

# 长波 p-on-n 碲镉汞红外焦平面器件高温工作性能

熊伯俊<sup>1</sup>, 邹雷<sup>2</sup>, 杨超伟<sup>1</sup>, 秦强<sup>1</sup>, 孔金丞<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 100071)

**摘要:** 碲镉汞材料为窄禁带半导体, 随着工作温度的升高, 材料本征载流子浓度会增加, 探测器截止波长会变短, 暗电流增加等, 会导致器件性能降低。碲镉汞红外探测器通常在 77 K 温度附近工作并获得很好的探测性能, 但低温工作会增加探测器的制备成本、功耗、体积和重量等。为了解决这些问题, 在保证探测器正常工作性能的前提下, 提升探测器的工作温度是碲镉汞红外探测器的重要研究方向。p-on-n 结构的碲镉汞红外焦平面器件具有低暗电流、长少子寿命等特点, 有利于在高工作温度条件下获得较好的器件性能。在不同工作温度下对 p-on-n 长波焦平面探测器的性能进行测试分析, 在 110 K 时 p-on-n 长波碲镉汞红外焦平面探测器噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 为 25.3 mK, 有效像元率为 99.48%, 在高温条件下具备较优的工作性能。

**关键词:** 高温探测器; 碲镉汞; p-on-n; 暗电流; 噪声等效温差 (NETD)

中图分类号: TN215 文献标识码: A

## High temperature performance of long-wave p-on-n HgCdTe infrared focal plane detector

XIONG Bo-Jun<sup>1</sup>, ZOU Lei<sup>2</sup>, YANG Chao-Wei<sup>1</sup>, QIN Qiang<sup>1</sup>, KONG Jin-Cheng<sup>1</sup>, LI Li-Hua<sup>1\*</sup>

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

2. Chinese People's Liberation Army 63963, Beijing 100071, China)

**Abstract:** The HgCdTe is a narrow band gap semiconductor. As the operating temperature increases, the intrinsic carrier concentration of the material will increase, the detector cut-off wavelength will become shorter, and the dark current will increase, which will cause the performance of the detector to decrease. HgCdTe infrared detectors usually work near 77 K temperature and obtain good detection performance, but low temperature operation will increase the preparation cost, power consumption, volume and weight of the detector. In order to solve these problems, under the premise of ensuring the normal working performance of the detector, increasing the operating temperature of the detector is an important research direction of the HgCdTe infrared detector. The p-on-n structure HgCdTe infrared focal plane detectors has the characteristics of low dark current and long minority carrier life, which is conducive to obtaining better detector performance under high operating temperature conditions. The performance of the p-on-n long-wave focal plane detectors is tested and analyzed at different operating temperatures. At 110 K, the noise equivalent temperature difference (NETD) of the p-on-n long-wave HgCdTe infrared focal plane detectors is 25.3 mK, and the operability is 99.48%, have better working performance under high temperature conditions.

**Key words:** high operating temperature detector, HgCdTe, p-on-n, dark current, noise equivalent temperature difference (NETD)

**PACS:** 81.05.Dz, 85.60.Gz, 85.60.Bt

## 引言

碲镉汞红外探测器是应用最广泛的制冷型红

外探测器, 被广泛应用于军事、遥感探测、环境监测以及工业探测等领域。禁带宽度窄导致碲镉汞材料在常温下具有高浓度的本征载流子浓度, 因此碲

收稿日期: 2021-11-03, 修回日期: 2022-05-20

基金项目: 红外专项 (LZX20190302)

Foundation items: Supported by Infrared Special Project (LZX20190302)

作者简介 (Biography): 熊伯俊 (1997-), 男, 云南红河人, 硕士研究生, 主要研究领域为红外探测器制备技术。E-mail: 2605723090@qq.com

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

Received date: 2021-11-03, Revised date: 2022-05-20

碲镉汞红外探测器通常在工作温度为 77 K 附近时表现出高的器件性能<sup>[1]</sup>,但是为了满足小型化、轻量化、低功耗以及低成本的要求,提高制冷型碲镉汞红外探测器的工作温度是有必要的,也是第三代焦平面器件发展的重要方向。随着工作温度的提高,碲镉汞材料本征载流子浓度升高,少子寿命变短,器件扩散电流增大,进而导致器件暗电流急剧增大<sup>[1-2]</sup>。相应碲镉汞探测器的响应信号、暗电流、噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)以及有效像元率等性能参数均会发生变化。

对于长波器件来说,由于材料禁带宽度变窄,电子容易发生跃迁,导致长波探测器的暗电流会增加;而 p-on-n 结构的红外探测器具有低的暗电流、高  $R_0A$  等优势<sup>[3-5]</sup>,p-on-n 结构器件可使器件暗电流降低两个数量级以上,暗电流的降低有利于器件工作温度的提高,这使得 p-on-n 器件在长波探测及高温工作等方面具有独特优势。目前国际上均已实现高温中波、长波波段器件的应用,美国 Teledyne 公司和法国 Sofradir 公司均采用 As 注入的 p-on-n 结构进行高温器件制备<sup>[6]</sup>,Sofradir 公司的 Scropio 中波器件工作温度可达 150 K 以上,且 88 K 到 150 K 的温度变化过程中器件性能基本保持不变<sup>[7]</sup>,同时 p-on-n 长波器件在 110 K 工作时有效像元率可到 99.5%<sup>[8]</sup>。德国 AIM 公司采用掺 Au 的 n-on-p 结构成功将中波焦平面器件的工作温度提升到 160 K,且器件性能稳定<sup>[9-10]</sup>,长波 n-on-p 在 100 K 时可获得高的器件性能<sup>[11-12]</sup>;另外 AIM 公司长波 p-on-n 器件工作温度在 120 K(9.9  $\mu\text{m}$ )时仍可获得高质量成像图,NETD 小于 40 mK<sup>[11]</sup>。

国内外针对焦平面器件在高温工作条件下的器件性能已有不少分析研究,为了进一步研究长波 p-on-n 结构焦平面器件在高温工作条件下的器件性能,本文将通过对 p-on-n 长波碲镉汞焦平面探测器的响应信号、噪声、暗电流、NETD、盲元等进行测试分析,研究在 70~110 K 的不同工作温度下,焦平面器件性能的变化情况,分析器件性能变化的原因。

## 1 工作温度变化对器件性能的影响

### 1.1 截止波长

碲镉汞材料的优势在于其可调的禁带宽度,禁带宽度决定了探测器的截止波长,与碲镉汞材料的组分和工作温度相关。禁带宽度 Hansen-Schmit 公

式如式<sup>[13]</sup>(1)所示:

$$E_g = -0.302 + 1.93x - 0.81x^2 + 0.832x^3 + 5.35 \times 10^{-4} \times T \times (1 - 2x) \quad (1)$$

其中  $E_g$  为材料禁带宽度,  $x$  为材料的 Cd 组分,  $T$  为工作温度。另外,截止波长与材料禁带宽度也有对应关系,如式(2):

$$\lambda_c = 1.24/E_g \quad (2)$$

其中  $\lambda_c$  为截止波长,因此可知随着工作温度的升高,碲镉汞材料的禁带宽度增大,对应的截止波长变短;而禁带宽度及截止波长与探测器的量子效率、探测率以及光谱响应等密切相关,表 1 列出了不同工作温度下探测器的截止波长,当  $x=0.2238$  时,77 K 时截止波长为 10.2  $\mu\text{m}$ 。

表 1 不同工作温度下的截止波长

Table 1 Cut-off wavelength at different operating temperatures

$T/\text{K}$	$\lambda_c/\mu\text{m}$
65	10.5
70	10.4
75	10.3
77	10.2
80	10.1
85	10.0
90	9.9
95	9.8
100	9.7
105	9.6
110	9.5
115	9.3
120	9.2
125	9.1
130	9.0

### 1.2 暗电流

高工作温度下,本征激发的载流子浓度会快速增加,导致俄歇 1 寿命的缩短和扩散电流的增大,进一步增加了器件的暗电流,暗电流密度可由式<sup>[14]</sup>(3)表示。

$$J_{\text{Dark}}(T) = q \frac{n_i^2(T)a}{N_D \tau(T)} \quad (2)$$

其中  $a$  是吸收层厚度,  $N_D$  是吸收层 n 型掺杂浓度,  $n_i$  为本征载流子浓度,  $n_i^2 = \exp\left(-\frac{E_g}{K_B T}\right)$ ;  $E_g$  为禁带宽度,  $K_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为工作温度;  $\tau(T) = \tau_{\text{nl}}(T)$ ,  $\tau$  为少子寿命。由式(3)可以看出,工作温度

的升高,将直接导致材料本征载流子浓度增大,碲镉汞材料中载流子的自由扩散增加,从而导致器件暗电流密度增大,暗电流的增大会导致器件性能的降低。

## 2 实验

针对 p-on-n 长波碲镉汞红外焦平面探测器展开研究,器件采用原位掺 In 的 LPE 技术在 CdZnTe 衬底上生长 N 型碲镉汞薄膜,通过 As 离子注入及退火激活实现 P 掺杂,进而制备得到像元间距 25  $\mu\text{m}$ , 640 $\times$ 512 阵列的 p-on-n 长波焦平面探测器,探测器结构示意图如图 1 所示,77 K 工作温度下截止波长为 10.2  $\mu\text{m}$ 。

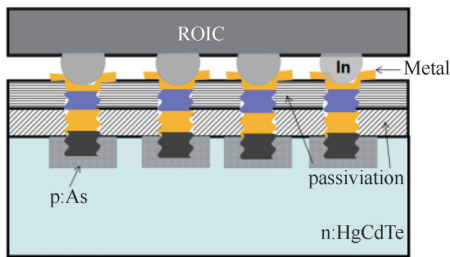


图 1 p-on-n 探测器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of p-on-n detector structure

为了研究分析不同工作温度下焦平面探测器性能变化,在两个不同的目标黑体辐射( $T_1=293\text{ K}$ ,  $T_2=308\text{ K}$ )下,对探测器性能进行测试,并通过计算得到电压响应信号、噪声信号、NETD 等性能参数,由测试结果分析工作温度变化对探测器性能的影响及其原因。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 响应电压及噪声信号

通过对长波焦平面探测器的性能测试,计算得到了不同工作温度下探测器的响应电压( $V_s$ )及噪声信号( $V_n$ ),测试结果如图 2 所示,为在 70~110 K 不同工作温度下响应电压及噪声信号随工作温度( $T$ )的变化。

由图 2 可知,随着工作温度的升高,长波焦平面探测器的响应电压逐渐降低;另外噪声信号则随工作温度的升高而增大。在 70~110 K 的温度范围内,由于探测器截止波长随温度升高而变短,导致材料吸收的光子辐射减小,从而导致响应电压减小,同时量子效率等也是响应电压减小的原因之一。工作温度的提升加剧了载流子的热运动,材料晶格振

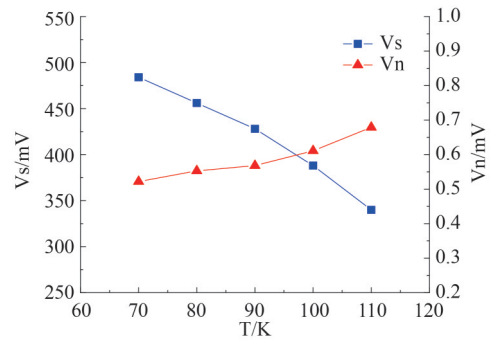


图 2 响应电压及噪声信号随工作温度的变化

Fig. 2 Variation of voltage response signal and noise signal with operating temperature

动也相应增加,另外探测器工作温度的增加会引起光敏元吸收背景辐射时存在起伏,引起探测器温度噪声的增加。

式(4)为普朗克黑体辐射粒子数公式,由式(4)可进一步计算出探测器响应电压( $V_s$ )随工作温度的变化关系。

$$N(\lambda) = 2\pi hc/\lambda^4 (e^{hc/\lambda K_b T_b} - 1) \quad (4)$$

其中  $N$  为黑体辐射粒子数密度,单位为(个 $\cdot\text{cm}^2/(\mu\text{m}\cdot\text{s})$ ),  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空光速,  $\lambda$  为波长,  $K_b$  为玻尔兹曼常数,  $T_b$  为黑体温度。

通过对式(4)在响应响应光谱范围内积分即可得到该光谱范围内总的光子数,为了避免读出电路及测试系统带来的误差,文中采用两个不同黑体辐射背景( $T_1, T_2$ )对探测器性能进行测试计算,以此来表征探测器的相关性能参数。将两个不同背景下得到的总光子数作差为  $\Delta N_\lambda$ ;而在对应积分时间  $t_{in}$  内辐射到探测器光敏元上的光子数(Photos)为:

$$\text{Photos} = \Delta N_\lambda * A^2 * t_{in} / (4 * F^2) \quad (5)$$

其中  $A$  为探测器光敏元面积( $\text{cm}^2$ ),  $F$  为探测器光学系统的  $F\#$  数,为探测器光学系统焦距与光学窗口直径的比值。

$$Q = \text{Photos} * \eta * q \quad (6)$$

$$V_s = Q/C \quad (7)$$

其中  $Q$  为辐射的探测器的光子所产生的电荷总量,  $\eta$  为量子效率,  $q$  为电子电量,  $V_s$  为探测器响应电压,  $C$  为电容,表征读出电路的电荷处理能力。由式(4)~(7)可计算出探测器响应电压,图 3 所给出的是量子效率为 1 时响应电压与工作温度的关系。

由图 3 所示,在理想情况下探测器响应电压随工作温度的升高而降低,而实验结果也与之相对应,工作温度的升高会导致探测器截止波长变短,

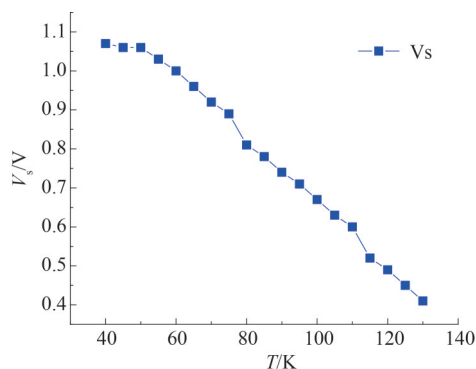


图3 响应电压随工作温度的变化关系

Fig. 3 The relationship between the output response voltage and the operating temperature

从而引起探测器接收到的目标辐射减少,进而导致探测器响应电压降低。

### 3.2 NETD和有效像元率

NETD即噪声等效温差,表示噪声响应信号与目标温差产生的电压信号相等时,该温差的值。NETD表征了探测器对目标温度变化的灵敏度,NETD越小,探测器能够探测的温差越小,探测器灵敏度越高。NETD可通过目标温差 $\Delta T$ 与信噪比的比值计算得到,即式(8),实验中通过测试并计算得到了不同工作温度下长波焦平面探测器的NETD,并绘出了NETD随工作温度变化的趋势图,如图4所示。

$$\text{NETD} = \Delta T / (V_s / V_n) \quad (8)$$

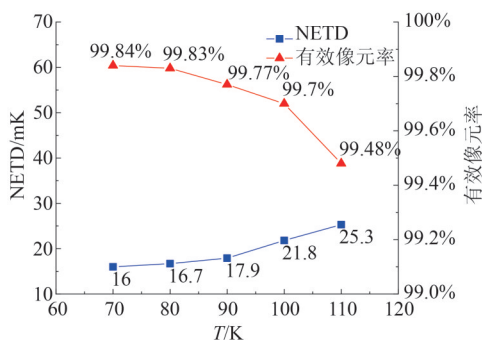


图4 NETD和有效像元率随工作温度的变化

Fig. 4 NETD and operability change with operating temperature

由图4知,随着探测器工作温度的提高,暗电流及 $1/f$ 噪声的增加,NETD也随之变大,尤其在80 K以后,NETD随工作温度的升高增加更明显,NETD与工作温度的变化关系与理论公式相符。具体来看从70 K到80 K时,NETD变化尚不明显,由16.0

mK增加到16.7 mK,仅增加了4.4%;而从80 K到110 K,NETD由16.7 mK增加到25.3 mK,增加了约51.5%。但是在实验范围内,焦平面探测器的NETD均在30 mK以内,探测器的温度灵敏度较好,探测器性能依旧能够满足应用需求。从NETD来看,所制备的p-on-n长波碲镉汞焦平面探测器在高温工作条件下具有较高的温度灵敏度,进一步验证了该结构应用于高温器件的可能性与优势。

从图4的有效像元率随工作温度变化趋势来看,在实验中,焦平面探测器的有效像元率随着工作温度的升高而有所下降。工作温度由70 K升高到110 K时,有效像元率下降了0.36%,说明盲元增加了将近1180个。导致盲元增加的原因主要是高温条件下,截止波长变短导致部分像元响应信号过小, $1/f$ 噪声及材料缺陷等导致部分像元异常而成为盲元。从数据上来看,110 K下的有效像元率达99.48%,依然可以提供正常的器件性能,在该种工作温度下,所制备的p-on-n长波焦平面探测器依旧可以满足应用需求。

### 3.3 暗电流及量子效率

为了研究高温工作条件下器件暗电流的变化,根据Rule07<sup>[15]</sup>经验公式绘制了长波焦平面探测器(截止波长为 $10.2\mu\text{m}$ )暗电流随工作温度变化的趋势图,并将实验测试所得器件暗电流与之相比较,结果如图5所示。由图5可知,根据Rule07经验公式所得的长波探测器暗电流随工作温度的提高而增大,尤其在工作温度高于100 K时暗电流急剧增大,暗电流已经增大到纳安量级以上。

实验分别测试了70 K到110 K不同工作温度下的暗电流,由图5的测试结果可以看出,实验结果与Rule07相近,变化趋势一致,从70 K到110 K的温度变化过程中,焦平面探测器暗电流由15 pA增加到了21.8 nA,暗电流呈指数增加。暗电流的增加主要由于本征载流子浓度增加引起的扩散电流增大而导致的,更高的器件工作温度需要进一步减小器件暗电流,降低高温下本征载流子对器件暗电流的影响。

另外在不同工作温度下测试计算得到探测器的量子效率随工作温度变化的结果,如图6所示,由测试结果可知,探测器的量子效率随工作温度的升高而相应降低,从70 K到110 K的工作温度变化中,量子效率下降了18.39%。量子效率的降低会导致探测器响应信号、探测率等减小,解决量子效率变

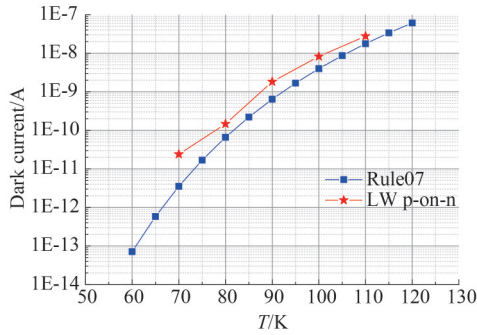


图5 焦平面探测器暗电流随工作温度的变化  
Fig. 5 Variation of dark current of focal plane detector with operating temperature

低也是高温器件发展的关键问题之一。

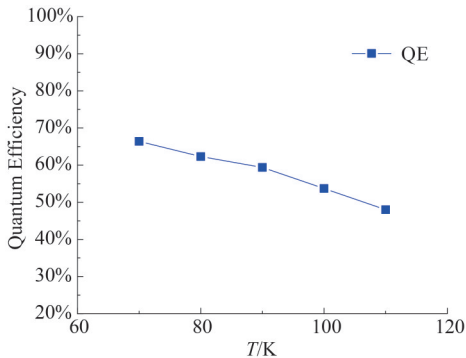


图6 焦平面探测器量子效率随工作温度的变化  
Fig. 6 The quantum efficiency of focal plane detector varies with operating temperature

### 3.4 峰值探测率及信号响应图

碲镉汞光伏探测器的峰值探测率  $D_p^*$  可由式<sup>[16]</sup>(9)表示:

$$D_p^* = \frac{\eta \lambda_p q}{hc} \left( \frac{1}{\sqrt{4k_B T / R_0 A + 2q^2 \eta \varphi_B}} \right), \quad (9)$$

其中  $\lambda_p$  为峰值波长,  $T$  为工作温度,  $R_0$  为零偏压下的动态阻抗,  $\varphi_B$  为光通量。由式9可知, 工作温度的升高会导致  $D_p^*$  的减小, 同时  $R_0 A$ 、量子效率等均会对器件探测率产生影响。

实验中对碲镉汞光伏探测器的峰值探测率  $D_p^*$  进行了测试分析, 在不同工作温度下的  $D_p^*$  测试结果如图7所示。由图7可知, 随着探测器工作温度的升高, 探测器的  $D_p^*$  逐渐降低, 从70 K到110 K的工作温度变化中,  $D_p^*$  由  $2.25 \times 10^{14} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$  降低到  $1.39 \times 10^{14} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ , 降低了38.2%。实际测试结果中工作温度的升高对  $D_p^*$  会产生显著的影响, 由式(9)及测试结果可知, 探测器工作温度的提高引起探测器量子效率降低, 是导致探测器  $D_p^*$  下降的

重要原因; 另外由于工作温度的升高使得器件暗电流增加, 导致  $R_0 A$  减小, 截止波长变短等也是导致  $D_p^*$  下降的直接原因。

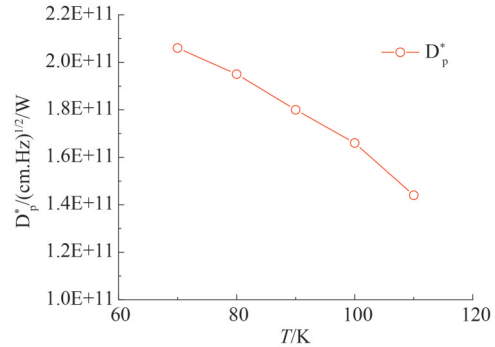


图7 焦平面探测器  $D_p^*$  随工作温度的变化  
Fig. 7  $D_p^*$  variation of focal plane detector with operating temperature

测试了在不同工作温度下长波 p-on-n 焦平面探测器的电压响应信号, 信号响应分布图如图8所示, 图中右下角的两个扎堆盲元簇为材料缺陷, 另外器件对角线位置存在工艺过程中器件表面受到的部分污染。从测试结果可以直观看出, 77 K 下焦平面探测器盲元少, 响应均匀, 当工作温度提升到110 K 时, 器件盲元有所增加, 且响应信号减小, 这与量子效率、探测率的下降有关。

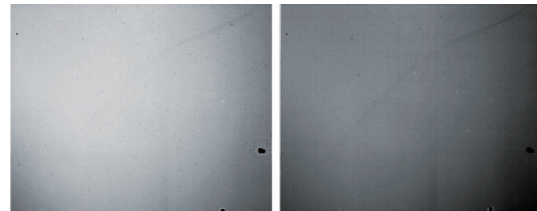


图8 不同工作温度下 p-on-n LWIR 焦平面信号响应图(左77 K, 右110 K)

Fig. 8 P-on-n LWIR focal plane signal response diagram under different operating temperatures (left 77 K, right 110 K)

## 4 结论

低温工作条件下, 碲镉汞红外探测器能够获得极佳的探测性能, 但在一定程度上会提高探测器成本, 增加器件功耗等, 而工作温度提高引起的暗电流增加会导致器件性能的相对降低。制备了 As 注入的长波 p-on-n 碲镉汞红外焦平面探测器, 并通过测试分析在不同工作温度下探测器的相关参数性能。通过研究分析, 在110 K 工作温度下, p-on-n 结构的长波碲镉汞焦平面探测器的 NETD、 $D_p^*$ 、有效

像元率以及暗电流等参数依旧可以维持在较好的水平,能够满足应用需求。p-on-n 结构的长波探测器可以实现在高温条件下稳定工作,继续提升器件工作温度需要进一步的工艺研究和技术提升,对提高探测器工作温度、降低器件成本及功耗、探测器的空间应用等具有重要意义。

## References

- [1] YANG Jian-Rong. *Material physics and technology of mercury cadmium telluride* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术. 国防工业出版社), 2012: 428-430.
- [2] Martyniuk P. HOT HgCdTe infrared detectors [C]// 2014 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD). IEEE, 2014.
- [3] Bubulac L O, Lo D S, Tennant W E, et al. P on n ion-implanted junctions in liquid phase epitaxy HgCdTe layers on CdTe substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, **50** (22): 1586-1588.
- [4] Baier N, Mollard L, Gravrand O, et al. MCT planar p-on-n LW and VLW IRFPAs [J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2013, **8704**: 87042P.
- [5] Mollard L, Bourgeois G, Lobre C, et al. p-on-n HgCdTe infrared focal-plane arrays: From short-wave to very-long-wave infrared [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43** (3): 802-807.
- [6] Reibel Y, Rouvie A, Nedelcu A, et al. Large format, small pixel pitch and hot detectors at SOFRADIR [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013, **8896**(2): 265-269.
- [7] ZHOU Lian-Jun, HAN Fu-Zhong, BAI Pi-Ji, et al. Review of HOT MW infrared detector using MCT technology [J]. *Infrared Technology* (周连军, 韩福忠, 白丕绩, 等. 高温碲镉汞中波红外探测器的国内外进展. 红外技术), 2017, **39**(2): 116-124.
- [8] Castelein P, Baier N, Gravrand O, et al. Latest developments in the p-on-n HgCdTe architecture at DEFIR [C]// *Infrared Technology and Applications XL*. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [9] AIM Infrarot-Module GmbH. HiPIR-1280M-MCT MWIR 1280×1024 15μm Pitch IDCA [M/OL] [2019-03-09]. [http://www.aim-ir.com/fileadmin/files/Data\\_Sheets\\_Security/Modules/02\\_MWIR\\_IDCA/HiPIR\\_1280M/2018\\_AIM\\_datenblatt\\_A4\\_HiPIR-1280M\\_engl.pdf](http://www.aim-ir.com/fileadmin/files/Data_Sheets_Security/Modules/02_MWIR_IDCA/HiPIR_1280M/2018_AIM_datenblatt_A4_HiPIR-1280M_engl.pdf).
- [10] AIM Infrarot-Module GmbH. HiPIR-Engine HOT MCT 1024×768 10μm PITCH IR ENGINE [M/OL] [2019-03-09]. [http://www.aim-ir.com/fileadmin/files/Data\\_Sheets\\_Security/Modules/01\\_Hot\\_Cube/2018\\_AIM\\_datenblatt\\_A4\\_HOT-MCT-1024\\_engl.pdf](http://www.aim-ir.com/fileadmin/files/Data_Sheets_Security/Modules/01_Hot_Cube/2018_AIM_datenblatt_A4_HOT-MCT-1024_engl.pdf).
- [11] Figgemeier H, Hanna S, Eich D, et al. State of the art of AIM LWIR and VLWIR MCT 2D focal plane detector arrays for higher operating temperatures [C]// *Spie Defense + Security*. 2016.
- [12] Figgemeier H, Hanna S, Eich D, et al. State-of-the-art MCT photodiodes for cutting-edge sensor applications by AIM [C]// *SPIE Defense + Security*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2017.
- [13] Hansen G L, Schmit J L, Casselman T N. Energy gap versus alloy composition and temperature in Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, **53** (10): 7099-7101.
- [14] Rubaldo L, Brunner A, Guinedor P, et al. Recent advances in Sofradir IR on II-VI photodetectors for HOT applications [C]// *Quantum Sensing & Nano Electronics & Photonics XIII*. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [15] Tennant W E, Lee D, Zandian M, et al. MBE HgCdTe technology: A very general solution to IR detection, described by rule 07, a very convenient heuristic [J]. *J. Electron. Mater.*, 2008, **37**(9): 1406-1410.
- [16] CHEN Bo-Liang, LI Xiang-Yang. *Space infrared imaging detector* [M]. Beijing: Science Press (陈伯良, 李向阳. 航天红外成像探测器. 北京: 科学出版社), 2016, **7**: 50-51.