

微光夜视器件划代方法初探

程宏昌 石峰 李周奎 师宏立 拜晓锋 闫磊 姚泽 王淼鑫 李燕红

Preliminary study on distinguishment method of low-level-light night vision devices

CHENG Hongchang, SHI Feng, LI Zhoukui, SHI Hongli, BAI Xiaofeng, YAN Lei, YAO Ze, WANG Miaoxin, LI Yanhong

引用本文:

程宏昌, 石峰, 李周奎, 等. 微光夜视器件划代方法初探[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1092–1101. DOI: 10.5768/JAO202142.0604001

CHENG Hongchang, SHI Feng, LI Zhoukui, et al. Preliminary study on distinguishment method of low-level-light night vision devices[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(6): 1092–1101. DOI: 10.5768/JAO202142.0604001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0604001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于一代像增强器的高分辨率X射线相机](#)

High-resolution X-ray CCD camera based on the first generation image intensifier

应用光学. 2017, 38(5): 810–814 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0505001>

[基于三代微光ICCD成像装置的目标对比度影响因素测试分析](#)

Test and analysis of factors influencing target contrast ratio based on 3rd generation LLL ICCD imaging device

应用光学. 2020, 41(6): 1241–1246 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0603004>

[高灵敏光纤光栅加速度检波器理论模型研究](#)

Research on theoretical model of high sensitivity fiber Bragg grating accelerometer

应用光学. 2019, 40(5): 910–917 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0508002>

[两种玻璃微通道阵列的制作技术及比较](#)

Two kinds of making technologies of glass micro-channel arrays and their comparison

应用光学. 2021, 42(5): 796–801 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501006>

[微光和红外融合装备分辨率测试方法研究](#)

Research on resolution test system of LLL and infrared fusion equipment

应用光学. 2019, 40(5): 918–922 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0509001>

[基于角反射镜的气体传感器](#)

Gas sensor based on corner cube prisms

应用光学. 2019, 40(5): 731–737 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0501003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 06-1092-10

微光夜视器件划代方法初探

程宏昌^{1,2}, 石 峰^{1,2}, 李周奎^{1,2}, 师宏立^{1,2}, 拜晓峰^{1,2},
闫 磊^{1,2}, 姚 泽^{1,2}, 王森鑫^{1,2}, 李燕红³

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;
3. 北方夜视技术股份有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 随着微光夜视技术不断发展, 微光夜视器件呈现出了品种多、性能差异大、应用领域广的特点, 如何从众多的微光夜视器件中梳理出其发展主线, 已成为微光夜视器件从业者的研究热点。回顾了零代、一代、二代、三代、超二代微光夜视器件的发展历程, 总结归纳了行业公认的零代、一代、二代、超二代、三代微光夜视器件的划代方法, 并提出了“四代”微光夜视器件的概念, 同时对非典型的几种微光夜视器件在微光夜视器件技术领域中所处的位置进行了说明, 绘制了“树状图”, 以便读者能够直观、准确、全面地了解每种微光夜视器件的技术特点以及它们在微光夜视器件技术领域所处的位置, 对从事微光夜视器件技术研究者具有一定参考作用。

关键词: 微光夜视; 像增强器; 灵敏度; 分辨力; 信噪比

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202142.0604001](https://doi.org/10.5768/JAO202142.0604001)

Preliminary study on distinction method of low-level-light night vision devices

CHENG Hongchang^{1,2}, SHI Feng^{1,2}, LI Zhoukui^{1,2}, SHI Hongli^{1,2}, BAI Xiaofeng^{1,2},
YAN Lei^{1,2}, YAO Ze^{1,2}, WANG Miaoxin^{1,2}, LI Yanhong³

(1. Key Laboratory of Low-Light-Level Night Vision Technology, Xi'an 710065, China;
2. Kunming Physics Research Institute, Kunming 650223, China; 3. North Night
Vision Technology Co.,Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: With the continuous development of low-level-light (LLL) night vision technology, the LLL night vision devices show the characteristics of many varieties, large performance differences, and wide application fields. How to sort out the main line of development from numerous LLL night vision devices has become a research hot spot for practitioners of low-light night vision devices. The development history of the zero-generation, first-generation, second-generation, third-generation, and ultra-second generation LLL night vision devices was reviewed. The industry-recognized methods for distinguishing the zero-generation, first-generation, second-generation, ultra-second generation, and third-generation low-light night vision devices were summarized. The concept of the fourth-generation low-light night vision device was put forward, and at the same time the position of several atypical low-light night vision devices in the technical field of low-light night vision devices was explained, and a tree diagram was drew, so that the technical characteristics of each low-light night vision device and their position in the field of low-light night vision device technology could be intuitively, accurately, and comprehensively understood. The proposed perspectives have a certain reference

收稿日期: 2021-06-03; 修回日期: 2021-07-25

基金项目: 兵器实验室基金 (J20180104)

作者简介: 程宏昌 (1974—), 男, 博士, 研高工, 主要从事微光夜视技术研究。E-mail: chh600@163.com

通信作者: 石峰 (1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事微光夜视技术研究。E-mail: shfyf@126.com

role for researchers engaged in low-light night vision device technology.

Key words: low-level-light night vision; image intensifier; sensitivity; resolution; signal-to-noise ratio

引言

自三代和超二代微光夜视器件出现以后, 美国 Litton 公司公开报道了四代微光夜视器件的概念, 并指出它是以无防离子反馈膜、自动门控电源、小丝径微通道板为典型特征, 该概念出现后引起了行业专家广泛热议, 但是经过大家深入思考, 四代微光夜视器件的概念没有被行业广泛引用, 很快消失。近年来, 随着低照度互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 器件、电子轰击有源像素传感器 (electrons bombard active pixel sensor, EBAPS) 数字微光器件、铝镓氮光阴极日盲紫外像增强器、铟镓砷光阴极短波红外响应像增强器等微光夜视器件的出现, 微光夜视器件呈现出了品种多、性能差异大、应用领域广的特点。造成了非技术专业人员“眼花缭乱”。四代微光夜视器件是什么? 微光夜视器件的发展趋势是什么? 低照度 CMOS 等上述这些微光器件到底和超二代、三代微光器件等有什么关系? 它们在微光夜视器件技术领域到底处于什么位置? 这些问题已经成为行业决策层、执行层以及拟投资人行的众多人员关注的焦点问题。本文通过回顾行业公认的零代、一代、二代、三代和超二代微光夜视器件的发展历程, 总结归纳了划代方法, 提出了“四代微光夜视器件”的概念, 分析了低照度 CMOS 等微光器件的技术特征, 并归纳出了它们在微光夜视器件技术领域的位置, 绘制了“树状图”, 为更加直观、准确、全面了解各种微光夜视器件的技术特点提供了有力支撑。

1 经典微光夜视器件发展历程

经典微光夜视技术是研究在夜间低照度条件下, 光子-电子-光子图像信息之间相互转换、增强、处理、显示等物理过程。利用该项技术能使人们在极黑的夜晚, 利用夜天光增强器的方法就可像白天一样看清楚景物^[1], 通过采用扩展观察者视力的方法, 实现了夜间或黑暗条件下的隐蔽观察。

微光夜视技术的工作原理是利用目标景物对夜天光反射率的差异而实现低照度成像的光电技术。夜视技术始于 20 世纪 30 年代, 真正发展在 20 世纪 50 年代、60 年代, 其核心器件是微光像增

强器或称为微光夜视器件。随着技术发展, 微光夜视器件先后经历了零代、一代、二代、三代、超二代^[2], 各代微光夜视器件技术特征如下。

1.1 零代微光夜视器件

零代微光夜视器件是一种外光电效应型成像器件。它出现在 20 世纪 30 年代, 其光阴极为 S-1, 材料为银-氧-铯。该类像增强器又称为红外变像管或变像管。它通常采用静电聚焦结构, 由光阴极、聚焦电极和荧光屏等部件组成, 主要有玻璃型和金属型 2 种结构。其工作原理为, 红外光阴极将目标景物所反射的红外光转换成光电子, 光电子经电场加速, 轰击荧光屏, 荧光屏将电子转换成光子形成可见光图像, 最终实现结构如图 1 所示。由于 Ag-O-Cs 光阴极转换效率低, 因而需要自带红外光源能主动式工作, 增大了系统体积与重量, 并且在战场中容易暴露自己, 造成伤亡, 导致其使用受限。主动式红外夜视系统的原理如图 2 所示。

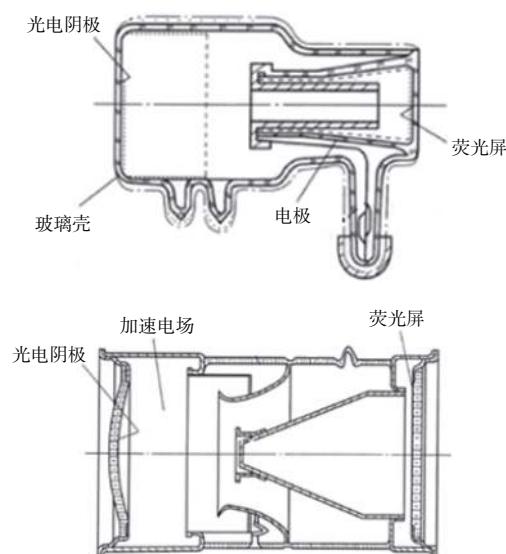


图 1 零代微光夜视器件结构图

Fig. 1 Structure diagram of zero-generation low-light-level night vision device

技术特征 玻璃窗口内表面制备银-氧-铯光阴极、双圆筒静电透镜、平板玻璃平面荧光屏。光阴极灵敏度低, 主动红外照明易暴露自身, 战场中实用性不强。

1.2 一代微光夜视器件

一代微光夜视器件是一种外光电效应型成像

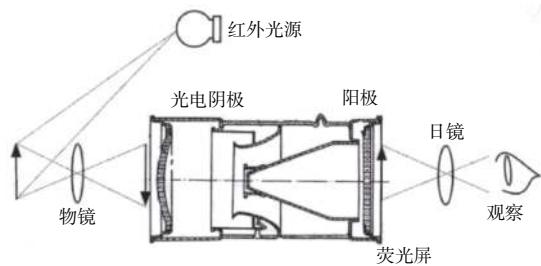
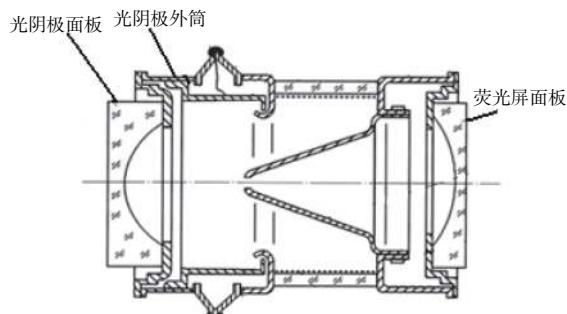


图 2 主动红外系统工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of active infrared system

器件。它出现在 20 世纪 60 年代, 其光阴极为 S-20, 材料为双碱锑钾、多碱锑钾钠等。该类微光夜视器件由光阴极、电子透镜和荧光屏采用静电聚焦结构等组成, 单级器件结构如图 3 所示。其工作原理为, 光阴极在景物输入光子的激发下, 产生相应光电子图像, 此过程将微弱的或不可见的辐射图像转换成电子图像; 在超真空管体内, 电子光学系统对光电子施加很强的电场, 使这些光电子获得能量, 并受电子光学透镜聚焦, 以高能量轰击荧光屏发光, 使之产生较入射光强的多的光强, 形成人眼可见的光子图像, 最终实现了将不可见光转化为增强后人眼可见的可见光图像的效果, 实现了光谱转换和能量增强功能。由于单级增益偏低(约 50 倍), 通常采用三级级联方式(如图 4 所示)。相比零代微光夜视器件, 一代微光夜视器件为被动观察方式, 其特点是隐蔽性好、成像质量明显提高。缺点是体积大、成像畸变较大, 怕强光, 有晕光现象。

技术特征 光纤面板球型结构多碱光阴极、双球型电子透镜、光纤面板球型结构荧光屏。光阴极灵敏度低、单级管增益低、三级级联体积重量大、可被动成像。



1—光阴极面板; 2—光阴极外筒; 3—荧光屏面板

图 3 单级一代微光夜视器件

Fig. 3 Single-stage first-generation low-light-level night vision device

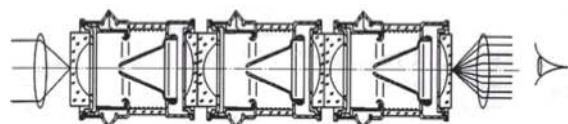


图 4 三级级联一代微光夜视器件

Fig. 4 Three-stage cascade first-generation low-light-level night vision device

1.3 二代微光夜视器件

20 世纪 70 年代, 出现了微通道板 (micro-channel-plate, MCP) 电子倍增器, 随后研制出了微通道板像增强器, 即二代微光夜视器件也称作二代管, 与一代的显著区别是采用了微通道板 (MCP) 作为电子倍增器。微通道板是带有许多微通道孔的玻璃薄板, 每个微通道孔内制备有高电子倍增系数材料的二次电子倍增层, 这样在不到 1 mm 厚度的玻璃薄板上就能够实现高达 10^6 的电子倍增。常见 2 种结构分别为近贴式 MCP 和静电聚焦式 MCP 微光夜视器件, 结构分别如图 5 和图 6 所示。

近贴式 MCP 微光夜视器件优点是: 轴上轴外

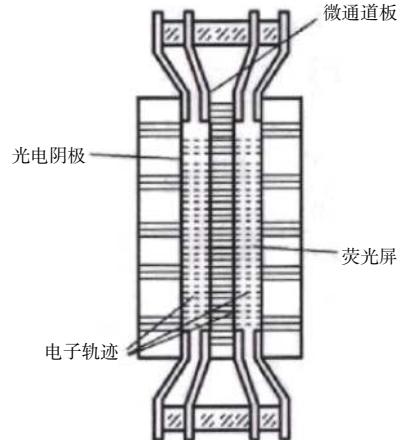


图 5 近贴式 MCP 像增强器

Fig. 5 Proximity MCP image intensifier

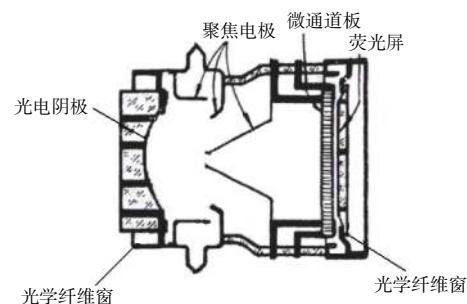


图 6 静电聚焦式 MCP 像增强器

Fig. 6 Electrostatic focusing MCP image intensifier

像质均匀, 图像无畸变, 放大率为 1, 不发生枕形畸变, 体积小、质量小, 具有自动防强光作用; 缺点是: 由于结构间距小, 为避免场致发射, 所加电压限制在 300 V~400 V, 光线反馈较严重。静电聚焦 MCP 微光夜视器件优点是: 能够成倒像, 调制传递函数好, 分辨率越高, 有足够的空间放置吸气剂, 延长了工作寿命, 具有自动防强光作用; 缺点是: 体积大、质量大, 不利于头戴武器装备使用。

技术特征 光纤面板或玻璃球型/平面结构多碱光阴极、微通道板作为电子倍增器、光纤面板或玻璃球型/平面结构荧光屏, 可被动成像; 与一代微光夜视器件相比, 二代微光夜视器件质量小、体积小; 可通过改变 MCP 两端的电压, 实现增益连续可调; MCP 具有的电流饱和特性, 使其自动防强光。积分灵敏度典型值为 450 $\mu\text{A/lm}$, 分辨率典型值为 30 lp/mm, 信噪比典型值为 14。光阴极灵敏度、分辨率、信噪比等指标还有提升空间。

1.4 三代微光夜视器件

三代微光夜视器件是双近贴聚焦电子光学系统的 MCP 微光夜视器件^[3], 由透射式 NEA GaAs 光阴极 (negative electron affinity, NEA, gallium arsenide, GaAs)、带 Al_2O_3 离子壁垒膜的三代 MCP 和光纤面板荧光屏组件构成, 光阴极与 MCP 输入面之间、MCP 输出面与荧光屏输入面之间均是近贴结构, 如图 7 所示。

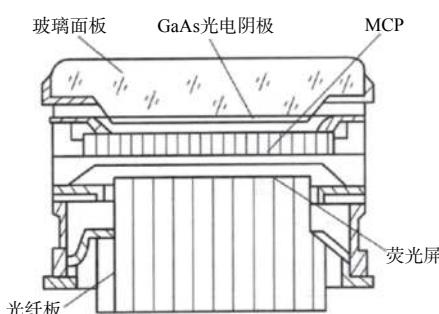


图 7 三代微光夜视器件结构图

Fig. 7 Structure diagram of third-generation low-light-level night vision device

三代微光像增强器具有 3 大技术特征。1) 负电子亲和势砷化镓光阴极。该光阴极的真空能级低于半导体内导带底能级, 形成负电子亲和势, 且受光子激发到导带的电子通过与晶格声子交换能量“热化”到导带底, 进而逸入真空产生光子电流。负电子亲和势光阴极, 具有量子效率高、暗发射小、发射电子的能量分布及角分布集中、长波可

调、长波响应扩展潜力大等优点, 这种负电子亲和势光阴极中的“热化电子”较二代微光正电子亲和势光阴极中的“热电子”, 具有长得多的寿命。因此, 负电子亲和势光阴极具有比正电子亲和势光阴极大得多的逸出概率, 即具有更高灵敏度, 可达 800 $\mu\text{A/lm}$ ~2 400 $\mu\text{A/lm}$, 较二代光阴极提高 1.5~2 倍以上。2) 第三代 MCP。三代微光夜视器件所使用的 MCP 具有高增益、低噪声、长寿命, 并在电子输入端面镀有三氧化二铝 (Al_2O_3) 离子阻挡膜。 Al_2O_3 离子阻挡膜可以阻止 MCP 电子倍增过程中产生的残余气体分子和正离子的反馈, 从而保护了光阴极。此外由于 Al_2O_3 膜的存在, 损失掉输入电子的部分能量, 导致 MCP 的增益有所降低, 故须选用增益更高的 MCP。3) 自动门控高压电源。小型集成高压电源是微光夜视器件的重要部件, 它除了以小体积、低功耗提供器件各级工作电压外, 还具有荧光屏亮度自动控制 (auto-bright control, ABC) 功能和亮源保护 (bright source protect, BSP) 功能。亮度自动控制电路为人眼提供舒适观察所需的荧光屏输出亮度, 其 ABC 照度适应范围为 10^{-5} lx~ 10^2 lx; 对于局部输入强光 (例如, 战场炮火、城市灯光和汽车灯等) 时, 则需要配置亮源保护电路; 在不改变 MCP 及工作电压光阴极前提下, 实现 ABC、BSP 和通过脉宽调节光阴极平均工作电压的电路, 统称为门控电路。这种电路的作用是: ABC、BSP 和抑制离子反馈、延长器件寿命。由于三代微光夜视器件具有灵敏度高, 光谱响应与极低照度 (10^{-4} lx) 下夜天光光谱分布匹配度高的特点, 三代微光夜视器件装备于微光夜视仪器中能大大提高夜视仪器的作用距离, 特别是极低照度下效果尤为明显。20 世纪 80 年代以来, 美欧国家军队陆续大量装备了三代微光夜视仪器, 在 1983 年马岛战争、1991 年海湾战争中使用后, 取得了优于前几代微光产品的满意效果, 也促进了三代微光夜视器件及设备的进一步扩大再生产和装备。

1.5 超二代微光夜视器件

超二代微光夜视器件是在二代微光夜视器件基础上, 引入高灵敏度的 (600 $\mu\text{A/lm}$ ~800 $\mu\text{A/lm}$) 多碱光阴极, 由 MCP、小型高压电源组成, 通常为双近贴结构, 如图 8 所示。微通道板噪声因子减小, 输出信噪比提高, 整管 MTF 得到改善。近几年来, 法国为了进一步提高超二代的性能, 将微纳光

栅技术引入到多碱光阴极组件中,提高了外界光的利用效率,使灵敏度有所突破,同时使光谱响应的长波阈值向长波延伸,使超二代微光夜视器件的综合性能有所提升。

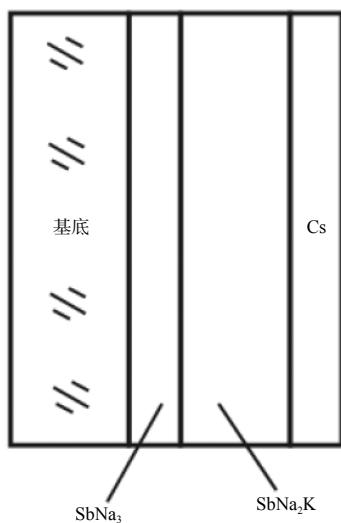


图 8 超二代多碱光阴极结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of ultra-second generation multi-alkali photocathode

技术特征 超二代加厚近红外延伸多碱光阴极,灵敏度 $500 \mu\text{A/lm} \sim 650 \mu\text{A/lm}$; 双近贴电子光学系统,单面热钢封结构; 低噪声 MCP 的应用,积分灵敏度 $650 \mu\text{A/lm} \sim 1200 \mu\text{A/lm}$, 分辨率 $64 \text{ lp/mm} \sim 72 \text{ lp/mm}$, 信噪比 $25 \sim 28$ 。

2 非典型微光夜视器件

非经典微光夜视器件目前有两类,第一类是与经典微光夜视器件工作体制相同,由非可见光响应的光阴极替换可见光响应光阴极,其他电子倍增及显示方式不变;第二类是与经典微光夜视技术工作体制不同,是在半导体器件上进行特殊处理,扩展半导体器件工作照度下限,实现了在有限低照度条件下的应用。

第一类,主要由对 X 射线、紫外光、蓝绿光、短波红外光有响应的光阴极先实施非可见光转换为电子,然后再借用经典微光夜视器件中成熟的电子倍增和显示,形成了光谱响应为非可见光响应的微光夜视器件,实现了对非可见光谱微弱辐射量探测、成像等,用于一些特殊领域,如 X 射线像增强器、紫外像增强器(碲化铯/碲化铯铷光阴极像增强器、铝镓氮/氮化镓光阴极像增强器)、蓝绿光响应像增强器(镓砷磷光阴极像增强器)、

短波红外响应像增强器(铟镓砷光阴极像增强器);第二类,主要包括低照度 CMOS 和电子倍增 CCD (EMCCD),它们是在普通 CMOS 和普通 CCD 基础上进行特殊加工,实现探测照度的下限阈值下移,实现了在有限低照度条件下的微光探测、成像。

2.1 “二代族”微光夜视器件

“二代族”微光夜视器件是在二代微光夜视器件技术体制基础上,保持器件结构组成不变,通过更换光阴极种类,拓展及衍生出来的光谱响应为非可见光的一类器件。如,碲化铯(碲化铷)($\text{Te}_2\text{Cs}/\text{Te}_2\text{CsRb}$)光阴极夜视器件^[4],它们是在二代多碱光阴极微光夜视器件的结构组成、部件及基础工艺保持不变前提下,通过用碲化铯(碲化铷)光阴极代替多碱光阴极,制备出在紫外波段($200 \text{ nm} \sim 320 \text{ nm}$)响应的紫外响应夜视器件。由于光阴极材料变化带来光谱响应范围从可见光变为紫外光,指标体系相应从光度学变为辐射度学^[5],无法与二代微光夜视器件技术指标实现一对一对比,无法纳入经典微光夜视器件“代”次划分体系中。

2.2 “三代族”微光夜视器件

“三代族”微光夜视器件是三代微光夜视器件技术体制基础上,采用相同器件结构组成不变,通过更换光阴极种类拓展及衍生出来的与 GaAs 光谱响应不完全吻合的一类器件。主要包括铝镓氮(氮化镓)光阴极像增强器^[6]、镓砷磷^[7]光阴极像增强器、铟镓砷光阴极像增强器,它们均是在三代负电子亲和势 GaAs 光阴极微光夜视器件的结构组成、部件及基础工艺保持不变前提下,分别用铝镓氮(氮化镓)光阴极、镓砷磷光阴极、铟镓砷光阴极代替 GaAs 光阴极,并充分发挥 Al 组分变化可调节长波阈值的技术优势,制备出在紫外波段($200 \text{ nm} \sim 280 \text{ nm}$)响应的日盲紫外器件、蓝绿光波段($400 \text{ nm} \sim 600 \text{ nm}$)响应的蓝绿光响应器件、短波红外波段($900 \text{ nm} \sim 1060 \text{ nm}$)响应的短波红外响应器件,这 3 种光阴极结构和制作原理与 GaAs 光阴极基本相同,由于光谱响应范围依次从可见光变为紫外光、蓝绿光和短波红外光,指标体系也从光度学变为辐射度学,无法与三代微光夜视指标进行一对一对比,无法纳入经典微光夜视器件“代”次划分体系中。

2.3 低照度 CMOS

低照度 CMOS^[8]是在传统 CMOS 技术基础上,

在像元内进行信号处理、放大并低噪声读出, 并以 CMOS 的形式数字化输出成像结果。针对 CMOS 图像传感器填充因子不高的缺陷, 在每个像元上方通过工艺制备出一个微透镜或微光楔, 将入射光能量聚焦于光电转换器光敏面上, 从而提高了 CMOS 图像传感器灵敏度, 形成低照度 CMOS, 其结构和工作原理如图 9 所示。将微透镜与 CMOS 结合, 虽然有效地改善了 CMOS 感光元件感光度, 提高了低照度环境下像质, 但由于内光电效应过程中噪声大, 只能在照度高于 10^{-2} lx 环境下成像, 能够满足在夜间模拟训练、行军、机动、维护、保障等基本任务所需较高照度环境下的微光夜视装备需求; 另外, 由于 CMOS 工艺兼容性强, 规模化生产能力强, 能够有效降低成本, 是一种能够在一定照度环境下非实战条件下使用的低成本、小尺寸微光夜视器件。

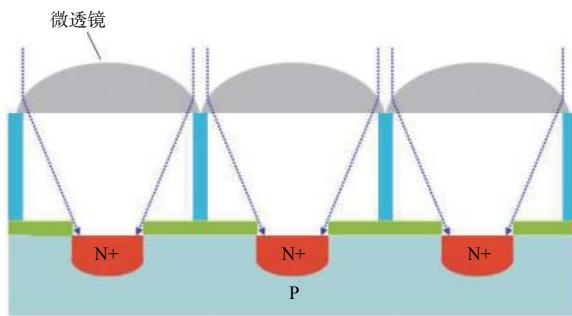


图 9 低照度 CMOS 原理图

Fig. 9 Schematic diagram of low-light-level CMOS

2.4 电子倍增 CCD

电子倍增电荷耦合器件^[9-10]即电子倍增 CCD (electron multiplying charge coupled devices, EMCCD), 由 CCD 成像存储区、串行寄存器、倍增寄存器和读出放大器组成, 属于帧转移或全帧转移面阵器件, 并采用了“片上增益”技术, 克服了读出放大器噪声对信号的影响, 提高了信噪比及成像质量, 其芯片内部结构如图 10 所示。EMCCD 工作原理与普通 CCD 区别如图 11 所示。普通 CCD, 串行移位寄存器直接把来自有源区的图像信号交给输出接头, 进行信号放大和 A/D 转换, 以显示视频图像。EMCCD, 串行移位寄存器中的图像电子信号, 必须先经过芯片内的增益寄存器低噪声放大后, 再交由输出接头后续处理、A/D 转换, 以显示视频图像; 相较于普通 CCD, EMCCD 芯片中有一个特殊的增益寄存器, 该寄存器位于 CCD 芯片的转移寄存器与输出放大器之间, 其结构和一般

CCD 类似。只是电子转移第二阶段的势阱被一对电极取代, 第 1 个电极上为固定值电压, 第 2 个电极按标准时钟频率加上一个高电压, 通过 2 个电极之间高电压差形成转移信号电子的冲击电离形成新的电子。尽管每次电离能够增加的新电子数目并不多, 但通过多次电离, 就可将电子的数目大大提高。

根据应用时光照条件强弱不同, EMCCD 工作模式可以分为如下 3 种: 1) 常规模式 当光照条件

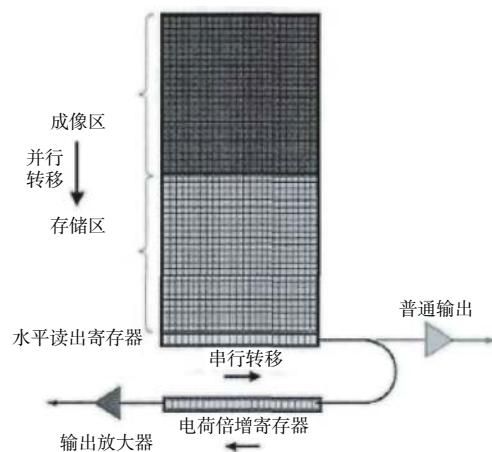


图 10 EMCCD 芯片内部结构

Fig. 10 Internal structure diagram of EMCCD chip

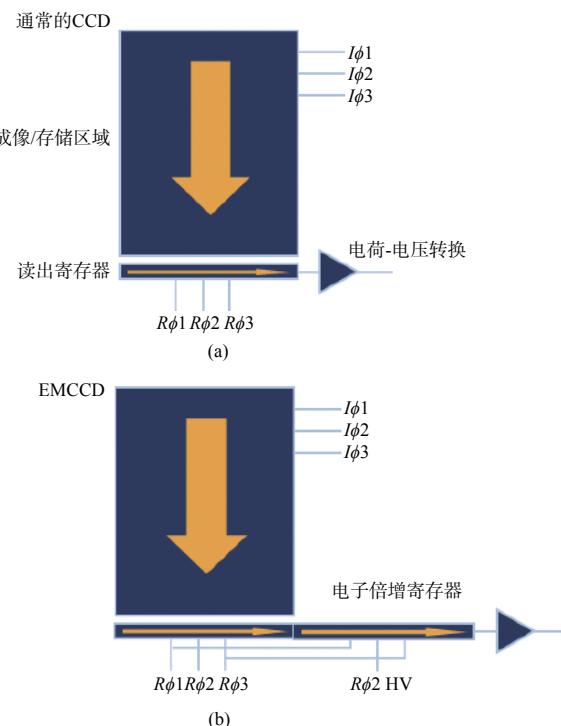


图 11 普通 CCD 与 EMCCD 原理对比图

Fig. 11 Comparison diagram of principle of ordinary CCD and EMCCD

相对较强, 可满足普通 CCD 的成像要求时, 可以关闭电子倍增 CCD 的电子倍增功能, 使其工作在常规模式下。此时, 倍增极上所加高电压降至与其他栅极相同的水平, 电子倍增寄存器仅相当于普通的转移寄存器, 电子倍增 CCD 的输出信号也与普通 CCD 的输出信号相同; 2) 线性模式 当光照条件减弱时, 输入信号也会减小, 当减小到一定程度, 导致输出信号的信噪比明显降低时, 可开启电子倍增的倍增功能, 并工作在线性模式之下。通过调节倍增寄存器倍增增益的设置, 电子倍增极的栅极电压随之相应变化, 输入信号在强电场雪崩倍增的作用下得到有效倍增, 提高输出信号的信噪比; 3) 光子计数模式 当光照条件非常弱时, 光辐射可以看成由一个一个可辨识的光子组成的光子流。由于单个光子所产生的信号非常微弱,

并不能从一个光子的信息中得到有效的信号恢复光子图像。为了使微弱单光子信号不被淹没于读出噪声之中, 必须将电子倍增 CCD 的增益尽可能调大。

EMCCD 特点是降低了噪声读取基底, 具有高的量子效率(可以达到 90% 以上), 最少的曝光时间, 降低了激发所需的强度。由于其成像单元仍为 CCD, 故成像结果能以 CCD 的形式数字化输出。

3 四代微光夜视器件

3.1 典型微光夜视器件划代方法研究

3.1.1 典型微光夜视器件划代方法总结

为了提出微光夜视器件划代方法, 将从典型指标、代次更新标志、光谱范围等方面对国外微光夜视器件进行对比分析, 如表 1 所示。

表 1 国外微光夜视器件性能对比表

Table 1 Comparison of performances of low-light-level night vision devices abroad

代次	时间	典型指标			代次更新标志	光谱响应范围/nm
		灵敏度/(μ A/lm)	分辨率/(lp/mm)	信噪比		
零代	20世纪30年代	100	—	—	玻璃窗 S1 光阴极。	300~1 100
一代	20世纪60年代	200	25	8	光纤面板 S20 光阴极和三级级联结构, 灵敏度和增益提高。	400~875
二代	20世纪70年代	300~450	30	14	微通道板电子倍增, 灵敏度和继续增益提高。	400~875
三代	20世纪80年代	1 600~1 200	42~55	18~22	GaAs 光阴极、防离子反馈膜高增益低噪声微通道板、自动门控电源, 灵敏度再提高。	400~895
超二代	20世纪90年代	500~650	42~57	20~23	超 S25 红延伸光阴极。	400~890
超二代、三代并存	21世纪 20 年代	650~1 200	64~72	25~28	同代性能提升	400~890
三代并存	三代	1 800~2 400	64~81	28~38		400~940

对表 1 所示内容进行总结归纳可知, 行业公认的经典微光夜视器件划代方法有如下特征。

1) 从零代、一代、二代、超二代、三代的发展历程可见, 随着代次序号变大, 其核心指标灵敏度、分辨率、信噪比等均逐步提升, 微光夜视器件综合性能也会得到提升。这一点已被试验所证实。在某项目中, 在 $(1\sim3)\times10^{-4}$ lx 条件下, 在同一套微光夜视设备中, 装备国产三代微光夜视器件的设备作用距离是装备国产超二代微光夜视器件作用距离的 2 倍以上; 在 $(1\sim3)\times10^{-3}$ lx 条件下, 装备国产三代微光夜视器件的设备作用距离比装备国产超二代微光夜视器件作用距离提高 30% 以上。

2) 典型微光夜视器件的光谱响应范围均界定在可见光及近红外区域(400 nm~1 100 nm), 均采用积分灵敏度指标表征其光阴极的光电转换效率, 属于光度学的物理量。

3) 每次出现更新换代时均会先出现一个典型新部件替代原部件, 且由于新部件性能变化必然会带来微光夜视器件性能大幅度跨越提升。如, 光纤面板出现并替代玻璃用于一代微光夜视器件中, 使一代三级级联微光夜视器件成为可能, 使增益得到了大幅度提升; 如 MCP 部件出现, 并作为电子倍增器用于二代微光夜视器件中使电子增益倍增, 同时带来微光夜视器件体积和质量大幅度下降; 如 GaAs 光阴极部件出现, 并用于三代微光夜视器件中替代二代的多碱光阴极, 使光阴极积分灵敏度成倍增加, 信噪比大幅度提升。

基于上述三点, 可见四代微光夜视器件应是光谱响应与三代微光器件基本相同即 GaAs 光阴极保持不变, 同时出现 1 个新部件来替代 MCP、荧光屏部件中的 1 个或者 2 个, 形成 1 个新器件且性能比三代微光夜视器件有一个大幅度变化。

3.1.2 微光夜视器件国内外划代方法探讨

国外曾经提出了四代微光夜视器件的概念^[11-14], 但还未被行业认可, 有以下几种较具有代表性的概念。1) 采用 InGaAs/InP 传输电子近红外($0.9\text{ }\mu\text{m}\sim 1.060\text{ }\mu\text{m}$)光阴极微光夜视器件; 2) bTe/PbSnTe 复合阵列红外光阴极 STIRP—热红外变像管($8\text{ }\mu\text{m}\sim 14\text{ }\mu\text{m}/3\text{ }\mu\text{m}\sim 5\text{ }\mu\text{m}$); 3) 三代微光夜视器件基础上改进 MCP 材料实现增益和灵敏度等性能提升; 4) 采用品质因数进行评价, 依据品质因数的大小进行划代。国内, 周立伟等人^[15]撰文指出, 用“代”划分来表征微光夜视器件的性能比较笼统, 不确切, 应淡化“代”的概念, 采用“品质因数”来对微光夜视器件的水平进行定量描述。金伟其及潘京生等人分别发文公布对微光夜视器件划代方法的研究成果^[16-17], 研究成果中均引用了国外部分学者提出的“品质因数”概念, 用品质因素来评价微光夜视器件性能, 不再考虑微光夜视器件的技术特征。这种提法能反映出具有一定的实用性思想, 但是此提法存在着一些值得探讨的地方: 1) 品质因数等于极限分辨率与信噪比乘积, 极限分辨率和信噪比是 2 个不同工作状态下的测试数据, 两者相乘的数值没有物理意义, 不能表征微光像增强器在具体实际环境下的使用效果。极限分辨率通常是指调制传递函数降到 3% 时对应的空间分辨率。测试时, 调节微光夜视器件输入照度使荧光屏上能够看到最多、最清晰分辨率靶面线条数即最高分辨率。通常, 测试时输入面照度为 $5\times 10^{-3}\text{ lx}\sim 1\times 10^{-2}\text{ lx}$, 且每个被测微光夜视器件极限分辨率对应的输入照度不一定相同, 也不要求必须相同。信噪比测试时要求用直径为 $\phi 0.2\text{ mm}$ 照度为 $1.08\times 10^{-4}\text{ lx}$ 的光斑照射微光夜视器件光阴极, 每个被测的微光夜视器件输入照度要求一定相同, 且必须相同。对比上述 2 个参数的测试条件, 明显不同, 把 2 个完全不在同一个照度量级工作的参数相乘, 没有太多的科学依据, 没有实际的物理意义, 值得探讨。2) 对于微光夜视器件这种在低照度下实现光电转换、倍增及显示的特殊光电器件, 要实现的功能先是看得见(由信噪比决定), 然后才是看得清(由分辨率决定)。因此, 只有看得见的前提下对比如极限分辨率高低才有价值。将两者相乘忽略了这一基本概念。国内外微光夜视器件在夜晚进行野外试验也证明了这一点, 2 支微光夜视器件在都能看得见的前提下, 极限分辨率高的使用效果好; 当照度变低后, 信噪比高的效果好, 极限分辨率已

经没有参考价值了。因此, 采用品质因数表征微光夜视器件性能的方法值得商榷。

3.2 四代微光夜视器件概念

目前超二代和三代微光夜视器件已经发展多年, 发展四代微光夜视器件已经成为众多研究者和决策层的共识, 四代微光夜视器件的具体技术特征是什么? 这已经成为行业关注的焦点。据此, 本文对典型微光夜视器件发展历程及各代技术特征进行了总结归纳, 并沿用前文归纳的微光夜视器件划代方法的 3 个特征, 提出四代微光夜视器件应是光谱响应与三代微光器件基本相同, 即 GaAs 光阴极保持不变, 同时出现一个新部件来替代 MCP、荧光屏部件中的 1 个或者 2 个, 形成一个新器件且性能比三代微光夜视器件有一个大幅度变化。可见四代微光夜视器件应是 GaAs 光阴极电子轰击 APS 数字微光器件, 即 GaAs 光阴极 EBAPS 数字微光器件^[9-10]。原因如下:

- 1) 从结构组成上分析, GaAs 光阴极电子轰击 APS 数字微光器件, 保留了三代微光像增强器 GaAs 光阴极不变, 用新的部件背减薄电子敏感 APS 代替了三代微光像增强器中 MCP 和荧光屏;
- 2) GaAs 光阴极光谱响应是可见光范围, 属于光度学范畴, 灵敏度性能可与三代微光器件进行比较;
- 3) 电子敏感背照式 APS 替代了三代微光夜视器件中 MCP 电子倍增和荧光屏电光转换的功能。该部件具有电子倍增、电子传输和信号读出“三位一体”的功能, 从而使三代微光夜视器件模拟输出图像的能力跃迁为数字图像输出的能力, 使微光夜视器件实现了“模拟输出”向“数字输出”的跨代提升, 使传统微光只能一人近距离直视图像的现状变为多人远距离联合共享图像, 能够更好适应新时代联合作战的使用要求; 另外采用光阴极选通电源, 在外界照度高时光阴极不工作, APS/CMOS 基于内光电效应工作, 外界照度低时光阴极基于外光电效应工作, 这 2 种工作模式相互交替发挥了两者的技术优势, 实现了性能提升, 是一种可全天候工作的数字微光器件。

GaAs 光阴极电子轰击 APS 微光夜视器件工作原理为光阴极将输入光子转换成光电子, 在静电电压的加速下, 光电子轰击背照式电子敏感 APS 芯片, 产生电子-空穴对, 形成电子轰击半导体 (EBS) 增益。由于 EBAPS 仅有光阴极和 APS 两个部件, 图像传输链短, 且 EBS 增益产生的噪声远低

于 MCP 的电子倍增噪声。既减小了体积和重量, 又极大地提高了信噪比和 MTF。由于其输出端为 APS, 故成像结果以 APS 形式数字化输出。APS 是 CMOS 的一种, APS 芯片在每个像素位置内部都有一个放大器, 这就使其性能在很低的带宽情况下把离散的电荷信号包转换成电压输出, 而且也仅需要在帧速率下进行重置, 具有带宽要求低、信噪比高等优点, 因此广泛应用于电子轰击条件下, 其工作原理如图 12 所示。

3.3 微光夜视器件树状图

经过上述研究, 给出各种微光夜视器件分布树状图如图 13 所示。

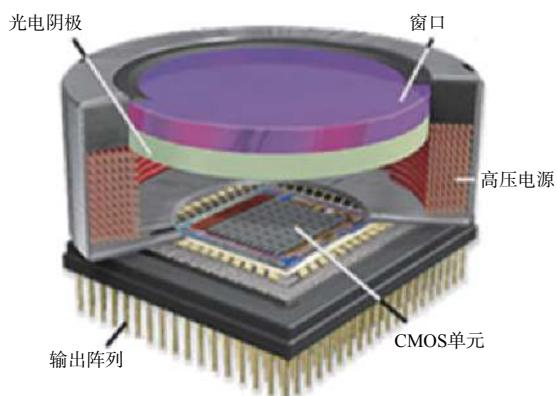


图 12 EBAPS 结构图

Fig. 12 Structure diagram of EBAPS

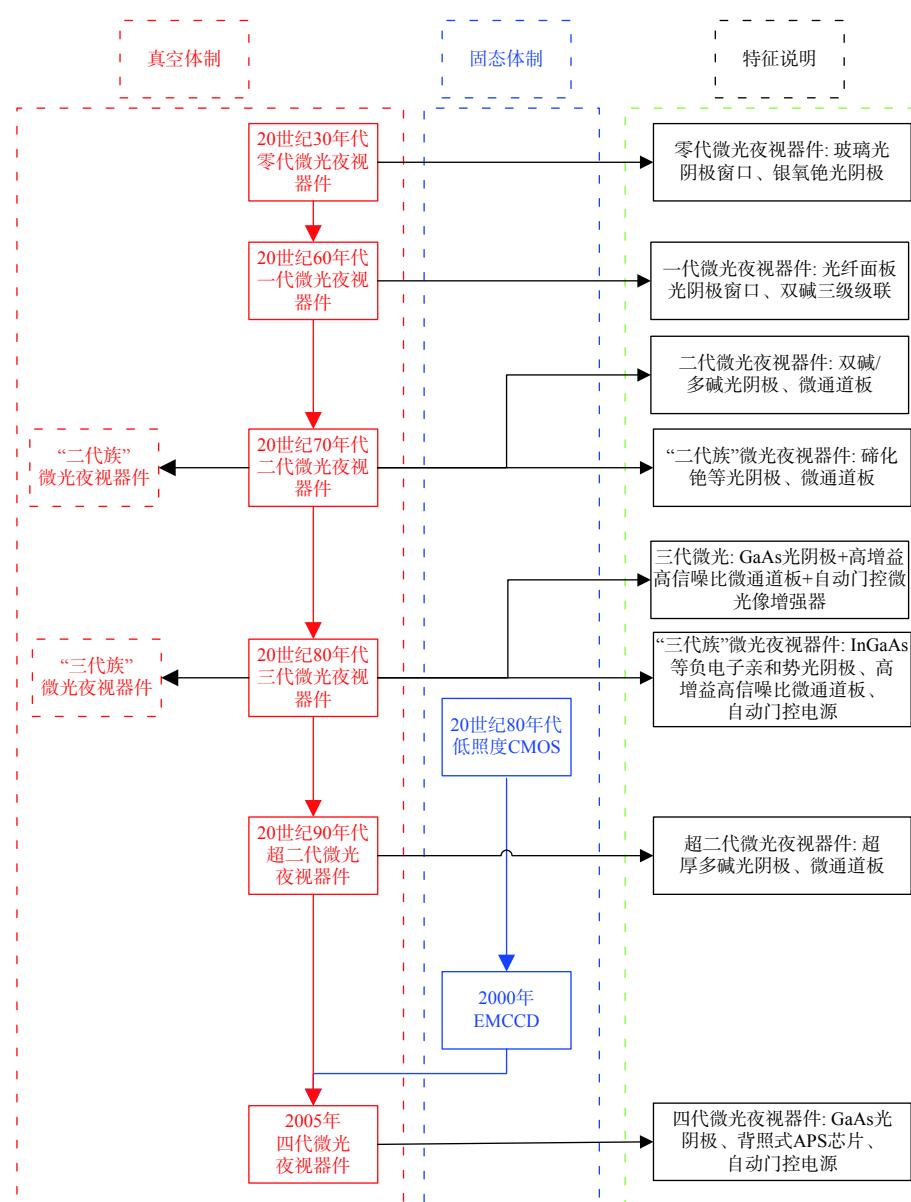


图 13 各种微光夜视器件分布树状图

Fig. 13 Distribution tree diagram of various low-light-level night vision devices

4 结束语

回顾了零代、一代、二代、三代、超二代等经典微光夜视器件发展历程, 归纳总结出来了经典微光夜视器件行业公认的划代方法的3个特征, 沿用这3个特征, 提出了四代微光夜视器件是指GaAs光阴极EBAPS数字微光器件, 它将使微光夜视器件从“模拟”时代跨入“数字”时代, 也是当前国际上在军用低照度探测成像方向发展及应用的重点; 对几种非典型微光夜视器件的成像机理及技术特征进行了分析, 提出了“二代族”、“三代族”的概念, 根据各种微光夜视器件的技术特征绘制了分布树状图, 说明了各种微光夜视器件在微光夜视器件领域的相应位置。研究成果具有一定参考作用。

参考文献:

- [1] 周立伟, 刘玉岩. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 79-100.
ZHOU Liwei, LIU Yuyan. Object detection and origin[M]. Beijing: BeiJing Institute of Technology Press, 2002: 79-P100.
- [2] 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: 6-10.
XIANG Shiming, NI Guoqiang. The principle of photo-electronic imaging devices[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 6-10.
- [3] 常本康. GaAs基光阴极[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1-13.
CHANG Benkang. GaAs based photocathodes[M]. BeiJing: science Press, 2017: 1-13.
- [4] 石峰, 程宏昌, 同磊, 等. 紫外探测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 132-175.
SHI Feng, CHENG Hongchang, YAN Lei, et al. UV detection technique[M]. BeiJing: National Defense Industry Press, 2017: 132-175.
- [5] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 29-35.
ZHANG Jingxian, LI Yudan, JIN Weiqi. Low-light-level and infrared imaging technology[M]. BeiJing: BeiJing Institute of Technology Press, 1995: 29-35.
- [6] 常本康. GaN基光阴极[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 13-17.
CHANG Benkang. GaAs based photocathodes[M]. BeiJing: Science press, 2018: 13-P17.
- [7] 贾欣志. 负电子亲和势光阴极及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 207-224.
JIA Xinzhi. Negative electron afinity photocathodes and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 207-224.
- [8] 姚立斌. 低照度CMOS图像传感器技术[J]. 红外技术, 2013, 35(3): 125-132.
YAO Libin. Low-light-level cmos image sensor technique[J]. Infrared Technology, 2013, 35(3): 125-132.
- [9] 韩露, 熊平. EMCCD工作原理及性能分析[J]. 传感器世界, 2009, 15(5): 24-28.
HAN Lu, XIONG Ping. The analysis of operating principle and performance of EMCCD[J]. Sensor World, 2009, 15(5): 24-28.
- [10] 刘亚宁, 桑鹏, 吕嘉玮, 等. 微型低功耗EBAPS相机技术[J]. 红外技术, 2019, 41(9): 810-818.
LIU Yaning, SANG Peng, LYU Jiawei, et al. Miniature low power consumption EBAPS camera technology[J]. Infrared Technology, 2019, 41(9): 810-818.
- [11] AEBI V W, COSTELLO K A, ARCUNI P W, et al. EBAPS: Next generation, low power, digital night vision[C]. [S.I.]: OPTRO 2005 International Symposium, 2005: 1-10.
- [12] ESTRERA J P, BENDER E J, GIORDANA A, et al. Long lifetime generation IV image intensifiers with unfilmed microchannel plate[J]. SPIE, 2000, 4128: 46-53.
- [13] THOMAS N I. System performance advances of 18-mm and 16-mm subminiature image intensifier sensors[J]. SPIE, 2000, 4128: 54-64.
- [14] RICHARDSON D. Technology for tomorrow's night vision[J]. Armada International, 1997(4): 32-37.
- [15] 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.
ZHOU Liwei. On figure of merit of low light level image intensifiers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(4): 331-337.
- [16] 金伟其, 刘广荣, 王霞, 等. 微光像增强器的进展及分代方法[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 460-463.
JIN Weiqi, LIU Guangrong, WANG Xia, et al. Image intensifier's progress and division of generations[J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 460-463.
- [17] 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.