

# 甚长波碲镉汞红外焦平面探测器

李雄军<sup>1</sup>, 邹雷<sup>2</sup>, 赵鹏<sup>1</sup>, 杨超伟<sup>1</sup>, 熊伯俊<sup>1</sup>, 王向前<sup>1</sup>, 张应旭<sup>1</sup>, 刘艳珍<sup>1</sup>,  
李红福<sup>1</sup>, 赵榆松<sup>1</sup>, 张绍裕<sup>1</sup>, 李立华<sup>1\*</sup>

(1. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223;

2. 中国人民解放军 63963 部队, 北京 100072)

**摘要:** 采用砷离子注入 p-on-n 平面结技术制备了 77 K 工作温度下截止波长分别为 13.23  $\mu\text{m}$  和 14.79  $\mu\text{m}$ 、像元中心距为 25  $\mu\text{m}$  的甚长波 640 $\times$ 512 探测器, 并对其基本性能和暗电流进行了测试和分析。结果表明, 对于截止波长为 13.23  $\mu\text{m}$  的甚长波 640 $\times$ 512 (25  $\mu\text{m}$ ), 器件量子效率为 55%, NETD 平均值为 21.5 mK, 有效像元率为 99.81%; 对于截止波长为 14.79  $\mu\text{m}$  的甚长波 640 $\times$ 512 (25  $\mu\text{m}$ ), 器件量子效率为 45%, NETD 平均值为 34.6 mK, 有效像元率为 99.28%。这两个甚长波器件在液氮温度下的  $R_qA$  分别为 19.8  $\Omega\cdot\text{cm}^2$  和 1.56  $\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 达到了“Rule07”经验表达式的预测值, 器件噪声主要受散粒噪声限制, 显示出了较好的器件性能。

**关键词:** 甚长波; p-on-n; 碲镉汞; 焦平面探测器;  $R_qA$

中图分类号: TN215 文献标识码: A

## Very long wave HgCdTe infrared focal plane detector

LI Xiong-Jun<sup>1</sup>, ZOU Lei<sup>2</sup>, ZHAO Peng<sup>1</sup>, YANG Chao-Wei<sup>1</sup>, XIONG Bo-Jun<sup>1</sup>, WANG Xiang-Qian<sup>1</sup>,  
ZHANG Ying-Xu<sup>1</sup>, LIU Yan-Zhen<sup>1</sup>, LI Hong-Fu<sup>1</sup>, ZHAO Yu-Song<sup>1</sup>, ZHANG Shao-Yu<sup>1</sup>, LI Li-Hua<sup>1\*</sup>

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. 63963 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Very long wave 640 $\times$ 512 FPAs with 25  $\mu\text{m}$  pixel pitch and cutoff wavelength of 13.23  $\mu\text{m}$ , 14.79  $\mu\text{m}$  respectively at 77 K were prepared by the arsenic ion implanted p-on-n planar junction technology. The basic performance and dark current of the FPAs are characterized and analyzed. The results show that the quantum efficiency of the VLWIR 640 $\times$ 512 FPAs with  $\lambda_c$  (77 K) = 13.23  $\mu\text{m}$  is 55%, the average NETD is 21.5 mK, with an operability of 99.81%; The quantum efficiency of the VLWIR 640 $\times$ 512 FPAs with  $\lambda_c$  (77 K) = 14.79  $\mu\text{m}$  is 45%, the average NETD is 34.6 mK, with an operability of 99.28%. The  $R_qA$  figures of merit at liquid nitrogen temperature are 19.8  $\Omega\cdot\text{cm}^2$  and 1.56  $\Omega\cdot\text{cm}^2$  respectively, which reaches the predicted value of the "rule07" heuristic law, and the device noise is mainly limited by current shot noise. The results show that the performances of FPAs are at the state of the art.

**Key words:** VLWIR, p-on-n, HgCdTe, FPA,  $R_qA$

## 引言

随着空间应用的持续升温, 空间技术的发展牵引了甚长波红外探测器的研制和应用研究, 并在太空观测、对地观测以及气象研究等方面得到了越来越多的关注。探测器的响应光谱延拓到甚长波段将对材料的组分均匀性和缺陷密度以及器件的量子效率和暗电流提出了很高的要求<sup>[1]</sup>。

子效率和暗电流提出了很高的要求<sup>[1]</sup>。

汞空位掺杂碲镉汞 n-on-p 技术由于工艺简单成熟, 器件性能稳定可靠而被法国 Sofradir、德国 AIM 以及国内相关研究机构用于碲镉汞红外焦平面器件的研制和生产。Sofradir 的 O. Gravrand 等<sup>[2-3]</sup>也采用该技术成功研制了 50 K 工作温度下截止波长

收稿日期: 2022-01-05, 修回日期: 2022-07-14

基金项目: 云南省科技人才与平台计划项目 (202105AD160047)

**Foundation items:** Supported by Yunnan Science and Technology Talents and Platform Plan Project (202105AD160047)

**作者简介 (Biography):** 李雄军 (1984-), 男, 白族, 云南大理人, 博士, 正高级工程师, 主要从事红外探测器材料与器件的研究. E-mail: lixiong-jun666@126.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: llh\_email@163.com

**Received date:** 2022-01-05, **revised date:** 2022-07-14

分别为  $14.8\ \mu\text{m}$  和  $18.0\ \mu\text{m}$ 、像元中心距为  $30\ \mu\text{m}$  的  $320\times 256$  碲镉汞探测器。器件有效像元率大于 99%，响应非均匀性小于 3%，显示出了较佳的器件性能。然而，汞空位除了作为受主电离产生空穴外，还在带隙内引入复合中心，降低少子寿命，使器件暗电流增加<sup>[4]</sup>。这对低背景应用以及较高工作温度下的器件性能具有很大的限制。

随后，Sofradir<sup>[3,5]</sup> 和 AIM<sup>[6-9]</sup> 开始转向非本征掺杂碲镉汞 n-on-p 技术的研究，受主杂质主要为 Au、Cu 以及 Ag 等。这些受主杂质电离提供空穴，且不会产生复合中心，有效提高了少子寿命，相应的器件暗电流水平较汞空位掺杂器件降低约 1 个数量级。但是，C. Leroy 等<sup>[5]</sup> 研究发现非本征掺杂 n-on-p 技术的工艺重复性以及所制备器件的可靠性均较汞空位掺杂 n-on-p 技术差。因此，Sofradir 终止了非本征掺杂碲镉汞 n-on-p 技术的研究，转而进行碲镉汞 p-on-n 技术的研究和开发<sup>[3,10-11]</sup>。AIM 则在较长的一段时间内对本征掺杂 n-on-p 技术情有独钟，进行了执着的研究，并成功研制了 55 K 工作温度下截止波长为  $14.7\ \mu\text{m}$ 、像元中心距为  $40\ \mu\text{m}$  的  $256\times 256$  碲镉汞探测器<sup>[6]</sup> 和 55 K 下截止波长为  $14.4\ \mu\text{m}$ 、像元中心距为  $40\ \mu\text{m}$  的  $112\times 112$  碲镉汞探测器<sup>[7]</sup>。此外，K. U. Gassmann 等<sup>[8-9]</sup> 对该技术进行了进一步优化，所制备的 80 K 下截止波长约为  $11\ \mu\text{m}$  的器件暗电流水平一度低于 W. E. Tennant<sup>[12]</sup> 提出的“Rule 07”经验值。然而，通过控制非本征掺杂浓度提高少子寿命的方法存在较大的局限，特别是将 p 型载流子浓度稳定可控地降低至小于  $1.0\times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$  具有很大的困难<sup>[13]</sup>，因此近年来 AIM 也开展了碲镉汞 p-on-n 技术的研究<sup>[13-15]</sup>。

碲镉汞 p-on-n 技术由于 n 型吸收层少子寿命长，使得器件具有约低于汞空位掺杂器件 2 个数量级的暗电流水平；同时，作为多数载流子的电子迁移率高，使得器件串联电阻较小。因此，该技术特别适用于较大面阵甚长波器件的研制。Sofradir 的 N. Baier 等<sup>[10-11]</sup> 采用 As 离子注入 p-on-n 平面结技术成功研制了 77 K 工作温度下截止波长为  $12.3\ \mu\text{m}$ 、像元中心距为  $30\ \mu\text{m}$  的  $320\times 240$  碲镉汞探测器。该器件有效像元率大于 99%，NETD 为 22.9 mK。此外，还研制了 77 K 下截止波长为  $15\ \mu\text{m}$ 、像元中心距  $25\ \mu\text{m}$  的  $384\times 288$  碲镉汞探测器。该器件在 70 K 工作温度下有效像元率大于 99%，50 K 下器件 NETD 为 26 mK，显示出较好的器件性能。此外，

美国 Boeing<sup>[16]</sup>、Raytheon<sup>[17]</sup> 以及 BAE<sup>[18]</sup> 等机构也开展了甚长波探测器的研制。近几年，国内主要从事红外探测器研制的单位也开展了相关的研究工作，但与国外水平相比仍存在较大的差距。本文基于液相外延(LPE)生长的甚长波碲镉汞薄膜，采用 As 离子注入 p-on-n 平面结技术研制了不同截止波长的甚长波碲镉汞焦平面探测器，并对器件性能进行了相应的表征和分析，结果显示器件性能已达到与国外技术水平相当的状态。

## 1 实验

### 1.1 器件制备

实验所用的碲镉汞材料通过 LPE 技术在碲镉汞衬底上生长得到，在生长过程中通过原位掺钢实现 n 型掺杂，掺杂浓度  $5\times 10^{14}\sim 1\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ ，薄膜厚度  $12\sim 16\ \mu\text{m}$ ，Cd 组分  $x$  分别为 0.205 和 0.198。p 型掺杂则通过砷离子注入以及注入后富汞条件下两步退火实现。第一步富汞条件下高温退火激活砷离子并对注入损伤进行修复；随后第二步富汞条件下低温长时间退火将填充材料生长、砷离子注入以及第一步高温退火过程中产生的汞空位，还原钢掺杂 n 型吸收层，同时实现 p-on-n 器件结构，如图 1 所示。接着干法刻蚀欧姆接触孔、沉积金属电极，并通过钢柱与读出电路倒装互连实现了像元中心距  $25\ \mu\text{m}$ 、甚长波  $640\times 512$  探测器的制备。为了提高器件的可靠性，将碲镉汞衬底完全去除，并沉积背增膜以增强红外辐射的入射。

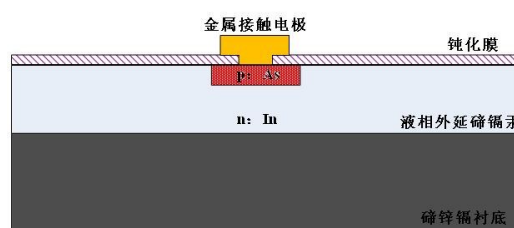


图1 碲镉汞 p-on-n 器件结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of HgCdTe p-on-n device

### 1.2 器件测试

在碲镉汞 p-on-n 器件制备过程中将电极成型后的器件置于低温探针台系统，液氮制冷至约 77 K 后采用 Keysight B1500A 进行  $I-V$  测试。

将完成衬底去除和背增膜沉积的甚长波  $640\times 512$  探测器芯片封装入中测杜瓦，冷屏 F# 数为 2，液氮制冷到约 77 K 后采用德国布鲁克 V70 傅里叶变换红外光谱仪对器件进行光谱响应测试。随后分

别对着 20 °C 和 35 °C 的面源黑体, 调节积分时间至半阱状态对焦平面器件的基本性能进行了测试。最后, 在 0° 视场 (0FOV) 条件下对液氮温度下器件的暗电流及相应的噪声进行了测试分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 p-on-n 器件 $I-V$ 特性

图 2 和图 3 分别为甚长波碲镉汞 p-on-n 器件在线  $I-V$  测试曲线和对应的器件微分阻抗随偏压的变化关系。其中插图分别为 77 K 下截止波长约为 10  $\mu\text{m}$  的碲镉汞 n-on-p 器件  $I-V$  和  $R-V$  曲线作为对比。由于 p-on-n 和 n-on-p 器件极性不同, 其电流随偏压的变化关系相反。此外, 如图 2 所示, n-on-p 器件微分阻抗从 -50 mV 到 -250 mV, 降低大于 1 个数量级, 而 p-on-n 器件从 50 mV 到 250 mV, 微分阻抗未发生明显变化, 表现出类似“平台”特征。这是由于长波碲镉汞 n-on-p 器件中电子的碰撞电离阈值较低, 在较小的偏压下就可能经历一定的雪崩倍增过程而使得器件阻抗随反偏出现较大的变化<sup>[3]</sup>。p-on-n 器件的少子为空穴, 本身质量较大且不易在外加电场中获得较大的能量, 故不易与晶格发生碰撞电离。大于 250 mV 后, 器件微分阻抗随偏压出现快速降低则是由于隧道电流所致。

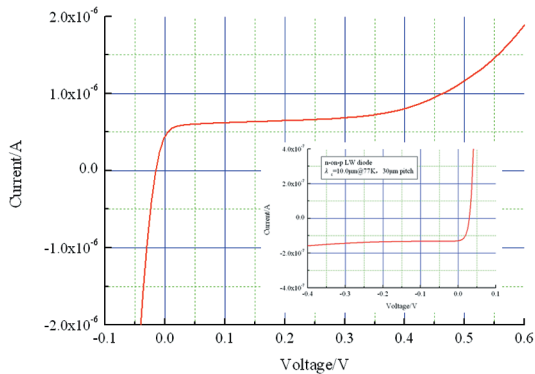


图 2 碲镉汞 p-on-n 器件的  $I-V$  特性

Fig. 2  $I-V$  characteristics of HgCdTe p-on-n device

### 2.2 焦平面器件光谱响应

图 4 为采用不同 Cd 组分碲镉汞材料制备的甚长波 640×512 (25  $\mu\text{m}$ ) p-on-n 探测器中心区域像元在 77 K 工作温度下的归一化相对光谱响应曲线。Cd 组分  $x$  为 0.205 的器件和 Cd 组分  $x$  为 0.198 的器件后截止波长分别为 13.23  $\mu\text{m}$  和 14.79  $\mu\text{m}$ 。

### 2.3 焦平面器件基本性能

对于 Cd 组分  $x$  为 0.205 的甚长波 640×512 (25

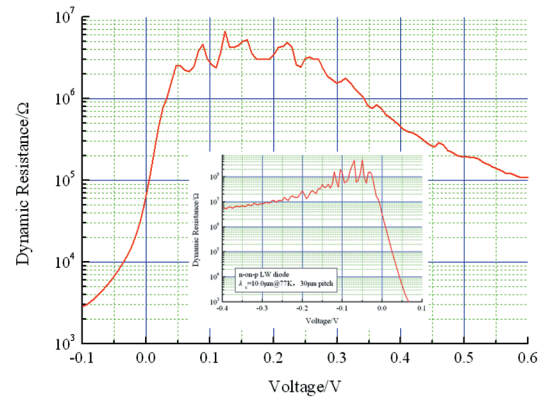
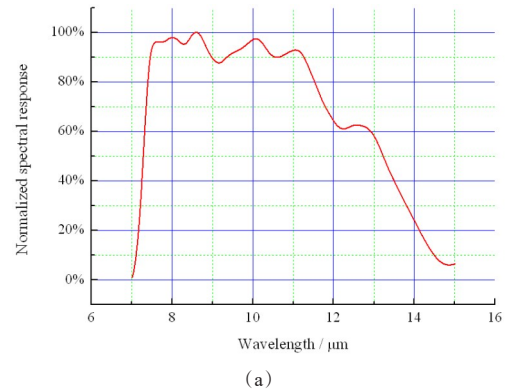
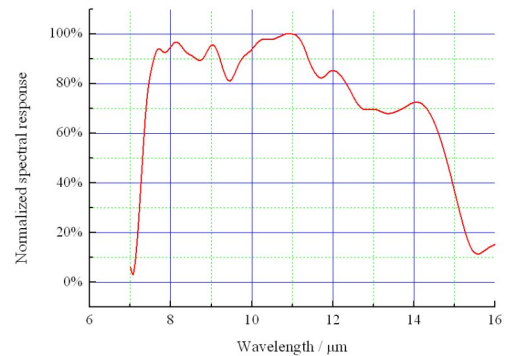


图 3 碲镉汞 p-on-n 器件的  $R-V$  特性

Fig. 3  $R-V$  characteristics of HgCdTe p-on-n device



(a)



(b)

图 4 77 K 下碲镉汞 p-on-n 器件归一化光谱响应: (a) Cd 组分  $x$  为 0.205, (b) Cd 组分  $x$  为 0.198

Fig. 4 The normalized spectral response of HgCdTe p-on-n device at 77 K: (a)  $x_{\text{Cd}}=0.205$ , and (b)  $x_{\text{Cd}}=0.198$

$\mu\text{m}$ ) 探测器, 积分时间调节至 60  $\mu\text{s}$ , 器件达到半阱状态。图 5 为器件响应率灰度图, 响应率非均匀性为 8.15%, 器件量子效率为 55%。图 6 为器件 NETD 直方图, 平均值为 21.5 mK。按照国标有关盲元判定标准 (即超出  $\pm 50\%$  平均响应率或大于 2 倍平均噪



声的像元定义为盲元),该探测器有效像元率为 99.81%,显示出了较好的器件性能。



图5 77 K下  $x_{Cd}=0.205$  的甚长波器件响应率灰度图  
Fig. 5 Responsivity pixel map for a VLWIR FPA with  $x_{Cd}=0.205$  at 77 K

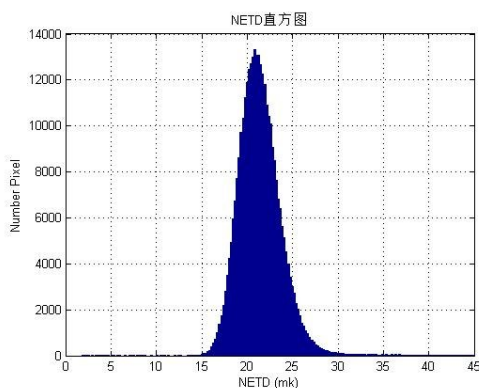


图6 77 K下  $x_{Cd}=0.205$  甚长波器件NETD直方图  
Fig. 6 NETD histogram for a VLWIR FPA with  $x_{Cd}=0.205$  at 77 K

Cd组分  $x$  为 0.198 的甚长波  $640 \times 512 (25 \mu\text{m})$  探测器达到半阱的积分时间为  $40 \mu\text{s}$ 。器件响应率灰度图如图 7 所示,响应率非均匀性为 12.64%,器件量子效率为 45%。图 8 为器件 NETD 直方图,平均值为  $34.6 \text{ mK}$ 。按照国标有关盲元判定标准,该探测器有效像元率为 99.28%。

为了进一步研究器件性能,以达到半阱状态下的积分时间保持不变,在探测器尚未开启的 Gpol 点采集噪声值。结合探测器半阱下的噪声测试值,按照式(1)计算得到单纯的器件噪声测试值。

$$v_{n3} = \sqrt{v_{n1}^2 - v_{n2}^2} \quad (1)$$

式中,  $v_{n1}$  为探测器半阱下的噪声测试值,  $v_{n2}$  为读出电路和测试系统噪声总和,  $v_{n3}$  为单纯的器件噪声测试值。

根据半阱下探测器直流电平测试值和积分时

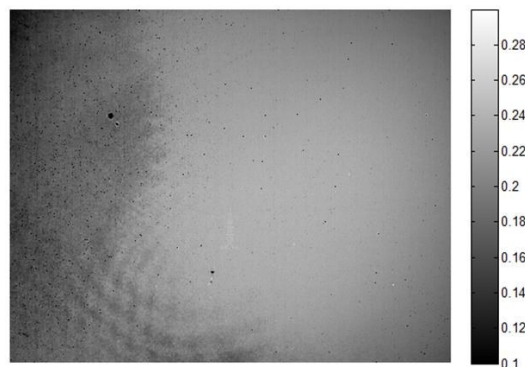


图7 77 K下  $x_{Cd}=0.198$  的甚长波器件响应率灰度图  
Fig. 7 Responsivity pixel map for a VLWIR FPA with  $x_{Cd}=0.198$  at 77 K

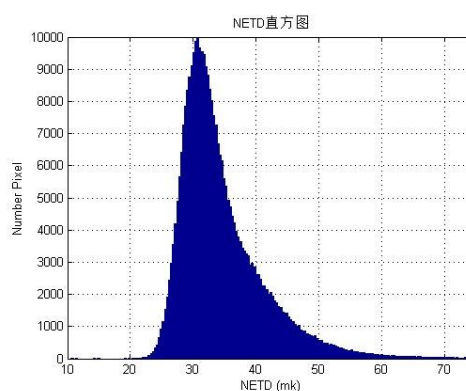


图8 77 K下  $x_{Cd}=0.198$  甚长波器件NETD直方图  
Fig. 8 NETD histogram for a VLWIR FPA with  $x_{Cd}=0.198$  at 77 K

间计算得到器件总电流。按照式(2)散粒噪声形式计算获得器件噪声理论值。

$$v_{n3\text{理论}} = \sqrt{2qI_{\text{总}}\Delta f} \cdot \frac{T_{\text{int}}}{C} \quad (2)$$

式中,  $v_{n3\text{理论}}$  为器件噪声理论值,  $q$  为电子电量,  $I_{\text{总}}$  为器件总电流,  $\Delta f$  为测试带宽,  $T_{\text{int}}$  为积分时间,  $C$  为积分电容。

图 9 和图 10 分别为 Cd 组分  $x$  为 0.205 的器件和 Cd 组分  $x$  为 0.198 的器件单纯器件噪声测试值和理论计算值的对比。这两个器件平均噪声测试值与理论计算值的均值之比分别为 1.032 和 1.045,表明器件主要受器件电流的散粒噪声限制,具有较好的器件性能。

## 2.4 焦平面器件暗电流

在 0FOV 条件下,对 77 K 工作温度下不同组分的甚长波器件进行了暗电流测试。为了减小测试误差,分别采集了半阱状态和短积分时间 ( $10 \mu\text{s}$ ) 下的直流电平值,通过半阱状态下器件电平减去  $10 \mu\text{s}$  短

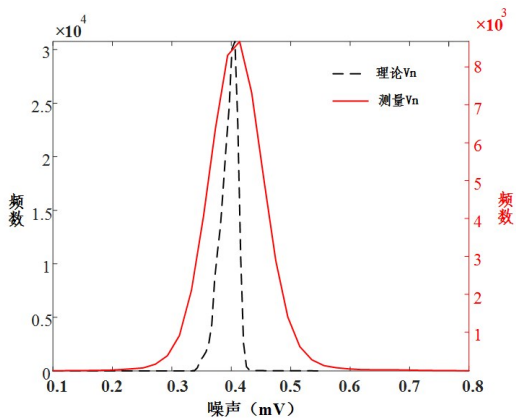


图9 77 K下  $x_{cd}=0.205$  的甚长波器件测试噪声与电流散粒噪声分布

Fig. 9 Measured noise and current shot noise distributions for a VLWIR FPA with  $x_{cd}=0.205$  at 77 K

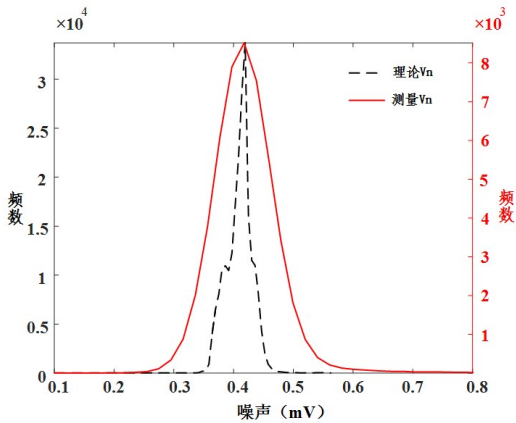


图10 77 K下  $x_{cd}=0.198$  的甚长波器件测试噪声与电流散粒噪声分布

Fig. 10 Measured noise and current shot noise distributions for a VLWIR FPA with  $x_{cd}=0.198$  at 77 K

积分时间下电平计算得到器件的暗电流。图11和图12为Cd组分  $x=0.205$  的器件暗电流灰度图和相应的直方图。器件左右两半部分区域的暗电流水平存在一定的差异,这可能与材料组分偏差和碲镉汞/背增膜界面状态有关。器件暗电流均值为  $2.6 \text{ nA}$ , 根据式(3)计算得到器件  $R_0A$  为  $19.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

$$R_0A = \frac{k_B T}{qJ_{dark}} \quad , \quad (3)$$

式中,  $R_0$  为器件零偏阻抗,  $A$  为结面积,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为工作温度,  $J_{dark}$  为器件暗电流密度。

图13和图14为Cd组分  $x=0.198$  的器件暗电流灰度图和相应的直方图。器件暗电流分布同样存在差异,且更换冷屏后芯片左侧出现了一条裂纹。器件暗电流均值为  $26.6 \text{ nA}$ , 根据式(3)计算得到器

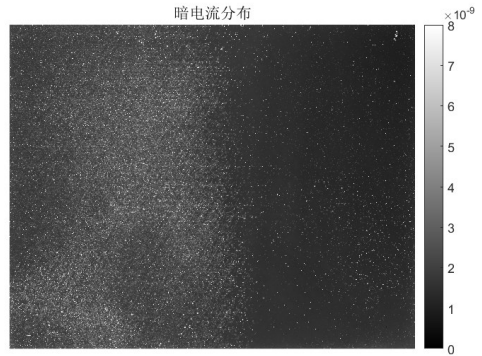


图11 77 K下  $x_{cd}=0.205$  甚长波器件暗电流灰度图

Fig. 11 2-dimensionnal map of dark current for a VLWIR FPA with  $x_{cd}=0.205$  at 77 K

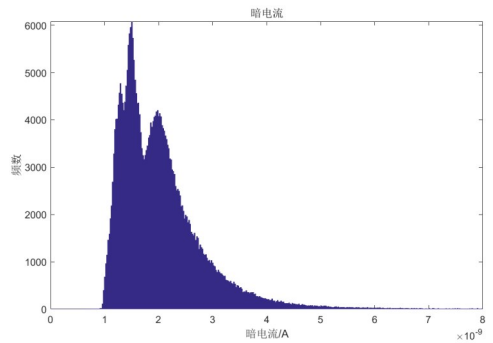


图12 77 K下  $x_{cd}=0.205$  甚长波器件暗电流直方图

Fig. 12 Dark current histogram for a VLWIR FPA with  $x_{cd}=0.205$  at 77 K

件  $R_0A$  为  $1.56 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

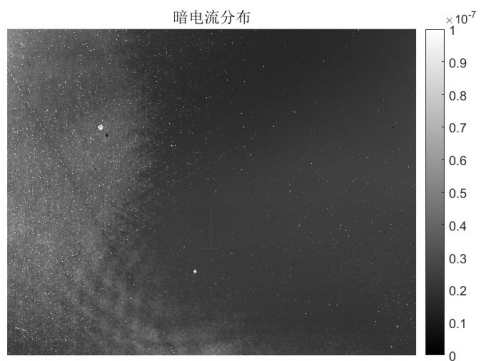


图13 77 K下  $x_{cd}=0.198$  甚长波器件暗电流灰度图

Fig. 13 2-dimensionnal map of dark current for a VLWIR FPA with  $x_{cd}=0.198$  at 77 K

将测试获得的不同组分器件  $R_0A$  值与不同研究机构研制的长波和甚长波器件在液氮温度下  $R_0A$  值进行汇总比较。如图15所示,目前制备的甚长波器件  $R_0A$  值和“Rule07”经验表达式的预测值相当,表明器件已达到较高的性能水平。

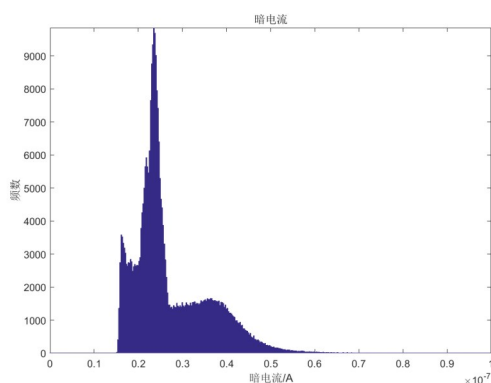


图 14 77 K 下  $x_{Cd}=0.198$  甚长波器件暗电流直方图

Fig. 14 Dark current histogram for a VLWIR FPA with  $x_{Cd}=0.198$  at 77 K

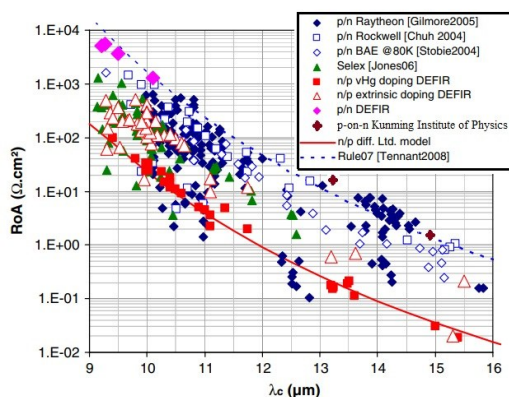


图 15 液氮温度下各研究机构研制的长波和甚长波器件  $R_oA$  值随截止波长的关系

Fig. 15 The relationship between  $R_oA$  value and cutoff wavelength of LW and VLW devices developed by various research institutions at liquid nitrogen temperature

## 2.5 焦平面器件成像演示

对封装在液氮中测杜瓦的 Cd 组分  $x=0.205$  的甚长波  $640 \times 512 (25 \mu\text{m})$  探测器前置长波镜头后进行了初步成像演示。经过非均匀性校正和盲元替换,器件成像照片如图 16 所示,衣服上的手掌印清晰可见,显示出较好的成像效果。

## 3 结论

本文采用 Cd 组分  $x$  分别为 0.205 和 0.198 的碲镉汞 LPE 材料,通过砷离子注入 p-on-n 平面结技术制备了像元中心距为  $25 \mu\text{m}$  的甚长波  $640 \times 512$  探测器。在液氮温度下对器件响应光谱、基本性能以及暗电流水平进行了测试和分析。结果表明,Cd 组分  $x$  为 0.205 的甚长波探测器后截止波长为  $13.23 \mu\text{m}$ ,响应率非均匀性 8.15%,器件量子效率 55%,



图 16 77 K 下  $x_{Cd}=0.205$  甚长波器件成像演示

Fig. 16 Imaging demonstration of a VLWIR FPA with  $x_{Cd}=0.205$  at 77 K operating temperature

NETD 平均值 21.5 mK,有效像元率为 99.81%;Cd 组分  $x$  为 0.198 的甚长波探测器后截止波长为  $14.79 \mu\text{m}$ ,响应率非均匀性 12.64%,器件量子效率 45%,NETD 平均值 34.6 mK,有效像元率为 99.28%。77 K 工作温度下,截止波长为  $13.23 \mu\text{m}$  和  $14.79 \mu\text{m}$  的甚长波器件  $R_oA$  分别为  $19.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$  和  $1.56 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,达到了“Rule07”经验表达式的预测值,器件噪声主要受散粒噪声限制,显示出了较好的器件性能。

## References

- [1] H R Vydyanath, V Nathan. Materials and process issues in the fabrication of high performance VLWIR HgCdTe infrared detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2001, **9**(1): 1-5.
- [2] O Gravrand, E De Borniol, S Bisotto, *et al.* From LWIR to VLWIR FPAs made with HgCdTe at Defir [C] //Proc. of SPIE, 2006, **6361**: 636118-1-636118-10.
- [3] O Gravrand, L Mollard, C Largeron, *et al.* Study of LWIR and VLWIR Focal Plane Array Developments Comparison Between p-on-n and Different n-on-p Technologies on LPE HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, **38**(8): 1733-1740.
- [4] M A Kinch, F Aqariden, D Chandra, *et al.* Minority carrier lifetime in p-HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, **34**(6): 880-884.
- [5] C Leroy, P Chorier, G Destefanis. LWIR and VLWIR MCT technologies and detectors development at Sofradir for space applications [C] //Proc. of SPIE, 2012, 8353: 835320-1- 835320-11.
- [6] J Ziegler, D Eich, S Hanna, *et al.* Recent Results of 2-dimensional LW- and VLW- HgCdTe IR FPAs at AIM [C] // Proc. of SPIE, 2010, **7660**: 766038-1- 766038-10.
- [7] R Wollrab, A Bauer, H Bitterlich, *et al.* Planar n-on-p HgCdTe FPAs for LWIR and VLWIR Applications [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8): 1618-1623.
- [8] K U Gassmann, D Eich, W Fick, *et al.* Low dark current MCT-based focal plane detector arrays for the LWIR and VLWIR developed at AIM [C] //Proc. of SPIE, 2015,

- 9639: 96390P-1- 96390P-9.
- [9] M Haiml, D Eich, W Fick, *et al.* Low dark current LWIR HgCdTe focal plane arrays at AIM [C] //Proc. of SPIE, 2016, **9881**: 988116-1- 988116-12.
- [10] N Baier, L Mollarda, O Gravrand, *et al.* Very long wavelength infrared detection with p-on-n LPE HgCdTe [C] // Proc. of SPIE, 2012, 8353: 83532N-1- 83532N-12.
- [11] N Baier, C Cervera, O Gravrand, *et al.* Latest Developments in Long-Wavelength and Very-Long Wavelength Infrared Detection with p-on-n HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(6): 3144 - 3150.
- [12] W E Tennant, D Lee, M Zandian, *et al.* MBE HgCdTe Technology: A Very General Solution to IR Detection, Described by "Rule 07", a Very Convenient Heuristic [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37** (3) : 1406-1410.
- [13] H Lutz, R Breiter, D Eich, *et al.* Small pixel pitch MCT IR-modules [C] //Proc. of SPIE, 2016, 9819: 98191Y-1- 98191Y-18.
- [14] H Lutz, R Breiter, D Eich, *et al.* Towards ultra-small pixel pitch cooled MW and LW IR-modules [C] //Proc. of SPIE, 2018, 10624: 106240B-1- 106240B-16.
- [15] H Lutz, R Breiter, D Eich, *et al.* Improved high performance MCT MWIR and LWIR modules [C] //Proc. of SPIE, 2019, **11002**: 1100216-1- 1100216-13.
- [16] A I Dsouza, L C Dawson, C Staller, *et al.* Large VLWIR Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te Photovoltaic Detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**(6): 630 - 635.
- [17] J Bangs, A Gerrish, A Stevens, *et al.* Advancements in HgCdTe VLWIR materials [C] //SPIE, 2005, **5783**: 223-230.
- [18] T Parodos, E A Fitzgerald, A Caster, *et al.* Effect of Dislocations on VLWIR HgCdTe Photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2007, **36**(5): 1068-1076.