

高工作温度 p-on-n 中波碲镉汞红外焦平面器件研究

杨超伟, 赵 鹏, 黄 伟, 秦 强, 何天应, 李红福, 浦同俊, 刘艳珍, 熊伯俊, 李立华*

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘要: As 注入掺杂的 p-on-n 结构碲镉汞红外探测器件具有少子寿命长、暗电流低、 R_0A 值高等优点, 是高温器件研究的重要技术路线之一。针对阵列规模 640×512 、像元中心距 $15 \mu\text{m}$ 的 As 掺杂工艺制备的 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件, 测试了不同工作温度下的性能和暗电流。研究表明, 在 80 K 工作温度下, 器件响应表现出高响应均匀性, 有效像元率达 99.98%; 随着工作温度升高, 器件盲元增多, 当工作温度为 150 K 和 180 K 时, 有效像元率降低至 99.92% 和 99.32%。由于对器件扩散电流更好的抑制, 器件在 160~200 K 温度范围内的暗电流低于 Rule-07。并且当工作温度在 150~180 K 时 (300 K 的背景下), 器件具有较好的信噪比, 极大程度地体现了高温工作的可行性。

关键词: 高工作温度; 碲镉汞; p-on-n; As 掺杂

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220150

Research on high operating temperature p-on-n medium wave mercury cadmium telluride infrared focal plane device

Yang Chaowei, Zhao Peng, Huang Wei, Qin Qiang, He Tianying, Li Hongfu,
Pu Tongjun, Liu Yanzhen, Xiong Bojun, Li Lihua*

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The p-on-n HgCdTe infrared detector with As ion implantation is an important technology development route for high operating temperature devices, owing to long minority carrier life, low dark current, high R_0A , etc. Focus on 640×512 , $15 \mu\text{m}$ pitch mid-wavelength infrared HgCdTe focal plane arrays (FPA) devices prepared by As ion implantation and doping, and analysis the performance and dark current under different temperature. The results indicate that the FPA device shows high uniform responsivity and 99.98% operability under 80 K. The number of bad pixels increase with increasing of operating temperature, and the operability decreases to 99.92% and 99.32% under 150 K and 180 K, respectively. Owing to suppression of diffusion current, the dark currents of this device operating within 160-200 K are better than the Rule-07. In addition, for a 300 K background temperature, when working at 150-180 K, the device shows high signal-to-noise ratio, which shows the feasibility of high operating temperature detectors.

Key words: high operating temperature; HgCdTe; p-on-n; As doping

收稿日期: 2022-03-26; 修订日期: 2022-04-15

作者简介: 杨超伟, 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为红外半导体器件。

通讯作者: 李立华, 男, 正高级工程师, 硕士, 主要研究方向为红外探测器总体技术及芯片制备。

0 引言

当前,在新军事变革的推动下,制备大面阵、多光谱、高性能的第三代焦平面红外探测器成为了未来光电子器件发展的重要方向,对红外探测器组件提出了轻量、低功耗、高分辨、低噪声及高可靠性等更高的要求。碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) 材料具有带隙可调,光吸收率高,响应光谱覆盖短波、中波、长波及甚长波波段的优点^[1],一直是红外探测材料研究的重点。高工作温度碲镉汞红外探测器具有降低系统功耗、减小系统尺寸和重量、增加系统寿命等优点,可满足精确制导、单兵及无人平台光电系统、告警侦察等领域对高可靠性、高性能的低功耗焦平面探测器的需求。

1985 年, Elliott 等首次提出了高工作温度红外光子器件的概念; 1999 年, Donald 等人提出了红外焦平面探测器低成本、高性能的发展思路^[2]。目前,国外 Sofradir、AIM、DAR、Selex、Teledyne 等公司已于近 15 年内先后报道了工作于 150~250 K 温度的中波以及 120~160 K 温度的长波碲镉汞红外焦平面探测器组件^[1, 3-7]; 国内武汉高德公司^[8]和 华北光电技术研究所^[9]已于近两年报道了工作于 120~130 K 温度的中波焦平面器件。至今,国内还未有 150 K 以上工作温度的碲镉汞焦平面器件相关报道。

文中采用 As 注入的方式构建 p-on-n 结构碲镉汞中波焦平面器件,研究了其性能在 80~200 K 温度范围内的变化情况,发现该器件在 80~180 K 温度范围内的有效像元率均达到 99.32% 及以上。

1 焦平面器件制备

p-on-n 结构中波碲镉汞焦平面器件通过光刻、离子注入、钝化、刻蚀、金属沉积、倒装互连等工艺制备而成,单元器件结构示意图如图 1 所示。其工艺流程简述如下: 利用液相外延法 (LPE) 原位掺 In 制备的 n 型碲镉汞吸收层,控制其载流子浓度在 $5 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 范围; 在碲镉汞材料表面通过光刻获得 640×512 阵列、中心距为 $15 \mu\text{m}$ 的图形; 使用离子注入工艺将计量为 $8 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 As 注入到材料中,注入能量为 300~400 keV,通过两步退火法^[10-12]进行 As 离子的扩散激活以及电学参数的修复; 再利用磁控溅射法在材料表面沉积 CdTe 和 ZnS 双层钝化层; 然后通过光刻和湿法腐蚀工艺制备电极接触孔,

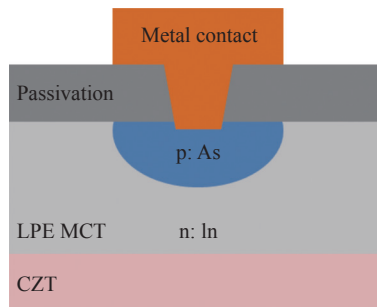


图 1 碲镉汞 p-on-n 器件结构截面示意图

Fig.1 Cross-sectionals view of HgCdTe p-on-n device

并沉积 Cr/Au/Pt/Au 金属电极; 最后将探测器芯片与读出电路倒装互连,获得像元尺寸 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 的 640×512 阵列 p-on-n 中波碲镉汞焦平面探测芯片组。

As 离子的注入与扩散激活是制备碲镉汞 p-on-n 结的重要步骤。为了探究 As 离子注入后 As 离子的扩散与激活特性,通过二次离子质谱仪测试了器件在退火前后的 As 离子分布情况,如图 2 所示。根据 Bubulac 等的理论,As 离子在碲镉汞材料中的热扩散可分为四种途径: As 通过缺陷辅助扩散; As 从占据 Te 位进行扩散; As 从占据汞空位进行扩散; As 从材料内位错扩散。经过高温汞饱和退火 ($420 \text{ }^\circ\text{C}$),该温度下 As 的扩散主要呈现以占据 Te 位进行扩散的激活过程,As 扩散的宽度显著增加,并形成所需要的 p 型区。

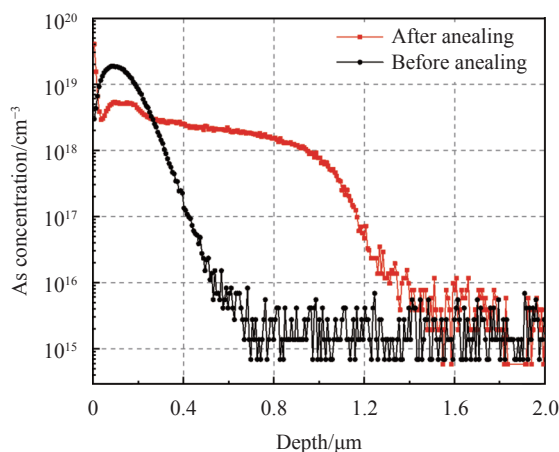


图 2 As 离子注入退火前 (黑色曲线) 和退火后 (红色曲线) 的浓度分布曲线
Fig.2 SIMS As concentration profiles before (black line) and after (red line) Hg annealing

2 焦平面器件低温性能

在 80 K 温度下,测试器件的 $I-V$ 特性如图 3 所示,器件表现出显著的 p-n 结二极管整流特性。另

外,通过焦平面光谱测试系统测试了器件的光谱响应曲线,如图 4 所示。

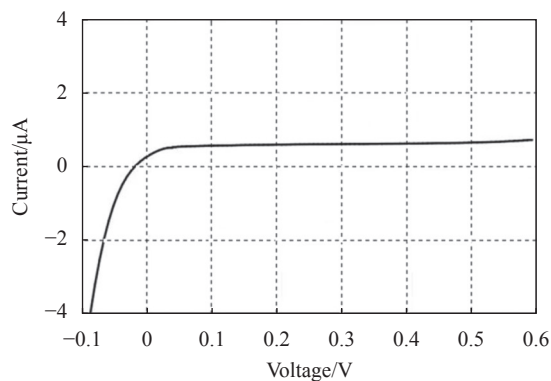


图 3 碲镉汞 p-on-n 结 I - V 特性曲线

Fig.3 I - V curve characteristics of HgCdTe p-on-n device

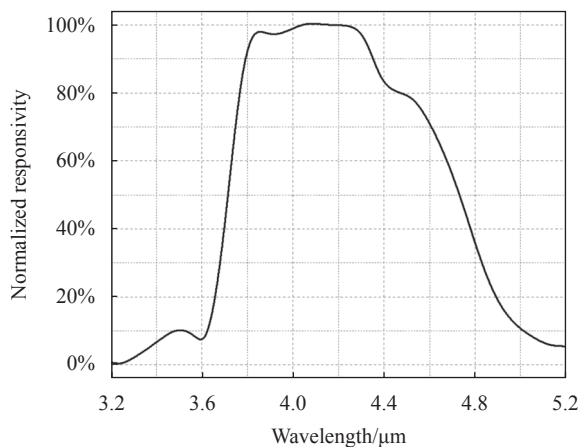


图 4 p-on-n 碲镉汞探测器芯片红外光谱曲线

Fig.4 Infrared spectrum curve of p-on-n HgCdTe device

在 80 K 工作温度、303 K 黑体辐射温度下,测试了器件焦平面性能,如图 5 所示。信号响应图表明器件的响应信号均匀,有效像元率达 99.98%。噪声等效

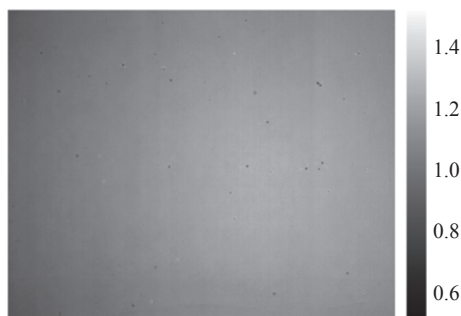


图 5 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件的信号响应图

Fig.5 Signal response diagram of p-on-n MWIR HgCdTe focal plane device

温差 (NETD) 约为 11.5 mK,如图 6 所示,NETD 半峰宽约 2.5 mK,进一步表明了器件的响应均匀性。

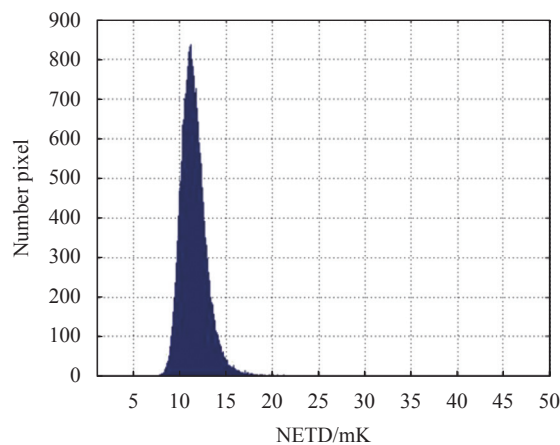


图 6 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件的 NETD 直方图

Fig.6 NETD histogram of MWIR p-on-n HgCdTe focal plane device

3 焦平面器件高温性能

将 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件封装于变温杜瓦中,测试其在 80~200 K 温度下的性能。如图 7 所示,器件的 NETD 由 11.5 mK 变化至 25.5 mK,其中,当温度达到 150 K 后,NETD 急剧增大。这是由于随着工作温度的升高,暗电流增大, $1/f$ 噪声逐渐增加,并且器件中材料的位错、汞空位等缺陷引起的噪声,以及材料的厚度和缺陷不均匀性引起的响应不均匀性显著增加,导致盲元增多。图 8 给出了 80、120、150、180 K 温度下器件的盲元分布图,有效像元率分别为

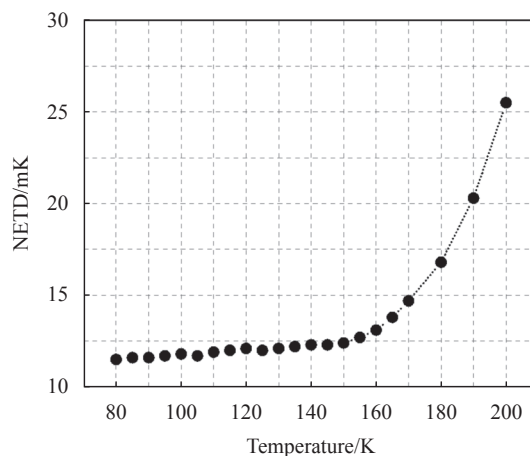


图 7 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件在 80~200 K 温度范围的 NETD

Fig.7 NETD of p-on-n MWIR HgCdTe focal plane device from 80 K to 200 K

99.98%、99.97%、99.92%、99.32%，盲元的增多也意味着有效像元率下降(如图 9 所示)。当工作温度为 150 K 时，器件盲元开始增多，有效像元率逐渐降低，然而器件在 180 K 温度下的有效像元率仍然可以达到 99.32%。器件性能随温度变化极易产生波动也说明器件现有的品质因子有待进一步提高，关键工艺有待进一步优化，从而保证 p-on-n 碲镉汞焦平面探测芯片性能随温度变化保持相对稳定。

此外，对中波器件的暗电流进行了评估，如图 10(a) 所示，器件在 150~200 K 工作温度之间暗电流的变化(图中红线为昆明物理研究所器件暗电流)接近 Rule-07 的水平，150 K 下(截止波长 4.51 μm)

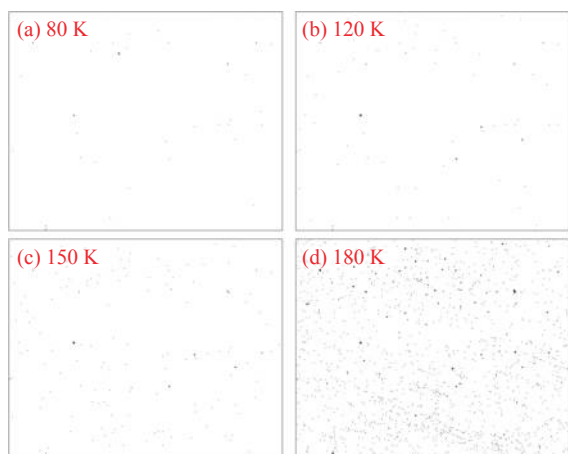


图 8 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件在 80~180 K 温度范围的盲元分布图

Fig.8 Blind element distribution of MWIR HgCdTe p-on-n focal plane device from 80 K to 180 K

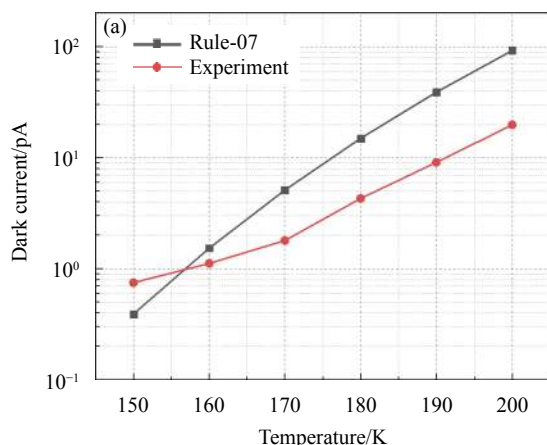


图 10 150~200 K 工作温度下器件暗电流 (a) 和不同黑体辐射背景温度下光电流与器件暗电流对比关系图 (b)

Fig.10 Dark current of the device operating within 150-200 K (a) and the comparison of dark current operating under 150 K and photocurrent of blackbody at different temperatures (b)

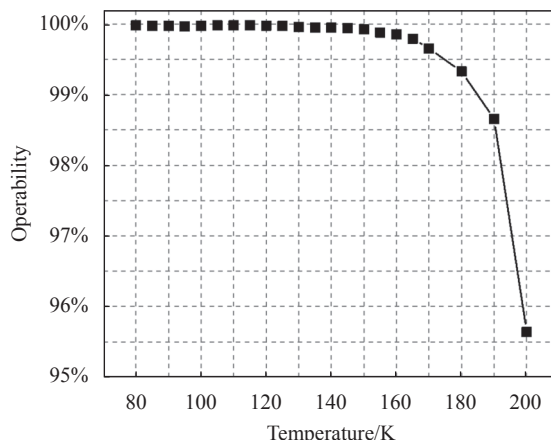
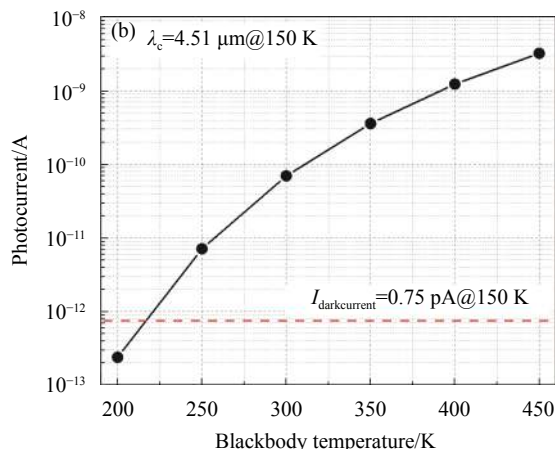


图 9 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件在 80~200 K 温度范围的有效像元率
Fig.9 Array operability of MWIR HgCdTe p-on-n focal plane device from 80 K to 200 K

器件暗电流为 0.75 pA。从图中还可以发现，由于 Rule-07 暗电流模型是以扩散电流为主导机制的模型，而扩散电流与温度成正相关的关系，因此，随着温度的不断降低，Rule-07 模型得到的暗电流会不断减小。对于实际的器件来说，随着温度的降低，扩散电流占据主导地位开始减小，产生复合电流，隧穿电流和表面漏电流等成分开始凸现出来^[13-14]，而 Rule-07 模型仅考虑了扩散电流^[15-16]，但实际的器件会在一定程度上的产生复合电流、隧穿电流和表面漏电流等暗电流，因此，实际器件的暗电流在低温时表现出来的暗电流值与 Rule-07 的值相比差异变小，甚至出现比 Rule-07 的电流值大的情况。此外，随着温度的升高，扩散电流会占据主导，掩盖掉其他暗电流机制



成分,而可能由于制备得到的器件的扩散电流抑制的较小,因此,相比 Rule-07 更小。

图 10(b) 所示为不同黑体背景温度下光电流 ($F/2$, 波长 3.71~4.51 μm , 量子效率 65%) 与器件暗电流对比关系。可以看出,工作温度在 150 K、低温背景 250 K 时,器件仍具有较好的信噪比。此外,从图 11 中可以看出,当工作温度在 150~180 K 之间 (300 K 的背景下),器件都具有较好的信噪比。

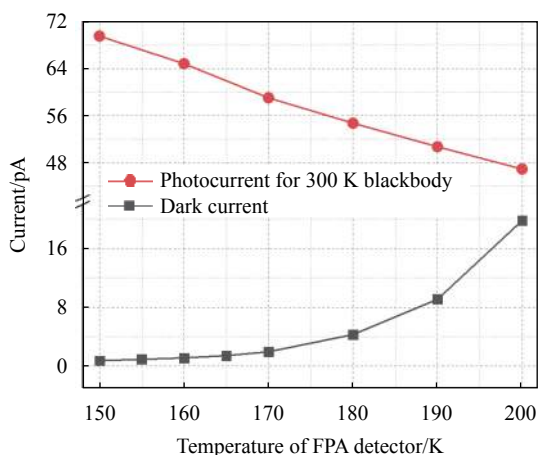


图 11 器件在 150~200 K 工作温度下的暗电流和 300 K 黑体下的光电流

Fig.11 Dark current and photocurrent for 300 K blackbody of the device operating within 150-200 K

4 结 论

As 注入掺杂 p-on-n 碲镉汞技术是实现高工作温度红外焦平面器件的重要技术路线。文中通过研究 p-on-n 中波碲镉汞器件在不同工作温度下的性能指标,发现随着温度升高,NETD 逐渐增加,有效像元率逐渐减小。在 80~180 K 工作温度范围内,器件有效像元率均可达到 99.32% 及以上。当工作温度在 150~180 K 时 (300 K 的背景下),器件都具有较好的信噪比,极大程度地体现了高温工作的可行性。

参考文献:

[1] Rogalsk A, Martyniuk P, Kopytko M, et al. Trends in performance limits of the HOT infrared photodetectors [J]. *Appl Sci*, 2021, 11(2): 501.
 [2] Ashley T, Elliott C. Non-equilibrium devices for infrared detection [J]. *Electron Lett*, 1985, 21(10): 451-452.

[3] Pillans L, Baker I, Mcewen R. Ultra-low power HOT MCT grown by MOVPE for handheld applications [C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9070: 407-418.
 [4] Schaake H, Kinch M, Strong R, et al. High operating temperature MWIR detectors [C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7608: 907-919.
 [5] Lutz H, Breiter R, Eich D, et al. High operating temperature IR-modules with small pitch for SWaP reduction and high performance applications [C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8185: 342-349.
 [6] Bllon-Lanfrey D, Tribolet P, Pistone F, et al. New IR detectors with small pixel pitch and high operating temperature [C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7854: 128-138.
 [7] Lee D, Carmody M, Piquette E, et al. High-operating temperature HgCdTe: A vision for the near future [J]. *J Electron Mater*, 2016, 45(9): 4587-4595.
 [8] Yang Z, Zhang B, Du Y, et al. A study of manufacture HgCdTe HOT MW infrared detector [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 204-208. (in Chinese)
 [9] Chen H, Shi C, Hu S, et al. Study on p-on-n technology of the MWIR HgCdTe for hot work [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 435-438. (in Chinese)
 [10] Mollard L, Destefanis G, Bourgeois G, et al. Status of p-on-n arsenic-implanted HgCdTe technologies [J]. *J Electron Mater*, 2011, 40(8): 1830-1839.
 [11] Shin S, Arias J, Zandian M, et al. Enhanced arsenic diffusion and activation in HgCdTe [J]. *J Electron Mater*, 1995, 24(5): 609-615.
 [12] Lobre C, Jalabert D, Vickridge I, et al. Quantitative damage depth profiles in arsenic implanted HgCdTe [J]. *Nucl Instrum Meth B*, 2013, 313: 76-80.
 [13] Du X, Savich G, Marozas B, et al. Suppression of lateral diffusion and surface leakage currents in nBn photodetectors using an inverted design [J]. *J Electron Mater*, 2018, 47(2): 1038-1044.
 [14] Chandra D, Goodwin M, Chen M, et al. Variation of arsenic diffusion coefficients in HgCdTe alloys with temperature and Hg pressure: Tuning of p on n double layer heterojunction diode properties [J]. *J Electron Mater*, 1995, 24(5): 599-608.
 [15] Tennant W, 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] Tennant W. "Rule-07" revisited: Still a good Heuristic predictor of p/n HgCdTe photodiode performance? [J]. *J Electron Mater*, 2010, 39(7): 1030-1035.