动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023082901

新一代飞行头盔夜视用传感器分析

司俊杰*，曾伟明，孔　渊，庄迁政，宋文明

（中国航空无线电电子研究所 航空电子系统综合技术重点实验室，上海 200233）

摘　要： 合适的夜视传感器对于飞行头盔的设计至关重要，是确保飞机驾驶员完成任务的关键。飞行头盔的工作特点也决定了集成其上的夜视传感器必须具备高灵敏、紧凑轻便等特性。在分析飞行头盔用夜视传感器的工作环境、目标特性基础上，参照已集成应用于飞行头盔的夜视传感器实例，解析了两种适用夜视传感应用的“电子轰击混合型像增强器”和”InGaAs 焦平面型探测器”的技术指标。给出了适合飞行头盔用夜视传感器的主要技术指标要求，并提出对国产现有夜视用传感器加以改进，使之更适合飞行头盔夜视应用的技术方向。

关键词： 夜视；传感器；飞行头盔

中图分类号： TN216；V241.6　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0817－10

Analysis of Night Vision Sensors Integrated in New Generation of Flight Helmet

SI Junjie, ZENG Weiming, KONG Yuan, ZHUANG Qianzheng, SONG Wenming

(Key Laboratory of Avionics System Integration Technology, China National Aeronautical Radio Electronic Research Institute, Shanghai 200233, CHN)

Abstract: Choosing a suitable night vision sensor is key to ensure a good design of flight helmet and to ensure a flight task completion for pilots. The operating characteristics of flight helmets also require that the night vision sensors integrated into them be highly sensitive, compact and lightweight. On the basis of analyzing the working environments and target characteristics of night vision sensors for flight helmets, and with reference to the examples of night vision sensors that have been integrated and applied to flight helmets, the technical specifications of two kinds of "electron bombardment hybrid image enhancers" and "InGaAs focal-plane detectors" were analyzed that were suitable for night vision sensing applications. The main technical requirements was given for night vision sensors suitable for flight helmets, and the technical direction of improving the existing domestic night vision sensors was put forward to make them more suitable for night vision applications in flight helmets.

Key words: night vision; sensor; flight helmet

0　引言

随着飞机飞行速度由初始约 200 km/h 提升到现在的 2.2 马赫数以上、飞行高度由初始约 2 km 提升到升限近 20 km[1]，飞行头盔已成为飞行员特别是军机飞行员的必需装备。先进的飞行头盔与集成了多通道、多种类传感器的机载光电系统相连接，提供飞行员全方位的态势感知。如美军的联合攻击战斗机 JSF F-35，配备了光电分布孔径系统（EODAS）和光电瞄准系统（EOTS）[2]，通过环绕机身排布的 7 个百万像素中波红外成像探测器，实现了前视红外（FLIR）、红外搜索瞄准（IRST）、导弹探测（MWS）和跟踪等功能的综合集成。这些信息经综合处理后，附加飞机飞行状态、战场环境状态、武器

收稿日期：2023－08－29.

*通信作者：司俊杰　E-mail：si_junjie@126.com

系统状态等展示在飞行头盔的近眼显示器上，使飞行员如处于透明驾驶座舱一样，能更加及时、全面地掌握战场态势。最新型的飞行头盔，除上述信息展示和保证通信、飞行员呼吸、弹射逃生功能外，还能够实现飞行员生理检测、视觉操控武器系统目标瞄准和语音控制武器发射的功能，极大提升了飞行员操控飞机的效率，增强了战机空战能力[3]。

提升飞行员夜航飞行时的环境感知能力也是新一代飞行头盔所追求的目标。通常机组夜间编队（执行防御/进攻空中对抗任务）时，成员是在关闭灯光的夜间模式下飞行，间或采用外部肉眼看不到的夜视照明。特别是靠近地形飞行时，保持正常的夜视能力尤为重要。良好的夜视能力可保证对来自激光吊舱的目标指示信号的捕获观察、临时机场夜间起降、加油补给等任务的执行。这种夜视能力要求飞行员通过驾驶舱窗口，在微光照明时清晰分辨视野内目标。

在现有 EODAS 不能提供 4π 全球面范围内的微光夜视影像情况下，新一代飞行头盔通常集成有可见光成像仪和微光夜视仪，可见光图像和夜视图像均采用头盔显示方式呈现。微光照明工作时，飞行员不再使用原头盔上方附带的较重且体积较大的夜视镜，这显著减小了飞行员承担长时间、复杂飞行作战任务的负担。图 1 给出美 F-35 和英 Striker Ⅱ 战机飞行头盔上安装的相应夜视光电传感器[4-5]。



(a) F-35 (b) Striker Ⅱ

图 1 美 F-35 头盔和英台风战斗机头盔

随着传感器技术的发展，飞行头盔可选配的夜视传感器在大小、重量、功耗、分辨率、响应波段等指标方面得到持续优化改进，推动飞行头盔向更强功能、更高人机工效方面发展。

用于夜视的光电传感器可分为微光像增强器、红外焦平面探测器两大类。两者工作原理不同，因而具有不同的响应波长范围、器件结构和成像特征。微光像增强器通常采用光敏感材料将光信号转换为电信号，再在高偏压下将电信号进行倍增放大。器件探测的是夜晚目标反射的来自月光、星光以及天空的微弱光辐射，这些辐射集中于可见光至近红外波段（0.4～0.9 μm）；红外焦平面探测器有基于热探测和基于光子探测两种类型，热探测通常利用的是光敏感材料在光照时的电阻变化，光子探测通常利用的是光敏半导体二极管在光照时的光生电流变化，它们响应的是目标自身的红外辐射。这些辐射依目标特性分布在相应的大气传输窗口，可以是短波红外（1～3 μm）、中波红外（3～5 μm）或长波红外（8～14 μm）波段。在成像特征上，微光像增强器给出的图像相对较清晰，而红外焦平面探测器给出的像具有透烟雾等防伪装特征。本文关注飞行头盔上集成的夜视用光电传感器，对可能采用的微光探测器和红外焦平面探测器加以分析讨论。

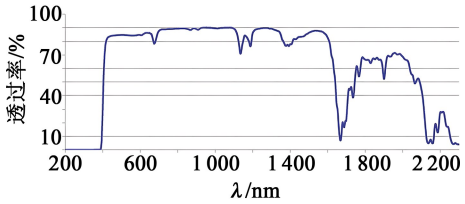
1 飞行头盔夜视用传感器解析

1.1 传感器响应波段分析

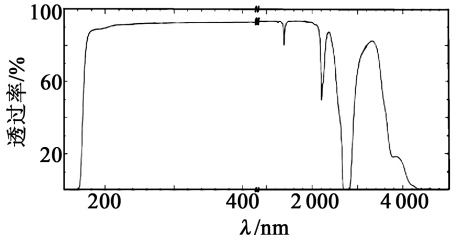
由于头盔上传感器的探测目标是飞机座舱外的景物，传感器的响应波段取决于传感器接收的来自目标的光谱信息。要确保飞行员清晰准确地观察到驾驶舱外目标景象，就要选取工作于机舱舱盖透明波段的光电传感器。

典型现代军机的飞机座舱舱盖是位于座舱上方的一个整体薄壁结构，它既最大限度地减少飞机飞行时的空气动力阻力，又为机组乘员提供一个合适、且尽可能利于乘员对外观察的工作环境。舱盖材料通常由聚碳酸酯（PC）材料构成，也有的其上覆盖一层硅酸盐玻璃[6]。基于雷达探测隐身要求，顶部通常敷布具有雷达波吸收作用且对可见光透明的导电膜氧化铟锡（ITO），它既可以防止驾驶舱中电子设备自身的电磁泄漏，又可以防止来自自身干扰机和其他电子战设备的电磁干扰。镀制有 ITO 薄膜的座舱舱盖呈金色[7]。为防止起雾影响飞行员能见度，舱盖上通常还涂敷有疏水涂层，以消除水分、油和液体涂料的可能影响。

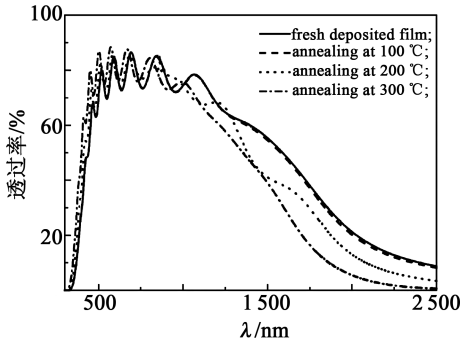
典型聚碳酸酯（PC）、硅酸盐玻璃和 ITO 薄膜在可见光和红外波段的透过率谱见图 2[8-10]。可以看出，硅酸盐玻璃从可见光（0.4～0.8 μm）到中波红外波段（3～5 μm）范围均透明，而聚碳酸酯和 ITO 膜的透光范围则从可见光到短波红外波段（0.78～2.5 μm），相对要窄。所以，飞行头盔应选配具有可见光和短波红外波段响应的光电传感器。



（a）聚碳酸酯



（b）硅酸盐玻璃



（c）透明导电膜氧化铟锡

图 2　聚碳酸酯、硅酸盐玻璃和透明导电膜氧化铟锡的光谱透过率曲线

1.2　夜视适用传感器——可见光波段

夜视中被观测目标呈现的是对月光及天空辉光的反射，传感器的探测效果同月光或辉光照明、目标的反射特性、反射光路径传输效果以及传感器的响应特性紧密相关。图 3 给出不同月光照明情况下，45°仰角观测时的光谱辐射通量[11]，可见，来自月光和天空辉光的微光辐射在短波红外波段比较集中，而可见光波段的微光辐射则和有无月光关系密切。

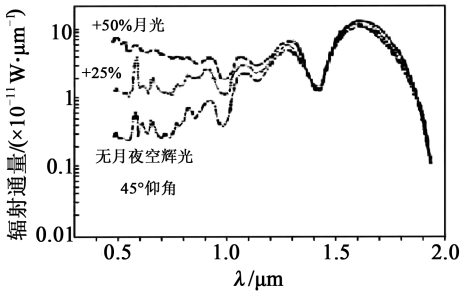
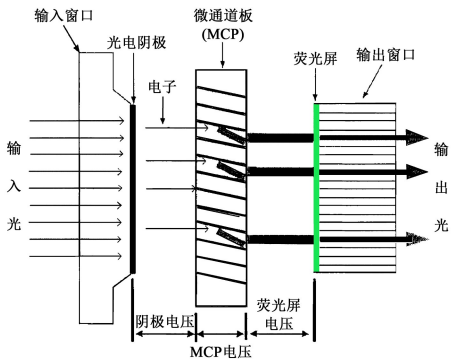


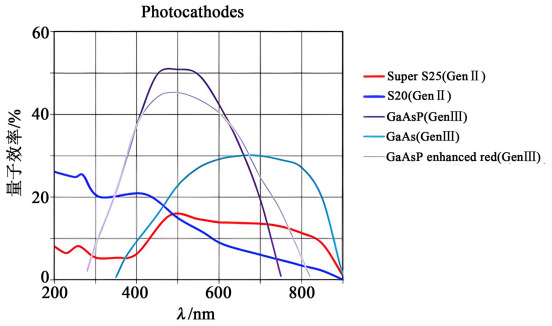
图 3　月光及无月夜空辉光光谱

可见光波段成像探测器通常为 Si 基 CCD 或 CMOS 探测器，Si 自身禁带宽度决定了其响应波段涵盖可见光和直至 1.1 μm 的近红外波段。当用其进行微光夜视探测时，由于不具有光生载流子倍增效应，探测灵敏度相对较低。具有载流子倍增效应的 Si 雪崩二极管（APD）阵列对于夜视应用更为适合，但现阶段在阵列规模、倍增率、背景噪声抑制方面，Si-APD 阵列的技术成熟度相对于微光夜视应用还需进一步提高。所以，夜视适用传感器还集中于采用像增强器。

用于夜视的像增强器自 20 世纪 30 年代提出以来，在应用需求及技术进步推动下，以光电阴极、电子倍增器件为主要标志进行区分，综合来看可分为Ⅰ代、Ⅱ代、Ⅲ代像增强器三个发展阶段。图 4 给出了像增强器的基本结构、工作原理示意图及器件的光谱响应曲线[12-13]。像增强器主要由光阴极、电子倍增部件（如微通道板）和荧光屏等组成。多碱光阴极将微弱光学图像转化为微弱的电子图像，电子倍增部件将微弱电子图像增强放大，荧光屏通过高速电子轰击将增强的电子图像转化为光学图像输出。典型的技术改进体现在：Ⅲ代像增强器以负电子亲和势 GaAs 光电阴极取代多碱阴极、微通道板（MCP）增加离子阻挡膜和双冷铟封近贴管型为特征，并增加了自动选通功能；另一种实现相似器件性能的技术路线是，采用改善多碱阴极灵敏度、拓宽近红外响应为特征，可以使器件在品质因子（FOM）上的表现同前述技术改进结果相当。迄今，高端夜视应用的像增强器均为Ⅲ代像增强器。更新型的器件开发体现在采用 InGaAs 负电子亲和势材料为阴极，进一步扩展近红外响应至 1.1 μm；同时，存在多种技术路线开发具有数字信号输出、彩色图像显示等特点的新型像增强器[14]。例如，将像增强器与 Si CMOS 或 Si CCD 集成，形成 Si 像增强型器件，如 Si I^2CCD，可以使器件微光成像性能更好、系统应用更为便捷。



（a）像增强器的基本结构及工作原理示意图



(b) 光谱响应曲线

图 4 像增强器的基本结构、工作原理示意图及器件的光谱响应曲线

表征像增强器的主要技术指标有[15]：(1)信噪比(SNR)，为器件输出信号量与静态干扰量，即“噪声”的比值，它是表征器件观测性能的最佳预测指标。采用高信噪比器件，可以得到更清晰的图像。(2)分辨率，用以表征器件可以显示的图像细节，通常以每毫米可分辨线对数(lp/mm)表示。(3)品质因子(FOM)，为像增强器的分辨率与 SNR 的乘积，用以综合描述器件水平。(4)等效背景照明(EBI)，为器件在无外部光照情况下，所测得的背景照明光通量(lm/cm^2)。它表征了器件的灵敏阈，通常随像增强器工作温度而变化，工作温度越高，背景照明越亮。(5)光晕(halo)，为视场中有明亮光源时，成像时在光源周围出现的光环。(6)亮度增益，为屏幕输出亮度与器件的光电阴极输入亮度之比。(7)光阴极灵敏度，也称白光灵敏度，为光阴极输出电流与输入光通量之比(μA/lm 或 mA/W)。表 1 给出典型的Ⅲ代像增强器指标及美军标的指标要求[14,16]。

表 1 现行Ⅲ代像增强器典型指标及美军标要求

厂商	Photonis(法)		L3Harris(美)		美军标	单位
型号	XR5	4G	M18H	M22H	要求	
FOM	1 770	2 200	1 800	2 200	1 600+	
SNR	26	30	22.2～25.0	27.8～30.5	25+	
分辨率	68	72	64	64	64+	lp/mm
光阴极灵敏度	—	—	1 800	2 200	2 000+	μA/lm
EBI	0.15	0.15				μlx
亮度增益	10 000～18 000	10 000～20 000	50 000～80 000/π	50 000～80 000/π	25 000～110 000/π	
HALO	0.8	0.7	<1.0	<0.85	<1.0	mm

图 4(b)给出了像增强器的光谱响应曲线，不同颜色曲线对应器件采用不同的光电阴极材料，包括Ⅱ代、Ⅲ代(两种技术路线)像增强器。可以看出Ⅱ代像增强器的光响应集中于可见光范围，而Ⅲ代像增强器则相对光响应效率更高。新型开发的像增强器的响应光谱后截止波长则进一步后延至 1.1 μm 以后。

1.3 夜视适用传感器——短波红外波段

在短波红外波段具有高探测效率的成像探测器有 InGaAs，InSb，HgCdTe，PbS 焦平面等，其中，以 InGaAs 焦平面探测器性能最为突出。

Ⅲ代像增强器已采用外延 InGaAs 来延长器件在近红外波段的光谱响应，随着Ⅲ-Ⅴ族半导体材料和器件技术的进步，全固体混成式 InGaAs 焦平面探测器取得开发和应用。如以色列 SCD 公司推出像元间距为 10 μm、阵列规模为 1 280×1 024 的 Cardinal 1280 HD 型 InGaAs 探测器。我国近年来在该型器件的研发制备方面也取得较大进展[17]。

InGaAs 焦平面探测器是在 GaAs 或 InP 衬底上外延 InGaAs 晶体薄膜，通过生长过程的掺杂控制，直接生长二极管结构；采用微电子加工技术得到二维 InGaAs 光敏元阵列。同时，采用 Si 超大规模集成电路技术设计加工同样单元尺寸、同样阵列规模的 Si 读出电路阵列芯片；分别在两个阵列芯片的单元上制备金属 In 柱，用倒装焊方法将两 In 柱互连在一起；再对衬底减薄抛光后进行器件封装。图 5 给出 InGaAs 探测器的光敏芯片结构。

典型的先进 InGaAs 焦平面探测器产品指标可以达到：工作波段 0.5～1.7 μm，覆盖可见和短波红外波段；像元间距 12.5 μm，阵列规模 1 280×1 024，盲元率小于 0.5%，平均探测率 2.8×10^{13} cm·$Hz^{1/2}\cdot W^{-1}$，动态范围 1 850∶1，量子效率大于 80%@1.55 μm[18]。

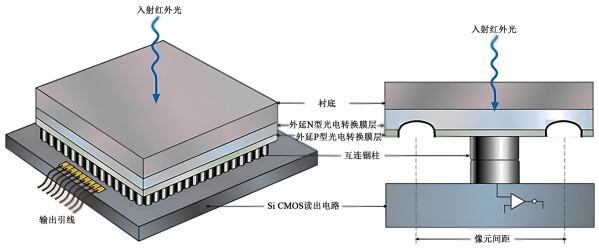


图 5 InGaAs 探测器的光敏芯片结构

图 6 给出 InGaAs 焦平面探测器的相对光谱响应曲线[19]。采用 InP 衬底晶格匹配生长的 InGaAs 探测器，响应截止波长为 1.7 μm。图中不同颜色曲线对应不同 In 含量的 InGaAs 探测器，扩展型 InGaAs 探测器截止波长可达 2.7 μm。为对比起见，图中也给出了 Si 可见光探测器的光谱响应曲线。参照图 5 可知，InGaAs 焦平面探测器的响应波

段可以完全覆盖月光及夜晚辉光发出的短波红外光谱范围。

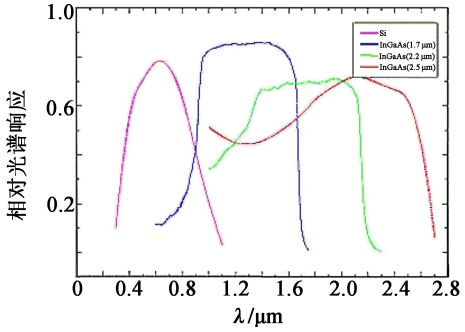


图 6　不同 In 含量的 InGaAs 探测器的相对光谱响应曲线

图 7 给出了 InGaAs 探测器与Ⅲ代像增强器、Si 像增强型 CCD 器件的量子效率对比[20]。可以看出，InGaAs 探测器的探测效率远高于Ⅲ代像增强器，缺点是通常型器件响应未延伸进入可见光波段。要实现对月光和大气辉光照明下的高效夜视探测，参照图 5，在短波红外波段应选用截止波长达 2.0 μm 的 InGaAs 探测器，并且器件的前截止波长应扩展至 0.4 μm，以覆盖可见光光谱范围。

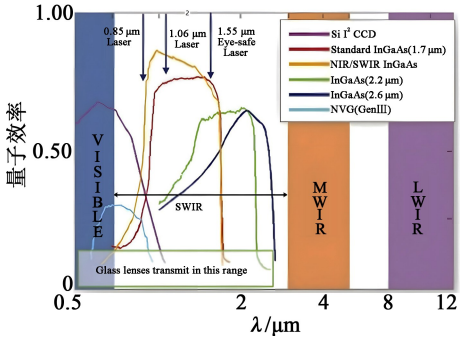


图 7　像增强器与 InGaAs 焦平面探测器量子效率对比

2　国外飞行头盔用夜视传感器

以下对三款国外飞行头盔用夜视装备所用的光电传感器进行分析。

一是 M949 航空夜视护目镜（ANVG）。2017 年美国 L3 Insight Technology 公司宣布其研制的 M949 ANVG 获得美国联邦航空管理局第一份技术标准令 FAA-TSO-164A 授权，该授权规范了 ANVG 的质量和安全要求。

M949 是一款头盔式双目夜视镜，美军装备代号 AN/AVS-9[21]。它可以在夜间和恶劣天气条件下为飞行员提供飞机外部图像增强视图。配备 AN/AVS-9 夜视镜的飞机包括 H-60 直升机、KC-135 和 KC-10 加油机、C-17 和 C-130 运输机等。

M949 采用 L3Harris 公司Ⅲ代像增强器“10160 飞行员像增强器”，具有大的 25 mm 目镜、40°视场，以及符合人体工程学设计，其性能指标如表 2[22]。

表 2　M949 ANVG 配装的第三代像增强器指标

参数	M20H	M22H	M24H	单位
FOM	2 000	2 200	2 400	
SNR	31	34	37	
分辨率	64	64	64	lp/mm
光阴极灵敏度	100	120	120	μA/lm
亮度增益	80 000/π	80 000/π	80 000/π	
HALO	＜0.7	＜1.0	＜1.0	mm
EBI	0.25	0.25	0.25	μlx
光谱响应范围	0.4～1.0	0.4～1.0	0.4～1.0	μm

二是“打击者Ⅱ”（Striker Ⅱ）头盔显示系统（HMDS），它由英国 BAE 系统公司于 2014 年首次推出，在前期“打击者”飞行头盔基础上，开发出的一个全数字化头盔显示系统[23]。该头盔内部安置了微型数字式夜视相机，具备全天候作战能力。该型飞行头盔装备了欧洲台风（Eurofighter Typhoon）战斗机和鹰狮舰队（JAS 39 Gripen）战斗机。

“打击者Ⅱ”HMDS 集成了一个中央安装的由美国 Intevac 公司生产的 ISIE 传感器，该传感器基于一种被称为“电子轰击有源像素传感器”（EBAPS）专利技术[24]。采用该数字化传感器，可使“打击者Ⅱ”HMDS 的微光夜视能力不低于美军现役最先进夜视镜（NVG）的性能水平。

图 8 给出了 EBAPS 传感器的工作原理及实物照片[25]。它采用 GaAs 或 InGaAs Ⅲ-Ⅴ族半导体为光电阴极，光入射至光电阴极①激发出光电子②，光电子经高压加速，以电子轰击形式直接注入 CMOS 阳极③中，经 CMOS 处理电路对收集的电子放大、读出，得到数字化视频输出。为提高光电子收集效率，CMOS 芯片背面进行了减薄处理。EBAPS 传感器相对传统图像增强器组件，简化了器件组件结构，以紧凑、轻量、低功耗、低成本为特点，具有高质量的夜视能力。

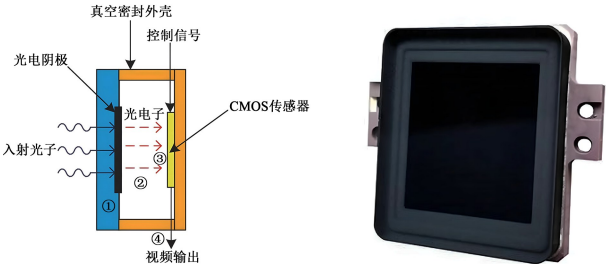


图 8　电子轰击有源像素传感器 EBAPS 工作原理示意图

EBAPS 传感器在探测性能上具有以下特征：一是选择不同光电阴极，可调整传感器的响应光谱范

围，可以集中于可见光波段，也可以扩展至近红外波段。二是选择不同规格的CMOS传感器，可以调整EBAPS传感器的分辨率、帧率和功耗。图9给出了GaAs为阴极的电子轰击有源像素传感器EBAPS响应光谱[26]。表3给出Intevac公司的三款EBAPS传感器性能指标。其中，ISIE6曾应用于“打击者Ⅱ”HMDS，改进型的“打击者Ⅱ”HMDS采用ISIE11传感芯片。

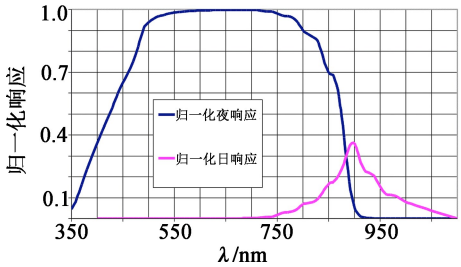


图9 采用GaAs为阴极的电子轰击有源像素传感器EBAPS光谱响应曲线

表3 Intevac公司的三款EBAPS传感器性能指标

	NightVista	ISIE6	ISIE10
格式	VGA 640×480	SXGA 1 280×1 024	SXGA 1 280×1 024
像元尺寸/μm^2	12.0×12.0	6.7×6.7	10.8×10.8
光学规格	1/2 英寸 (9.8 mm 对角线)	2/3 英寸 (11 mm 对角线)	1 英寸 (17.7 mm 对角线)
帧频/Hz	30	27.5	最高达 37
视频输出	RS-170 或隔行数字视频	10 bit 数字输出，连续扫描	10 bit 数字输出，连续扫描
光电阴极	GaAs(500～900 nm)		
高压电源	自动选通实现动态范围控制		
全天侯能力	日光成像时高压关闭		

三是“F-35战机第三代”(F-35 Gen Ⅲ)头盔显示系统，它是由美以合资视觉系统公司(ESA)为F-35战机研发的第三代HMDS[27]。该显示系统通过集成于头罩上的数字式夜视传感器，为飞行员提供弱光或无光条件下增强的视觉能力。

这个位于头盔前部的夜视摄像头配装的也是Intevac公司的EBAPS传感器。它相对基于微通道板的Ⅲ代图像增强器或电子倍增CCD器件，在微通道板去除后，固有噪声更低，即使在很低光照度下，器件依然可以获得高信噪比输出；该款采用EBAPS传感器的夜视摄像头表现出的性能更为先进。

F-35 Gen Ⅲ HMDS配装的EBAPS传感器是美Eotech公司的ISIE 11传感器。采用该传感器的低照度夜视相机NightVista M611-05技术参数见表4[28]。

表4 NightVista M611-05参数表

图像格式	1 600×1 200像素(UXGA)，±20像素电子定位
像素大小	10.8 μm正方形
传感器规格	4/3 inch(22.2 mm对角线)
响应光谱	夜间模式(增强)：400～900 nm 日间模式(非强化)：约800～1 050 nm
最小面板照度/lx	10^{-5}
帧频	最高60 Hz(逐行扫描)，全帧 在窗口模式下可以实现更高帧率
快门类型	快照/滚动快门
输出信号格式	CameraLink主频(10位数字视频)
通讯	RS-232或CameraLink
盲元	＜0.1%
电压	6 VDC(最小)～15 VDC(最大)
功耗	2.4 W(标称)
尺寸，重量	1.8″宽×1.8″高×3.2″深，271克(不含镜头)
镜头卡口	c-卡口，1″光学格式
工作温度/℃	－40～＋60
相对湿度	0～90%不凝结
相机功能	白天模式、夜间模式、非均匀性校正(NUC)，坏像素替换(BPR)，AGC，扩展动态范围(XDR)带启用/禁用功能，实时对比度增强，水平图像定向/翻转，缩放/窗口/帧率选项，外部信号同步(Genlock)，电子图像定心(1 640×1 240有效像素)
包括软件	控制软件(GUI)

应用EBAPS传感器的航空夜视装备还包括美陆军为波音AH-64阿帕奇攻击直升机飞行员配备的头盔可拆卸双筒夜视镜[29]。

3 飞行头盔适用传感器及其国产化思考

3.1 可见-短波红外(VIS-SWIR)双波段探测器混合集成

在尚无单一探测器能同时兼顾夜视所需的可见光(VIS)到短波红外(SWIR)全范围高效探测现状下，将VIS波段与SWIR波段适用的夜视传感器混合集成应用于飞行头盔，并采用成像数据融合，实现飞行员夜视全波段观察，是飞行头盔夜视传感器的优选。

在VIS探测器选择上，以EBAPS为代表的电子轰击混合型光电传感器(EBCCD和EBCMOS等)为优先选择。一是该型传感器能提供不低于Ⅲ代像增强器的夜视性能。比较图11和图6(b)所示EBAPS和Ⅲ代像增强器的响应光谱范围发现，两者在光电阴极材料选择相同时，响应光谱类似，覆盖了夜视观测中目标的可见光和近红外光谱范围。二是该型传感器能提供数字化读出，更有利于VIS成像数据与SWIR传感器数字化输出数据的融合处理。EBAPS芯片已在欧美先进战机飞行头盔上得到实际应用。类似的EBCMOS芯片(法Photonis公司

开发)也在 Digit Owl-EB7 手持夜视仪上应用,像素规模达到 240 万和 700 万,可以实现 1×10^{-5} lx 微光照明下工作[30-31]。

在 SWIR 探测器选择上,以 InGaAs 焦平面探测器为优先选择。比较图 9 和图 5 所示 InGaAs 探测器响应光谱和夜视图像光谱,可知标准 InGaAs 探测器尽管可以满足激光指示和红外激光主动照明(1.06 和 1.55 μm)应用,但相对夜视目标光谱范围依然不足。应采用截止波长 2.0 μm 以上的扩展型 InGaAs SWIR 探测器。

需要关注的是,尽管采用 InGaAs 的 SWIR 成像仪已实现应用超 10 年,美国防部先进国防计划管理局(DARPA)和美陆军夜视实验室(NVL)也支持了一系列 InGaAs 探测器夜视应用项目,但迄今还未见 InGaAs 焦平面探测器在飞行头盔上的应用。一是由于器件的探测性能仍待提升:夜视应用时被探测目标反射的光子辐射通量很低,这就要求 InGaAs 探测器必须具有高响应特性和极低暗电流特性。两种技术途径被用来改善器件实现相应的特性,将 InGaAs 单元像元结构采用 p-i-n 形式或制备 InGaAs 雪崩二极管(APD)器件。两种技术途径都使得器件制备难度增加,相应读出电路(ROIC)也需针对超低噪声和高阻抗匹配进行专门设计制做,高技术难度导致成熟夜视应用 InGaAs 焦平面成像器件推出较慢;二是 InGaAs 探测器光谱响应范围向可见光范围扩展不足:图 8 显示 InGaAs 成像探测器的响应光谱通常前截止波长在 0.9 μm 附近,这是由于 InGaAs 薄膜外延生长在 GaAs 衬底或 InP 衬底上,探测器结构为背入射式,衬底吸收导致 InGaAs 探测器在 VIS 波段未能充分发挥作用。

飞行头盔采用 VIS 与 SWIR 传感器混成,需要关注小型化、低重量和低功耗(SWaP)要求。特别是飞行头盔减重问题一直倍受飞行员使用关注。因为即使小的头盔增重,当飞机做大机动时,也会形成超重过载进而导致飞行员头昏眼花,甚至昏厥,后果严重。

3.2　单一集成型传感器是飞行头盔用传感器发展方向

采用一个传感器同时实现 VIS-SWIR 整个夜视光谱探测,满足飞行头盔高灵敏宽光谱夜视要求是技术的发展方向。由于保证了两波段目标信号采集的同时性、共口径以及同视场,相对于双传感器混成实现 VIS 和 SWIR 图像融合的技术路线,单一集成型传感器对于飞行头盔的结构设计和信号处理更为便捷,更有利于头盔系统的 SWaP 要求。

一种方法是将电子轰击混合型光电传感器的前后截止波长扩展,使之覆盖如图 5 所示的夜视光谱范围。迄今为止公开资料中尚未见响应波长达 1.7 μm 的 EBAPS/EBCCD 传感器的产品报道。这取决于光电阴极选用 InGaAs 材料时光电子激发特性的改进。

另一种方法是将 InGaAs 焦平面探测器前截止波长向可见光波段扩展,同时采用 APD 结构实现光生载流子倍增,提高探测效率。对于前截止波长扩展,采用衬底减薄技术减小乃致消除衬底影响,可以实现 InGaAs 传感器前截止波长前移。图 10 所示为 Sensor Unlimited 公司采用不同技术路线、经消除衬底影响后 InGaAs 焦平面探测器的光谱响应曲线[32-33]。三种器件分别是可见光-短波红外(VIS-SWIR)探测器、近红外-短波红外(NIR-SWIR)探测器和衬底影响未加改变的标准型短波红外(SWIR)InGaAs 探测器。由图 10 可以看出,消除衬底影响可以明显地改善 InGaAs 探测器在可见光光谱范围的探测效果。

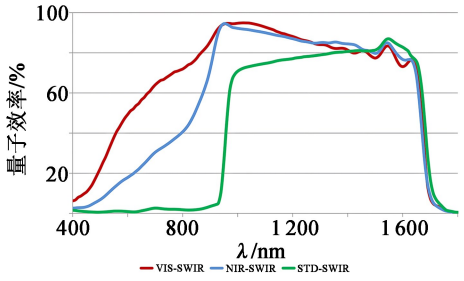
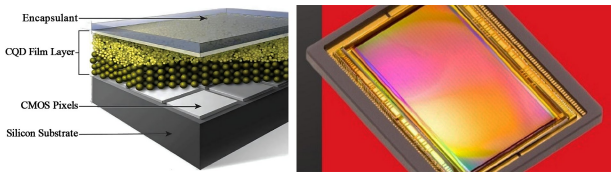


图 10　Sensor Unlimited 公司制备的三种背入射 InGaAs 焦平面探测器的响应光谱

近年来不断取得进步的新型 SWIR 数字型成像探测器,给出飞行头盔夜视传感器的一种新选择。图 11 是美国 SWIR 视觉系统公司推出的胶体量子点(CQD)短波红外探测器芯片结构示意图,以及采用 CQD 制备的成像芯片。图 12 给出由这种芯片开发的短波红外相机及其光谱响应曲线[34]。器件响应覆盖整个可见到短波红外范围,具有高分辨率、适宜规模化生产、低廉成本为突出特征。不足之处在于其响应灵敏度相对 InGaAs 探测器还较低。IMEC 公司则报道了像素间距为 1.82 μm、集成在 Si-CMOS 芯片上、基于薄膜光电探测器的高分辨率 SWIR 图像传感原型器件,其利用 PbS 量子点,实现

短波红外响应截止波长大于 2 μm，光电转换外量子效率平均 18%（预期改进后大于 50%）的器件性能[35]。



（a）CQD 探测器芯片结构原理图　　（b）相应的 Acuros CQD 芯片

图 11　SWIR vision system 公司的 CQD 探测器芯片结构原理图及相应的 Acuros CQD 芯片

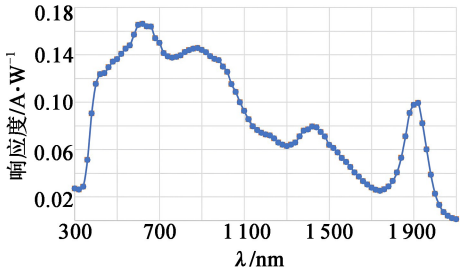


图 12　基于 SWIR 视觉系统公司量子点探测器开发的短波红外相机光谱响应曲线

3.3　飞行头盔夜视传感器采用国产化器件考量

国内近年来在 InGaAs 红外探测器、像增强器包括 EBAPS 型器件开发方面，取得长足进展。表 5 给出由中科德芯公司推出的高清格式标准型 InGaAs 焦平面探测器参数指标[36]。西安立鼎光电公司推出基于像元间距分别为 15 和 25 μm、阵列规模为 640×512 的 InGaAs 短波致冷型和非致冷型红外相机，表 6 给出了其性能指标[37]。

表 5　国产 InGaAs 焦平面探测器参数列表

特性参数	典型值
阵列规模	1 280×1 024
像元尺寸/μm²	15×15
像元间距/μm	15
光谱响应波段/μm	0.9～1.7
峰值探测率	≥5×10¹² cm·Hz^1/2/W@5 ℃，1.55 μm
峰值量子效率	≥70%@1.55 μm
暗电流	≤5 fA@5 ℃，−5 mV
响应非均匀性	≤8%
盲元率	≤1%
动态范围/dB	≥65
帧频/Hz	50
工作温度/℃	−20～+60
储存温度/℃	−40～+70
外形尺寸/mm³	67(*L*)×46(*W*)×13(*H*)
封装形式	内部集成热电制冷器、金属管壳气密封装

在 EBAPS 像增强器方面，北方夜视公司推出了高清格式、百万像素级器件，性能参数见表 7。该产品实现了数字技术与微光夜视技术相结合，具有昼夜双模式：白天关闭高压，光学信号成像；夜间开启高压，电子轰击成像。器件最低工作照度为 5×10⁻⁵ lx，兼具高探测率和数字化输出特点。

表 6　国产 InGaAs SWIR 相机参数列表

型号	LD-SW6401715-UC	LD-SW6401725-CTE2-G
光谱响应/μm	0.9～1.7	0.9～1.7
阵列规模	640×512	640×512
像元间距/μm	15	25
有效面积/mm²	9.6×7.68	16×12.8
制冷方式	非制冷	TE1/TE2
帧率	25/50 Hz/100 Hz(300 Hz@可根据要求定制)	100 Hz@可根据要求定制
数字输出格式/bit	14	8/14
模拟输出格式	PAL/NTSC	PAL/NTSC
板载图像处理	自动/手动曝光；自动/手动增益；非均匀性校正；盲元校正	自动/手动曝光；自动/手动增益；非均匀性校正；盲元校正
数字输出接口	Mini Camera Link/GigE	RJ45@GigE
模拟输出接口	SMA	SMA
外部触发	RS422/TTL/LVDS	TTL/LVDS
控制接口	RS422	RS422
电源输入/V	12 V DC	12 V DC
功耗	＜3 W	＜6 W TEC 关时
工作温度/℃	−40～+60	−40～+55
存储温度/℃	−45～+70	−50～+65
重量	≤165 g(不含镜头)	≤600 g(不含镜头)
尺寸/mm³	≤50×50×57	≤76×76×70

表 7　国产 EBAPS 器件(9B-3)参数列表

数字化输出	ADC/模拟输出；10/12 bit
有效像素数	1 280×1 024
像素尺寸/μm²	≤10×10
帧频/Hz	60
动态范围/lx	5×10⁻⁵～100
光谱响应范围/nm	380～1 100
工作温度/℃	−45～55
快门模式	卷帘快门
输出接口	Camera Link/USB/SD
昼夜模式	昼夜通用
功耗/W	≤1.5
整机尺寸/mm³	≤34.7×34.7×60.5
整机重量/g	≤100
传感器重量/g	≤21
输出接口	Camera Link/USB/SD

国产 EBAPS 传感器与 InGaAs 焦平面探测器为新一代国产飞行头盔配装夜视传感器打下了基础，为实现可见-短波红外（VIS-SWIR）双波段探测器集成应用、双波段成像融合提供了保证。对比国产器件与国外同类器件性能差别，从飞行头盔夜视选用器件角度考量，可以发现：在 InGaAs 焦平面探测器方面，国产器件光谱响应在可见光范围还覆盖不足，延伸波长的产品种类还较少，专用于夜视的 APD 焦平面型 InGaAs 器件短缺。在 EBAPS 像增强器件方面，国产器件还没有采用 InGaAs 特别是延伸波长 InGaAs 材料作为光电阴极，器件在 SWIR 的探测光谱范围不足。另外，器件性能如最低工作照度方面，还需进一步提高。这是未来器件在满足

飞行头盔夜视应用方面需努力改进的方向。

综合考虑器件实际发展水平和飞行头盔应用需求，对于数字化电子轰击混合型光电传感器，其关键性能指标应满足：分辨率达高清 HD 1 080(1 920×1 080)，单元像素尺寸不大于 10 μm，具有白天/夜晚双模工作、光谱响应涵盖可见光波段和近红外波段且长波截止波长不小于 1.1 μm、最小面板照度不大于 1×10^{-5} lx、数字化输出位数不小于 10 bit。对于 InGaAs 数字化焦平面探测器，其关键性能指标应不低于：分辨率达高清 SXGA(1 280×1 024)、单元像素尺寸不大于 12 μm、光谱响应涵盖可见光和短波红外波段且短波截止波长不大于 400 nm、长波截止波长不小于 2.0 μm、器件暗电流密度不大于 1×10^{-7} A/cm^2、量子效率不小于 70%、数字化输出位数不小于 12 bit。结合头盔使用特点，成像帧频要求不高，但应降低器件制冷要求以使器件重量不大于 100 g。考虑机舱照明系统影响，要滤除蓝绿光入射。随着飞机航电系统升级，夜视用传感器将广泛集成于飞机 EODAS 系统中，飞行头盔上将不再集成夜视用传感器。新型智能飞行头盔利用 EODAS 系统完全实现飞机周围 360°夜视观察，并且具有更强的数据处理和人机工效效能。

4　结语

飞行头盔夜视效能取决于头盔选用的夜视传感器，随着可见光探测器和短波红外探测器的技术进步，光谱范围更宽、探测灵敏度更高、响应动态范围更大的夜视用传感器，正在为飞行机组成员提供全天候的环境视图。同时，不断提升的飞行头盔夜视需求也促进了高清、轻量化、高动态响应的可见光和短波红外探测器的进步。

新一代飞行头盔上夜视用传感器优选集中于数字化电子轰击混合型光电传感器和 InGaAs 数字化焦平面探测器。在采用上述器件混成实现飞行头盔夜视应用后，进一步地优化数字化电子轰击混合型光电传感器和 InGaAs 数字化焦平面探测器的器件结构、提高器件灵敏度和扩展响应光谱范围，实现单片集成、覆盖可见-短波红外双波段的传感器，更好地满足新一代飞行头盔夜视需要。

参考文献：

[1] 《顶级飞机手册》编写组. 顶级战斗机图典[M]. 北京：航空工业出版社，2014：155.
Top Aircraft Handbook Team. Top Fighter Atlas [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 155.

[2] Frey T L, Aguilar J C, Engebretson K R, et al. F-35 information fusion [EB/OL]. (2018-5-24) [2023-8-18]. https://swiss-f35. ch/wp-content/uploads/2021/08/PIRA-F-35-Sensor-Fusion-Brief-for-Switzerland. pdf.

[3] Fein G. New sensors are force multipliers[EB/OL]. (2007-5-1)[2023-8-18]. https://www. aviationtoday. com/2007/05/01/new-sensors-are-force-multipliers/.

[4] Mola R. Super helmet F-35 pilots get X-ray vision and other magic powers[J/OL]. Air & Space Magazine, 2017, 9: 2017-8-22[2023-08-18]. https://www. smithsonianmag. com/air-space-magazine/super-helmet-180964342/.

[5] Bae Systems Co. Striker® Ⅱ digital helmet-mounted display[EB/OL]. 2021-04-04[2023-8-18]. https://www. baesystems. com/en/product/striker-ii-digital-helmet-mounted-display.

[6] 石　琳. 现代飞机风挡及舱盖透明材料的发展[J]. 航空制造工程，1994(12)：26-28.
Shi Lin. Development of transparent materials for modern aircraft windshields and cockpit [J]. Aeronautical Manufacturing Engineering, 1994(12): 26-28.

[7] Drendel L. F-22 Raptor in Action [M]. Squadron Signal, 2022: 21.

[8] GS Plastic Optics Co. Transmission curves for plastic optics [EB/OL]. (2022-07-18) [2023-8-18]. https://www. gsoptics. com/transmission-curves/.

[9] 叶　辉，侯昌任. 光学材料与元件制造[M]. 杭州：浙江大学出版社，2014：34-36.
Ye Hui, Hou Changren. Optical Materials and Optical Components Fabrication Process [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014: 34-36.

[10] Zhang J, Chia A C E, LaPierre R R. Low resistance indium tin oxide contact to n-GaAs nanowires[J]. Semiconductor Science and Technology, 2014, 29: 054002.

[11] Gaspari D D, Veldeman J, Lamerichs P. The night glows brighter in the near-IR[J]. Photonic Spectra, 2012: 62-64.

[12] 王洪刚. 像增强器的电子输运与噪声特性研究[D]. 南京：南京理工大学，2015.
Wang Honggang. Research on the electron transport and noise characteristics [D]. Nanjing: Nanjing University of Science&Technology, 2015.

[13] Lambert Instruments B V. Third generation image intensifier[EB/OL]. (2014-12-04) [2023-8-18]. https://www. lambertinstruments. com/technologies-1/2014/12/4/third-generation-image-intensifier.

[14] 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.

[15] The U. S. Department of Homeland Security (DHS). Night

Vision Technologies Handbook [M]. Space and Naval Warfare Systems Center Atlantic, 2013: 15-20.

[16] Alpha Photonics GmbH & Co. KG. Basic knowledge of night vision[EB/OL]. (2023-5-10)[2023-8-21]. https://alpha-photonics.com/en/basic-knowledge-of-night-vision/.

[17] 李 雪, 龚海梅, 邵秀梅, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面研究进展[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 129-138.
Li Xue, Gong Haimei, Shao Xiumei, et al. Recent advances in short wavelength infrared InGaAs focal plane arrays[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 129-138.

[18] Sensors Unlimited Inc. Mini-SWIR 1280 JSX high definition camera [EB/OL]. (2019-7-7) [2023-8-21]. https://www.sensorsinc.com/images/uploads/documents/1280JSX-60_Military.pdf.

[19] Sensors Unlimited Inc. SWIR Imaging: An industrial processing tool[EB/OL]. (2023-1-13)[2023-8-21]. https://www.photonics.com/Articles/Related_SWIR_Imaging_An_Industrial_Processing/ar25134.

[20] UTC aerospace system. Why SWIR & InGaAs? Why is it useful? [EB/OL]. (2018-3-18)[2023-8-21]. https://www.sensorsinc.com/technology/why-swir#filesent_2.

[21] L3Harris. Aviation night vision goggle-M949 [EB/OL]. (2020-9) [2023-8-21]. https://www.l3harris.com/all-capabilities/aviation-night-vision-goggle-m949.

[22] Harris Corp. 18 mm Gen3 image intensifier spec. sheet[EB/OL]. (2019-2-11)[2023-08-21]. https://www.harris.com/solution/image-intensifier-tubes.

[23] BAE Systems. Striker Ⅱ digital helmet-mounted display[EB/OL]. (2022-12-16)[2023-08-21]. https://www.baesystems.com/en/product/striker-ii-digital-helmet-mounted-display.

[24] Intevac Corporation. EBAPS technology[EB/OL]. (2012-1-30) [2023-08-21]. https://www.intevac.com/intevacphotonics/military/ebaps-technology-overview/.

[25] 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-level-light EBAPS imaging system based on three-color LCTF[J]. J. of Appl. Opt., 2022, 43(6): 1044-1053.

[26] Aebi V, Costello K, Arcuni P, et al. EBAPS: Next generation, low power, digital night vision 1[C]// Optro 2005 Inter. Symp., 2005: 1-10.

[27] Collins Aerospace. F-35 Gen Ⅲ helmet mounted display system (HMDS)[EB/OL]. (2021-07-19)[2023-08-22]. https://www.collinsaerospace.com/what-we-do/industries/military-and-defense/displays-and-controls/airborne/helmet-mounted-displays/f-35-gen-iii-helmet-mounted-display-system.

[28] Intevac Corporation. PDS0004 _ rG-NightVista-M611-05-Camera[EB/OL]. (2018-07)[2023-08-22]. https://www.intevac.com/wp-content/uploads/2018/08/PDS0004_rG-NightVista-M611-05-Camera.pdf.

[29] Army Technology. Intevac to supply night-vision cameras for US army Apaches[EB/OL]. (2013-06-12)[2013-08-22]. https://www.army-technology.com/news/newsintevac-supply-night-vision-cameras-US-army-apache/.

[30] Photonis Technology. Photonis adds high resolution 2 and 4Mpx EBCMOS to its portfolio[EB/OL]. (2018-06-12)[2023-08-22]. https://www.photonis.com/news/photonis-adds-high-resolution-2-and-4mpx-ebcmos-its-portfolio.

[31] Tack D, Angel H, Osborne A. Augmented reality and night vision fusion[EB/OL]. (2021-03)[2023-08-22]. https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc399/p815432_A1b.pdf.

[32] Sensor Unlimited. Sensors Unlimited 1280JSX [EB/OL]. (2019-7) [2023-08-22]. https://www.sensorsinc.com/images/uploads/documents/1280JSX-60_Commercial.pdf.

[33] Sensor Unlimited. Mini-SWIR 1280JSX high definition camera[EB/OL]. (2019-7)[2023-08-22]. https://www.sensorsinc.com/images/uploads/documents/VIS_NIR_SWIR_FPA_TYPICAL_QE_CHART.pdf.

[34] Swir Vision Systems. Colloidal quantum dot photodetectors for large format NIR, SWIR, and eSWIR imaging arrays[EB/OL]. (2021-10-15)[2023-08-22]. https://www.swirvisionsystems.com/colloidal-quantum-dot-photodetectors-whitepaper/.

[35] IMEC. Imec presents a thin-film short-wave-infrared image sensor with sub-2 μm pixel pitch[EB/OL]. (2020-12-09)[2023-08-22]. https://www.imec-int.com/en/press/imec-presents-thin-film-short-wave-infrared-image-sensor-sub-2mm-pixel-pitch.

[36] 中科德芯. Su 型 1 280×1 024 元 InGaAs 面阵探测器[EB/OL]. (2023-07-07)[2023-08-22]. https://www.zkdex.cn/productinfo/286149.html.
ZKDX. Type-Su 1 280×1 024 InGaAs focal plane arrays[EB/OL]. (2023-07-07)[2023-08-22]. https://www.zkdex.cn/productinfo/286149.html.

[37] 西安立鼎光电. LEADING 640 面阵非制冷/制冷短波红外相机[EB/OL]. (2021-07-09)[2023-08-22]. http://www.leadingoe.com/wap/photo-x.php?id=161.
Xi'an Leading Optoelectronic Technology Co. Leading 640 FPA uncooled/cooled SWIR camera[EB/OL]. (2021-07-09)[2023-08-22]. http://www.leadingoe.com/wap/photo-x.php?id=161.

[38] 北方夜视集团有限公司. 数字化器件 EBAPS[EB/OL]. (2022-03-31)[2023-08-22]. http://www.nvt.com.cn/art/2022/3/31/art_7918_329068.html.
North Night Vision Technology Co. Digital device EBAPS[EB/OL]. (2022-03-31)[2023-08-22]. http://www.nvt.com.cn/art/2022/3/31/art_7918_329068.html.

作者简介:

司俊杰(1963—),男,河南省洛阳市人,博士,正高级工程师,长期从事红外探测器研发工作。