

电子轰击型有源像素传感器 (EBAPS) 研究进展

王司龙, 孙爱平, 李训牛, 余佳桐, 周玲玲, 陈玉柔, 皮冬明

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 电子轰击型有源像素传感器 (electron bombarded active pixel sensor, EBAPS) 是一种电子轰击型的数字化微光器件, 低功耗、高灵敏度、适用于极低照度探测。本文从 EBAPS 原理出发, 以传感器阴极、阳极内部结构为着手点, 阐述 EBAPS 从光信号输入到数字图像输出的工作过程, 分析 EBAPS 光学系统的结构特点, 结合 Intevac 公司系列 EBAPS 产品综述 EBAPS 的发展迭代与应用。最后, 总结影响 EBAPS 传感器性能的各方面因素并展望器件的发展趋势。

关键词: EBAPS; 数字化微光器件; 极低照度探测

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2024)10-1120-10

Research Progress of an Electron Bombarded Active Pixel Sensor

WANG Silong, SUN Aiping, LI Xunniu, YU Jiatong, ZHOU Lingling, CHEN Yurou, PI Dongming

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: An electron bombarded active pixel sensor (EBAPS) is a novel, digital low-light device characterized by its low power consumption, high sensitivity, and suitability for extreme low-light detection. This study begins with the principles of the EBAPS, focusing on the internal structure of the sensor's cathode and anode to elucidate the working process of the EBAPS from its input of optical signals to its output of digital images. This study further analyzes the structural features of the EBAPS optical system and, combined with a series of EBAPS products from the Intevac Corporation, reviews the development iterations and applications of the EBAPS. Finally, this study summarizes the various factors affecting the performance of EBAPS sensors and discusses the development trends of such devices.

Key words: EBAPS, digital low-light device, extreme low illumination detection

0 引言

微光夜视技术主要是研究在低照度空间下, 微弱目标像的增强、成像与识别。由于其所成图像细节相对丰富且低延迟, 受到广泛应用。微光成像系统通常由光学镜头、微光器件、控制电路以及图像显示屏4部分组成。

微光夜视技术中, 图像获取为最关键步骤, 微光器件是微光技术的核心, 其决定着整个微光系统的成像质量。微光像增强器经历了从一代、二代、到超二代以及三代的发展历程, 探测性能有了稳步提升。随着战争变革为数字化、智能化, 微光图像传感器也开辟了新的发展方向, 目前新一代微光图像传感器的概念已经提出, 旨在结合真空器件与固体器件, 研制出高性能的数字化器件^[1], 电子轰击型有源

像素传感器 (electron bombarded active pixel sensor, EBAPS) 应运而生。EBAPS 电子轰击型有源像素传感器兼顾了真空传感器的高探测率与固体传感器数字化输出的特点, 适用于极低照度探测, 在国内外军用领域引起广泛关注。

1 EBAPS 原理

2005 年美国 Intevac 公司率先研制成功电子轰击型有源像素传感器 EBAPS, 微弱光入射到阴极表面, 产生的光电子在高压加速下轰击 APS (active pixel sensor), 随后 APS 产生电信号, 通过电路读出, 并进行后续图像处理与显示。EBAPS 传感器的工作原理如图 1 所示^[2]。

EBAPS 传感器具有一个高分辨、背面减薄的 APS 芯片, 阳极 APS 既可以接受光信号, 也可以感

收稿日期: 2024-06-28; 修订日期: 2024-07-15.

作者简介: 王司龙 (2001-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 研究方向为光学系统设计。E-mail: 16688202332@139.com。

通信作者: 孙爱平 (1980-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为红外整机系统设计以及光学系统设计。E-mail: 50973525@qq.com。

知电信号并建立数字输出。阴极材料是具有负电子亲和势的 III-V 族砷化镓 (GaAs) 材料。EBAPS 昼夜分模式分焦面响应, 夜晚光阴极接收目标微光辐射, 激发电子, 电子轰击 APS 阳极, 在阳极处, 电子被收集、放大, 并输出数字信号。白天光阴极充当滤光片, 近红外波段在阳极响应^[3]。

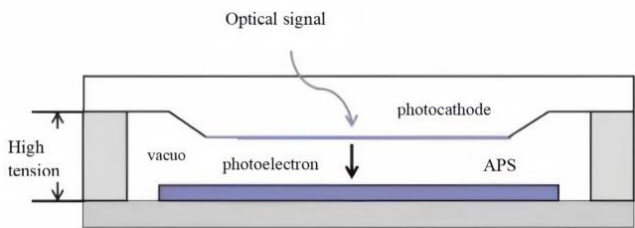


图1 EBAPS 传感器的工作原理图^[2]

Fig.1 Working principle diagram of EBAPS sensor^[2]

EBAPS 传感器去除了传统的微通道板 (micro channel plate, MCP) 以及荧光屏, 增益过程中的噪声低于以 MCP 微通道板实现电子倍增的噪声, 且夜视性能没有损失, 为用于极低照度探测的夜视产品提供了硬件基础, 最低探测照度可达 10^{-5} lx。

1.1 APS 阳极

CMOS (complementary metal oxide semi-conductor) 成像器件通过晶体管的开关来控制光信号的接收与读取, 如图 2 所示。早期的 CMOS 是无源像元传感器 (passive pixel sensor, PPS), 随着半导体技术的不断发展, APS 有源像元图像传感器进入人们视野, 使得 CMOS 性能大幅提升^[4]。

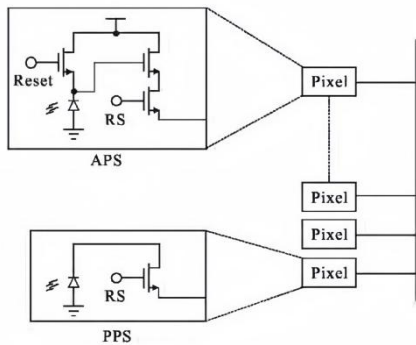


图2 CMOS 的 APS 及 PPS 结构^[4]

Fig.2 Structure of CMOS APS and PPS^[4]

APS 每个像素集成光电二极管, 每个像素单元还包含一个或多个有源晶体管。APS 的结构可以是横向或纵向, 用于光电检测和信号存储。而 PPS 是一种被动式传感器, 其像素结构中没有有源晶体管, 不具备像 APS 那样的放大功能。相比与传统的 CMOS 芯片, APS 内部电子结构独特, 二极管产生的光电流通过分布电容积分, 再经源极跟随器的缓冲, 传输至总线。经过以上信号处理步骤, 光电信号

的信噪比得到增强, 而且经过源极跟随器缓冲后的电压信号更有利于多路传输。

EBAPS 器件的 APS 阳极不仅可以接收光信号, 也是电子敏感 CMOS, 也可以在电子轰击机制下接收电信号, 并建立数字输出。当高能电子撞击光电二极管的感光区域时, 会产生电子, 这些电子被放大电路 (APS 芯片上的有源晶体管) 捕获并转换为电信号。

APS 阳极芯片由像元阵列, 信号发生器以及控制电路组成。列选控制电路与逻辑定时电路共同控制像元阵列。APS 中的逻辑电路会根据收集到的电子数量产生不同的电压信号。这些电压信号经过放大和处理后, 可以被转换为数字输出, 形成图像中每个像素的灰度值。图 3 为 APS 芯片结构图^[3]。

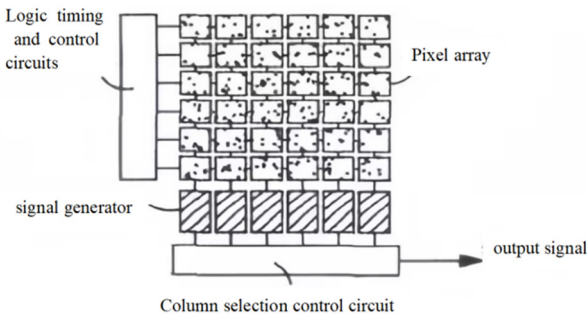


图3 APS 芯片结构^[3]

Fig.3 Structure diagram of APS chip^[3]

基于 EBAPS 的 APS 阳极的以上特性, EBAPS 具有昼夜兼容全天候工作的特点。白天高照度空间时, APS 直接采集目标物体的光信号, 光谱响应波段为 880~1050nm。晚上低照度使用时, EBAPS 阴极与阳极间加高压, 光阴极接收光子, 受激发辐射光电子, 光电子经高电压的加速, 轰击 APS 阳极, APS 同时兼具光敏与电敏特性, 建立数字输出。其夜间光谱响应波段为 400~880nm^[5-7]。图 4 为 EBAPS 响应曲线^[6]。

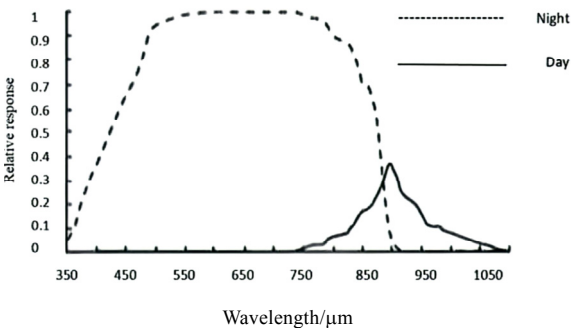


图4 EBAPS 响应曲线^[6]

Fig.4 EBAPS response curves^[6]

1.2 EBAPS 光阴极

EBAPS 传感器阳极由固体图像传感器 CMOS 改进而来, 阴极由真空图像传感器即像增强器改进而

来^[8]。20世纪60年代中期,第一代微光像增强器研发成功,其特点是3个单管级联形成增益,又称级联管。70年代初期,取消级联结构,引入微通道板,以微通道板MCP作为新的电子倍增结构,具有重量轻体积小等特点,增强了便携性与实用性。20世纪80年代,荷兰DEP公司与法国Photonis公司通过优化二代像增强器的多碱光阴极,提升增强器性能,研制出超二代微光管。80年代初,美国用负电子亲和势的GaAs光阴极代替多碱光阴极,并将离子壁垒膜引入MCP微通道板中^[9],研制出第三代像增强器。超二代与第三代真空微光器件的批量国产化为EBAPS研发提供硬件基础。根据像增强器的发展历程,现有的光阴极材料有III-V族GaAs半导体光阴极与Na₂K₂Sb碱金属光阴极。

Na₂K₂Sb是一种多晶半导体,而GaAs是单晶半导体^[10-11]。Na₂K₂Sb禁带宽度为1 eV,表面电子亲和势大于零,如图5(a); GaAs禁带宽度为1.4 eV,电子亲和势为负,如图5(b)。(图中 E_v 表示价带顶; E_c 表示导带底; E_0 表示真空能级; E_F 表示费米能级; A_f 表示电子亲和势)。

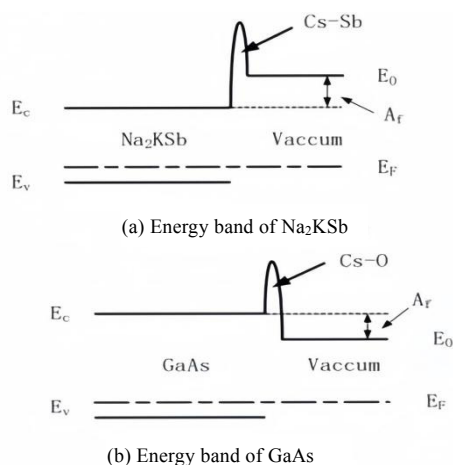


图5 光阴极原理图^[10]
Fig.5 Photocathode principle^[10]

Na₂K₂Sb光阴极表面电子亲和势大于零,电子不容易摆脱势垒逸出; GaAs光阴极表面为负电子亲和势,不存在势垒,电子比较容易逸出。因此GaAs光阴极灵敏度要高于Na₂K₂Sb光电阴极灵敏度。目前美国Intevac公司与法国Photonis公司生产的EBAPS皆使用GaAs光阴极。

通常以W. E. Spicer的“三步模型”理论来解释GaAs光阴极电子发射过程。首先,在光激发下,电子吸收能量,当电子能量大于材料禁带宽度的光子能量时,电子从价带跃迁到导带。其次GaAs导带内的受激电子很快弛豫到GaAs导带底附近,并向阴极

后表面运动,运动过程中经历电子-电子散射、电子-晶格散射和电子-空穴复合过程;最后,由于GaAs材料的导带底高于真空能级,到达阴极表面的光电子能量高于真空能级(以真空能级为零势能面)。因此电子能够以一定的几率穿过阴极表面的电子势垒,以一定的动能发射向真空。

GaAs光阴极在可见光与近红外区域具有很高的响应能力和较低的暗电流,在低照度夜视成像应用领域具有非常重要的作用,国内MOCVD生长的GaAs光阴极已经达到极高的灵敏度,目前的一大难题是光电阴极寿命问题。有研究表明,阴极寿命与水蒸气压力成反比。富As表面更有利于Cs的激活,进而使得光阴极在更短的时间和更少的激活周期内表现出良好性能^[11]。

EBAPS器件的昼夜模式响应,当不加高电压时,EBAPS GaAs光阴极停止工作,光子透过GaAs光阴极照射APS感光区域, GaAs过滤部分波段光信号, APS阳极感光并数字输出。另外为了达到拓宽或改变光谱范围的目的,可以改变光阴极材料的组成成分。

1.3 EBAPS与其他微光器件的对比

数字化微光器件是微光夜视技术与数字化集合的产物,为分辨不同微光器件的不同应用场景,将空间照度条件分为以下几个等级,空间照度 ≥ 1000 mlx定义为夜间高照度环境,通常为满月的夜晚; 10~40 mlx为低照度空间,多为多云夜晚; 0.1~2 mlx为极低照度空间,多为无月阴天、无月星光天。通过上述定义,我们可以更规范地阐述不同微光器件的应用场景。

低照度CMOS是在传统CMOS的基础,着重于提高信噪比、灵敏度等重要参数,使其获得一定的夜视性能,可以实现低照度探测,具有结构紧凑、可靠性高等优势,但是延迟相对大。

科学级CMOS即sCMOS集成了传统CMOS读出电路结构与CCD(charge-coupled devices)的基底结构体系,具有分辨率高、彩色微光成像优异等特点,但是体积大、功耗大,需要制冷。

增强型CCD/CMOS(ICCD/ICMOS)是通过中继光学元件将CCD/CMOS与真空像增强器进行耦合,中继镜组具有调焦功能,光能利用率低(小于10%),且存在系统杂散光影响。

图6展示了(ICCD/ICMOS intensified CCD/CMOS)微光器件的内部结构形式,毕竟是组装型的微光器件,在体积、重量与可靠性方面没有优势,且组件配比困难,虽然也可以满足低照度成像要求,但是价格昂贵,性能不稳定。

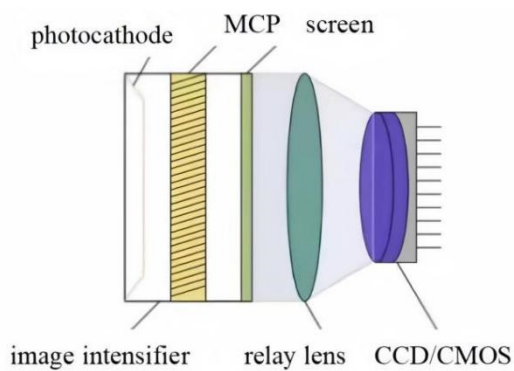


图6 增强型 CCD/CMOS
Fig.6 Intensified CCD/CMOS

电子轰击 APS (EBAPS)、新一代电子轰击型器件、电子轰击型器件既有真空器件的高灵敏度、宽光谱、低延迟的特点,也有固体半导体器件高分辨率、低功耗、数字化输出的特点。相比于传统的像增强器取消了 MCP 与荧光屏,信号传输链变短,噪声更低,信噪比与 MTF 有了显著提升,相比于 ICCD/ICMOS 器件灵敏度更高、功耗更低、器件体积与重量更小,但是 EBAPS 工艺要求高,要进行真空处理以及 APS 二次处理,使得 APS 可以同时接受光信号与电信号。

2 EBAPS 成像系统

图 7 展示了 EBAPS 成像系统的模块组成,EBAPS 成像系统通常由光学镜头、图像传感器、电路与控制系统以及供电模块组成。

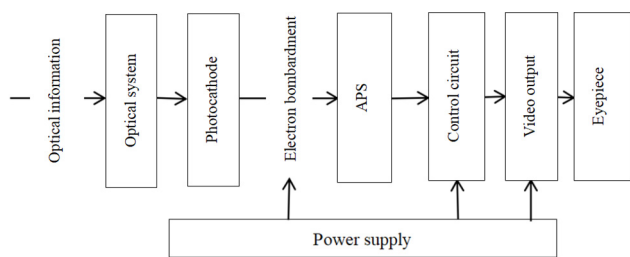


图7 EBAPS 成像系统组成

夜间模式下,首先光学物镜将光信号聚焦于光阴极,进行光电转换。接着供电模块在阴阳极两端加高电压,电子轰击 APS,通过读出电路在 OLED (organic light emitting diode) 上显示图像,最后由目镜实现人眼观察。

白昼模式下,光阴极与高电压模块停止工作,光学物镜需要将光信号聚焦在 APS 阳极面,APS 感光区域接受光信号,产生电信号,建立数字输出。基于

EBAPS 搭建的成像系统可以用于激光探测成像、极低照度深海、太空成像等多个领域。

物镜光学系统收集光信息聚焦于光阴极与阳极焦面,是 EBAPS 成像系统的重中之重,由于 EBAPS 分模式响应的特性,要求物镜光学系统需要同时兼具阴极焦面与阳极焦面的优秀光学性能,由于电子轰击原理的限制,阴极与阳极之间的距离一般不小于 0.25 mm,这超出了普通光学系统的焦深范围,需要光学系统根据器件响应波段进行特殊处理;

EBAPS 响应波段一般可以分为两种情况,即双焦面分波段响应与双焦面宽波段响应。分波段响应即昼模式阳极焦面响应近红外波段,夜模式阴极焦面响应可见光波段。宽波段响应为昼夜模式下阳极与阴极焦面皆响应 400~1000 nm,该宽波段覆盖从可见光到近红外。

EBAPS 分波段响应时,如图 8(a)(b)所示,光学系统可以通过采用特殊的光学材料组合,根据同一材料不同波段折射率不同的原理,进行分离焦面分波段分模式成像,光阴极对应夜模式,阳极 APS 对应昼模式,该方案光学设计难度高,主要表现在材料选取难、校正色差难以及特殊光学材料制作工艺的限制。

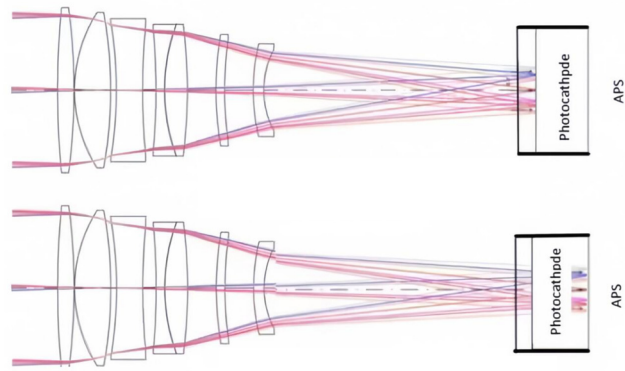


图8 分波段定焦光学成像:可见光阴极焦面夜间模式(上);近红外阳极焦面白昼模式(下)

Fig. 8 Optical imaging of segmented fixed focus: Visible light cathode focal plane with night mode(above)(b) Near-infrared anodic focal plane with day mode(below)

北方夜视股份有限公司的新一代 EBAPS 传感器宽波段分焦面响应,光学匹配方式如图 9(a)(b)所示。光学系统可以通过机械调焦的方式改变像面位置,即通过移动一片或几片透镜,实现物镜系统的整体光学性能的改变,进而实现宽波段分焦面分模式成像,阴极对应夜间模式,阳极 APS 对应白昼模式。光学设计难度不高,但是需要引入电动或手动调焦结构,整机体积与重量不易于控制。

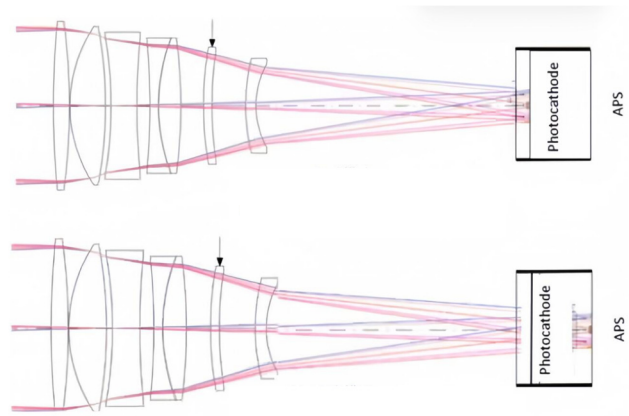


图9 宽波段调焦光学成像:宽波段阴极焦面夜间模式(上);宽波段阳极焦面白昼模式(下)

Fig.9 Wide-band focused optical imaging: (a) Wide-band cathode focal plane with night mode(above)(b) Wide-band anodic focal plane with day mode(below)

无论是分波段成像还是宽波段成像，面对EBAPS双焦面问题，都可以借鉴传统工程项目离焦处理方案，即探测器焦面的主动移动，以适配定焦光

学系统的单一焦面，同时也能解决物距远近切换的离焦问题，该方法在工程应用中广泛使用，较为成熟，但是基于EBAPS成像系统，需要考虑器件焦面移动敏感度，以及频繁移动对器件真空工艺与使用寿命的影响。

3 EBAPS 发展与应用

3.1 国外发展现状

2005 年，美国 Intevac 公司率先公布第一个 EBAPS 传感器专利，开辟了 EBAPS 技术的先河，在世界范围内引起广泛关注。

Intevac 公司早期有三代微光 EBAPS 产品^[12]，这三代 EBAPS 产品型号分别命名为 Night Vista, ISIE6, ISIE10。表 1 为 EBAPS 产品参数。从中可以看出早期 EBAPS 相机帧频普遍较低。21 世纪初美国 Intevac 公司改进并研制出新一代 EBAPS 探测器（型号为 ISIE11^[13-14]），继续针对极低照度探测的性能表现做了进一步的优化和提升。

表 1 EBAPS 系列产品性能参数对比^[12-17]

Table 1 Comparison of performance parameters of EBAPS series products^[12-17]

Function	Product				
	NightVista	ISIE6	ISIE10	ISIE11	ISIE19
Pixel	640×480	1280×1024	1280×1024	1640×1240	1920×1920
Pixel size/μm	12×12	6.7×6.7	10.8×10.8	10.8×10.8	9.11×9.11
Sensitive size/mm	9.8	11	17.7	22.2	24.7
Frequency/fps	30	27.5	37	60	160

2011 年 Intevac 公司与美国海军航空作战中心签署合作协议，共同研制更高分辨率的新一代数字夜视传感器（ISIE4000）^[15]。

2020 年 Intevac 公司向美国海军提供现有的新型 EBAPS 传感器 ISIE19^[16]，用于帮助美国军队在极弱光条件下高效执行任务，ISIE19 EBAPS 具有极低照度灵敏度，160 Hz 帧率时的像素分辨率为 1920×1920，可在滚动快门或伪快照模式下工作。它的特点包括用于增加线性动态范围的高位深度、比第三代技术更高的工作温度下、等效的背景噪声以及已获专利的零光晕技术，该技术即使在最极端的微光条件下也能提供高质量图像。

至此美国 Intevac 公司 EBAPS 芯片种类得到极大丰富，对比表 1 数据变化发现，分辨率与帧频不断提高。

图 10 给出了美国 Intevac 公司部分 EBAPS 传感器实物图对比^[18]。从图中可得，前三代传感器的尺寸大小和一枚 25 美分的硬币相当。符合微光器件设计

的轻量化、小型化要求。图 11 给出 Night Vista 和 ISIE6 EBAPS 相机的实物照片^[18]。从图中可以看出，相机尺寸小于成年人的手掌尺寸，可以单手持握。低重量、小体积的特点使其在头戴、手持夜视产品领域应用广泛。

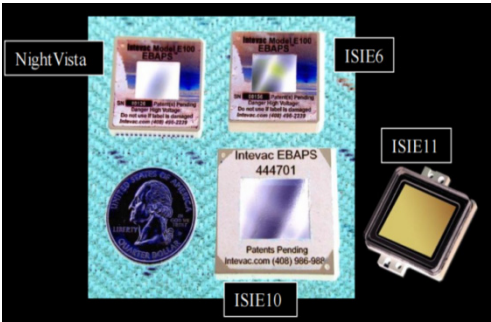


图 10 EBAPS 芯片的实物^[18]

Fig.10 EBAPS chip^[18]

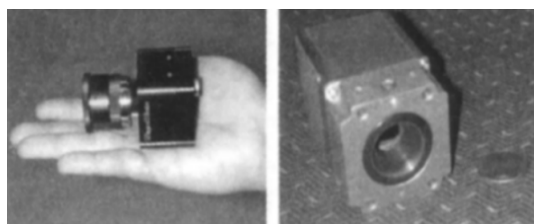


图 11 Night Vista (左) 和 ISIE6 相机 (右) 的实物照片^[18]
Fig.11 Photos of the Night Vista(left) and ISIE6(right) cameras^[18]

EBAPS 整机产品按用途划分为 3 种, 一是直升机引航, 如 ISIE11 EBAPS 夜视模块安装在 AH-64 Apache 直升机的机头炮塔上方, 用于增强飞行员的夜间飞行能力; 二是固定翼飞机引航, 如 ISIE19 EBAPS 集成在 F-35 联合攻击战斗机、轻型攻击机、军用空运机和教练机使用的头盔式显示器, 用于增强飞行员的夜视能力, 包括飞行引航和获取战术信息; 三是士兵机动作战, 如美军的集成式视觉增强系统中集成的 ISIE19 EBAPS 传感器, 基于 ISIE19 EBAPS 传感器的 M619 微光相机旨在使系统具备较好微光夜视性能的同时, 还具有数字化功能, 如变焦、信息叠加、无线图像传输和接收的功能^[19]。

在 2013 年与 2015 年, 美军先后两次采购 Intevac 公司集成 ISIE11 EBAPS 传感器的夜视相机, 并将其用于 AH-64 阿帕奇直升机上, 像素分辨率 1280×1960 , 最低工作照度可达 10^{-5} lx 量级如图 12 所示, 展示了相机在夜间满月与无月光成像的效果对比, 从图中可见两种情况下都完成了对地面物体的轮廓识别, EBAPS 为微光夜视应用提供了全新的选择^[19]。



图 12 用于阿帕奇武装直升机的 EBAPS 相机及夜间 (满月、无月) 成像效果^[19]
Fig.12 EBAPS camera used for Apache gunship and night (full moon, no moon) imaging effect^[19]

Intevac 公司目在售的 E3010C 型相机集成了 Night Vista EBAPS 传感器。该相机在极低照度下具有极高灵敏度, 帧频 30 fps^[20]。NightVista 芯片光电阴极材料为 GaAs 和阳极是一个分辨率 1280×1024 背照式 CMOS, 像元尺寸 $10.8 \mu\text{m} \times 10.8 \mu\text{m}$ 。图 13^[20]

给出在半月光环境下, E3010C 型相机在 50 码和 75 码处目标人物的观测图像。从图中可以比较容易地分辨出人手持枪支, 基本满足军用要求。



图 13 半月光状态下 50 码和 75 码外人物图像^[20]
Fig.13 Images of people 50 and 75 yards away under half moonlight^[20]

Collins 航空公司的增强型视觉灵敏度 (enhance visual acuity, EVA) 系统正在帮助美国海军和海军陆战队从模拟夜视系统过渡到数字夜视系统^[21]。如图 14 所示, EVA 集成了头盔式双目显示器, 以获得更宽、更高分辨率的图像, 当旋转翼飞行员最需要时, 能在极低光照水平下改善夜视性能。该系统使用 ISIE-19 传感器与显示器结合实现微光性能, 重量轻、对比度高、视野大。



图 14 Collins 航空公司研制的头盔式数字夜视显示器 EVA 系统^[20]

Fig.14 Head-mounted digital night vision display EVA system developed by Collins Aviation^[20]

EBAPS 在激光雷达成像领域也有较多应用, 国外目前军用激光雷达图像传感器均为电子轰击型传感器, 美国陆军实验室的第二代激光 ($1.55 \mu\text{m}$) 雷达, 啁啾调幅 (Chirped AM) 舰船激光雷达跟踪系统^[22-23], 该系统集成了 EBAPS 作为光电探测器。EBAPS 将二维空间微弱的光学信号转换为数字信号, 并通过 OLED 以及目镜匹配人眼观察。

美国 BAE 系统公司基于高分辨率二维成像雷达研制一种新型的目标命中系统, 提高激光成像性能的同时, 有效降低成本^[24], 如图 15 所示该系统集成了门控计时装置, 激光发射装置以及 Intevac 公司的 EBAPS 传感器。该目标采集系统具有多种功能, 包含红外目标探测、激光测距以及全球定位 (GPS)。激

光测距工作波长为 $1.5\mu\text{m}$ 和 $1.06\mu\text{m}$ ，当工作在 VGA 模式下输出帧频达到 28 fps。

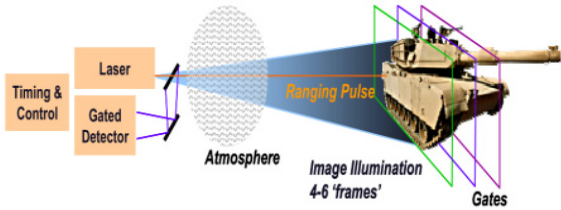


图 15 激光雷达系统示意图^[24]

Fig.15 Schematic diagram of LiDAR system^[24]

此外法国 Photonis 公司在电子传感技术市场上具备丰富经验，该公司生产的 EBAPS 传感器也具有卓越性能。EBNocturn 是由 Photonis 公司生产的一款集成 EBAPS 的数字图像增强型相机^[25]。它专为集成成像系统而设计，具有出色的低光水平图像质量，适用于夜视观测、武器瞄准、头盔安装、视觉和精确目标定位。像素分辨率 1280×1024 ，CMOS 靶面尺寸 1 英寸，帧率 60 fps。与 Intevac 公司产品类似，昼夜模式分波段分焦面工作，光谱范围为夜间模式： $500\sim930\text{ nm}$ ；日间模式： $930\sim1100\text{ nm}$ 。可达最低照度： $10^{-5}\text{ lx @60 fps}$ 探测。外形尺寸 $34\text{ mm}\times37\text{ mm}\times56\text{ mm}$ 。重量仅 120 g，体积小、重量轻、满足轻量化要求。同系列 EBNocturn 2Mpx 产品分辨率提高到 2048×1024 。

综上所述，在国外 EBAPS 技术发展进程中美国 Intevac 公司与法国 Photonis 公司分别占据先导与主体地位，随着技术创新与市场化推进，目前 EBAPS 传感器已经在美军单兵、机载、车载等平台大量列装，帮助美军完成极低照度探测，且应用效果良好。

3.2 国内发展现状

我国的微光夜视技术在现代高新技术局部战争和夜战中扮演着重要角色，目前国内微光成像技术发展仍面临一定挑战。研发和生产配套装备的能力相对较低，材料、仪表和软件等方面也相对依赖进口，与国际先进水平相比有差距。具体体现在光阴极技术、APS 器件技术及高真空密封技术等方面。由于国外的技术封锁和禁止出口政策，20 世纪我国在电子轰击型微光探测技术方面进步缓慢。

北方夜视技术股份有限公司与微光夜视技术重点实验室的新一代数字化器件 EBAPS，其光谱响应范围覆盖可见光与近红外波段，具有良好的夜视性能。搭载该器件的微光夜视仪器也不断涌现，受到广泛好评。

北方夜视股份 9B-3EBAPS 技术选用多碱光阴极（如图 16），具有低成、本小型化、极低探测下限、数字化输出、响应速度快等优点。有效像

素数 1280×1024 ；帧频 60 fps；光谱响应范围： $400\sim940\text{ nm}$ ；最低工作照度可达 $5\times10^{-5}\text{ lx}$ 。

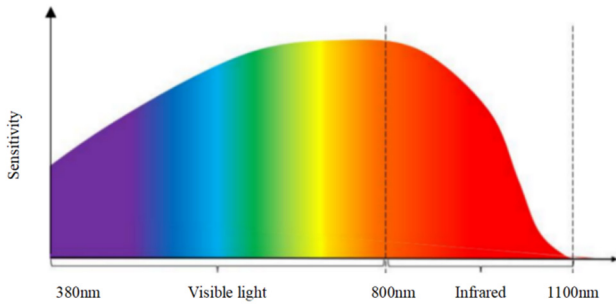


图 16 北方夜视股份 9B-3EBAPS 传感器光谱特性曲线

Fig.16 Northern Night Vision shares 9B-3EBAPS sensor spectral characteristic curve

微光夜视技术重点实验室 EBAPS 机芯采用 GaAs 光阴极，器件分波段响应，夜间光阴极响应波段 $400\sim900\text{ nm}$ ，白天工作时阳极响应波段为 $900\sim1100\text{ nm}$ ，有效像素数 1280×1024 ，输出帧频 60 Hz，具备自适应、手动调节曝光时间及增益、图像增强等功能。

目前国内具有 EBAPS 电子轰击型有源像素传感器研发以及批量生产能力的单位仅有北方夜视股份有限公司与微光夜视技术重点实验室，两者所研发的 EBAPS 传感器在光阴极与波段响应等方面略有异同，但是都满足了极低照度探测的任务，抢占了一定市场份额。此外长春理工大学、中国电子科技 55 研究所与中科院西安光机所对影响 EBAPS 传感器性能的因素进行了探究。

2017 年长春理工大学建立了 EBAPS 电子轰击有源像素传感器的电荷收集效率计算模型^[26-27]。通过优化模型并计算，最终获得了较高的电荷收集效率，达到 92%，为高增益 EBAPS 器件制备提供理论依据。

2018 年中科院西安光机所研究了影响 EBAPS 性能的因素，证明了阴极和阳极之间的距离和偏置电压对其相应的成像分辨率有显著影响。发现提高入射电子能量或减小钝化层厚度是增强电子倍增层倍增效应的一种方法^[28]。不同条件下比较了模拟结果，并成功找到了最佳参数，实现了相对较高的灵敏度。

2021 年微光夜视技术重点实验室杨晔等测试了不同温度下 EBAPS 设备的暗电流和等效背景照明之间的关系，探讨了温度对 EBAPS 设备成像性能的影响^[29]。确定了噪声来源。提供了不同温度下的暗电流，为有效降低器件噪声提供实验基础。2022 年微光夜视技术重点实验室李桐桐等搭建了超高真空除气系统，对 EBAPS 器件电子敏感 CMOS 阳极的放气特性进行了研究，实验验证了高温烘烤对 EBAPS 除

气有较好的效果,且不影响电子元件性能,为制作工艺提供新方案^[30]。

基于 EBAPS 的整机研制近年国内逐步推进。2019 年中国科学大学刘亚宁设计一款低功耗的 EBAPS 相机,搭配 Intevac 公司 EBAPS 器件,相机能够在日光下清晰成像,且具有弱光成像的能力,动态功耗为 0.82 W,电子学噪声 6.7 mV^[19],同年中科院西安光机所研制出 EBAPS 紫外样机,通过改变光阴极材料,使得样机在紫外光谱响应下实现了 0.84×10^{-4} lx 的低照度检测灵敏度。搭建的实验样机如图 17 所示,样机包括真空室、汞灯(作为入射光源)、偏振滤光片(用于减少光干扰)和金阴极^[19]。该样机的 EBAPS 将电子轰击图像与光学图像平行放置,物镜光学系统将入射光倾斜引入光阴极,光学图像沿光线倾斜方向读取,电子轰击图像沿垂直方向读取。

北京理工大学采用微光夜视技术重点实验室的 EBAPS 器件,基于三色液晶可调制滤光片组建了 EBAPS 彩色微光成像系统^[31]。该系统可以真实地输出景物与环境本身的颜色,且具有一定自然感,有效地提升了低照度夜间观察的视觉体验。该彩色 EBAPS 微光成像系统可以在 5×10^{-4} lx 照度下清晰

成像,系统结构如图 18 所示。该系统由光学镜头、三色液晶可调制滤光片及其控制装置、EBAPS 传感器以及 PC 机组成。系统采用的物镜为 PENTACON M55 定焦距光学镜头,其光 F 数 1.8,焦距 50 mm,后截距 55 mm,尺寸符合整机设计需求。该物镜可以实现 0.33 m 到无穷远清晰成像。

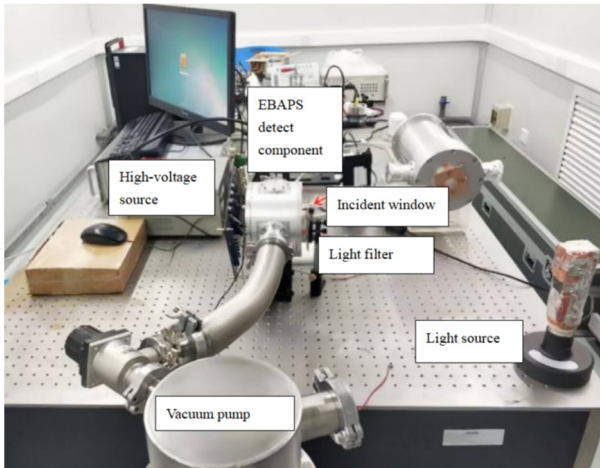


图 17 EBAPS 的实验样机图^[19]
Fig.17 Experimental prototype of EBAPS^[19]

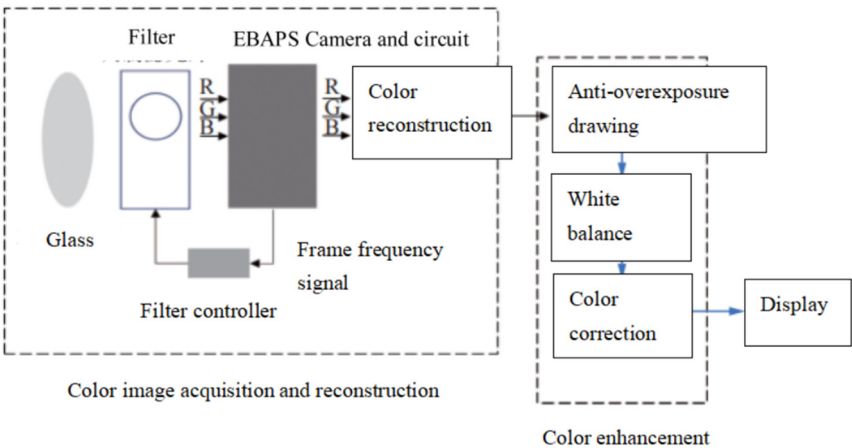


图 18 彩色微光 EBAPS 图像采集系统^[31]
Fig.18 Color low light level EBAPS image acquisition system^[31]

综上所述,EBAPS 电子轰击型传感器由美国首先公布专利并研制,适用于极低照度探测,在美军与欧洲军队有大量配备,包括头显系统、枪瞄系统等,且产品的性能不断更新提升,主要应用领域有激光探测成像,深海极低照度成像,太空卫星成像等。

由于技术封锁,国内 EBAPS 技术起步较晚,随着国内科技工作者不断探索影响 EBAPS 性能因素,目前我国已经有自主量产高性能 EBAPS 传感器的能力,随着加工工艺的优化,器件良品率与探测性能不

断提升。考虑到现阶段成本控制以及产品更新的问题,目前 EBAPS 传感器在我国军队还没有批量装备,还处于样机试用阶段。

4 EBAPS 发展趋势

EBAPS 作为一种新型的数字化微光器件,展示了微光器件必将兼具数字化和高性能探测的发展方向。EBAPS 因其数字化输出,灵敏度高、极端照度

下强探测能力、低延时、高帧频、小尺寸、低功耗等优势,未来军用光电装备中将大量推广应用。

美国在国防光电探测武器装备上已经大批量使用电子轰击型传感器,该技术研究也受到美国军方和政府机构的大力支持。如今我国EBAPS技术的研究也有了突飞猛进的进展,这得益于成熟的CMOS技术、光阴极技术、电荷收集以及电子倍增技术。国内相关混合微光器件封装等核心技术也为EBAPS发展提供有力支撑。

目前EBAPS虽然已经在极低照度环境探测占据优势,但仍存在光谱范围小,制作成本不易控制等难题,为了积极面对微光器件市场化,仍需朝着高性能,低成本方向发展。

另外也可以将EBAPS与彩色微光夜视技术、偏振成像技术等相结合,开辟EBAPS又一新的应用领域。未来EBAPS电子轰击型有源像素传感器必然朝着智能化、小型化、大数据共享等方向发展,应用场景也将逐渐复杂广泛,不仅涉及军用市场,也将推向民用市场,比如偏远郊区安防、野外探险、野外低照度安全驾驶等。

5 结束语

EBAPS在极低照度探测领域具有明显优势,虽然目前国内已经可以自主生产EBAPS传感器,但是在图像噪声、分辨率等方面仍有进步空间。通过引入光栅分光等新加工工艺以及优化算法结构,EBAPS性能将稳步提高。

参考文献:

- [1] 白晋周. 电子轰击有源像素传感器关键技术及应用研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2022.
BAI Jinzhou. Research on Key Technology and Application of Electron Bombardment Active Pixel Sensor[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Optical Precision Mechanical Research, CAS), 2022.
- [2] 田金生. 微光像传感器技术的最新进展[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 527-534.
TIAN Jinsheng. Latest development of low light level image sensor technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 527-534.
- [3] Aebi V W, James B J. Electron bombarded active pixel sensor: CA20002379956[P]. [2001-01-25].
- [4] 熊智鹏, 李琦, 王骥. 电子轰击型有源像素传感器在激光雷达的应用[J]. 激光与红外, 2012, 42(7): 725-730.
XIONG Zhipeng, LI Qi, WANG Qi. Application of electron bombardment active pixel sensor in lidar[J]. *Laser and Infrared*, 2012, 42(7): 725-730.
- [5] BAI J, BAI Y, HOU X, et al. The analysis of electron scattering among multiplying layer in EBAPS using optimized Monte Carlo method[J].

Modern Physics Letters B, 2020(1): 2050398. DOI: 10.1142/S0217984920503984.

- [6] Intevac Inc. Apache M611-02 Low Light Level Camera[EB/OL]. [2019-02-23]. <https://www.intevac.com/intevacphotonics/apache-camera/>.
- [7] INSINNA VALERI. Special Operators To Test Digital Night Vision Goggles[J/OL]. *National Defense*, 2013, 98(72): <https://law-journals-books.vlex.com/vid/special-operators-to-test-635938861>
- [8] 蔡志鹏. 用于双微带阴极选通型分幅相机的改进型第三代像增强器研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013.
CAI Zhipeng. Research on Improved Third Generation Image Intensifier for Dual Microstrip Cathode Gate Amplitude Divider Camera[D]. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2013.
- [9] 吴昊, 伍园. 数字微光夜视器件技术研究[J]. 光电子技术, 2022, 42(1): 72-78.
WU Hao, WU Yuan. Technology research of digital low light level night vision device[J]. *Optoelectronic Technology*, 2022, 42(1): 72-78.
- [10] 李晓峰, 杨文波, 王俊. 用光致荧光研究多碱阴极光电发射机理[J]. 光子学报, 2012, 41(12): 1435-1440.
LI Xiaofeng, YANG Wenbo, WANG Jun. Photoemission mechanism of multi-alkali photocathode by photoluminescence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1435-1440
- [11] 常本康. GaAs基光电阴极[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
CHANG Benkang. *Photocathode Base on GaAs*[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [12] Chrzanowski K. Review of night vision technology[J]. *Opto-electronics Review*, 2013, 21(2): 153-181. DOI: 10.2478/s11772-013-0089-3.
- [13] Jeff Andreson. Intevac announces LIV AR digital camera production orders[EB/OL]. [2013-02-08]. <https://www.intevac.com>.
- [14] Norton T, Joseph C, Woodgate B E, et al. High quantum efficiency photon-counting imaging detector development for UV(50-320 nm) astronomical observations[C]// *AAS Meeting*, 2011, 43: 21725419N.
- [15] Intevac Inc. Apache M611-05 low light level camera[EB/OL]. [2021-03-04]. <https://www.intevac.com/>.
- [16] 金伟其, 陶禹, 石峰, 等. 微光视频器件及其技术的进展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3167-3176.
JIN Weiqi, TAO Yu, SHI Feng, et al. Development of low-light video devices and their technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3167-3176.
- [17] Intevac Inc. NightVista@VISNIR Cameras[EB/OL]. [2021-03-04]. <https://www.intevac.com/intevacphotonics/military>.
- [18] Intevac Inc. Apache M506 low light level camera[EB/OL]. [2021-03-04]. <https://www.intevac.com/intevacphotonics/dnvg/>.
- [19] 刘亚宁. 基于低功耗小体积FPGA的EBAPS相机技术[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2019.
LIU Yaning. EBAPS camera technology based on low power and small size FPGA [D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences (National Center for Space Science, CAS), 2019.

[20] Intevac Photonics. Advances in electronic bombardment of active pixel sensors: E3010M digital image intensifier(DI2)[EB/OL]. [2022-07-04]. http://www.intevac.com/Intevac_photonics.

[21] Collins Aviation Corp. Collins new airborne digital night vision system[EB/OL]. [2020-06-23]. <https://www.collinsaerospace.com/what-we-do/industries/military-and-defense/displays-and-controls/simulation-and-training-helmet-mounted-displays>.

[22] Redman B C, Stann B L, Ruff W C, et al. Anti-ship missile tracking with a chirped amplitude modulation ladar[C]//*Laser Systems Technology II*, 2004: 5-7(DOI:10.1117/12.542598).

[23] Grasso R J, Odhner J E, Wikman J C, et al. A novel low-cost targeting system (LCTS) based upon a high-resolution 2D imaging laser radar[C]//*Proceedings of SPIE*, 2005, **47**: 190-194. DOI:10.1117/12.630525.

[24] Stann B, Redman B C, Lawler W, et al. Chirped amplitude modulation ladar for range and doppler measurements and 3-D imaging[C]//*Proceedings of SPIE*, 2007, **6550**: 655005-655005-12. DOI: 10.1117/12.719523.

[25] Photonis EBNocturn 2MPX[EB/OL][2012-04-23]. <https://www.directindustry-china.cn/prod/photonis/product-82199-2210683>.

[26] 朴雪. 电子轰击有源像素传感器电荷收集效率理论模拟研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
PU X. Theoretical Simulation of Charge Collection Efficiency of Active Pixel Sensor Under Electron Bombardment [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.

[27] 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): 1098-1100.
CHENG Hongchang, SHI Feng, LI Zhoukui, et al. A preliminary approach to the generation of low light level night vision devices[J]. *Applied Optics*, 2021, **42**(6): 1098-1100.

[28] 刘虎林, 王兴, 田进寿, 等. 高分辨紫外电子轰击互补金属氧化物半导体器件的实验研究[J]. *物理学报*, 2018, **67**(1): 175-180.
LIU Hulin, WANG Xing, TIAN Jinshou, et al. Experimental study on high resolution ultraviolet electron bombardment of complementary metal oxide semiconductor device [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(1): 175-180.

[29] YE Y, KUN H, LEI Y, et al. Study on effect of different temperatures on imaging performance of EBAPS devices[C]//*Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications*, 2020, DOI:10.1117/12.2587110.

[30] 李桐桐, 肖超, 焦岗成, 等. 电子敏感CMOS 部件除气方法[J]. *应用光学*, 2022, **43**(6): 1181-1186.
LI Tongtong, XIAO Chao, JIAO Gangcheng, et al. Degassing method for electron-sensitive CMOS components[J]. *Applied Optics*, 2022, **43**(6): 1181-1186.

[31] 刘璇, 李瑞强, 李力, 等. 基于三色LCTF的自然感彩色微光EBAPS成像系统[J]. *应用光学*, 2022, **43**(6): 1044-1053.
LIU Xuan, LI Ruiqiang, LI Li, et al. Natural color low-light EBAPS imaging system based on three-color LCTF[J]. *Applied Optics*, 2022, **43**(6): 1044-1053.

《红外技术》第八届编辑委员会名单

荣誉主编：褚君浩 姜会林 曾 毅 曾桂林

主 编：苏君红

执行主编：姚立斌

副 主 编：姬荣斌 李 凯 朱颖峰 陈 钱

蔡 毅 何 力 金伟其 郑云峰（常 务）

编 委（以姓氏笔画为序）

马文坡 王双保 王 霞 石 峰 卢 进 史衍丽 白廷柱 白 瑜

朱颖峰 刘逸平 麦绿波 苏君红 巫广华 李云红 李 凯 李晓峰

杨 宇 吴一冈 吴晗平 何 力 邹继鑫 汪岳峰 张长泉 张若岚

张建奇 陆 卫 陈 钱 陈效双 金伟其 郑云峰 郑 凯 赵勋杰

赵 俊 胡伟达 施加林 姚立斌 顾国华 凌福日 郭 杰 唐 剑

唐利斌 唐良瑞 姬荣斌 常本康 葛宝臻 蒋亚东 曾 宇 蔡 毅

熊 平