

引用格式: 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
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

超二代与三代像增强器低照度分辨力的比较

李晓峰,常乐,赵恒,邱永生,陈俊宇,张彦云

(北方夜视技术股份有限公司,昆明 650214)

摘 要:比较了超二代像增强器和三代像增强器在不同照度下的分辨力。结果表明,增益、极限分辨力、信噪比以及调制传递函数相同的超二代像增强器和三代像增强器,当照度大于 4.3×10^{-3} lx 时,分辨力均为常数,均不随照度的变化而变化;当照度小于 4.3×10^{-3} lx 时,分辨力均不为常数,均随照度的降低而降低,并且超二代像增强器的分辨力均低于三代像增强器的分辨力,照度越低,差别越大。此外,当采用品质因子来比较像增强器的综合性能时,只能在相同光电阴极的像增强器之间进行比较,而不能在不同光电阴极的像增强器之间进行比较,即品质因子不能用来比较超二代像增强器和三代像增强器的性能。

关键词:像增强器;微通道板;灵敏度;分辨力;增益;品质因子;信噪比;调制传递函数

中图分类号:TN223

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215009.0904003

Comparison of Resolution Between Super Gen. II and Gen. III Image Intensifier

LI Xiaofeng, CHANG Le, ZHAO Heng, QIU Yongsheng, CHEN Junyu, ZHANG Yanyun
(North Night Vision Technology Co.,Ltd, Kunming 650214, China)

Abstract: In this paper, the resolution of the super second generation image intensifier and the third generation image intensifier under different illuminations are studied. The results show that the resolution of the super second generation image intensifier and the third generation image intensifier with the same gain, limit resolution, signal to noise ratio and modulation transfer function is constant when the input illumination is above 4.3×10^{-3} lx, and does not change with the change of input illumination. The resolution of the super second generation image intensifier is lower than that of the third generation image intensifier. The lower the input illumination, the greater the difference. The reason is that the third generation image intensifier has higher cathode sensitivity. The higher the sensitivity of the cathode, the higher the initial contrast of the photocathode, and the higher the contrast of the target image on the fluorescent screen, so the higher the resolution under low input illumination. Figure of Merit is an index to characterize the comprehensive performance of image intensifiers. However, when Figure of Merit is used to compare the comprehensive performance of image intensifiers, it can only be compared between the image intensifiers with the same photocathode, but not between the image intensifiers with different photocathode. Therefore, the Figure of Merit can not be used to compare the performance of super second generation and the third generation image intensifiers.

Key words: Image intensifier; Microchannel plate; Sensitivity; Resolution; Gain; Figure of Merit; Signal to noise ratio; Modulation transfer function

OCIS Codes: 040.3780; 040.5160; 230.2090; 240.3990

基金项目:国家自然科学基金(No. 11535014),微光夜视技术国防科技重点实验室基金(No. J011102)

第一作者: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。Email: 984118295@qq.com

收稿日期:2021-03-01;录用日期:2021-04-20

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

像增强器是一种真空光电成像器件,其作用是对低照度图像进行亮度放大,使人眼在夜间也能看到物体^[1-3]。目前主流的像增强器有两种,一种为超二代像增强器,另一种为三代像增强器^[4-6]。两种像增强器在结构上完全相同,不同的仅仅是所采用的光电阴极。超二代像增强器采用 Na_2KSb 多碱光电阴极^[7],三代像增强器却采用GaAs光电阴极^[8-10]。超二代像增强器以法国PHOTONIS公司为代表,而三代像增强器则以美国的Elbit Systems公司为代表。无论是超二代像增强器还是三代像增强器,它们均使用同一套指标体系来表征其性能。这些指标包括阴极灵敏度,增益,极限分辨力,信噪比以及调制传递函数等。目前对于超二代像增强器和三代像增强器而言,在所有指标中,除光电阴极灵敏度存在较大区别外,其他指标如增益、极限分辨力、信噪比以及调制传递函数等均基本相同,不存在较大差距,特别是极限分辨力。极限分辨力定义为像增强器所能分辨的光电阴极上亮暗间隔线条的最高密度,是像增强器电子光学系统的分辨力,它表征了像增强器对入射图像细节的分辨能力^[11-13]。极限分辨力通常是在 $3 \times 10^{-2} \text{ lx} \sim 6 \times 10^{-2} \text{ lx}$ 照度下测量的。极限分辨力越高,所能看到的图像越清晰,所以极限分辨力越高越好。在不特别明确的条件下,极限分辨力通常简称分辨力。然而,极限分辨力并不是像增强器在实际使用过程中的分辨力。像增强器主要在低照度(如星光)下使用,低照度下的分辨力并不等于极限分辨力,而低照度下的分辨力更重要。低照度下的分辨力越高,其性能越好。因此,要比较超二代和三代像增强器的性能,需要比较超二代和三代像增强器在低照度下的分辨力,所以,有必要对超二代和三代像增强器低照度下的分辨力进行比较。

1 方法及原理

选择增益、极限分辨力、信噪比以及调制传递函数相同的超二代像增强器和三代像增强器,在不同照度下测量其分辨力,进行比较。分辨力测量采用南京理工大学研制的NJG-1型分辨力测试仪,其结构见图1。

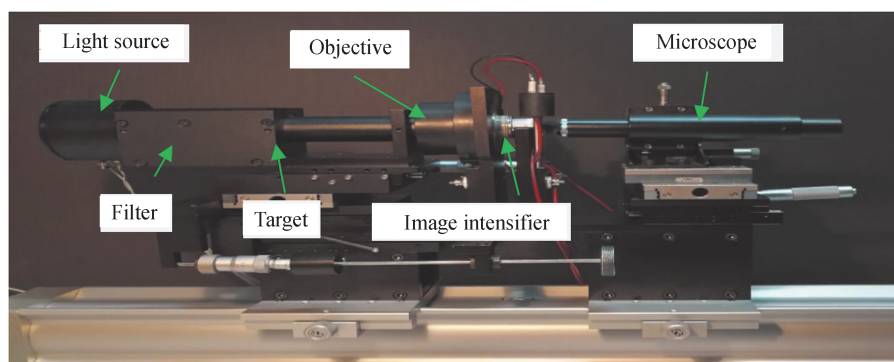


图1 分辨力测量仪器

Fig.1 Test set of resolution for image intensifier

该仪器符合像增强器测量标准^[14-15],包括光源、滤光片组、分辨力靶板、投影物镜、测量样品(像增强器)以及显微目镜。测量仪器的光源为卤钨灯,色温为2 856 K,功率为10 W,电压为6 V。滤光片组由不同中性密度的衰减滤光片组成,通过不同中性密度滤光片的组合,可以对输入照度进行衰减,从而获得不同的照度,实现不同照度下的分辨力测量。

分辨力靶板为USAF-1951(US Air Force-1951)靶板。靶板的每一块靶标由两组相互垂直的分化线组成,而每一组分化线又由三条亮线和暗线组成,并且亮暗的对比度为100%,见图2。

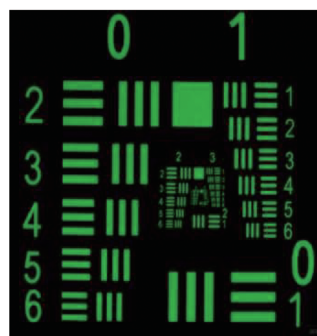


图2 分辨力测试靶板

Fig.2 Target used for resolution measurement

靶板经投影物镜投射在像增强器的光电阴极上,经像增强器增强以后在荧光屏上成像,该图像再被目镜放大供人眼观察。观察时,人眼所能分辨的最小靶标的线对数即为分辨力。

2 结果及分析

像增强器测试样品为1支超二代像增强器(编号518#)和1支三代像增强器(303#),其有效阴极直径均为18 mm。2支像增强器除阴极灵敏度(Sensitivity)有较大区别外,其它指标,如增益(Gain)、极限分辨力(Limiting Resolution)、信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)以及调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)基本相同,具体指标见表1,其中MTF值对应于 $30 \text{ lp}\cdot\text{m}^{-2}$ 的空间频率。

表1 试验样品指标
Table 1 Parameters of samples for resolution measurement

Sample	Sensitivity/ $(\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1})$	Gain/ $(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1})$	Limiting resolution/ $(\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1})$	SNR	MTF/%
518#	997	18 600	68	31.8	43
303#	1 890	18 400	68	32.1	41

表1中2支像增强器在不同照度下的分辨力测量结果见图3。测量过程中,光电阴极上的输入照度由高到低,从 $4.3\times 10^{-2} \text{ lx}$ 开始,一直到 $4.3\times 10^{-7} \text{ lx}$ 为止。另外在照度变化过程中,仅仅改变光通量,不改变光源的色温,光源的色温为2 856 K。

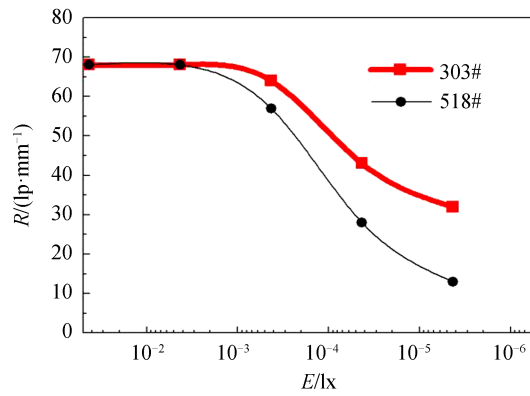


图3 超二代与三代像增强器的分辨力
Fig.3 Resolution of Super Gen. II and Gen. III image intensifier

从图3可以看出,无论是超二代像增强器还是三代像增强器,当照度从 $4.3\times 10^{-2} \text{ lx}$ 降低到 $4.3\times 10^{-3} \text{ lx}$ 时,2支像增强器分辨力均为常数,为 $68 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$,分辨力并未随着照度的降低而降低。但随着照度的进一步降低,当照度降低到 $4.3\times 10^{-3} \text{ lx}$ 以下,像增强器分辨力随着照度的降低而降低。像增强器分辨力由人眼来判断,是一个主观指标。人眼分辨目标遵从科尔特曼定律^[16-17],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。

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

对于像增强器而言,荧光屏的输出亮度为输入照度与增益的乘积,因此在像增强器增益相同条件下,从式(1)可以得出式(2)。式(2)中, E 表示像增强器光电阴极上的照度, K' 为常数。

$$E \times C^2 \times \alpha^2 = K' \quad (2)$$

在分辨力的测量过程中,如果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像增强器光电阴极上的照度 E 降低以后,根据式(2),人眼的最小分辨角 α 随之增大。人眼的最小分辨角 α 与人眼的最高分辨力成反比。在 $4.3\times 10^{-3} \text{ lx}$ 以上照度,由于人眼最小分辨角还能满足对像增强器极限分辨力的分辨,因此在 $4.3\times 10^{-3} \text{ lx}$ 以上照度,像增强器的分辨力不随照度的降低而降低。但在 $4.3\times 10^{-3} \text{ lx}$ 以下照度,随着人眼最小分辨角的进一步增加,人眼的分辨角开始影响对像增强器极限分辨力的分辨,使得在 $4.3\times 10^{-3} \text{ lx}$ 以下照度,像增强器的分辨力随输入照度的降低而降低。这就是像增强器分辨力随照度降低而降低的原因。

之一。另外当照度降低到 4.3×10^{-3} lx 以下,光子涨落噪声的影响开始显现。输入照度越低,光子涨落噪声的影响越大;输入照度越高,光子涨落噪声的影响越小。这也是像增强器在低照度下,分辨力随照度降低而降低的又一原因。

另外从图3还可以看出,尽管超二代像增强器和三代像增强器的极限分辨力相同,但在 4.3×10^{-3} lx 照度以下,随着照度的降低,其分辨力出现了区别,并且照度越低,区别越大。或者说尽管2支像增强器的极限分辨力均相同,但随着照度的降低,2支像增强器分辨力的下降速率不相同,518#超二代像增强器分辨力下降的速率较高,而303#三代像增强器分辨力下降的速率较低。例如在 4.3×10^{-5} lx 照度时,518#超二代像增强器的分辨力下降到了 $28 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$,而303#三代像增强器的分辨力却仅仅下降到 $43 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$;在 4.3×10^{-6} lx 照度时,518#超二代像增强器的分辨力下降到了 $13 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$,而303#三代像增强器的分辨力却仅仅下降到 $32 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。从表1可以看出,2支像增强器除阴极灵敏度存在较大区别外,其余参数基本相同,因此造成2支像增强器分辨力下降速率不同,或者说在低照度下分辨力不同的原因只能是阴极灵敏度的不同。然而,如果详细比较超二代和三代像增强器在信号放大过程中的差别,那么从信号能量传输的角度看,阴极灵敏度不是超二代像增强器和三代像增强器在低照度下分辨力不同的原因。图4为超二代像增强器和三代像增强器能量传输原理示意图。

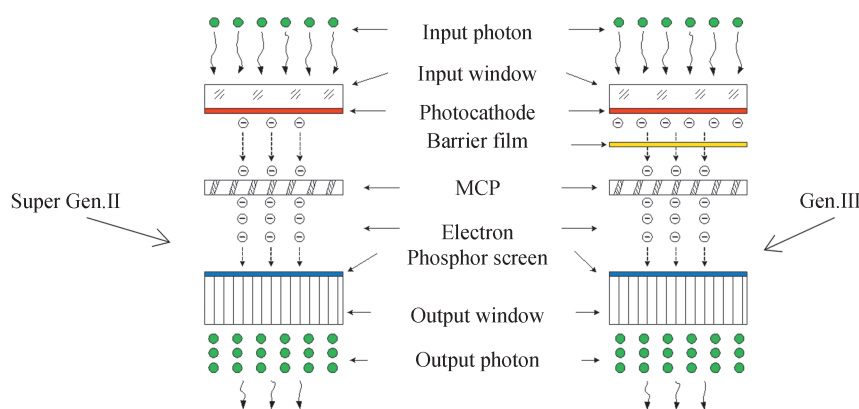


图4 超二代和三代像增强器成像原理
Fig.4 Super Gen. II and Gen. III image intensifier

从图4可以看出,超二代像增强器从结构上讲主要包括光电阴极(Photocathode)、微通道板(Microchannel Plate, MCP)以及荧光屏(Phosphor screen)三大部分。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。另外输入窗(Input window)为玻璃,起支撑光电阴极的作用,输出窗(Output window)为光纤面板,起支撑荧光屏的作用。输入光子(Input photon)到达光电阴极,经过光电阴极以后转换为光电子,光电子在电场的作用下到达MCP,经过MCP倍增后,在电场作用下加速并轰击荧光屏,使荧光屏发光即输出光子(Output photon),从而实现输入光的放大。三代像增强器从结构上讲与超二代像增强器基本相同。不同的是在三代像增强器中, MCP的输入端具有一层离子阻挡膜(Barrier film)^[18-20],见图4,而这一离子阻挡膜在超二代像增强器中却没有。在超二代像增强器中,光电子从光电阴极直接到达MCP,而在三代像增强器中,光电子在到达MCP之前,需要先穿透离子阻挡膜。由于离子阻挡膜的存在,当电子穿透离子阻挡膜时,电子数量会有所损失,而损失率可根据像增强器信噪比进行计算。像增强器的信噪比由式(3)计算^[21-22]。式(3)中, Δ 表示像增强器的信噪比, S 表示光电阴极的灵敏度, N_f 表示 MCP 的噪声因子。

$$\Delta = 1.03 \times \frac{\sqrt{S}}{N_f} \quad (3)$$

两种像增强器的信噪比之比为

$$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{\sqrt{S_1}}{\sqrt{S_2}} \times \frac{N_{f2}}{N_{f1}} \quad (4)$$

式中, Δ_1 、 S_1 及 N_{i1} 分别为超二代像增强器的信噪比、阴极灵敏度及MCP噪声因子; Δ_2 、 S_2 及 N_{i2} 分别为三代像增强器的信噪比、阴极灵敏度及MCP噪声因子。

超二代像增强器和三代像增强器均使用传统的MCP作为电子倍增器,因此其噪声因子 N_i 基本相同,所以式(4)可以简化为式(5)。

$$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{\sqrt{S_1}}{\sqrt{S_2}} \quad (5)$$

518#超二代像增强器的阴极灵敏度 S_1 为 $997 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$,信噪比为 Δ_1 为31.8,303#三代像增强器的信噪比 Δ_2 为32.1,根据式(5)计算三代像增强器的阴极灵敏度 S_2 等于 $1\ 006 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。此处计算得到的阴极灵敏度是三代像增强器的等效阴极灵敏度,与实测 $1\ 890 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 的阴极灵敏度相比,仅为实测阴极灵敏度的54%。这说明303#三代像增强器中的电子穿透离子阻挡膜层时,阴极灵敏度损失率为46%。由于303#三代像增强器的等效阴极灵敏度仅为 $1\ 060 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$,与518#超二代像增强器的阴极灵敏度相当,所以从信号强度,或者说从能量探测的角度看,阴极灵敏度不是超二代像增强器和三代像增强器在低照度下分辨力产生差别的原因。

在分辨力测量时,假设投影在像增强器的光电阴极的分辨力靶板的对比度为100%,那么分辨力靶板分化线经过光电阴极的转换以后,形成了电子分划线。假设光电阴极无对比传递损失,那么电子分划线的对比度仍然为100%,见图5(a)。但由于光电阴极存在暗发射,因此即使在光电阴极无对比传递损失条件下,电子分划线的对比度也会降低,见图5(b)。

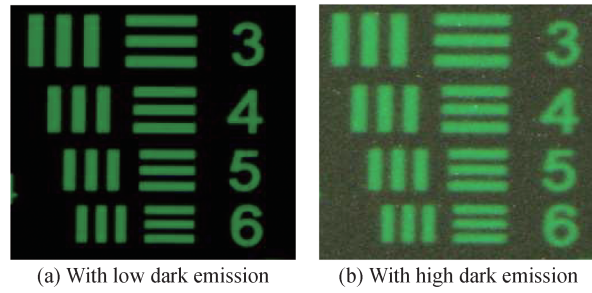


图5 电子分划线对比示意图

Fig. 5 Comparison for different contrast of electric bar

如果将电子分划线的亮线理解为目标,暗线理解为背景,那么电子分划线亮线亮度与暗线亮度之比(以下称为亮暗比)可以由式(6)计算。

$$C_i = \frac{E \times S + i_d}{i_d} \quad (6)$$

式中, C_i 为电子分划线亮暗比, E 为靶板在光电阴极上的输入照度, S 为光电阴极的灵敏度, i_d 为光电阴极的暗电流密度。

由于在光电阴极上,暗发射是均匀的,因此不仅暗发射叠加在暗分划线上,而且也叠加在亮分化线上,所以亮分化线的电流密度为输入照度所产生的电流密度 $E \times S$ 与暗发射电流密度 i_d 之和,这样式(6)分式中的分子即为电子分划线的亮分划线电子密度,而分母则为电子分划线暗分划线电子密度。因为光电阴极的暗电流相对于光电流而言较小,所以 $E \times S + i_d$ 近似等于 $E \times S$,这样式(6)可以简化为式(7)。

$$C_i = \frac{E \times S}{i_d} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,电子分划线的亮暗比与光电阴极的灵敏度成正比。为叙述方便,将式(7)定义的亮暗比 C_i 称为光电阴极的初始对比。根据式(7),可以得出式(8)。

$$\frac{C_{i1}}{C_{i2}} = \frac{S_1}{S_2} \times \frac{i_{d2}}{i_{d1}} \quad (8)$$

式(8)中 C_{i1} 和 C_{i2} 分别表示超二代像增强器和三代像增强器光电阴极的初始对比, S_1 和 S_2 分别表示超二

代像增强器和三代像增强器的阴极灵敏度,而 i_{d1} 和 i_{d2} 则分别表示超二代像增强器和三代像增强器的阴极暗电流密度。

因为超二代像增强器和三代像增强器的暗电流密度基本相等^[23],所以式(8)还可以进一步简化为式(9)。

$$\frac{C_{i1}}{C_{i2}} = \frac{S_1}{S_2} \quad (9)$$

518#超二代像增强器的阴极灵敏度为 $997 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$,而 303#三代像增强器的阴极灵敏度为 $1890 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$,由式(9)可知,超二代像增强器与三代像增强器光电阴极初始对比的比值为 53%,即超二代像增强器光电阴极的初始对比仅仅为三代像增强器光电阴极初始对比的一半。根据像增强器的倍增原理可知,在三代像增强器中,尽管离子阻挡膜对电子有所衰减,但不会改变光电阴极的初始对比。因此分辨力靶板在超二代像增强器荧光屏上的图像亮暗比自然低于三代像增强器荧光屏上的图像亮暗比。由于光电阴极的初始对比存在差距,造成了极限分辨力相同的超二代像增强器和三代像增强器,在低照度下分辨力出现区别,并且照度越低,区别越大。这就是超二代像增强器和三代像增强器在低照度下分辨力不同的原因。由于 Na_2KSb 多碱光电阴极和 GaAs 光电阴极的暗电流密度相当,因此超二代像增强器和三代像增强器在低照度下分辨力不同的原因是阴极灵敏度不同带来的初始对比差异。

3 讨论

三代像增强器为了保护 GaAs 光电阴极,阻挡来自 MCP 的正离子破坏,采用了离子阻挡膜来保护 GaAs 光电阴极,从而延长了光电阴极的寿命。由于离子阻挡膜在阻挡离子的同时会阻挡一部分电子,相当于降低了光电阴极的灵敏度,所以从能量传输的角度看,三代像增强器与超二代像增强器相比,GaAs 光电阴极的高灵敏度优势并未体现出来。然而从光电阴极的初始对比看,三代像增强器光电阴极初始对比是超二代像增强器光电阴极的一倍以上,因此 GaAs 光电阴极的高灵敏度优势得到了充分的体现。在低照度条件下,图像对比又是人眼分辨目标的必要条件,具有决定性的作用。图像对比越高,越有利于人眼分辨,因此在低照度条件下,三代像增强器的性能优于超二代像增强器的性能。

目前像增强器的综合性能采用品质因子(Figure of Merit, FOM)来评价^[24-26]。品质因子定义为像增强器极限分辨力与信噪比的乘积。在分辨力相同的条件下,品质因子越高,意味着信噪比越高,阴极灵敏度越高,初始对比越高。对于相同光电阴极的像增强器,因为品质因子越高,意味着信噪比越高,同时初始对比也越高,所以品质因子可以用来评价相同光电阴极像增强器之间的综合性能,如用来评价超二代像增强器之间或三代像增强器之间的综合性能。但品质因子不能用来评价不同光电阴极像增强器之间的综合性能,如不能用来评价超二代和三代像增强器之间的性能。因为三代像增强器和超二代像增强器的光电阴极不同,它们之间相同的信噪比仅仅意味着相同的等效阴极灵敏度,并不意味着相同的光电阴极初始对比,所以品质因子不可以用来评价不同光电阴极像增强器之间的综合性能,即不同光电阴极像增强器的品质因子不具备可比性。

4 结论

在低照度下,对于增益、极限分辨力、信噪比以及调制传递函数相同,但阴极灵敏度不同的超二代像增强器和三代像增强器,在 $4.3 \times 10^{-3} \text{ lx}$ 照度以下,超二代像增强器的分辨力均低于三代像增强器,并且照度越低,差距越大。原因是超二代像增强器光电阴极的灵敏度低,从而导致光电阴极的初始对比低。光电阴极的初始对比低是造成超二代像增强器在低照度下分辨力低的主要原因。品质因子只能在相同光电阴极像增强器之间进行综合性能比较,而不能在不同光电阴极像增强器之间进行综合性能比较,即品质因子只能在超二代像增强器之间,或在三代像增强器之间进行性能比较,而不能在超二代像增强器和三代像增强器之间进行性能比较。

参考文献

- [1] LIU Lu, GUO Mangan, YAN Ming, et al. High repeating frequency characteristics of image intensifier in high-speed imaging application[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11): 1123004.

- 刘璐,郭明,安严明,等.像增强器在高速成像应用中的重复频率特性[J].光子学报,2017,46(11):1123004.
- [2] WU Haibing, TAO Shengxiang, GU Guohua, et al. Study on color night vision image fusion method based on quadruple-band images[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(5):510002.
吴海兵,陶声祥,顾国华,等.基于四波段图像融合的彩色夜视方法研究[J].光子学报,2017,46(5):510002.
- [3] 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.
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.
- [4] TIAN Jinsheng. New development of low level imaging sensor technology[J]. Infrared Technology, 2013, 35(9):527-534.
田金生.低照度微光传感器的最新进展[J].Infrared Technology, 2013, 35(9):527-534.
- [5] GUO Hui, XIANG Shiming, TIAN Minqiang. A review of development of low light level night vision technology [J]. Infrared Technology, 2013, 35(2):63-68.
郭晖,向世明,田民强.微光夜视技术发展动态评述[J].红外技术,2013,35(2):63-68.
- [6] DANVID A, PETR B, CEDAR J, et al. Detective quantum efficiency of intensified CMOS cameras for cherenkov imaging in radiotherapy[J]. Physics in Medicine and Biology, 2020, 659(22):225013.
- [7] KANG Tianyou, REN Ling, ZHANG Kaimin, et al. Electronic structures and optical properties of cubic crystal K_2CsSb , K_3Sb and Cs_3Sb cathode materials[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(3):0116001.
康天佑,任玲,张锴珉,等.立方 K_2CsSb 、 K_3Sb 和 Cs_3Sb 阴极材料的电子结构和光学性质[J].光子学报,2020,49(1):0116001.
- [8] NIU Jun, CHEN Ling, QIAN Yunsheng, et al. Characteristic research of uniform-doping and GaAlAs/GaAs photocathode with femtosecond laser illumination[J]. Optik, 2019, 183:629-634.
- [9] HAO Guanghui, HAN Panyang, LI Xinghui, et al. The electron emission characteristics of GaAs photocathode with vacuum-channel structure[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(10):266-272.
郝广辉,韩攀阳,李兴辉,等.真空沟道GaAs光阴极电子发射特性[J].物理学报,2020,69(10):266-272.
- [10] FANG Chengwei, ZHANG Yijun, RONG Minmin, et al. Micro-area analysis of surface contaminations of GaAs photocathode in preparation process[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9):925001.
方城伟,张益军,荣敏民,等.GaAs光阴极制备工艺中表面污染的微区分析[J].光子学报,2019,48(9):925001.
- [11] TIAN Liping, WEN Wenlong, WANG Xing, et al. Research on the spatial-temporal and gain performances on the small-size streak tube[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(7):723002.
田丽萍,温文龙,王兴,等.小型条纹管时空分辨及增益特性研究[J].光子学报,2019,48(7):723002.
- [12] ZHANG Ke, CAI Houzhi, LIU Jinyuan, et al. Spatial resolution for the time dilation X-ray framing camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2):211003.
张珂,蔡厚智,刘进元,等.时间展宽X射线分幅相机空间分辨特性[J].光子学报,2018,47(2):211003.
- [13] 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.
邱亚峰,严武陵,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.
- [14] WJ 2091-1992,微光像增强器试验方法[S].北京:中国标准出版社,1992.
- [15] GJB 2000A-2020,像增强器通用规范[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [16] ZHOU Yisong. Electric vacuum imaging device and its theoretical analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1989.
周异松.电真空成像器件及理论分析[M].北京:国防工业出版社,1989.
- [17] XIANG Shiming, NI Guoqiang. The principle of photoelectronic imaging device[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
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.
- [18] LI Xiaofeng, ZHANG Jingwen, GAO Hongkai, et al. Ion barrier of MCP in the third generation image intensifier[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(12):1496-1499.
李晓峰,张景文,高宏凯,等.三代管MCP离子阻挡膜研究[J].光子学报,2001,30(12):1496-1499.
- [19] LI Yao, SU Tong, SHENG Lizhi, et al. Effects of spatial electrons on signal-noise-ratio of X-ray communication system [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11):1106002.
李瑶,苏桐,盛立志,等.空间带电离子对X射线通信信噪比的影响[J].光子学报,2017,46(11):1106002.
- [20] YANG Xiaojun, LI Dan, QIAO Kai, et al. Experimental study of C pollution removal from microchannel plate with ion barrier film[J]. Infrared Technology, 2020, 42(8):509-518.
杨晓军,李丹,乔凯,等.防离子反馈微通道板表面碳污染去除的试验研究[J].红外技术,2020,42(8):747-751.
- [21] 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, 2001, 30(12):1496-1499.
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,2017,46(11):1106002.

- [22] LI Xiaofeng, ZHANG Zhenjun, CONG Xiaoqing, et al. Influence of microchannel plate structure parameters on noise factor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 0225001.
李晓峰, 张正君, 丛晓庆, 等. 微通道板结构参数对噪声因子的影响研究[J]. *光子学报*; 2021; 50(5): 0225001.
- [23] LIU Yuanzheng, WANG Chongchun, DONG Yaqiang. *Electron emission and photocathode*[M]. Beijing: Beijing Science and Technology University Press, 1995.
刘元震, 王仲春, 董亚强. *电子发射与光电阴极*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [24] ZHOU Liwei. On quality factor of low light level image intensifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 331-337.
周立伟. 关于微光像增强器的品质因数[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(4): 331-337.
- [25] PANG Jingsheng. Image intensifier upgraded performance and evaluation standard [J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(6): 509-518.
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.
- [26] ZHANG Xisheng, YAN Chunyu, WU Tihui. Fabrication of CsPbBr₂ quantum dots and its photocathode performance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 123002.
张喜生, 晏春, 吴体辉, 等. CsPbBr₂量子点制备及其光探测器性能[J]. *光子学报*, 2020, 49(1): 123002.