

〈微光技术〉

## 超二代像增强器分辨力随输入照度变化研究

李晓峰<sup>1,2</sup>, 常乐<sup>1</sup>, 刘倍宏<sup>1</sup>, 须恃瑜<sup>1</sup>, 丁易冰<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:** 为研究超二代像增强器在不同输入照度下的分辨力变化规律, 在不同照度下分别对不同极限分辨力、信噪比以及等效背景照度像增强器的分辨力进行了测试。通过测试数据的分析, 得出了极限分辨力、信噪比及等效背景照度在不同照度下对分辨力影响的规律。该规律表明, 在  $5 \times 10^{-2} \text{ lx} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ lx}$  照度区间, 不同性能参数像增强器的分辨力均等于其极限分辨力, 并且分辨力不随照度的降低而降低; 在  $5 \times 10^{-3} \text{ lx} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ lx}$  照度区间, 分辨力不等于其极限分辨力, 并且分辨力均随照度的降低而降低。在分辨力随照度降低的过程中, 信噪比越高, 等效背景照度越低的像增强器, 其分辨力下降的速率越低, 并且分辨力相对更高。在  $5 \times 10^{-3} \text{ lx} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ lx}$  照度区间, 信噪比对分辨力的影响较大; 但在  $5 \times 10^{-6} \text{ lx} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ lx}$  照度区间, 等效背景照度对分辨力的影响更大。像增强器主要在弱光下使用, 因此在弱光下的分辨力更重要。要使像增强器在  $5 \times 10^{-3} \text{ lx} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ lx}$  照度区间具有更高的分辨力, 除需要提高极限分辨力外, 还需要提高信噪比及降低等效背景照度。

**关键词:** 像增强器; 分辨力; 信噪比; 等效背景照度; 对比度

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2022)04-0377-06

## Analysis of Resolution Change of the Super Gen. II Image Intensifier with Input Illumination Variation

LI Xiaofeng<sup>1,2</sup>, CHANG Le<sup>1</sup>, LIU Beihong<sup>1</sup>, XU Shiyu<sup>1</sup>, DING Yibing<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:** The resolution of image intensifier samples with different limiting resolution, signal-to-noise ratio, and equivalent background illumination were tested under different illuminations to study the variation of the resolution of Super Gen. II image intensifier. By analyzing the test data, the influence of limiting resolution, signal-to-noise ratio and equivalent background illumination on resolution under different illuminations were obtained. The results show that in the range of  $5 \times 10^{-2}$  to  $5 \times 10^{-3} \text{ lx}$ , the resolution of the image intensifier with different performance parameters is identical to its limiting resolution, and the resolution does not decrease with decreasing illumination. In the range of  $5 \times 10^{-3}$  to  $5 \times 10^{-7} \text{ lx}$ , the resolution differs from its limiting resolution, and the resolution decreases with decreasing illumination. In the case of resolution decreasing with illumination, the higher the signal-to-noise ratio and the lower the equivalent background illumination, the lower the rate of resolution decrease, and the resolution remains relatively high. In the illumination range of  $5 \times 10^{-3}$  to  $5 \times 10^{-6} \text{ lx}$ , signal-to-noise ratio has a greater influence on the resolution, whereas in the illumination range of  $5 \times 10^{-6}$  to  $5 \times 10^{-7} \text{ lx}$ , the influence of equivalent background illumination is greater. As the image intensifier is mainly used in low light conditions, the resolution under these conditions is more important. To increase the resolution of the image intensifier in the illumination range of  $5 \times 10^{-3}$  to  $5 \times 10^{-7} \text{ lx}$ , it is necessary to improve the signal-to-noise ratio and reduce the equivalent background illumination as well as the limiting resolution.

**Key words:** image intensifier, resolution, signal-to-noise ratio, equivalent background illumination, contrast

收稿日期: 2021-04-14; 修订日期: 2021-04-30.

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)。

## 0 引言

超二代像增强器是一种真空光电成像器件<sup>[1-2]</sup>,除具有图像亮度增强功能外,还具有图像传输功能,因此分辨力是最重要的性能指标。超二代像增强器在制作完成后,每支均需进行性能测试,其中就包括分辨力。所测得的数值即为超二代像增强器所能达到的具体指标,称为标称指标。根据相关测试标准<sup>[3-4]</sup>,超二代像增强器分辨力是在最佳工作(输入)照度(约 $10^{-2}$  lx)下测量的,因此所测得的分辨力实际上是超二代像增强器所能达到的最高分辨力,即极限分辨力,而不是超二代像增强器在使用过程中的分辨力。超二代像增强器在使用过程中的分辨力随着照度的变化而变化。因此,如果采用极限分辨力作为参数来估算微光夜视系统在不同照度下的视距时,往往会出现较大的偏差。另外,对于极限分辨力相同的2支超二代像增强器,如果其他性能参数不同,如信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)或等效背景照度(equivalent background illumination, EBI)不同,那么

其在不同照度下的分辨力也不同。这说明超二代像增强器在不同照度下的分辨力不仅与极限分辨力有关,还与信噪比及等效背景照度有关。目前关于超二代像增强器在不同照度下的分辨力变化规律以及极限分辨力、信噪比及等效背景照度对不同照度下分辨力的影响还未见报道,因此有必要进行研究。

## 1 分辨力测量原理

超二代像增强器分辨力随照度的变化规律可以通过样品实测的方法获得,即在不同输入照度下分别测量超二代像增强器的分辨力,即可获得像增强器分辨力随照度的变化规律。分辨力测量采用传统的测量仪器。该仪器包括光源、滤光片组、分辨力靶板、投影物镜、测量样品(超二代像增强器)以及显微目镜,其结构示意图见图1。测量仪器的光源为卤钨灯,色温为2856 K。滤光片组由不同中性密度(neutral density, ND)的衰减滤光片组成,通过不同的中性密度滤光片组合,可以获得不同的输入照度。

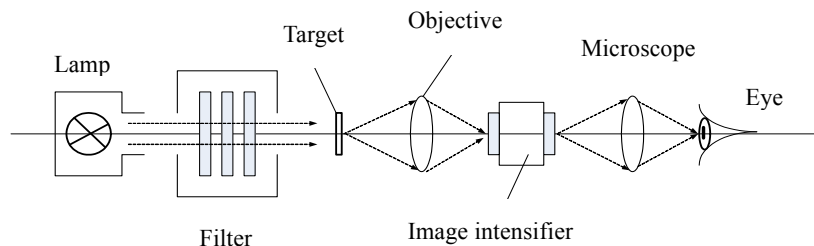


图1 分辨力测量仪器示意图

Fig.1 Diagram of measuring instrument for resolution

测量仪器的分划板为USAF-1951(US Air Force-1951)分划板。分划板的每一块靶板由两组相互垂直的分化线组成,而每一组分化线又由3条亮线和暗线组成,并且亮暗的对比度为100%,USAF-1951分划板的图形见图2。在图2中的分划板中,每6块靶板组成1组。分划板最外周的右下角为0组分划板的第1块靶板,最外周的左边分别为0组分划板的第2至第6块靶板。分划板最外周的右边(0组分划板的第1块靶板上)分别为第1组分划板的第1至第6块靶板。分划板内部是更小尺寸的分辨力靶板,排列方式与外周相同。如2组分划板的排列方式与0组分划板的排列方式相同,而3组分划板的排列方式与1组分划板的排列方式相同。

靶板经投影物镜投射在像增强器的光电阴极上,经微通道板增强以后在荧光屏上成像,该图像再被显微目镜放大供人眼观察。观察时,人眼所能分辨最小

靶标的线对数即为分辨力。测量超二代像增强器不同照度下的分辨力时,输入照度从高到低,每改变一次照度,测量一次分辨力,从 $4.3 \times 10^{-2}$  lx开始,一直到 $4.3 \times 10^{-7}$  lx为止,这样就可测出超二代像增强器不同照度下的分辨力( $R$ )。超二代像增强器测试样品的输入窗为玻璃,有效阴极直径为18 mm,光电阴极

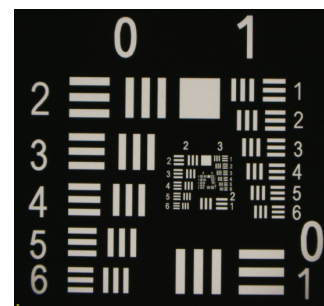


图2 分辨力测试分划板

Fig.2 Target used in resolution measurement

为 Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb (Cs) 多碱阴极, 输出窗为光纤倒像器, 荧光屏为镀铝荧光屏, 荧光粉牌号为 P43, 倍增机构为微通道板 (microchannel plate, MCP), 电子聚焦为双近贴聚焦。测量样品共 4 支, 具体性能指标, 如增益 (G)、极限分辨力 (R<sub>m</sub>)、信噪比 (SNR) 及等效背景照度 (EBI) 见表 1。另外所选超二代像增强器样品的增益 (定义为像增强器荧光屏输出亮度与光电阴极输入照度之比) 均为 15000 cd·m<sup>-2</sup>·lx<sup>-1</sup>。

表 1 试验样品参数

Sample	G/(cd·m <sup>-2</sup> ·lx <sup>-1</sup> )	R <sub>m</sub> /(lp·mm <sup>-1</sup> )	SNR	EBI/lx
5327#	15000	64	24.7	1.5×10 <sup>-7</sup>
4525#	15000	57	24.4	1.7×10 <sup>-7</sup>
3533#	15000	64	29.1	1.4×10 <sup>-7</sup>
3445#	15000	64	28.9	0.1×10 <sup>-7</sup>

## 2 分辨力随照度变化规律

图 3 为 4 支样品在不同照度下的测量结果。为叙述方便, 以下将 5×10<sup>-2</sup> lx~5×10<sup>-3</sup> lx 之间的照度称为高照度 (简称高照); 将 5×10<sup>-3</sup> lx~5×10<sup>-6</sup> lx 之间的照度称为低照度 (简称低照); 将 5×10<sup>-6</sup> lx~5×10<sup>-7</sup> lx 之间的照度称为极低照度 (简称极低照)。

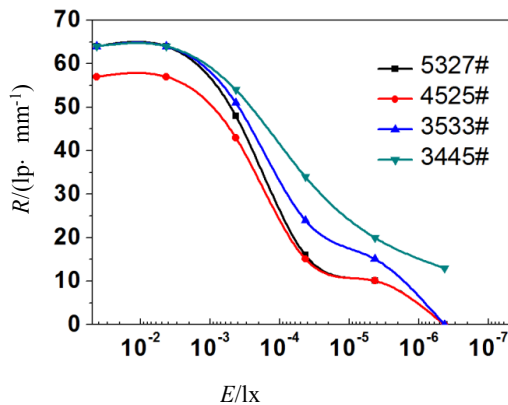


图 3 不同照度下的分辨力

Fig.3 Resolution under different illuminations

从图 3 可看出, 在高照区间, 4 支不同性能参数样品的分辨力均不随着照度的降低而降低, 均等于其极限分辨力。这说明超二代像增强器在高照下的分辨力由其极限分辨力所决定。超二代像增强器的极限分辨力越高, 其在高照区间的分辨力也越高。但在低照及极低照下, 4 支不同性能参数样品的分辨力均随着照度的降低而降低, 所不同的仅仅是分辨力曲线降低的速率。

超二代像增强器分辨力由人眼来判断, 因此是一个主观指标。人眼分辨目标遵从科尔特曼定律<sup>[5]</sup>, 即亮度 L、对比度 C 及最小分辨角 α 之间服从式(1)的关

系, 其中 K 为常数。

$$L \cdot C^2 \cdot \alpha^2 = K \quad (1)$$

对于超二代像增强器而言, 随着输入照度的降低, 其输出亮度会随之降低。在分辨力的测量过程中, 如果超二代像增强器输出图像的对比度 C 保持不变, 那么当分辨力靶板在超二代像增强器荧光屏上的亮度 L 降低以后, 根据式(1), 人眼的最小分辨角 α 随之增大。人眼分辨角 α 增大, 意味着所测量的分辨力将会减小。在高照度区间, 由于人眼的分辨角还能满足对超二代像增强器极限分辨力的分辨, 因此在高照度区间, 超二代像增强器的分辨力不随照度的降低而降低。但在低照及极低照区间, 随着人眼分辨角的进一步增大, 人眼的分辨角开始影响对超二代像增强器极限分辨力的分辨, 使得在低照及极低照区间, 超二代像增强器的分辨力随输入照度的降低而降低。所以要提高超二代像增强器在低照及极低照下的分辨力, 需要进一步提高超二代像增强器的增益, 从而增加超二代像增强器的输出亮度。但对于超二代像增强器, 增益机构为 MCP。MCP 的增益越高, 像增强器的增益越高, 但目前提高 MCP 的增益采用提高 MCP 工作电压的方法。MCP 的工作电压越高, 其噪声因子越大, 像增强器的信噪比越低。因此考虑到像增强器增益对信噪比的影响, 目前超二代像增强器的增益为 15000 cd·m<sup>-2</sup>·lx<sup>-1</sup>。为了进一步提高超二代像增强器的增益, 需要解决高 MCP 工作电压和高增益与低 MCP 噪声因子的矛盾, 这需要研制出高增益和低噪声的 MCP<sup>[6-8]</sup>。

## 3 影响分辨力变化因数分析

### 3.1 极限分辨力

为分析极限分辨力对分辨力随输入照度变化的影响<sup>[9-13]</sup>, 对 5327#和 4525#样品的分辨力曲线进行比较。5327#样品的极限分辨力为 64 lp·mm<sup>-1</sup>, 信噪比为 24.7, 等效背景照度为 1.5×10<sup>-7</sup> lx; 4525#样品的极限分辨力为 57 lp·mm<sup>-1</sup>, 信噪比为 24.4, 等效背景照度为 1.7×10<sup>-7</sup> lx。2 支样品的信噪比及等效背景照度基本相同, 主要区别在于极限分辨力, 因此比较这两支像增强器的分辨力曲线即可分析极限分辨力对不同照度下分辨力的影响。比较图 3 中 5327#和 4525#样品的分辨力曲线, 可看出在低照及极低照区间, 随着照度的降低, 其分辨力均随输入照度的降低而降低。在分辨力降低过程中, 在约 2×10<sup>-5</sup> lx 照度时两条分辨力曲线达到相交, 之后随着照度的进一步降低, 其分辨力曲线的变化基本相同, 并且在 4.3×10<sup>-7</sup> lx 时趋于 0。另外通过比较 5327#和 4525#样品的分辨力曲线还可

以看出,在低照区间,极限分辨力高的,不同照度下的分辨力也越高,并且照度越高,分辨力越高。但在极低照区间,不同极限分辨力的样品却具有相同的分辨力。

超二代像增强器的极限分辨力实际上是指其电子光学系统<sup>[14]</sup>的分辨力。超二代像增强器的电子光学成像链包括阴极近贴聚焦距离、阳极近贴聚焦距离、微通道板、荧光屏以及光纤倒像器。限于工艺制造水平的限制,目前超二代像增强器的阴极近贴聚焦距离控制在约0.15 mm,阳极近贴聚焦距离控制在约0.5 mm。如果再进一步减小距离,会降低超二代像增强器生产的良品率。因此在通过减小阴极和阳极近贴聚焦距离来提高分辨力方面困难较大。而在提高荧光屏分辨力方面,考虑到荧光屏的分辨力与发光效率之间存在一定的矛盾,因此进一步提高荧光屏的分辨力困难也较大。所以目前在提高超二代像增强器的极限分辨力方面,较可行的办法是进一步减小微通道板的孔径及荧光屏输出窗光纤面板的丝径。

### 3.2 信噪比

为了解信噪比<sup>[15-16]</sup>对不同输入照度下分辨力的影响,对图3中5327#和3533#样品的分辨力曲线进行比较。3533#样品的极限分辨力为 $64 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,信噪比为29.1,等效背景照度为 $1.4 \times 10^{-7} \text{ lx}$ ,与5327#样品相比,极限分辨力和等效背景照度基本相同,主要的区别为信噪比(见表1),因此比较这两支像增强器的分辨力曲线即可分析信噪比对不同照度下的分辨力影响。从图3可看出,2支样品在低照及极低照区间,分辨力随输入照度降低而降低的速率并不相同。3533#样品分辨力降低的速率相对较慢,并且分辨力均高于5327#样品。但3533#样品的分辨力在 $4.3 \times 10^{-7} \text{ lx}$ 时也趋于0。5327#和3533#样品在低照及极低照区间分辨力不同的原因是信噪比不同。因为在低照及极低照度下,光子涨落噪声对分辨力的影响

逐步显现。图4(a)、4(b)和4(c)分别为3533#样品在 $4.3 \times 10^{-2} \text{ lx}$ 、 $4.3 \times 10^{-4} \text{ lx}$ 以及 $4.3 \times 10^{-5} \text{ lx}$ 照度下的分辨力靶板图像。图4(a)图像中分化线的亮度均匀且稳定,未出现明显的涨落噪声,所以涨落噪声未对分辨力产生影响。图4(b)图像中分化线的亮度不均匀且闪烁,即出现明显的涨落噪声,因此对分辨力的影响开始显现,这样图像中心区域的2组及以下的靶板由于涨落噪声的影响而不能分辨,仅能分清最外周左右两边0组和1组的靶板,因此分辨力降低了。图4(c)图像中分化线的亮度更加不均匀且更加闪烁,分划线完全由随机出现的亮点(闪烁点)所组成,涨落噪声更加明显,对分辨力的影响更显著。与图4(b)相比,不仅图像中心区域的2组和3组的靶板由于涨落噪声的影响而不能分辨,而且图像左右两边的0组和1组的靶板的轮廓也较模糊,因此分辨力更低。所以涨落噪声在低照及极低照下会影响分辨力。信噪比与涨落噪声相关,在相同的信号强度下,涨落噪声越高,信噪比越低;涨落噪声越低,信噪比越高。5327#样品的信噪比为24.4,而3533#样品的信噪比为29.1,3533#样品具有更高的信噪比,因此在相同的照度下,涨落噪声更低,所以在低照及极低照区间,具有更高的分辨力。

### 3.3 等效背景照度影响

为了分析等效背景照度对不同照度下分辨力的影响,对图3中5327#和3445#样品的分辨力曲线进行比较。3445#样品的极限分辨力为 $64 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,信噪比为28.9,等效背景照度为 $0.1 \times 10^{-7} \text{ lx}$ ,与5327#样品相比较,2支样品的极限分辨力以及信噪比基本相同,其主要区别在于3445#样品的等效背景照度较5327#样品低了一个数量级(见表1),因此分析这两支像增强器的分辨力曲线可得出等效背景照度对不同照度下分辨力的影响。从图3可看出,2支样品在 $4.3 \times 10^{-4} \text{ lx}$ 以上照度区间的分辨力基本相同,但在 $4.3 \times 10^{-4} \text{ lx}$ 以下的照度区间,3445#样品的分辨力

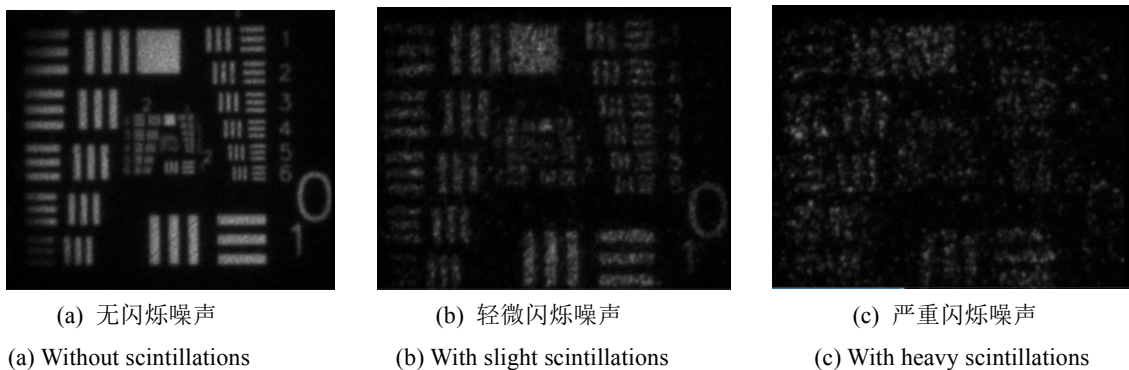


图4 不同照度下的分辨力靶板图像

Fig.4 Image of target under different illuminations



均高于 5327#样品,特别是在极低照度区间,区别更明显。如在  $4.3 \times 10^{-7}$  lx 照度时, 3445#样品的分辨力为  $10 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ , 但 5327#样品的分辨力却为 0, 因此 2 支样品等效背景照度不同是造成其分辨力在  $5 \times 10^{-7}$  lx 照度下不同的原因。如果超二代像增强器的输入照度为  $E$ , 光电阴极的灵敏度为  $S$ , 面积为  $A$ , 那么光电阴极所产生的光电流  $I_p$  和暗电流  $I_d$  分别由式(2)、式(3)给出:

$$I_p = E \cdot S \cdot A \quad (2)$$

$$I_d = EBI \cdot S \cdot A \quad (3)$$

光电阴极是一个光电转换器件,它的作用是将光信号转变为电(电流)信号。根据对比度的定义,光电阴极输出电信号的对比度  $C$  由式(4)表示:

$$C = \frac{I_p - I_d}{I_p + I_d} \quad (4)$$

将式(2)、式(3)代入式(4), 可得出式(5):

$$C = \frac{E - EBI}{E + EBI} \quad (5)$$

从式(5)可看出等效背景照度会降低电信号的对比度。在超二代像增强器中,输入图像经光电阴极转换,电信号再经 MCP 倍增和荧光屏转换。在此过程中,假设 MCP 倍增和荧光屏转换过程中不损失电信号对比度,那么荧光屏上图像的对比度就等于光电阴极输出电信号的对比度,所以等效背景照度会影响超二代像增强器荧光屏输出图像的对比度。当输入照度  $E$  远远大于光电阴极的等效背景照度时(例如高于 1 个数量级),等效背景照度对电信号对比度的影响较小;输入光的照度与光电阴极的等效背景照度相近时,等效背景照度对电信号对比度的影响较大。在  $4.3 \times 10^{-7}$  lx 照度条件下,假设输入图像的对比度为 100%,那么根据式(5)可以分别计算出 3445#和 5327#样品电信号对比度分别为 54%和 96%。假设微通道板的倍增以及荧光屏的转换不损失对比度,那么 3445#和 5327#样品荧光屏上图像的对比度也分别为 54%和 96%。因为分辨力测量是用人眼观察,所以图像的对比度越高,图像越容易被人眼分辨,分辨力越高。5327#样品具有较高的对比度,因此具有更高的分辨力。所以在极限分辨力及信噪比相同的条件下,在  $5 \times 10^{-4}$  lx 以下的照度区间,等效背景照度的影响开始显现,等效背景照度越低,分辨力越高。超二代像增强器的等效背景照度主要由光电阴极的暗发射所决定。长期以来,人们对多碱阴极的灵敏度研究主要集中在提高其灵敏度方面<sup>[17-19]</sup>,并且在提高多碱阴极灵敏度方面取得了较大的进展,使得多碱阴极的灵敏度得到了较大的提高<sup>[20-21]</sup>,并且超过了  $1000 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。

与多碱阴极灵敏度的提高相比,在降低多碱阴极暗发射方面的研究却较少,因此在降低多碱阴极暗发射方面所取得的进展也不大,暗发射仍然维持在原有水平。所以为了提高超二代像增强器在低照及极低照下的分辨力,在进一步提高多碱阴极灵敏度的同时,需要进一步降低多碱阴极的暗发射。

## 4 结论

通常情况下,超二代像增强器所标称的分辨力实际上是指其极限分辨力,并不是超二代像增强器在实际使用过程中的分辨力。超二代像增强器只有在高照下使用时,分辨力才等于其极限分辨力;在低照及极低照下,分辨力随照度降低而降低。

超二代像增强器的极限分辨力越高,在高照下的分辨力也越高。但在低照及极低照下,超二代像增强器的分辨力不仅与极限分辨力有关,而且还与信噪比及等效背景照度有关。信噪比越高、等效背景照度越低,分辨力越高。在低照区间,信噪比对分辨力的影响更大,但在极低照区间,等效背景照度对分辨力的影响更大。

超二代像增强器主要在弱光下使用,所以在提高超二代像增强器极限分辨力的同时,还需要提高超二代像增强器在低照及极低照下的分辨力,而这需要在提高极限分辨力的同时,提高信噪比和降低等效背景照度。

## 参考文献:

- [1] 李晓峰,李娇娇,李金沙,等.超二代及三代像增强器不同响应波段的参数测量及比较[J].光子学报,2020,50(2):0225001-1.  
LI Xiaofeng, LI Jiaojiao, LI Jinsha, et al. Measure and comparison between the Second-generation and the third-generation image intensifier within the different region of wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(2): 0225001-1.
- [2] 李晓峰,杜木林,徐传平,等.影响超二代像增强器最高增益的因数分析[J].光子学报,2022,51(3):0304001-1.  
LI Xiaofeng, DU Mulin, XU Chuanping, et al. Analysis on factors affecting the maximum gain of super second generation image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(3): 0304001-1.
- [3] 微光像增强器试验方法:WJ 2091-1992[S].北京:中国标准出版社,1992.  
Test Method of Image Intensifier: WJ 2091-1992[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.
- [4] 像增强器通用规范:GJB 2000A-2020[S].北京:中国标准出版社,2020.  
General Specification of Image Intensifier: GJB 2000A-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

- [5] 李晓峰, 常乐, 赵恒, 等. 超二代与三代像增强器低照度分辨力的比较[J]. 光子学报, 2021, **50**(9): 0904003.  
LI Xiaofeng, CHANG Le, ZHAO Heng, et al. Comparison of resolution between super gen. II and gen. III image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, **50**(9): 0904003.
- [6] LU Nianhua, YANG Yigang, LV Jingwen, et al. Neutron detector design based on ALD coated MCP[J]. *Physics Procedia*, 2012, **26**: 110-115.
- [7] YAN Baojun, LIU Shulin, HENG Yuekun, et al. Nano-oxide thin films deposited via atomic layer deposition on microchannel plates[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2015, **10**(1): 1-11.
- [8] LU Nianhua, YANG Yigang, LIU Jingwen, et al. Neutron detector design based on ALD coated MCP[J]. *Physics Procedia*, 2012, **26**: 110-115.
- [9] 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, ZENG Jinneng, et al. Study on the improvement of input signal utilization of MCP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3): 0325002.
- [10] 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, ZENG Jinneng, et al. Study on resolution improvement of microchannel plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1223002.
- [11] Hoenderken T H, Hagen C W, Barth J E, et al. Influence of the microchannel plate and anode gap parameters on the spatial resolution of an image intensifier[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2001, **19**(3): 843-850.
- [12] 陶禹, 金伟其, 王瑶, 等. 高性能近贴式像增强器的调制传递函数分析[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 0604003.  
TAO Yu, JIN Weiqi, WANG Yao, et al. The MTF analysis of high performance proximity image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0604003.
- [13] 邱亚峰, 严武凌, 华桑墩. 基于电子追迹算法的微光像增强器分辨力研究[J]. 光子学报, 2020, **49**(12): 1223003.  
QIU Yafeng, YAN Wuling, HUA Sangtun. Resolution research of low-light-level image intensifier based on electronic trajectory tracking[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(12): 1223003.
- [14] Alla Shymanska. Numerical analysis of electron optical system with microchannel plate[J]. *Journal of Computational Electronics*, 2011, **10**(3): 57-60.
- [15] 钱芸生, 常本康, 童默颖, 等. 微光像增强器噪声频谱测试技术研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 67-70.  
QIAN Yunsheng, CHANG Benkang, TONG Moying. Frequency spectrum measurement of noise of image intensifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 67-70.
- [16] 李晓峰, 李金沙, 常乐, 等. 微通道板噪声因子与工作电压关系研究[J]. 光子学报, 2020, **49**(7): 0725002.  
LI Xiaofeng, LI Jinsha, CHANG Le, et al. Study on the relationship between noise factor and working voltage of microchannel plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(7): 0725002.
- [17] Pranav Gupta, Luca Cultrera, Ivan Bazarov. Monte Carlo simulations of electron photoemission from cesium antimonide[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121**(21): 215702.
- [18] 李晓峰, 赵恒, 张彦云, 等. 高性能超二代像增强器及发展[J]. 红外技术, 2021, **43**(9): 811-816.  
LI Xiaofeng, ZHAO Heng, ZHANG Yanyun, et al. High performance super second generation image intensifier and its further development[J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(9): 811-816.
- [19] Dimitrov D, Bell G, Smedley J, et al. Modeling quantum yield, emittance, and surface roughness effects from metallic photocathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **122**(16): 165303.
- [20] Nutz G, Lavout P. Sem-transparent Photocathode with Improved Absorption Rate: US, 9960004B2[P]. 2018-05-01.
- [21] 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.  
Nutz G, Lavout P. Sem-transparent photocathode with improved absorption rate: CN, 9960004B2[P]. 2015-07-15.