

大面阵短波碲镉汞红外焦平面器件研究

龚晓丹, 李红福, 杨超伟, 袁绶章, 封远庆, 黄元晋, 胡旭*, 李立华*

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘要: 随着红外焦平面技术的发展, 大面阵红外焦平面器件在遥感、气象、资源普查和高分辨对地观测卫星上得到了广泛应用。因此, 基于第三代红外焦平面技术的超大规模焦平面器件成为国内外研究热点。文中介绍了昆明物理研究所采用 n-on-p 技术路线成功研制的短波 (Short Wave, SW) 2 k×2 k (18 μm, 像元中心距) 碲镉汞红外焦平面器件。短波 2 k×2 k 碲镉汞红外焦平面器件突破了大尺寸碲镉汞 (CdZnTe) 衬底制备和大面积液相外延薄膜材料生长技术, 衬底尺寸由 Φ75 mm 增加到 Φ90 mm, 获得了高度均匀的大面积碲镉汞 (HgCdTe) 薄膜材料。通过大面阵器件工艺、大面阵倒装互连等技术攻关, 最终获得了有效像元率大于 99.9%、平均峰值探测率 (D^*) 大于 4×10^{12} (cm·Hz^{1/2})/W、暗电流密度在 1 nA/cm² 的高性能短波 2 k×2 k (18 μm) 碲镉汞红外焦平面器件。

关键词: 短波; 大面阵; 2 k; 红外焦平面器件

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220079

Study on large-area array SW HgCdTe infrared focal plane device

Gong Xiaodan, Li Hongfu, Yang Chaowei, Yuan Shouzhong, Feng Yuanqing,
Huang Yuanjin, Hu Xu*, Li Lihua*

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: With the development of infrared focal plane technology, large-area infrared focal plane devices have been widely used in remote sensing, meteorology, resource surveys and high-resolution earth observation satellites. Therefore, based on the third-generation infrared focal plane technology ultra-large-scale focal plane devices are called research hotspots at home and abroad. The short wave (SW) 2 k (18 μm, pixel pitch) mercury cadmium telluride (MCT) infrared focal plane device was reported, which was successfully developed by Kunming Institute of Physics using n-on-p technology. The SW 2 k MCT infrared focal plane device has broken through the preparation of large-size cadmium zinc telluride (CdZnTe) substrates and the growth of large-area liquid phase epitaxy thin film materials. The substrate size was increased from Φ75 mm to Φ90 mm, and a highly uniform large-area Mercury Cadmium Telluride (HgCdTe) thin film material was obtained. By tackling key technologies such as large array device technology and large area array flip-chip interconnect, a high-performance SW 2 k×2 k (18 μm) MCT infrared focal plane device with an operability over 99.9%, average peak detection rate (D^*) greater than 4×10^{12} (cm·Hz^{1/2})/W and dark current density of 1 nA/cm² was finally obtained.

Key words: short wave; large area array; 2 k; infrared focal plane device

收稿日期: 2022-01-29; 修订日期: 2022-04-07

作者简介: 龚晓丹, 女, 工程师, 硕士, 主要从事红外器件研发及评价方面的工作。

通讯作者: 胡旭, 男, 研究员级高级工程师, 主要从事红外器件研发方面的工作。

李立华, 男, 研究员级高级工程师, 主要从事红外器件总体技术及芯片制备方面的研究工作。

0 引言

由于对大气穿透能力强、作用距离远、可昼夜成像等优点,红外探测技术广泛应用于军事以及民用领域。空间红外光学遥感技术开阔了探索宇宙视野,是体现国家科技实力、军事实力乃至国际地位的重要因素。短波红外探测器被广泛应用于高光谱分析、空间红外光学遥感等^[1],美国等主要发达国家持续投入进行研发,已经形成多种产品,应用于卫星遥感、太空天文探测等领域。

由于大尺寸 CdZnTe 衬底制备、大面积高均匀性薄膜材料制备和大面阵器件制备技术限制,我国空间遥感技术发展缓慢。昆明物理研究所突破了大面阵 CdZnTe 衬底制备和液相外延薄膜材料生长技术,获得高度均匀的大面阵碲镉汞薄膜材料,同时进一步优化大面阵器件制备工艺,最终获得了短波(SW) 2 k×2 k (18 μm, 像元中心距、下同) 碲镉汞红外焦平面器件。文中对昆明物理所研制的短波 2 k×2 k (18 μm) 碲镉汞红外焦平面器件相关性能进行了介绍。

1 国内外研究进展

美国 Teledyne 致力于大面阵碲镉汞红外焦平面探测器的研究,主要用于天文和近地观测,2008 年以来,陆续推出单模块大面阵碲镉汞红外焦平面器件,其规格有 SW 1 k×1 k (18 μm)、SW 2 k×2 k (18 μm)、SW 4 k×4 k (15 μm) 和 SW 4 k×4 k (10 μm) 等^[2-5]。Teledyne 的器件结构为 p-on-n 结构,采用分子束外延(MBE)技术在 CdZnTe 衬底上生长 n 型的 HgCdTe 吸收层,并在吸收层生长了一层 n 型的 cap 层,通过 As 离子注入的方式形成 p 型层,其器件结构如图 1 所示。

TIS 于 2008 年研制的 SW 1 k×1 k (18 μm) 的碲镉汞红外焦平面器件(用于哈勃望远镜),以及 SW 2 k×2 k (18 μm) 碲镉汞红外焦平面器件(用于 James Webb 空间望远镜),皆采用完全去除衬底的技术,以提高器件的量子效率^[3],改进前后量子效率对比如图 2 所示。

2002 年,美国 Raytheon 制备了像素规格 2 k×

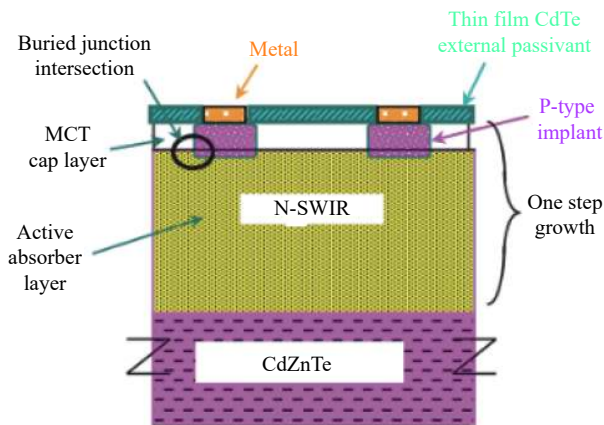


图 1 美国 Teledyne 短波 p-on-n 双层平面异质结器件结构^[6]

Fig.1 SW p-on-n double layer planar heterostructure of US Teledyne^[6]

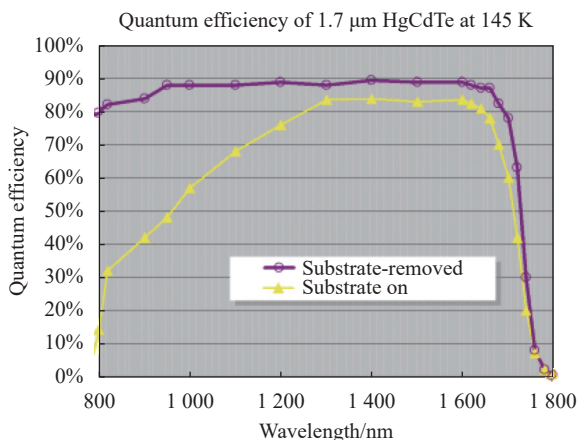


图 2 美国 Teledyne 短波器件去除衬底和未去除衬底的量子效率对比图^[3]

Fig.2 Comparison of the quantum efficiencies of the US Teledyne SW detector with and without substrate removal^[3]

2 k、像元中心距为 20 μm 的短波碲镉汞红外焦平面器件^[7]。器件结构如图 3 所示,选用 CdZnTe 作为衬底材料,采用液相外延(LPE)技术生长 HgCdTe 薄膜,像元结构为 p-on-n 台面结构,采用双面钢柱互连技术将读出电路和芯片互连,CdZnTe 衬底未去除,为了增强光吸收,在 CdZnTe 衬底上沉积背增透膜。此外,为减小不同材料之间的热失配,在读出电路 Si 衬底上增加平衡层以平衡热失配。2009 年,美国 Raytheon^[8]报道了低噪声高动态范围的大面阵短波器件,其暗电流密度在 1 nA/cm²,但文中并未指出其材料结构。

2009 年,法国 Sofradir 报道应用于太空领域的

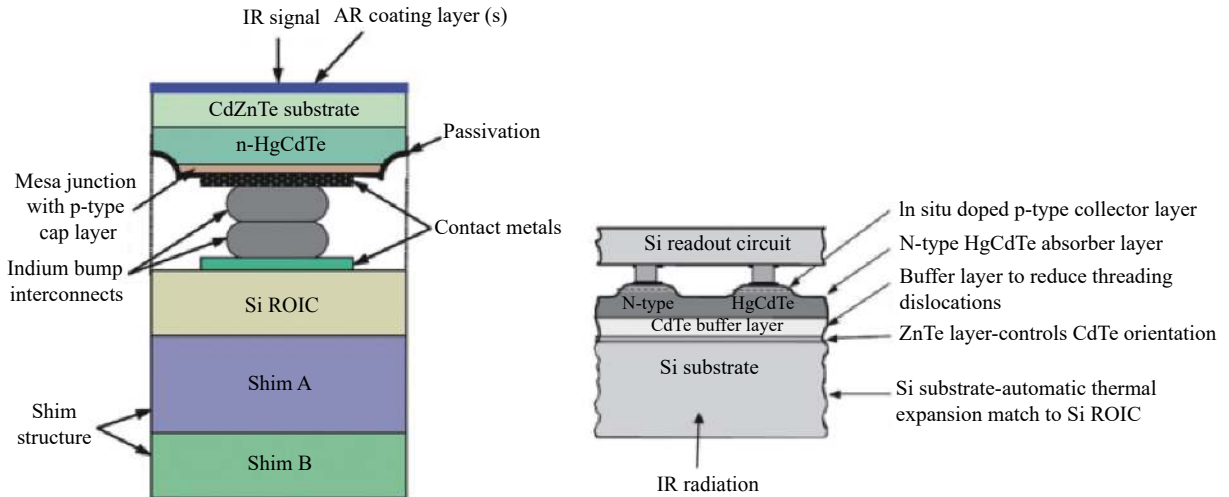


图 3 美国 Raytheon 器件结构^[7]

Fig.3 US Raytheon device structure^[7]

SW 1 k×256 (30 μm) 碲镉汞红外焦平面器件^[9], 器件采用 n-on-p 结构。在 2018 年国际空间光学会议上, 其报道称制备得到了大面阵 SW 2 k×2 k (15 μm) 碲镉汞红外焦平面器件^[10], 选用 CdZnTe 作为衬底材料, 采用 LPE 技术生长 HgCdTe 薄膜, 器件结构则采用 p-on-n 平面结构, 如图 4 所示, 同时指出了大面阵碲镉汞焦平面器件的关键技术, 如图 5 所示。

示^[12], 成像效果如图 6 所示, 但具体的器件结构、工艺细节和器件性能未见相关报道。

2018 年, 华北光电技术研究所报道了短波和中波单片 2.7 k×2.7 k 红外焦平面探测器, 并进行了成像演

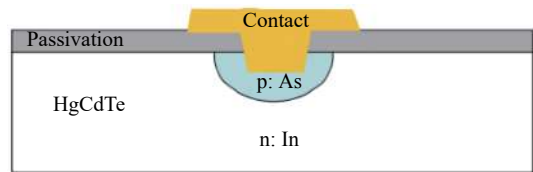


图 4 法国 p-on-n 结构^[11]

Fig.4 p-on-n planar structure of France^[11]

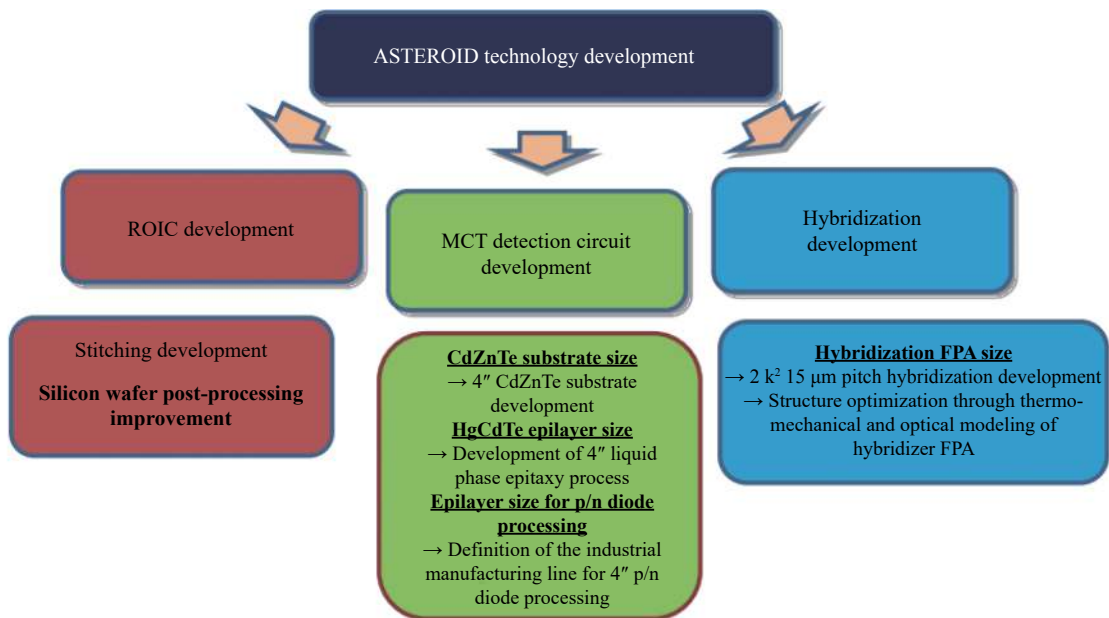


图 5 法国大面阵碲镉汞焦平面器件的关键技术^[10]

Fig.5 The key technology of HgCdTe focal plane device with large array in France^[10]



图 6 2.7k×2.7k 红外焦平面探测器探测出的红外图像^[12]

Fig.6 Infrared image detected by 2.7k×2.7k infrared focal plane detector^[12]

2 昆明物理研究所 SW 2 k×2 k(18 μm) 碲镉汞红外焦平面器件研制情况

昆明物理研究所突破了大面阵 CdZnTe 衬底制备和液相外延薄膜材料生长技术,采用 n-on-p 器件结构,如图 7 所示,通过优化大面阵器件制备工艺,采用 In 柱倒装互连实现探测器芯片与读出电路的互连,获得了 SW 2 k×2 k (18 μm) 碲镉汞红外焦平面器件,如图 8 所示。

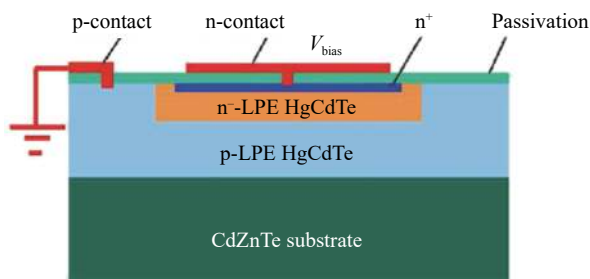


图 7 n-on-p 器件结构

Fig.7 n-on-p planar structure



图 8 SW 2 k×2 k(18 μm) 碲镉汞红外焦平面探测器件

Fig.8 Package of SW 2 k×2 k, 18 μm pitch HgCdTe infrared detector

2.1 大尺寸衬底及薄膜材料生长技术

2.1.1 大尺寸衬底制备技术

碲镉汞晶体材料存在自身生长温度高、层错能低、堆垒势能低及溶体导热性差等问题,使大尺寸、低缺陷和高组分均匀性的高质量碲镉汞衬底制备比较困难。昆明物理研究所主要从以下方面进行大尺寸衬底制备技术改进:(1)对碲镉汞晶体生长温场进行有效调整;(2)优化籽晶引晶技术;(3)大尺寸衬底缺陷控制技术;(4)精准调控 Zn 组分以实现衬底与碲镉汞液相外延薄膜晶格的匹配。通过以上技术改进实现了衬底尺寸由 Φ75 mm 到 Φ90 mm 的突破,目前 Φ90 mm 晶体 EPD 值达到 $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$,沉积相尺寸 $5 \sim 10 \mu\text{m}$,密度 $\leq 2.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$,碲镉汞晶片如图 9 所示。

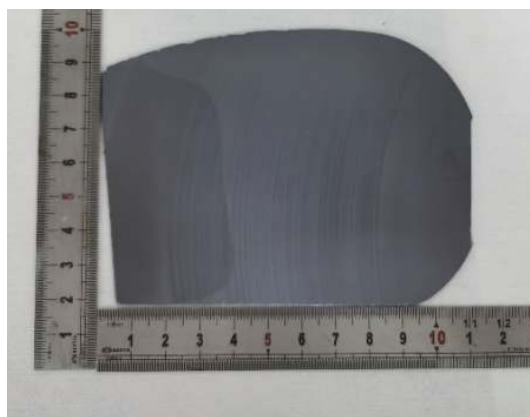
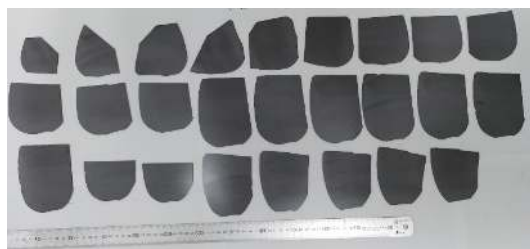


图 9 高质量碲镉汞晶片

Fig.9 High quality CZT wafers

2.1.2 大面积薄膜材料制备技术

大面积碲镉汞薄膜材料采用液相外延方式在碲镉汞衬底上外延生长碲镉汞薄膜,在外延薄膜生长时,薄膜表面形貌、表面起伏和薄膜点缺陷的控制尤为重要,通过控制母液蒸气温度和密度、扩大母液槽等方式优化薄膜生长条件,获得高质量大面积碲镉汞薄膜材料。用于制备 SW 2 k×2 k(18 μm) 器件的碲镉汞薄膜尺寸为 50 mm×60 mm。采用傅里叶红外光谱

仪测试材料组分和厚度均匀性,室温下测试 16 个点,其透过率曲线如图 10 所示,16 个不同点的透过率曲线重合度高,表明优化外延工艺后制备的大面积薄膜具有较好的均匀性,优化后制备的液相外延薄膜形貌图如图 11 所示。

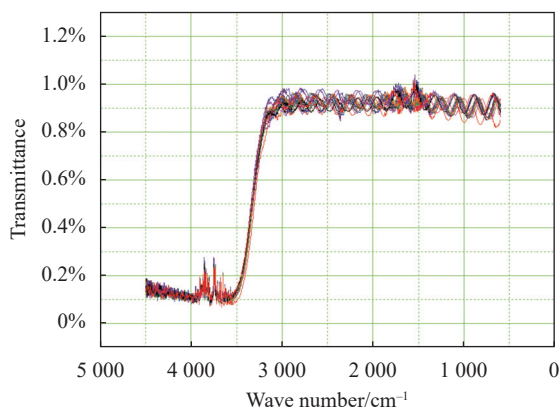


图 10 透过率曲线

Fig.10 Transmittance curve

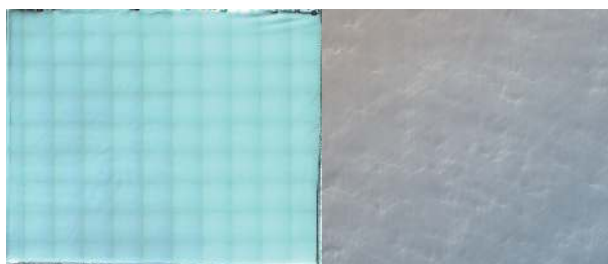


图 11 CZT 基液相外延制备薄膜形貌图

Fig.11 The morphology of the film prepared by CZT-based liquid phase epitaxy

2.2 大面阵 SW 2 k×2 k 红外焦平面器件制备技术

2.2.1 大面阵碲镉汞焦平面器件芯片工艺

大面阵器件芯片制备采用 B 离子注入形成 n 型层,表面钝化选用 CdTe/ZnS 复合钝化膜,采用干法刻蚀结合湿法腐蚀的工艺形成微型接触孔,在接触孔内沉积 Cr/Pt/Au 形成金属电极。芯片制造过程中需要经历高温工艺,由于芯片面积大,芯片不同区域温度传递存在差异,芯片在高温过程会积累一定应力,产生一定的翘曲形变,通过优化磨抛工艺、改进退火工艺参数、晶片平坦化等来控制工艺过程的芯片翘曲。由于短波器件暗电流主要受缺陷辅助隧穿电流的影响,通过热处理工艺将结区结构由 n⁺-on-p 变成 n⁺-n⁻-on-p,将主耗尽层由 p 区转变到 n⁻区,使得 n⁻区载流

子浓度和深能级中心的密度降低,因此能大幅降低缺陷辅助隧穿电流。

2.2.2 大面阵倒装互连技术

SW 2 k×2 k(18 μm) 芯片和读出电路采用 FC300 倒装焊接设备进行倒装互连,互连采用混合式红外焦平面器件互连方式。倒装互连的关键在于读出电路钢柱的均匀性和高精度对准技术。硅基读出电路钢柱制备工艺主要包括 UBM 沉积、光刻、钢膜沉积、剥离。通过改进光刻工艺形成上口小底部大的 undercut 结构、优化钢膜沉积参数和金属钢剥离技术,获得了高度均匀的钢膜,如图 12 所示。高精度对准倒装互连采用光学十字找平,光源发射出十字叉光斑,由分光镜将该光束分别投射到芯片和读出电路,调整芯片和读出电路的十字光斑进行高精度对准。通过高度均匀的钢膜制备技术和高精度倒装互连对准技术,倒装互连连通率达到 99.9% 以上。

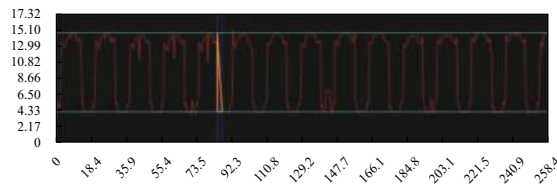
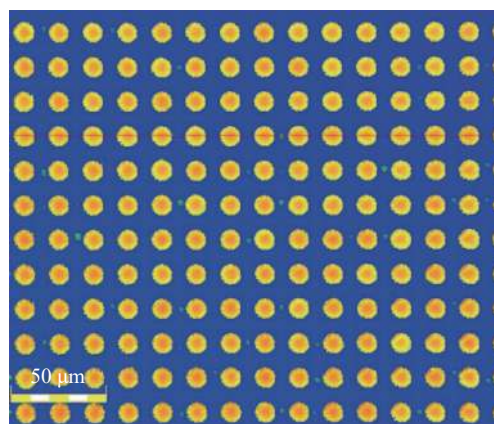


图 12 钢柱阵列

Fig.12 Indium column array

3 器件测试结果

SW 2 k×2 k 红外焦平面器件封装于动态杜瓦中进行相关性测试,封装 F 数为 4,测试条件为 50% 的势阱填充,将像元响应率超过平均响应率 1/2 的像元、像元噪声电压大于平均噪声电压 2 倍的像元判定为盲元,器件结果如表 1 所示。

表 1 器件结果

Tab.1 Results of the device

Parameters	Achieved
Format	2 k×2 k(18 μm)
Spectral	2.1-3.3 μm
Operability	>99.9%
D^*	$>4 \times 10^{12} (\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2})/\text{W}$
NETD	$\leq 30 \text{ mK}$
Dark current	$< 1 \text{ nA/cm}^2$
Quantum efficiency	$> 80\%$
Non linearity	$< 3\%$
Operating temperature	80-110 K

昆明物理研究所制备的 n-on-p 器件和法国的 n-on-p 器件的有效像元率对比图如图 13 所示。在工作温度低于 115 K 时,昆明物理研究所的 n-on-p 器件有效像元率优于法国 n-on-p 器件^[13],但当工作温度高于 115 K 后,昆明物理研究所的 n-on-p 器件有效像元率急剧下降,噪声盲元急剧增多。噪声盲元增多的原因可能是随工作温度的升高,受温度影响较大的热噪声、产生-复合噪声以及随机电报噪声随之增大,这些噪声机制主要依赖于材料与器件的制备工艺水平,因此,昆明物理研究所 SW 2 k×2 k 红外焦平面器件若需应用在高温,还需进一步优化材料及器件工艺,提高温度稳定性。

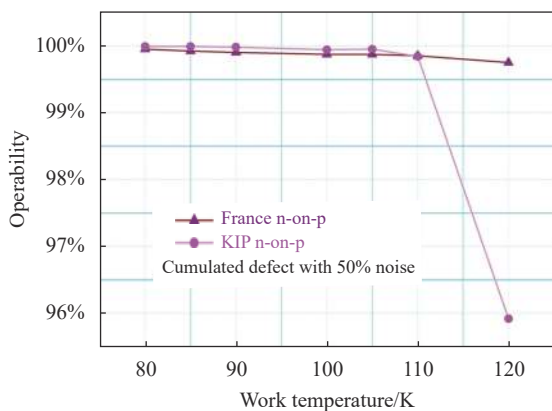


图 13 不同工作温度下的有效像元率

Fig.13 Operability at different working temperatures

器件暗电流分布如图 14 所示,暗电流均匀分布,器件在 80 K 工作温度下暗电流均值在 3 fA (0.9 nA/cm²) 左右,器件 R_0A 值约为 $7.45 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。根据光伏探测器背景限公式计算,当 R_0A 大于 $2500 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 时,器

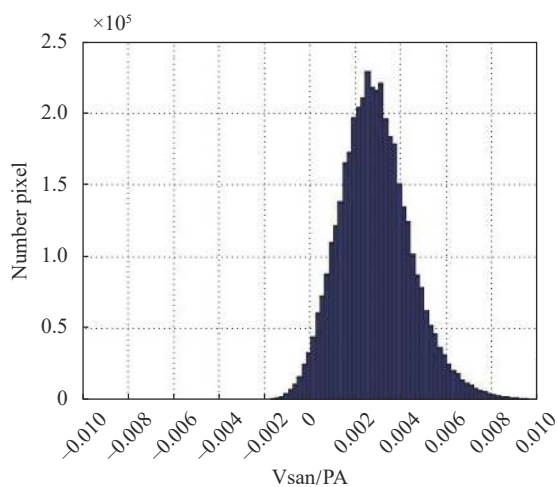
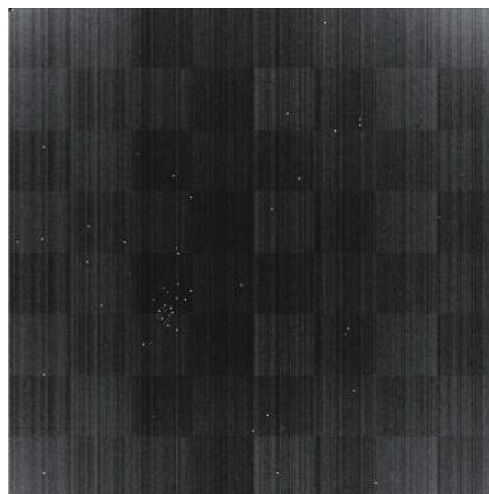


图 14 器件暗电流分布情况

Fig.14 Device dark current distribution

件接近背景限性能。

4 结 论

昆明物理研究所通过优化衬底制备技术,获得了大尺寸碲锌镉衬底,并在该衬底上采用液相外延技术获得高均匀性低缺陷密度的大面积薄膜材料,通过大面阵器件工艺、大面阵倒装互连等技术攻关,成功研制了性能接近国际水平的 SW 2 k×2 k (18 μm) 红外焦平面器件,对我国红外技术在卫星遥感、太空天文探测等领域的应用具有十分重要的意义。

参考文献:

[1] Chorier P, Tribolet P M, Fillon P, et al. Application needs and trade-offs for short-wave infrared detectors[C]/Infrared Technology and Applications XXIX. International Society for

- Optics and Photonics, 2003, 5074: 363-373.
- [2] Amico P, Beletic J W. Scientific Detectors for Astronomy: The Beginning of a New Era[M]. Holland: Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [3] Beletic J W, Blank R, Gulbransen D, et al. Teledyne imaging sensors: Infrared imaging technologies for astronomy and civil space[C]//High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III. SPIE, 2008, 7021: 161-174.
- [4] Zandian M, Farris M, McLevige W, et al. Performance of science grade HgCdTe H4 RG-15 image sensors[C]//High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII, 2016, 9915: 148-158.
- [5] Piquette E C, McLevige W, Auyeung J, et al. Progress in development of H4 RG-10 infrared focal plane arrays for WFIRST-AFTA[C]//High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VI. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9154: 91542 H.
- [6] Finger G, Baker I, Downing M, et al. Development of HgCdTe large format MBE arrays and noise-free high speed MOVPE EAPD arrays for ground based NIR astronomy[C]//International Conference on Space Optics—ICSO 2014. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10563: 1056311.
- [7] Starr B, Mears L, Fulk C. RVS large format arrays for astronomy[C]//High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII, 2016, 9915: 929-942.
- [8] Acton D, Jack M, Sessler T. Large format short-wave infrared (SWIR) focal plane array (FPA) with extremely low noise and high dynamic range[C]//Infrared Technology and Applications XXXV. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7298: 1273-1285.
- [9] Chorier P. Sofradir MCT technology for space applications[C]//Proceedings of SPIE, 2009, 7330: 46-57.
- [10] Fieque B, Chorier P, Lamoure A, et al. Status of space activity and science detectors development at Sofradir[C]//Proceedings of SPIE, 2018, 11180: 111803E.
- [11] Mollard L, Destefanis G, Baier N, et al. Planar p-on-n HgCdTe FPAs by arsenic ion implantation [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38(8): 1805-1813.
- [12] 看!中国电科又成功研制出逆天神器[EB/OL]. (2018-01-10)[2022-01-29]. <http://mil.news.sina.com.cn/2018-01-10/doc-ifyqptqv6869682.shtml>.
- [13] Vuillermet M, Billon-Lanfrey D, Reibel Y, et al. Status of MCT focal plane arrays in France[C]//Infrared Technology and Applications XXXVIII. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8353: 901-912.