Lu S L, Yang W B, et al. Component uniformity study on Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb film of multi-alkali photocathode[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(10): 1171-1175.
- [19] 安迎波, 徐向晏, 孙巧霞, 等. 多碱光电阴极灵敏度理论模拟 [J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0331001.  
An Y B, Xu X Y, Sun Q X, et al. Simulation of multi-alkali photocathode sensitivity[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0331001.
- [20] Erjavec B. Activation of the Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb photocathode with Cs and O<sub>2</sub> at lowered temperatures[J]. Applied Surface Science, 1996, 103(4): 343-349.
- [21] 李朝木, 李谷川, 贾文. 多碱光电阴极[J]. 真空与低温, 1992 (1): 11-13, 10.  
Li C M, Li G C, Jia W. Multi-alkali photocathode[J]. Vacuum and Cryogenics, 1992(1): 11-13, 10.
- [22] 曾桂林, 周立伟, 李晓峰. 多碱光阴极玻璃基底表面处理研究 [J]. 激光与红外, 2005, 35(7): 508-511.  
Zeng G L, Zhou L W, Li X F. Research on surface treatment of multialkali photocathode glass substrate[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(7): 508-511.

## Influence of Photocathode Preparation Techniques on Performance of High-Temperature Photomultiplier Tubes

Yan Shikai<sup>1,2</sup>, Si Shuguang<sup>1,2\*</sup>, Wang Xingchao<sup>1,2</sup>, Ren Ling<sup>1,2</sup>, Jin Muchun<sup>1,2</sup>, Jiang Tao<sup>1</sup>,  
Wang Liang<sup>1,2</sup>, Wu Kai<sup>1,2</sup>, Jin Zhen<sup>1,2</sup>, Huang Guorui<sup>1,2</sup>, Tu Yunchao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>North Night Vision Science & Technology (Nanjing) Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, Shaanxi, China

### Abstract

**Objective** High-temperature photomultiplier tubes (PMTs) play an important role in oil logging. Till now, there has been a lack of their research and manufacturing capabilities domestically, and a significant gap in their performance compared to the world's advanced level. Therefore, it is urgent to develop independent and controllable technology for achieving domestic alternative high-temperature PMTs. The photocathode quality exerts a decisive effect on the performance of PMTs. It is necessary to optimize the photocathodes preparation techniques for high-quality photocathodes. To develop a Na-K-Sb high-temperature cathode that can be applied to high-temperature PMTs and further improve its photoelectric performance, we compare the performance of high-temperature PMTs fabricated by mono-evaporation and co-evaporation techniques and reveal the inherent mechanism affecting the performance. Additionally, we

also test and evaluate the performance of the prepared high-temperature PMTs in practical applications.

**Methods** Quantum efficiency and photocathode sensitivity are tested to explore the effects of preparation techniques on the properties of high-temperature PMTs. The ability to distinguish energy peaks is studied by measuring the  $^{137}\text{Cs}$  energy spectrum after coupling PMTs with NaI (Tl) scintillation crystals using a multi-channel analyzer. The plateau characteristic curves of high-temperature PMTs prepared by different techniques are measured. To explore the underlying reasons for different performances, we test spectral response curves and high- and low-temperature curves on the two high-temperature PMTs. Meanwhile, the film thickness and surface morphology information of the Na-K-Sb high-temperature photocathode prepared by the two techniques are analyzed by scanning electron microscope, which can reveal the microscopic mechanism. The high-temperature PMTs coupled with high-temperature scintillators are placed in a chamber at 175 °C to study their performance in practical applications.

**Results and Discussions** The test results show that the high-temperature PMTs prepared by the co-evaporation technique exhibit better performance. Compared with the PMTs prepared by the mono-evaporation technique, the quantum efficiency is increased by 55.4% and the photocathode sensitivity is enhanced by 88.3%, with the energy resolution increasing by 15.7% and counting stability improving by 56.9%. This indicates that the proposed co-evaporation preparation technique is more suitable for preparing high-temperature PMTs with high performance. The analysis of the spectral response curve and the high- and low-temperature curves shows that the essential reason for significant performance improvement of PMTs prepared by the co-evaporation technique is that the Na-K-Sb high-temperature photocathode prepared by the co-evaporation technique has better photoelectric emission ability and weaker thermionic emission ability. The microscopic mechanism of different photoelectric emission ability and thermionic emission ability for the high-temperature photocathode is further revealed by microscopic characterization. It reveals that the Na-K-Sb high-temperature photocathode prepared by the co-evaporation technique has a more uniform thickness, a denser and smoother film, and better morphology uniformity. In practical applications, the prepared high-temperature PMTs show relatively poor energy resolution, plateau characteristics, and gain at 175 °C compared with like products internationally.

**Conclusions** We study the effects of photocathode preparation techniques on the performance of high-temperature PMTs. The two preparation techniques for preparing high-temperature Na-K-Sb photocathodes are introduced, and their effects on the performance of PMTs are compared. The test results indicate that PMTs prepared by the co-evaporation technique have better quantum efficiency, cathode radiant sensitivity, energy resolution, and plateau characteristics. By analyzing the spectral response curve and high- and low temperature curves, we can conclude that the photocathode prepared by the co-evaporation technique has stronger photoelectric emission capacity and weaker thermionic emission ability, which is the fundamental reason for the performance improvement. Combined with the microscopic morphology characterization analysis, it is found that the photocathode film layer prepared by the co-evaporation technique is denser, smoother, and more uniform, which reveals the underlying mechanism for the different photoelectric emission and thermionic emission abilities between the two techniques. This mechanism can be applied to prepare other photocathode types, which helps promote the development of high-performance PMTs. In practical applications, the prepared high-temperature PMTs still show relatively poorer performance than like products internationally. Thus, advanced research on noise reduction of photocathode and CuBe sensitization technique is needed to improve the performance of high-temperature PMTs to the international advanced level.

**Key words** detectors; photomultiplier tube; high temperature; photocathode; preparation technique; oil logging