

〈综述与评论〉

## 高性能超二代像增强器及发展

李晓峰<sup>1,2</sup>, 赵恒<sup>1</sup>, 张彦云<sup>1</sup>, 张勤东<sup>1</sup>

(1. 北方夜视技术股份有限公司, 云南 昆明 650217; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 本文介绍了高性能超二代像增强器的技术特征及性能, 并与普通超二代像增强器进行了比较, 提出了进一步改进高性能超二代像增强器性能的技术途径。超二代像增强器是在二代像增强器基础上, 采用新技术、新工艺和新材料而发展起来的, 性能较二代像增强器有大幅提升。近年来, 超二代像增强器由于使用了光栅窗, 性能又有了进一步的提升。光栅窗的使用, 增加了 Na<sub>2</sub>KSb 光电阴极膜层的吸收系数, 使阴极灵敏度达到 1000 μA·lm<sup>-1</sup> 以上, 10<sup>-4</sup> lx 照度条件下的分辨力达到 17 lp·mm<sup>-1</sup> 以上。可以预计, 通过进一步优化和改进 Na<sub>2</sub>KSb 光电阴极膜层的制作工艺, 同时进一步优化光栅窗的结构, 提高光栅窗的增强系数, 那么 Na<sub>2</sub>KSb 光电阴极的灵敏度将会达到 1350~1800 μA·lm<sup>-1</sup>, 信噪比达到 35~40; 通过 4 μm 小丝径 MCP 以及 3 μm 光纤面板的应用, 分辨力将会达到 81 lp·mm<sup>-1</sup> 以上。

**关键词:** 像增强器; 光栅; 灵敏度; 分辨力; 信噪比

中图分类号: TN223, Q462.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)09-0811-06

## High Performance Super Second Generation Image Intensifier and Its Further Development

LI Xiaofeng<sup>1,2</sup>, ZHAO Heng<sup>1</sup>, ZHANG Yanyun<sup>1</sup>, ZHANG Qindong<sup>1</sup>

(1. North Night Vision Technology Co., Ltd, Kunming 650217, China;

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

**Abstract:** This paper presents the technical characteristics and performance of high performance super second generation image intensifier, compares it with ordinary super second generation image intensifier, and puts forward the technical measures to further improve the performance of high performance super second generation image intensifier. Super second generation image intensifier is a kind of image intensifier with higher performance over second generation image intensifier. It was developed by application of new technology, new craft and new material on the base of the second generation image intensifier. After nearly 30 years of development, its performance has been greatly improved. In recent years, due to the use of grating window on the super second generation image intensifier, the sensitivity of the Na<sub>2</sub>KSb photocathode is over 1000 μA·lm<sup>-1</sup>, and the resolution is above 17 lp·mm<sup>-1</sup> on the illumination of 10<sup>-4</sup> lx. It would be predicted that the sensitivity of Na<sub>2</sub>KSb photocathode will reach 1350-1800 μA·lm<sup>-1</sup>, and the signal-to-noise ratio will reach 35-40 by further improving the fabrication process of Na<sub>2</sub>KSb film and optimizing the structure of grating. It would be predicted that the resolution will reach 81 lp·mm<sup>-1</sup> through use of microchannel plate of 4 μm diameter and fiber optical plate of 3 μm diameter, the resolution is likely to reach 81 lp·mm<sup>-1</sup>.

**Key words:** image intensifier, grating, sensitivity, resolution, signal to noise ratio

### 0 引言

人眼由于受到探测阈值的限制, 在夜间看不见物体。微光像增强器的作用就是使人眼在夜间也能

看见物体<sup>[1-2]</sup>。其工作原理是利用光电阴极将入射光转换为光电子, 再利用微通道板 (Microchannel plate, MCP)<sup>[3]</sup>对光电子进行倍增, 之后再提高 MCP 输出电

收稿日期: 2020-09-22; 修订日期: 2020-11-11.

作者简介: 李晓峰 (1963-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要研究方向为微光夜视技术。E-mail: 984118295@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金 (11535014)。

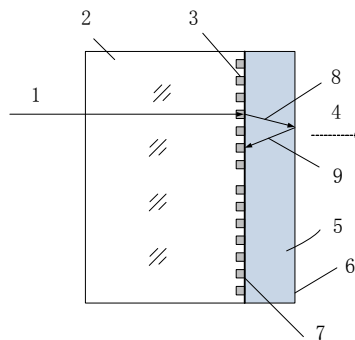
子的动能，最后使其轰击荧光屏发光，从而获得亮度适合人眼观察的可见光图像。微光像增强器从结构上讲包括输入窗、光电阴极、MCP、荧光屏、输出窗、管壳以及高压电源等。输入窗起输入光学图像和支撑光电阴极的作用，光电阴极起光电转换的作用，MCP 起电子数量倍增的作用，荧光屏起电光转换的作用，输出窗起支撑荧光屏并输出光学图像的作用，管壳起真空封装的作用，高压电源起对光电子运动进行加速的作用。

目前像增强器主要有两种，一种为超二代像增强器，另一种为三代像增强器。超二代像增强器采用  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极<sup>[4-5]</sup>，而三代像增强器则采用  $\text{GaAs}$  光电阴极<sup>[6-8]</sup>。超二代像增强器是在二代像增强器的基础上，采用新技术、新工艺和新材料而发展起来的。因为性能提高显著，因此将这种性能更高的二代像增强器称为超二代像增强器。超二代像增强器的主要参数包括阴极灵敏度、增益、信噪比、分辨力等。阴极灵敏度定义为单位入射光通量所产生的光电流。增益定义为像增强器输出窗上的亮度与输入窗上的照度之比；分辨力定义为像增强器荧光屏上所能分辨的最高黑白线对数（线密度）；信噪比定义为像增强器输出信号平均值与噪声（噪声定义为信号与信号平均值偏差的均方根值）之比。

超二代像增强器从 20 世纪 80 年代中期开始，到 20 世纪 80 年代末实现产业化，至今已经发展了近 30 年。在这 30 年的发展过程中，其性能得到不断提高，品质因子(Figure of Merit, FOM)从 500 提高到了 1800 以上。FOM 定义为信噪比与分辨力的乘积<sup>[9]</sup>。超二代像增强器技术以法国 PHOTONIS 公司为代表，相关的技术标准和规范也由 PHOTONIS 公司制定和引领。近年来，随着 PHOTONIS 公司 4G 系列像增强器的出现，使超二代像增强器的性能达到了一个新的高度。4G 系列像增强器的标志是阴极灵敏度达到  $1000 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ，品质因子达到 1800。4G 系列像增强器与之前的超二代像增强器一样，仍然采用  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极。4G 系列像增强器由于性能的提高，应用范围更广，可以在月光星光、沙漠丛林、天空海面、城市乡村等多种环境下使用。以下称 4G 系列像增强器为高性能超二代像增强器；称之前的超二代像增强器为普通超二代像增强器。本文分析了高性能超二代像增强器的技术特征及性能，并与之前的超二代像增强器进行了比较，提出了进一步提高性能的技术途径，为超二代像增强器的研发以及应用提供参考。

## 1 特征及性能

PHOTONIS 公司高性能超二代像增强器与普通超二代像增强器相比，一个重要的区别是所采用的阴极输入窗不同。普通超二代像增强器采用玻璃窗，而高性能超二代像增强器却采用透射式衍射光栅窗。透射式衍射光栅窗（以下简称光栅窗）的结构见图 1。该光栅窗由一个玻璃窗和一个光栅所组成，其中的玻璃窗起支撑的作用，光栅起使输入光发生偏转的作用。如图 1 中的输入光线 1 经过玻璃窗 2 达到光栅 3，由于光栅 3 的衍射作用，使得输入光 1 发生偏转，这样进入光电阴极膜层 5 的光线 8 就成为斜射光，而斜射光 8 到达光电阴极的真空界面 6 时，因为满足全反射的条件<sup>[10-11]</sup>，因此会发生全反射，使光线 8 再次反射回光电阴极，形成光线 9，这样入射光在光电阴极内部的光程增加了一倍，因此增加了入射光的吸收率，从而提高了  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极的灵敏度。



1. Input photon, 2. Glass window, 3. Diffraction grating, 4. Emission electron, 5. Photocathode, 6. Vacuum interface, 7. Photocathode interface, 8. Diffracting photon, 9. Reflection photon

图 1 高性能超二代像增强器的光电阴极结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of photocathode for super second generation image intensifier with high performance

图 2 为光栅窗  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极与普通玻璃输入窗（以下简称普通窗） $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极的光谱响应曲线，其中曲线“Grating window”表示光栅窗  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极的光谱灵敏度，而曲线“Glass window”则表示普通窗  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极的光谱灵敏度。从图中可以看出，光栅窗与普通窗的光谱灵敏度相比，在整个光谱响应范围内，光谱灵敏度均有不同程度的提高，并且波长越长，提高的比例越大。原因是  $\text{Na}_2\text{KSb}$  材料是一种多晶半导体，相对于单晶半导体（如  $\text{GaAs}$  半导体），电子的扩散长度较小，因此其厚度不能太厚，否则光电子不能扩散到真空界面，从而不能逸出光电阴极形成光电流。由

于  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极厚度较薄，因此对入射光吸收不充分，特别是对长波。而采用光栅窗之后，由于吸收系数增加，对入射光的吸收更充分，特别是长波，因此光栅窗光电阴极的光谱灵敏度在长波方向的增加比例较大。长波光谱灵敏度的增加，将进一步提高  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极与夜天光的光谱匹配系数，从而改善高性能超二代像增强器在夜天光条件下的使用性能。

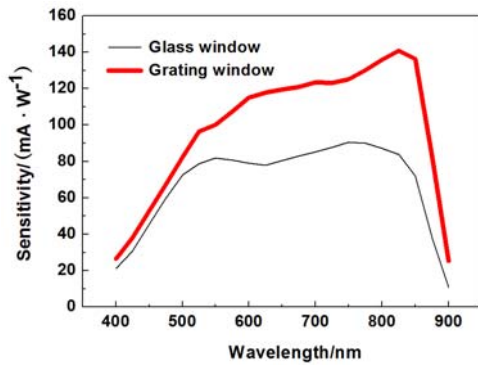


图2 不同阴极窗的光电阴极光谱分布

Fig.2 Spectral distribution of photocathode on different windows

采用光栅窗之后，同样的  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极，由于吸收系数的增加，阴极灵敏度可以提高，所提高的倍数称为增强系数 (Enhance coefficient, EC)。EC 由式(1)定义：

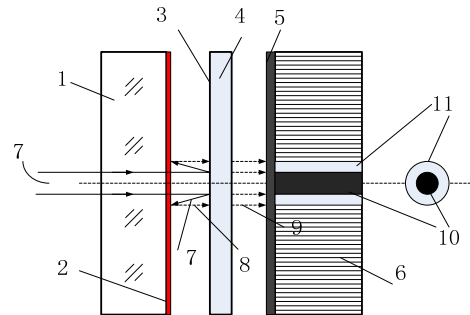
$$EC = S_1 / S_2 \quad (1)$$

式中： $S_1$  和  $S_2$  分别为相同光电阴极在光栅窗和玻璃窗上的阴极灵敏度。例如对同一组制作的 4 支超二代像增强器，2 支为采用光栅窗的超二代像增强器，另外 2 支为采用玻璃窗的超二代像增强器。4 支像增强器由于是同时制作，因此可以认为 4 支像增强器的光电阴极是相同的。2 支光栅窗像增强器的平均阴极灵敏度为  $S_1$ ，另外 2 支玻璃窗像增强器的平均阴极灵敏度为  $S_2$ ，这样光栅窗的 EC 可以根据式(1)计算出来。

目前采用普通窗的  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极灵敏度在  $750 \sim 1000 \mu\text{A} \cdot \text{lm}^{-1}$  之间，而对于 4G 系列超二代像增强器，目前阴极灵敏度在  $1100 \sim 1400 \mu\text{A} \cdot \text{lm}^{-1}$  之间<sup>[10-11]</sup>，因此可以推算出 4G 系列超二代像增强器所使用光栅窗的 EC 为 1.40~1.45。

采用普通窗的  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极，由于对输入光的吸收不充分，因此透过  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极的光线还会被 MCP 的输入端反射回光电阴极，从而再次激发光电阴极发射光电子，而形成较亮的光晕，原理见图 3。如光束 7 经过阴极窗 1，再经过光电阴极 2，一部分被光电阴极所吸收，另一部分透过光电阴极入射到 MCP 的输入端 3 上面，经过 MCP 输入端反射回光电阴极 2，使光电阴极发射光电子 9，而光电子 9

再经过 MCP 的倍增，激发荧光屏 5 发光，最后从光纤面板输出窗 6 输出，因此在入射光束所成亮斑 10 的周围形成了一个光晕 11。光晕包括电子光晕和光学光晕，此处所述的光晕是指光学光晕。采用光栅窗的  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极，因为吸收系数增加，光吸收更充分，因此形成的光晕较小并且较暗。



1. Input window, 2. Photocathode, 3. Input end of MCP, 4. MCP, 5. Phosphor screen, 6. Fiber optical Plate, 7. Reflection light, 8. Photoelectron, 9. Output electron, 10. Bright spot, 11. Halo

图3 光晕形成的原理示意图

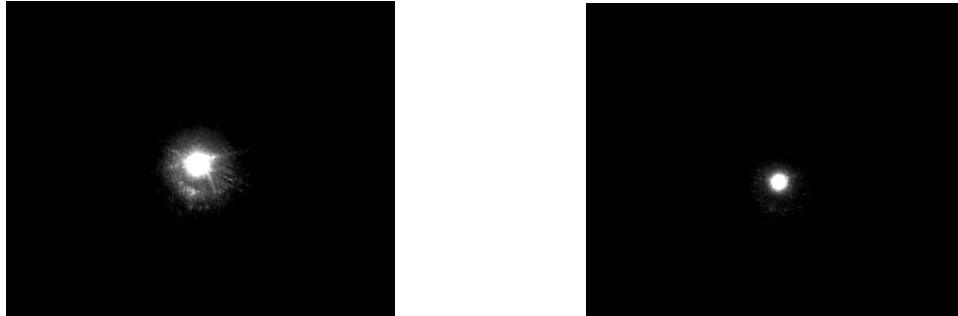
Fig.3 Schematic diagram of halo generation

图 4 为高性能超二代像增强器和普通超二代像增强器对圆形亮斑成像的对比。投射在光电阴极上的圆形亮斑的尺寸和照度相同，但经过像增强器成像之后，在荧光屏上所观察到的图像却不一样。亮斑在荧光屏上的图像由两部分组成，中心的亮斑为入射圆形光斑的图像，而在亮斑周围的一圈亮环即为光晕。对于高性能像增强器而言，不仅亮斑的尺寸较小，同时光晕的直径也较小，见图 4(a)。但对于超二代像增强器而言，不仅亮斑图像的尺寸较大，而言光晕的直径也较大，见图 4(b)。高性能超二代像增强器的光晕较小且较暗，因此在城市周边或机场周边使用时，亮光源（如灯泡）对目标图像的干扰较小。

高性能超二代像增强器与普通超二代像增强器相比较，由于性能提高显著，使得其最低探测阈值进一步降低。为了比较两种像增强器探测阈值的变化，对低照度条件下的像增强器分辨力进行了测量。测量样品分别为一支高性能超二代以及一支普通超二代像增强器，其中高性能超二代像增强器的阴极灵敏度为  $1214 \mu\text{A} \cdot \text{lm}^{-1}$ ，增益为  $15000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ ，信噪比为 32.2，分辨力为  $68 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ；普通超二代像增强器的阴极灵敏度为  $874 \mu\text{A} \cdot \text{lm}^{-1}$ ，增益为  $15000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ ，信噪比为 28.4，分辨力为  $68 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。分辨力测量仪的光源为 2856 K 色温的钨丝灯，靶板规格为 USF1951。测量时，先在  $10^{-1} \text{ lx}$  数量照度（阴极面上）条件下测量两支像增强器的分辨力，然后再在光路中分别加入 10 倍、100 倍或 1000 倍的中性密度衰减滤光片，

再分别测量两支像增强器的分辨力。测量结果表明，随着照度的不断降低，两支像增强器的分辨力均有所降低，但分辨力基本相同。当照度进一步降低到  $10^{-4}$  lx 数量级时，普通超二代像增强器分辨力接近于消失，很难分别出分辨力靶板的图像，见图

5(a)，但高性能超二代像增强器仍然能分辨出分辨力靶板的图像，并且分辨力仍有  $17 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，见图 5(b)。这说明高性能超二代像增强器的阴极灵敏度提升以后，较超二代像增强器而言，极限探测能力有了很大的提高。



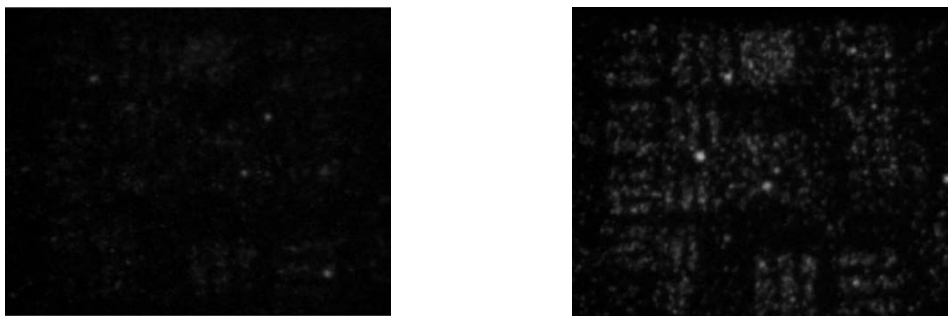
(a) 普通超二代像增强器

(b) 高性能超二代像增强器

(a) Super second generation image intensifier (b) Super second generation image intensifier with high performance

图 4 不同型号像增强器光晕比较

Fig.4 Halo comparison of different image intensifier



(a) 普通超二代像增强器

(b) 高性能超二代像增强器

(a) Super second generation image intensifier (b) Super second generation image intensifier with high performance

图 5 不同型号像增强器分辨力比较

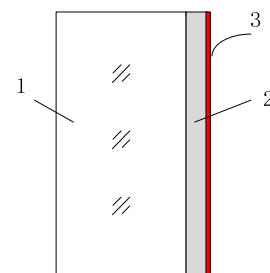
Fig.5 Resolution comparison of different image intensifier

## 2 提高性能的技术途径

在不改变现有超二代像增强器技术框架的前提下进一步提高超二代像增强器的信噪比和分辨力仍然是超二代像增强器的发展方向。因为像增强器的信噪比<sup>[12-13]</sup>与阴极灵敏度的平方根成正比，因此提高信噪比的关键就是提高阴极灵敏度。

$\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极从结构上讲由两部分组成。一部分为  $\text{Na}_2\text{KSb}$  吸收层，另一部分为  $\text{Cs}_3\text{Sb}$  表面层，见图 6。 $\text{Na}_2\text{KSb}$  吸收层的作用是吸收光子，产生跃迁电子； $\text{Cs}_3\text{Sb}$  表面层的作用是降低光电阴极的逸出功，因此  $\text{Na}_2\text{KSb}$  吸收层以及  $\text{Cs}_3\text{Sb}$  表面层均对  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极的灵敏度高低起作用。由于  $\text{Cs}_3\text{Sb}$  表面层较薄，约 15 nm，再加上制作工艺相对容易，因此工艺的一致性和重复较好，所以长期以来制作工艺相对固定。而对于  $\text{Na}_2\text{KSb}$  基底层而言，由于其

厚度较厚，约 200 nm，再加上制作工艺较难，因此工艺的一致性和重复性较差，所以制作工艺一直在不断改进或优化。从  $\text{Na}_2\text{KSb}$  光电阴极灵敏度提高的过程看，主要是  $\text{Na}_2\text{KSb}$  吸收层的制作工艺得到了不断的优化，而  $\text{Cs}_3\text{Sb}$  表面层的制作工艺却未发生变化。



1. Glass window, 2.  $\text{Na}_2\text{KSb}$  layer, 3.  $\text{Cs}_3\text{Sb}$  layer

图 6 光电阴极结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of structure for photocathode

表1为4支普通超二代像增强器阴极灵敏度的实测值。从表中看出，4支普通超二代像增强器样品的阴极灵敏度高低不同，最高的为 $917\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ，最低的为 $582\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。但其长波截止波长变化不大，在 $950\ \text{nm}\sim 955\ \text{nm}$ 之间。长波截止波长基本相同，意味着4支样品的逸出功基本相同，再加上 $\text{Cs}_3\text{Sb}$ 表面层的制作工艺基本相同，所以可以认为4支普通超二代像增强器样品阴极灵敏度不同的原因在于 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 吸收层的不同。例如0615#和6495#两支样品，长波截止波长相同，均为 $950\ \text{nm}$ ，逸出功也相同，均为 $1.3\ \text{eV}$ ，但其阴极灵敏度却差别很大，0615#样品的阴极灵敏度仅为 $582\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ，而6495#样品的阴极灵敏度却为 $917\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。又如7650#样品和8550#样品相比较，7650#样品的截止波长为 $955\ \text{nm}$ ，比8550#样品的长波截止波长长 $5\ \text{nm}$ ，逸出功小 $0.01\ \text{eV}$ ，但7650#样品的阴极灵敏度为 $702\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ，比8550#样品的阴极灵敏度低，8550#样品的阴极灵敏度为 $748\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ，这也说明造成 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 光电阴极灵敏度产生差距的主要因素在于 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 吸收层。如果 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 吸收层的性能不好（如晶格质量、吸收系数、掺杂浓度、杂质含量、扩散长度等），那么即使 $\text{Cs}_3\text{Sb}$ 表面层达到了降低 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 光电阴极逸出功的要求，阴极的灵敏度也不会高。目前 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 光电阴极制作的实践证明，通过改进 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 吸收层的制作工艺能够提高光电阴极的灵敏度，并且阴极灵敏度最高可以超过 $1000\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ，并且接近 $1100\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。尽管制作工艺改进对 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 吸收层性能影响的机理还不甚清楚，但改进工艺确实是进一步提高光电阴极灵敏度的有效的方法。所以加强对 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 材料的研究，搞清楚机理，并通过理论对实践进行指导，不断改进或优化 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 吸收层的制作工艺是提高 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 阴极灵敏度的途径。可以预计随着 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 制作工艺的进一步改进，普通玻璃窗 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 光电阴极的灵敏度将会达到 $850\sim 1150\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 之间。

表1 不同光电阴极灵敏度及逸出功

Sample	Sensitivity/ $(\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1})$	Threshold/nm	Work function/eV
0615#	582	950	1.30
6495#	917	950	1.30
7650#	702	955	1.29
8550#	748	950	1.30

在通过改进 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 吸收层的制作工艺，进一步提高 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 光电阴极灵敏度的同时，还可以进一步提高光栅窗的EC。根据相关报道<sup>[10-11]</sup>，光栅窗的结构以及制造工艺有多种选择，随着技术的发展，光

栅窗的结构将进一步优化，光栅密度和衍射效率将进一步提高，同时EC也将进一步提高。如果光栅窗的EC达到1.6，而普通窗 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 光电阴极的灵敏度达到 $850\sim 1150\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ，那么光栅窗 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 光电阴极的灵敏度可以达到 $1350\sim 1800\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。如果MCP的噪声因子为1.1，根据理论计算<sup>[12-13]</sup>，超二代像增强器的信噪比将达到 $35\sim 40$ 。

提高超二代像增强器分辨力的最直接的技术途径就是采用小丝径的MCP和光纤面板<sup>[14-15]</sup>。目前实践证明，采用 $6\ \mu\text{m}$ 丝径MCP和 $4\ \mu\text{m}$ 丝径光纤面板的超二代像增强器，分辨力可以达到 $72\ \text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，根据理论推算<sup>[16-17]</sup>，如果采用 $4\ \mu\text{m}$ 丝径MCP和 $3\ \mu\text{m}$ 丝径光纤面板，那么预计分辨力将可以达到 $81\ \text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 以上，因此FOM将会达到 $2800\sim 3200$ 之间。

### 3 结论

在颠覆性技术出现之前，超二代像增强器技术仍然是沿着现有的技术路线不断发展，因为无论是在提高 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 光电阴极的灵敏度，还是在提高超二代像增强器的分辨力方面，均有进一步提高的空间。在超二代像增强器技术的发展过程中，PHOTONIS公司平均每5年实现一次技术提升<sup>[18]</sup>，因此可以预计在今后的 $5\sim 10$ 年时间内，超二代像增强器的性能还会达到一个更高的水平。

超二代像增强器采用 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 光电阴极，而 $\text{Na}_2\text{KSb}$ 是一种多晶半导体，生长工艺相对简单，因此生产成本低，具有性价比高的优点，而这一优点与单兵夜视装备要求性价比高的特点相吻合，所以超二代像增强器在未来 $5\sim 10$ 年时间内，在单兵夜视装备领域仍然具有不可替代性。

### 参考文献：

- [1] LIU Qiankun, LIU Lei, DENG Yubin, et al. Apparent distance theory vision for low-light-level night vision system based on noise factor[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, **49**(7): 249-264.
- [2] 金伟其, 张琴, 王霞, 等. 一种改进的直视型微光夜视系统视距模型[J]. *光子学报*, 2020, **49**(4): 0411001.  
JIN Weiqi, ZHANG Qin, WANG Xia, et al. An improved apparent distance model for direct-view low-light-level night vision system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4): 0411001.
- [3] LU Nianhua, YANG Yigang, LIU Jingwen, et al. Neutron detector design based on ALD coated MCP[J]. *Physics Procedia*, 2012, **26**: 110-115.
- [4] Pranav Gupta, Luca Cultrera, Ivan Bazarov. Monte Carlo simulations of electron photoemission from cesium antimonide[J]. *Journal of Applied*

- Physics*, 2017, **121**(21): 215702.
- [5] Dimitrov D A, Bell G I, Smedley J, et al. Modeling quantum yield, emittance, and surface roughness effects from metallic photocathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **122**(16): 165303.
- [6] Siddharth Karkare, Dimitre Dimitrov, William Schaff, et al. Monte Carlo charge transport and photoemission from negative electron affinity GaAs photocathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(10): 104904.
- [7] Sinor T W, Estera J P. An analysis of electron scattering in the thin dielectric films used as ion barriers in generation III image tubes[C]//*SPIE*, 2003, **4796**: 23-32.
- [8] Estera J P, FORD C E, Giordana A, et al. High reliability GaAs image intensifier with unfilmed microchannel plate[C]//*SPIE*, 1999, **3749**: 713-714.
- [9] BOSCH L A. Image intensifier tube performance is what matters[C]//*SPIE*, 2000, **4128**: 65-78.
- [10] Gert Nutzel, Pascal Lavout. Sem-transparent photocathode with improved absorption rate: US, 9960004B2[P]. 2018-005-01.
- [11] 格特·怒茨泽尔, 帕斯卡尔·拉武特. 具有改善吸收率的半透明的光电阴极:CN,104781903A[P]. 2015-07-15.  
Gert Nutzel, Pascal Lavout. Sem-transparent photocathode with improved absorption rate: CN, 104781903A[P]. 2015-07-15.
- [12] 钱芸生, 常本康, 童默颖, 等. 像增强器噪声频谱特性测试技术研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 67-70.  
QIAN Yunsheng, CHANG Benkang, TONG Moying, et al. Frequency spectrum measurement of noise of image intensifiers[J]. *ACTA Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 67-70.
- [13] 崔东旭, 郑少成, 邱亚峰, 等. 微通道板的输出信噪比特性研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, **32**(6): 468-471.  
CUI Dongxu, ZHENG Shaocheng, QIU Yafeng, et al. Output signal-to-noise ratio characteristics of microchannel plate[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, **32**(6): 468-471.
- [14] 李晓峰, 常乐, 曾进能, 等. 微通道板分辨力提高研究[J]. *光子学报*, 2019, **48**(12): 1223002.  
LI Xiaofeng, CHANG Le, ZEN Jinneng, et al. Study on resolution improvement of microchannel plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1223002.
- [15] 李晓峰, 李廷涛, 曾进能, 等. 微通道板输入信号利用率提高研究[J]. *光子学报*, 2020, **49**(3): 0325002.  
LI Xiaofeng, LI Tingtao, ZEN Jinneng, et al. Study on the improvement of input signal utilization of MCP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **49**(3): 0325002.
- [16] 向世明. 双近贴聚焦超二代微光像增强器分辨力理论极限问题研究[J]. *应用光学*, 2008, **29**(3): 351-353.  
XIANG Shiming. Study on theory limitation of resolution for double proximity focused super second generation image intensifier[J]. *Applied Optics*, 2008, **29**(3): 351-353.
- [17] 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, 1999.  
XIANG Shiming, NI Guoqiang. *Principle of Optoelectronic Imaging Device*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
- [18] 潘京生. 像增强器的迭代性能及其评价标准[J]. *红外技术*, 2020, **42**(6): 509-518.  
PAN Jingsheng. Image intensifier upgraded performance and evaluation standard[J]. *Infrared Technology*, 2020, **42**(6): 509-518.