

微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器技术新进展

邓荣春¹, 卢杰², 徐立中^{1,3}, 胡荣群¹

¹南昌理工学院电子与信息学院, 江西 南昌

²航空工业洪都集团660研究所, 江西 南昌

³河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京

收稿日期: 2021年9月13日; 录用日期: 2021年11月10日; 发布日期: 2021年11月15日

摘要

近年来, 随着大规模集成电路、半导体薄膜、微机电系统等科技进步, 微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器技术快速发展, 已成为目前技术最成熟、市场占有率最高的一种焦平面探测器型式。本文介绍了红外焦平面探测器分类、微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器工作原理及总体设计、制造与工艺、测试等关键技术模块。综述了国内外相关技术最新进展和领域应用。最后, 总结指出了非制冷红外焦平面探测器技术发展趋势及发展方向, 包括: 1) 亚波长微纳光学技术与像元中心距压缩到10 μm 以下更小尺寸的超高清红外成像; 2) 基于新一代TSV(硅通孔技术)三维垂直封装的三维单芯片系统(3DSoC)技术与红外热像机芯/模组的集成化与智能化; 3) 无快门(shutter-less)技术结合无热电冷却元件(TEC-less)与进一步降低系统功耗等。

关键词

非制冷红外焦平面阵列, 微测辐射热计, 微机电系统, 芯片

New Progress of Uncooled Infraredray Focal Plane Array and Detector Technology Based on Microbolometer Type: A Review

Rongchun Deng¹, Jie Lu², Lizhong Xu^{1,3}, Rongqun Hu¹

¹School of Electronics and Information, Nanchang Institute of Technology, Nanchang Jiangxi

²660 Design Institute, Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang Jiangxi

³College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Abstract

In recent years, with the scientific and technological progress of large-scale integrated circuit, semiconductor films and micro-electro-mechanical system, the technology of uncooled infrared-ray focal plane array based on microbolometer type develops rapidly, and has become a focal plane detector type with the most mature technology and highest market share. In this paper, the classification of infrared ray focal plane array and detector, the working principle of uncooled infrared-ray focal plane array based on microbolometer type and overall design of the detector, manufacturing engineering, testing and other key technical modules are introduced. The latest development and application of related technologies at home and abroad are reviewed. Finally, the development trend and direction of uncooled infrared focal plane array and detector technology are summarized, including: 1) subwavelength micro-nano optics technology and ultra-high-definition infrared imaging with pixel pitch of the microbolometer compressed to less than 10 μm ; 2) the 3DSoC (three-dimensional system on-chip) with the 3D vertical package of a new generation TSV (through silicon via) and the integration and intellectualization of infrared camera core/module; 3) shutter-less technology combined with TEC-less and further reduces system power consumption.

Keywords

Uncooled Infrared Ray Focal Plane Array, Microbolometer, Micro-Electro-Mechanical System, Chip

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代红外探测器技术始于 20 世纪 40 年代的制冷光子型单元红外探测器, 后来发展出多元线列和小规模面阵探测器, 再到集成化的焦平面阵列型探测器, 已发展到第三代。红外焦平面探测器是一种在红外光学系统焦平面上, 由多个红外光传感器单元组成二维红外线焦平面阵列(infraredray focal plane array, IRFPA), 可使观测视野中每一个像元与敏感元一一对应的红外探测器件(类似于可见光 CCD 图像传感器阵列结构)。焦平面探测器作为红外成像系统的核心部件, 是探测物体和获取红外信息的关键, 在军事和民用领域具有广泛的应用。

红外焦平面探测器可分为制冷型红外焦平面探测器和非制冷型红外焦平面探测器。制冷型探测器是基于红外辐射与敏感元件相互作用产生光电效应, 非制冷探测器基于红外辐射与敏感元件产生热效应, 实现对物体的探测。随着大规模集成电路、半导体薄膜、微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)等科技进步, 非制冷红外焦平面探测器技术快速发展, 其中微测辐射热计(microbolometer, MB)型非制冷红外焦平面探测器的探测灵敏度、图像分辨率、工作帧频、热响应时间、空间噪声、尺寸和功耗等性能指标得到大幅提升, 已成为目前技术最成熟、市场占有率最高的一种红外焦平面探测器型式[1] [2] [3] [4]。本文后续的内容, 将在介绍微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器工作原理基础上, 综述国内外相关技术和领域应用, 总结指出非制冷红外焦平面探测器技术发展趋势及发展方向。

2. 微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器关键技术及进展

2.1. 红外焦平面探测器分类

红外波段(0.75~1000 μm)处在可见光和微波波段之间(如图 1 所示)。理论上讲,所有高于绝对零度(-273℃)的物体自身都会发出热辐射或红外辐射,辐射能量与物体表面的温度和材料特性直接相关,温度越高,辐射能量越大。通常,室温物体的热辐射集中在长波红外波段,其次在中波红外波段,当物体温度较高或在夜晚时,其辐射能量大部集中在短波红外波段,不同波段的红外成像在机理上存在差异(波段划分及成像机理见表 1)。

图 2 给出了制冷型和非制冷型红外焦平面探测器的分类。根据工作原理的不同,制冷型探测器可分为光电导、光伏、光发射、光电磁及量子阱等类型,采用的半导体光敏薄膜材料包括,III~V 族化合物半导体材料碲化铟(InSb)、碲镉汞(HgCdTe)、砷化镓(InGaAs)、量子阱(QWIP)、II 类超晶格(T2SL)和硫化铅(PbS)等[5] [6] [7]。非制冷型探测器可分为微测辐射热计 MB、热释电、热电偶/热电堆及热敏二极管等类型,采用的热敏薄膜材料包括,氧化钒(VOx)、非晶硅(α -Si)、绝缘衬底上硅(silicon on insulator, SOI)和钛酸锶钡(BST)等[1] [8] [9]。制冷型探测器在原理上属光子传感,具有分辨更细微温度差别的高灵敏度、探测距离较远的优势。非制冷探测器在原理上则属热敏传感。光子传感相比热敏传感的探测率通常大 1~2 个数量级,一般正常工作时需要制冷。工作在室温条件下的非制冷探测器虽然在灵敏度上差于制冷型探测器,但随着非制冷红探测器技术日趋成熟,在军用和民用市场的占有份额正持续增速。

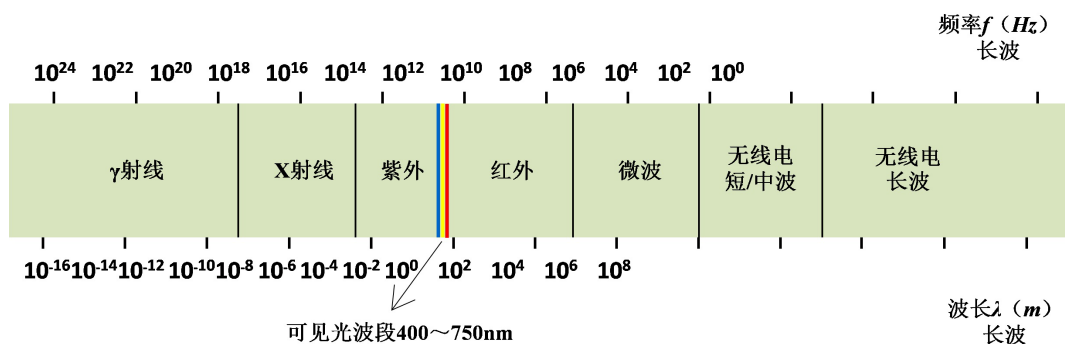


Figure 1. Position of the infrared band in the electromagnetic wave spaces
图 1. 红外波段在电磁波谱中的位置

Table 1. Infrared band division and imaging mechanism

表 1. 红外波段划分及成像机理

波段	波长	成像机理
可见光	0.40~0.75	可见光、短波红外、近红外(0.4~2.5 μm)是一个有着较高大气传递性和峰值太阳照度的波段,探测器在这三个波段可获得高清晰度和分辨率。
近红外	0.75~1.1 μm	光反射成像,红外成像具有阴影反差,利于目标识别。
短波红外	1.1~2.5 μm	应用:红外夜视、24 小时视频监控、人脸识别研究、武器装备、生物、医疗、近红外波段白天工作的光学摄影(红外或彩色红外航空摄影)。
中波红外	3.0~5.0 μm	热成像,可观测高温或常温物体。 应用:工业测量、空空、地空制导、红外搜索跟踪与导弹预警系统。
长波红外	7.0~14 μm	热成像,对大多数陆地物体具有很好的可见性。 应用:民用热成像仪、高性能观察系统、单兵武器热瞄具、飞行武器的目标导引和攻击制导与反导。

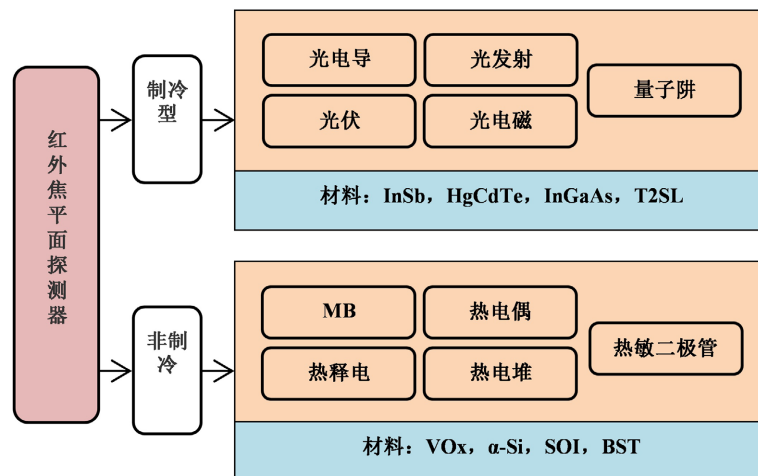


Figure 2. Classification of focal plane array detectors

图 2. 红外焦平面探测器分类

2.2. 微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器工作原理

微测辐射热计(MB)属热敏电阻型传感器元件,与半导体工艺兼容,能够与 CMOS 读出电路(readout integrated circuit, ROIC)单片集成,基于 MEMS 技术制造加工,由硅衬底、底部反射镜、互联电极、热绝缘桥墩、热敏电阻材料层和红外吸收桥面组成。目前采用的热敏电阻材料层以氧化钒(VO_x)和非晶硅($\alpha\text{-Si}$)半导体热敏薄膜材料为主。

红外吸收桥面由 MEMS 微桥结构的像元在焦平面上二维重复排列构成,每个像元(微桥)对特定入射角的热辐射进行测量。微桥由多层材料组成,由上到下分别是红外吸收层、热敏层,以及起到支撑与电连接作用的桥臂和桥墩,并通过桥臂和桥墩与制作在硅衬底上的 COMS 系统相连。当桥面吸收外界红外辐射时,微桥吸收层吸收红外能量并分别产生细微的温度变化,从而引起各微桥的热敏层电阻值发生相应的变化。ROIC 通过互联电极将微桥电阻变化经放大处理后,转换形成电学视频信号输出[10] [11]。

2.3. 关键技术及其进展

2.3.1. 微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器关键技术

微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器核心指标参数包括阵列规模(可表征图像分辨率)、像元中心距(像元间距)、噪声等效温差(NETD,也称探测灵敏度)、系统最小可分辨温差(MRTD)、工作帧频、热响应时间、空间噪声和功耗等,涉及了焦平面探测器总体设计、制造与工艺、测试等关键技术[1] [10]-[16]。

与红外焦平面探测器总体设计相关的包括,微测辐射热计桥面与衬底间低的热导、高的红外吸收率、合适的焦平面热敏薄材料、读出电路设计和电学噪声控制,以及总体设计指标的分解等。1) 半导体热敏薄膜材料的 MEMS 结构、微桥 MEMS 的桥臂低热导材料设计等。2) 优化设计微测辐射热计的填充系数(填充系数定义为桥面对红外辐射的有效吸收面积占其总面积的百分比),填充系数和热导之间的权衡,或优化设计微桥下方红外反射面的红外光学谐振腔设计。3) 焦平面材料的选取对于 NETD 有非常大的影响,NETD 越小,探测器灵敏度越高;早期的材料采用氧化钒 VO_x 、钛酸锶钡 BST 和非晶硅 $\alpha\text{-Si}$ 等,发展至今,氧化钒和非晶硅成为主流,其中氧化钒占有 70% 的市场份额。4) 红外辐射照射到焦平面微桥上所产生的信号电流一般为 nA 级甚至 pA 级,对这种非常小信号的读出电路,在进行版图布局设计的同时,还需要综合考虑像元级、列级等片上各电路模块的低噪声设计。5) 探测器的阵列规模与图像分辨率、像元中心距与光学系统、探测器灵敏度指标 NETD 与薄膜材料、NETD 和空间噪声与图像质量、工作帧频与

热响应时间等相互关联, 根据总体设计指标参数进一步把指标分解到 MEMS、读出电路与集成、封装等各个部件/工艺环节[14] [15]。

在红外焦平面探测器芯片制造与工艺过程中, 需要重点解决: 1) 桥面多层材料和 MEMS 工艺流程中低应力、高质量、低缺陷等不同要求的制备, 保障高精度刻蚀、光刻等工艺以及热绝缘微桥等。2) 保持微桥阵列在真空环境、相对稳定温度条件下工作的真空封装。

红外焦平面探测器的真空封装技术分为金属封装(metal packaging, MP)、陶瓷封装(ceramic packaging, CP)、晶圆级封装(wafer level packaging, WLP)和像元级封装(pixel level packaging, PLP) [10] [17] [18] [19]。金属封装 MP 采用金属管壳、半导体热电冷却元件(thermoelectric cooler, TEC)温控工作点、柱状吸气剂等, 封装方式可适应较极端的环境, 缺点是成本占比较大, 生产周期较长。陶瓷封装 CP 包括无引脚芯片封装(LCC)和有引脚表面贴装(PGA)两种, 采用多层布线的陶瓷基板的管壳, 内部无热电冷却元件(TEC-less), 真空除气、吸气剂激活、真空密封三合一封装。晶圆级封装 WLP 是直接对红外探测器晶圆上进行大多数或是全部的封装、测试, 然后再进行切割的技术, 目前有两种晶圆级封装方式, 即 W2W (wafer-to-wafer) 和 C2W (chip-to-wafer)方式。近年来在晶圆级封装技术基础上又进一步发展了低成本小型化成像模组与光学系统集成的晶圆级光学镜头(wafer level optics, WLO)焦平面和专用红外图像信号处理(image signal processing, ISP)电路芯片技术。像元级封装 PLP 是新发展的一种全新的封装技术, 国际业界领先公司已开始应用于产品开发和生产, 通过微电子工艺的淀积方法, 将只有几微米厚的非晶硅膜淀积到每一个像素上, 形成与阵列的像素数目相同的真空密封帽。目前国外主流产品以陶瓷、晶圆级封装为主, 2015 年之前国内主流产品多采用金属、陶瓷封装, 近 2 年也已完全掌握了晶圆级封装技术[2]。

根据探测器总体设计指标的分解, 建立工艺过程优化仿真模型, 保障较高的成品率和批次一致性。国内外各红外焦平面探测器生产厂商都非常重视产品的测试工作。探测器芯片和组件的测试主要包括单元测试和组件测试两个方面, 由于测试系统的专业性和复杂性, 一般都是自行研制或通过专门从事测试平台的厂商定制开发。国际上专门从事红外焦平面探测器测试平台产品开发的业界领先厂商主要有, 美国圣塔芭芭拉红外(SBIR)公司、美国光电工业(EOI)公司、法国 HGH 红外系统公司、以色列 CI 系统等。国外这些厂商/公司的测试平台产品功能齐全、性能优越, 但价格昂贵, 并对我国技术封锁。国内厂商的测试平台产品和定制开发水平相对落后, 测试工作主要集中在系统级参数测试部分, 对像元级参数测试的研究较少, 与国外相比还存在较大差距。

2.3.2. 国外技术进展

国外非制冷红外焦平面探测器源自 20 世纪 80 年代霍尼韦尔(Honeywell)公司在美国军方支持下开发的氧化钒 VO_x 技术, 之后, 20 世纪 90 年代德州仪器(TI)公司及法国原子能委员会电子与信息技术实验室(CEA-Leti)又分别开发了非晶硅 α -Si 技术[20] [21]。从那时起, 主要的工作集中在减小像元中心距, 以及提高微测辐射热计、SOI 二极管测温器件和非制冷红外焦平面阵列的性能上。如今, 像元中心距已接近光学的衍射极限, 其性能几乎能够满足所有的商业应用[1] [3] [11]。当前国际上红外探测器业界知名公司有, 美国菲力尔(FLIR)公司、雷神(Raytheon)公司、DRS 公司、BAE 系统公司、L-3 公司, 法国 Lynred 公司(2019 年 Sofradir 公司与 ULIS 公司合并), 以色列 SCD 公司、日本电气(NEC)公司以及三菱(Mitsubishi)公司等。目前这些国外公司主要围绕着超大面阵规模, 以及尺寸、重量、功耗及成本(size weight and power-cost, SWaP-C)两个方面进行着相关技术研究和产品开发。表 2 给出了目前代表性的国外公司在超大面阵规模以及 SWaP-C 方面的技术进展情况。表 3 给出了国外公司典型的微小型机芯/模组产品技术参数。

在超大面阵规模方面, 为了实现更高的空间分辨率和更小尺寸的成像系统, 在过去的近 30 年间, 为

降低微测辐射热计和 SOI 二极管非冷却红外焦平面阵列的像元尺寸, 研究人员和工程师们做出了大量努力, 取得了显著的进步。从 50 μm (1992 年)、25 μm (2002 年)、17 μm (2007 年)、12 μm (2013 年) 减小到目前最先进的焦平面探测器的像元中心距为 10 μm [1] [22] [23]。如 DRS、BAE 公司已量产面阵规模 1280 \times 1024、像元中心距 10 μm 的非制冷红外焦平面探测器。

Table 2. Technological progress of foreign companies
表 2. 国外公司技术进展

厂商	超大面阵技术 (阵列规模/像元中心距)	SWaP-C 技术	薄膜材料	封装技术
FLIR	1280 \times 1024/12 μm	Boson™、Lepton 微型红外热像一体化模组技术	VOx	WLP/WLO/PLP
Raytheon	2048 \times 1536/17 μm 1920 \times 1200/12 μm	得到美国 DARPA LCTI-M 项目资助	VOx	WLP/WLO/PLP
DRS	1280 \times 1024/10 μm	得到美国 DARPA LCTI-M 项目资助	VOx	WLP/WLO
BAE	1920 \times 1200/12 μm 1280 \times 1024/10 μm	得到美国 DARPA LCTI-M 项目资助	VOx	WLP/WLO
L-3	1280 \times 1024/12 μm	WLP/WLO/PLP/ TEC-less/ISP	VOx/ α -S	WLP/WLO
Lynred	1280 \times 1024/12 μm	WLP/WLO/PLP、 TEC-less/ISP	α -S	WLP/WLO/PLP
SCD	1280 \times 1024/12 μm	WLP/WLO/ TEC-less/ISP	VOx	CP/WLP/WLO
NEC	1280 \times 1024/12 μm	WLP/TEC-less/ISP	VOx	CP/WLP

Table 3. Technical parameters of typical micro/small module and products of thermal imager from foreign companies
表 3. 国外公司典型的微小型机芯模组产品技术参数

厂商	型号	阵列规模像元中心距	灵敏度(NETD)	重量(g)	外形尺寸(mm ³)	功耗(mW)	推出时间
FLIR	Boson™	320 \times 640/12 μm	<40 mK	7.5	21 \times 21 \times 11	500	2016
	Lepton 3	160 \times 120/12 μm	—	—	12.7 \times 8.5 \times 6.0	160	2017
DRS	Tamarisk320	640 \times 480/17 μm	<50 mK	65	34 \times 30 \times 30	1000	—
BAE	Smart	640 \times 480/12 μm	<50 mK	5.1	29	490	2015
	SCC500H	320 \times 240/28 μm	<50 mK	83	—	2500	—
Lynred	M80L90	80 \times 80/34 μm	<100 mK	2.0	14 \times 14 \times 9	55	2016
SCD	BIRD640-VE	640 \times 480/25 μm	<50 mK	40	—	450	—

在 SWaP-C 方面, 2012~2014 年美国国防高级研究计划局(DARPA)启动执行的低成本热像仪制造(low cost thermal imager-manufacturing, LCTI-M)项目, 旨在进一步强化低成本 - 微小型红外光学制造工艺的优势, 以提高士兵作战能力, 并可扩大到民用领域。DARPA 隶属美国国防部, 负责研发用于军事用途的高新科技, 其宗旨是“保持美国的技术领先地位, 防止潜在对手意想不到的超越”。从美国国防预研高新科技的一个侧面也反映了降低 SWaP-C 技术的发展。LCTI-M 项目先后支持了 Raytheon、DRS、BAE 三家公司开发低成本、小体积红外成像机芯模组, 实现了 12 μm 像元中心距、重量在 10 g 以下的机芯模组

产品量产[24]。2014年FLIR公司发布了当时世界上最小的机芯模组Lepton,这种微型红外热像一体化模组制造技术采用了非制冷VOx微测辐射热计、WLO、WLP和定制专用集成电路(ASIC),实现了从探测器集成化到红外热像仪机芯模组的集成化与微小型化。2019年新一代Lepton机芯模组产品的像元中心距由 $17\ \mu\text{m}$ 缩小到 $12\ \mu\text{m}$,分辨率提高了4倍,功耗为 $160\ \text{mW}$,外形尺寸仅为 $12.7\times 8.5\times 6.0\ \text{mm}^3$ 。降低SWaP-C进一步朝着晶圆级封装-晶圆级光学-红外图像信号处理电路(WLP-WLO-ISP)三维(3D)封装芯片技术方向发展,当今的微电子产业界将三维封装芯片列为第四代封装技术,并已实现商用化。2018年美国DARPA资助了三维单芯片系统(three-dimensional system on-chip, 3DSoC)项目,该项目聚焦于采用新一代三维垂直高密度封装技术,在单衬底垂直向上构建微系统所需材料、设计工具和制造技术的研发,旨在进一步推进红外成像机芯完全由微电子工艺规模化制造。通过采用三维封装芯片技术、视觉处理单元(vision processing unit, VPU)、进一步降低微小型机芯模组产品规模化生产成本,以及在不同程度上增强了诸如图像存储、不同制式的数据输出接口、SD卡(secure digital card)存储、以太网/无线视频传输等功能。随着采用新一代高密度封装(三维垂直封装)技术-硅通孔(through silicon via, TSV)技术的三维单芯片系统(three-dimensional system on-chip, 3DSoC)、三维堆叠集成电路芯片(three-dimensional stacked integrated circuit chip, 3DSIC),以及红外图像信号处理与系统控制等技术集成的日渐成熟,将进一步推进微小型机芯模组产品的发展。3D单芯片系统的结构如图3所示。

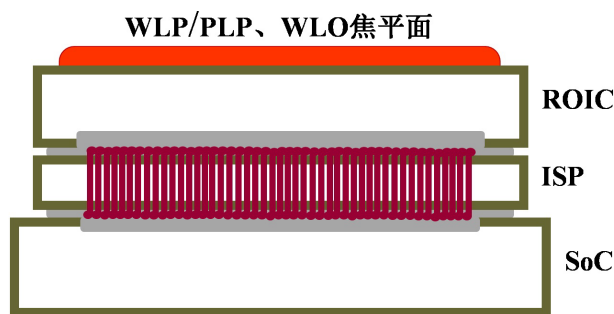


Figure 3. Schematic diagram of 3DSoC
图 3. 3D 单芯片结构示意图

2.3.3. 国内技术进展

国内非制冷红外焦平面探测器的研究晚于国外美欧等发达国家,早期的研究限于跟踪国外技术的研究,以高校和科研院所为主,主要有华中科技大学、电子科技大学、昆明物理研究所(中国兵器集团 211 所)、西安应用光学研究所(中国兵器集团 205 所)、华中光电技术研究所(中船重工 717 所)、华北光电技术研究所(中国电科集团 11 所),中科院上海技术物理所等单位。红外热成像探测器芯片作为核心技术,长期被美国、法国等少数军工企业垄断,在高端产品方面一直对我国实行严格的禁运措施。2000 年之后,法国 ULIS 公司开始每年向我国出口少量工业级低端产品。2005 年之前国内生产厂商主要以采购 ULIS 公司探测器芯片集成红外热像仪机芯产品为主。2008 年前后,以“核高基重大专项”(国家科技重大专项“核心电子器件、高端通用芯片及基础软件产品”)的组织实施为标志,自主可控的红外热成像探测器芯片及制造工艺研究成为解决国产化重大需求的研究焦点。2011 年之后突破国外技术封锁,探测器芯片核心技术自主可控的产品逐步开始量产。2019 年、2020 年之后,国内非制冷红外焦平面探测器及其机芯模组的主要技术指标和制造工艺水平,与国际业界知名公司的差距明显缩小,个别指标已达到甚至超过国际知名公司同类像元尺寸产品。在超大阵列规模方面,焦平面阵列规模及像元中心距指标已达到 $1280\times 1024/12\ \mu\text{m}$ 、 $1280\times 1024/10\ \mu\text{m}$,灵敏度(NETD)指标已达到 $<40\ \text{mK}$ 、 $<30\ \text{mK}$,正在跻身国际业界知名

公司行列。在 SWaP-C 方面,已攻克晶圆级封装 WLP、晶圆级光学镜头 WLO、无热电冷却元件 TEC-Less、红外图像信号处理 ISP 芯片等关键技术,微小型红外热像一体化组件/机芯模组产品的尺寸和重量也已部分达到国外同类先进产品[2] [4] [17]。

国内生产厂商主要有:武汉高德红外股份有限公司(1999 年成立)、浙江大立科技股份有限公司(2001 年成立)、北方广微科技有限公司(2006 年成立,中国兵器集团控股)、烟台睿创微纳技术股份有限公司(2009 年成立,下属有艾睿光电等多家子公司)、杭州海康微影传感科技有限公司(2016 年成立,海康威视子公司)等。据 2020 年国际知名市场调研和战略咨询公司法国 YOLE (Yole Development)发布全球 10 大红外热像仪最新品牌排行,睿创微纳、高德红外、大立科技、北方广微四家公司上榜,也反映了我国非制冷红外焦平面探测器自主研发与制造水平及市场占有率正在改变全球红外行业格局。近年来国内探测器技术进展情况列于表 4,典型的微小型机芯模组产品技术参数列于表 5。

Table 4. Technological progress of domestic uncooled infrared focal plane detectors

表 4. 国内的非制冷红外焦平面探测器技术进展

厂商	薄膜材料	封装技术	阵列规模像元中心距	帧频	灵敏度(NETD)	推出时间	状态
高德红外	VOx/ α -Si	MP	640 × 512/17 μ m	50/60 Hz	<30 mK	2014	成熟产品
		WLP	1280 × 1024/12 μ m	50/60 Hz	<30 mK	2019	成熟产品
大立科技	α -S	MP/CP	1024 × 1024/15 μ m	—	<60 mK	2014	成熟产品
		WLP	1920 × 1080/15 μ m	60 Hz	<50 mK	2019	成熟产品
		WLP	3072 × 2048/12 μ m	60 Hz	<60 mK	2019	—
北方广微	VOx	MP	160 × 120/45 μ m	—	<50 mK	2009	成熟产品
		MP/CP	640 × 512/17 μ m	50/60 Hz	<45 mK	2017	成熟产品
睿创微纳	VOx	MP/CP	384 × 288/17 μ m	50/60 Hz	<40 mK	2016	成熟产品
		WLP	1280 × 1024/12 μ m	—	—	2019	成熟产品
		WLP	1280 × 1024/10 μ m	30 Hz	<40 mK	2019	—
		WLP	1920 × 1080/8 μ m	—	—	2020	—
海康微影	VOx	CP/WLP	1024 × 768/17 μ m	—	<50 mK	2018	成熟产品
		WLP	1280 × 1024/12 μ m	60 Hz	<50 mK	2020	成熟产品

Table 5. Technical parameters of domestic typical micro/small module and products of thermal imager

表 5. 国内的典型微小型机芯模组产品技术参数

厂商	型号	阵列规模像元中心距	灵敏度(NETD)	重量(g)	外形尺寸(mm ³)	功耗(mW)	推出时间
高德红外	Coin417	400 × 300/17 μ m	<40 mK	20	25.4 × 25.4 × 10.4	1000	2017
	COIN417R	400 × 300/17 μ m	<40 mK	13	25.4 × 25.4 × 14.1	1100	2017
	COIN212R	256 × 192/12 μ m	<40 mK	7.5	20 × 20 × 32.6	400	2017
	TIMO-256	256 × 192/12 μ m	<45 mK	—	15 × 13 × 6.83	70	2021
睿创微纳	Nano	384 × 288/17 μ m	<50 mK	12	21 × 21 × 16.5	500	2018
	Tiny I-A	256 × 160/12 μ m	<50 mK	2	13 × 13 × 7.3	40	2019
	Micro III	640 × 512/12 μ m	<50 mK	20	26 × 22 × 26	900	2020
	T2L	256 × 192/12 μ m	—	18	26 × 26 × 26.6	350	2020

3. 应用

近年来随着超大面阵技术、降低 SWaP-C 技术的发展,非制冷红外焦平面探测器迅速在军事武器装备、工业、交通、安防监控、消费电子、医学等领域大规模推广应用[1] [2] [3] [4] [5]。

1) 各种武器平台。在美国等西方发达国家,陆地武器(坦克、装甲车等)的夜视、单兵携带式夜视装备、飞行武器的目标导引和攻击制导与反导、舰载红外成像夜间目标识别等配置的红外焦平面探测器,

大量型号产品列装部队和应用已成为现代战争重要的战术和战略手段。

2) 民用行业。非制冷红外焦平面探测器及其产品已应用到工业制造过程、电力检测、辅助车辆驾驶、24 小时视频监控、灾害事故救援、节能环保、消费电子、商用视觉增强、物联网、医疗诊断、疫情防控等各个方面。

4. 结论

红外成像系统通过探测物体/目标的热辐射或红外辐射, 转换形成电学视频信号, 完成成像信号处理、分析与控制功能, 其核心部件是红外焦平面探测器。随着非制冷红外焦平面阵列技术日趋成熟, 灵敏度显著提升, 微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器以其质轻体小、功耗低、效费比/性价比高以及寿命长等特点, 迅速在军用装备和民用领域大规模推广应用。非制冷红外焦平面探测器技术的未来发展, 将仍围绕高性能大面阵与降低 SWaP-C 两条主线展开, 包括小像元尺寸与超高清红外成像、机芯模组集成化与智能化, 以及低功耗低成本等方面。

1) 更小的像元尺寸不仅能够提高焦平面阵列的高清分辨率, 同时还可以减少光学系统尺寸, 降低成像系统尺寸/重量/功耗/成本。在高端军事应用和航天领域, 已有超高清红外焦平面阵列的报道。像元尺寸的减小目前已接近光学衍射极限, 随着突破传统衍射极限的亚波长微纳光学(subwavelength micro-nano optics)技术进步, 在保持微测辐射热计性能的同时, 像元中心距从目前的 10 μm 水平还将会压缩到更小像元尺寸。

2) 采用晶圆级光学镜头(WLO)、像元级封装(PLP)、三维单芯片系统(3DSoC)、三维堆叠集成电路芯片(3DSIC)等新技术, 以及新一代 TSV 三维垂直封装的三维单芯片系统技术等, 将会进一步促进非制冷红外焦平面探测器朝着红外热像一体化组件/机芯模组的集成化与智能化方向发展。

3) 降低功耗是红外热像一体化组件/机芯模组的重要方面, 特别是在军用便携式装备、微型导弹攻击制导等高端应用领域, 以及新兴的物联网应用领域。尽管微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器是目前的主流商业化技术, 但仍存在探测器膜悬浮、真空封装、响应慢、易受温度变化影响等问题, 一般需要热电稳定器。此外, ROIC 的电阻变化需要外部设置偏压来得到辐射信号的函数。这些问题阻碍了微测辐射热计的高性能和更低的功耗。无快门(shutter-less)技术结合无热电冷却元件(TEC-less)将是进一步降低机芯模组系统功耗和压缩体积的研究方向。

基金项目

国家自然科学基金项目(No. 51979085)。

参考文献

- [1] Kimata, M. (2018) Uncooled Infrared Focal Plane Arrays. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **13**, 4-12. <https://doi.org/10.1002/tee.22563>
- [2] 中经产业研究院. 2021 年中国红外探测器行业研究报告(编号: BGK2021203862) [R]. 北京: 中经产业研究院, 2021.
- [3] 中经视野研究院. 中国探测器行业市场前景分析预测报告[R]. 北京: 中经视野信息咨询有限公司, 2021.
- [4] 恒州博智(QYR)电子及半导体研究中心(北京恒州博智信息咨询有限公司). 2021-2027 全球与中国非制冷型红外探测器市场现状及未来发展趋势[R]. 北京: 恒州博智信息咨询有限公司, 2021.
- [5] Bhan, R.K. and Dhar, V. (2019) Recent Infrared Detector Technologies, Applications, Trends and Development of HgCdTe Based Cooled Infrared Focal Plane Arrays and Their Characterization. *Opto-Electronics Review*, **27**, 174-193. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.04.004>
- [6] Rogalski, A., Martyniuk, P. and Kopytko, M. (2016) Challenges of Small-Pixel Infrared Detectors: A Review. *Reports*

- on Progress in Physics*, **79**, Article ID: 046501. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/4/046501>
- [7] 吕衍秋, 鲁星, 鲁正雄, 李墨. 铋化物红外探测器国内外发展综述[J]. 航空兵器, 2020, 27(5): 1-12.
- [8] Li, W., Ni, Z., Wang, J. and Li, X. (2019) A Front-Side Microfabricated Tiny-Size Thermopile Infrared Detector with High Sensitivity and Fast Response. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **66**, 2230-2237. <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2903589>
- [9] Sengupta, L., Auroux, P.A., Mcmanus, D., Harris, D.A., Blackwell, R.J., Bryant, J., Boal, M. and Binkerd, E. (2015) BAE Systems' SMART Chip Camera FPA Development. *Proceedings of SPIE*, **9451**, Article ID: 94511B. <https://doi.org/10.1117/12.2177011>
- [10] Kruse, P.W. (2001) Uncooled Thermal Imaging Arrays Systems and Applications. SPIE Press, Bellingham. <https://doi.org/10.1117/3.415351>
- [11] Liu, C., Fu, J., Hou, Y., Zhou, Q. and Chen, D. (2021) A Self-Test Method of Structural Failures of Uncooled Infrared Focal Plane Array. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, **34**, 235-240. <https://doi.org/10.1109/TSM.2020.3047849>
- [12] Kimata, M. (2013) Trends in Small-Format Infrared Array Sensors. *Sensors 2013 IEEE*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2013.6688495>
- [13] Dao, T.D., Doan, A.T., Ishii, S., Yokoyama, T., Ørjan, H.S., Ngo, D.H., Ohki, T., Ohi, A., Wada, Y., Niikura, C., Miyajima, S., Nabatame, T. and Nagao, T. (2019) MEMS-Based Wavelength-Selective Bolometers. *Micromachines*, **10**, Article No. 416. <https://doi.org/10.3390/mi10060416>
- [14] Tawfik, H.H., Allidina, K., Nabki, F. and El-Gamal, M.N. (2019) Dual-Level Capacitive Micromachined Uncooled Thermal Detector. *Sensors*, **19**, Article No. 5434. <https://doi.org/10.3390/s19245434>
- [15] Göktaş, H. and Gökhan, F.S. (2019) Analysis and Simulation of Forcing the Limits of Thermal Sensing for Microbolometers in CMOS-MEMS Technology. *Micromachines*, **10**, Article No. 733. <https://doi.org/10.3390/mi10110733>
- [16] 徐立伟, 李强, 张环. 红外成像系统光学性能评估综述[J]. 光电子, 2017, 7(4): 117-126. <https://doi.org/10.12677/oe.2017.74017>
- [17] 李静, 宋广, 董珊, 陈文礼, 王宏臣. 非制冷红外焦平面探测器研究进展与趋势[J]. 红外, 2020, 41(10): 1-14, 24.
- [18] 李煜, 白丕绩, 陶禹, 袁名松. 应用于红外成像导引头的非制冷焦平面探测器[J]. 红外技术, 2016, 38(4): 280-289.
- [19] Yon, J.J., Dumont, G., Goudon, V., Becker, S., Arnaud, A., Cortial, S. and Tisse, C.L. (2014) Latest Improvements in Microbolometer thin Film Packaging: Paving The way for Low-Cost Consumer Applications. *Proceedings of SPIE*, **9070**, Article ID: 90701N. <https://doi.org/10.1117/12.2050378>
- [20] Liddiard, K.C. (1983) Thin-Film Resistance Bolometer IR Detectors. *Infrared Physics*, **24**, 57-64. [https://doi.org/10.1016/0020-0891\(84\)90048-4](https://doi.org/10.1016/0020-0891(84)90048-4)
- [21] Wood, R.A., Han, C.J. and Kruse, P.W. (1992) Integrated Uncooled Infrared Detector Imaging Array. *Technical Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, 22-25 June 1992, 132-135. <https://doi.org/10.1109/SOLSEN.1992.228308>
- [22] Endoh, T., Tohyama, S., Yamazaki, T., *et al.* (2013) Uncooled Infrared Detector with 12 μm Pixel Pitch Video Graphics Array. *Proceedings of SPIE*, **8704**, Article ID: 87041G. <https://doi.org/10.1117/12.2013690>
- [23] Skidmore, G.D. (2016) Uncooled 10 μm FPA Development at DRS. *Proceedings of SPIE*, **9819**, Article ID: 98191O. <https://doi.org/10.1117/12.2229079>
- [24] 中商产业研究院. 2017-2027 全球及中国光谱红外探测器行业深度研究报告(编号: XY906681) [R]. 深圳: 中商产业研究院, 2018.