

碲镉汞红外焦平面器件技术进展

丁瑞军, 杨建荣, 何力, 胡晓宁, 陈路, 林春, 廖清君, 叶振华, 陈洪雷, 魏彦锋

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要: 近十年碲镉汞第二代红外焦平面探测器应用呈现爆发式增长, 也是第三代焦平面技术快速发展的十年。文中对近十年来碲镉汞红外焦平面探测器技术的发展进行了简单的回顾, 并结合碲镉汞红外焦平面探测器的应用, 对在碲镉汞红外焦平面探测器技术方面的研究工作和工程应用进行了总结, 最后, 对未来碲镉汞红外焦平面探测器技术的发展进行了展望。

关键词: 红外焦平面; 碲镉汞; 分子束外延; 液相外延; 读出电路

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0103010

Development of technologies for HgCdTe IRFPA

Ding Ruijun, Yang Jianrong, He Li, Hu Xiaoning, Chen Lu, Lin Chun, Liao Qinjun,
Ye Zhenhua, Chen Honglei, Wei Yanfeng

(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The applications of the second HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays (IRFPA) have exploded in the past 10 years, meanwhile the third IRFPA has developed rapidly. This article makes a brief retrospect in development of HgCdTe IRFPA detector, combines with applications of HgCdTe IRFPA detector, summarizes the research works and the engineering applications of HgCdTe IRFPA detector and looks forward to the further development of HgCdTe IRFPA detector.

Key words: IRFPA; HgCdTe; MBE; LPE; ROIC

收稿日期: 2019-12-02; 修订日期: 2019-12-20

作者简介: 丁瑞军(1964-), 男, 研究员, 主要从事集成电路设计、红外光电器件及物理、分析和评价技术等方面的研究。

Email: dingrj@mail.sitp.ac.cn

0 引言

近年来,国际上碲镉汞第二代焦平面探测器的日趋成熟,性能趋于理论限,得到广泛应用。基于小像素、双色、甚长波、雪崩探测(APD)和高温工作等技术的三代焦平面探测器取得了实质性的突破,2015年后,在第三代焦平面探测器技术的基础上,技术发展的方向又转向了称之为 Swap³(小尺寸、低重量、高性能、低功耗和低成本集为一体)的先进红外焦平面探测器技术。在国内,近十年是第二代碲镉汞红外焦平面应用技术发展最为迅速的十年,基于 CdZnTe 基的长波碲镉汞材料和 Si 或 GaAs 基异质衬底碲镉汞中/短波材料的技术达到了实用化应用的水平,几千元的长线列和中大规模面阵探测器实现了应用。近十年也是三代红外焦平面技术快速发展的十年,小像素、甚长波、多谱段、数字化和 APD 红外焦平面探测器技术的关键技术取得了突破,为今后碲镉汞红外器件技术的发展奠定了良好的基础。文中将就碲镉汞红外焦平面探测器技术的发展现状做一扼要的介绍,并以第二代焦平面技术在航天领域中的应用来反映该技术在国内的进展,并对红外焦平面探测器技术的进一步发展给出了展望。

1 碲镉汞焦平面近十年的发展

近十年,碲镉汞红外焦平面技术发展主要围绕超大规模、甚长波、双色、APD 和高工作温度(HOT)探测等技术来展开的,其中,产品级中/短波红外焦平面器件规模做到了 2 048×2 048,最大规模为 4 096×4 096^[1];长波红外焦平面器件规模为 1 280×1 024;长波 640×512 红外焦平面的截止波长超过了 11 μm@80 K^[2];中/长波双色碲镉汞红外焦平面的规模达到 1 280×768^[3];APD 焦平面器件则实现了单光子探测^[4]和雪崩探测模式成像^[5];HOT 红外焦平面探测器的工作温度提高了 30~50 K,以 Sofradir 中波红外焦平面探测器的产品为例,探测器的工作温度从 90 K 提高到 130 K(室温背景和 f 数为 2 的条件下),实验室演示的水平更是达到 175 K^[6],2020 年的研究目标已定在了 200 K^[7]。

上述技术进步的取得主要得益于红外探测器阵列芯片小像素加工技术的突破和探测器阵列漏电流

的大幅度降低。为了实现超大规模的焦平面探测器,产品级的探测器像元中心尺寸已从以前的 30 μm 降低到了 10 μm,漏电流密度并未受到表面漏电的影响而增加,新的研究成果是中心距 5 μm 红外焦平面已实现演示成像^[8],其漏电流甚至低于传统探测器漏电流所遵循的“07 定律”^[9]。探测器漏电流的降低一是得益于 p⁺-on-n 芯片技术的日趋成熟,二是得益于材料工艺和芯片加工工艺的不断完善,法国 Sofradir 和德国 AIM 的长波面阵、甚长波和高温的红外焦平面器件都已采用了基于 As⁺离子注入的 p⁺-on-n 技术,通过完善材料质量和芯片工艺,有效地解决了焦平面器件高温下噪声盲元增殖的问题^[10]。

2 第二代碲镉汞红外焦平面研究与应用

在红外探测器技术发展中,碲镉汞材料在红外探测器技术领域一直处于主流地位,碲镉汞材料制备的探测器能够覆盖了整个红外波段,从短波到甚长波(1~16 μm),各个波段的探测器都体现出了很高的性能。空间应用是红外探测发展碲镉汞红外探测器技术的主要推动力之一,中国科学院上海技术物理研究所(SITP)长期致力于空间用碲镉汞材料与红外焦平面成像器件的研究,针对空间遥感的需求发展了各大气窗的成像焦平面探测器,产品主要分为用于推扫成像的线列焦平面和凝视成像的面阵焦平面两大类型。

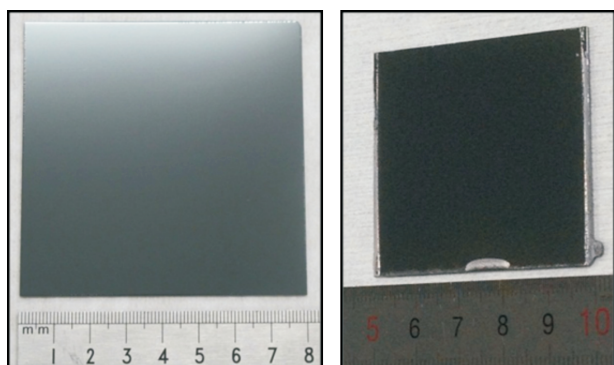
2.1 碲镉汞外延材料

根据工程应用的不同需求,SITP 重点发展了基于碲镉汞衬底的碲镉汞液相外延(LPE)和异质衬底的大面积碲镉汞分子束外延(MBE)的材料制备技术,其中,位错密度较低的碲镉汞 LPE 材料主要用于长波红外焦平面探测器的研制,而大尺寸的碲镉汞 MBE 材料则用于满足大规模的中/短波碲镉汞红外焦平面的应用和双色红外焦平面探测器研制的的需求。

为了获得低缺陷密度的碲镉汞 LPE 材料,SITP 研发了碲镉汞衬底材料技术,Φ90 mm 的晶锭已成为目前的主流技术,最大晶锭尺寸为 Φ120 mm,衬底最大尺寸已达到 80 mm×80 mm(见图 1(a))。通过对移动炉体法的 Bridgman 生长技术的反复优化,并结合新开发的碲镉汞材料热处理技术^[11],掌握了位错密度低于 5×10⁴ cm⁻²、沉淀物尺寸小于 1 μm 的衬底材料制备技术。为了满足更大尺寸衬底材料的应用需

求,开发了基于移动温场的 VGF 技术,已获得可切衬底片的碲镉汞晶锭材料。

为了满足工程应用对材料批量化制备能力提出的需求,研发了垂直富碲液相外延技术^[12],材料的尺寸从 30 mm×20 mm 扩大到了目前的 40 mm×40 mm 和 50 mm×50 mm(见图 1(b))^[13],单炉日产外延片从 1 片提高到了 4 片,材料各项参数达到了国际上公认的性能水平。为了满足截止波长 12.5 μm 探测器对材料电学特性的要求,SITP 开发了 Au 掺杂 LPE 材料的制备技术,实现了 Au 掺杂浓度分布的定量可控^[14]。



(a) 80 mm×80 mm 碲镉汞衬底 (b) 50 mm×50 mm 液相外延材料
(a) 80 mm×80 mm CdZnTe substrate (b) 50 mm×50 mm LPE material



(c) 4 in 碲镉汞分子束外延材料
(c) 4 in HgCdTe MBE material

图 1 碲镉汞衬底和碲镉汞外延材料

Fig.1 CdZnTe substrate and HgCdTe epitaxial materials

碲镉汞分子束外延基于 GaAs 基和 Si 基衬底,通过改进 ZnTe/CdTe 缓冲层的生长技术, GaAs 基和 Si 基中波/短波碲镉汞外延材料已经达到了与 CdZnTe 基碲镉汞外延材料相当的性能水平。在进一步解决组分精确控制技术、材料大面积均匀性技术和批生产相关技术的基础上^[15],并利用 Si 衬底与焦平面读出电路之间能够实现良好热匹配特性,成功

地将 Si 基碲镉汞外延材料应用于大规模红外焦平面探测器的研制。结合芯片结构设计和加工工艺,在不去除衬底的条件下,成功地规避了 GaAs 或 CdZnTe 基材料与读出电路之间热失配所引发的应力导致探测器失效的问题。与此同时,MBE 碲镉汞材料生长的主流技术从 3 in(1 in=2.54 cm)成功地切换到 4 in(见图 1(c)),通过优化外延工艺,MBE 外延材料表面缺陷密度的平均值从 1 000 cm⁻² 降低到了 200 cm⁻² 以下(见图 2),一次装高纯汞源可连续生长材料的片数提高了一倍左右,达到了工程应用对碲镉汞 MBE 材料制备技术提出的各项指标要求。

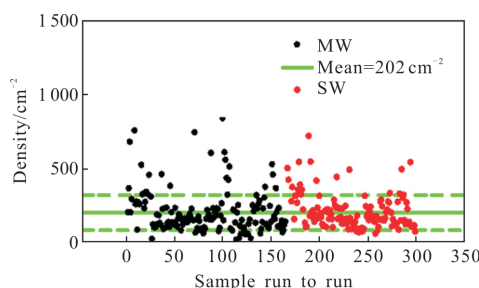


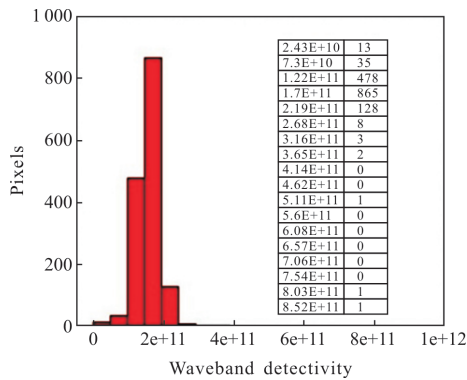
图 2 碲镉汞外延材料宏观缺陷密度平均水平

Fig.2 Mean value of macro void density for HgCdTe MBE

2.2 线列碲镉汞探测器

经过十多年发展,第二代线列碲镉汞探测器技术日趋成熟,主要集中在控制 n⁺-on-p 型二极管结构和工艺。扫描型焦平面器件的规模从 1 000 元发展到 8 000 元,以及超过万元,拼接基本模块由原来的 256 元发展到 512 元和 1 024 元,以及 512×8 TDI 焦平面,探测波段涵盖了短波 1~3 μm、中波 3~5 μm、长波 8~10 μm 及长波 11~12.5 μm。焦平面像元中心距从 46 μm 发展到 28 μm 以及 14 μm,探测器的温度分辨率 NEDT 目前达到小于 10 mK。线列碲镉汞红外焦平面器件已在空间扫描型红外遥感系统中得到成功应用。图 3 为 1 500 元长波红外焦平面探测率统计直方图和遥感成像图片。

尽管不同应用背景对探测器阵列提出不同波段要求,由于碲镉汞材料具有截止波长大范围可调的优势,能符合各种红外应用系统需求。在碲镉汞材料、探测器阵列工艺、读出电路、无盲元精密拼接等关键技术突破基础上,探测率和噪声等效温差得到进一步提升,碲镉汞长波红外焦平面探测率大于 1×10¹¹ cmHz^{1/2}/W,噪声等效温差小于 10 mK。



(a) 1500 元长波红外焦平面探测率直方图

(a) Histogram of detectivity for 1500 pixels LW IRFPA



(b) 碲镉汞长波红外焦平面遥感热成像

(b) LWIR remote sensing thermal imaging for HgCdTe FPA

图 3 碲镉汞 1500 元长波焦平面探测率和遥感热成像

Fig.3 Detectivity and remote sensing thermal imaging for HgCdTe 1500 pixels LW IRFPA

2.3 面阵碲镉汞探测器

近十年来, 面阵碲镉汞红外焦平面器件发展所采用的主要技术路线为 CdZnTe 基、GaAs 基和硅基 HgCdTe 焦平面技术, 面阵规模从 320×256 的面阵发展到中大规模的 640×512、1k×512 和 1k×1k 焦平面器件, 以及 2k×512 和 2k×2k 焦平面器件。与此同时, 面阵焦平面像元尺寸从 30、25、18 μm 发展到 15 μm。

随红外焦平面阵列规模不断扩大, 传统 CdZnTe 衬底尺寸限制, 使 Si 基 HgCeTe 成为突破衬底尺寸的限制、发展大规格面阵焦平面的一条有效途径, 为此, 在 GaAs 碲镉汞分子束外延技术的基础上, SITP 重点发展了 3 in/4 in 硅衬底上分子束外延生长的碲镉汞材料制备技术, 在芯片工艺中采用芯片级应力释放结构设计, 精确控制了 pn 结耗尽区位置, 降低了芯片表面处理对 pn 结漏电的影响, 还同时采用了硅基碲镉汞材料组分缓变结构、精确控制芯片腐蚀深度等措施, 降低了耗尽区漏电, 从而改善了 pn 结

特性, 获得了 25~30 μm 中心距的 640×512 红外焦平面器件和 18 μm 中心距 1024×1024 红外焦平面器件, 短波/中波红外焦平面平均探测率分别大于 1×10¹² cmHz^{1/2}/W、5×10¹¹ cmHz^{1/2}/W, 噪声等效温差小于 15 mK, 响应非均匀性小于 5%。图 4 为 640×512 碲镉汞中波红外焦平面组件和成像。

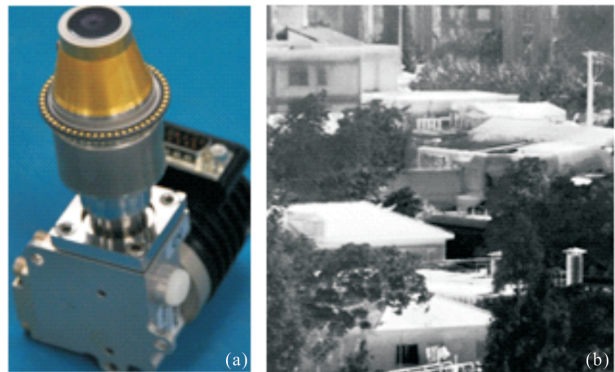


图 4 640×512 中波红外焦平面组件和成像

Fig.4 640×512 MWIR IDCA and imaging

硅基碲镉汞短波/中波 512×512、短波 2k×512 凝视焦平面器件已在航天红外系统中应用。硅基碲镉汞短波红外焦平面器件暗电流密度小于 10⁻¹⁰ A/cm⁻², 2k×512 最高帧频大于 250 Hz, 读出电路噪声小于 195e, 50 000 光子入射条件下探测器信噪比大于 120, 在空间遥感仪器的高光谱红外相机中成功应用^[16]。图 5 为碲镉汞短波红外焦平面器件高光谱相机成像。



图 5 碲镉汞短波红外焦平面高光谱成像

Fig.5 Hyperspectral imaging by HgCdTe SW IRFPA

基于分子束外延技术具有制备多层材料的优势, 发展了碲镉汞中波/长波双色焦平面器件。在双色材料能带调制、同向 pn 结成结、深台面成形和金属化、信号同时读出, 同时积分的读出电路的研究基础上, 研制出中波/长波碲镉汞双色焦平面器件。图 6 为双色器件的光谱响应, 图 7 为手持前截止波长为 6.5 μm 滤光片阻挡电烙铁中波辐射成像, 但不影响

电烙铁长波辐射成像的实验照片。

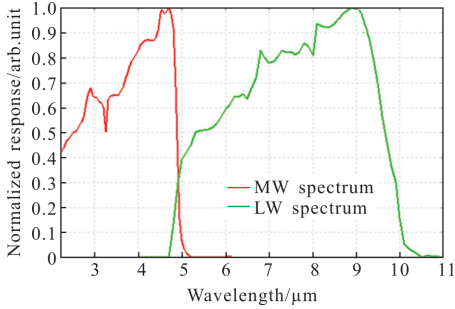


图 6 中波/长波碲镉汞双色焦平面光谱响应曲线

Fig.6 Spectral response curves for HgCdTe MW/LW two-color FPA



图 7 中波/长波碲镉汞双色焦平面器件成像

Fig.7 Thermal imaging by HgCdTe MW/LW two-color FPA

长波和甚长波红外焦平面探测器在空间有着重要的应用,为了满足应用的需求,重点发展了掺杂型的 n^+on-p HgCdTe 焦平面芯片技术,在探测器芯片加工技术中采用了低损伤探测器阵列芯片工艺及衬底去除技术。获得了截止波长为 $16 \mu m$ 的 32×32 焦平面器件,在 50 K 温度下器件的平均峰值探测率为 $4.9 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/W$ 。图 8 是参考文献中报道的各种工艺技术路线研制的 HgCdTe 红外探测器的 R_0A 所达到的水平^[17],以及 SITP 甚长波探测器的性能(图

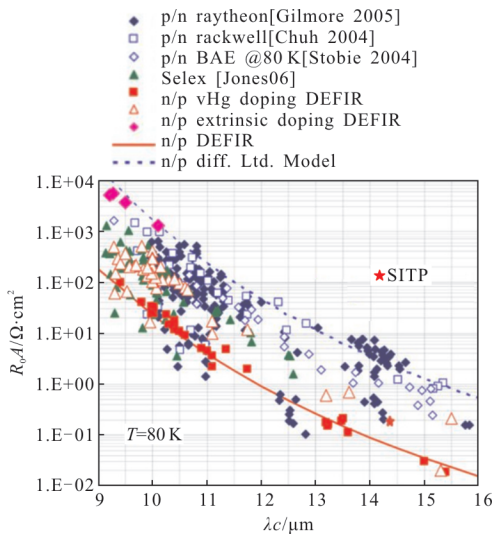


图 8 不同工艺的 HgCdTe 探测器的 R_0A 水平

Fig.8 Comparison of HgCdTe detector R_0A by different technology

中五角星),结果表明:器件性能已经达到了同类工艺技术的较好水平。

3 碲镉汞红外焦平面的发展展望

碲镉汞红外探测器经过六十多年的发展,从第一代发展到第三代,从 2015 年开始,碲镉汞红外焦平面技术进入了先进红外焦平面探测器技术的发展时代,该技术具有三个主要的特征。

3.1 性能和功能的集成

国际上红外焦平面探测器的功能和性能集成通常用 Swap³ 来描述^[18],目标是制造出同时具有高灵敏度、高空间分辨率、高光谱分辨率且适用范围更广的红外焦平面探测器,通过提高探测器的工作温度,实现探测器组件的小型化、低功耗和低成本,以满足红外焦平面探测器在新技术(信息化和智能化)领域和新兴产业中的发展需求和应用范围。图 9 是一款 AIM 公司基于 Swap³ 理念研发的高工作温度(140~160 K)超紧凑 1024×768 中波红外焦平面成像原型样机^[19],其外形尺寸做到了 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。

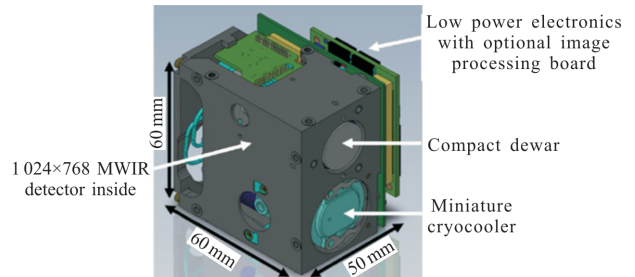


图 9 AIM 公司超紧凑中波红外焦平面成像原型样机

Fig.9 Preliminary design of ultra-compact MWIR camera by AIM

3.2 技术集成

为了实现 Swap³ 红外焦平面探测器,必须将第三代焦平面探测器研究的技术集成在一起。为制备超大规模的红外焦平面并维持产品的可靠性和低功耗,必须采用超小像素技术,小像素带来的 MTF 降低的问题需要通过减小吸收层厚度或增加反向偏置来解决,吸收层厚度减小所导致的光吸收效率(直接影响器件量子效率)降低的问题需通过减小材料禁带宽度,或利用雪崩效应产生的增益来弥补,降低禁带宽度和增加反向偏置所导致的漏电流增加需依靠第三代红外焦平面技术中甚长波和高温红外焦平面器件所研发的低漏电流技术(取决于材料与器件的

制备工艺)来解决,即只有依靠所有先进技术的集成,才能制备出先进的 Swap³ 红外焦平面探测器。目前小像素的尺寸已从第三代技术的 10 μm 进一步减小至 5 μm,碲镉汞中波 HOT 器件的工作温度已从 120 K 进一步提高到近 200 K,近期的研究目标已指向 200 K 以上,相关技术的难度也在不断的增加,并给技术集成带来了更大的挑战。

3.3 智能化处理功能的集成

为了提高探测器的灵敏度和目标快速处理能力,读出集成电路(ROIC)必须具有高灵敏度(18 位)和数字化输出,以及读出电路具有片上信息处理的功能,以大幅度压缩超大规模红外焦平面探测器输出的数据量,提高红外图像的输出速率。随着人工智能技术的发展,对片上数据处理的需求会越来越大,要求也会越来越高,智能化片上读出电路势必向 3D-IC 技术发展。存在的有利因素是 HOT 技术的发展为智能化读出电路增加一定的功耗提供了可行性。

在未来 5~10 年时间内,先进碲镉汞红外焦平面探测器将在空间科学研究、大气物理研究和军事应用领域获得广泛应用。在空间科学研究中,5 μm 像元尺寸/数百万像素的短波红外焦平面探测器将应用于天体物理的研究,高灵敏度的中、长波红外焦平面探测器则将用于外星球的科学研究,而甚长波碲镉汞红外焦平面探测器将被用于大气物理的研究。超大规模的碲镉汞红外焦平面探测器将在高分辨率对地观测、远距离目标识别、高光谱成像探测等领域应用,而大批量的 Swap 红外焦平面探测器则将在战术平台(目标告警、精确识别等)和民用遥感技术中应用。

4 结 论

近十年来,碲镉汞第二代红外焦平面技术在空间科学、空间对地观测和国防领域中获得了广泛应用,基于第三代焦平面技术的超大规模(百万像素以上)、双色探测和甚长波(截止波长大于 12.5 μm)红外焦平面探测器实现了实用化,高工作温度(HOT)和雪崩模式的探测器技术取得重大突破。

在应用牵引下,碲镉汞长行列焦平面和凝视焦平面材器在过去十年中也实现了快速发展。在 GaAs 基和 Si 基衬底上生长的碲镉汞分子束外延材料和碲锌镉基的液相外延材料均实现了工程应用,异质衬底和碲锌镉衬底的外延材料尺寸分别做到了 4 in

和 50 mm×50 mm,碲锌镉衬底的最大尺寸已做到 80 mm×80 mm,基于双层钝化的 n⁺-on-p 平面结技术,研制出了面阵规模达百万像数和行列规模达几千及上万元的短波、中波和长波红外焦平面芯片,成功用于多个空间对地观测系统和高光谱成像的应用系统。在第三代碲镉汞红外焦平面探测器技术方面,突破了多层掺杂组分异质结材料的分子束外延技术,实现中/长波双色红外焦平面探测器,通过有效地解决了 Si 基碲镉汞外延材料因缺陷密度高而无法工程应用的关键技术,使 Si 基 2 000×512 短波红外焦平面探测器在高光谱相机中获得了成功应用。通过研发 P 型材料及其结层工艺,将红外焦平面探测器的响应波段拓展到了 12.5 μm。

目前,碲镉汞红外焦平面探测器技术进入了一个新的发展时期,它将第三代焦平面技术集成起来打造出一种高性能、低成本和超紧凑型的新型红外焦平面探测器(Swap³),并通过发展具备片上数字化和智能化处理功能的读出集成电路技术,实现未来红外探测技术发展所需的 Swap³ 智能化先进红外焦平面探测器。

致 谢

感谢中国科学院上海技术物理研究所材器中心全体从事该项工作的研究人员和工程技术人员,感谢他们为此文做出的贡献!

参 考 文 献:

- [1] James Bangs, Mark Langell, Madhu Reddy, et al. Large format high operability SWIR and MWIR focal plane array performance and capabilities[C]//SPIE, 2011, 8012: 10.1117/12.887417.
- [2] Figgemeier H, Hannaa S, Eicha D, et al. State of the Art of AIM LWIR and VLWIR MCT 2D focal plane detector arrays for higher operating temperatures[C]//SPIE, 2016, 9819 (2009): 10.1117/12.2223001.
- [3] Smtth E P G, Venzor G M, Gallagher A M, et al. Large-format HgCdTe dual-band long-wavelength infrared focal-plane arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, 40 (8): 1630.
- [4] Bratt P R, Johnson S M, Rhiger D R, et al. Historical perspectives on HgCdTe material and device development at raytheon vision systems [C]//SPIE, 2009, 7298: 10.1117/

- 12.822899.
- [5] Johan Rothman, Eric de Borniol, Philippe Ballet. HgCdTe APD—Focal Plane Array performance at DEFIR [C]//SPIE, 2009, 7298: 10.1117/12.819320.
- [6] Laurent Rubaldo, Alexandre Brunner. State of the art HOT performances for Sofradir II—VI extrinsic technologies [C]//SPIE, 2016, 9819: 10.1117/12.2229308.
- [7] Breiter R, Figgemeier H, Lutz H. Improved MCT LWIR modules for demanding imaging applications [C]//SPIE, 2015, 9451: 10.1117/12.2178538.
- [8] John Caulfielda, Jon Curzan. Small pixel infrared sensor technology [C]//SPIE, 2017, 10177: 10.1117/12.2264824.
- [9] Tennant W E, Gulbransen D J, Roll A, et al. Small-pitch HgCdTe photodetectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(8): 3041.
- [10] Gravrand O, Destefanis G, Bisotto S, et al. Issues in HgCdTe research and expected progress in infrared detector fabrication [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(11): 3349–3358.
- [11] Xu Chao, Sheng Fengfeng, Yang Jianrong. Annealing of CdZnTe materials to reduce inclusion defects [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, 451(1): 126–131.
- [12] Yang Jianrong, Zhang Chuanjie, Fang Weizheng, et al. Te-rich dipping technique of HgCdTe liquid phase epitaxy [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(5): 325–329. (in Chinese)
杨建荣, 张传杰, 方维政, 等. 碲镉汞富碲垂直液相外延技术红外与毫米波学报[J]. 2009, 28(5): 325–329.
- [13] Sun Quanzhi, Sun Ruiyun, Wei Yanfeng, et al. Batch production technology of 50 mm × 50 mm HgCdTe LPE materials with high performance [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 45(9): 49–53. (in Chinese)
孙权志, 孙瑞贇, 魏彦锋, 等. 50 mm × 50 mm 高性能 HgCdTe 液相外延材料的批生产技术 [J]. 红外与毫米波学报, 2016, 45(9): 49–53.
- [14] Sun Quanzhi, Yang Jianrong, Wei Yanfeng, et al. Characteristics of Au migration and concentration distributions in Au-doped HgCdTe LPE materials [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(8): 2773–2778.
- [15] He L, Fu Xiangliang, Wei Qingzhu, et al. MBE HgCdTe on alternative substrates for FPA application [J]. *J Electronic Materials*, 2008, 27(9): 1189–1199.
- [16] Hu Xiaoning, Huang Aibo, Liao Qinjun, et al. Large-format high SNR SWIR HgCdTe/Si FPA with multiple-choice gain for hyperspectral detection [C]//SPIE, 2017, 10213: 10.1117/12.2262912,
- [17] Gravrand O, Chorier Ph. Status of very long infrared wave focal plane array, development at DEFIR [C]//SPIE, 2009, 7298: 10.1117/12.819319.
- [18] Yann Reibel, Taalat R, Brunner A, et al. Infrared SWAP detectors: pushing the limits [C]//SPIE, 2015, 9451: 10.1117/12.2179212.
- [19] Lutz H, Breitera R, Eich D, et al. Small pixel pitch MCT IR-modules [C]//SPIE, 2016, 9819: 10.1117/12.2223841.