

文章编号: 1672-8785(2020)04-0001-07

双层异质结碲镉汞甚长波红外 焦平面探测器研究进展

谭 振 刘世光 田 震 宋淑芳 吴 卿 周立庆
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 报道了碲镉汞甚长波红外焦平面探测器的最新研究进展。采用水平液相外延 In 掺杂和垂直液相外延 As 掺杂技术生长了 p-on-n 异质结材料。基于湿法腐蚀、表侧壁钝化以及 In 柱互连工艺, 制备了第一支台面型碲镉汞甚长波红外焦平面器件。在 60 K 的工作温度下, 该器件的截止波长为 14.28 μm , 有效像元率为 94.5%, 平均峰值探测率为 $8.98 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

关键词: 双层异质结; 甚长波红外; 碲镉汞; 红外焦平面探测器

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.04.001

Research Progress of HgCdTe VLWIR Focal Plane Detectors Based on Double-Layer Heterojunction

TAN Zhen, LIU Shi-guang, TIAN Zhen, SONG Shu-fang,
WU Qing, ZHOU Li-qing

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

Abstract: The latest research progress of HgCdTe very-long-wavelength infrared focal plane detectors in North China Research Institute of Electro-Optics is reported. The p-on-n heterojunction materials are grown using horizontal liquid phase epitaxy with In doping and vertical liquid phase epitaxy with As doping. Based on wet etching, surface and side passivation, and In bump interconnection process, the first mesa-type HgCdTe very-long-wavelength infrared focal plane device is prepared. At an operating temperature of 60 K, the device has a cut-off wavelength of 14.28 μm , an operability of 94.5%, and an average peak detection rate of $8.98 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$.

Key words: double-layer heterojunction; very-long-wavelength infrared; HgCdTe; infrared focal plane detector

0 引言

红外探测器的一个重要用途是导弹预警。实现预警探测的方式通常有大气层内探测和大

气层外探测两种。其中, 大气层内预警探测的目标是具有热窗口、阳光或地表散射等高背景辐射的热目标。这种应用要求实现高精度测量

收稿日期: 2020-02-27

作者简介: 谭振(1984-), 男, 山东蒙阴人, 高级工程师, 主要从事窄禁带红外探测器设计与制备方面的研究。E-mail: tanzhen8402@126.com

和背景辐射抑制,属于战术预警。而大气层外预警探测的目标则是具有低背景辐射的冷目标。该目标通常非常遥远并且无法在探测初期被发现,因此这种应用属于战略预警。在远程弹道导弹的预警探测过程中,导弹飞入空间温度很低的地球背光区域时,弹体可被看作是辐射极低的冷目标,其峰值波长在甚长波红外波段。这时就需要用甚长波红外探测器对其进行探测,从而为远程弹道导弹防御提供目标信息。

在飞行中段,远程弹道导弹处于大气层外(环境温度非常低),其辐射峰值波长在甚长波红外波段。由于红外辐射的大气窗口作用(见图1),大气层中的 CO_2 几乎会全部吸收波长超过 $14\ \mu\text{m}$ 的辐射,因此大气层外对波长超过 $14\ \mu\text{m}$ 的甚长波红外辐射而言是非常“干净”的背景。在这种情况下,通过采用截止波长大于等于 $14\ \mu\text{m}$ 的红外探测器,可以对处于中段飞行的远程弹道导弹进行良好的预警探测,而且截止波长越长,越能够利用大气透过窗口,进而更有利于预警探测。

在碲镉汞甚长波红外探测器方面,传统的n-on-p光电二极管制备技术在抑制暗电流和提高均匀性及有效像元率上面临着很大困难,因此国外早在2000年初期就开始研究p-on-n光电二极管制备技术。他们相继研发出了As离子注入同质结、As离子原位掺杂异质结等

非本征p型掺杂光电二极管制备技术。其中,后者的As离子激活率高、均匀性好。

本文介绍了华北光电技术研究所p-on-n型异质结碲镉汞材料生长和台面型焦平面器件制备方面的相关进展。采用In掺杂和As掺杂工艺生长了双层异质结碲镉汞材料,然后通过湿法腐蚀、表侧壁钝化和In柱互连工艺制备了 320×256 元焦平面阵列芯片及微型杜瓦组件,并对其光电性能进行了测试评价,进而验证了p-on-n台面型焦平面器件技术。

1 双层异质结材料的生长

1.1 In掺杂碲镉汞吸收层的材料制备

采用富碲水平液相外延技术制备吸收层材料,并通过In掺杂将吸收层的导电类型改为n型。在In掺杂工艺中,In的溶解度和分凝系数是影响掺杂效果的两个重要因素。在富碲碲镉汞溶液中,In元素可以任意比例溶解其中,因此In的掺杂相对容易。由于掺杂后无需热处理就能被完全激活,该方法是n型碲镉汞材料的主要制备方式之一。

n型碲镉汞层的载流子浓度正比于In掺杂浓度以及生长过程中的Hg偏压,激活能为 $11\ \text{eV}$,扩散系数为 $5\times 10^{14}\ \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})@300\ \text{K}$ 。通过优化工艺参数(如调节In掺杂浓度、母液配方、Cd组分等)来改进n型碲镉汞吸收层的质量。目前制备的高质量n型甚长波碲镉汞吸收层材料的半峰宽为 $25''$,位错密度低于 $1\times$

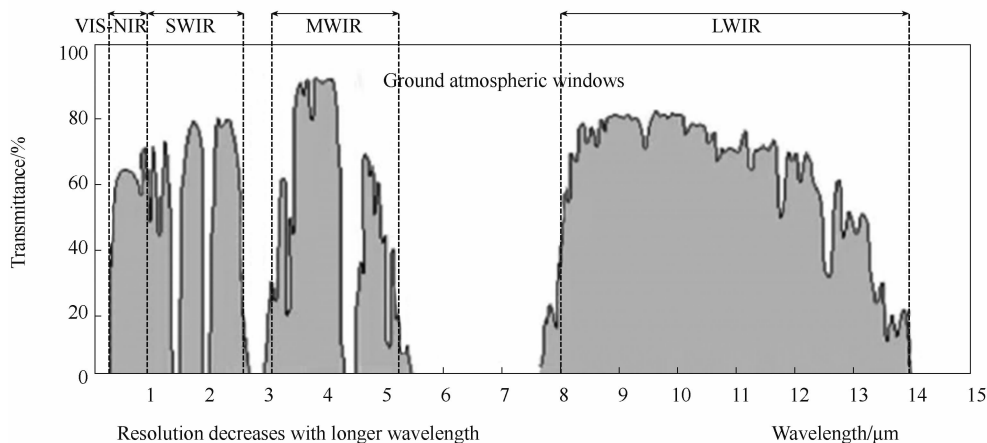


图1 大气层中红外辐射透过率与波长的关系

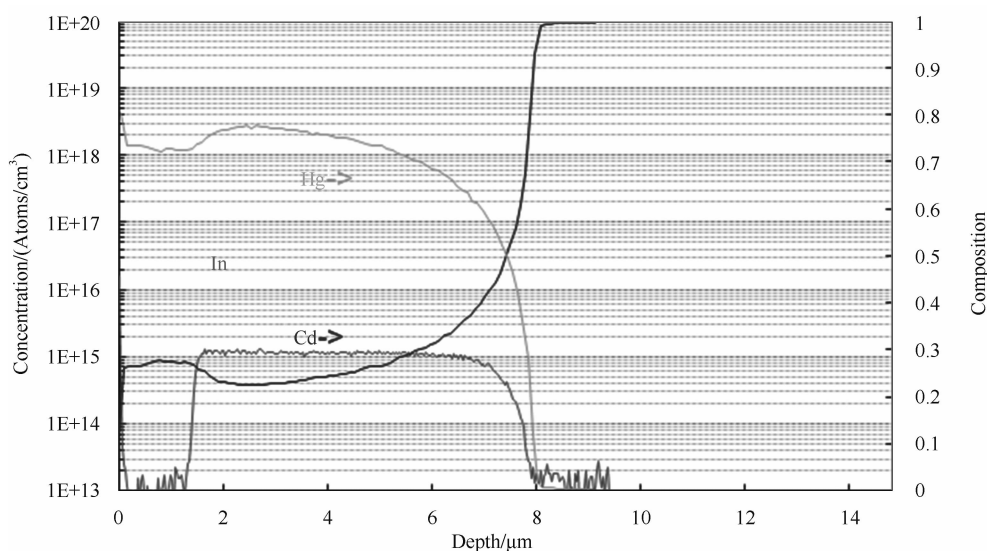
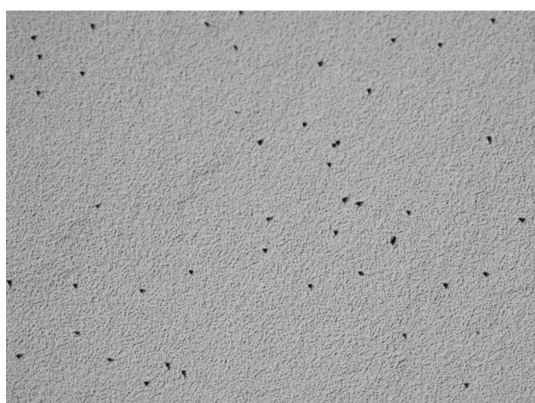


图 2 In 掺杂碲镉汞吸收层的 SIMS 测试结果

图 3 In 掺杂碲镉汞吸收层的位错密度测试结果 ($7.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$)

10^5 个/ cm^2 , 掺杂浓度达到 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 且掺杂浓度随深度变化不大。图 2 和图 3 所示分别为 In 掺杂碲镉汞吸收层的二次离子质谱 (Secondary Ion Mass Spectroscopy, SIMS) 测试结果以及材料位错测试结果。目前, n 型吸收层材料的截止波长最长能够达到 $16.71 \mu\text{m}@60 \text{ K}$ 。

1.2 As 掺杂碲镉汞帽层的材料制备

在 n 型吸收层之上, 基于富汞垂直液相外延工艺, 通过 As 原位掺杂生长 p 型帽层, 从而形成 p-on-n 双层异质结。富汞垂直液相外延是唯一能够通过原位生长实现 As 掺杂的外延技术, 其 As 激活率接近 100%, 且无需作额外的退火处理。但是富汞外延的难点在于 Hg 压高, 母液中的 Cd 含量很低。以 450°C 生

长为例, Hg 压可达 10 atm, Cd 含量仅为万分之几, 导致生长过程中容易产生 Cd 耗尽, 因此需要增加母液量^[1]。设备温区波动和母液组分变化较快致使工艺重复性差, 薄膜材料表面容易残留母液导致材料缺陷多、表面形貌差, 如图 4(a) 所示。所以, 通过在每次材料生长前对生长条件进行调试 (如母液熔化、生长参数及温度曲线优化等), 可以提高工艺重复性和解决表面母液残留的问题, 进而得到表面平整的材料样品 (见图 4(b))。

帽层的 As 掺杂浓度基本都在 $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 量级的范围内。霍尔测试结果表明, 在材料生长过程中, As 原子几乎被 100% 激活。这显示出了用富汞垂直液相外延技术生长 p 型碲镉汞材料的优点。

图 5 所示为双层异质结材料的 SIMS 测试结果。可以看出, 帽层厚度在 $1.8 \mu\text{m}$ 左右, 过渡区的厚度约为 $1 \mu\text{m}$, n 型层的厚度在 $6 \mu\text{m}$ 左右。帽层组分为 $0.265 \sim 0.276$, 组分梯度较小; n 型层的组分随深度增大而逐步增加 $0.229 \sim 0.295$, 组分梯度较大。该材料符合 p-on-n 双层异质结的设计, 其中帽层为中波红外材料, 吸收层为甚长波红外材料。

2 台面型焦平面器件的制备

图 6(a) 和图 6(b) 分别为台面型焦平面器

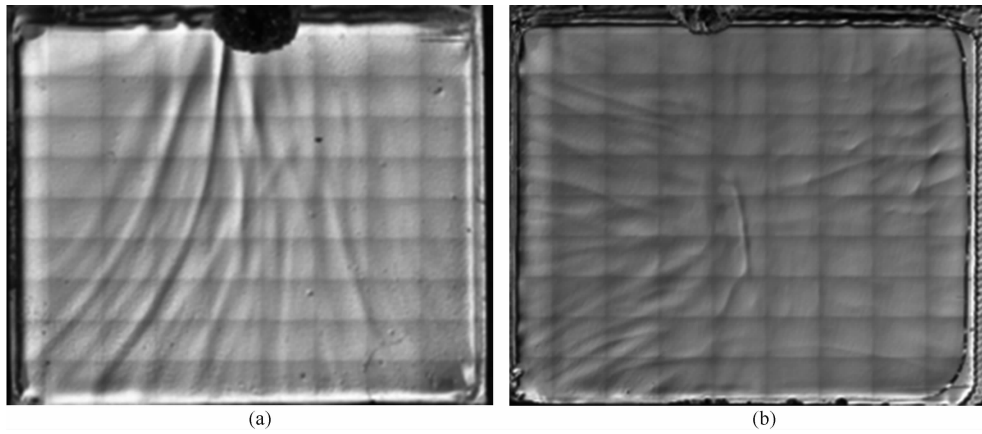


图4 工艺优化前后双层异质结材料的表面形貌对比

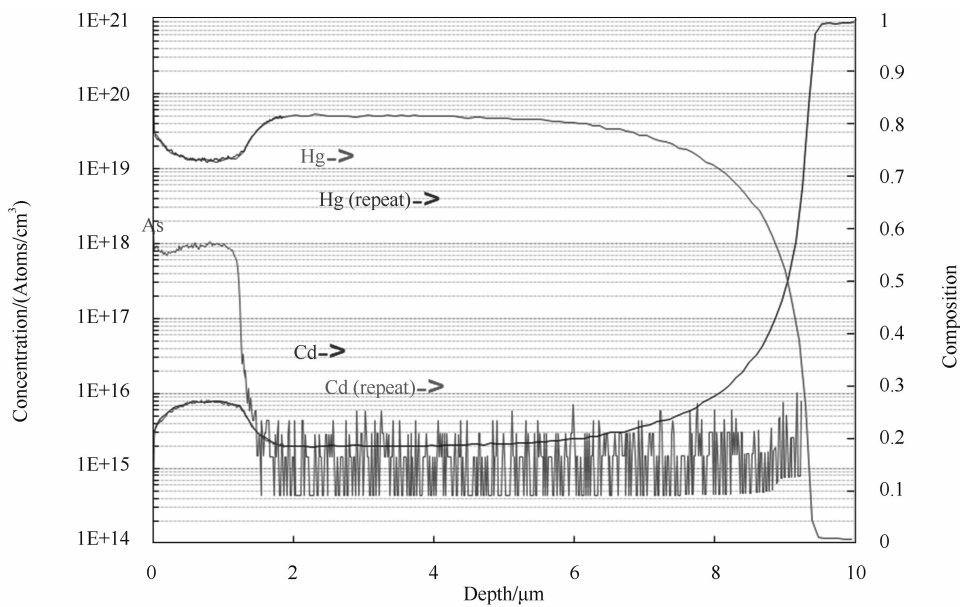


图5 As 掺杂异质结材料的 SIMS 测试结果

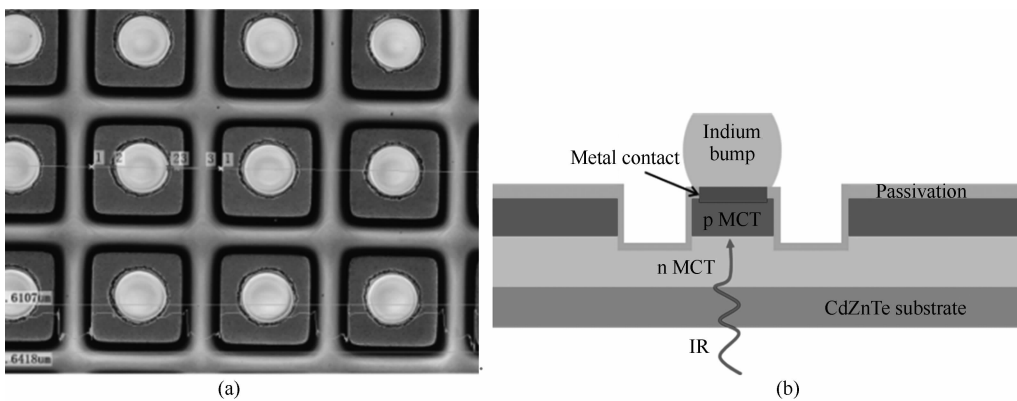


图6 甚长波红外焦平面阵列的实物图及像元结构示意图

件的像元阵列显微镜图和单元结构示意图。该器件的阵列规格为 320×256 ，像元间距为 $30 \mu\text{m}$ ；像元为台面结构，采用 In 柱互连方案。

在焦平面阵列的制备过程中，采用去离子水和溴-甲醇溶液处理 p-on-n 异质结材料，去除表面污渍及颗粒；然后通过光刻形成焦平

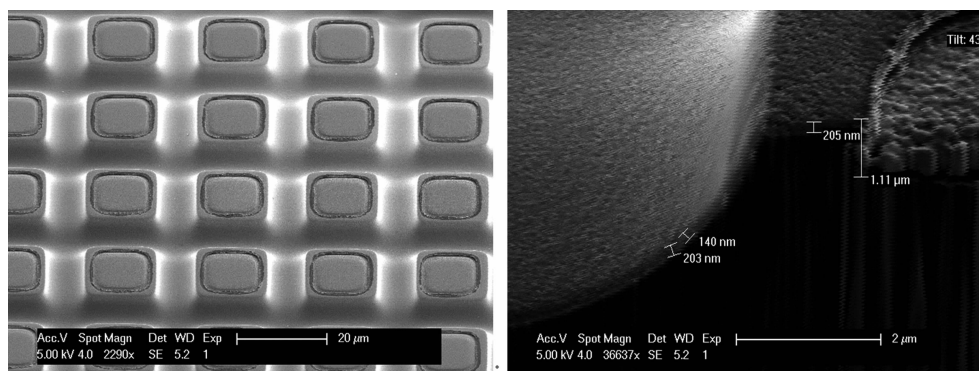


图 7 焦平面像元阵列(左)及像元钝化膜剖面(右)的 SEM 图

台面图形, 并采用湿法腐蚀工艺腐蚀出台面阵列。清洗之后, 迅速将其转入沉积腔室进行 CdTe 和 ZnS 钝化膜层生长。钝化膜生长完成之后, 对异质结材料进行退火处理, 使 CdTe 和 p 型 HgCdTe 互扩散。这将有助于形成组分渐变的宽禁带互扩散层, 降低表面陷阱的热产生率^[2]; 同时, 在该组分渐变区域, 价带能级向着表面降低, 能够将少子空穴从表面驱离, 从而限制光生载流子的表面复合^[2]。

退火之后, 采用湿法工艺进行 p 型和 n 型接触孔的开孔。考虑到帽层厚度只有 1~2 μm, 需适当调整腐蚀液的浓度, 以降低腐蚀速率和提高工艺重复性。开孔后, 在接触孔内沉积 Cr/Au/Pt 金属, 形成欧姆接触。图 7 为工艺完成之后的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图。可以看出, 像元间距为 30 μm, 台面深度为 3.2 μm, 钝化膜层的厚度为 200 nm。

在 77 K 下, 对焦平面像元进行了 I-V 性能测试(结果见图 8)。可以看出, 像元的反向击穿电压可达到 200 mV 以上, 能够满足工作在几十毫伏左右的甚长波红外探测器的偏置电压需求。

3 读出电路设计

基于 0.35 μm 硅互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)技术设计适用于甚长波红外探测器的读出电路。该电路负责对来自光电二极管的瞬时信号进行积分、存储、单元选通、行选通

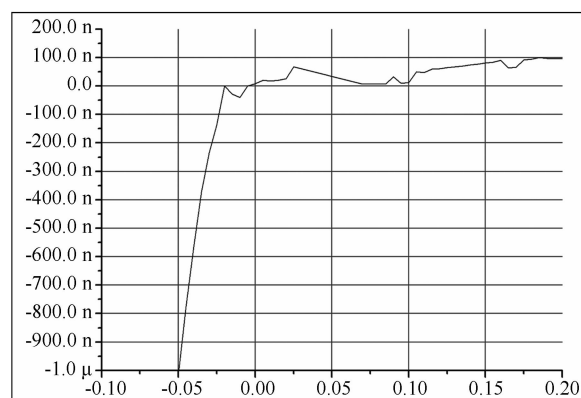


图 8 甚长波像元的 I-V 特性

以及采样-保持, 可按列进行信号倍增, 并进行多路选择至输出。

阵列规格为 320 × 256, 像元间距为 30 μm, 输入级设计基于直接注入(Direct Injection, DI)原理, 电荷在积分时间内被存储到输入级电容内。考虑到碲镉汞甚长波红外探测器像元可能存在大暗电流的情况, 将输入级设计成具有 0.7 pF 和 2.1 pF 的两级可选增益。

读出电路的工作模式基于快摄方式, 采用先积分后读出(Integrate Then Read, ITR)模式。输出通道设计为 1 或 4 通道, 行间连续读出, 可切换; 典型输出速率为 6M pixel/s, 最大值为 8M pixel/s。同一读出电路可有三种阵列规格以及以任意窗口模式进行成像, 使用户可以根据应用需求选择不同的工作模式。

对读出电路进行流片后, 在 5M pixel/s 主频、4通道输出模式下对其进行了低温测

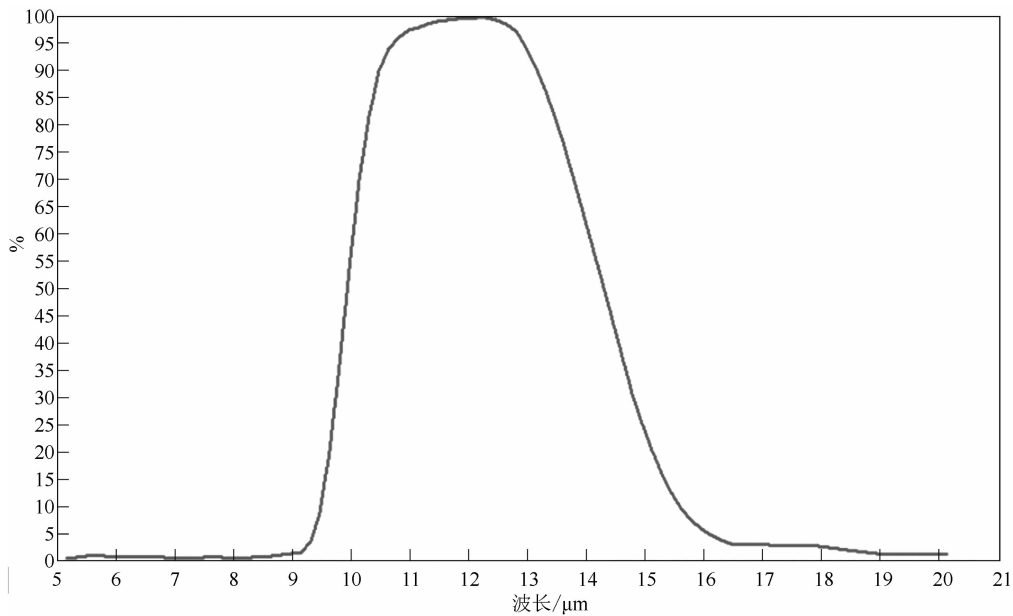


图 9 320×256 元碲镉汞甚长波红外探测器的响应光谱

试。结果表明，该电路的输出范围为 0～3.3 V，均方根噪声为 0.28 mV，动态范围为 80.6 dB，可以满足碲镉汞甚长波红外探测器测试评价的使用要求。

4 碲镉汞甚长波红外探测器的光电性能

基于像元间距为 30 μm 的 320×256 元碲镉汞甚长波红外探测器芯片，制备了碲镉汞甚长波红外探测器微杜瓦组件，并在 60 K 的工作温度下对其光电性能进行了测试评价。

光谱响应范围由碲镉汞材料中的 Cd 组分确定。本文介绍的碲镉汞甚长波红外探测器的 Cd 组分范围为 0.202～0.207。图 9 所示为该探测器的响应光谱。可以看出，光谱曲线的后截止部分陡峭，有利于在一定的波长范围内维持更均匀的光电响应，从而保证探测器组件的响应均匀性，同时也有利于降低探测器组件的噪声^[3]。

图 10 所示为探测器组件对 20℃ 黑体的响应电平。可以看出，电平响应整体上较为均匀。图 11 所示为探测器组件的盲元分布情况。可以看出，较多的盲元集中在中心区域，呈离散分布，且多为死像元。因此推断，由于接触孔湿法腐蚀工艺的不均匀性，中心区域某些像

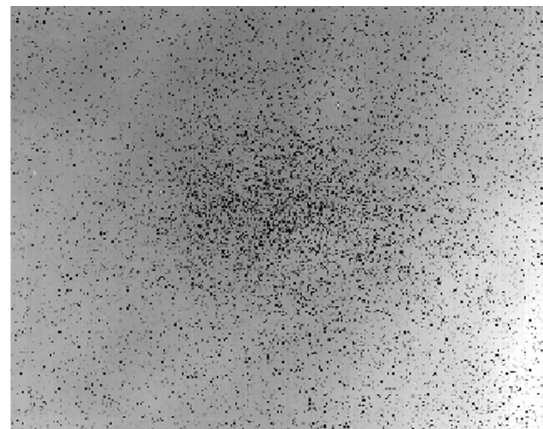


图 10 320×256 元甚长波红外探测器芯片的电平图 (20℃)

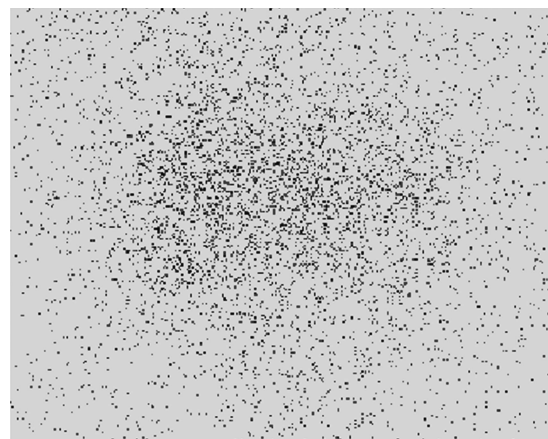


图 11 320×256 元甚长波红外探测器芯片的盲元图 (20℃/35℃)

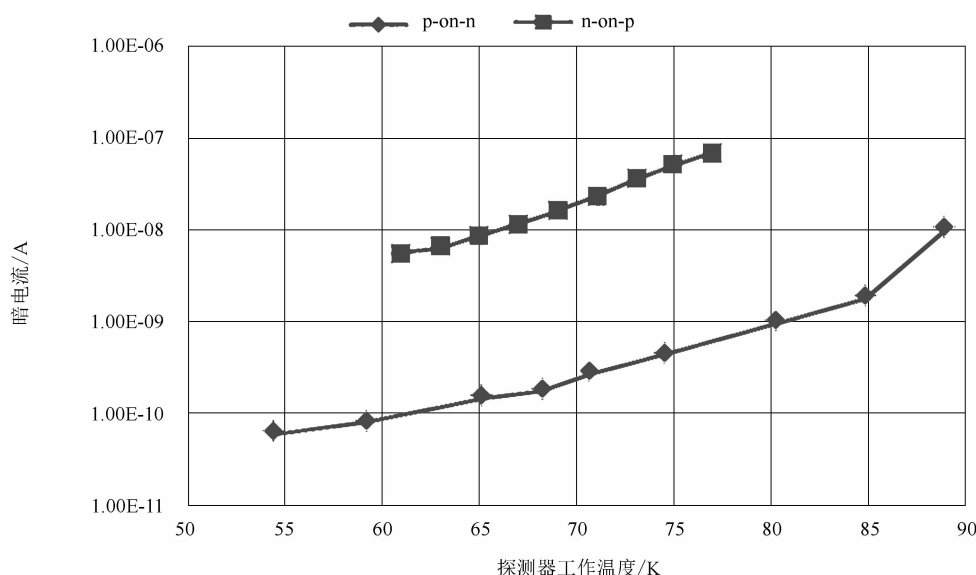


图 12 碲镉汞甚长波红外探测器(像元间距为 30 μm)的暗电流对比

元可能存在钝化膜层腐蚀不彻底的情况。在接触孔内引入了较大的串联电阻,降低了像元的偏置电压,导致响应偏低。该像元也由此成为了盲元。

为了评价 p-on-n 双层异质结碲镉汞甚长波红外探测器的暗电流情况,对截止波长为 14.28 μm (60 K)的碲镉汞甚长波红外探测器进行了暗电流测试,并将其结果与截止波长为 14.15 μm (60 K)的 n-on-p 碲镉汞长波红外探测器的暗电流进行了比较。探测器的工作温度范围为 55~105 K。图 12 所示为两种技术路线的具体对比情况。可以看出,采用 p-on-n 双层异质结技术制备的碲镉汞甚长波红外探测器的暗电流比 n-on-p 技术路线低 2 个量级,在暗电流抑制方面显示出了优越性。

5 结束语

本文总结了基于 p-on-n 异质结技术制备碲镉汞甚长波红外探测器的主要进展,并通过 In 掺杂和 As 掺杂对吸收层和帽层的载流子浓度进行了控制,获得了高质量双层异质结材料;对原有的 n-on-p 器件工艺进行了针对性改进以适应 p-on-n 台面器件的制备;通过多次工艺流片获得了反向击穿电压在 200 mV 以

上的碲镉汞芯片,并制备了碲镉汞甚长波红外焦平面探测器组件。在 60 K 的工作温度下,此组件的截止波长为 14.28 μm ,有效像元率为 94.5%,平均峰值探测率达到 $8.98 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。利用该组件完成了变温暗电流测试。结果表明,在 55~105 K 的工作温度区间,基于 p-on-n 技术路线制备的碲镉汞红外探测器的暗电流比 n-on-p 技术路线低 2 个量级,实现了较好的暗电流抑制。此类型碲镉汞甚长波红外探测器的顺利研制将有助于推进低光通量场景下的空间探测、气象分析等装备对甚长波红外探测器的应用。

参考文献

- [1] 宋淑芳,田震. As 掺杂 p 型碲镉汞材料的研究进展 [J]. *激光与红外*, 2017, **47**(9): 1059-1062.
- [2] Stobie J, Hairston A, Tobin S, et al. VLWIR HgCdTe Staring Focal Plane Array Development [C]. *SPIE*, 2007, **6660**: 66600L.
- [3] Gilmore A S, Bangs J, Gerrish A, et al. Advancements in HgCdTe VLWIR Materials [C]. *SPIE*, 2005, **5783**: 223-230.