光电技术及应用

DOI:10.16818/j.issn1001－5868.20241008001

基于EBAPS的昼夜微光成像跟踪系统

张旭旭[1*],段文博[1],张夏疆[1],王 毅[1],李 琦[1],张卫国[1],闫 磊[2]

(1. 西安应用光学研究所,西安 710065; 2. 微光夜视技术重点实验室,西安 710065)

摘 要: 电子轰击型有源像素传感器(Electron Bombarded Active Pixel Sensor,EBAPS)作为一种数字化微光成像器件,以其成像系统具有小型化、低成本和低功耗的优势,以及在昼夜条件下连续拍摄时具备清晰成像的能力,成为微光成像领域的研究热点。文章基于国产某型EBAPS微光器件,利用FPGA作为核心处理器,完成了EBAPS器件驱动电路、图像处理和跟踪电路、显示电路的设计。同时,构建了满足昼夜复用的光学系统,搭建了一种小型化的手持成像跟踪系统。实验结果表明,该EBAPS昼夜成像系统可在1×10^{-4}~1×10^{4} lx照度条件下实现良好的成像和跟踪效果。

关键词: 数字微光器件; EBAPS; 昼夜; FPGA; 跟踪

中图分类号: TN223 **文章编号:** 1001－5868(2025)01－0106－07

Day and Night Low-light-level Imaging and Tracking System Based on EBAPS

ZHANG Xuxu[1], DUAN Wenbo[1], ZHANG Xiajiang[1], WANG Yi[1], LI Qi[1], ZHANG Weiguo[1], YAN Lei[2]

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, CHN; 2. Science and Technology on Low-Light-Level Night vision Laboratary, Xi'an 710065, CHN)

Abstract: As a digital low-light imaging device, the electron-bombarded active pixel sensor (EBAPS) has the ability to obtain a clear image under both day and night conditions. Compared with visible light and infrared imaging, its imaging system has the advantages of miniaturization, low cost, and low power consumption, making it a popular research topic in the field of imaging. Adopting a fully domestic EBAPS low-light device concept and FPGA as the main processor, an EBAPS device driving circuit, image processing and tracking circuit, and display circuit were completed. Using an optical system that satisfied the requirements of both day and night, a miniaturized handheld imaging and tracking system was built. The experimental results show that the EBAPS imaging system realizes clear imaging and good tracking effects under illuminance conditions ranging from 1×10^{-4} to 1×10^{4} lx.

Key words: digital low-light level device; electron bombarded active pixel sensor; day and night; FPGA; tracking system

0 引言

传统的昼夜成像系统采用可见光与近红外结合的方式,利用CCD或CMOS成像器件在近红外波段的响应特性,夜间采用补光的方式达到清晰成像的效果,在视频监控领域中应用广泛。其特点是功耗低、分辨率高、成本低,但由于探测距离较短,适用于民用市场,具有很高的性价比。

而红外昼夜成像系统在完全黑暗的环境下,依

收稿日期:2024－10－08.

基金项目:国防装备预研项目(YY222021J0XX-X).

* 通信作者:张旭旭

靠物体自身的红外辐射进行成像，利用HgCdTe或InGaAs等探测器响应物体的中波或长波波段辐射特性达到探测目的，其不受可见光缺失的影响，可根据不同物体辐射产生的温度差异，实现对环境和目标的清晰成像。依据探测器技术体系的不同，主要有致冷型和非致冷型两种。红外型昼夜成像系统特点是光学系统复杂、探测距离远、成本较高、分辨率相对较低，在天文、航空航天[1]、军事、安防、消防等领域均有广泛的应用。

近年来，低照度成像器件为昼夜成像系统提供了另外一种解决途径。其中，增强型电荷耦合器件（Intensified Charge Device，ICCD）为低照度成像的技术代表[2]，而该器件在尺寸、重量、调制函数等方面不具备显著优势；电子倍增电荷耦合器件（Electron Multiplying Intensified Charge Coupled Device，EMCCD）能在极低微弱光下成像[3]，但对致冷温度要求较高。相比上述典型低照度器件，电子轰击型有源像素传感器（Electron Bombarded Active Pixel Sensor，EBAPS）作为一种新型低照度成像器件[4]，融合了真空光电器件高增益、高灵敏度和宽动态范围的特点，同时发挥了CMOS器件自身高分辨率、低功耗、低成本、数字化能力强的优势，已成为目前新型器件研究和制备的热点。

国际学术界在EBAPS器件领域持续开展基础研究和技术攻关，通过材料体系优化与器件架构创新实现关键技术突破。以美国为代表的科研机构在第三代半导体异质结集成、低损伤电子注入界面构建等方向取得突破性进展，相关EBAPS产品，广泛应用于昼夜环境作战和复杂环境下的态势感知系统。

国内研究团队通过产学研协同创新实现关键技术自主可控。北方夜视科技研究院微光夜视技术实验室[5]、南京理工大学[6-7]等研究团队在EBAPS的研究和制备等方面取得了一定成果，基于国产APS晶圆成功研制出全国产化的EBAPS传感器，并向产品应用化方向推进。

本文以近年来某国产EBAPS探测器的研究成果为基础，设计开发相应的光机系统，结合轻量化的跟踪算法，研制基于EBAPS的小型化手持式昼夜微光成像跟踪系统，探索该类器件在小型化跟踪领域的应用。

1　EBAPS器件

EBAPS数字化微光器件是一种将减薄后的有源像素传感器互补金属氧化物半导体（Active Pixel Sensor Complementary Metal Oxide Semiconductor，APS CMOS）芯片与GaAs光阴极进行耦合的装置，它能通过光电子转换成高能电子的方式，在低照度下放大微弱光信号。

1.1　工作原理

EBAPS工作原理为：GaAs光阴极将输入的光子转换成光电子，在静电电压的加速作用下，光电子以一定能量轰击背减薄APS芯片外延层，形成电子轰击半导体增益产生大量的电子-空穴对，进而实现电子倍增，倍增电子通过扩散进入背减薄APS芯片中的收集阱且被收集，最终通过片上集成读出电路转换成数字图像信号输出，实现对低照度微弱光信号的采集和探测，其工作原理如图1所示。

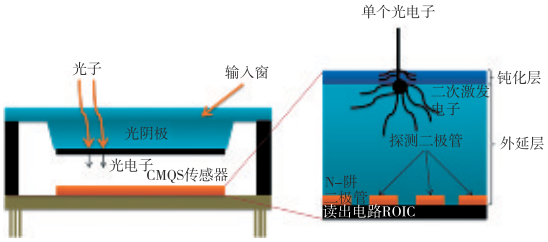

图1　EBAPS工作原理示意图

光阴极激发的光电子由高压加速轰击至电子敏感CMOS芯片，产生电子轰击增益，其增益系数G的计算公式为[8]：

$$G=\varepsilon(E_0-E_{\mathrm{Dead}})/W \tag{1}$$

式中，E_0为入射光电子能量，E_{Dead}为经过钝化层损耗的能量，ε为电荷收集效率，W为半导体内产生一个电子-空穴对所需要的能量（其中Si材料为3.6 eV，GaAs材料为4.4 eV[9]）。

均匀掺杂下EBAPS电荷收集效率模拟研究表明[10]：1）入射光电子透过钝化层的能量损失受入射光电子能量、钝化层厚度影响，而与入射光电子束直径无关；2）EBAPS的电荷收集效率随基底掺杂浓度和基底厚度的下降而提高，随入射光电子能量增加而提高。在入射光子能量大于钝化层损耗的情况下，EBAPS增益与入射电子的能量成正比，因此提高EBAPS的电子倍增电压，可使器件获得极高的信噪比，信噪比计算公式为：

$$SNR=\frac{\Phi\alpha_e t}{\sqrt{G_e^2+I_{\text{dark}}^2+N_{\text{read}}^2}} \tag{2}$$

式中，Φ为入射光通量，α_e为量子效率，t为积分时间，G_e为电子轰击增益噪声，I_{dark}为暗电流噪声，N_{read}为读出电路噪声。当电子轰击$SNR=1$时，认为可探测信号与噪声相同。因此，调整电子倍增电压，提高器件最小可探测有效信号的电子流密度，高增益下读出电路噪声降低到忽略不计，可显著提升器件的信噪比。实现极低照度下探测所需的电子倍增电压范围为0～1 kV。

1.2 器件总体设计

基于某国产APS CMOS传感器晶圆，借助全自主封装工艺，完成EBAPS传感器总体结构设计，如图2所示。参考已有圆形结构GaAs光阴极、陶瓷基座及其冷铟封等工艺成果，重点攻克一体化方形陶瓷基座设计及验证、方形GaAs光阴极激活、方形器件超高真空冷铟封及APS芯片电子清刷等关键技术，形成EBAPS传感器设计、工艺及试验等规范，研制出一体化结构、高稳定的EBAPS传感器。

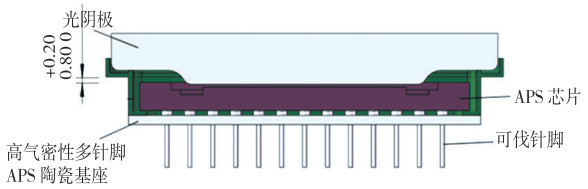

图2 EBAPS传感器结构示意图

2 EBAPS成像跟踪系统设计

某国产EBAPS传感器，其像素分辨率可达到1280(H)×1024(V)，像素时钟最高为50 MHz，采用卷帘曝光的方式，具有较高的动态范围，帧频可到达60Hz，支持MIPI或LVDS标准接口输出。EBAPS器件主要参数如表1所示。

表1 EBAPS器件主要参数

主要参数	指标
像素	1280×1024
像元尺寸/μm	9.6
输出帧频/Hz	≥60Hz@1280×1024
工作波段/μm	0.5～1.1
电源/V	5
功耗/W	≤2W@60Hz
存储温度/℃	−40～+60
重量/g	≤80
输出接口	MIPI/LVDS

实验基于该器件尺寸小、低照度成像性能良好的特点，开发出低功耗、结构微小紧凑型电路，研制了一种手持式全天候昼夜成像跟踪系统。系统由机械结构、光学系统、成像电路、核心算法等组成，其结构如图3所示。

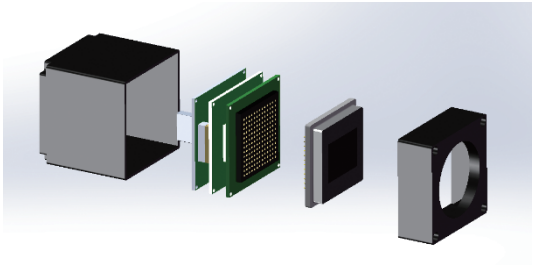

图3 成像系统总体结构

2.1 光学系统设计

光学系统工作在可见光波段，与探测器一同安装在结构件内，用于将目标反射的可见光转换为电信号，再经过电子学处理后以需要的视频格式输出，实现对目标的清晰成像。

根据光学系统视场要求(10°×8°)，结合像面尺寸，可计算光学系统的焦距、入瞳直径，计算式为：

$$f'=\frac{b}{2\tan(\omega/2)} \tag{3}$$

$$F^{\#}=f'/D_0 \tag{4}$$

式中，f'是系统焦距，单位为mm；b是探测器靶面宽度，单位为mm；ω是水平视场；$F^{\#}$是光学系统F数；D_0是光学系统入瞳直径，单位为mm。

设计的光学系统焦距为65.3 mm，按照约翰逊准则，对于1.7 m×0.5 m的行人，其识别距离可达到800 m。

2.2 硬件设计

2.2.1 系统供电

系统供电主要由两部分组成。一部分为FPGA主芯片供电，输入为+5 V电源，通过四路DC/DC电源芯片TLV62130RGT，配置不同的分压电阻后，可分别输出3.3 V，1.5 V，1.8 V，1.0 V四路电源，每路输出电流可高达3 A。此外，通过LDO SPX3819M5-3-3产生VCCIO电源，主要用于为JFMQL20S的BANK35供电，也可根据需要更换其他LDO芯片，以适应不同电压标准。1.5 V电源通过SY8113开关电源芯片生成DDR3所需的VTT和VREF电压。另外一部分给EBAPS供电，主要提供器件工作所需的3.3 V和1.8 V电压，以及驱

动EBAPS光阴极的高压电源。

根据外部环境照度不同，EBAPS器件在低照度模式下所需增益不同，其光阴极工作电压范围在负几十伏到千伏之间。实验通过控制初级绕组对振荡电路电压进行调控，利用具有可外控调节输出功能的DC-DC转换芯片为初级绕组供电，再经过固定变比的变压器将电压转换为一个峰峰值可调的交流信号，最终通过固定倍数的倍压电路，实现从－200 V到－1600 V可调的稳定电场，流程如图4所示。该调控技术，解决了EBAPS器件光阴极工作电压宽范围调控及光阴极高电压稳定输出问题。



图4　光阴极工作电压调节流程图

2.2.2　驱动模块

EBAPS驱动板主要为EBAPS探测器提供正常工作所需供电电压、偏置电压、参考电压、像素时钟、像素高低电平电压等，以及系统复位电路、I2C配置总线接口、MIPI输出接口电路等。

采用直流耦合技术降低驱动电路系统噪声，并严格按照阻抗匹配设计，以降低MIPI接口实时高速传输误码率。

2.2.3　数据处理模块

数据处理电路作为整个系统的核心，采用FPGA＋ARM的处理架构，主要电路部分包括具备ARM核的国产复旦微电子JFMQL20S处理器电路、DDR3存储电路、FLASH电路、MIPI接口电路、电源转换电路以及滤波电路等。其中，JFMQL20S400芯片的PS系统集成了4个ARM Cortex™-A7处理器、AMBA®互连、内部存储器、外部存储器接口和外设。这些外设主要包括USB总线接口、以太网接口、SD/SDIO接口、I2C总线接口、CAN总线接口、UART接口及GPIO等。PS可以独立运行并在上电或复位下启动。

数据处理模块主要是FPGA对EBAPS图像传感器接收到的MIPI接口图像信息进行处理，利用存储器进行缓存，最终将数据转化成合适的视频格式，再采用图像跟踪算法，完成目标的检测、跟踪和字符叠加，最终将图像按照HDMI接口标准输出。

3　算法实现

3.1　驱动时序设计

驱动时序如图5所示，主要包括：1）通过I2C总线完成EBAPS的寄存器配置和时序控制；2）对EBAPS图像传感器输出的MIPI图像进行解析和缓存；3）利用内部存储器进行乒乓缓存，完成数据的跨时钟域匹配，调整图像输出频率为需要的帧频；4）根据照度自适应控制算法，计算图像的感光区间，调节EBAPS的偏置电压和积分时间；5）调整图像格式，按照HDMI接口标准输出图像。

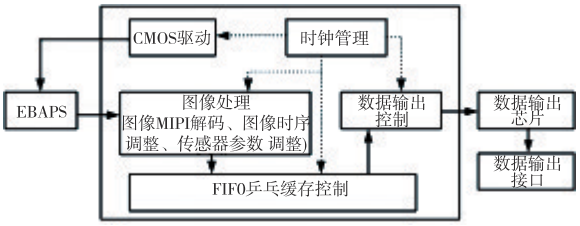

图5　系统驱动时序

3.2　照度自适应控制算法设计

EBAPS器件需要在1×10^{-4}～1×10^{4} lx宽动态范围内正常工作，在照度较低的环境下，EBAPS输出图像要足够清晰；在照度较高的环境下，EBAPS输出图像不能过曝。因此，需要对EBAPS在各个照度条件下进行自适应动态调节，从而保证当环境照度发生变化时图像质量能够保持平稳。

保证图像稳定即保证在环境照度发生变化时，图像的平均灰度值不出现大范围的变化。决定EBAPS器件输出图像灰度值的因素主要有：光阴极偏置电压和CMOS曝光时间[8]。光阴极偏置电压越大，EBAPS输出的图像灰度值越大；CMOS曝光时间越长，EBAPS输出的图像灰度值越大。因此，照度自适应控制技术主要通过对EBAPS偏置电压和EBAPS曝光时间进行自适应调节，实现当照度发生变化时图像灰度值保持平稳。

基于图像均值分布和直方图分布的原理，提出了一种照度自适应的算法，该算法对EBAPS的偏置电压和积分时间进行调节。将器件的感光范围（1×10^{-4}～1×10^{4} lx）划分为若干个区间，通过计算当前采集图像的均值和直方图，调节器件至合适的感光区间。具体算法为：计算成像区域连续3帧图像的最大值P_{max}、最小值P_{min}、均值P_{mean}以及直方图分布；对于一幅像素数为n，灰度范围为$[0, L-1]$的图像，令r表示第k个灰度级，n_k表示图像中r出现

的像素个数，则r的直方图$P(r)$为：

$$P(r)=n_k/n\ k=0,1\cdots L-1 \tag{5}$$

计算每帧图像最大值P_{max}与均值P_{mean}的差值E_H、均值P_{mean}与最小值P_{min}的差值E_L，标记直方图分布$P(r)$峰值所在的灰度值r。

当连续3帧图像的$E_H>T_H$，$E_L>T_L$（T_H和T_L为经验值），可判定当前图像的感光区间分布跨度大，偏置电压和积分时间设置合理。当前输出图像所判定的感光区间合理，可直接输出目标图像。

当连续3帧图像的$E_H<T_H$，$E_L<T_L$，则判定当前图像的高低像素灰度分布差异不大，灰度集中在均值附近，此时需要做进一步的判断：1）当直方图$P(r)$的峰值所在位置的灰度值r为灰度范围的5%以下，则认为EBAPS当前所在的感光区间高饱和，需要进一步提高感光区间，同时调整EBAPS的积分时间和偏置电压，重复上述步骤继续进行判断，直至到达合理的感光区间；2）当直方图$P(r)$峰值所在位置的灰度值r为灰度范围95%以上，则认为EBAPS当前所在的感光区间低饱和，需要进一步提高感光区间，重复上述步骤继续进行判断，直至到达合理的感光区间。

基于上述算法，可实现图像区间的合理检测，以及输出图像的稳定过度，避免出现闪烁现象。

3.2 ARM和FPGA协同的跟踪算法加速设计

考虑到实验使用的硬件平台性能，采用“跟踪-检测-学习”框架，适用于视频中未知物体长期跟踪任务。算法由三部分组成：跟踪模块、检测模块、学习模块，如图6所示。跟踪模块实现相邻帧的短时目标跟踪；检测模块是在全图中检测疑似目标；学习模块则根据跟踪模块和检测模块的结果进行学习，生成训练样本来对跟踪模块的正负样本和检测模块的目标概率模型进行更新，以避免后面出现类似错误。

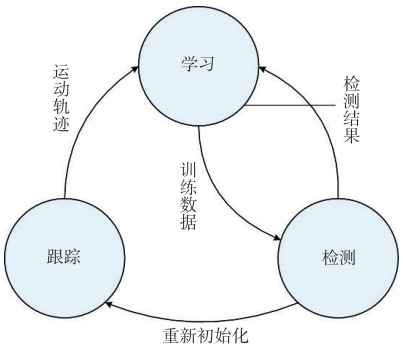

图6 基于“跟踪-检测-学习”的跟踪算法

国产JFMQL20S处理器实时数据采集和处理采用PL端的FPGA逻辑来实现，而跟踪算法以Linux运行环境为基础，对关键运算单元采用FPGA逻辑加速的方式，以及ARM和FPGA协同，实现对60Hz帧频图像的实时跟踪。

此处，卷积运算作为图像跟踪处理的基本单元，其运算效率影响算法的运行速度。基于RTL逻辑对该模块进行加速，在PL端采用Pipeline流水线方式，在缓存两行的基础上，第三行图像数据到达时开始计算，保证卷积运算的延迟达到像素级，而在PS端优化算法流程，从而提高了跟踪算法的整体效率。卷积运算仿真结果如图7所示。

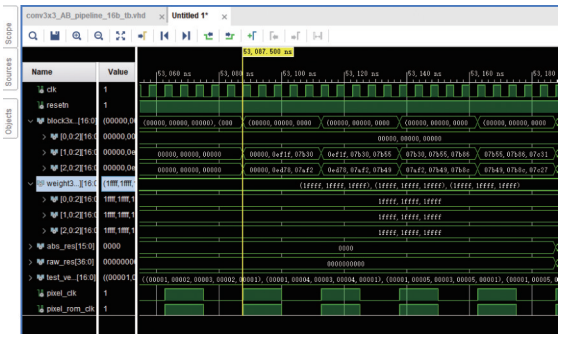

图7 卷积运算仿真结果

4 测试与分析

基于上述设计方案，完成了EBAPS昼夜微光成像系统硬件电路的搭建，开发了相应的软件和算法程序，并搭配变焦镜头对系统成像性能进行充分测试。系统样机实物如图8所示。

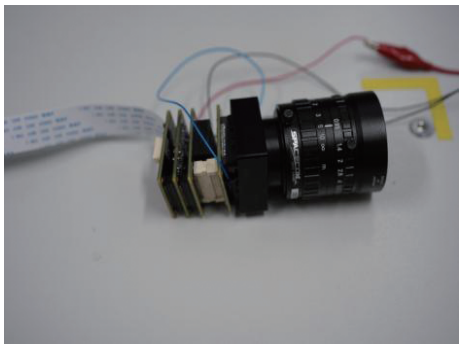

图8 系统样机实物图

为测试系统在微弱光条件下的成像效果，将系统置于暗室环境，调节暗室照度至1×10^{-4} lx附近，采用微弱光照度计实测环境照度为1.026×10^{-4} lx，系统对准靶标进行成像，采集的成像效果图如图9所示。可以看到，在该照度条件下，图像仍能显示

条纹靶标的基本轮廓，存在明暗对比度。

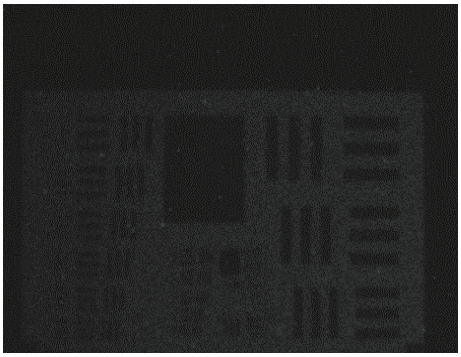

图9　1.026×10^{-4} lx照度下暗室成像效果

为验证系统在白天光强明显条件下的成像效果，将其置于室外，选择正午太阳直射环境，采用标准照度计测得实际照度为8.104×10^{4} lx，系统能够对环境景物等清晰成像，成像距离达到50 m以上，如图10所示。

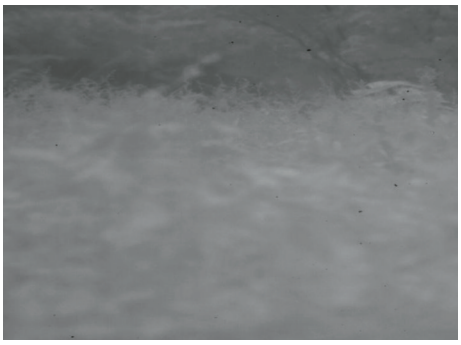

图10　8.104×10^{4} lx照度下室外成像效果

在50 m成像距离条件下，采用某型低照度可见光CMOS相机进行成像性能对比，该相机焦距为60mm，分辨率为1920×1080，试验时的环境照度为7.822×10^{4} lx，采集的环境景物图如图11所示。



图11　7.822×10^{4} lx照度下室外成像效果

EBAPS在白天的成像效果与低照度CMOS相机相比，清晰度和细节略差，主要原因是其在白天GaAs光阴极对400～900 nm光谱波长的信号进行了吸收。后期，课题将通过改进图像增强算法，提升系统的对比度和锐度。

此外，手持系统在夜间低照度条件下验证跟踪算法，如图12所示。对于5 km外空中经过的大型民航飞机，天空背景为多云天气，实测环境照度为6.701×10^{-2} lx，系统在测试人员手持的情况下，持续跟踪1分钟直至飞机消失，算法可对目标进行稳定跟踪，达到凝视跟踪的目的。



图12　1分钟内多帧图像的跟踪效果

综合上述实验表明，所设计的EBAPS成像系统，达到了昼夜成像和跟踪目标的要求。

5　结论

以某型EBAPS数字化微光探测器为基础，设计了一种昼夜微光成像跟踪系统。针对昼夜成像需求，设计了相应的光学系统，基于低功耗和紧凑型的理念，采用国产FPGA方案搭建了软硬件平台，重点解决了低照度下的照度自适应控制，并利用低照度图像实现了目标跟踪测试。实验结果表明，该系统整机功耗为3 W，可在1×10^{-4}～1×10^{4} lx照度条件下清晰成像，实现昼夜成像的设计目标。该昼夜成像系统，可作为EBAPS器件在手持式成像跟踪设备中的有效探索，对于类似昼夜成像系统的研制具有借鉴意义。

参考文献：

[1] 司俊杰，曾伟明，孔　渊，等. 新一代飞行头盔夜视用传感器分析[J]. 半导体光电，2023，44(6)：817-826.
Si Junjie，Zeng Weiming，Kong Yuan，et al. Analysis of Night Vision Sensors Integrated in New Generation of Flight Helmet [J]. Semiconductor Optoelectronics，2023，44(6)：817-826.

[2] 吴　昊，伍　园，伍　伟，等. 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，Wu Wei，et al. Study on the Digital Low-light Level Night Vision Device [J]. Optoelectronic Technology，2022，42(1)：72-78.

[3] 汪朝敏，尹 俊，江海波，等．大动态高灵敏1024×1024 EMCCD研制[J]．半导体光电，2023，44(2)：172-174.
Wang Chaomin，Yin Jun，Jiang Haibo，et al. Development of Large Dynamic and High Sensitivity 1024×1024 EMCCD[J]. Semiconductor Optoelectronics，2023，44(2)：172-174.

[4] 严毅赟，钱芸生，张景智，等．电子轰击有源像素传感器光谱响应测试系统设计[J]．激光与光电子学进展，2022，59(23)：123-128.
Yan Yiyun，Qian Yunsheng，Zhang Jingzhi，et al. Design of EBAPS spectral response measurement system[J]. Advances in Laser and Optoelectronics，2022，59(23)：123-128.

[5] 韩 剑，焦岗成，闫 磊，等．数字微光器件研究进展[J]．应用光学，2023，44(4)：874-886.
Han Jian，Jiao Gangcheng，Yan Lei，et al. Research progress of digital low-light-level devices [J]. Journal of Applied Optics，2023，44(4)：874-886.

[6] 杨婧薇，钱芸生，柳 磊，等．基于EBAPS的全国产成像电路研制[J]．应用光学，2023，44(3)：668-676.
Yang Jingwei，Qian Yunsheng，Liu Lei，et al. Development of domestic imaging circuit based on EBAPS [J]. Journal of Applied Optics，2023，44(3)：668-676.

[7] 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 EBAPS camera technology[J]. Infrared Technology，2019，41(9)：810-818.

[8] Barbier R，Cajgfinger T，Calabria P，et al. A single-photon sensitive ebCMOS camera：The LUSIPHER prototype[J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research A，2011，648(1)：266-274.

[9] 籍宇豪．基于可变高压下的宽动态范围EBAPS成像技术研究[D]．南京：南京理工大学，2021.
Ji Yuhao. Research on wide dynamic range EBAPS imaging technology under variable high pressure[D]. Nanjing：Nanjing University of Science and Technology，2021.

[10] 罗 元，肖 航，欧俊雄．基于深度学习的目标跟踪技术的研究综述[J]．半导体光电，2020，41(6)：757-767.
Luo Yuan，Xiao Hang，Ou Junxiong. Research on Target Tracking Technology Based on Deep Learning [J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(6)：757-767.

作者简介：

张旭旭(1985—)，男，甘肃省西和县人，博士，高级工程师，主要研究方向为光电系统总体设计。