

〈综述与评论〉

铟镓砷焦平面阵列在微光夜视应用中的潜力及前景

潘京生¹, 孙建宁^{1,2}, 金戈¹, 任玲¹, 毛汉祺¹, 顾燕¹, 郭一亮¹, 苏德坦¹

(1. 北方夜视技术股份有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 得益于夜气辉在短波红外(SWIR)0.9~1.7 μm波段的自然辐射数十倍强于夜天空在可见光和近红外(NIR)0.4~0.9 μm波段的辐射, SWIR成像成为应用于微光条件下的成像探测的最佳选择, 由晶格匹配In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP制作InGaAs焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA), 灵敏于0.9~1.7 μm波段, 在整个响应波段具有超过70%的量子效率, 和室温非制冷工作的极低的暗电流。通过减薄基底, 还可将InGaAs FPA的短波限延伸至可见光波段的0.4 μm。最近几年, 超低暗电流、低读出噪声、大面阵和小像素尺寸的InGaAs FPA的开发取得了实质性的进展, 特别是暗电流得到了数量级的降低, InGaAs FPA探测器已经显露出应用于微光夜视的极大潜力, 并且还通过采用更复杂的温度相关的非均匀校正算法实现了无TEC的低功耗工作, 基于超低噪声的密集阵列InGaAs FPA的SWIR成像技术有望成为新一代夜视技术的一个重要组成部份。

关键词: 微光夜视; 短波红外成像; 铟镓砷焦平面阵列; 暗电流; 多光谱图像融合

中图分类号: TN223, TN215, TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)06-0425-08

The Potential and Prospect of Indium Gallium Arsenide Focal Plane Array Applied to Low Light Level Night Vision

PAN Jing-sheng¹, SUN Jian-ning^{1,2}, JING Ge¹, REN Ling¹, MAO Han-qi¹, GU Yan¹, GUO Yi-liang¹, SU De-tan¹

(1. North Night Vision Tech. Corp. Ltd., Nanjing 211106, China;

2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: The shortwave infrared (SWIR) spectral irradiance in the 0.9 μm to 1.7 μm band which caused by night airglow is several ten times stronger than the irradiance in the visible and near infrared realm of 0.4 μm to 0.9 μm of the night sky, so SWIR imaging is the best choice for the imaging detection under low light level condition. The Indium Gallium Arsenide (InGaAs) focal plane array (FPA) sensors based on lattice matched In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP is sensitive to SWIR light whose wavelength is from 0.9 μm to 1.7 μm, matching the spectral irradiance caused by night airglow, and have exceeded quantum efficiency of 70% over whole response spectral range, as well as with very low dark current while working at room temperature. Removing the InP substrate from the FPA allows extending cutoff wavelength to visible region of 0.4 μm. The work on InGaAs FPA with ultra low dark current, low readout noise, large format and small pixel size has been progressing substantially in recent years, especially as the dark current of this sensor dropped in order of magnitude, the InGaAs FPA SWIR had demonstrated extreme potential for low light level night vision application, and low-power consumption with no-TEC work also has been realized by applying a more complex temperature dependent non-uniformity image correction algorithms. The ultra low noise and dense pitch arrays InGaAs FPA based SWIR detector will become an important part of next generation night vision technology.

Key words: low light level night vision, shortwave infrared imaging, InGaAs focal plane array, dark current, multi-spectral image fusion

0 引言

夜视技术源自于在夜晚极微弱光照条件下的军事行动为获得战术优势而采用辅助视觉的需要。夜视技术分为微光像增强技术和红外热成像技术,两者基于完全不同的物理原理,且工作于来自不同区域的电磁波谱,由此导致其探测或识别物体能力的差异。微光像增强是探测来自于夜天空微弱辐射物在景物上的反射光子并放大光的能量来获得可视图像,工作于可见光近红外波段(VNIR, 0.4~0.9 μm),能够提供目标所在场景的细节信息,清晰度较高。红外热成像则是探测直接来自于景物本身的热辐射来获得可视图像,工作于中波红外(MWIR, 3~5 μm)或长波红外(LWIR, 7~15 μm),具有识别伪装能力,能发现隐藏在树林和草丛中的人员、车辆与火炮,但其对场景的亮度变化不敏感,成像清晰度低,不符合人眼视觉习惯。微光像增强器的优势在近距离的目标识别,而热成像探测器能够获得远距离的定点目标^[1]。

短波红外(SWIR, 1~3 μm)成像具有与可见光相同的成像方式,并可得益于夜气辉在1.0~1.7 μm波段的自然辐射。由In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP制作的InGaAs焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)灵敏于0.9~1.7 μm波段,与夜气辉光谱匹配,在整个响应波段具有超过70%的量子效率,和室温下工作的低暗电流级别,也可通过热电制冷(TEC)以进一步降低噪声^[2-7]。通过减薄基底,还可将短波限延伸至0.4 μm^[8-10]。最近几年,通过改进外延片和器件的设计与制作过程,InGaAs FPA在超低暗电流、低读出噪声、大面阵和小像素尺寸等方面都取得了实质性的进展,特别是在暗电流上得到了数量级的降低,已经显露出其在极微弱光条件下成像探测的极大潜力^[11-15]。

按美军的MANTIS(Multispectral Adaptive Networked Tactical Imaging System)和PCAR(Visible/Short Wave Infrared-Photon Counting Arrays)规划,未来的夜视头盔将是一个VNIR、SWIR和LWIR的多光谱图像融合系统,超低暗电流、低读出噪声、大面阵和小像素尺寸的InGaAs FPA是可应用于微光夜视的SWIR成像技术的发展方向^[16-17],超低噪声的密集阵列InGaAs FPA探测器将成为未来的夜视技术的一个重要组成部份。本文介绍了InGaAs FPA探测器在微光条件下的应用潜力及前景。

1 SWIR成像在微光条件下的应用优势

夜天空的辐射是由各种自然辐射源的辐射综合形成的,大部份可见光实际上是来自月亮表面朝向各个方向散射的太阳光,地球直接接收到的月光和由大气层散射的月光是月夜天空可得到的最主要辐射源,星光仅在无月夜晚才成为夜天空的一个重要辐射源,而大气层对光的散射和吸收,特别是高层大气层所固有的夜气辉,是夜天空辐射物的另一个重要辐射源。太阳光经由太阳系所包含的尘埃粒子向地球散射的黄道光,也改变了夜天空的照度光谱分布;同样还有来自于银河系的漫射光和宇宙光,以及太阳光在地球边缘四周的散射对夜晚辐射照度也有贡献(如图1)^[18]。



图1 从国际空间站上观察到的月光、星光、气辉、极光和城市光的相对亮度和分布

Fig.1 The relative brightness and distribution of various sources of nighttime illumination including airglow, aurora borealis, gibbous moon, starlight, and city lights viewed from the ISS

夜气辉由高层大层中的多种变化过程而产生,如高层大气中氧和氮与羟基粒子反应的化学发光,白天经日光照射电离离子在夜晚的再复合,以及宇宙射线撞击高层大气的发光。气辉具有在所有纬度均匀发射的优点,而不像极光仅产生在接近地磁极的高纬度地区。气辉的最亮处在高度90~100 km的高层大气,看上去像是一个环绕地球的亮窄带。气辉的能量在红外波段要比在可见光波段大,其主要峰值在1.3 μm和1.6 μm^[19],夜气辉在0.9~1.7 μm波段的辐射数十倍强于无月夜天空的可见光波段的辐射,如图2^[20]所示。

满月在天顶时的地面的照度大约是0.2 lx,由于月亮位相的关系,月亮反射到地球的光在满月前后变化很快,两三天时间内月光亮度可减少仅相当于满月时一半还小。在晴朗无月的夜间,由星光主要

提供微弱的地面照明。无月云遮星光的夜晚在地面上产生的照度大约为 2.2×10^{-4} lx, 仅相当于晴朗无月夜天光照度的 1/4, 最昏暗时刻在无月多云夜晚, 此时的地面照度仅 10^{-5} lx^[19]。SWIR 成像的最为明显的优势是在无月星光的夜晚, 此时在 $1.4 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 范围的自然光谱照明是 $(1.5 \sim 2) \times 10^{-7} \text{ W}/(\text{cm}^2 \mu\text{m})$, 是高于微光像增强器 $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 光阴极灵敏度范围的自然光谱照明 $(1.5 \sim 3) \times 10^{-9} \text{ W}/(\text{cm}^2 \mu\text{m})$ 的近两个数量级。如图 3^[21] 所示, 由晶格匹配 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 制作的 InGaAs FPA, 灵敏于 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段, 与夜气辉匹配, 并且在整个响应波段具有超过 70% 的量子效率。

SWIR 具有与可见光相同的成像方式, 即基于来自景物反射的微弱光子的入射, 可显示景物阴影和对比度, 在分辨率和细节方面可以与可见光图像相媲美。SWIR 成像可采用玻璃的光学系统, 可通

过窗口观察房间或汽车内 (低于 $2.5 \mu\text{m}$ 的 SWIR 可穿透普通玻璃)。并且 SWIR 较可见光具有更好的大气透明度, 因其波长更长而减少散射的缘故。并且由于水对 SWIR 的吸收, 意味着 SWIR 成像中水是黑色的, SWIR 成像在以海洋为背景的监视中具有独特的优势。图 4^[22] 显示了 47 km 距离的海洋轻雾霾条件下可见光和 SWIR 成像观察的油井图像对比, 在可见光图像中船桅几乎看不见, 而 SWIR 图像显示出强对比度, 甚至长支臂上的火光的存在。

SWIR 不被人眼、CCD 或 CMOS 和像增强器所观察, 可隐蔽工作, 同时, SWIR 成像对于具有在 $1.06 \sim 1.55 \mu\text{m}$ 的激光器的目标定位是一个很好的手段, $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 范围的激光器在非常高功率时还具有人眼安全的优势, SWIR 激光雷达相比于可见光激光雷达更具在雾、云、烟、尘等遮蔽物很厚的恶劣天气条件下的应用优势^[15]。

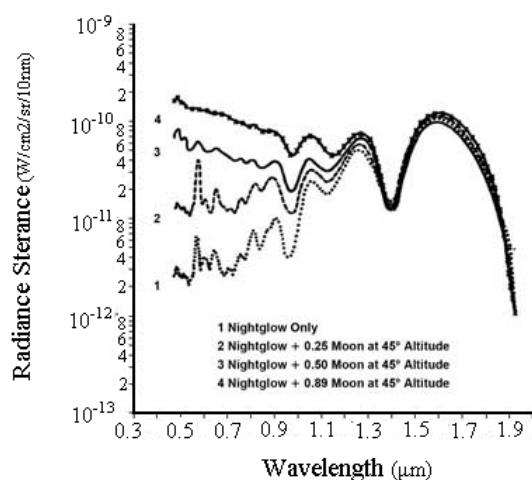


图 2 不同夜天空下辐射物的光谱辐射立体角密度

Fig.2 Night sky spectral radiant sterance for various phase of the moon

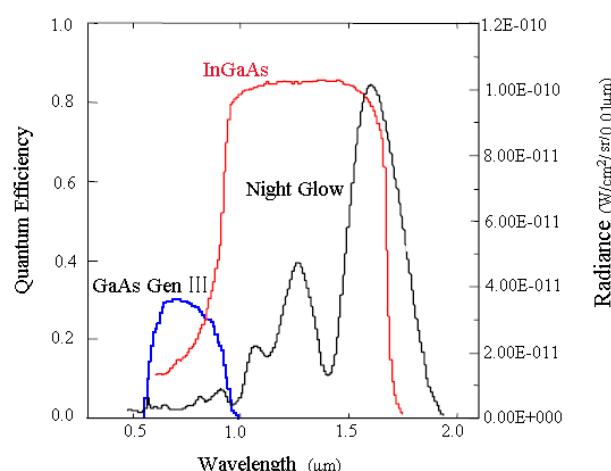


图 3 三代像增强器 GaAs 光阴极、InGaAs FPA 的量子效率和夜气辉的光谱分布

Fig.3 The quantum efficiency of GaAs photocathode Gen. III image intensifier and InGaAs FPA and spectral radiance night of glow

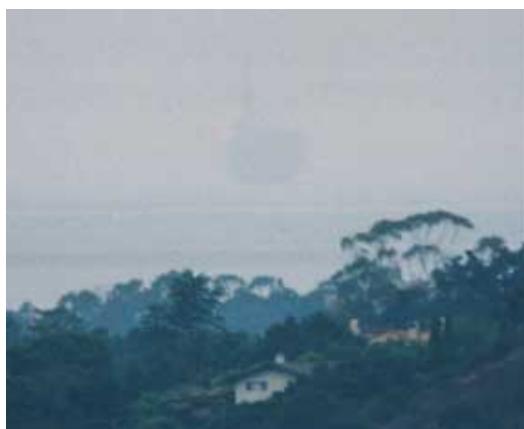


图 4 47 km 距离的海洋轻雾霾条件下的采用可见光 (左) 和 SWIR (右) 成像观察的油井图像的对比



Fig.4 Comparison of visible-light image (left) and SWIR image (right) of an oil rig at a 47 km range taken through fairly light haze

2 InGaAs FPA

采用由晶格匹配 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 制作的背照明的 PIN 光二极管阵列 (PDA) 和 CMOS 读出电路 (ROIC) 通过铟柱倒装焊互连而成的 InGaAs FPA, 其结构如图 5 (上) 所示^[4-5]。 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的带隙是 0.75 eV, 相应于 1.68 μm 的截止波长。InP 带隙是 1.35 eV, 相应于 0.92 μm 的截止波长, 因而 InGaAs FPA 的探测波段为 0.9~1.7 μm 。InGaAs PIN PDA 由掺 Si 的 InP 基体 (N), InGaAs 本征吸收层 (I) 和顶部的 InP 帽组成, 如图 5 (下左) 所示, InP 基体厚度为几百微米, InP 帽层的厚度约 1.0 μm , 用以钝化外延片表面, P 掺杂通过 Zn 穿过 InP 帽层的扩散来得到。 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 对于低于 1.5 μm 波长的光的吸收率大于 10^4 cm^{-1} , 3.0 μm 厚度的吸收层即可足够于达到对低于这个波长的辐射的大于 98% 的量子效率的可能性, 确保在整个响应波段具有超过 70% 的量子效率。PIN PDA 采用平面结构以避免台面边缘渗漏, 而整个 PDA 被隔绝在一个台面上以在前端形成一个共阴极接触。ROIC 为 Si CMOS 数模混合集成电路, 由输入电路单元、多路传输器和输出缓冲器等功能模块组成, 输入电路单元给光二极管提供合适稳定的偏置并在一定时间内对探测器光生电流进行积分放大。为稳定和保持光敏元的偏置、线性度, ROIC 输入电路单元采用积分电容可调的

跨阻抗反馈放大器 (CTIA), 作为与光敏元和后置多路传输器的接口电路, 其电路原理结构如图 5 (下右) 所示。CTIA 电路单元实现电流信号的放大与采样保持, 通过在高增益放大器的输入端引入积分电容反馈, 使 InGaAs 光敏元产生的光电流在反馈电容上积分。采用 fF 量级小积分电容的 CTIA 具有高信号增益, 使 InGaAs FPA 适用于微光夜视等低照度场合。

由于许多色素对 SWIR 辐射是透明的, 在 SWIR 成像中颜色趋于消失, 因而不能对可见光的颜色标志、织物图案、油漆和车辆的字体进行细节成像, 也不能观察电视或计算机监视器这些仅有可见光组成的目标景象, 而在军事监视应用中, 具有看见颜色标志、织物和显示器的细节以及所有波长的激光的能力与夜间成像能力同等重要。

InGaAs 本身可同时灵敏于 VNIR 波段, InP 基体 0.92 μm 截止波长是阻止 VNIR 到达 InGaAs 吸收层的壁垒。通过背减薄可以拓展 InGaAs FPA 的光谱响应到 VNIR 波段, 如图 6 所示^[12], 借助于在 InGaAs/InP 外延结构中增加的一个腐蚀阻止层, 通过湿法腐蚀和机器减薄相结合可以获得非常薄的接触层, 在基体去除完成后, InGaAs PDA 前端作为 n-接触的 InP 层可做到仅 0.2 μm 厚, 整个 PDA 的厚度仅不到 4.2 μm ^[23-24]。

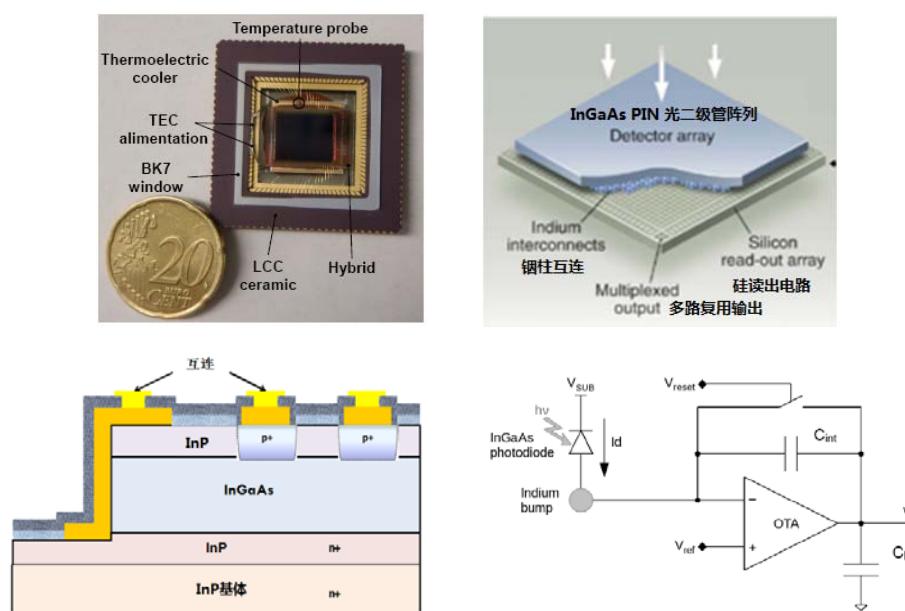


图 5 由背照明 InGaAs PIN PDA 与 ROIC 互连而成的 InGaAs FPA (上) 和 InGaAs/InP PIN PDA 的结构 (下左) 以及 ROIC 的 CTIA 接口电路单元 (下右) 原理示意图

Fig.5 InGaAs FPA consist of a InGaAs PIN PDA interconnect with a ROIC(upper), Cross section of InGaAs/InP PIN PDA (lower left) and CTIA pixel simplified diagram(lower right)

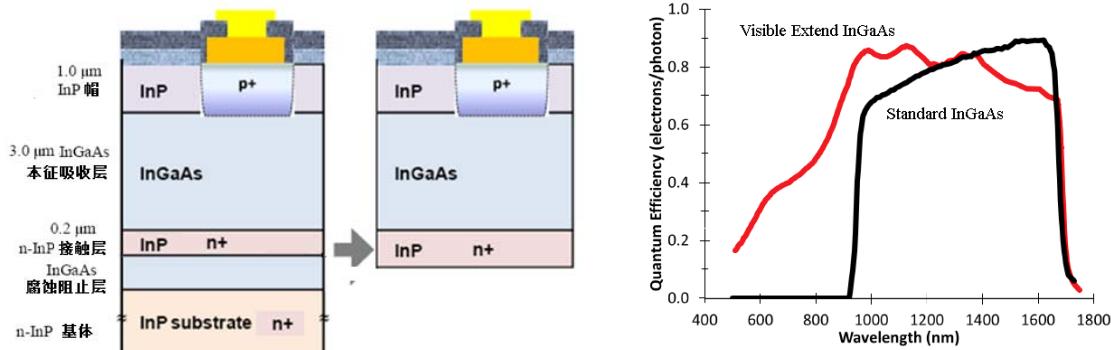


图 6 减薄基体的 InGaAs PDA 的原理示意 (左) 及其在光谱响应范围上的拓展 (右)
Fig.6 Scheme of thinned substrate InGaAs PDA (left) and resulting spectral response extended (right)

这种具有非常薄的 InP 层 (0.2 μm 厚度) 的 InGaAs FPA 在 0.7 μm 的量子效率可达到 50%，在 0.5 μm 的量子效率达到大约 20%，如果采用 10% 的 QE 作为截止波长标准，InGaAs FPA 短波限延伸到 0.3 μm^[24]，并且减薄基体后并不降级光二极管的暗电流。拓展响应的 InGaAs FPA 可以探测到更多的可用光子，提高其在微光条件下的应用能力。

对于微光条件下的成像能力，读出噪声是一个关键性的参数，InGaAs FPA 的读出噪声可通过降低 InGaAs PDA 的暗电流和通过设计极低噪声的 ROIC 来减少，在最近几年 InGaAs FPA 在微光条件下的成像能力得到了相当程度的关注，探测器的暗电流得到了数量级的降低，已经显露出了在微光条件下的成像探测应用的极大潜力^[25-26]。

3 InGaAs FPA 在微光夜视应用中的潜力及前景

近几年来，在美军 MANTIS 和 PCAR 规划的资助下，Sensors Unlimited Inc (SUI) 在可应用于微光条件下成像的 InGaAs FPA 的开发上取得了实质性的进展。MANTIS 规划的目标是在难于满足 VNIR 成像照度条件 (包括通常的城市环境光) 的无月或多云夜晚，提高士兵在夜晚的观察能力，包括具有穿透烟、雾、尘和照明弹的视觉能力，MANTIS 夜视头盔采用在 0.4~1.0 μm (VNIR)、0.9~1.7 μm (SWIR) 和 8~12 μm (LWIR) 工作的成像探测器，并利用其中的 2 路 4 通道的 VNIR 和 SWIR 的自适应图像融合，也称为离眼图像融合，在提供 70° 的广视场的同时，还为主眼提供一个 40° 的高分辨率视场，如图 7 所示^[16]。MANTIS 要求 SWIR 探测器达到可在 10^{-4} lx 微光条件下的背景光子涨落限定下的探测能力。而 PCAR 规划则资助开发对 VNIR 和 SWIR 具有光子计数能力的 InGaAs FPA

探测器，可在一个高密度的大面积阵列中达到接近于零的额外噪声，并具有大动态范围，以及能够满足在微弱光子流下成像的高分辨力的需要^[17]。

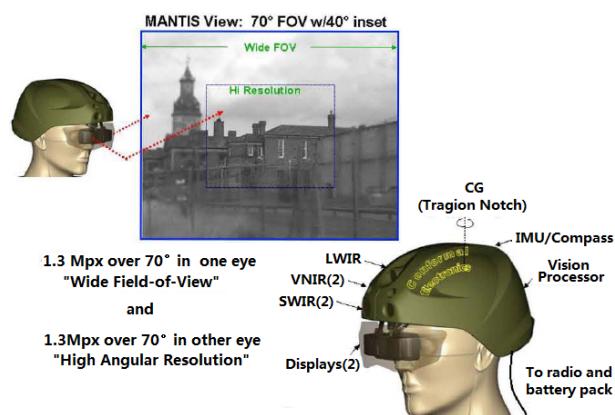


图 7 MANTIS 未来士兵夜视头盔的开发目标

Fig. 7 Objectives of MANTIS development program

基于 InGaAs 的吸收光谱和夜天空光谱分布，SUI 团队对 InGaAs FPA 和 Omni V 像增强器的 I²CCD 进行了大量的实验室和场地对比试验，通过一个噪声限定分辨力分析模型，模拟了通过降低暗电流、降低读出噪声、大面积阵列成像和减小探测单元间距，以使 InGaAs FPA 达到在微弱光条件下 100 m 距离的士兵目标识别 (友军或敌人分辨) 所要求的设计目标，如图 8 所示^[12]。对应于美军对目标的探测 (Detection)、识别 (Identification) 和辨认 (Recognition) 的定义，最高性能的 Omni V 像增强器的 I²CCD 仅能够分别在 1×10^{-3} lx 和 2×10^{-2} lx 照度下识别 100 m 距离的士兵目标的探测和识别。640×512 元 20 μm 间距的 InGaAs FPA 探测器，只要其暗电流密度低于 2 nA/cm^2 ，读出噪声低于 $30 \text{ e}^- \text{ rms}$ ，就有能力在 5×10^{-4} lx 照度下实现 100 m 距离的士兵目标的探测，但限定于 640×512 元的极限分辨力而不能识别，即使是在满月的 10^{-1} lx 照度。因

此,要达到对100 m距离的士兵目标识别能力,需要一个更大面阵的更小像素尺寸的1280×1024元15 μm 间距密集阵列的InGaAs FPA,即可以分别在 3×10^{-4} lx和 1×10^{-3} lx照度下实现100 m距离的士兵目标的识别和辨认,超过目前最高性能的I²CCD所能达到的水平。

在PCAR规划的第II阶段(2004-2006年),SUI开发出具有极低噪声的1280×1024元15 μm 像素间距的InGaAs FPA,这种超低噪声的密集阵列InGaAs FPA,工作在-100 mV反偏压和279 K温度和30 Hz帧率时,光二极管的暗电流降低到fA级,暗电流密度低于 2nA/cm^2 ,读出电路的读出噪声仅为 $10 \text{e}^- \text{rms}$,并且同样通过减薄基体拓展响应到0.4 μm ^[12-13]。同时,SUI团队还改进了InGaAs器件噪声的理论分析模型,说明先前采用模型其所预示的紧密间距阵列的终极暗电流限定并不准确,阐明了在密集阵列中如何有效抑制扩散电流,以及器件中的体积产生复合目前并不是一个限定因素,由此能够解释其目前的试验阵列所测试在20°C的暗电流密度低于 0.5nA/cm^2 和在7°C低于 0.1nA/cm^2 结果的合理性,从理论上说明了密集阵列的InGaAs光二极管的暗电流再降低1个数量级是可行的^[27]。

目前可应用于微光夜视的InGaAs FPA的发展方向是超低暗电流、低读出噪声、大面阵和小像素尺寸,同时,通过采用新颖的非均匀校正算法,InGaAs FPA还实现了无TEC工作。通常,从系统中除去TEC

会引入了一个影响FPA空间均匀性的温度影响因素。通过开发出更复杂的温度依存非均匀成像校正算法,从而可在各种光条件下提供高质量的图像质量,由此大大减少了探测系统的尺寸、重量和功耗,如图9所示^[28],SWIR成像系统的典型功耗降低到3 W或更低,同时仍然保持改进的性能。

近年来,多传感器信息融合技术得到了迅速的发展,与单一传感器所提供的数据相比,多传感器所提供的信息具有可靠性、冗余性和互补性。微光像增强的I²CCD与非制冷微测辐射热计LWIR成像的融合技术目前已经进入了美军的夜视装备。相比于I²CCD与LWIR的融合,SWIR与LWIR的融合有着更好的图像质量,图10所示的照片拍摄于多云满月(4×10^{-4} lx),尽管在这里I²CCD相比于InGaAs探测器具有更高的分辨力,LWIR/SWIR融合图像质量优于VNIR/LWIR图像^[17]。图11则分别显示了四分之一月采集的(2.7×10^{-4} lx)VNIR/SWIR/MWIR/LWIR的各自的融合图像质量^[17]。

结合VNIR、SWIR和LWIR图像产生实时的融合可提高对环境的感知能力,未来的夜视头盔将是一个具有VNIR、SWIR和LWIR的多光谱图像融合的系统。因此可以预见,基于超低噪声和拓展响应的InGaAs FPA探测器的SWIR成像技术将成为新一代的夜视技术或未来的夜视头盔的一个重要的组成部份。

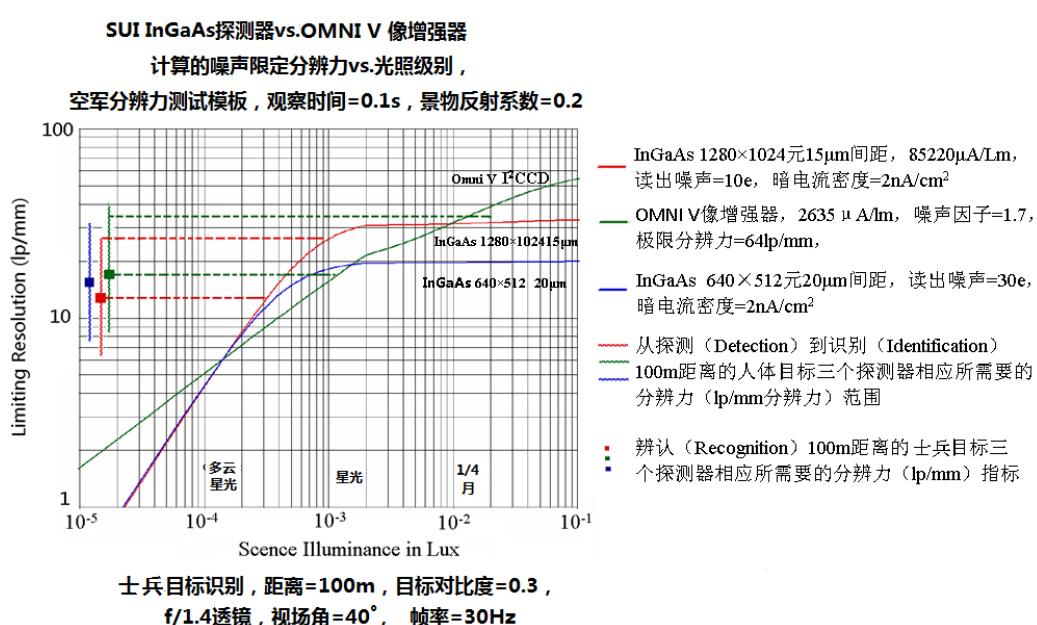


图8 超低噪声InGaAs FPA探测器与OMNI V三代像增强CCD的性能模拟对比

Fig.8 Modeled performance comparison of ultra-low noise InGaAs FPA OMNI V Gen. III I²CCD



图9 SUI 的紧凑的低功耗无 TEC 的 Micro-SWIR™新一代 SWIR 成像器——SU640CSX
Fig.9 SUI compact low-power no-TEC Micro-SWIR™ next generation SWIR imager——SU640CSX



图10 采用 I²CCD 作为 VNIR 通道的 VNIR/LWIR 的双探测器的图像融合, 和采用 InGaAs FPA 作为 SWIR 通道的 SWIR/LWIR 双探测器的图像融合, 均采用非制冷微测辐射热计作为 LWIR 通道

Fig.10 Dual-sensor fusion of VNIR/LWIR using an I²CCD for the VNIR channel, and SWIR/LWIR using an InGaAs FPA for the SWIR channel, both using an uncooled microbolometer for the LWIR channel

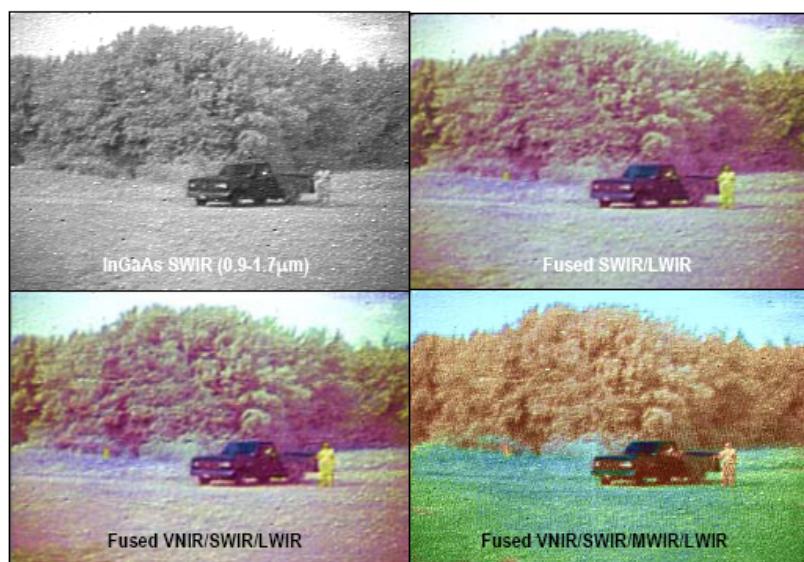


图11 在 1/4 月 (2.7×10^{-4} lx) 采集的 SWIR 图像与 VNIR/MWIR/LWIR 图像的融合
Fig.11 Image fusion of VNIR/SWIR/MWIR/ LWIR as collected under quarter-moon (2.7×10^{-4} lx)

4 结论

目前最新技术的超低暗电流、低读出噪声、大面积和小像素尺寸的 InGaAs FPA 探测器在极微弱光条件下的目标识别和辨认能力上已经超过了目前最高性能的 I²CCD 所能达到的水平, 同时通过采用更复杂的非均匀校正算法实现了 InGaAs FPA 的无 TEC 工作, 从而大大地减少了探测系统的尺寸、重量和功耗, 并且从理论上说, InGaAs FPA 的暗电流还具有可再降低 1 个数量级的潜力, 可以预见 InGaAs FPA 探测器有望成为未来的夜视头盔和新一代的夜视技术的一个重要的组成部份。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ettenberg M H, Lange M J, O'Grady M T, et al. A room temperature 640×512 pixel near-infrared InGaAs focal plane array[C]//SPIE, 2000, **4028**: 201-207.
- [3] Costard E, Nedelcu A, Achouche M, et al. Focal plane arrays from UV up to VLWIR[C]//SPIE, 2007, **6744**: 674411.
- [4] Ettenberg M H, Cohen M J, Brubaker R M, et al. Indium Gallium Arsenide imaging with smaller cameras, higher resolution arrays, and greater material sensitivity[C]//SPIE, 2002, **4721**: 26-36.
- [5] Reverchon J L, Djedide A, Rouvié A, et al. New InGaAs SWIR imaging solution from III-V Lab[C]//SPIE, 2011, **8185**: 1-10.
- [6] 高新江, 张秀川, 唐遵烈, 等. 320×256 InGaAs 短波红外焦平面阵列探测器[J]. 半导体光电, 2009, **30**(2): 178-183.
- [7] 史衍丽, 胡锐, 张卫锋, 等. InGaAs 固体微光器件研究进展[J]. 红外技术, 2014, **35**(2): 81-88.
- [8] Martin T J, Cohen M J, Dries J C, et al. InGaAs/InP for visible light imaging [C]//SPIE, 2004, **5406**: 38-45.
- [9] Turner D G, Bakker T C, Dixon P, et al. The Development of, and applications for, extended response (0.7 to $1.7\mu\text{m}$) InGaAs focal plane arrays [C]//SPIE, 2008, **6940**: 694037.
- [10] Martin T, Dixon P, M-A Gagliardi, et al. 320×240 pixel InGaAs/InP focal plane array for short-wave infrared and visible light imaging[C]//SPIE, 2005, **5726**: 85-91.
- [11] Boisvert J, Isshiki T, Sudharsanan R, et al. Performance of very low dark current SWIR PIN arrays [C]//SPIE, 2008, **6940**: 69400L.
- [12] B M Onat, W Huang, N Masaun, et al. Ultra low dark current InGaAs technology for focal plane arrays for low-light level visible-lightwave infrared imaging [C]//SPIE, 2007, **6542**: 65420L.
- [13] Blessinger M. Performance of focal plane arrays for the photon counting arrays (PCAR) program[C]//SPIE, 2007, **6542**: 65420K.
- [14] E De Borniol, F Guellec, P Castelein, High-performance 640×512 pixel hybrid InGaAs image sensor for night vision[C]//SPIE, 2012, **8353**: 8353-05.
- [15] Nicther J E, Martin T J, Onat B M, et al. Develop multipurpose InGaAs focal plane array visible/SWIR camera for staring and range-gated applications[C]//SPIE, 2007, **6572**: 65720L.
- [16] Curry D C, Harrington L K, Hopper D G. Dichoptic image fusion in human vision system[C]//SPIE, 2006, **6224**: 622401.
- [17] Waxman A, Fay D, Ilardi P, et al. Sensor fused night vision: assessing image quality in the lab and the field[C]//9th International Conference on Information Fusion of IEEE, 2006: 1-8.
- [18] Jensen H W, Durand F, Stark M, et al. A physically-based night sky model [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH Annual Conference Series on Computer Graphics, 2001: 399-408.
- [19] G H Olsen, M J Cohen. Applications of near-infrared imaging[C]//SPIE, 1998, **3379**: 300-306.
- [20] Vastis M, Stich U, Dunlap D. Night-sky radiant sterance from 450 to 2000 nanometers [R]. NTIS, 1972.
- [21] M P Hansen, Douglas S Malchow, Overview of SWIR detectors, cameras, and applications [C]//SPIE, 2008, **6939**, 693901.
- [22] Richard A. IR Imaging Optics Meet Varied Needs, Photonics Spectra [J/OL]. 2012, **46**(8): <http://www.photonics.com/Article.aspx?PID=5&VID=100&IID=629&Tag=Features&AID=51523>.
- [23] Martin T J, Cohen M J, Dries J C, et al. InGaAs/InP for visible light imaging[C]//SPIE, 2004, **5406**: 38-45.
- [24] Turner D G, Bakker T C, Dixon P, et al. The development of, and applications for, extended response (0.7 to $1.7\mu\text{m}$) InGaAs focal plane arrays[C]//SPIE, 2008, **6940**: 694037.
- [25] Boisvert J, Isshiki T, Sudharsanan R, et al. Performance of very low dark current SWIR PIN Arrays[C]//SPIE, 2008, **6940**: 69400L.
- [26] Hood A D, MacDougal M H, Manzo J, et al., Large-format InGaAs focal plane arrays for SWIR imaging[C]//SPIE, 2012, **8353**: 83530A.
- [27] Trezza J A, Masaun N, Ettenberg M. Analytic modeling and explanation of ultra-low noise in dense SWIR detector arrays[C]//SPIE, 2011, **8012**: 80121Y.
- [28] Nazemi J, Battaglia J, Brubaker R. A Low power TEC-less 1280×1024 compact SWIR camera with temperature dependent non-uniformity corrections[C]//SPIE, 2012, **8353**: 83530B.