

文章编号: 1672-8785(2020)10-0001-14

非制冷红外焦平面探测器 研究进展与趋势

李 静¹ 宋 广² 董 珊¹ 陈文礼¹ 王宏臣¹

(1. 烟台艾睿光电科技有限公司, 山东 烟台 264006;

2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 介绍了非制冷红外焦平面探测器的基本工作原理, 并概括了其关键技术参数。梳理了非制冷红外焦平面探测器技术与产品的发展简史, 综述了国内外相关研究及产品开发的最新进展。最后还讨论了非制冷红外焦平面探测器技术的发展趋势。

关键词: 非制冷红外焦平面探测器; 微测辐射热计; 氧化钒薄膜

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.10.001

Research Progress and Trend of Uncooled Infrared Focal Plane Detectors

LI Jing¹, SONG Guang², DONG Shan¹, CHEN Wen-li¹, WANG Hong-chen¹

(1. Yantai IRay Technology Co., Ltd., Yantai 264006, China;

2. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The basic working principle of the uncooled infrared focal plane detector is introduced, and its key technical parameters are summarized. The brief history of the development of uncooled infrared focal plane detector technology and products is reviewed, and the latest progress in related research and product development at home and abroad is reviewed. Finally, the development trend of uncooled infrared focal plane detector technology is discussed.

Key words: uncooled infrared focal plane detector; microbolometer; vanadium oxide thin film

0 引言

近二十年间, 随着大规模集成电路技术与微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术的飞速发展, 非制冷红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)探测

器技术日趋成熟, 相关产品也逐步实现系列化。在学术界与产业界的共同推动下, 非制冷红外焦平面探测器技术快速发展, 焦平面探测器的灵敏度显著提升^[1], 像元间距越来越小^[2], 阵列规模越来越大^[3]。非制冷红外成像

收稿日期: 2020-07-22

作者简介: 李静(1988-), 女, 山东济南人, 工程师, 硕士, 主要从事非制冷红外焦平面探测器研究。

E-mail: jing.li@infisnse.cn

技术以其低成本、小尺寸、低功耗以及长寿命等优点迅速在军用国防装备和商用领域得到了大规模的推广应用。非制冷红外焦平面阵列探测器被广泛用于武器制导、武器热瞄具、红外侦查、边境警戒、海防监控、反恐救援等军用领域,以及安防监控、汽车夜间辅助驾驶、工业监控、疾病防控、医疗诊断、节能环保等民用领域(包括手机配件、可穿戴设备等个人消费电子领域)。

1 非制冷红外焦平面探测器的原理

非制冷红外焦平面探测器是指工作在室温附近的可将目标的入射红外辐射转换为电学视频信号的一种成像传感器。根据工作原理的不同,非制冷红外焦平面探测器可分为热释电、热电堆、热敏二极管以及微测辐射热计等类型。其中,微测辐射热计是一种热敏电阻型传感器。在红外辐射照射到传感器后,传感器温度升高,热敏薄膜的阻值改变。微测辐射热计型探测器是目前技术最成熟、市场占有率最高的主流非制冷红外焦平面探测器^[4]。

微测辐射热计是基于 MEMS 技术制造加工的微型传感器,是非制冷红外探测器的核心传感元件。它由底部反射镜、互联电极、绝热桥腿、热敏电阻和红外吸收桥面组成(见图 1)。其中,红外吸收桥面能够高效吸收外界红外辐射,引起温度变化,导致集成于桥面之中的热敏材料的电阻发生改变。专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)通过互联电极将微测辐射热计阵列的电阻变化经放大处理后转换为视频电学信号并将其输出。底部反射镜与红外吸收桥面构成特定波长的 1/4 波长共振吸收腔,可增强桥面的红外吸收。绝热桥结构用于降低桥面热敏电阻与读出电路衬底之间的热交换,使热敏电阻对红外辐射敏感。其材料与几何尺寸决定了桥面与 ASIC 之间的热传导能力,进而直接决定微测辐射热计的响应。热敏感材料包括氧化钒薄膜、非晶硅薄膜、非晶硅锗与单晶硅锗薄膜等。

美国 Honeywell 研究中心的 Kruse P W 等

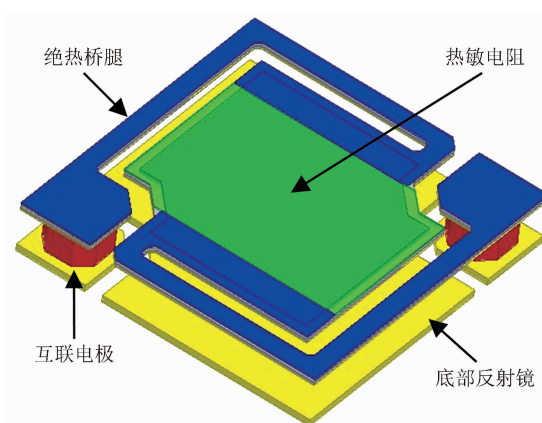


图 1 微测辐射热计的结构示意图

人对微测辐射热计的理论模型进行了系统阐述。微测辐射热计的响应度可表示为^[5]

$$\mathfrak{R} = \frac{\alpha \beta \eta i_b R_b}{G_e (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}} \quad (1)$$

式中, α 为热敏材料的电阻温度系数(Temperature Coefficient of Resistance, TCR); β 为填充因子; η 为微测辐射热计的吸收率; i_b 为偏置电流; R_b 为微测辐射热计的电阻; G_e 为微测辐射热计的有效热导; ω 为调制频率; τ_e 为有效热时间常数。微测辐射热计的噪声来源主要包括 1/f 噪声和 Johnson 噪声。1/f 噪声电压的有效值可表示为^[5]

$$\sqrt{\Delta V_{nf}^2} = \sqrt{V_b^2 k_f \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} \quad (2)$$

式中, k_f 为微测辐射热计的 1/f 噪声系数; V_b 为偏置电压; f_2 和 f_1 分别为微测辐射热计的噪声带宽上下限。微测辐射热计的 Johnson 噪声电压有效值可表示为^[5]

$$\sqrt{\Delta V_{nf}^2} = \sqrt{4KTR_b \Delta f} \quad (3)$$

式中, K 为玻尔兹曼常数; Δf 为噪声带宽。噪声带宽上下限 f_2 和 f_1 分别由积分时间 T_{int} 和凝视时间 T_{stare} 决定^[5]:

$$f_2 = \frac{1}{2T_{int}} \quad (4)$$

$$f_1 \approx \frac{1}{4T_{stare}} \quad (5)$$

显然,微测辐射热计热敏材料的噪声系数与电阻温度系数、光学吸收效率与填充因子、微测辐射热计结构材料的热导率与 MEMS 加

工工艺能力共同决定着探测器的性能参数。开发高性能敏感薄膜与低热导率结构材料, 设计高填充因子、低热导、高吸收效率的传感器结构以及研制低噪声读出电路一直是非制冷红外焦平面探测器研究的重点领域。

非制冷红外焦平面探测器的关键技术参数包括阵列规模、像元中心距、噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)、工作帧频、热响应时间和空间噪声等。其中, 阵列规模可表征图像分辨率。常规阵列规模包括 160×120 、 320×240 、 384×288 、 640×512 、 1024×768 和 1920×1080 。焦平面探测器的阵列规模越大, 图像分辨率越高, 图像越清晰。

像元中心距与光学系统共同决定了成像系统的空间分辨率。原则上来说, 当像元尺寸大于红外辐射波长时, 像元中心距越小, 图像的空间分辨率越高。目前非制冷红外焦平面探测器的像元中心距已低至 $10 \mu\text{m}$, 与长波红外光的中心波长相当。对于长波红外探测而言, 当像元中心距进一步减小到 $5 \mu\text{m}$ (长波红外光中心波长的一半) 时, 图像的空间分辨率主要受限于镜头的光学极限。

NETD 也被称为探测器灵敏度, 是非制冷红外焦平面探测器最重要的性能指标。它与传感器设计及薄膜材料等因素有关。NETD 越小, 探测器灵敏度越高。典型军用探测器的 NETD 需小于 50 mK 。

工作帧频与热响应时间决定了运动目标图像的延迟。对于导引头等快速目标成像应用来说, 工作帧频通常需要不低于 50 Hz , 探测器像元的热响应时间应小于 10 ms 。

空间噪声与 NETD 共同决定了图像质量。当空间噪声显著高于时域噪声时, 图像会明显劣化, 导致系统最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD) 显著降低。

2 非制冷红外焦平面探测器的历史与研究进展

早期用于研发非制冷红外焦平面的材料技术路线包括氧化钒 (VO_x)、钛酸锶钡 (BST) 和非晶硅 ($\alpha\text{-Si}$)。发展至今, 非制冷红外焦平面探测器产品主要包括氧化钒和非晶硅微测辐射热计两大技术阵营。其中, 氧化钒技术占有 70% 以上的市场份额, 是国际主流的非制冷红外成像技术。它源自美国 Honeywell 研究中心, 而非晶硅技术则源自美国 TI 公司和法国 CEA-Leti 实验室。国内的研究机构及厂家也分为氧化钒和非晶硅微测辐射热计两大技术阵营。通过投入大量的研究精力来紧追国际同行, 并于 2019 年步入了 $12 \mu\text{m}$ 像元产品时代。同时, 烟台艾睿光电科技有限公司 (以下简称“艾睿光电”) 已突破 $10 \mu\text{m}$ 像元技术, 缩小了与国际同行的差距。

2.1 非制冷红外焦平面探测器的发展简史

(1) 1978 年, Raytheon 公司和 TI 公司分别申请了 BST 技术专利。

(2) 20 世纪 80 年代, 在美国政府 HIDAD 项目的支持下, Raytheon 公司与 Honeywell 公司着手研制非制冷红外焦平面探测器。其中, Raytheon 公司致力于将 BST 技术商用化, 而 Honeywell 公司则选择研究 VO_x 技术。

(3) 1990~1994 年, Honeywell 公司将其成功研发的 VO_x 技术先后转让给多家公司, 形成了国际上非制冷红外焦平面探测器的主要供应商——FLIR、Raytheon Vision System、BAE System、DRS、SCD、NEC 等。

(4) 20 世纪 90 年代中期, TI 公司将其 BST 热成像技术推广至商用领域, 但由于该技术在性能方面落后于 VO_x 技术, 市场前景并不乐观。在同一时期, TI 公司开始研制非晶硅技术。随后他们将这两项技术打包卖给 Raytheon Commercial Infrared 公司, 后者在 2004 年又将其一起转卖给 L-3 公司。

(5) 20 世纪 90 年代末, 法国 CEA-Leti 实验室成功研制出了非晶硅非制冷红外焦平面探测器技术, 后来将其授权给 ULIS 公司进行量产。

(6) 1995 年, LORAL 公司(后被 BAE System 收购)和 ROCKWELL 公司(后被 DRS 收购)分别推出了各自的首款红外焦平面阵列产品。两者的阵列规模均为 320×240 , 像元中心距分别为 $46 \mu\text{m}$ 和 $51 \mu\text{m}$ 。

(7) 1998 年, Indigo Systems 公司在其成立两年后推出了首款红外焦平面读出电路(阵列规模为 160×120)。随后他们又推出了像元中心距为 $38 \mu\text{m}$ 的焦平面探测器产品。

(8) 1999 年, Raytheon 公司推出了当时灵敏度最高的 SB-151 型 VO_x IRFPA 产品。该探测器的阵列规模为 320×240 , 像元中心距为 $50 \mu\text{m}$, 像元响应率大于 $2.5 \times 10^7 \text{ V/W}$ 。

(9) 2000 年, ULIS 公司发布了自己的 $45 \mu\text{m}$ 产品(阵列规模为 320×240 , NETD 为 85 mK)。

(10) 2001 年, DRS 公司推出了首款 $25 \mu\text{m}$ IRFPA 产品(阵列规模为 320×240)。同年, Raytheon 公司也推出了 $25 \mu\text{m}$ IRFPA 产品(阵列规模包括 160×120 、 320×240 和 640×240)。随后, BAE System 公司推出了像元中心距为 $28 \mu\text{m}$ 、阵列规模为 320×240 的类似产品。自此, IRFPA 进入“20”时代。

(11) 2005 年, DRS 公司发布了首款 $17 \mu\text{m}$ IRFPA 产品(阵列规模为 640×480)。随后, Raytheon、BAE System、ULIS、FLIR、SCD 等公司也陆续推出了自己的 $17 \mu\text{m}$ IRFPA 产品。至今, $17 \mu\text{m}$ IRFPA 仍是国际非制冷红外成像市场的主流产品之一。

(12) 2009 年, 最后一家采用 BST 技术的厂商——L-3 公司停止生产 BST 产品。

(13) 2014~2016 年, NEC、BAE System、FLIR、Raytheon 等公司先后发布了 $12 \mu\text{m}$ IRFPA 的研究成果及产品。 $12 \mu\text{m}$ IRFPA 自此开始逐步替代 $17 \mu\text{m}$ IRFPA 而成为市场主流产品。

(14) 2014 年, FLIR Systems 公司推出了全球首款消费类红外相机——FLIR ONE。经过一年的改进, 他们于 2015 年推出的 FLIR

ONE 2 相机上集成了非制冷红外领域的诸多先进技术, 比如 $12 \mu\text{m}$ 像元、晶圆级封装(Wafer-Level Packaging, WLP)、晶圆级光学(Wafer-Level Optics, WLO)以及专用图像信号处理(Image Signal Processing, ISP)芯片等。

(15) 2015 年, 艾睿光电发布了像元中心距为 $14 \mu\text{m}$ 、工作帧频为 30 Hz 、NETD 小于 40 mK 的 1024×768 非制冷 IRFPA 探测器。

(16) 2015 年, DRS 公司在其官方网站上发布了像元中心距为 $10 \mu\text{m}$ 的 1280×1024 IRFPA 探测器。2016 年, 他们公开报道了这种探测器的性能指标和成像图片。该探测器的工作帧频为 30 Hz , NETD 小于 50 mK , 是目前世界上像元中心距最小的非制冷红外焦平面探测器^[6]。

2.2 国外研究进展

国外非制冷红外焦平面探测器源自 Honeywell 公司的氧化钒技术以及 TI 公司和 CEA-Leti 实验室的非晶硅技术。其中, 氧化钒技术的代表包括美国 DRS 公司、Raytheon 公司、BAE 系统公司、FLIR 公司, 以色列 SCD 公司以及日本 NEC 公司; 非晶硅技术的代表包括法国 ULIS 公司和美国 L-3 公司。这些公司又沿着超大面阵规模以及尺寸、重量、功耗、成本(Size Weight and Power-Cost, SWaP-C)两个方向进行着产品开发。

在大面阵与超大面阵成像方面, Raytheon 公司报道了基于视场拼接技术的 $17 \mu\text{m}$ 2048×1536 非制冷红外焦平面探测器, 并开发了 $12 \mu\text{m}$ 1920×1200 非制冷红外焦平面探测器。DRS 公司研制了 $10 \mu\text{m}$ 1280×1024 非制冷红外焦平面探测器和 $17 \mu\text{m}$ 1024×768 非制冷红外焦平面探测器。BAE 公司开发了 $12 \mu\text{m}$ 1920×1200 非制冷红外焦平面探测器, 并开始研制 $10 \mu\text{m}$ 1280×1024 非制冷红外焦平面探测器。SCD 公司开发了 $17 \mu\text{m}$ 1024×768 非制冷红外焦平面探测器。基于非晶硅技术, L-3 公司研制了 $12 \mu\text{m}$ 1280×1024 非制冷红外焦平面探测器, ULIS 公司开发了 $17 \mu\text{m}$ 1024×768 非

制冷红外焦平面探测器。韩国 i3 公司还利用氧化钛技术研制了 $12\text{ }\mu\text{m}$ 1024×768 非制冷红外焦平面探测器。

在 SWaP-C 方面, FLIR 公司研发了基于 $12\text{ }\mu\text{m}$ $160\times 120/80\times 60$ WLP 探测器和 WLO 技术的 Lepton 成像模组与 Boson 机芯。其中, Lepton 模组以小像元技术、WLP 技术、无制冷器 (Thermoelectric Cooler-Less, TEC-Less) 工作、ISP 和 WLO 技术为基础。在美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) LCTI-M 项目的支持下, DRS 公司、Raytheon 公司和 BAE 公司也开展了 SWaP-C 系统研究。其中 WLP、WLO、TEC-Less 和 ISP 等技术也是各家公司的研究重点。ULIS 公司在 2016 年突破了像元级封装 (Pixel-Level Packaging, PLP) 技术, 并将其用于 Micro80P Gen2 产品的生产。

2.2.1 DRS 公司

DRS 公司生产的非制冷红外焦平面探测器源自 Honeywell 公司于 1994 年授权给 Boeing Defense and Space 公司的氧化钒微测辐射热计技术。Boeing Defense and Space 公司在 1999 年报道了其 U4000 型非制冷红外焦平面探测器设计^[7]。2000 年, 该公司研制出了像元中心距为 $51\text{ }\mu\text{m}$ 、阵列规模为 320×240 、NETD 小于 30 mK 的 U3000 型非制冷红外焦平面探测器^[8]。DRS 公司于 2001 年收购了 Boeing Defense and Space 公司。2002 年, 他们推出了像元中心距为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、阵列规模为 640×480 、NETD 小于 50 mK 且集成内部校正功能的 U6000 型非制冷红外焦平面探测器^[9]。该公司于 2007 年报道了 $17\text{ }\mu\text{m}$ 640×480 非制冷红外焦平面探测器^[10], 并基于此技术陆续推出了 U3600 系列 320×240 、U6160 系列 640×480 和 U8000 系列 1024×768 非制冷红外焦平面探测器。这些探测器均具有传统插针陶瓷封装和无引脚芯片载体 (Leadless Chip Carrier, LCC) 两种封装形态 (见图 2)。DRS 公司生产的微测辐射热计采用了伞状双层微桥结构 (见

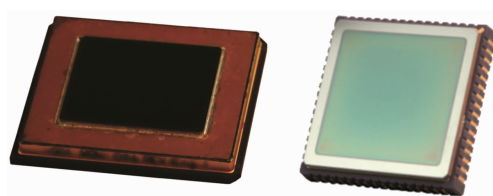


图 2 DRS 公司非制冷红外焦平面探测器的封装形式 (来源: www.leonardodrs.com)

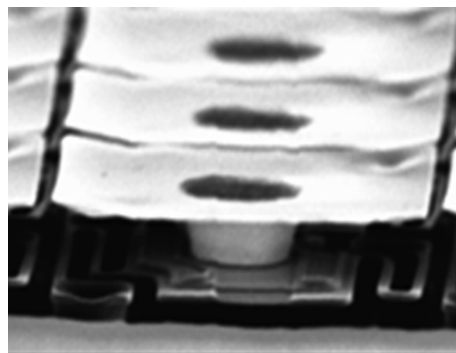


图 3 DRS 公司微测辐射热计的结构图^[10]

图 3), 提高了像元的填充因子与响应率。另外, 他们还采用了惠斯通电桥电路架构, 使探测器具备像元自加热效应的自动消除功能以及 TEC-Less 补偿功能。

DRS 公司在 DARPA LCTI-M 项目的支持下开展了低成本红外热像仪研制, 并于 2015 年发布了像元中心距为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的 1280×1024 、 640×512 和 320×256 系列探测器 (成像图片见图 4)。此外, 该公司还研发了 WLP 技术, 并且正在开发 WLO 技术。

2.2.2 Raytheon 公司

作为全球第五大国防合约商, Raytheon 公司在 1999 年推出了像元中心距为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、阵列规模为 320×240 、NETD 最低可达 8.6 mK 的 SB-151 型探测器^[11]。2001 年, 该公司报道了像元中心距为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的焦平面探测器系列, 包括 160×128 、 320×240 和 640×512 阵列规模^[12]。他们于 2007 年展示了像元中心距为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 的 640×512 非制冷红外焦平面探测器^[13]。2009 年, Raytheon 公司与 Freescale 公司达成合作, 将产能提高到每月 25000~75000 颗芯片。2011 年, 他们研制出了基于视场拼接技术的 $17\text{ }\mu\text{m}$ 2048×1536 非制冷红外焦平面



图 4 DRS 公司 $10\ \mu\text{m}$ 1280×1024 非制冷红外焦平面探测器的成像图(1280×720)^[6]

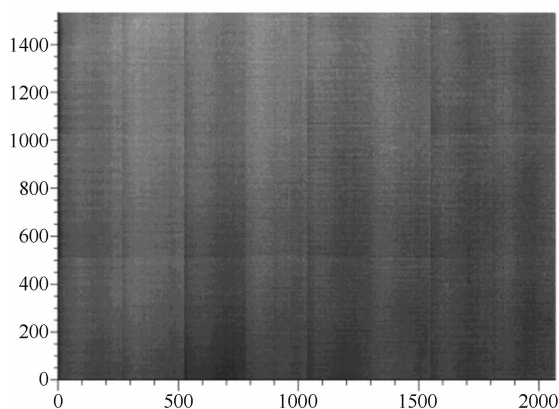


图 5 Raytheon 公司 $17\ \mu\text{m}$ 2048×1536 非制冷红外焦平面探测器的输出图像^[14]

探测器(输出图像见图 5)^[14]。

Raytheon 公司在 DARPA LCTI-M 项目的支持下开展了低成本红外热像仪研制,并于 2015 年报道了像元中心距为 $12\ \mu\text{m}$,阵列规模涵盖 1920×1200 、 640×480 和 206×156 的产品系列^[15]。图 6 为该探测器像元的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图片。另外,这些器件均采用了 WLP 技术(见图 7)。Raytheon 公司的 $12\ \mu\text{m}$ 206×156 产品已经用 Seek Thermal 品牌进军消费电子领域,且售价仅为 199 美元。

2.2.3 BAE 系统公司

BAE 系统公司是世界第三大军火供应商,

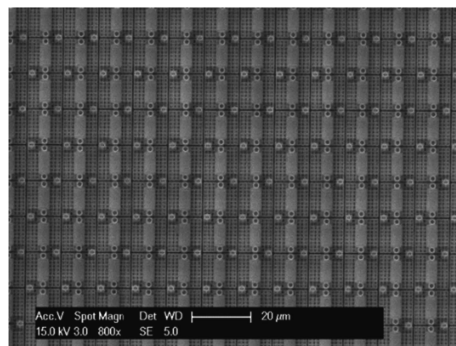


图 6 Raytheon 公司 $12\ \mu\text{m}$ 像元的 SEM 图片^[15]

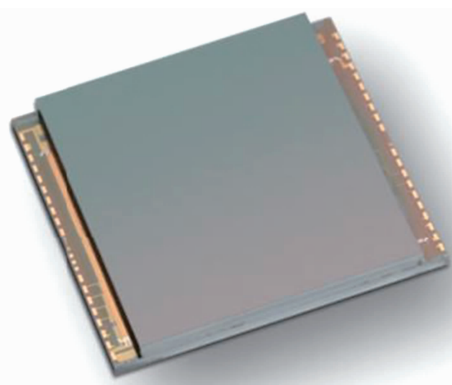


图 7 Raytheon 公司的晶圆级封装探测器^[15]

也是世界知名的氧化钒非制冷红外焦平面探测器生产厂商(北美子公司 BAE Systems Inc.)。2005 年,该公司推出了三种型号的热像仪机芯: SIM500L(像元中心距为 $46\ \mu\text{m}$ 、阵列规模为 160×120)、SIM500H(像元中心距为 $28\ \mu\text{m}$ 、阵列

规模为 320×240) 和 SIM500X (像元中心距为 $28 \mu\text{m}$ 、阵列规模为 640×480)^[16]。图 8 为 BAE 系统公司 $46 \mu\text{m}$ 像元的 SEM 图片。

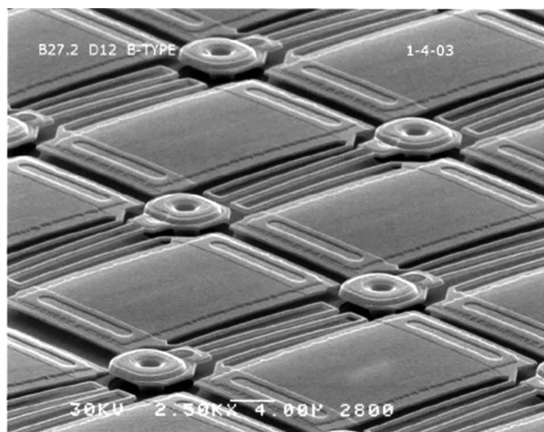


图 8 BAE 公司 $46 \mu\text{m}$ 像元的 SEM 图片^[16]

BAE 系统公司于 2007 年报道了像元中心距为 $17 \mu\text{m}$ 的 640×480 非制冷红外焦平面探测器^[17]。2009 年, 他们研制出了像元中心距为 $17 \mu\text{m}$ 、NETD 小于等于 35 mK 的 1024×768 非制冷红外焦平面探测器^[18]。

BAE 系统公司在 DARPA LCTI-M 项目的支持下开展了低成本红外热像仪研制, 并于 2014 年报道了 $12 \mu\text{m}$ 640×480 非制冷红外成像机芯。2015 年, 该公司继续深入报道了其在 LCTI-M 项目支持下开展 Smart-Chip 热像仪(见图 9)研制工作的进展(其探测器采用晶圆级封装技术)^[19]。2019 年, 他们在日本红外阵列传感器论坛上介绍了第二代全高清非制冷红外机芯——Athena 1920 ($1920 \times 1200 @ 12 \mu\text{m}$)。作为第一代产品 TWV1912 的升级版, Athena 1920 机芯的工作帧频为 60 Hz , NETD 为 50 mK 。

2.2.4 FLIR 系统公司

FLIR 系统公司是全球红外热成像仪设计、制造及销售领域的领导者。作为创新成像系统制造领域的领军企业, FLIR 系统公司的产品范围涉及红外热像仪、航空摄像机和机械检测系统等。该公司不单独销售焦平面探测器, 都是以机芯或整机系统形式销售。他们在 2004 年收购 Indigo Systems 公司后便具备了 TEC-

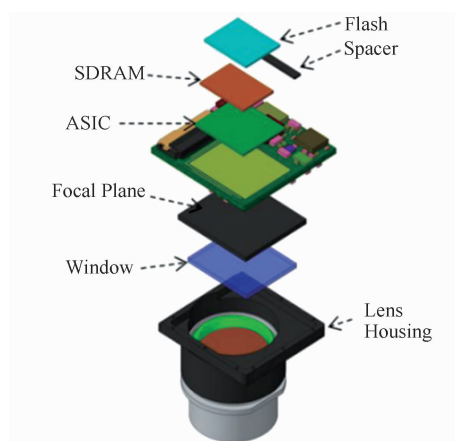


图 9 BAE 公司的 Smart-Chip 热像仪^[19]

Less 非制冷红外焦平面探测器技术, 其探测器集成了片上非均匀性校正和模拟数字转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 模块。目前, FLIR 系统公司生产的非制冷焦平面探测器的像元中心距以 $17 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$ 为主; 阵列规模包括 336×256 和 640×512 ; 封装形式上既有陶瓷管壳封装, 也有晶圆级封装; NETD 指标约为 40 mK 左右; 热响应时间约为 $10 \sim 15 \text{ ms}$ 。

FLIR 系统公司基于 WLP、WLO 和 ASIC 芯片技术研发了采用 $17 \mu\text{m}$ 80×60 非制冷红外焦平面探测器的 FLIR One 型低成本小型化成像模组, 随后又发布了基于 Lepton 3 的 $12 \mu\text{m}$ 160×120 非制冷红外热像仪模组(售价仅为 199 美元)。通过采用双光融合的技术方案实现了较好的成像效果与应用尝试。图 10 为 Lepton 系列产品的实物图。

2.2.5 SCD 公司

2010 年, SCD 公司报道了基于氧化钽材料的 $17 \mu\text{m}$ 640×480 非制冷红外焦平面探测器^[20]。该公司的 $17 \mu\text{m}$ 系列产品的面阵规模包括 384×288 、 640×480 和 1024×768 ; 热响应时间约为 10 ms ; NETD 指标约为 50 mK 。他们的探测器产品主要针对特殊应用市场, 并长久以性能与功耗著称。

2.2.6 NEC 公司

NEC 公司是一家采用氧化钽技术的非制冷红外焦平面探测器生产厂商, 拥有像元中心



图 10 FLIR 公司的 Lepton 系列产品(来源: www.flir.cn)

距为 $23.5\ \mu\text{m}$ 、面阵规模为 320×240 和 640×480 的探测器产品。这些产品是基于屋檐状双层微测辐射热计技术制成的。2013 年, NEC 公司成功研制出了像元中心距为 $12\ \mu\text{m}$ 、NETD 为 $60\ \text{mK}$ 的 640×480 探测器^[21]。该探测器采用了基于三层微桥技术的传感器结构(见图 11)。

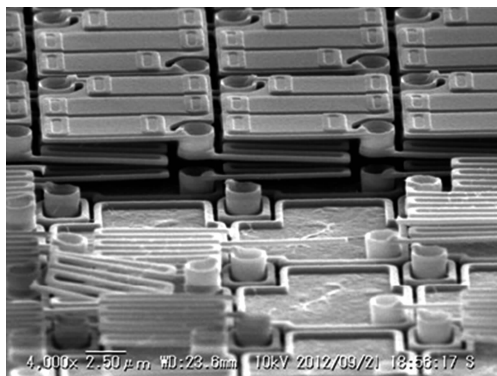


图 11 NEC 公司 $12\ \mu\text{m}$ 微测辐射热计的 SEM 图片^[21]

2.2.7 ULIS 公司

ULIS 公司(2019 年与 Sofradir 公司合并成为 Lynred 公司)的非制冷红外焦平面探测器源自 CEA-Leti 实验室的非晶硅微测辐射热计技术。2000 年, CEA-Leti 实验室和 Sofradir 公司联合研制出了像元中心距为 $45\ \mu\text{m}$ 、阵列规模为 320×240 、NETD 小于等于 $70\ \text{mK}$ 的非制冷红外焦平面探测器产品^[22]。2002 年, ULIS 公司推出了像元中心距为 $35\ \mu\text{m}$ 、阵列规模为 160×120 、NETD 为 $36\ \text{mK}$ 的非制冷红外焦平面探测器^[23]。该公司在 2003 年报道

了晶圆级封装研究, 2005 年开发了 $25\ \mu\text{m}$ 像元技术^[24], 2008 年研制了 $17\ \mu\text{m}$ 1024×768 非制冷红外焦平面探测器^[25], 并于 2017 年和 2019 年相继发布了 $12\ \mu\text{m}$ 系列产品——Atto 320 和 Atto 640 (NETD 小于 $60\ \text{mK}$)。此外, CEA-Leti 实验室还对 PLP 技术进行了开发; ULIS 公司也投资了 2000 万欧元, 用于将这种技术推向产业化, 从而进军消费电子领域^[26]。2016 年 10 月, 据 Infrared Imaging News 报道, ULIS 公司已突破 PLP 技术, 并将其用于生产 Micro80P Gen2 产品(见图 12)。

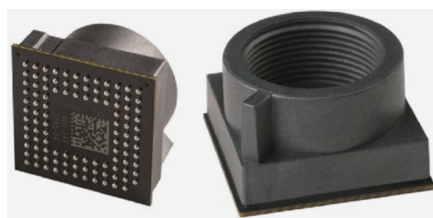


图 12 ULIS 公司的 Micro80P Gen2 产品(来源: www.lynnred.com)

2.2.8 L-3 公司

L-3 公司采用非晶硅热敏材料技术方案, 在非晶硅红外探测器的出货量上仅次于 ULIS 公司。他们在 2009 年实现了像元中心距为 $17\ \mu\text{m}$ 的探测器的量产, 其产品的阵列规模覆盖了 320×240 、 640×480 和 1024×768 。据报道, 该公司生产的 $17\ \mu\text{m}$ 探测器在 $10\ \text{ms}$ 热响应时间下可达到 $35\ \text{mK}$ 的 NETD 水平。除了非晶硅之外, 他们也将非晶硅锗材料作为热敏材料进行产品开发, 以期提升产品性能。L-3 公司在 2008 年便报道了基于 WLP 技术开发的非制冷红外焦平面探测器(见图 13)^[27]。2017 年 5 月, 据 Infrared Imaging News 报道, 该公司发布了首款像元中心距为 $12\ \mu\text{m}$ 的探测器产品(阵列规模为 1280×1024)。

2.3 国内研究进展

国内非制冷红外焦平面探测器研究的发展相对迟缓, 早期以高校和科研院所为主力军, 且侧重于材料与原型器件研制。2005 年之前, 国内红外成像厂家主要通过从 ULIS 公司采购焦平面探测器来研发成像机芯和热像仪。国内

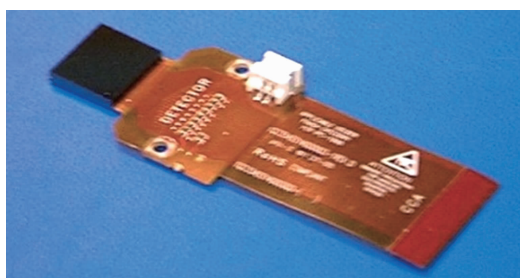
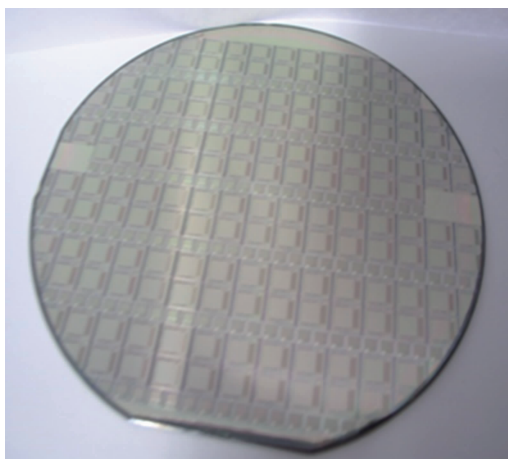


图 13 L-3 公司的非制冷红外焦平面探测器^[27]

红外成像焦平面探测器共经历了材料与器件原理研究(2000~2005 年)、产品研制(2005~2010 年)、军品国产化推进(2010~2015 年)三个阶段,“十三五”期间则正在进行产品系列化与产业化的全面推进。

2.3.1 材料与器件原理研究

2000~2005 年,随着 Honeywell 公司对非制冷红外成像技术的小幅披露,国内高校和科研院所对非制冷红外焦平面探测器的材料及器件原理进行了研究。研究主力包括华中科技大学^[28-29]、电子科技大学^[30]以及中国兵器工业集团昆明物理研究所^[31]等。研究方向主要集中在氧化钒与 BST 薄膜材料技术、热绝缘微桥技术和读出电路平坦化技术等^[36-46],像元尺寸为 100~45 μm ,阵列规模包括 32×32 和 160×120。具有代表性的研究成果是,2003 年华中科技大学的易新建团队研制出了我国首款非制冷红外焦平面探测器原型(见图 14)。该探测器的阵列规模为 32×32,像元尺寸为 100 μm ^[47]。



2.3.2 产品研制

2005~2010 年,国内主要开展了非制冷红外焦平面探测器产品的研制工作。主要代表包括电子科技大学、北方广微科技有限公司(以下简称“北方广微”)、浙江大立科技股份有限公司(以下简称“大立科技”)和艾睿光电等,研制产品的像元中心距包括 45 μm 和 35 μm ,阵列规模包括 384×288 和 160×120。这些研究机构都采用了国外相对成熟的金属封装形式。其中,北方广微和艾睿光电集中进行了氧化钒技术开发,而大立科技则选择了非晶硅技术路线。代表成果是,2009 年北方广微研制出了我国首款非制冷红外焦平面探测器产品。该探测器的阵列规模为 160×120,像元尺寸为 45 μm 。在此期间,大立科技也报道了基于非晶硅的焦平面探测器产品;艾睿光电则围绕氧化钒薄膜和热绝缘微桥结构进行了系列技术开发。

2.3.3 军品国产化推进

2011~2015 年,国内开始推进非制冷红外焦平面探测器的军品国产化,参与的代表企业包括艾睿光电、北方广微、大立科技以及武汉高德红外股份有限公司(以下简称“高德红外”)等。研制产品的像元中心距包括 25 μm 、20 μm 、17 μm 和 14 μm ,阵列规模覆盖 1024×768、800×600、640×512 和 384×288。代表成果是,2015 年艾睿光电发布了我国首款阵

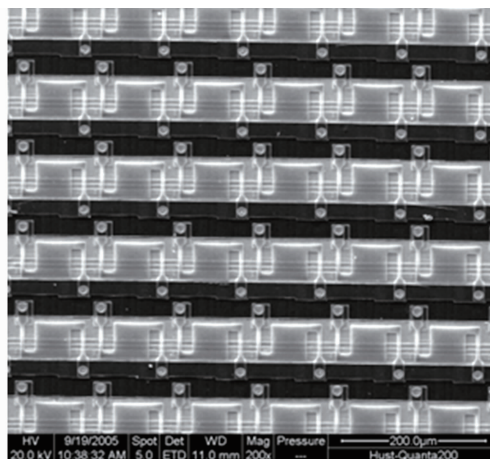


图 14 华中科技大学非制冷红外焦平面探测器的晶圆以及微测辐射热计 SEM 图片^[47]

列规模为 1024×768 (XGA)、像元尺寸为 $14 \mu\text{m}$ 的氧化钒非制冷红外焦平面探测器。这是我国当时像元中心距最小的非制冷焦平面探测器产品。目前,艾睿光电的非制冷探测器产品已经在多个军品型号项目中顺利通过了严苛的可靠性考核,并实现了批量供货。

2.3.4 产品系列化与产业化

2016 年至今,国内民营企业全面开展了非制冷红外焦平面探测器产品的系列化与产业化。代表企业包括艾睿光电、北方广微、大立科技和高德红外等。研制产品的像元中心距包括 $20 \mu\text{m}$ 、 $17 \mu\text{m}$ 、 $15 \sim 12 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$,阵列规模覆盖 1920×1080 、 1280×1024 、 1024×768 、 800×600 、 640×512 、 384×288 、 256×192 、 160×120 和 80×80 。其中,量产产品集中于 $17 \mu\text{m}$ 像元,并逐步减小至 $12 \mu\text{m}$ 。在这些产品的产业化进程中采用了金属、陶瓷以及晶圆级封装技术,年产能为数千至数十万个不等。

2016 年 5 月,艾睿光电发布了 $17 \mu\text{m}$ 640×512 第二代探测器系列产品(器件 NETD 小于 30 mK);2017 年进一步发布了 $17 \mu\text{m}$ 384×288 陶瓷和晶圆级封装数字输出产品(器件 NETD 小于 50 mK);2018 年推出了 $12 \mu\text{m}$ 1280×1024 探测器;2019 年发布了 $10 \mu\text{m}$ 1280×1024 探测器(NETD 小于 40 mK)。表 1 列出了艾睿光电主要探测器产品的技术指标。可以

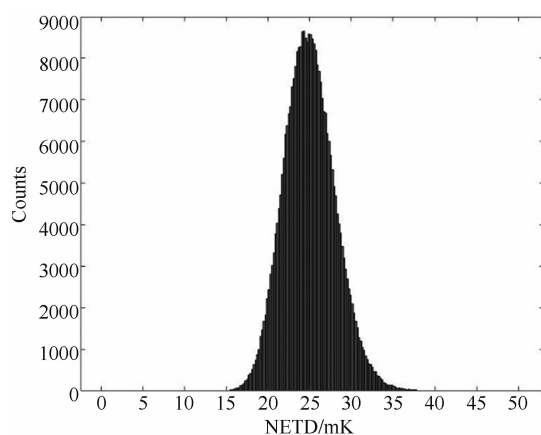


图 15 艾睿光电 $12 \mu\text{m}$ 640×512 探测器的典型 NETD 直方图

看出,在减小像元中心距的同时,保证了同样甚至更好的灵敏度指标。图 15 为艾睿光电 $12 \mu\text{m}$ 640×512 非制冷红外焦平面探测器的典型 NETD 直方图。图 16 为艾睿光电 $12 \mu\text{m}$ 1280×1024 探测器的成像图片(分辨率为 1920×1080)。在批量生产方面,艾睿光电正在致力于优化产品一致性,即通过优化设计与制造工艺来提升探测器的出货一致性。

2.3.5 国内研究进展小结

表 2 列出了国内研究机构目前最先进的非制冷红外焦平面探测器技术指标。可以看出,国内研究机构在像元中心距和阵列规模方面紧跟国际水平;器件 NETD 接近甚至超过某些国际研究机构的同等像元尺寸产品。

在 SWaP-C 方面,国内厂商也已突破 WLP、

表 1 艾睿光电非制冷红外探测器产品的技术指标

参 数	型 号					
	RTD611/311	RTD3172C	RTD2121	RTD3122	RTD6122	S121
阵列规模	$640 \times 512 / 384 \times 288$	384×288	256×192	384×288	640×512	1280×1024
像元尺寸	$17 \mu\text{m}$	$17 \mu\text{m}$	$12 \mu\text{m}$	$12 \mu\text{m}$	$12 \mu\text{m}$	$12 \mu\text{m}$
工作帧频	50/60 Hz	50/60 Hz	30 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz	30 Hz
输出模式	模拟	数字	数字	数字	数字	数字
动态范围	2.4 V	$>75 \text{ dB}$	$>75 \text{ dB}$	$>75 \text{ dB}$	$>75 \text{ dB}$	$>70 \text{ dB}$
NETD	$<30 \text{ mK}$	$\leq 40 \text{ mK}$	$<40 \text{ mK}$	$<40 \text{ mK}$	$<40 \text{ mK}$	$<40 \text{ mK}$
良元率	$>99.5\%$	$\geq 99.5\%$	$>99.9\%$	$>99.9\%$	$>99.9\%$	$>99.9\%$
封装形式	金属	陶瓷	WLP	陶瓷/ WLP	金属/陶瓷 /WLP	金属/ 陶瓷

图 16 艾睿光电 12 μm 1280 $\times$ 1024 探测器的成像图(分辨率为 1920 $\times$ 1080)

表 2 国内非制冷红外探测器技术指标对比

厂商	技术路线	像元尺寸	阵列规模	帧频	输出模式	灵敏度 (NETD)	推出时间
艾睿光电	氧化钒	10 μm	1280 $\times$ 1024	30 Hz	数字	<40 mK	2019
高德红外	氧化钒	12 μm	1280 $\times$ 1024	50/60 Hz	数字	<30 mK	2019
大立科技	非晶硅	15 μm	1920 $\times$ 1080	60 Hz	模拟	<50 mK	2019
北方广微	氧化钒	17 μm	640 $\times$ 512	60 Hz	模拟	<50 mK	2017

表 3 全球典型微型机芯模组产品

厂商	型号	像元尺寸	阵列规模	NETD	重量	产品尺寸	功耗	推出时间
BAE	Smart	12 μm	640 $\times$ 480	<50 mK	5.1 g	2.9 cm ³	490 mW	2015
FLIR	Boson	12 μm	320 $\times$ 640	<40 mK	7.5 g	21 $\times$ 21 $\times$ 11 mm ³	500 mW	2016
FLIR	Lepton2.0	17 μm	80 $\times$ 60	<50 mK	—	10.8 $\times$ 11.7 $\times$ 5.9 mm ³	150 mW	2016
ULIS	M80L90	34 μm	80 $\times$ 80	<100 mK	2 g	14 $\times$ 14 $\times$ 9 mm ³	55 mW	2016
高德红外	Coin417	17 μm	400 $\times$ 300	<40mK	20 g	25.4 $\times$ 25.4 $\times$ 32.6 mm ³	1 W	2017
艾睿光电	Nano	17 μm	384 $\times$ 288	<50 mK	12 g	21 $\times$ 21 $\times$ 16.5 mm ³	500 mW	2018
艾睿光电	Tiny1-A	12 μm	256 $\times$ 160	<50 mK	2 g	13 $\times$ 13 $\times$ 7.3 mm ³	40 mW	2019



图 17 艾睿光电生产的 Tiny1-A 机芯

ISP、TEC-Less 等关键技术。艾睿光电于 2018 年发布的 Nano 和 2019 年发布的 Tiny1-A 都是可与国际产品相媲美的微型机芯模组产品(见表 3 和图 17)。它们适用于无人机和单兵夜视头盔。

3 非制冷红外焦平面探测器的发展趋势

非制冷红外焦平面探测器的发展趋势包括高性能大面阵与 SWaP-C 两条主线。其中,高性能大面阵探测器瞄准高端军事应用,而 SWaP-C 型探测器或热像仪系统则聚焦小型化、低功耗、低成本技术。这两条主线的共同特点就是小像元、集成化、智能化和低功耗。

3.1 小像元中心距

通过减小像元中心距不仅可以提高芯片集成度和降低芯片成本,而且更重要的是可以减小光学系统的尺寸,促进成像系统的小型化与低成本化。同时,缩小像元中心距也是走向大面阵高清红外成像的必经之路。目前,DRS 公司和艾睿光电已将微测辐射热计的像元尺寸推向 $10\ \mu\text{m}$ 。随着亚波长成像技术的进步,微测辐射热计的像元中心距必将向着更小尺寸的方向发展。这样便可提高红外系统像方视场的空间采样频率,从而满足军用领域日益增长的高清与超高清红外成像需求。

美国军方从系统调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)的角度分析了非制冷红外焦平面探测器在小型化方面的挑战。他们认为,通过在系统层面上进行 MTF 折衷,

可以将非制冷红外焦平面探测器像元压缩到 $5\ \mu\text{m}$ ^[48]。

3.2 集成化

在集成化方面,相关研究从 WLP 技术走向了 WLO、ISP 甚至三维封装技术。CEA-Leti 实验室提出了一种基于双层牺牲层工艺的像元级封装技术^[49]。FLIR 公司通过收购掌握了红外 WLO 技术,并基于 TEC-Less 数字输出芯片开发了 ISP 芯片技术,从而实现了高度集成的成像模组。如今的探测器集成化已经不仅仅局限于探测器的集成化,而是追求红外热像仪的集成化与小型化。

3.3 智能化

探测器的智能化包括读出电路的智能化和集成系统的智能化。通过设计智能化的读出电路,可以实现标准化的工作接口与视频输出;然后直接将其与 DSP、ARM 或 ASIC 连接,从而实现系统的小型化和智能化。随着芯片技术或者三维封装技术的发展,可将智能化系统及功能在探测器组件层面上加以实现。FLIR 公司基于 WLP、WLO 和 ASIC 芯片技术开发的 Lepton 模组便是一次成功的智能化尝试。

3.4 低功耗、TEC-Less 与 Shutter-less 应用

降低功耗是所有光电产品发展的一个重要方向,更是便携式军用设备领域的迫切需求。非制冷红外焦平面探测器芯片均采用了低功耗设计,芯片功耗一般为 $100\sim 200\ \text{mW}$,而 TEC 的功耗约为 $100\sim 1000\ \text{mW}$ 。因此,实现 TEC-Less 工作是降低功耗的一个主攻方向。同时,TEC-Less 工作也有利于进一步压缩探测器及其系统的体积。另外,Shutter-Less 技术能够在 TEC-Less 条件下进一步降低系统功耗和压缩系统体积,所以它也是智能化、集成化发展中的一项关键技术。

综合而言,非制冷红外探测器技术必将朝着更小像元中心距、更多样化的面阵规模、Shutter-Less 应用、智能化与集成化的方向迈进。降低红外成像模组的批产成本,有利于促进单兵装备的大批量列装。这是提升战斗力和

提高作战效费比的重要发展方向。制冷红外成像系统的价格高达数十万元, 传统非制冷红外成像模组的价格也达到上万元。以小像元、WLP、ISP、WLO 以及晶圆级模组制造技术推动红外成像组件的低成本化, 有望实现红外装备的大规模列装。通过大幅压缩非制冷红外成像模组的制造成本, 可以实现微型无人机载和单兵便携式红外成像夜视仪、微型制导炸弹与其他微型武器弹药的末端制导, 从而大幅提升武器弹药的命中率以及装备效费比。

参考文献

- [1] William A R, Daniel F M, Adam K, et al. Microbolometer Uncooled Infrared Camera with 20-mK NETD [C]. *SPIE*, 1998, **3379**: 636–646.
- [2] Becker S, Imperinetti P, Yon J J, et al. Latest Pixel Size Reduction of Uncooled IRFPA at CEA, LETI [C]. *SPIE*, 2012, **8541**: 85410C.
- [3] Alicandro C J, Demarco R W. 1024×768 XGA Uncooled Camera Core Achieves New Levels of Performance in a Small Package [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 80121H.
- [4] Black S H, Sessler T, Gordon E, et al. Uncooled Detector Development at Raytheon [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 80121A.
- [5] Paul W K. Uncooled Thermal Imaging Arrays Systems and Applications [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [6] George D S. Uncooled 10 μm FPA Development at DRS [C]. *SPIE*, 2016, **9819**: 98191O.
- [7] Howard P E, Clarke J E, Parrish W J, et al. Advanced High-Performance 320×240 VO_x Microbolometer Uncooled IR Focal Plane [C]. *SPIE*, 1999, **3698**: 131–136.
- [8] Howard P E, Clarke J E, Bradley M G, et al. Progress in Uncooled Focal Plane Sensor Technology at Boeing [C]. *SPIE*, 2000, **4130**: 168–174.
- [9] Howard P E, Clarke J E, Ionescu A C, et al. DRS U6000 640×480 VO_x Uncooled IR Focal Plane [C]. *SPIE*, 2002, **4721**: 48–55.
- [10] Li C, George D S, Christopher H, et al. Recent Development of Ultra Small Pixel Uncooled Focal Plane Arrays at DRS [C]. *SPIE*, 2007, **6542**: 65421Y.
- [11] Radford W A, Murphy D F, Finch J A, et al. Sensitivity Improvements in Uncooled Microbolometer FPAs [C]. *SPIE*, 1999, **3698**: 119–130.
- [12] Murphy D F, Ray M, Wyles R, et al. High Sensitivity (25 μm Pitch) Microbolometer FPAs and Application Development [C]. *SPIE*, 2001, **4369**: 250–256.
- [13] Murphy D F, Ray M, Wyles R, et al. 640×512 17 μm Microbolometer FPA and Sensor Development [C]. *SPIE*, 2007, **6542**: 65421Z.
- [14] Black S H, Sessler T, Gordon E, et al. Uncooled Detector Development at Raytheon [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 80121A.
- [15] Kennedy A, Masini P, Lamb M, et al. Advanced Uncooled Sensor Product Development [C]. *SPIE*, 2015, **9451**: 94511C.
- [16] Grealish K, Kacir T, Backer B, et al. An Advanced Infrared Thermal Imaging Module for Military and Commercial Applications [C]. *SPIE*, 2005, **5796**: 186–192.
- [17] Blackwell R J, Bach T, O'Donnell D, et al. 17 μm Pixel 640×480 Microbolometer FPA Development at BAE Systems [C]. *SPIE*, 2007, **6542**: 65421U.
- [18] Blackwell R, Franks G, Lacroix D, et al. Small Pixel Uncooled Imaging FPAs and Applications [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76600Y.
- [19] Sengupta L, Auroux P A, Mcmanus D, et al. BAE Systems' SMART Chip Camera FPA Development [C]. *SPIE*, 2015, **9451**: 94511B.
- [20] Mizrahi U, Bikov L, Giladi A, et al. New Developments in SCD's 17 μm VO_x μ -bolometer Product Line [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76600W.
- [21] Endoh T, Tohyama S, Yamazaki T, et al. Uncooled Infrared Detector with 12 μm Pixel Pitch Video Graphics Array [C]. *SPIE*, 2013, **8704**: 87041G.
- [22] Tissot J L, Martin J L, Mottin E, et al. 320×240 Microbolometer Uncooled IRFPA Development

- ment [C]. *SPIE*, 2000, **4130**: 473–479.
- [23] Tissot J L. Uncooled IR Focal Plane Arrays: Worldwide Review and State-of-the-art at ULIS [C]. Dubrovnik: 6th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, 2002.
- [24] Yon J J, Mottin E, Tissot J L. Latest Amorphous Silicon Microbolometer Developments at LETI-LIR [C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 69401W.
- [25] Fièrue B, Robert P, Minassian C, et al. Uncooled Amorphous Silicon XGA IRFPA with 17 μm Pixel-pitch for High End Applications [C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 69401X.
- [26] Yon J J, Dumont G, Goudon V, et al. Latest Improvements in Microbolometer Thin Film Packaging Paving the Way for Low Cost Consumer Applications [C]. *SPIE*, 2014, **9070**: 90701N.
- [27] Schimert T, Brady J, Fagan T, et al. Amorphous Silicon Based Large Format Uncooled FPA Microbolometer Technology [C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 694023.
- [28] Chen C, Yi X, Zhao X, et al. Design and Fabrication of Linear Array IR Bolometers Using VO_2 Thin Films [C]. Beijing: 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, 2000.
- [29] Chen C, Yi X, Zhang J, et al. Micromachined Uncooled IR Bolometer Linear Array Using VO_2 Thin Films [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **22**(1): 53–58.
- [30] 吴志明, 蒋亚东, 牟宏, 等. 氧化钒热敏特性研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(4): 237–238.
- [31] 王忠华, 李振豪, 普朝光, 等. 用于非制冷热释电红外探测器的 PZT 铁电薄膜研究 [J]. *无机材料学报*, 2006, **21**(5): 1223–1229.
- [32] Li Y, Yi X, He Z, et al. Infrared Camera Based on 320×240 Uncooled Focal Plane Array [C]. *SPIE*, 2001, **4548**: 297–301.
- [33] Yi X, Chen S, Wang Y, et al. VO_2 -based Infrared Microbolometer Array [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, **23**(12): 1699–1704.
- [34] 王宏臣, 易新建, 黄光, 等. 一种制备氧化钒薄膜的新工艺 [J]. *半导体光电*, 2003, **24**(4): 280–282.
- [35] Chen S, Tanner D M, Ramesham R, et al. Wafer-level Scale Package of MEMS Device by Eutectic Bonding Method [C]. *SPIE*, 2004, **5343**: 94–100.
- [36] Wang H, Yi X, Lai J, et al. Fabricating Microbolometer Array on Unplanar Readout Integrated Circuit [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **26**(5): 751–762.
- [37] 赵小梅, 陈四海, 付小朝, 等. 化学镀镍在 32×32 非制冷红外焦平面互连中的应用 [J]. *红外技术*, 2005, **27**(4): 303–306.
- [38] Chen X, Yi X, Yang Y, et al. A New CMOS Readout Circuit for VO_2 -based Uncooled Focal Plane Arrays [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **27**(9): 1281–1291.
- [39] Wang H, Yi X, Lai J, et al. Fabrication and Characterization of Nanocrystalline VO_2 Thin Films [J]. *Chinese Physical Letter*, 2005, **22**(7): 1746–1748.
- [40] 赵悦, 赖建军, 陈坦, 等. 32×32 微镜阵列的 ANSYS 模拟和制造工艺研究 [J]. *激光杂志*, 2006, **27**(6): 28–29.
- [41] Chen S, Ma H, Dai J, et al. Nanostructured Vanadium Dioxide Thin Films with Low Phase Transition Temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(10): 1209.
- [42] Chen S, Lai J, Dai J, et al. Characterization of Nanostructured VO_2 Thin Films Grown by Magnetron Controlled Sputtering Deposition and Post Annealing Method [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(26): 24153–24161.
- [43] Huang Z, Chen C, Lv C, et al. Tungsten-doped Vanadium Dioxide Thin Films on Borosilicate Glass for Smart Window Application [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, **564**(7): 158–161.

(下转第 24 页)

表 1 两种探测器图像的特征区域光谱

	传统工艺	优化工艺
特征区域的光谱范围/ μm	11.33~12.54	11.69~11.99
特征区域的光谱最大差异/ μm	1.21	0.30

光谱一致性影响较大,且优化工艺在该方面优于传统工艺。这一结果符合工艺优化试验的最终目标。

4 总结

本文选取成像电平图中的特征区域,然后对该区域的光谱曲线进行了分析汇总,得到了特征区域光谱的曲线范围及最大差异,并由此来评判整个探测器面阵光谱一致性的优劣。另外还利用此方法对工艺线上两种主流材料探测器的光谱一致性进行了对比分析,得到了两种工艺对探测器光谱一致性影响较大的结论,进而确定了工艺优化的有效性。这种光谱一致性测试方法的建立可以正向反馈材料制备工艺对探测器光谱一致性的影响,意义重大。目前,

焦平面探测器光谱一致性分析方法还处于摸索阶段,针对多种材料、多种谱段探测器的光谱一致性和谱段串扰分析将是我们以后更深一步的研究方向。

参考文献

- [1] 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 [J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(1): 4-7.
- [2] 李春领,王春红,秦艳红. 碲镉汞材料双面平坦化工艺研究 [J]. *激光与红外*, 2017, **47**(8): 992-995.
- [3] 陆慧庆,胡晓宁,方家熊. 用红外反射光谱研究离子束作用后碲镉汞的表面形貌 [J]. *红外与激光工程*, 1998, **27**(6): 52-55.
- [44] Huang Z, Chen S, Lv C, et al. Infrared Characteristics of VO_2 Thin Films for Smart Window and Laser Protection Applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(19): 191-905.
- [45] Huang Z, Chen S, Chen Y, et al. Low Transition-temperature Characteristic in VO_x Films Grown on Si_3N_4 /Glass Substrates [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, **207**: 130-134.
- [46] Wang B. Vanadium Oxide Microbolometer with Gold Black Absorbing Layer [J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(7): 074003.
- [47] 王宏臣. 氧化钒薄膜及非致冷红外探测器阵列研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [48] Lohrmann D, Littleton R, Reese C, et al. Uncooled Long-wave Infrared Small Pixel Focal Plane Array and System Challenges [J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(6): 061305.
- [49] Dumont G, Rabaud W, Baillin X, et al. Pixel Level Packaging for Uncooled IRFPA [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 801211.

(上接第 14 页)