

通过成结模拟器研究 n^+-n^-p 碲镉汞高温探测器

林加木, 周松敏, 王溪, 甘志凯, 林春*, 丁瑞军

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

摘要: 第三代红外探测器发展的一个重要方向是高工作温度探测器。对于碲镉汞 $n-on-p$ 探测器而言, n^+-n^-p 结构以及良好的钝化工艺能够有效的抑制暗电流的产生, 从而在高工作温度条件下获得较好的探测器性能。基于自行开发的成结模拟器, 对 n^+-n^-p 结构地高温器件进行了工艺仿真和器件仿真, 获得成结过程的制备参数, 并结合抑制表面漏电的组分梯度钝化工艺, 将高工作温度下的暗电流抑制至理论极限, 研制出可以在更高温度工作下的碲镉汞 $n-on-p$ 红外焦平面探测器。经测试, 中波 $n-on-p$ 红外焦平面器件在不同工作温度下性能优异, 在 80 K 工作温度下噪声等效温差 (NETD) 达到了 6.1 mK, 有效像元率为 99.96%; 而在 150 K 工作温度下噪声等效温差 (NETD) 为 11.0 mK, 有效像元率为 99.50%, 达到了同类器件的理论极限。

关键词: 碲镉汞; n^+-n^-p ; 高工作温度; 红外焦平面

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Study on HgCdTe detectors with high operating temperature by junction formation simulator

LIN Jia-Mu, ZHOU Song-Min, WANG Xi, GAN Zhi-Kai, LIN Chun*, DING Rui-Jun

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

Abstract: An important branch of the three-generation infrared focal plane is high operating temperature (HOT) infrared detector. For HgCdTe $n-on-p$ detectors, dark current can be suppressed with n^+-n^-p structure and good passivation, and then better performance of the detector will be obtained under high operating temperature. Based on the junction formation simulator, the junction formation parameters of HOT device are achieved and combined with the manufacture technology of optimized passivation layer, HgCdTe $n-on-p$ infrared focal plane arrays which can operate at higher temperature was made in Shanghai Institute of Technical Physics (SITP). The performance of was studied at high operating temperature. One of mid-infrared detector has reached good performance under different operating temperature. The NETD is 6.10mK and operability is 99.96% at 80K, and the NETD is 11.0mK and operability is 99.50% at 150K, which reached the theoretical limit.

Key words: HgCdTe, n^+-n^-p , high operation temperature (HOT), infrared focal plane array

引言

碲镉汞红外探测器通常在低温甚至深低温条件下工作。而第三代红外探测器提出了“SWaP³”概念^[1-3], 即小型化、轻量化、低功耗、高性能和低成本。要求提高探测器工作温度的同时探测器性能基本不变, 则可以有效地降低红外系统的体积、重量和功耗, 是实现低成本的有效途径。

在碲镉汞体系中, 高温器件的研究方面, 国外开展相关的公司和团体主要有欧洲的 Sofradir, AIM, Selex 以及美国的 DRS, Teledyne 公司。其中通过 $n-on-p$ 工艺路线研制的器件在工作温度为 160 K 时有着优异的性能, 主要规格为中波 640×512 甚至更大的规模; 通过 $p-on-n$ 工艺路线研制的器件在工作温度 220 K 下仍有较好的性能^[4-8]。

收稿日期: 2023-05-02, 修回日期: 2023-07-22

基金项目: 中国科学院青年创新促进会 (2017288)

作者简介 (Biography): 林加木 (1982-), 男, 江苏宜兴人, 博士研究生, 主要研究领域为碲镉汞红外探测器。E-mail: linjiamu@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: chun_lin@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2023-05-02, Revised date: 2023-07-22

在国内开展高温器件研究的单位主要有中国科学院上海技术物理研究所、昆明物理研究所、中电科 11 所以及武汉高德红外等。杨朝臣等于 2019 年报道了高德红外公司基于 n-on-p 技术的高温器件能在 125 K 下工作^[9]。中电科 11 所陈慧卿等于 2020 年报道了其 p-on-n 器件在 120 K 时性能发生了退化^[10]。昆明物理研究所陈军等 2022 年报道了基于碲镉汞材料 p-on-n 技术研制的 640×512 探测器组件在 150 K 温度性能优异工作, 噪声等效温差小于 20 mK, 并可实现商用量产^[11]。

随着工作温度的升高, 碲镉汞红外探测器的暗电流迅速增加, 成为决定探测器性能的一个关键因素。为保证在更高工作温度条件下获得良好的探测器性能, 国内外高温器件的研究大部分都围绕暗电流抑制方面展开。在碲镉汞 n-on-p 高温探测器方面, n⁺-n⁻-p 结构能够减少产生-复合暗电流, 而梯度钝化工艺能够减少表面扩散电流和降低隧穿电流, 两者相结合后能有效地抑制高工作温度条件下的暗电流, 从而获得性能较好的高温器件。

本论文介绍了本课题组在碲镉汞 n-on-p 高工作温度器件方面所做的工作, 由碲镉汞成结模拟器出发, 模拟了 n⁺-n⁻-p 型高温器件成结过程, 获得了制备参数和器件参数, 结合使用抑制表面漏电的梯度钝化工艺技术, 获得了高温工作的中波 320×256 焦平面器件, 并进行了一系列参数表征和成像演示。

1 碲镉汞 n-on-p 高工作温度器件的工艺仿真与器件仿真

对需要在更高温度下工作的碲镉汞红外探测器而言, 抑制暗电流是核心工作。本论文结合工艺仿真和器件仿真, 对器件成结工艺和抑制表面漏电的钝化工艺进行了研究。

1.1 n⁺-n⁻-p 结构成结的工艺仿真

碲镉汞 n-on-p 器件要在更高的工作温度下具有较好的性能, 对 n⁻区的厚度以及掺杂浓度的调制是一个关键的工艺步骤。在平面结工艺的基础上, 对离子注入后形成的 pn 结进行高温退火, 使得 pn 结深度得到推进, 同时降低了 n⁻区浓度, 形成如图 1 所示的 n⁺-n⁻-p 结构。在离子注入后的退火工艺过程中, 受温度的影响, 被离子注入打出的 Hg 填隙原子向碲镉汞内部扩散, 注入区附近区域内作为受主的 Hg 空位被填充后, 最终形成了由剩余施主掺杂的 n⁻区。本课题组开发了成结模拟器^[12-13]来专门研究

不同退火温度和退火时间下 Hg 填隙原子向内部扩散的速度和深度, 从而确定了满足工艺要求的退火条件范围。

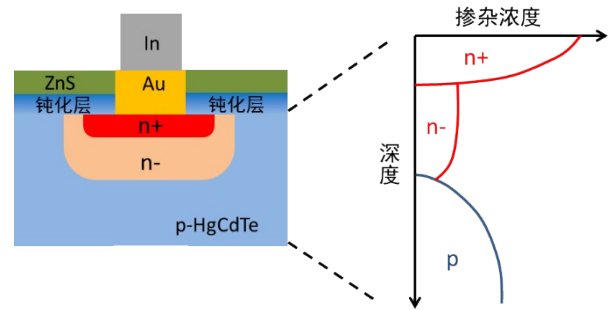


图 1 n⁺-n⁻-p 结构示意图

Fig. 1 The diagram of n⁺-n⁻-p structure

在此研究中, 以往的方法通常是通过多次实验来研究不同退火温度与退火时间所产生的推结效果, 这种方法的研究及迭代速度较慢。而在本课题组的研究中, 采用自行开发的成结模拟器首先进行成结模拟, 随后获得具体的成结制备参数, 从而加快了研究的效率。碲镉汞材料成结与传统硅材料不同, 硼离子注入于碲镉汞材料之后是非电活性的, 它的作用在于撞出晶格中的汞原子, 形成汞填隙, 随后在退火的过程中, 汞填隙从损伤区内溢出向体内扩散, 湮灭 p 型汞空位, 显现出剩余施主 n⁻区, 最终形成 n⁺-n⁻-p 结。成结模拟器可以有效地模拟注入后退火的过程, 其从汞空位与汞填隙的扩散方程出发, 它们的方程分别为

$$\frac{\partial C_I}{\partial t} = \nabla(D_I \nabla C_I) + g C_{Hg} - k_R C_I C_V, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_V}{\partial t} = \nabla(D_V \nabla C_V) + g C_{Hg} - k_R C_I C_V, \quad (2)$$

式中 C_I , C_V , D_I 和 D_V 分别是汞填隙与汞空位的浓度与扩散系数, C_{Hg} 是汞原子晶格位置的数量, k_R 和 g 分别代表了复合和产生率。结合边界条件, 解式 (1) 和式 (2) 的耦合偏微分方程, 可获得结区推进随退火温度与退火时间变化的结果。图 2 为中波碲镉汞相同时间下不同退火温度的结深推进结果, 图中粉色虚线代表了剩余施主浓度, 当汞空位浓度曲线与剩余施主浓度虚线相交时, 代表了结深的位置。从图 2 可以看出, 退火温度对结深推进的影响非常大, 高退火温度可以将结深推进至较深的距离, 而较低的退火温度则获得较浅的结深推进距离。

1.2 暗电流仿真

通过成结模拟器获得结区掺杂浓度分布之后,

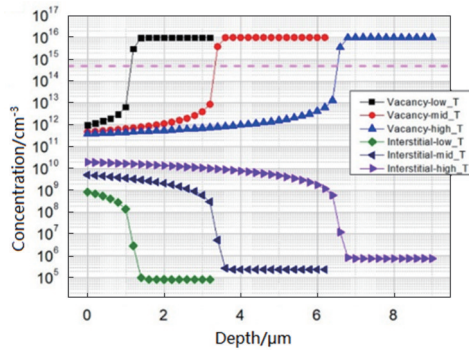


图2 不同温度结深推进结果

Fig. 2 Junction drive-in results under different temperature

将其代入器件模拟软件。根据扩散及漂移模型,建立电流连续性方程。由于高温工作器件采用的是 n⁺-n⁻-p 结构,因此主要考虑电子的作用。

$$J_n = qn\mu_n E_n + qD_n \nabla n, \quad (3)$$

式中 q 为电子电量, n 为电子浓度, μ_n 为电子迁移率, E_n 为有效电场强度, D_n 为电子扩散系数, 在碲镉汞材料中, 迁移率 μ_n 表达式为

$$\mu_n = 9 \times 10^8 \left(\frac{0.2}{x} \right)^{7.5} T^{-2} \left(\frac{0.2}{x} \right)^{0.6}, \quad (4)$$

其中 x 为碲镉汞组分, T 为温度, 在获得迁移率表达式之后, 可得到扩散系数 D_n 表达式:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n, \quad (5)$$

其中 k 为玻尔兹曼常数。由准费米能级与载流子浓度的关系可推导出有效电场强度 E_n 为

$$E_n = -\nabla \left(\Psi + \frac{kT}{q} \ln n_{ie} \right), \quad (6)$$

可见电场强度与电势 Ψ 以及本征载流子浓度 n_{ie} 相关。因此在器件模拟软件中, 开启式 (3)-式 (6), 可以获得模拟的器件暗电流随温度变化的结果如图 3 所示。图 3 中绿色方块曲线为光电流仿真结果, 其模拟条件为, 器件工作温度 150 K, 背景温度 293 K, 响应波段为 3.7~4.8 μm , F# 为 4 的条件下获得的光电流。从图 3 可以看出, 在 150 K 的温度下, 该结构的器件暗电流仍然比光电流低近 1 个数量级, 适合应用于高温器件的制备。

1.3 抑制表面漏电的梯度钝化表面能带仿真

由于碲镉汞材料是窄禁带半导体, 其表面电荷状态极容易受到界面电荷的影响, 从而形成载流子反型或积累的状态, 造成界面处 pn 结性能退化, 形成表面漏电, 其暗电流急剧增加^[14]。本文制备的器件采用了界面梯度变化的钝化工艺, 用来抑制表面

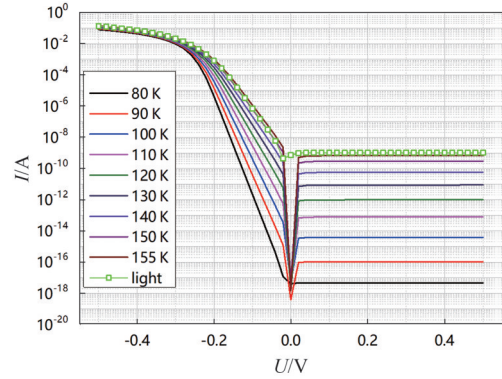


图3 高温结构不同温度暗电流与光电流模拟结果

Fig. 3 Simulated dark current under different temperature and light current of HOT structure device

漏电, 大幅度降低器件暗电流, 从而进一步提高器件工作温度。

高温热处理可以使得 CdTe/HgCdTe 之间发生组分互扩散^[15], 从而在碲镉汞表面形成一定深度的组分互扩散区域, 在该区域内 Cd 组分从碲镉汞体内至表面逐渐增加。碲镉汞内部能带由于组分发生变化从而形成了弯曲, 其产生的内建电场使得碲镉汞表面的载流子向碲镉汞内部移动。在平衡态时, 碲镉汞内部载流子浓度大于表面附近的载流子浓度; 同时得益于禁带宽度在表面较宽, 隧穿电流也得到了抑制。因此, 经过 CdTe/HgCdTe 退火后制备出来的光敏元芯片, 由于组分互扩散钝化层的存在, 表面漏电得到了极大的抑制, 从而使得探测器暗电流中的漏电流成分得到了大幅的削弱。图 4 为组分梯度缓变钝化能带结构仿真结果。

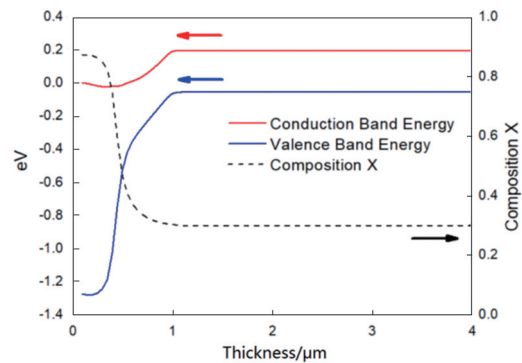


图4 组分梯度缓变钝化的能带结构

Fig. 4 The diagram of passivation structure with composition gradient

2 中波 320×256 碲镉汞 n-on-p 高温器件参数表征及成像演示

本课题组基于液相外延(LPE)生长的中波碲镉汞材料制备了能在更高温度下工作的红外焦平面器件。通过注入成结,注入后进行热处理形成 $n^+ - n^- - p$ 结构。钝化层选用 CdTe,生长钝化层后,通过热处理形成组分渐变的 CdTe/HgCdTe 表面区域。后续进行 ZnS 生长,金属化,制备碲镉汞光敏芯片,再通过钢柱倒焊读出电路,获得了高温工作的中波 320×256 焦平面探测器。将器件封装至金属杜瓦内,耦合制冷机,制备成红外焦平面制冷组件。杜瓦窗口为宝石窗口,所安装的冷屏中心 F 数为 4。

探测器芯片组分为 0.307,阵列规模 320×256,像元中心距 30 μm 。按照国标要求的条件和测试方法,对该器件进行了高工作温度下的参数表征,并在此基础上进行了成像演示。测试时黑体温度分别为 293 K 和 308 K,积分时间 18 ms。

2.1 80 K 工作温度下的性能

该器件在 80 K 工作温度下的信号响应分布如图 5(a)所示,噪声等效温差(NETD)约 6.1 mK, NETD 的分布图如图 5(b)所示。

2.2 不同工作温度下的响应与噪声

随着工作温度的升高,材料的理论截止波长变短,器件的响应减小。图 6 为不同工作温度下器件的响应与噪声实测结果,其中图 6(a)为器件响应和光生电子计算数随工作温度而变化的曲线,图 6(b)为器件噪声随工作温度而变化的曲线。器件噪声测试的结果中,包含了器件光子噪声、暗电流噪声、读出电路噪声以及测试系统噪声。在不考虑测试系统噪声的前提下,在工作温度较低时,器件暗电流很低,噪声主要由光子噪声决定,噪声随工作温度的变化不明显;随着工作温度的升高,暗电流呈指数增长的态势,当工作温度高于 140 K 时,暗电流对器件噪声的贡献已较为明显;当工作温度达到 150 K 后,器件噪声主要成分为暗电流噪声,并且随温度升高而显著增加。

2.3 不同工作温度下的噪声等效温差(NETD)

噪声等效温差(NETD)是探测器应用中一个重要的参数,用于表征探测器信噪比,由探测器的响应大小和器件噪声共同决定。在更高工作温度下,暗电流成为影响器件噪声的主要因素。以探测器反向偏置为 200 mV 时的器件漏电流表征探测器暗电流,图 7 为实测暗电流随工作温度变化的曲线,理论暗电流

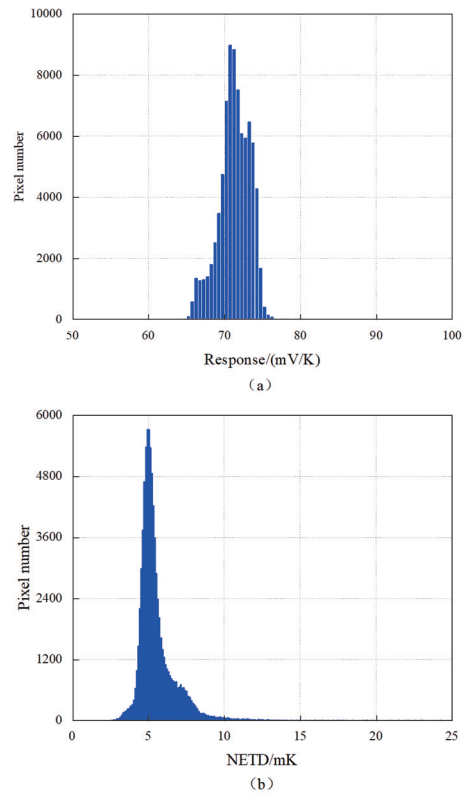


图 5 80 K 下的 n-on-p 中波碲镉汞焦平面器件性能直方图: (a)响应分布, (b)噪声等效温差分布

Fig. 5 Performance histogram of MWIR n-on-p HgCdTe focal plane arrays at 80 K: (a) histogram of response, (b) histogram of NETD

主要由产生-复合以及扩散两种机制主导,器件暗电流则是采用焦平面器件进行测试。如图 7 所示,在较低的工作温度时,器件暗电流测试时使用暗场冷屏温度过高引起了光电流,因此器件暗电流实测值表现为保持在 0.1 pA 左右,这一量级的漏电流对噪声及 NETD 的测试影响可以忽略;而当工作温度在 120~150 K 范围内,暗场冷屏温度过高引起的光电流量级远小于器件暗电流,其暗电流测试数据不受该光电流的影响,表现为与理论仿真结果相符合。

基于暗电流理论值,对不同工作温度下的器件理论 NETD 进行了计算。图 8 为器件 NETD 随工作温度变化的曲线,实测 NETD 与理论值基本一致。从图 8 可以看出,在工作温度较低时,NETD 处于 6~8 mK 范围内,几乎不随工作温度变化而变化;当工作温度高于 140 K 时,NETD 随着工作温度的增加而增加,在 150 K 工作温度下 NETD 为 11.0 mK;当工作温度高于 155 K 时,NETD 仍有 13.6 mK,但是随工作温度的升高开始显著增加。

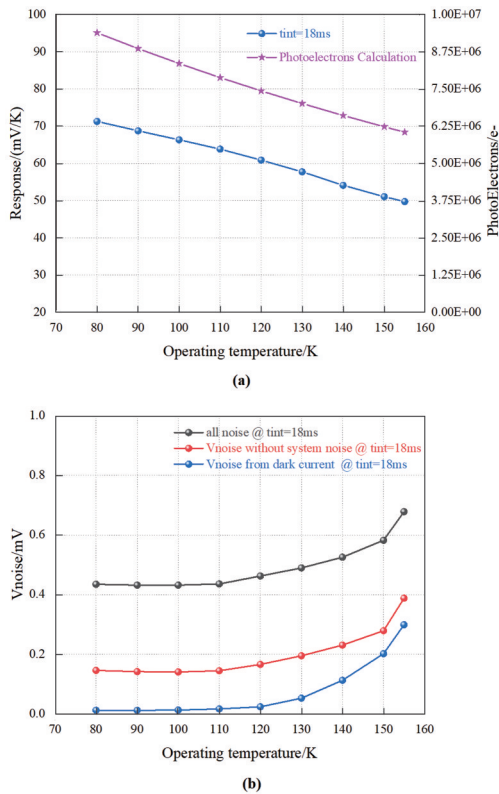


图6 不同工作温度下器件的响应和噪声测试结果:(a)响应与光生电子计算数,(b)噪声
 Fig. 6 response and noise result of the device at different operating temperature: (a) Response and photoelectrons calculation, (b) Noise

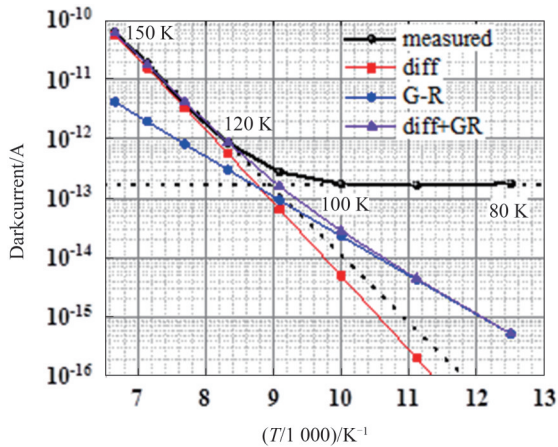


图7 器件实测暗电流随工作温度的变化曲线
 Fig. 7 Dark current graph of the device at different operating temperature

2.4 不同工作温度下的有效像元率

在较低工作温度下,器件暗电流远小于其光电流,不论是器件性能还是盲元率均不受暗电流的影响,因此低温下器件有效像元率较高,如图9所示。

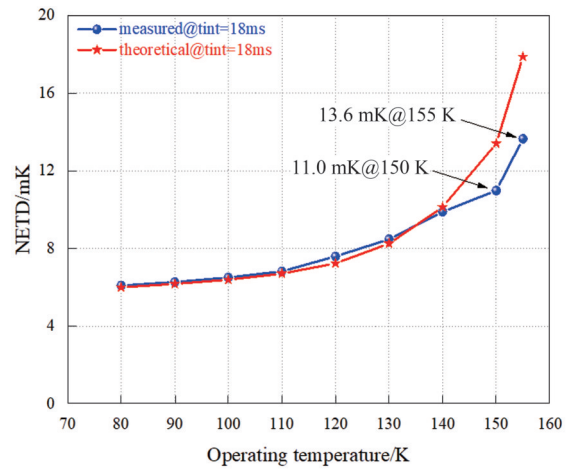


图8 器件噪声等效温差随工作温度的变化曲线
 Fig. 8 NETD graph of the device at different operating temperature

在80 K工作温度下,有效像元率达到99.95%;在150 K工作温度下,有效像元率仍有99.50%。但是随着温度的升高,暗电流的不一致性开始对盲元率产生影响,在155 K工作温度下虽然器件多数像元仍有较高性能,但盲元数量陡然增加,主要是部分像元暗电流急剧增加导致像元饱和从而表现为死像元,有效像元率降低到98%以下。

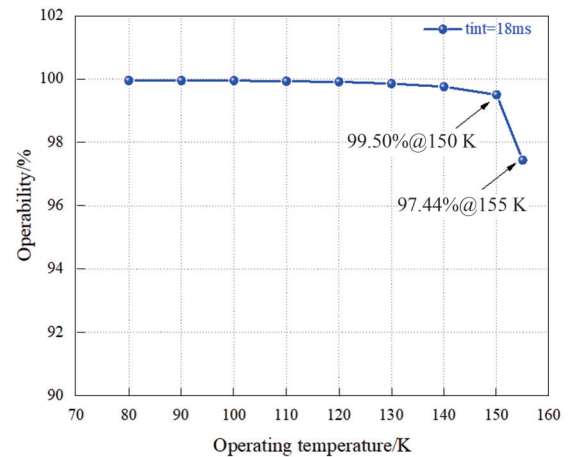


图9 器件有效像元率随工作温度的变化曲线
 Fig. 9 Operability graph of the device at different operating temperature

2.5 不同工作温度下的成像演示

使用该探测器在不同工作温度下进行了凝视成像演示,并对成像结果做了伪彩色处理,成像结果如图10所示,可以看到在不同工作温度下都表现出良好的成像效果,尤其在150 K下该探测器成像质量较好,温度差异清晰可辨。



图 10 320×256 中波焦平面探测器在不同工作温度下的伪彩色成像图

Fig. 10 Image picture of 320×256 MWIR focal plane arrays at different operating temperature

3 结语

高工作温度红外探测器可以有效地减小红外系统的尺寸、重量和成本,实现“SWaP”。本课题组基于工艺仿真和器件仿真,通过 n^+n^-p 型器件制备工艺和抑制表面漏电的钝化工艺研制了能够在更高温度下工作的红外焦平面探测器。与成结模拟器仿真结果高度吻合的器件测试结果表明,该器件可以在高工作温度下正常工作,并拥有优异的性能,其中暗电流和 NETD 在 150 K 工作温度条件下均符合了理论仿真结果,同时在高工作温度条件下中波红外成像效果表现良好,能够满足小型化、轻量化、低功耗、高性能和低成本的应用要求。

References

- [1] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(9): 091101.10.1063/1.3099572.
- [2] Reibel Y, Taalat R, Brunner A, et al. Infrared SWAP detectors: pushing the limits [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2015, **9451**: 945110-945110-14.
- [3] Ye Zhen-Hua, Li Hui-Hao, Wang Jin-Dong, et al. Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 李辉豪, 王进东, 等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势. *红外与*

毫米波学报), 2022, **41**(1): 15-39.

- [4] Reibel Y, Rouvie A, Nedelcu A, et al. Large format, small pixel pitch and hot detectors at SOFRADIR: Proc. SPIE, 2013 [C]. 8896:88960B.
- [5] Ruhlich I, Mai M, Withopf A, et al. AIM cryocooler developments for HOTdetectors: Proc. SPIE, 2014 [C]. 9070: 90702P.
- [6] Knowles P, Hipwood L, Pillans L, et al. MCT FPAs at high operating temperatures: Proc. SPIE, 2011 [C]. 8185: 818505.
- [7] Robinson J, Kinch M, Marquis M, et al. Case for small pixels: system perspective and FPA challenge: Proc. SPIE, 2014 [C]. 9100:910001.
- [8] Jerram P, Beletic J. Teledyne's high performance infrared detectors for Space missions [C]//International Conference on Space Optics — ICSO 2018. SPIE, 2019. DOI: 10.1117/12.2536040.
- [9] Yang Zhao-Chen, Zhang Bing-Jie, Du Yu, et al. A study of manufacture HgCdTe HOT MW infrared detector [J]. *Laser & Infrared* (杨朝臣, 张冰洁, 杜宇, 等. 碲镉汞高温中波红外探测器的制备研究. *激光与红外*), 2019, **49**(2): 204-208.
- [10] Chen Hui-Qing, Shi Chun-Wei, Hu Shang-Zheng, et al. Study on p-on-n technology of the MWIR HgCdTe for hot work [J]. *LASER & INFRARED* (陈慧卿, 史春伟, 胡尚正, 等. 中波碲镉汞 p-on-n 高温工作技术研究. *激光与红外*), 2020, **50**(4): 435-438.
- [11] Chen Jun, Xi Zhongli, Qin Qiang, et al. Advance in high operating temperature HgCdTe infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering* (陈军, 习中立, 秦强, 等. 碲镉汞高温红外探测器组件进展. *红外与激光工程*), 2023, **52**(1): 20220462.
- [12] Gan Zhikai, Zhao Yu, Lin Chun, et al. Study of lateral junction drive-in after annealing in Ion implanted HgCdTe [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2022, **40**: 062206.
- [13] Gan Zhikai, Zhao Yu, Lin Chun, et al. 2D modeling of annealing process after ion implantation in n-on-p HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2023, **52**: 2871-2877.
- [14] He Kai, Zhou Song-Min, Li Yang, et al. Effect of surface fields on the dynamic resistance of planar HgCdTe mid-wavelength infrared photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics* 28 May 2015; **117** (20): 204501. <https://doi.org/10.1063/1.4921593>
- [15] Wang Xi, Zhou Song-Min, Sun Chang-Hong, et al. Annealing of Au doped HgCdTe covered by electron beam evaporated CdTe [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王溪, 周松敏, 孙常鸿, 等. 真空退火的 CdTe/Au 掺杂 HgCdTe 界面状态的影响 [J]. *红外与毫米波学报*), 2018, **37**(4): 399-402.