

红外光电探测器的前沿热点与变革趋势

叶振华^{1*}, 李辉豪^{1,2}, 王进东^{1,2}, 陈星¹, 孙常鸿¹, 廖清君¹, 黄爱波¹, 李辉¹,
周松敏¹, 林加木¹, 潘建珍¹, 王晨飞¹, 陈洪雷¹, 陈路¹, 魏彦锋¹, 林春¹,
胡晓宁¹, 丁瑞军¹, 陈建新¹, 何力¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 红外光电探测技术通常工作在无源被动的传感模式, 具有作用距离远、抗干扰性好、穿透烟尘雾霾能力强、全天时工作等优点, 在航天遥感、军事装备、天文探测等方面都有广泛应用。至今, 二代、三代红外光电探测器已大规模进入装备, 高端三代也在逐步推进实用化, 并出现了前沿前瞻性的新概念、新技术、新器件。本文聚焦国内外的红外技术研究现状, 重点介绍红外光电探测器当前的研究热点与未来的发展趋势。首先, 介绍针对战术泛在化、战略高性能的 SWaP³ 概念。其次, 综述以超高空间分辨率、超高能量分辨率、超高时间分辨率、超高光谱分辨率为特征的高端三代红外光电探测器, 分析挑战光强探测能力极限的红外探测器的技术特征与实现方法。然后, 论述基于人工微结构的四代红外光电探测器, 重点介绍偏振、光谱、相位等多维信息融合的实现途径与技术挑战。最后, 从片上数字化升级为片上智能化的角度, 探讨未来极具变革性趋势的红外探测器。

关键词: 红外光电探测器; SWaP³; 多维信息融合; 片上智能化; 曲面/柔性探测器

中图分类号: TN305.7; TN304.2+5

文献标识码: A

Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors

YE Zhen-Hua^{1*}, LI Hui-Hao^{1,2}, WANG Jin-Dong^{1,2}, CHEN Xing¹, SUN Chang-Hong¹,
LIAO Qing-Jun¹, HUANG Ai-Bo¹, LI Hui¹, ZHOU Song-Min¹, LIN Jia-Mu¹, PAN Jian-Zhen¹,
WANG Chen-Fei¹, CHEN Hong-Lei¹, CHEN Lu¹, WEI Yan-Feng¹, LIN Chun¹, HU Xiao-Ning¹,
DING Rui-Jun¹, CHEN Jian-Xin¹, HE Li¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Infrared photon detection technology usually works in the passive sensing mode and contains the advantages of long acting-distance, good anti-interference, excellent penetration of smoke and haze, and all-day operation, which has been widely used in space remote sensing, military equipment, astronomical detection and other aspects. So far, the second-generation and the third-generation infrared photon detectors have been deployed widely. The high-end third-generation infrared photon detectors have been gradually promoted to practical application. The fourth generation and more forward-looking research including new concept, new technology, and new device has been proposed. This paper focuses on the research status of infrared technology at home and abroad, emphatically introducing the hotspots and development trends of infrared photon detectors. Firstly, the concept of SWaP³ is introduced due to tactical ubiquity and strategic high performance. Secondly, the high-end third-generation infrared photon detectors with ultra-high spatial resolution, ultra-high energy resolution, ultra-high time resolution and ultra-high spectral resolution are reviewed. Technical characteristics and implementation methods of ultimate-performance infrared detectors are analyzed. Then, the fourth-generation infrared photon detector based on the artificial micro-structure is discussed. The realization approaches and technical challenges of multi-dimensional information fusion such as polarization, spectrum and phase are

收稿日期: 2021-10-28, 修回日期: 2021-11-22

Received date: 2021-10-28, Revised date: 2021-11-22

基金项目: 中国科学院战略高新技术创新基金项目 (CXJJ-19-A04)

Foundation items: Supported by the Strategic High Technology Innovation Fund of Chinese Academy of Sciences (CXJJ-19-A04)

作者简介 (Biography): 叶振华 (1977-), 男, 江西玉山人, 二级研究员、博士, 从事制冷型红外光电探测器研究。E-mail: zhye@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhye@mail.sitp.ac.cn

mainly introduced. Lastly, highly innovative trends of future detectors are discussed according to upgradation from on-chip digitization to on-chip intelligence.

Key words: infrared photon detector, SWaP³, multi-dimensional information fusion, on-chip intelligence, curved/flexible photodetector

引言

随着科学技术的进步及未来战争需求的推动,武器装备正从机械化向信息化、智能化的趋势发展。由于主要工作在被动的探测模式,红外/光电成像系统可全天候工作,且分辨率高、抗电磁干扰能力强。因此,红外/光电成像系统将是信息感知的关键,是信息化武器装备、未来智能化军事变革的重要基础。

作为一种电磁波,红外辐射蕴含着物体丰富的本质属性。红外/光电探测器在吸收物体的红外辐射后,通过光电转换、电信号处理等手段将携带物体辐射特征的红外信号可视化。红外光电探测器通常工作在无源、被动的传感模式,具有作用距离远、抗干扰性好、穿透烟尘雾霾能力强、可全天候、全天时工作等优点,在航天、军用、民用、科学、天文、工业等领域都得到了极为广泛的应用。

如图1所示,带有读出电路的红外探测器阵列器件,简称红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)。通常,红外焦平面器件由红外像元芯片和读出电路两部分组成。从工作温度区分为制冷红外探测器和非制冷红外探测器,从工作波段划分为短波、中波、长波、甚长波红外探测器,从工作原理上可区分成热电型红外探测器、光电型红外探测器,从波段信息获取上可分为单色、双色/多色等红外探测器,从成像模式上有被动、主动、主被动结合红外探测器,应用领域有航天、军用、民用、科

学等。

一般而言,光电型红外焦平面探测器都需要制冷,属于制冷型红外光电探测器。1913年,Case首先成功研制了光导型的TlS₂探测器。然后,涌现了PbS、PbSe、InSb等多种材料的红外光电探测器。1959年,Lawson^[1]提出的碲镉汞(HgCdTe)材料,可以覆盖短波红外(Short Wave Infrared, SWIR)、中波红外(Medium Wave Infrared, MWIR)、长波红外(Long Wave Infrared, LWIR)、甚长波红外(Very Long Wave Infrared, VLWIR)等波段范围。作为主流的红外探测材料,碲镉汞对红外光电探测技术的发展起到了极大的推动作用。同时,二类超晶格(Type II Superlattice, T2SL)、量子阱(Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP)、量子点(Colloidal Quantum Dot, CQD)等材料的红外光电探测器也得到了相应的发展。

由于在国家安全、军用装备、国民经济中的重要作用,红外/光电探测器已经成为一个国家的战略性技术,国外发达国家投入了大量的经费和人力。随着科学技术的不断进步,红外/光电探测器技术的发展和尖端武器装备的更新换代也从未停止过。至今,红外光电探测器经历了近百年的发展,大体上可以概括为三个阶段(见图2)。

第一个阶段:单元的光电器件,以及在20世纪60年代末出现的线列型光电导探测器。这是第一代红外光电探测器,只能逐行扫描成像,需要复杂

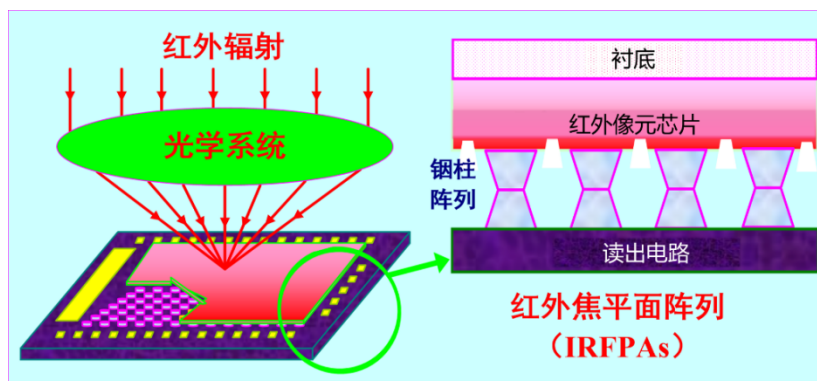


图1 红外光电探测器的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of infrared photon detector

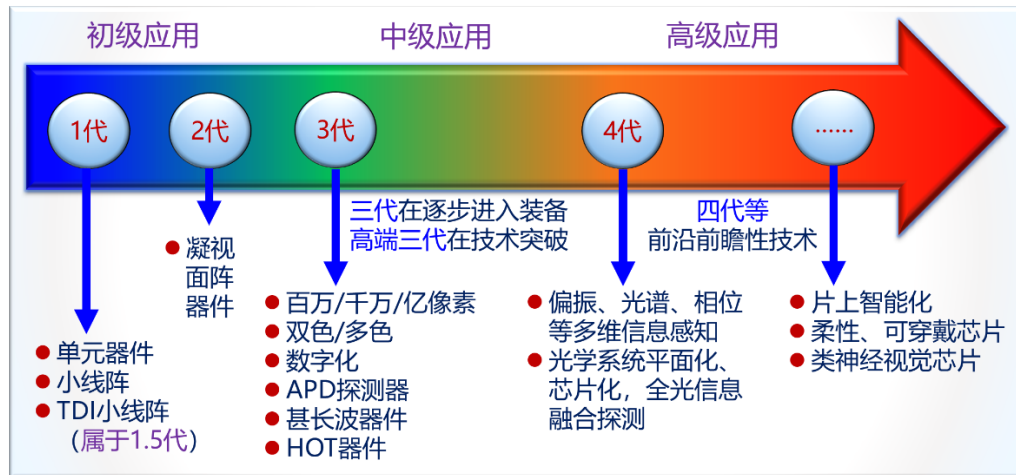


图2 红外光电探测器的发展历程与未来趋势

Fig. 2 Development history and future trend of infrared photon detector

的光学扫描机构。随后,还出现了时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI)的红外探测器,属于1.5代产品。

第二个阶段:与第一代相比,第二代红外光电探测器像元数明显提升,可以实现凝视成像。20世纪末,欧美等发达国家已在航天遥感、武器装备等各大领域实现了产业化应用,并在实战中显示出了巨大的威力。而在2010年前后,我们国家也初步具备了二代红外探测器应用于航天遥感、武器装备等的实用化能力。

第三个阶段:随着半导体材料、芯片技术的不断进步,2000年以来国际上开始了第三代红外光电探测器的研究。2010年左右,业内提出了小尺寸、轻重量、低能耗、低价格、高性能的概念(SWaP³),相应地红外探测器步入了以大规格、小型化、双色/多色化(two/multi-color)、智能化和高温工作(High Operation Temperature, HOT)等为技术特征的时代。

近年来,为进一步提高系统应用的空间、时间、能量、光谱的分辨率,红外光电探测器在现有的三代红外探测器的基础上,继续挑战红外辐射强度的探测能力极限。此类探测器被称为“高端三代”红外光电探测器。同时,人工微结构、人工智能和神经形态计算等技术研究逐渐兴起,推进了红外辐射光学调控、片上智能化与传统红外光电探测器的芯片级集成发展。许多极具前沿前瞻性的新概念、新技术、新器件,如雨后春笋般地应运而生^[2]。

本文针对红外系统应用的红外/光电探测器的需求,着重介绍当前红外探测器的发展动态和变革趋势,分析相关的发展方向与技术挑战。

1 三代红外光电探测器

世界军用电子元器件领域正朝着高效能、高集成、高速度、智能化、小型化等方向发展。技术需求主要包括更强的信息获取能力、更快的处理速度、更高的集成度、更小的体积、更好的可靠性和环境及抗辐射适应性。光电器件领域选择方向的重要标准是如何高效率、高可靠、高集成、低功耗地进行红外辐射信息的探测、识别、处理以及传输。

2000年以来,国外投入了大量的资源进行三代红外光电探测器的研发。在1999年,唐纳德·里高等人提出SWaP³(Size, Weight, Power, Performance and Price)概念。基本思想是小型化、轻重量、低功耗、高性能、低成本。图3给出了红外光电探测器SWaP³概念涉及的因素及其关联性。

在该概念的发展引领下,红外探测器的发展主要集中在大规格、小型化、双色/多色化、智能化和高温工作等前沿领域方面。在战略应用方面,红外光电探测器的高性能是核心,更关注“四高”,重点是提高光谱、空间、时间的分辨率和辐射探测器的灵敏度。而在战术应用时,则涉及SWaP³概念的各个方面,需要权衡尺寸、重量、功耗、价格,特别注重的因素是应用的泛在化。

1.1 HOT型红外光电探测器

红外光电探测器一般需要在低温下工作以维持较低的暗电流。因此,提高探测器的工作温度(HOT)是红外光电探测器实现低成本泛在化发展的重要途径。

高性能的红外探测器一般需要在液氮温区工作,需要装配高真空的杜瓦和大冷量的制冷机。目

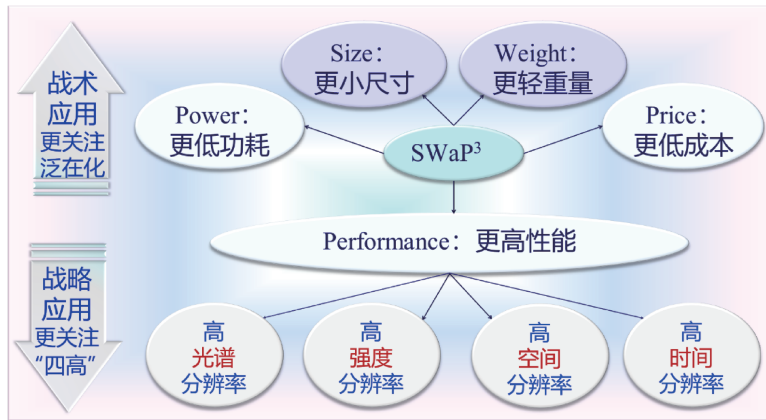


图3 三代/高端三代红外光电探测器的SWaP³概念

Fig. 3 The third generation/high-end third generation infrared photon detector SWaP³ concept

前,制冷机的成本已接近探测器本身的制造成本。同时,制冷机的外形尺寸较大,对星载红外探测、便携式红外装备等应用造成限制。提高红外探测器的工作温度可以有效降低制冷机的成本、功耗和尺寸。而且,更长的制冷机工作寿命和更小的探测器热失配应力,还可以提高探测器的可靠性^[3]。

但是,工作温度上升会导致器件中产生大量本征激发的载流子,导致暗电流增加。如图4所示,HgCdTe器件的暗电流随工作温度的上升快速增加,目前的高性能探测器的暗电流极限遵循经验公式07规则(Rule 07)和19法则(Law 19)^[4]。高工作温度下,红外探测器的热噪声随载流子随机热运动的增强而快速增加,暗电流增大也导致散粒噪声、1/f噪声、过剩噪声等暗电流相关的噪声都出现明显增加。背景限红外探测器在高于设计工作温度时会产生非常严重的噪声,几乎无法获得清晰的成像。

更高的工作温度,杂散光会带来背景辐射噪声,特别是对长波红外探测器的成像造成严重干

扰,一般需要设计冷屏结构抑制探测器内壁发射、反射的杂散光。当工作温度提高,杂散光会引入更多背景噪声。为抑制背景噪声,HOT器件冷屏的工作温度仍需要维持在较低水平,对制冷机仍存在较高的制冷量需求。

HOT型红外光电探测器的研究重点在于通过寻找新型器件结构设计、改进器件制造工艺、集成亚波长的陷光结构、采用新型探测材料(CQD^[5]、二维材料^[6])等方法抑制暗电流。器件制造工艺的改进包括低缺陷密度的材料生长、接近平带的表面钝化、非本征掺杂等。新型的器件结构则包括nBn型结构、P⁺/π(v)/N⁺结构等,利用耗尽层结构在非平衡态下工作,实现暗电流的有效抑制。同时,通过优化设计冷屏结构,抑制探测器杜瓦组件内壁发射、反射的杂散光,以减小因工作温度提升带来的背景噪声。集成光子晶体、表面等离激元金属阵列等陷光结构可以在亚波长尺度上调控入射光的空间分布,从而在不影响量子效率的同时大大减小光敏区域的面积,进而减小光敏区域产生的暗电流^[7,8]。

目前,SCD公司的XBn-InAsSb中波器件能在150 K的工作温度下仍有良好性能。Teledyne公司通过设计耗尽层在HgCdTe p-on-n中波器件上获得高达220 K的工作温度,长波器件的工作温度也提高到了160 K^[9]。

1.2 双色红外光电探测器

双波段红外凝视成像探测系统采用两种红外波段同时对视场内的目标和背景成像,充分利用不同的目标、背景和复杂干扰等在两种波段上所呈现的不同辐射率、辐射强度等特性来识别不同的目标和背景。目前,双色红外探测器的研究几乎涵盖了短波红外、中波红外、长波红外的任意组合,还

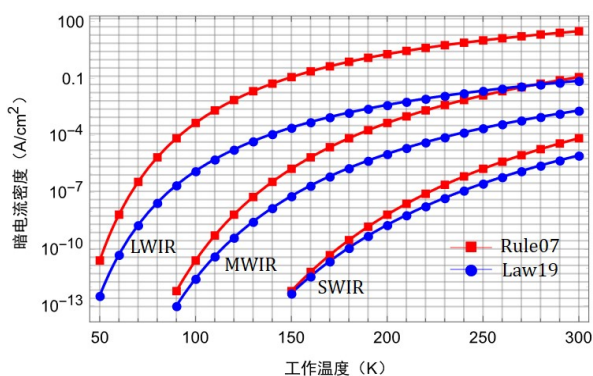


图4 HgCdTe红外光电探测器暗电流密度与温度关系^[4]

Fig. 4 Relationship between dark current density and temperature of HgCdTe infrared photon detector^[4]

出现了可见-红外、紫外-红外等多光学谱段组合的探测器。双色成像可以获取探测目标在不同波段的特征信息,有效抑制复杂的背景噪声,提升抗诱饵诱骗、反隐身的光电对抗能力,可降低虚假告警等错误识别目标的概率。双色探测的图像融合技术可以发挥不同波段成像的优势,包括短波红外的高分辨率、中波红外的远探测距离、长波红外的常温目标识别等^[10]。

红外探测器实现双波段探测主要的技术路线包括分光系统、镶嵌式像元排列结构、纵向叠层结构等。(1)采用分光系统的双色红外系统一般依靠光栅、分色镜等元件将两个波段的光分别成像,存在分光元件引入像差、系统设计复杂、图像对准困难等问题,一般应用在多光学谱段。(2)早期的双色光电探测器常常采用镶嵌式像元排列的滤色片结构设计,通过在焦平面阵列入射方向上交错排列透过不同波段的滤色片,实现双色成像探测。近年来,也有研究利用超表面集成实现像元级的分光探测^[11]。(3)纵向叠层结构是目前双色红外探测器最常用的模式(见图5)。单个像元区域内叠加了响应波段不同的多个吸收层,从而单个双色/多色芯片即可完成多波段的探测。

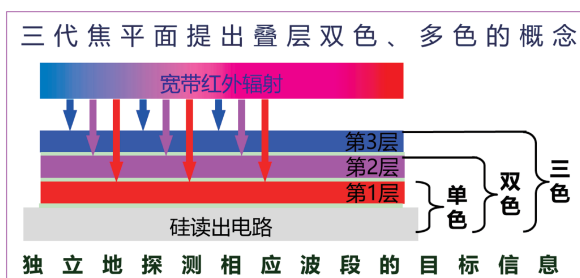


图5 纵向叠层双色/多色红外光电探测器的工作原理示意图^[12]

Fig. 5 The schematic diagram of working principle of longitudinal laminated two-color/multi-color infrared photon detector^[12]

纵向叠层的双色红外光电探测器不仅有时间、空间完全同步的优点,而且在应用时不需要复杂的光学系统,可以在应用系统中直接替代同等规格单色红外光电探测器(见图6)。采用双色红外焦平面器件,特别是时间、空间完全同步的双色探测器,可在维持与单色探测系统基本相同的体积、功耗与可靠性以及完全相同的空间分辨率的同时,大大提升系统长距离探测与识别、防红外诱饵诱骗、抗阳光

散射干扰等能力^[13, 14]。洛克希德-马丁和雷神公司采用256×256、512×512中波/长波双色探测器共同研制的“标准-3”(SM-3)导弹是美国海基中段导弹防御系统的重要组成部分,用来拦截中、远程弹道导弹。自2002年1月以来,美国海军总共使用“宙斯盾”弹道导弹防御系统进行了27次拦截试验。其中,23次使用“标准-3”型拦截弹进行大气层外拦截,18次取得了成功,该系列导弹有超过80%成功率。由此可见,这种纵向叠层双色红外光电探测器是泛在化又一个典范。

图7是双极同向结构的双色红外光电探测器的结构示意图。如图7所示,双色红外光电探测器的研制涉及纵向能带裁剪的双色异质结材料、高深宽比的微台面刻蚀成形与钝化、双色读出电路设计等关键技术。由于吸收层需要保持一定的厚度以及阻挡层的存在,材料生长厚度、组分与掺杂浓度控制的难度明显大于单色材料^[15-17]。随着像元密度的增大,微台面阵列的刻蚀深宽比快速增加,双色微台面芯片的无损、低损伤成形,以及损伤修复技术是获得高性能的双色红外光电探测器的又一个技术难题^[18-22]。同时,模式的双色红外光电探测器需要对两个波段分别读取、输出信号,双色读出电路设计时需要在有限的单元面积内实现双输入级的结构设计,重点平衡两个波段的信号电荷处理能力。

双色探测器焦平面阵列规格最大为美国Raytheon公司报道的1280×720的中波/长波器件,像元中心距为20 μm^[23]。目前,美国Raytheon公司、法国Lynred公司、英国SELEX公司、德国AIM公司都有更高像元密度的640×512规格双色红外光电探测器的报道。国内直到2004年才有80元的原理型HgCdTe双色红外探测器报道^[24],2010年双色器件的规格达到128×128^[21],目前初步具备了320×256、640×512双色红外光电探测器的研制与生产能力。

2 高端三代红外光电探测器

当前,红外/光电探测主要利用红外辐射的强度特性实现灰度、伪彩色的成像,也有利用红外辐射的频率特性实现多光谱、高光谱及超光谱成像。近年来,超高分辨率、超高灵敏度、超快响应等为新技术特征的高端第三代红外/光电探测器件在国内外获得了重大的技术突破。红外探测的空间特性、能量特性、时间特性、光谱特性的分辨能力不断提升,逐渐逼近其分辨率的理论极限。图8是红外系统在

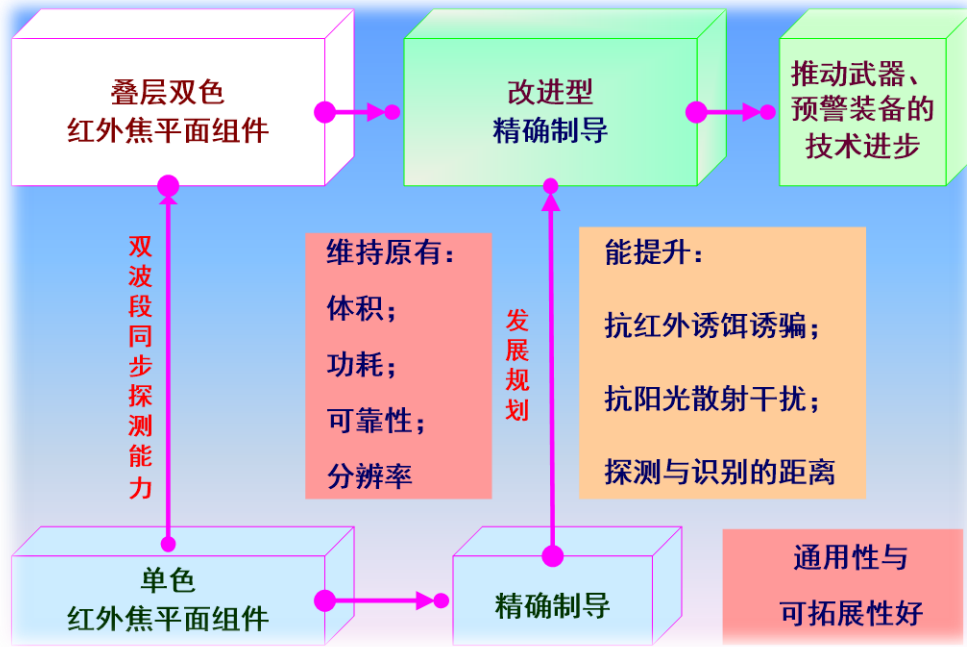


图6 叠层双色红外光电探测器的应用优势^[12]

Fig. 6 Application advantages of laminated two-color infrared photon detector^[12]

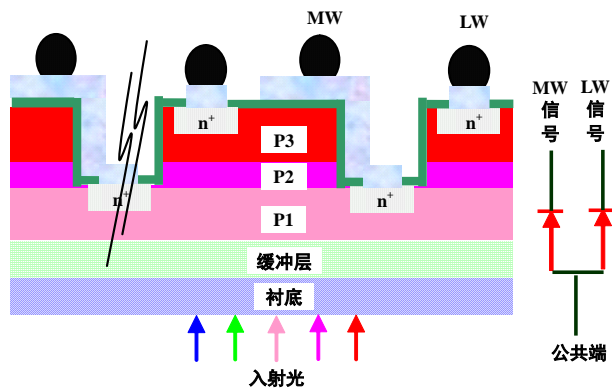


图7 双极同向的双色焦平面探测器结构示意图

Fig. 7 The schematic diagram of dual-color focal plane detector with two poles in the same direction

实现高的空间、能量、时间、光谱分辨率存在的相互关联性与制约性。单个的红外光电探测器不可能同时满足红外系统超高的空间、能量、时间、光谱分辨率要求。通过特殊的设计、定制,来实现红外系统几个核心参数相互间的合理平衡。通常都是针对具体的探测需求与应用场景,重点关注其中1~2个方面的极高分辨率。

2.1 超高空间分辨率

空间分辨率是成像上能够详细区分的空间内最小单元的尺寸或大小,是表征图像分辨目标细节的重要参数。超高空间分辨率可以提供大视场、高

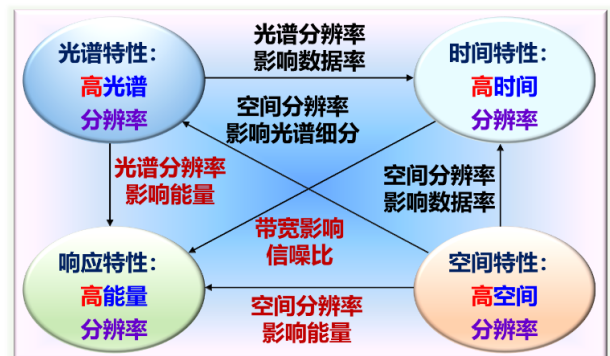


图8 核心参数“四高”性能的相互关联性与制约性

Fig. 8 The correlation and constraint of the core parameters "four high" performance

清晰度的红外图像,在卫星遥感、深空探测等领域提供更强的目标探测能力。增大焦平面阵列规格(超大规格)和减小像元中心距(高密度)是超高空间分辨率红外探测器的主要研究方向。

2.1.1 超大规格红外光电探测器

(1) 超大规格的发展现状

红外探测器焦平面阵列的规格从最早的32×32,已发展到了高清成像的水平。美国、法国等在大规格红外焦平面阵列领域有一定先发优势,2 k×2 k、4 k×4 k阵列已在航天、军事等领域投入应用。国内红外探测器的研究起步较晚,且受到国外的技术封锁,但近年来发展迅速,也初步实现了2 k×2 k、

4 k×4 k 红外探测器阵列的航天应用。

美国 Teledyne 公司的商用产品 H4RG 的规格达到 4096×4096,且通过高精度模块化拼接达到了天文探测器的分辨率需求。美国 L3HARRIS 公司为机载红外传感器提供的产品 LFISE 规格达到 4096×4096。美国 Raytheon 公司为卫星遥感红外探测器提供的产品规格也达到 4 096×4 096。法国 Lynred 公司的商用产品 ATTO1280 的规格为 1 280×1 024,为欧洲航天局深空探测任务提供的红外探测器规格为 2 048×2 048。

目前,美国的 Raytheon 公司正在利用 8 英寸碲镉汞材料研制 15 μm 像元中心距的 8 k×8 k 超大规格红外探测器,并通过发展 12 英寸碲镉汞材料来制备 15 μm 像元中心距的 14 k×14 k 超大规格红外探测器。

卫星遥感、天文探测等方面的应用对红外探测器像素规格有很高的要求,现有单片的规格仍不能完全满足需求,实际应用中往往还需要进一步采用高精度拼接的方法获得更大像素规格的红外光电探测器阵列。

(2) 超大规格的技术挑战

超大规格焦平面阵列器件的制备受多方面因素限制,包括多层材料组件热失配、大尺寸衬底制备难度大、HgCdTe 外延生长不均匀以及探测器尺寸变大带来的可靠性问题等。

红外探测器通常包含探测器芯片(衬底/外延材料/芯片结构)、读出电路、互连钢柱、底充胶、引线基板等,属于复杂的多层结构体系。红外探测器在高温下制作并在常温下封装,但需要在低温(液氮温区)下工作。由于各层材料特别是探测器芯片和读出电路的热膨胀系数不同,温度循环过程中器件内部会产生热失配应力,导致芯片变形、甚至断裂,影响探测器的性能与可靠性^[25, 26]。

采用 CdZnTe、GaAs 衬底材料 HgCdTe 外延生长,探测器芯片与 Si 读出电路都存在热失配问题。衬底减薄、去除或采用热匹配的 Si 材料作为衬底是常见的解决方案。另外,通过在 Si 读出电路背面引入高热膨胀系数压缩层和平衡层的方法,抑制读出电路的形变,且使其有接近衬底的热膨胀系数^[27]。

CdZnTe 衬底成本高和晶圆尺寸小的问题也同样限制了 HgCdTe 焦平面阵列规格。CdZnTe 和 HgCdTe 同为闪锌矿结构,有很好的晶格匹配度,是 HgCdTe 外延生长的良好衬底材料。但是,目前商用

CdZnTe 尺寸与面积有限,更大尺寸的 CdZnTe 衬底制备成本非常高,对焦平面阵列规格的扩大造成严重限制。

GaAs、Ge、Si 等都先后用作替代的衬底材料^[28-31],但晶格失配度高,生长的 HgCdTe 材料容易存在高密度的位错,严重限制了在长波器件上的应用。新提出的 GaSb 衬底结合 CdTe 缓冲层是良好的衬底替代材料,有低晶格失配度(6.1%)、低热失配等优点,GaSb 衬底生长的 HgCdTe 材料位错密度已接近于 CdZnTe 衬底生长 HgCdTe 材料的位错密度^[32, 33],为寻找 HgCdTe 材料的替代衬底提供了新的方向。

HgCdTe 材料主要由离子键结合,但 Hg-Te 键键能较弱,Hg 析出导致超大规格器件出现组分与响应的不均匀性,形成固定图像噪声^[34, 35]。InSb 材料研究较为成熟,有高质量的商用衬底,在 SWIR 和 MWIR 超大规格焦平面阵列上与 HgCdTe 材料竞争激烈,已研制成功 InSb 薄膜的 8 k×8 k 红外光电探测器。

2.1.2 高密度像元的红外探测器

(1) 高密度像元的发展现状

高密度像元的红外探测器像元中心距很小,接近波长尺度。表 1 是美国海军实验室在 2012 年提出的高密度像元红外探测器的发展目标。红外探测器的像元中心距在早期达到 100 μm 以上,发展到本世纪初 30 μm 左右,到目前 Lynred、ATTOLLO、Teledyne 等公司推出大量像元中心距为 10 μm 的产品^[36, 37],也有数款像元中心距 5 μm~8 μm 的器件宣布成功^[38-40]。国内各单位的研究水平相近,现有产品的像元中心距仍停留在 10 μm 左右。

(2) 高密度像元的技术挑战

制冷型红外光电探测器需封装在杜瓦组件内以保持低温工作环境,并需要配套的制冷机。像元尺寸的减小可以有效地减小芯片的尺寸,可在单个晶圆上制备更多芯片,降低杜瓦组件的尺寸及制冷量要求,进而降低系统的成本和功耗。目前,红外光电探测器像元尺寸的减小受到空间串音、噪声、读出电路、探测器芯片暗电流等方面因素的限制。

(a) 像元间串音抑制

红外光电探测器的串音主要包括由光学系统衍射导致的光学串音和光生载流子在像元间扩散引起的电学串音^[41],串音对探测器的调制传输函数(Modulation Transfer Function, MTF)会造成不利的

表 1 美国海军在 2012 年提出的高密度像元的系统需求

Table 1 The US Navy proposed a system requirement for high-density pixels in 2012

光学镜头 尺寸	长波红外 LWIR	中波红外 MWIR	中波/长波 双色
6 英寸	5 μm 中心距 5 k \times 5 k 像素规格	3 μm 中心距 8.3 k \times 8.3 k 像素规格	中波/长波像元 3 μm 中心距 8.3 k \times 8.3 k 像素规格
3 英寸	5 μm 中心距 2.5 k \times 2.5 k 像素规格	3 μm 中心距 4.2 k \times 4.2 k 像素规格	中波/长波像元 3 μm 中心距 4.2 k \times 4.2 k 像素规格

影响。现有器件的像元中心距已逐渐逼近衍射极限限制的最小像元尺寸(对采用 4 倍过采样的 F/1 系统,中波器件为 2 μm ,长波器件为 5 μm ^[42])。利用过采样和点扩散函数算法处理图像信号可以有效降低衍射引起光学串音对成像效果的影响,像元尺寸可减小到接近甚至超越衍射极限的水平。利用微透镜阵列等亚波长尺度光学元件将入射光汇聚到像元中心,减小光生载流子扩散到临近像元的概率,也是减小光学串音的发展方向^[43-45]。另外,还有入射光受杜瓦、衬底等散射引起的光学串音,可以通过优化冷屏结构参数、去除衬底等方法实现抑制。

电学串音是高密度像元红外光电探测器串音的主要来源。随着焦平面器件像元密度增加、像元中心距减小,吸收层内入射光激发的光生载流子横向扩散到邻近像元 PN 结,部分信号被邻近像元收集,进而导致电学串音。通过减小注入区面积改变注入区形状、减少吸收层厚度等方式^[46-48]调整器件结构与参数的方法可以对电学串音形成一定抑制,但会出现器件响应率降低、制造工艺复杂等问题。目前减少电学串音的器件结构有微台面结构^[49]、HDVIP 结构^[50]、PIN 结构等。

微台面阵列芯片通过在像元间刻蚀沟槽,形成物理隔离从而抑制串音。HgCdTe 材料的光谱响应等特性对表面缺陷状况非常敏感^[51],刻蚀微台面结构容易导致 HgCdTe 表面出现损伤^[52, 53],并对后续的钝化工艺提出了技术挑战。HDVIP 结构采用垂直 PN 结,在靠近像元中心的载流子更容易被激发,从而更大概率被中心像元收集。但像元中心金属化区域因阻挡了红外辐射透过而不能产生载流子,对器件的量子效率和 MTF 都有影响。PIN 结构在完全耗尽的吸收层存在 PN 结内建电场,收集中心像元区域内产生的载流子,对减少串音和暗电流都有很好效果。

(b) 表面漏电流与盲元抑制

红外探测器的噪声受表面漏电流、隧道电流等因素影响,暗电流密度随像元中心距的减小呈现非线性变化,影响器件的信噪比。像元尺寸的减小逐渐接近材料缺陷的尺寸,材料缺陷引起的盲元变得显著,限制了高密度像元器件的有效像元率。因此,优化红外光电探测器芯片设计、芯片表面钝化、工艺引入缺陷都成为高密度像元探测器的技术挑战。

红外光电探测器的禁带宽度一般较小,表面电荷会引起表面附近能带的明显弯曲,造成严重的表面漏电流。因此,红外光电探测器的表面钝化技术非常关键。特别是微台面阵列芯片的侧壁钝化,其表面钝化介质膜的均匀覆盖对抑制表面漏电起到重要作用^[54]。随着像元中心距持续减小,热蒸发、磁控溅射、MBE 等传统钝化工艺越来越难满足深宽比不断提高的微台面阵列芯片的钝化要求。为适应像元中心距更小、像元结构更复杂的红外光电芯片的钝化,原位 CdTe 钝化^[55, 56]、钝化界面植氢优化^[57, 58]、原子层沉积^[59]等新的钝化技术快速得到了应用。

PIN 耗尽型碲镉汞红外焦平面器件是国际上前沿的研究热点。它通过抽取载流子,实现吸收区载流子完全耗尽的非平衡态工作,可抑制 Auger 热产生机制相关的暗电流。

基于 InAsSb 的 nBn 探测器可以有效抑制噪声,是高密度像元探测器的一个新发展方向。势垒层光入射方向的一侧 n 型掺杂区禁带宽度小,作为光子吸收层。而另一侧 n 型掺杂区为接触层与读出电路相连。多子势垒层允许吸收层中光生载流子的少子(空穴)流向接触层,而抑制多子(电子)形成的暗电流和表面漏电流^[60]。nBn 探测器比传统光电探测器有更低的暗电流、更高的信噪比,同时制造工艺简单、可靠性高,性能与 HgCdTe 器件相近,是红

外探测技术发展的重大进步。

(c)高连通率的混成互连技术

像元中心距的减小对红外探测器芯片与读出电路的混成互连工艺提出更高的要求。微小钢柱阵列制备工艺是混成互连获得高的连通率的先决条件。当器件像元中心距减小时,采用传统的光刻、钢薄膜生长和剥离来制备钢柱,存在钢柱高度不均匀、且钢柱高度不足的缺点。从而,导致对准难度高、倒焊滑移、焊点稳定性差、邻近焊点黏连等问题。这在高密度像元的超大规格红外光电探测器中尤为显著^[61]。新的蒸发/离子刻蚀^[62]、加入介电层等工艺可以对像元中心距 $10\ \mu\text{m}$ 的器件形成高度均匀的球型钢柱阵列,提高了倒焊的连通率。像元中心距 $7.5\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 的研究也在器件制备上取得成功^[63], $3\ \mu\text{m}$ 等更小像元中心距的焊接工艺正在研究中^[64]。

(d)高密度像元的读出电路技术

与常规红外探测器相比,超高密度像元红外探测器的感光面积大幅度减小,而系统的暗电流等噪声并没有成比例地降低,如何设计高效、低噪声的成像驱动电路,保障系统获得足够高的信噪比,是超高密度像元成像探测系统面临的一个必须解决的技术难题。

输入级结构是读出电路性能关键,直接注入(Direct Injection, DI)和电容反馈跨阻放大器(Capacitive Trans-impedance Amplifier, CTIA)是目前最常用的输入级结构^[65]。输入级的积分电容占读出电路面积的主要部分,像元面积减小导致电容设计面积利用率进一步下降,从而高密度像元器件的电荷存储能力快速减弱。集成电路工艺的发展允许在单个像元对应区域内实现多层读出电路垂直互连的3D集成^[66]。3D集成技术可以通过金属-金属键合在器件层之间形成像素级的互连,允许读出电路的多层排列,从而在更小的单个像元区域内实现信号的采集、处理与输出。3D集成的积分电容具有更大的电荷处理能力,极大地提高高密度像元器件的灵敏度。

(3)调制传递函数

调制传递函数(MTF)是描述红外探测器成像能力的重要指标。MTF描述物体成像的锐度,反映系统的空间分辨能力,一般作为频率的函数给出。MTF曲线的测量可以采用阶梯式的光源扫描获得像元的响应,通过傅里叶变换获得实际系统的MTF

曲线。

红外成像系统的MTF受限于红外探测器的像元尺寸与所用光学系统的光圈,两者都可成为系统MTF的限制因素。当红外成像探测器的MTF以比光学系统更低的空间频率趋近于零时,系统的MTF受限于探测器的像元尺寸。相反,当光学系统的MTF先趋近于零时,那么系统MTF将受限于光学系统。

傅里叶光学指出了光学截止频率的存在,因此在光电成像系统中,即使探测器的分辨率无限高,获得的图像仍然受到光学截止频率的限制。由于目前红外探测器的像元尺寸逐渐接近探测光的波长,衍射效应开始不可忽略。当系统达到衍射极限,点光源在焦平面上成像为艾里斑和外侧的同心环,艾里斑的直径 D 有: $D = 2.44\lambda F$, 其中 λ 为光波长, F 为系统的光圈。取 d 为探测器像元尺寸,当 $F\lambda/d = 0.41$, 像元尺寸大于艾里斑直径,MTF曲线主要受像元限制;当 $F\lambda/d = 2$, 单个艾里斑平均被4.9个像元探测、成像,MTF曲线主要受光学系统限制^[67]。以前,大多数红外探测器都设计在 $F\lambda/d < 1$ 的范围内。但随着像元尺寸不断减小,红外探测器MTF曲线逐渐由受像元限制转变为受光学系统限制(见图9)。

为进一步提高目标探测能力,通过某些数字图像处理算法可获得光学截止频率以外的图像信息。

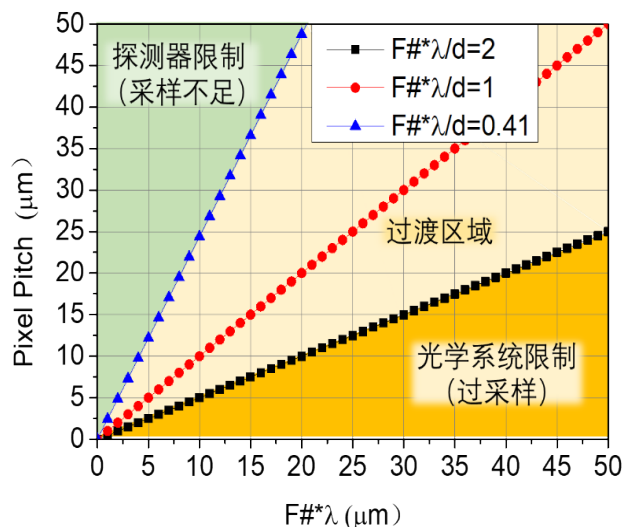


图9 MTF受红外探测器像元中心距和光学系统光圈尺寸制约的转换关系

Fig. 9 Conversion relationship that MTF is controlled by the center distance of infrared detector pixel and aperture size of optical system

根据瑞利判据,一个艾里斑的圆心与另一个靠近艾里斑第一暗环重合,则认为是两个信号可分辨的临界状态。此时, $f/d=1.64 \cdot D/\lambda$ 。后来,Sparrow判据提出当 $f/d=2 \cdot D/\lambda$ 时,两个艾里斑的合光强不出现极小值为可分辨的临界状态,认为像元进一步缩小还能够提升空间的分辨能力。图10给出了2014年由美国DRS公司研制的1280×720长波红外相机清晰成像情况,使用的探测器像元中心距为 $5 \mu\text{m}$ ^[68]。

2.2 超高能量分辨率

能量分辨率是探测成像时能够详细区分的最小红外辐射能量,可以探测目标灵敏度能力,通常用噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)参数来表征。超高能量分辨率的红外探测器可以更精细地感知探测场景的细节,获取的红外图像可以保留更完整的目标信息。超高能量分辨率的发展方向包括甚长波的探测、高动态范围(High Dynamic Range, HDR)等。

2.2.1 甚长波红外光电探测器

(1) 甚长波探测器的发展现状

波长大于 $14 \mu\text{m}$ 的甚长波红外辐射(VLWIR)包含大气 H_2O 、 CO_2 等分子含量、大气层温度分布等信息,在低于200 K的低温目标高灵敏度提出方面有重要作用,甚长波的探测对获取整个红外波段的光谱信息是必不可少的一环。

国外技术先进的公司对材料的掌握很好,在甚长波段探测器方面都有相应研究、生产。国际上已经在实验室研究成功 $15\sim 17 \mu\text{m}$ 的性能良好的甚长波探测器,如法国截止波长 $15.1 \mu\text{m}$ 的 384×288 探测器,美国截止波长 $\geq 17 \mu\text{m}$ (80 K)探测器。2013年,SOFRADIR公司在CdZnTe衬底上应用改良的n-

on-p工艺生长了 $16 \mu\text{m}$ 截止波长(55 K工作温度)的HgCdTe甚长波红外探测器^[69]。光电性能的测试结果显示55 K下有效像元率为99.6%。同时,暗电流的测试结果表明其与扩散电流限相符。同时,p-on-n结构二极管的结构能够将暗电流下降2个量级,该结构的应用对于提高VLWIR探测器工作温度是非常有益的。2018年Bansal等提出的石墨烯-HgCdTe双层结构被认为在77 K下可获得 $20.6 \mu\text{m}$ 的截止波长^[70]。早在2000年,JPL设计的双色QWIP器件在40 K的工作温度下即可探测 $14\sim 15 \mu\text{m}$ 的甚长波红外辐射^[71]。国内,正在发展 $14 \mu\text{m}$ 、 $16 \mu\text{m}$ 截止波长的碲镉汞和II-SLs红外焦平面探测器,部分甚长波红外探测器已经被风云气象卫星等航天工程项目采用。

(2) 甚长波探测器的技术挑战

甚长波红外探测器材料禁带宽度很窄,响应波段能覆盖甚长波的材料有能带结构可调的HgCdTe、T2SL、QWIP等材料,另外有不依赖半导体材料本征吸收的阻挡杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)材料也可以探测甚长波的红外辐射。

甚长波红外探测器材料禁带宽度很窄(E_g 都小于 0.1 eV),以获得更大的截止波长。窄禁带宽度容易形成非常大的暗电流,因此甚长波红外探测器需要更低的工作温度。Rule 07是描述HgCdTe p-on-n二极管暗电流随截止波长-工作温度乘积变化的经验公式^[72],可预测HgCdTe探测器的暗电流极限,也可以用于指导应变层超晶格(二类超晶格)、量子阱(QWIP)等探测器的暗电流抑制研究。对于78 K下的长波器件,当截止波长增大,受Auger-1复合机制限制,Rule 07得出暗电流会出现指数型的增



图10 美国DRS公司波长 λ 尺度1280×720长波红外相机(F数为1)成像的照片^[68]

Fig. 10 DRS long wave infrared camera (F#=1) imaging photos with wavelength λ and scale 1280×720^[68]

长。但 Rule 07 的适用范围较小,新提出的 Law 19 公式^[73]认为,对低温甚长波器件,暗电流的减小主要受 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合机制和背景噪声的限制(见图 11)。Law 19 给出比 Rule 07 低几个数量级的极低暗电流,为甚长波器件的发展提供了可行性支持。

HgCdTe 材料由于在红外波段的应用工艺成熟,一直是甚长波器件的首选材料。但 HgCdTe 的均匀生长问题一直是甚长波器件制造工艺的难点,若 Cd 组分 x 变化 1% 即可导致像元截止波长大于 $0.4 \mu\text{m}$ 的变化。相比 MBE, LPE 生长的 HgCdTe 有平坦的外延层和均匀的组分分布,更常用于甚长波器件的制备工艺。

二类超晶格探测器的截止波长可以精确调控,可以实现甚长波甚至太赫兹波段的探测。但是,传统结构的二类超晶格红外探测器的量子效率较低,在一定程度上限制了挑战极限性能的应用需求。受载流子扩散长度和暗电流的限制,二类超晶格无法通过传统增大吸收层厚度的方法获得高量子效率。基于 GaAs/AlGaAs 的 QWIP 红外探测器通过调节材料组分,可以在大于 $2 \mu\text{m}$ 的任意波段获得光谱响应峰值^[74]。QWIP 生长材料技术成熟,且有很好的均匀性,是甚长波红外焦平面器件的主流材料之一。但是,比二类超晶格更低的量子效率严重限制了 QWIP 甚长波的进一步发展。

微透镜阵列可以把入射到单个像元区域的光会聚到像元的吸收区附近^[75],是提高量子效率最直接的方法。集成微透镜可以减小像元产生暗电流

的体积,进而形成较小的暗电流,但存在制备工艺复杂的缺点。菲涅尔透镜通过在衬底上刻蚀同心环形成波带片作为会聚透镜,有效避免了微透镜制备难度大的问题。波带片可以对不同区域的入射光交替增加 π 的相位差,这些红外辐射到达吸收区时会具有相同的相位引起干涉增强,提高器件的光吸收系数;超表面结构将每个像元作为谐振腔^[76],红外辐射因全反射被限制在像元内部,再利用金属纳米结构的表面等离激元效应实现光的高效吸收,从而仅使用很薄的吸收层即得到很高的量子效率。

BIB 探测器利用杂质能级跃迁的光电效应探测光子^[77]。由于杂质电离能一般远小于半导体材料能隙,器件光谱响应的截止波长明显大于对应的基底半导体材料, Si 基 BIB 探测器即可用于探测甚长波红外辐射。BIB 器件的结构主要包括掺杂吸收层、本征阻挡层和电极区。掺杂吸收层的杂质能级电子被光子激发为光生载流子,在电场驱动下到达电极区形成光电流。本征阻挡层掺杂浓度低,可以有效阻挡杂质能带形成的暗电流。BIB 探测器主要探测远红外和太赫兹波段的电磁波,且需要在甚低温(液氮温区)下工作,因此主要应用于天文探测等领域^[78]。

2.2.2 高动态范围的红外光电探测器

(1) 高动态范围(HDR)的发展现状

HDR 需求来源于对高对比度场景的探测。红外光电探测器的动态范围(Dynamic Range, DR)是指兼顾对弱信号和强信号的探测。由于实际场景的对比度通常超过探测器的动态范围, HDR 成像对

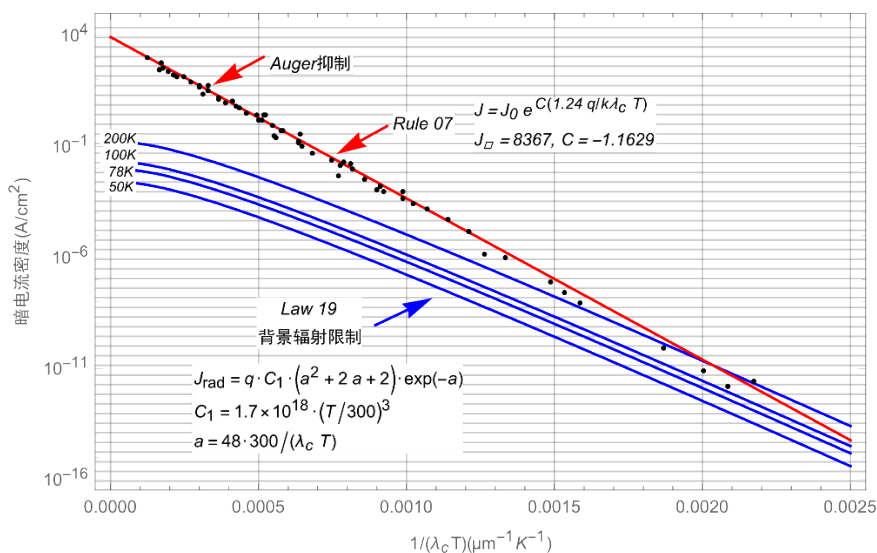


图 11 Rule 07 和 Law 19 暗电流^[73]

Fig. 11 Rule 07 and Law 19 dark current^[73]

全面获取场景信息是非常重要的。红外探测器的动态范围可以通过最大饱和光电流 I_{max} 和噪声电流 I_{min} 表示,公式为: $DR = 20\log(I_{max}/I_{min})$ 。传统的红外探测器动态范围最大约为 80 dB。先进的像素级数字化读出电路动态范围可达 90 dB,甚至达到 100 dB 以上。采用 HDR 图像合成算法可进一步提高红外探测器的动态范围。

(2) 高动态范围的技术挑战

提高红外光电探测器动态范围是从抑制探测器暗电流和提高电荷处理能力两个维度来实现。由于 I_{max} 受积分电容 Q_{sat} 和积分时间 t_i 的影响: $I_{max} = eQ_{sat}/t_i$ 。采用大积分电容、长积分时间可以探测大的光通量。但是,红外探测器向高密度像元方向发展时,会一定程度上减小积分电容设计面积利用率,导致动态范围会受到一定影响。

红外 HDR 探测方法是在读出电路(Readout Integrated Circuit, ROIC)的单个像元区域内设计两个积分电容,在白天/夜晚选用不同增益的积分电容,兼顾弱信号的高增益和强信号的低增益,以达到高动态范围的探测需求^[36]。改进的方法先对每个像元的光通量作预积分,根据光通量对每个像元分别选择合适的积分电容,即可在维持弱信号获取的同时提高探测器的动态范围^[79]。但这种预积分设计导致器件存在比较长的响应时间,难以探测快速移动的目标。

在积分时间内设置几个采样点,积分电容的电压在积分时间内被多次采样,若像元的输出电压高于阈值电压,则将该像元复位重新开始曝光,像元输出电压要乘以复位次数再输出^[80]。采样的次数越多,器件的动态范围也就越大。但如果阈值电压或积分电容电压在采样点出现变化,输出信号可能会出现失真。基于对每个像元的单独调控^[81],可有效地响应快速变化的输入信号,获得有高信噪比的 HDR 成像^[82]。

对数-线性模式的 ROIC 是利用积分电容电压与光电流的非线性关系提高探测器动态范围的方法。人眼有很高的动态范围,仿照人眼的对数响应曲线,红外探测器的响应曲线在动态范围内呈现非线性关系,但往往可以划分为几个线性的部分。对于较弱的信号,仍采用传统电路的线性积分模式,有较高的信噪比;对于较强的信号,则采用非线性的对数响应模式,明显提高探测器的动态范围。

像元级模数转换(Analog-to-Digital Conver-

sion, ADC)是利用数字信号实现 HDR 成像的新方法。像元 ADC 积分的本质是由电流-频率转换来取代传统读出电路电流-电压转换。相比芯片级、行列级 ADC,像元级 ADC 在像元内直接完成模拟信号到数字信号的转换。由于数字信号的传输抗干扰能力强,可以明显减小读出电路引入的噪声,探测器信噪比大大提高。像元级 ADC 通过对光敏电流转换的数字脉冲信号积分获得输出信号,规避了模拟信号积分受电源电压和积分电容限制的问题。通过增加读出电路数字信号的位数,可打破动态范围受读出电路积分电容的限制^[79]。法国 Sofradir 公司在 2013 年报道了 25 μm 中心距 320×256 长波(波长 9.2 μm)红外探测器,采用 15-bit 像素级 ADC,实现了动态范围大于 90 dB、峰值 NETD 为 2 mK 的探测性能^[83]。

2.3 超高时间分辨率

时间分辨率是同一场景相邻两次成像的最小时间间隔。时间间隔越小,时间分辨率越高。高速运动目标跟踪的探测对红外探测器的响应速度提出很高的要求,高速运动目标的成像在空间与时间上快速变化,要求红外探测器有超高的时间分辨率以获得清晰的成像。超高时间分辨率要求在极短的积分时间内对目标快速成像并输出,对红外探测器的响应时间、内部增益、输出帧频等都提出更高要求。

2.3.1 雪崩光电红外探测器

雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)是具有低噪声因子、高内部增益的器件,对微弱信号有很强的探测能力,可以在极短的积分时间内检测极低的光通量获得高速成像。APD 红外探测器在高速探测、三维测距、主被动结合成像等方面发挥着重要作用。

APD 红外光电探测器通过二极管的雪崩效应获得很高的内部增益,通常有盖格和线性两种工作模式。

在盖格模式下,载流子无限制地雪崩增加会导致器件损坏,需要通过读出电路复位中断雪崩过程并重置偏置电压才能开始下一次探测,恢复过程中器件无法对入射的光子响应,称为 APD 器件的死区效应^[84],恢复过程所需的时间称为死区时间。读出电路中通常要设计淬灭-复位电路,减小死区时间以提高 APD 器件的时间分辨率,新提出的 APD 红外器件的时间分辨率已能做到几十纳秒的数

量级^[85, 86]。

在线性模式下,入射光激发的载流子受较大反向偏置电压产生的强电场作用,不断加速获得很高的动能,与晶格作用激发更多的载流子。载流子电场加速-碰撞电离-产生新载流子的过程导致载流子浓度急速增加,从而将入射的微弱光信号快速放大为读出电路可检测的电信号。放大过程不改变信噪比,且输出电流与入射光子数呈线性关系(见图12),APD器件已广泛应用于低通量、高速的红外探测器。

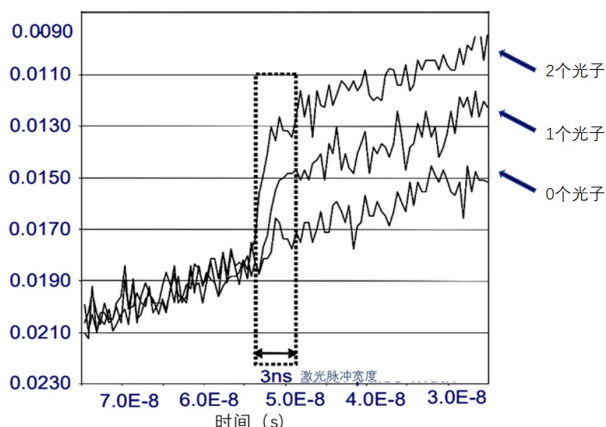


图12 碲镉汞线性APD探测器具备光子分辨能力^[87]

Fig. 12 The HgCdTe linear APD detector has photon resolution^[87]

由于HgCdTe的空穴-电子电离系数比可通过组分调节,适合制备电子型和空穴型的APD器件。将载流子加速到碰撞电离所需的电场强度不仅取决于探测材料的能带结构,也取决于材料中的载流子散射机制。获得较高的信号增益需要施加较大的反向偏置电压,导致APD器件的暗电流指数性增加,对微弱信号探测造成严重的噪声干扰。碰撞电离噪声是强反向偏置电压所引入的主要噪声,载流子碰撞电离的过程有不同的电离系数,导致器件的增益出现随机变化,随机变化的平均强度用过剩噪声因子^[88, 89]表示。McIntyre唯象理论^[90]给出理想APD器件过剩噪声因子的计算值为2。HgCdTe材料的空穴与电子的碰撞电离系数差异大,SWIR和MWIR碲镉汞材料空穴与电子的碰撞电离系数比分别远大于1和远小于1。这使得HgCdTe APD特有单载流子工作机制,且几乎无过剩噪声,已有过剩噪声接近1的器件报道^[91]。常见的结构包括PIN型、SAM型、HDVIP型等,各结构都设计了低掺杂的倍增区以加大空间电荷区宽度,用于载流子的雪崩

增加。

采用线性模式的碲镉汞APD红外探测器可以实现主被动双模的工作方式。在被动模式下对大视场进行成像、搜索,当发现具体目标后,再在主动模式下对目标进行三维成像,获得目标的详细信息。三维成像时采用门限开关控制,利用时间控制电路控制探测器开启的时间点以及曝光时间,就可以形成不同位置处的图像,从而组成探测目标的三维图像。瞬时光子分辨三维成像芯片能够同时获得目标的三维强度(灰度、红外辐射)信息和距离信息,为目标探测和识别提供新的自由度,显著提高光电探测系统在复杂环境下的目标识别能力,提高系统的高速实时探测能力以及小型化、集成化程度,将引领未来近20年三维红外探测器的发展。

碲镉汞雪崩器件的雪崩因子接近于1,基于碲镉汞材料的瞬时光子分辨三维成像光电感知芯片的发展,能够准确获取倍增下的入射光子数。法国First Light Imaging公司生产的基于HgCdTe e-APD的C-RED One相机,具备低于一个电子的读出噪声^[92],具有极高的帧频与灵敏度,是应用于自适应光学、空间碎片跟踪、超光谱成像、条纹跟踪和干涉仪等的绝佳选择,在天文探测和医学成像等方面具有重大的应用前景;美国DRS公司研发的单光子HgCdTe APD探测器在空间雷达和行星探测上具有重大应用前景。

InGaAs/InP、II-SLs等III-V族半导体材料也可以发展APD红外焦平面器件,特别是用于1.06 μm和1.55 μm光纤通信的高速、低噪声单光子探测器。减小暗电流是目前III-V族APD红外焦平面器件的关键,同时基于微透镜、金属-绝缘体-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)的表面等离子共振结构等提高器件量子效率也非常重要。III-V族APD红外焦平面器件在大的反向偏置电压来驱动电子、空穴同时发生雪崩时,过剩噪声因子一般在4~5。由于过剩噪声比较大,III-V族APD红外焦平面器件一般不适于工作在线性模式,而是选用盖格模式。

2.3.2 高帧频红外探测器

人眼能识别的视频帧频大约在24 Hz,早期红外探测器实时成像的帧频达到25 Hz即可满足人工分析的要求。随着红外图像分析逐渐由计算机辅助完成,目前常规红外探测器实时视频输出的帧频一般在50~60 Hz。在机载红外探测、卫星遥感等数据量大、实时性要求高的领域,红外探测器的帧频

可达到 200 ~300 Hz。在生物化学反应超高速成像等科学研究领域,定制的红外探测器帧频可达 1500 ~10000 Hz^[93]。

限制红外探测器帧频提高的主要因素是对微弱信号的探测能力。常规红外探测器的成像需要一定的积分时间,让入射光子积累足够强的信号以区别于噪声。增大光学系统孔径、抑制器件暗电流对提高红外探测器的帧频有一定作用。但要获得超高帧频的红外探测器,需要探测灵敏度达到几个光子的水平。早期的高帧频红外探测器采用光电倍增管,目前主要通过 APD 器件实现。

高帧频的红外探测器需要从焦平面阵列快速读取、传输,特别是大规格器件对读出电路的数据传输能力提出更高要求,对实时图像增强算法的软硬件也形成一定压力。以色列 SCD 公司最新提出规格达到 2560×2048 的产品 CRANE 帧频最高可达 140 Hz,若按每像素量化比特为 12 bit 计算,视频信号输出的速率高达 8.81 Gbps,超过 USB 3.0 接口的最大传输带宽 5 Gbps,需要使用专门的视频输出接口。

2.4 超高光谱分辨率

光谱分辨率是光谱成像上能够详细区分电磁波谱的最小波长范围,是表征图像分辨目标光谱细节的重要参数。实际应用探测的红外辐射一般不是单一波长,而是包含丰富的光谱(颜色)信息。但是,传统红外探测器只能探测灰度图像,双色/多色探测器也只能探测几个不连续的波段。为实现对目标更精确的识别,红外探测器在红外成像的同时也需要获取图像的光谱信息,其中最具代表性的是红外高光谱技术。至今,红外光电探测已经实现了由灰度成像→双色成像→光谱成像的发展,提出能力也实现了由成像感知→双色认知→图谱识别的提升(见图 13)。

高光谱技术可以获得目标的空间信息和光谱信息,大大提高了红外探测目标识别能力,在遥感探测、医学检验等方面逐渐显现应用潜力。高光谱技术在传统成像技术的基础上,基于面阵探测器与光谱细分、扫描机构结合,空间维的每一行像元接收目标的不同细分特定波长区间的辐射信息,从而在二维图像上附加一维光谱信息形成数据立方^[94]。实现高光谱成像的方法包括空间扫描、光谱扫描等。

空间扫描型的高光谱探测器焦平面阵列一般采用一维为空间维(列方向)、一维由空间维改为光谱维(行方向)的方式设计,空间维的像元数量一般明显大于光谱维。不同行像元有不同的中心波长,光谱采样间隔低至 5~10 nm,对应几十乃至几百个光谱测量通道,获得精细的光谱测量信息。同一行的像元有相同的中心波长,获得线列型的成像,再通过一维线列的空间扫描即可获得二维成像。空间扫描同时也让目标成像扫过光谱维,二维成像的每一像元都含有完整的光谱信息。

光谱扫描型的高光谱探测器主要依赖于旋转滤光片、声光调制器等可调谐窄带滤波器进行光谱上各波段的扫描,仅允许特定波段的光透射到红外焦平面阵列上成像,再根据多次成像对应波段还原完整的高光谱信息。由于在光谱扫描过程中探测器保持对同一目标的观测,有效避免了频繁的光学系统对焦过程。随着新型分光技术不断提出,光谱扫描型高光谱探测器的光谱分辨率快速提高。

高光谱探测器需要极低暗电流水平,以减小光谱细分后信号弱的影响。目前,国际上高光谱短波红外探测器的暗电流水平达到了 0.06 e/s/pixel@100 K^[95],这为光谱细分的进一步减小(即提高光谱分辨率)奠定了基础。

近年来,随着高光谱技术的覆盖波段快速增

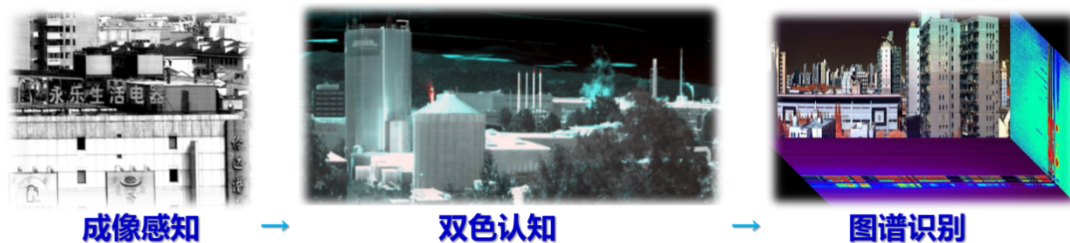


图 13 红外光电探测器成像感知、双色认知、图谱识别的三个探测水平

Fig. 13 Three detection levels of infrared photon detector: imaging perception, two-color recognition and spectral image recognition

加,红外探测器空间分辨率及光谱分辨率不断提高,在“天宫一号”、“高分五号”、“资源二号”等卫星平台上已出现国际领先水平的高光谱成像仪^[96],在环境监测、矿产勘探等方面发挥重要作用。

3 四代红外光电探测器

当前红外光电探测器以探测目标辐射强度为主要技术手段,以提高空间分辨率、视场范围、温度灵敏度等性能为主要目标,实现对目标的感知。未来光探测感知系统迫切需要实现光场信息特征和目标距离特征等信息的多维度获取,采用一定算法将各影像数据中所含的信息优势互补性有机结合起来,融合成新的更高维度的影像数据,以此增强目标图像的对比度,提升探测系统的识别和抗干扰能力,提高光电探测系统对动目标、弱目标和小型伪装目标的侦察感知能力,增强对复杂战场和气象环境的适应性。

为满足多维信息融合与平台灵巧化的应用需求,不同维度探测功能的物理实现应尽可能达到小型化、集成化的目标。随着超表面等人工微结构学科的兴起,新一代红外光电探测器发展芯片级光场调控集成技术,实现光强、光谱、偏振、相位等多维信息融合。这颠覆了传统光学系统与红外光电探测器的分立模式限制。目前,国际上普遍认为集成了偏振、光谱、相位等光场调控人工微结构的红外焦平面探测器,是未来的四代红外光电探测器(图14)。

3.1 像素级偏振集成红外探测器

偏振描述光在传播过程中电矢量的振动方式,不同目标表面辐射或反射光的偏振信息存在一定的差异,为红外探测器获取信息提供了一个新的自由度。反射光的偏振受物体表面形状、材料等影响,附加偏振信息的红外成像可以大大提高不同物体之间的对比度,对目标识别有重要价值。红外探测器检测偏振信息的方式包括光学系统附加偏振

片、焦平面阵列集成线偏振光栅、超表面相位调制、偏振敏感吸收器等。

光学系统附加偏振片是最直接地检测红外辐射偏振的方法,旋转线偏振片即可直接在焦平面阵列上获得不同偏振情况的红外成像^[97]。这种方法只能对不同偏振的光多次成像合成,存在响应速度慢、图像校准困难、受抖动影响大等问题。另外,旋转偏振片的机械结构会明显增加光学系统的复杂度,导致整体成本居高不下。此外,采用分光系统将入射光通过不同偏振片后,在多个红外探测器上同时成像的方法,但相关的光学系统设计复杂,成像效果也不尽人意。

焦平面阵列集成线偏振光栅方法是指在像元表面集成亚波长尺度的微纳光栅阵列,单个像元只能接收特定偏振方向的红外光,相邻几个像元设置了偏振方向各不相同的偏振光栅,在同一焦平面阵列上即可获得各偏振方向的实时红外成像^[98,99]。图15是偏振集成的红外光电探测器工作原理,红外辐射在入射到红外探测器前进行光场偏振调控。相邻的四个像元组成一个超像元,与一组斯托克斯矩阵的偏振光栅对应。这一方法相当于将多个像元分别获得不同的偏振成像,然后作为单个像元的信号融合,会显著降低探测器的分辨率,需要通过超分辨率重建技术提高红外图像的分辨率^[100]。偏振片在探测器衬底的集成也容易导致焦平面阵列的不均匀和热失配等问题,其中最大的难题是偏振矩阵与红外探测器像元阵列空间上中心轴重合的制备问题。

超表面可以给入射光附加偏振相关的相位,通过适当的设计可以使不同偏振的入射光受到不同的调制。偏振选择的超表面可以作为分束器,将两种偏振光分别向两个方向偏转,实现不同偏振光分别成像。工作在红外波段的线偏振分束器已获得90%以上的效率^[101]。在主动探测领域方面,利用正



图14 四代红外光电探测器的核心架构与技术内涵

Fig. 14 Core architecture and technical connotation of the fourth generation infrared photon detector

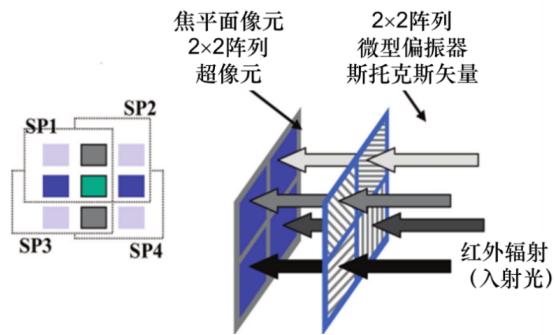


图 15 偏振集成的红外光电探测器示意图

Fig. 15 The schematic diagram of polarization integrated infrared photon detector

交的偏振光照射目标,通过偏振敏感超表面器件分光,可以获得目标的全息成像。新的研究还可以给包括椭圆偏振在内的任意一组正交偏振光提供完全独立的相位调控^[102]。但超表面器件的工作方式一般是固定的,对偏振响应的动态调节还有待研究。

偏振敏感吸收器具有一定的偏振敏感吸收特性,对不同偏振的光有不同的吸收谱。基于表面等离子激元的金属-绝缘体-金属(MIM)探测器对偏振有高度敏感性^[103]。MIM探测器在像元上集成金属结构的等离子体谐振腔以获得高量子效率,与谐振腔垂直的线偏振光几乎被完全反射,获得的最高极化比达到52%^[104],对以极化为编码模式的量子保密通信有重要作用。

基于反射物理学的偏振产生模型,物体表面反射光的偏振特性可用于分析物体表面性质。Levenberg-Marquardt算法是最著名的算法,通过求解多次偏振成像获得的非线性方程组计算物体表面的等效折射率^[105]。在被动探测(一般以太阳为照明源)的情况下,现有算法可利用不同入射角收集成像信息,用于目标材料的识别与分类^[106],但背景噪声的去除仍是相关算法亟待解决的问题。

主动探测获取红外辐射的偏振信息可以用于表面结构的3D重建。利用两束正交的偏振光照射目标,获得不同偏振方向的相移图像,再通过算法重建目标表面的形状^[107]。相比于传统的条纹投影相移法,基于偏振的方法可以测量高速移动物体、快速变化物体的表面形状,但仍面临物体表面去极化、背景噪声等问题。

3.2 可调谐光谱的红外探测器

相比于三代红外探测器对光谱信息的探测依赖空间推扫的机械结构,四代红外光电探测器利用

微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)技术可以直接在焦平面阵列上集成可调谐滤波所需的微传感器和微机械结构,从而实现光谱信息的自适应探测。

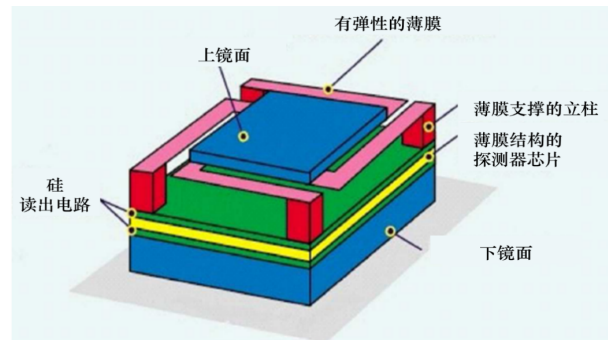


图 16 DARPA 自适应焦平面阵列单元结构示意图

Fig. 16 The schematic diagram of DARPA adaptive focal plane array cell structure

MEMS技术在衬底表面制造微型的法布里-珀罗谐振腔结构,仅允许特定波长的光透射,实现微型滤波器的功能。2005年,美国国防部先进研究项目局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)开始开展“自适应焦平面阵列(Adaptive Focal Plane Array, AFPA)”研究计划,旨在开发探测谱段可随目标特性智能调谐的高性能高集成度的焦平面阵列。图16所示为这种自适应多光谱成像原理示意图,其核心部分为集成了可调法布里-珀罗(F-P)滤光片的红外焦平面探测器组件。F-P可调滤光片结合了MEMS工艺技术与光学薄膜技术,通过电压控制调节两反射镜之间的距离,改变滤光片的中心波长,从而实现光谱通带范围的调谐。

2005年,在DARPA的资助下,洛克威尔科学公司(Rockwell Scientific Co.)首次报道实现了在长波红外波段(LWIR, 8.0~10.7 μm)内的窄带光谱(带宽约100 nm)大范围调谐及中波红外波段(MWIR, 3~5 μm)宽带透过的静电致动MEMS滤光片阵列^[108]。其报道了4x4可调谐滤光片,单个可调谐滤光片单元尺寸为200x200 μm ,并通过L型悬臂支撑实现滤光片上下移动。研究过程中实现了复杂的微光机电系统(Micro-Opto-Electro-Mechanical System, MOEMS)滤光片与红外探测器芯片的工艺集成。2015年,该项目又报道了最新的研究成果,单独控制8x24个滤光片阵列单元,并且将MEMS驱动电路与可调谐滤光片混合集成。MEMS集成微型滤波器的短波红外器件透射波长调节范围可达800

nm,中波红外器件的调节范围可达到900 nm^[109],长波红外器件的调节范围则可达到3000 nm^[110]。

近年来采用新型人工电磁微结构进行光谱调控发展较快。2014年,斯坦福大学Brongersma教授课题组利用表面等离子激元结构实现了对可见光的热电探测。同年,莱斯大学Halas教授课题组将铝栅嵌入到了互补性氧化金属半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)光电探测器中,实现了光电探测器的窄带选频。2017年,Padilla课题组研制了超材料微结构红外热电探测器,实现了对10.76 μm且半高宽仅有560 nm的红外辐射选频探测。

再通过电路读取处理目标数据,经过自适应算法对图像数据分析,通过反馈电路对可动反射镜进行调节,由此实现自适应于变化的环境和任务的探测谱段调节。智能光谱成像算法可以产生一组最佳的响应波长,并根据环境预测目标光谱特征和实时直接测量。

微光机电系统(MOEMS)技术将微光学、微电子和微机械相结合,实现微光学元件的动态调控。将MOEMS技术与光电探测技术进行融合,利用MOEMS技术替代原有的分立式光机分光系统,能够解决多光谱成像系统体积、重量、功耗大的问题,并可颠覆传统光谱成像系统的架构,提升其智能化水平,具有广泛的平台应用前景。具有波长可调谐功能的中波探测微型系统,可获取目标的多个光谱信息,具备更强的目标识别探测能力和环境适应能力,具有广泛的军用和民用前景,已经得到国外相关研究机构的广泛关注,并可视为是未来光电感知微系统的发展方向之一。

3.3 相位调制的红外探测器

相位是光传播过程的基本参数之一,主动探测中检测目标散射光的相位可以获得目标的距离信息,甚至实现全息成像,对探测目标实现更精确的识别。传统红外焦平面器件无法直接获得入射光的相位信息,一般需要结合干涉仪(相移法^[111])、微透镜阵列(波前传感法^[112])等组件实现波前相位检测,导致系统设计非常复杂。近年来,提出了过采样成像、相空间断层扫描、散焦成像、菲涅尔衍射成像等非干涉相位成像技术。

相移法是三维形状测量的常用方法,相位编码的数字条纹投影技术将码字嵌入到周期性条纹的相位中^[113, 114]。由于相位受背景噪声、目标对比度等

因素影响较小,相位编码的条纹测量有较强的抗干扰能力。照射目标的探测光强度是条纹状分布,改变条纹相对相位,利用探测器对目标多次成像,即可计算出探测目标的缠绕相位梯度分布,还原目标的3D表面结构。

过采样成像技术是最容易应用到红外探测器的相位检测技术。由于光学系统孔径的限制,入射光受空间频率的低通滤波器调制,焦平面上的成像是尺寸大于像元中心距的光斑,导致像元间的光学串音。光学串音是相邻像元间电场的相互耦合,像元边界处的信号强度与电场之间的相对相位有关。过采样成像技术通过已知相位参考像元的适当排列,检测像元边界处的信号强度,即可计算所有像元的电场相位,同时利用相位相干减小串音^[115, 116]。这种方法不需要相位检测参考波,且一次成像即可获得相位信息。

超表面是亚波长单元结构在二维平面上的排列,对电磁波有任意的相位调控能力。不同于传统光学元件利用传输过程实现光的相位积累,超表面器件可以获得光的相位突变,相位的改变取决于超表面的结构设计,由广义斯涅尔定律描述^[117]。通过设计双曲线型的相移轮廓,超表面器件可以实现类似透镜的会聚/发散功能,且有明显小于透镜的像差^[118],有望取代红外探测器的光学成像系统。编码超表面将超表面结构与数字编码结合,在超表面结构上实现数字信号处理。根据傅里叶卷积定理,可以对超表面单元结构进行编码卷积处理^[119],利用超表面实现高效的相位全息成像^[120, 121]。

红外全息成像技术具有穿过烟雾、火焰进行成像的能力,在军事侦察、消防救援等存在明显背景噪声的领域有重要应用^[122, 123]。现有的红外全息成像基本通过激光照射目标反射后与直接照射到焦平面上的参考光形成干涉条纹,来获得探测器与目标间的距离信息,进而扫描获得目标的三维成像。

4 红外探测器的未来发展趋势

随着信息化社会人工智能物联网(Artificial Intelligence of Things, AIoT)趋势在各领域的快速普及,红外信息的复合探测和智能处理是红外探测技术向更多领域普及发展的必由之路,红外探测器正在由单一的传感器向多维信息融合成像、片上智能化的红外光电探测器发展。在片上集成光场调控人工微结构的四代红外光电探测器基础上,通过3D堆叠发展片上红外信息获取、信号处理、智能决策

的变革性红外光电探测器(见图 17)。

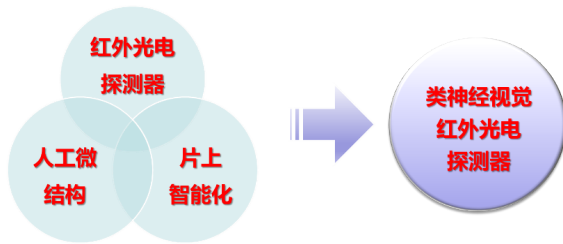


图 17 新概念红外光电探测器的核心架构与技术内涵

Fig. 17 Core architecture and technical connotation of new concept infrared photon detector

基于片上集成与智能化处理技术,新型智能化信息处理光电探测器具有片上像元计算、并行输出、基于事件驱动的低功耗特征,可大幅提升特征提取等光电探测系统并行、分步计算、智能化水平。薄片式柔性化超高灵敏度光电成像、全光场信息自适应高灵敏度光电成像、新型智能化信息处理等新概念的光电探测器技术将极大地颠覆目前的传统光电成像探测器技术领域,在情报侦察、夜视观瞄等军用领域和安全监视、资源探测、污染防控、能源利用、交通运输、物流管控、物联网、移动装备、自动驾驶、智能制造等工业、民用领域具有广阔的应用前景。

4.1 片上 3D 集成红外光电探测器

未来图像传感器将继续向高度集成化和智能化方向发展。到目前为止图像传感器的发展都是在模仿和接近人眼的观测效果。智能化系统的集成将在真正意义上实现图像传感器对人眼的超越。通过将测距、通讯、定位、温度传感器及数字信号处理等功能在片上智能化系统的集成,进行图像增强,获取多种人眼无法获取的信息,并实现各单位间的信息实时共享,在夜间单兵作战和协同作战中将发挥巨大作用,在车载导航等民用领域也能大幅提高获取信息的丰富性,让使用者有更加准确的预判,提升驾驶安全性。

美国 DARPA 在 2009 年开展了垂直集成传感器阵列 (Vertically Integrated Sensor Array, VISA) 项目计划,将探测器、模拟集成电路 (Integrated Circuit, IC) 和数字 IC 通过三维结构设计,实现焦平面阵列的三维堆叠(见图 18)。

由于在 ROIC 集成信号处理电路容易对探测器芯片产生散热、噪声等问题,传统红外探测器只能

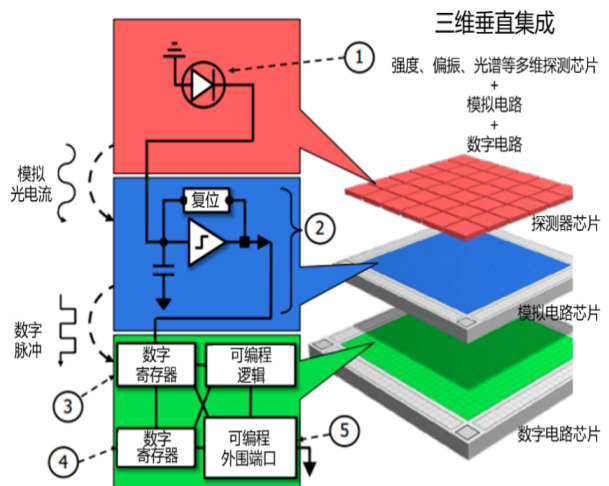


图 18 片上 3D 集成红外光电探测器的概念

Fig. 18 3D integrated mode of readout circuit for on-chip intelligent infrared photon detector

输出芯片所成的原始图像,图像的校正、分析与目标识别都需要输出后再进行处理,对红外探测器的普及应用造成了限制。随着集成电路工艺的进步,为提高红外探测器的灵敏度和信息快速处理能力,高性能、低功耗的片上集成芯片逐渐应用于红外探测器的片上数据处理、智能化分析与决策。

图像信号处理 (Image Signal Processing, ISP) 芯片最先集成到热成像仪,提供嵌入式的图像处理功能,已在商业产品上获得应用^[124]。受红外探测器制造工艺的限制,像元响应率可能出现不均匀分布,所成的原始图像存在严重噪声,需要经过多次校准。ISP 芯片可以对原始数据作特定算法处理并同步输出,校正焦平面阵列的像元缺陷、不均匀等问题。集成 ISP 芯片可以简化探测器组装过程中的校准步骤,降低相关产品的使用门槛。

片上集成系统 (System on Chip, SoC) 是在红外探测器上集成了稳压电源、时钟信号、模数转换、信号处理等功能的电路模块,一般支持根据不同的红外探测器设置输入信号参数、自定义图像处理算法等复杂的功能。目前大多数基于传统 ROIC 的红外探测器输出信号为模拟输出,SoC 可以将探测器输出的模拟信号进行高速、多通道的片上模数转换。转换的数字信号输入到 CPU 做进一步处理分析。CPU 支持通过自定义算法实现数据缓存、非均匀校正、盲元处理、图像增强、灰度变换、数码变焦等功能,还可以通过人工智能算法实现目标识别等功能,为可穿戴的智能设备提供了完整的解决方案^[125]。由于减少了数据输出到外部处理器的过程,

红外探测器的响应速度和功耗都有一定改进。

4.2 曲面红外光电探测器

平面探测器是制约红外成像技术向大视场高分辨探测发展的关键问题。对于天文探测等领域,红外探测器的光学系统一般会设计非常大的口径,容易产生像场弯曲。现代大视场、高分辨率红外成像探测需要采用复杂的光学系统以减小像差,提高光学分辨率。额外的光学元件导致高分辨系统体积重量庞大、成本昂贵,限制了探测系统的通用性。

仿生学一直以来都给了人类很多的启发。而人眼作为一个极其重要的器官也对探测器存在着很多的指导意义,引发了曲面红外成像芯片的创新。曲面红外焦平面阵列可以一定程度地校正系统的光学像差、减小光学系统的复杂度,获得更高质量的红外成像。得益于赋形技术的发展,曲面器件在弯曲的情况下仍能保持相同结构平面器件的性能。曲面探测芯片引入了球面曲率这一新的参数,可以按照光学系统的成像效果、Petzval 曲率等设计曲面的焦平面阵列以减小场曲像差^[126],从而允许光学系统采用更加简单和紧凑的设计,同时也允许焦平面阵列继续向更高分辨率发展。

为适应实际光学系统的成像效果、进一步消除像差,焦平面阵列的形状不能用统一的曲率半径描述,甚至不具有很好的旋转对称性,需要通过正交多项式数学模型进行自由曲面设计^[127]。国际上大规模曲面型 Si 面阵探测器的研究已取得很大的进展。2012 年,法国从事红外探测器技术研究的 CEA-Leti 研究中心已立项开展曲面型混成红外焦平面探测器技术的研究工作,并在 2014 年演示了碲镉汞曲面红外探测器的成像效果^[128]。

4.3 柔性红外光电探测器

复杂形状焦平面阵列的制造依赖于导电聚合物、单壁碳纳米管(Single-Wall carbon NanoTube, SWNT)、石墨烯等柔性材料和波浪状、马蹄状等可拉伸的金属互连结构^[129, 130]。超表面也可以集成到弯曲基板或柔性材料上,发挥接近平面器件的各种功能。

目前柔性红外探测器主要基于透明基板和有机半导体薄膜材料开发,在柔性有机太阳能电池、有机发光二极管等方面逐渐呈现潜在的应用^[131]。柔性有机太阳能电池采用紫外、红外吸收,可见光透明的有机材料,可以在日常场景中大范围安装使用而不造成太多影响,甚至直接安装到电子设备表

面,显著降低相关产品制造成本。利用柔性有机材料开发的红外探测器已可用于近红外和中红外的红外辐射剂量检测。

在全新的二维光电探测体系中,二维材料的纵向尺度仅为原子级,使得其具有柔性、超薄透明等特点,同时其二维面内超高的载流子迁移速度、室温下高光电转换能效造就了二维材料在非制冷、柔性可穿戴红外探测器技术等未来军事应用领域的发展前景。这种柔性探测器可与各种可穿戴设备、大视场曲面探测系统进行完美集合。

2015 年,美国 DAPRA 和 ARL 已经展开以石墨烯、2D-BNCO 为基础的红外成像设备,如夜视镜。2017 年,西班牙光子科学研究所(ICFO)研究人员展示了首个石墨烯和 CMOS 的单片集成电路,基于石墨烯和量子点(Quantum Dot, QD)实现了由数十万个光电探测器构成的宽光谱高分辨率图像传感器,光谱响应范围从紫外、可见光到红外(图 19)^[132]。

近年来,随着二维材料体系新成员的不断增加,新型高迁移率材料的出现,例如黑磷、狄拉克材料、Weyl 半金属等具备类似于石墨烯能带结构但性能却比石墨烯更加丰富多样,从而激发人们探索在石墨烯基础上实现材料性能的飞跃。

二维材料发展日新月异,其在电子、光子、光电子方面已经展示出了优异的性能,突破了很多传统材料和物理的极限。基于二维材料红外探测增强技术势必引发电探测技术的跨越发展,颠覆现有光电探测器在低成本、高工作温度、柔性以及高性能方面不能兼顾的瓶颈。基于二维材料带来的变革性机遇,有望实现高灵敏、高速、非制冷以及多谱段工作的红外光电探测器。

4.4 类神经视觉红外芯片

20 世纪 90 年代,美国加州理工学院的 C. Mead^[133]和日本东京大学的石川正俊^[134]等人就提出了视觉芯片的概念,视觉芯片将图像处理 and 图像传感器集成在一起。视觉芯片是一种仿生处理芯片,图像传感器相当于人类视觉系统的视网膜,而图像处理器采用多级异构并行处理架构,类似人类的视网膜以及大脑。视觉芯片符合视觉图像处理特征,因此能够以很高的速度完成图像的获取和处理。最早的视觉芯片采用模拟电路实现,随着 CMOS 工艺和设计技术的不断进步,视觉芯片都采用数字化的方式实现。

随着科学技术的不断进步与发展,红外光电成

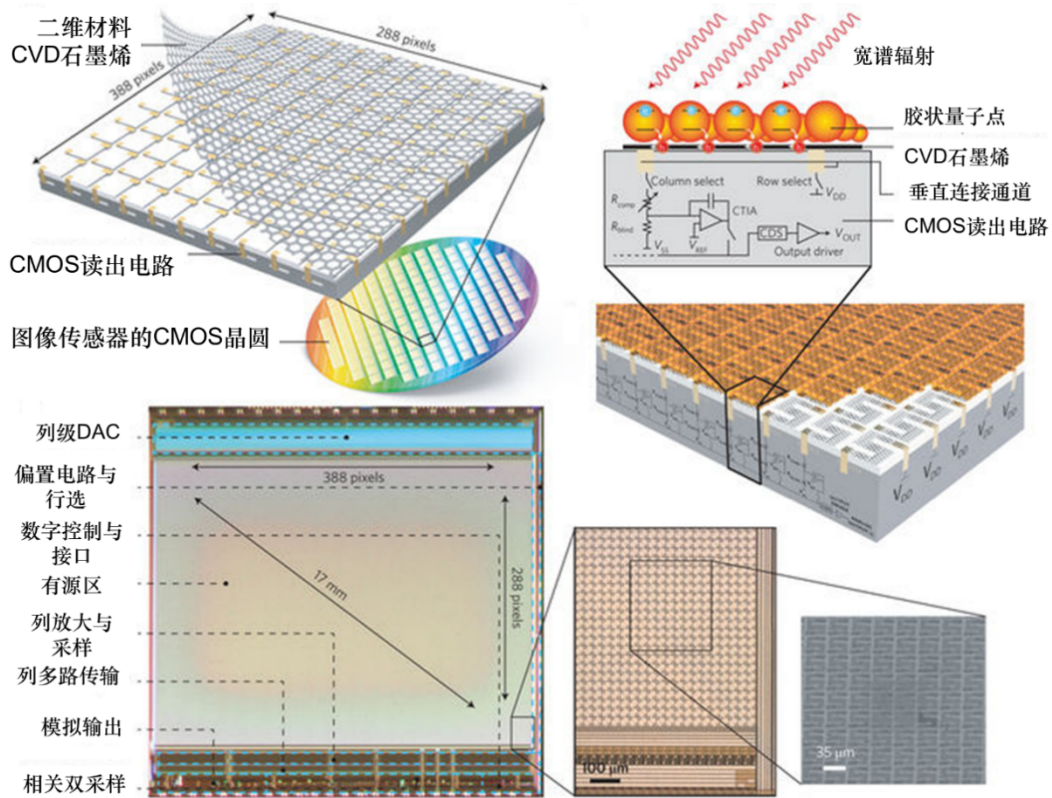


图 19 基于量子点-石墨烯-CMOS的紫外+可见+红外宽谱图像传感器^[132]

Fig. 19 Ultraviolet, visible and infrared wide-spectral photon detector based on QD and graphene CMOS 2D material^[132].

像器件向着高分辨、高动态范围、高帧率、三维成像、宽光谱等重要方向发展,红外成像器件的输出数据量呈现指数增长。将红外光电探测器和神经形态的处理器进行集成,就构成了所谓的神经形态视觉红外光电探测器,其核心功能在于红外光电成像后即进行图像大数据的实时处理,需具备片上自主学习甚至自主决策等更多、更复杂的智能化处理功能(见图 20)。在红外成像器件内部进行数据处理,实现片上类神经视觉是未来红外光电成像器件发展的必然趋势。

例如,可见光的人脸识别是图像传感器类神经视觉应用最重要的研究方向。而红外成像提供了更多的光谱信息,同时可以测量目标温度,红外成像与可见光成像结合的人脸识别可以大大提高识别的准确率,特别是在暗光条件下有明显优势^[135]。先后有基于偏最小二乘法、深度感知映射技术、耦合神经网络、生成对抗网络、耦合深度卷积神经网络、耦合独立分量分析等框架的可见-红外人脸识别算法提出^[136-138],在图像增强、人脸特征提取、身份识别等方面取得了大量成果。

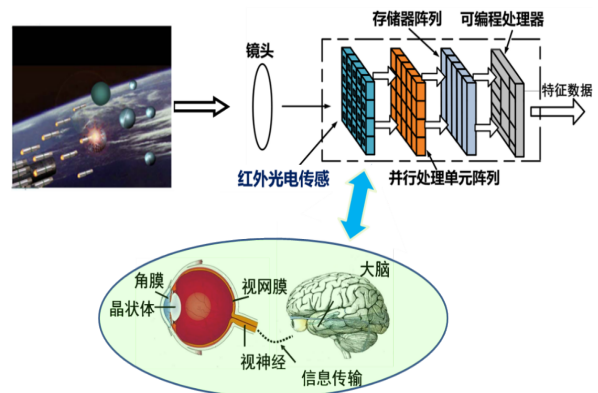


图 20 类神经视觉红外光电探测器的概念

Fig. 20 Concept of neural vision infrared photon detector

5 结束语

红外/光电探测器已经完成了第一代、第二代的研究与实用化。三代红外光电探测器主要针对战术泛在化、战略高性能的应用特点,重点发展 SWaP³ 概念的红外光电探测器,目前技术基本突破、部分开始进入装备。高端三代红外光电探测器则趋于挑战超高分辨率、超高能量分辨率、超高时间分辨率和超高光谱分辨率等光强探测的极限性能。

同时,正在发展人工微结构和红外光电探测器的片上集成技术,实现强度、相位、偏振、光谱等多维光学信息融合的四代红外光电探测器。结合四代红外光电探测器的发展,突破红外光电探测器读出电路3D堆叠技术,实现红外辐射信息获取、信号处理、智能决策的片上感存算一体化,进而推动红外光电探测器的跨越与革新。

可以预期,红外光电探测器正朝着“挑战光强探测极限→全光信息融合集成→片上智能化/类神经视觉红外探测器”的技术趋势持续蓬勃发展、方兴未艾。

Reference

- [1] Lawson W D, Nielsen S, Putley E H. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1959, **9** (3-4): 325-329.
- [2] HU Wei-Da, LI Qing, CHEN Xiao-Shuang, et al. Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*. (胡伟达,李庆,陈效双,等.具有变革性特征的红外光电探测器.物理学报), 2019, **68** (12): 120701.
- [3] Yann R, Taalat R, Brunner A, et al. Infrared SWAP detectors: pushing the limits: Proc.SPIE, 2015[C].
- [4] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M, et al. Trends in Performance Limits of the HOT Infrared Photodetectors: Applied Sciences[Z]. 2021: 11.
- [5] Martyniuk P, Rogalski A. Comparison of performance of quantum dot and other types of infrared photodetectors: Proc.SPIE, 2008[C].
- [6] Revathi C, Rajendra Kumar R T. Chapter 7 - Enzymatic and Nonenzymatic Electrochemical Biosensors [M]. Fundamentals and Sensing Applications of 2D Materials, Hywel M, Rout C S, Late D J, Woodhead Publishing, 2019, 259-300.
- [7] HU Wei-Da, LIANG Jian, YUE Fang-Yu, et al. Recent progress of subwavelength photon trapping HgCdTe infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (胡伟达,梁健,越方禹,等.新型亚波长陷光结构HgCdTe红外探测器研究进展.红外与毫米波学报), 2016, **35** (1): 25-36.
- [8] Ye Z H, Zhang P, Li Y, et al. Photon trapping photodiode design in HgCdTe mid-wavelength infrared focal plane array detectors [J]. *Optical and Quantum Electronics*. 2014, **46** (10): 1385-1390.
- [9] Paul Jerram, James Beletic. Teledyne's high performance infrared detectors for Space missions: Proc.SPIE, 2019[C].
- [10] Sweeney S J, Eales T D, Marko I P. The physics of mid-infrared semiconductor materials and heterostructures [M]. Mid-infrared Optoelectronics, Tournié E, Cerutti L, Woodhead Publishing, 2020, 3-56.
- [11] WANG Jin-Dong, YE Wen-Cheng, ZHANG Wei-Ting, et al. Design of infrared metasurface splitter arrays [J]. *Optics and Precision Engineering*. (王进东,叶文成,张伟婷,等.超构表面红外分光阵列设计.光学精密工程), 2021, **29** (04): 674-681.
- [12] Rogalski Antonio. Infrared Detectors [M]. 2nd Edition ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [13] Hu Weida, Ye Zhenhua, Liao Lei, et al. 128x128 long-wavelength/mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultralow spectral cross talk [J]. *Optics Letters*. 2014, **39** (17): 5184-5187.
- [14] YE Zhen-Hua, ZHOU Wen-Hong, HU Wei-Da, et al. SPECTRAL STUDY ON RESPONSE OF HgCdTe IR TWO-COLOR DETECTOR ARRAYS [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (叶振华,周文洪,胡伟达,等.碲镉汞红外双色探测器响应光谱研究.红外与毫米波学报), 2009, **28** (1).
- [15] Chen Yiyu, Ye Zhenhua, Zhang Peng, et al. A barrier structure optimization for widening processing window in dual-band HgCdTe IRFPAs detectors [J]. *Optical and Quantum Electronics*. 2016, **48** (5): 294.
- [16] Ye Z H, Zhang P, Li Y, et al. Design of spectral crosstalk suppressing structure in two-color HgCdTe infrared focal plane arrays detector [J]. *Optical and Quantum Electronics*. 2014, **46** (10): 1283-1289.
- [17] YE Zhen-Hua, LI Yang, HU Wei-Da, et al. Simultaneous mode MW/LW two color HgCdTe infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (叶振华,李杨,胡伟达,等.同时模式的中波/长波碲镉汞双色红外探测器.红外与毫米波学报), 2012, **31** (6): 497-500.
- [18] Liu L F, Chen Y Y, Ye Z H, et al. Inductively Coupled Plasma-Induced Electrical Damage on HgCdTe Etched Surface at Cryogenic Temperatures [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2018, **47** (10): 5759-5762.
- [19] Chen Y Y, Ye Z H, Sun C H, et al. Dry etched SiO2 Mask for HgCdTe Etching Process [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2016, **45** (9): 4705-4710.
- [20] Ye Z H, Hu W D, Lei W, et al. Investigations on a Multiple Mask Technique to Depress Processing-Induced Damage of ICP-Etched HgCdTe Trenches [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2013, **42** (11): 3164-3167.
- [21] YE Zhen-Hua, YIN Wen-Ting, HUANG Jian, et al. 128x128 SW/MW two-color HgCdTe IRFPAs [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (叶振华,尹文婷,黄建,等.128x128短波/中波双色红外焦平面探测器.红外与毫米波学报), 2010, **29** (6): 415-418.
- [22] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, QUAN Zhi-Jue, et al. STUDY ON ETCH PATTERN OF DRY TECHNIQUE FOR HgCdTe IRFPAS [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (叶振华,胡晓宁,全知觉,等.HgCdTe探测阵列干法技术的刻蚀形貌研究.红外与毫米波学报), 2006, **25** (5): 325-328.
- [23] King D F, Radford W A, Patten E A, et al. Third-generation 1280 x 720 FPA development status at Raytheon Vision Systems: Proc.SPIE, 2006[C].
- [24] YE Zhen-Hua, WU Jun, HU Xiao-Ning, et al. STUDY OF INTEGRATED MW1/MW2 TWO-COLOR HgCdTe INFRARED DETECTOR ARRAYS [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (叶振华,吴俊,胡晓宁,等.集成式HgCdTe红外双色探测器阵列.红外与毫米波学报), 2004, **23** (3): 193-196.
- [25] LI Yan-Jin, HE Li, YANG Jian-Rong, et al. STUDY ON THERMAL MISMATCH STRESS OF HgCdTe INFRARED FOCAL PLANE ARRAY [J]. *J. Infrared Millim.*

- Waves.(李言谨,何力,杨建荣,等. 碲镉汞红外焦平面器件热失配应力研究. 红外与毫米波学报), 2008, 27.
- [26] Wang Jinling, Zeng Shengkui, Silberschmidt Vadim V, et al. Multiphysics modeling approach for micro electro - thermo - mechanical actuator: Failure mechanisms coupled analysis [J]. *Microelectronics Reliability*. 2015, **55** (5): 771-782.
- [27] Zhang Wei-Ting, Chen Xing, Ye Zhen-Hua. A study on the surface correction of large format infrared detectors [J]. *Semiconductor Science Technology*. 2020, **35**: 125007.
- [28] Benson J D, Bubulac L O, Smith P J, et al. Growth and Analysis of HgCdTe on Alternate Substrates[J]. *Journal of Electronic Materials*. 2012, **41**(10): 2971-2974.
- [29] Jacobs R N, Nozaki C, Almeida L A, et al. Development of MBE II - VI Epilayers on GaAs(211)B[J]. *Journal of Electronic Materials*. 2012, **41**(10): 2707-2713.
- [30] Zanatta J P, Badano G, Ballet P, et al. Molecular beam epitaxy growth of HgCdTe on Ge for third-generation infrared detectors[J]. *Journal of Electronic Materials*. 2006, **35** (6): 1231-1236.
- [31] Song P Y, Ye Z H, Huang A B, et al. Dark Current Characterization of SW HgCdTe IRFPAs Detectors on Si Substrate with Long Time Integration[J]. *Journal of Electronic Materials*. 2016, **45**(9): 4711-4715.
- [32] Lei W, Ren Y L, Madni I, et al. Low dislocation density MBE process for CdTe-on-GaSb as an alternative substrate for HgCdTe growth[J]. *Infrared Physics & Technology*. 2018, **92**: 96-102.
- [33] Lei W, Gu R J, Antoszewski J, et al. GaSb: A New Alternative Substrate for Epitaxial Growth of HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*. 2014, **43**(8): 2788-2794.
- [34] Li Stan Z, Jain Anil. Fixed Pattern Noise[M]. *Encyclopedia of Biometrics*, Boston, MA:Springer US, 2009, 549.
- [35] Hu W, Chen X, Ye Z, et al. Dependence of Ion-Implant-Induced LBIC Novel Characteristic on Excitation Intensity for Long-Wavelength HgCdTe-Based Photovoltaic Infrared Detector Pixel Arrays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2013, **19**(5): 1-7.
- [36] Reibel Y, Pere-Laperne N, Augey T, et al. Getting small, new 10 μm pixel pitch cooled infrared products: Proc.SPIE, 2014[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 886-895.
- [37] Atul Joshi, Nitin Kataria, James Garnett, et al. A low SWaP-C 10-micron pitch 3-megapixel full motion video MWIR imaging system: Proc.SPIE, 2021[C].
- [38] Huang Ed, Thomas Jeremy, Hibberd Dustin, et al. Small pixel MWIR sensors for low SWaP applications: Proc. SPIE, 2021[C].
- [39] Shkedy L, Armon E, Avnon E, et al. HOT MWIR detector with 5 um pitch: Proc.SPIE, 2021[C].
- [40] Lee Jiwon, Georgitzikis Epimetheas, Sielegheem Edward Van, et al. Image sensors for low cost infrared imaging and 3D sensing: Proc.SPIE, 2020[C].
- [41] Karp L, Musca C, Dell J, et al. Characterisation of crosstalk in HgCdTe n-on-p photovoltaic infrared arrays: Characterisation of crosstalk in HgCdTe n-on-p photovoltaic infrared arrays[Z]. Abbott D, Eshraghian K, Musca C A, et al. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2004: 5274, 183-193.
- [42] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Challenges of small-pixel infrared detectors: a review [J]. *Reports on Progress in Physics*. 2016, **79**(4): 46501.
- [43] Werner T R, Cox J A, Swanson S, et al. Microlens array for staring infrared imager: Proc.SPIE, 1991[C].
- [44] Li Yang, Ye Zhen-Hua, Hu Wei-Da, et al. Numerical Simulation of Refractive-Microlensed HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays Operating in Optical Systems[J]. *Journal of Electronic Materials*. 2014, **43**(8): 2879-2887.
- [45] Li Yang, Ye Zhen-Hua, Lin Chun, et al. Crosstalk suppressing design of GaAs microlenses integrated on HgCdTe infrared focal plane array[J]. *Optical and Quantum Electronics*. 2013, **45**(7): 665-672.
- [46] Cui Ailiang, Liu Lingfeng, Sun Changhong, et al. Analysis of dark current generated by long-wave infrared HgCdTe photodiodes with different implantation shapes [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2019, **103**: 103036.
- [47] YE Zhen-Hua, WU Jun, HU Xiao-Ning, et al. STUDY OF HgCdTe p+-on-n LONG-WAVELENGTH HETERO-JUNCTION DETECTOR[J]. *J. Infrared Millim. Waves.*(叶振华,吴俊,胡晓宁,等. 碲镉汞p⁺-on-n长波异质结探测器的研究. 红外与毫米波学报), 2004, **23**(6): 4.
- [48] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, ZHANG Hai-Yan, et al. STUDY OF DARK CURRENT FOR MERCURY CADMIUM TELLURIDE LONG-WAVELENGTH PHOTODIODE DETECTOR WITH DIFFERENT STRUCTURES [J]. *J. Infrared Millim. Waves.*(叶振华,胡晓宁,张海燕,等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究. 红外与毫米波学报), 2004, **23**(2): 5.
- [49] Musca C A, Dell J M, Faraone L, et al. Analysis of crosstalk in HgCdTe p-on-n heterojunction photovoltaic infrared sensing arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*. 1999, **28**(6): 617-623.
- [50] Strong Roger L., Kinch Michael A., Armstrong John M. Performance of 12- μm - to 15- μm -Pitch MWIR and LWIR HgCdTe FPAs at Elevated Temperatures [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2013, **42**(11): 3103-3107.
- [51] Sun Ting, Ye Zhenhua, Liao Qingjun, et al. A Calculation Method for Response Spectrum of Mercury Cadmium Telluride Infrared Focal Plane Arrays Detector [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2020, **49**(2): 1462-1466.
- [52] Liu Lingfeng, Chen Yiyu, Ye Zhenhua, et al. A review on plasma-etch-process induced damage of HgCdTe [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2018, **90**: 175-185.
- [53] Li Yantao, Hu Weida, Ye Zhenhua, et al. Direct mapping and characterization of dry etch damage-induced PN junction for long-wavelength HgCdTe infrared detector arrays[J]. *Optics Letters*. 2017, **42**(7): 1325-1328.
- [54] Zhang Peng, Ye Zhen-Hua, Sun Chang-Hong, et al. Passivation Effect of Atomic Layer Deposition of Al₂O₃ Film on HgCdTe Infrared Detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2016, **45**(9): 4716-4720.
- [55] YE Zhen-Hua, HUANG Jian, YIN Wen-Ting, et al. HgCdTe photodiode arrays passivated by MBE in-situ grown CdTe film[J]. *J. Infrared Millim. Waves.*(叶振华,黄建,尹文婷,等. MBE原位碲化镉钝化的碲镉汞长波光二极管阵列. 红外与毫米波学报), 2011, **30**(6): 495-498.

- [56] Ye Z, Yin W, Huang J B, *et al.* Low-Roughness Plasma Etching of HgCdTe Masked with Patterned Silicon Dioxide [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2011, **40**: 1642–1646.
- [57] YE Zhen-Hua, HUANG Jian, YIN Wen-Ting, *et al.* HgCdTe mid-wavelength infrared detector with interface passivated by hydrogen implantation [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (叶振华, 黄建, 尹文婷, 等. 钝化界面植氢优化的碲镉汞中波红外探测芯片. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(3): 260–262.
- [58] Hu W D, Chen X S, Ye Z H, *et al.* A hybrid surface passivation on HgCdTe long wave infrared detector with in-situ CdTe deposition and high-density hydrogen plasma modification [J]. *Applied Physics Letters*. 2011, **99** (9) : 91101.
- [59] CUI Ai-Liang, SUN Chang-Hong, YE Zhen-Hua. Principle of atomic layer deposition and prospect of application in mercury Cadmium telluride infrared detector [C] 2019 Symposium on Infrared and Remote Sensing Technology and Applications and Interdisciplinary Forum, Suzhou, Jiangsu, China (崔爱梁, 孙常鸿, 叶振华. 原子层沉积原理及在碲镉汞红外探测器中的应用展望: 2019年红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛. 中国江苏苏州), 2019: 7.
- [60] Klipstein Philip. "XBn" barrier photodetectors for high sensitivity and high operating temperature infrared sensors: Proc.SPIE, 2008[C].
- [61] Castelein P, Debono J M, Fendler M, *et al.* Ultra fine pitch hybridization of large imaging detectors: 2003 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record (IEEE Cat. No.03CH37515), 2003[C]. 3518–3521.
- [62] YE Zhen-Hua, YIN Wen-Ting, HUANG Jian, *et al.* HgCdTe long-wavelength photodiode arrays modified with high-density hydrogen plasma [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (叶振华, 尹文婷, 黄建, 等. HgCdTe 长波光电子二极管阵列的等离子体修饰. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(1): 4.
- [63] Bisotto S, Abergel J, Dupont B, *et al.* 7.5 μm and 5 μm pitch IRFPA developments in MWIR at CEA-LETI: Proc. SPIE, 2019[C].
- [64] Abergel J, Rochette F, Gout S, *et al.* Development of sub-10 μm pitch HgCdTe infrared detectors: Proc.SPIE, 2019[C].
- [65] Song Pengyun, Ye Zhenhua, Huang Aibo, *et al.* Theoretical investigation on input properties of DI and CTIA readout integrated circuit [J]. *Optical and Quantum Electronics*. 2016, **48**(3): 185.
- [66] Ko Cheng-Ta, Chen Kuan-Neng. Low temperature bonding technology for 3D integration [J]. *Microelectronics Reliability*. 2012, **52**(2): 302–311.
- [67] Holst G C. Imaging system performance based upon F λ /d [J]. *Optical Engineering*. 2007, **46**(10): 1–10.
- [68] Robinson J, Kinch M, Marquis M, *et al.* Case for small pixels: system perspective and FPA challenge: Proc. SPIE, 2014[C].
- [69] Pidancier Patricia, Jamin Nicolas, Fièque Bruno, *et al.* A review of the latest developments of MCT infrared technology from visible to VLWIR for space applications at Sofradir: Proc.SPIE, 2013[C].
- [70] Bansal Shonak, Sharma Kuldeep, Jain Prince, *et al.* Bi-layer graphene/HgCdTe based very long infrared photodetector with superior external quantum efficiency, responsivity, and detectivity [J]. *RSC Advances*. 2018, **8**(69) : 39579–39592.
- [71] Gunapala S D, Bandara S V, Singh A, *et al.* 640/spl times/486 long-wavelength two-color GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector (QWIP) focal plane array camera [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2000, **47**(5): 963–971.
- [72] Tennant W E, Lee Donald, Zandian Majid, *et al.* MBE HgCdTe Technology: A Very General Solution to IR Detection, Described by "Rule 07", a Very Convenient Heuristic [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2008, **37** (9) : 1406–1410.
- [73] Lee Donald, Dreiske Peter, Ellsworth Jon, *et al.* Law 19: The ultimate photodiode performance metric: Proc.SPIE, 2020[C].
- [74] Shin J C., Choi W J, Han I K, *et al.* Spectral Response Modification Of Quantum Well Infrared Photodetector By Quantum Well Intermixing [J]. *MRS Online Proceedings Library*. 2003, **744**(1): 98.
- [75] Allen K W, Abolmaali F, Duran J M, *et al.* Increasing sensitivity and angle-of-view of mid-wave infrared detectors by integration with dielectric microspheres [J]. *Applied Physics Letters*. 2016, **108**(24): 241108.
- [76] Choi K K, Allen S C, Sun J G, *et al.* Small pitch resonator-QWIP detectors and arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2018, **94**: 118–125.
- [77] Rollin B V, Simmons E L. Long Wavelength Infra-Red Photoconductivity of Silicon at Low Temperatures [J]. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1952, **65**(12): 995–996.
- [78] LIAO Kai-Sheng, LIU Xi-Hui, HUANG Liang, *et al.* Blocked impurity band infrared detector for astronomy [J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*. (廖开升, 刘希辉, 黄亮, 等. 天文用阻挡杂质带红外探测器. *中国科学:物理学 力学 天文学*), 2014, **44**(04): 360–367.
- [79] Jo Y M, Woo D H, Kang S G, *et al.* Very Wide Dynamic Range ROIC with Pixel-Level ADC for SWIR FPAs [J]. *IEEE Sensors Journal*. 2016, **16**(19): 7227–7233.
- [80] Yang D X D, Gamal A E, Fowler B, *et al.* A 640/spl times/512 CMOS image sensor with ultrawide dynamic range floating-point pixel-level ADC [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1999, **34**(12): 1821–1834.
- [81] Kim C Y, Woo D H, Lee H C.. High-Dynamic-Range ROIC with Asynchronous Self-Controlled Two-Gain Modes for MWIR Focal Plane Arrays [J]. *IEEE Sensors Journal*. 2019, **19**(2): 615–622.
- [82] Bhan R K, Dhar V. Recent infrared detector technologies, applications, trends and development of HgCdTe based cooled infrared focal plane arrays and their characterization [J]. *Opto-Electronics Review*. 2019, **27** (2) : 174–193.
- [83] Reibel Yann, Espuno Laurent, Taalat Rachid, *et al.* High performance infrared fast cooled detectors for missile applications: Proc.SPIE, 2016[C].
- [84] Rothman Johan, Mollard Laurent, Gôut Sylvain, *et al.*

- History-Dependent Impact Ionization Theory Applied to HgCdTe e-APDs [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2011, **40**(8): 1757-1768.
- [85] Bronzi D, Villa F, Tisa S, *et al.* 100 000 Frames/s 64 × 32 Single-Photon Detector Array for 2-D Imaging and 3-D Ranging [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2014, **20**(6): 354-363.
- [86] Stipčević M, Christensen B G, Kwiat P G, *et al.* Advanced active quenching circuit for ultra-fast quantum cryptography [J]. *Optics Express*. 2017, **25**(18): 21861-21876.
- [87] Asbrock J, Bailey S, Baley D, *et al.* Ultra-High sensitivity APD based 3D LADAR sensors: linear mode photon counting LADAR camera for the Ultra-Sensitive Detector program: Proc.SPIE, 2008 [C].
- [88] Rogalski Antoni, Adamiec Krzysztof, Rutkowski Jaroslaw. Narrow-Gap Semiconductor Photodiodes [M]. illustrated ed. SPIE Press, 2000.
- [89] Xie Runzhang, Li Qing, Wang Peng, *et al.* Spatial description theory of narrow-band single-carrier avalanche photodetectors [J]. *Optics Express*. 2021, **29**(11): 16432-16446.
- [90] McIntyre R J. A new look at impact ionization-Part I: A theory of gain, noise, breakdown probability, and frequency response [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1999, **46**(8): 1623-1631.
- [91] Rothman Johan, De Borniol Eric, Gravrand Olivier, *et al.* HgCdTe APD-focal plane array development at DEFIR: Proc.SPIE, 2010 [C].
- [92] Lanthermann C, Anugu N, Le Bouquin J B, *et al.* Modeling the e-APD SAPHIRA/C-RED ONE camera at low flux level [J]. *A&A*. 2019, 625.
- [93] Ikuo K, Ryu M, Morikawa J. High speed infrared thermography of freezing onion-skin cells: QIRT, 2019 [C]. Tokyo, Japan: QIRT Council.
- [94] Schweizer S M, Moura J M F.. Hyperspectral imagery: clutter adaptation in anomaly detection [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2000, **46**(5): 1855-1871.
- [95] Gravrand O, Mollard L, Boulade O, *et al.* Ultralow dark current CdHgTe FPAs in the SWIR range at CEA and Sofradir: Proc.SPIE, 2012 [C].
- [96] LIU Yin-Nian. Development of hyperspectral imaging remote sensing technology [J]. *National Remote Sensing Bulletin*. (刘银年. 高光谱成像遥感载荷技术的现状与发展. *遥感学报*), 2021, **25**(01): 439-459.
- [97] Ben-Dor B, Oppenheim U P, Balfour L S. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared: Proc. SPIE, 1993 [C].
- [98] Tyo J S. Optimum linear combination strategy for an N-channel polarization-sensitive imaging or vision system [J]. *Journal of the Optical Society of America A*. 1998, **15**(2): 359-366.
- [99] Malone N R, Kennedy A, Graham R, *et al.* Staring MWIR, LWIR and 2-color and scanning LWIR polarimetry technology: Proc.SPIE, 2011 [C].
- [100] Dong Chao, Loy Chen Change, He Kaiming, *et al.* Learning a Deep Convolutional Network for Image Super-Resolution: 2014 [C]. Cham: Springer International Publishing, 184-199.
- [101] Cao Guangtao, Xu He-Xiu, Zhou Lei-Ming, *et al.* Infrared metasurface-enabled compact polarization nanodevices [J]. *Materials Today*. 2021.
- [102] Rubin N A, Devlin R C, Groever B, *et al.* Metasurface Polarization Optics: Independent Phase Control of Arbitrary Orthogonal States of Polarization [J]. *Physical Review Letters*. 2017, **118**(11): 113901.
- [103] Wen J, Wang W J, Li N, *et al.* Plasmonic optical convergence microcavity based on the metal-insulator-metal microstructure [J]. *Applied Physics Letters*. 2017, **110**(23): 231105.
- [104] Wen J, Wang W J, Li N, *et al.* Light enhancement by metal-insulator-metal plasmonic focusing cavity [J]. *Optical and Quantum Electronics*. 2016, **48**(2): 150.
- [105] Bin Yang, Yan Changxiang, Zhang Junqiang, *et al.* Refractive index and surface roughness estimation using passive multispectral and multiangular polarimetric measurements [J]. *Optics Communications*. 2016, **381**: 336-345.
- [106] Mashaal H, Gordon J M. Basic limit for the efficiency of coherence-limited solar power conversion [J]. *Optics Letters*. 2014, **39**(17): 5130-5133.
- [107] LI Lei-Lei, HUANG Hai-Xia, GUO Yang, *et al.* 3D reconstruction method of target based on infrared radiation polarization imaging [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (李磊磊, 黄海霞, 郭阳, 等. 基于红外辐射偏振成像的目标三维重建方法. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(03): 413-419.
- [108] Gunning W J, Denatale J, Stupar P, *et al.* Dual band adaptive focal plane array: an example of the challenge and potential of intelligent integrated microsystems: Proc. SPIE, 2006 [C].
- [109] Musca C A, Antoszewski J, Keating A J, *et al.* MEMS-based microspectrometers for infrared sensing: 2007 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, 2007 [C]. 137-138.
- [110] Mao H, Silva K K M B D, Martyniuk M, *et al.* MEMS-Based Tunable Fabry - Perot Filters for Adaptive Multi-spectral Thermal Imaging [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2016, **25**(1): 227-235.
- [111] Malacara Daniel. *Optical Shop Testing* [M]. 3rd Edition ed. Wiley-Interscience, 2007.
- [112] Primot Jérôme. Theoretical description of Shack - Hartmann wave-front sensor [J]. *Optics Communications*. 2003, **222**(1): 81-92.
- [113] Wang Yajun, Zhang Song. Novel phase-coding method for absolute phase retrieval [J]. *Optics Letters*. 2012, **37**(11): 2067-2069.
- [114] Chen Yuan, Han Xu, Zhang Pengfei, *et al.* 3D measurement method based on S-shaped segmental phase encoding [J]. *Optics & Laser Technology*. 2020, **121**: 105781.
- [115] Monroy I T, Jonker R, de Waardt H, *et al.* Interferometric Crosstalk Reduction by Phase Scrambling [J]. *Journal of Lightwave Technology*. 2000, **18**(5): 637.
- [116] Matsunaga Norihito, Yano Kazuhiro, Endrizzi Marco, *et al.* Detection of individual sub-pixel features in edge-illumination x-ray phase contrast imaging by means of the dark-field channel [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2019, **53**(9): 95401.

- [117] Yu Nanfang, Genevet Patrice, Kats Mikhail A, *et al.* Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction [J]. *Science*. 2011, **334**(6054): 333–337.
- [118] Zhang Shuyan, Soibel Alexander, Keo Sam A, *et al.* Solid-immersion metalenses for infrared focal plane arrays [J]. *Applied Physics Letters*. 2018, **113**(11): 111104.
- [119] Della Giovampaola Cristian, Engheta Nader. Digital metamaterials [J]. *Nature Materials*. 2014, **13** (12) : 1115–1121.
- [120] Wen Dandan, Yue Fuyong, Li Guixin, *et al.* Helicity multiplexed broadband metasurface holograms [J]. *Nature Communications*. 2015, **6**(1): 8241.
- [121] Zheng Guoxing, Mühlenbernd Holger, Kenney Mitchell, *et al.* Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*. 2015, **10**(4): 308–312.
- [122] Locatelli M, Pugliese E, Paturzo M, *et al.* Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography [J]. *Optics Express*. 2013, **21**(5): 5379–5390.
- [123] Bianco V, Paturzo M, Finizio A, *et al.* Portable IR Laser System for Real-Time Display of Alive People in Fire Scenes [J]. *Journal of Display Technology*. 2015, **11** (10): 834–838.
- [124] Ducol T, Rahaga T, Louvat B. Image signal processor for bolometers IR detectors: Proc.SPIE, 2021[C].
- [125] Oh Sechang, Ba Ngoc Le, Bang Suyoung, *et al.* A 260 μ W infrared gesture recognition system-on-chip for smart devices: 2016 IEEE Symposium on VLSI Circuits (VLSI-Circuits), 2016[C]. 1–2.
- [126] Iwert Olaf, Delabre Bernard. The challenge of highly curved monolithic imaging detectors: Proc. SPIE, 2010[C].
- [127] Jahn Wilfried, Ferrari Marc, Hugot Emmanuel. Innovative focal plane design for large space telescopes: Proc. SPIE, 2017[C].
- [128] Tekaya Kevin, Fendler Manuel, Dumas Delphine, *et al.* Hemispherical curved monolithic cooled and uncooled infrared focal plane arrays for compact cameras: Proc. SPIE, 2014[C].
- [129] Gonzalez Mario, Axisa Fabrice, Bulcke Mathieu Vanden, *et al.* Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits [J]. *Microelectronics Reliability*. 2008, **48**(6): 825–832.
- [130] Arafat Yeasir, Dutta Indranath, Panat Rahul. Super-stretchable metallic interconnects on polymer with a linear strain of up to 100% [J]. *Applied Physics Letters*. 2015, **107**(8): 81906.
- [131] Guedes Andre F S, Tartari Simone. Flexible optoelectronic organic sensor for infrared detection [Z]. International Society for Optics and Photonics, 2021341–347.
- [132] Goossens Stijn, Navickaite Gabriele, Monasterio Carles, *et al.* Broadband image sensor array based on graphene – CMOS integration [J]. *Nature Photonics*. 2017, **11**(6): 366–371.
- [133] Mead Carver A, Mahowald M A. A silicon model of early visual processing [J]. *Neural Networks*. 1988, **1** (1) : 91–97.
- [134] Yamada Y, Ishikawa M. High speed target tracking using massively parallel processing vision: Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93), 1993[C]. 267–272.
- [135] Dong Chunhua, Naghedolfeizi Masoud, Yousif Nabil, *et al.* Polarimetric thermal-to-visible heterogeneous face recognition using coupled independent component analysis: Proc.SPIE, 2021[C].
- [136] Kong Seong G, Heo Jingu, Abidi Bisma R, *et al.* Recent advances in visual and infrared face recognition—a review [J]. *Computer Vision and Image Understanding*. 2005, **97**(1): 103–135.
- [137] Shoja Ghiass Reza, Arandjelović Ognjen, Bendada Abdelhakim, *et al.* Infrared face recognition: A comprehensive review of methodologies and databases [J]. *Pattern Recognition*. 2014, **47**(9): 2807–2824.
- [138] Jin Xin, Jiang Qian, Yao Shaowen, *et al.* A survey of infrared and visual image fusion methods [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2017, **85**: 478–501.