

p-on-n 长波、甚长波碲镉汞红外焦平面器件技术研究

李立华*, 熊伯俊, 杨超伟, 李雄军, 万志远, 赵鹏, 刘湘云
(昆明物理研究所, 昆明 650223)

摘要: As 注入掺杂的 p-on-n 结构器件具有暗电流小、 R_0A 值高、少子寿命长等优点, 是长波、甚长波碲镉汞红外焦平面器件发展的重要趋势。介绍了由昆明物理研究所研究制备的 77 K 温度下截止波长为 9.5 μm 、10.1 μm 和 71 K 下 14.97 μm 的 p-on-n 长波、甚长波碲镉汞红外焦平面器件, 对器件的响应率、NETD、暗电流及 R_0A 等性能参数进行测试分析。测试结果表明, 器件的有效像元率在 99.78%~99.9% 之间, 器件的 NETD 均小于 21 mK。实现了 p-on-n 长波、甚长波碲镉汞红外焦平面器件的有效制备。

关键词: 碲镉汞红外探测器; p-on-n 长波器件; 焦平面性能测试; NETD; 暗电流
中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Research on p-on-n LWIR and VLWIR HgCdTe infrared focal plane detectors technology

LI Li-Hua*, XIONG Bo-Jun, YANG Chao-Wei, LI Xiong-Jun, WAN Zhi-Yuan, ZHAO Peng, LIU Xiang-Yun
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223)

Abstract: The p-on-n structure doped with As implantation has the advantages of low dark current, high R_0A product, and long minority carrier lifetime, which is an important trend in the development of long-wavelength and very long-wavelength HgCdTe infrared focal plane detectors. P-on-n LWIR and VLWIR HgCdTe infrared focal plane detectors with cut-off wavelength of 9.5 μm and 10.1 μm at 77 K and 14.97 μm at 71 K fabricated by Kunming Institute of Physics are introduced. Test and analyze performance parameters such as the responsivity, NETD, dark current and R_0A of the detectors. The test results show that the operability of the detectors is between 99.78% and 99.9%, and the NETD of the detectors is less than 21 mK. The effective fabrication of p-on-n LWIR and VLWIR HgCdTe infrared focal plane detectors is realized.

Key words: HgCdTe infrared detector, p-on-n long wave detector, Focal plane performance tests, NETD, Dark current

引言

红外探测器的工作机理是基于器件吸收红外辐射后产生的光电效应, 红外辐射可以按波长分为短波, 中波, 长波, 甚长波^[1-2], 对应不同的波段, 可将红外探测器进行相应分类。不同波长的红外辐射对应不同的半导体禁带宽度, 波长越长禁带越窄, 通过调整碲镉汞材料的组分, 可使得碲镉汞材料的

禁带宽度由负禁带的 HgTe 连续变化到 1.65 eV 的 CdTe^[3], 理论上碲镉汞红外探测器可以实现覆盖整个红外波段的辐射探测。

基于遥感探测、航天航空、军事、工业等领域的应用需求, 以及碲镉汞材料的特殊性质, 目前长波、甚长波碲镉汞红外焦平面器件的发展应用越来越广泛, 更多关于长波、甚长波红外探测器的研究也越来越多。传统 n-on-p 结构中的汞空位的存在会

收稿日期: 2021-08-25, 修回日期: 2021-09-29

基金项目: 红外专项项目 (LZX20190302)

Foundation items: Infrared Special Project (LZX20190302)

作者简介 (Biography): 李立华 (1974-), 男, 云南大理人, 研究员高工, 硕士生导师, 主要从事红外探测器总体技术及芯片制备研究工作。E-mail: llh_email@163.com

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

Received date: 2021-08-25, Revised date: 2021-09-29

导致深能级的产生,从而引入Shockley-Read复合中心,降低电子寿命,导致器件暗电流增加。而p-on-n结构以外部砷注入掺杂实现,主要以带间复合为主,并且采用低掺杂浓度的n型吸收区,增加了少数载流子(空穴)的寿命和扩散长度,有利于抑制俄歇复合引入的扩散电流,因此p-on-n结构器件暗电流较低,相比n-on-p结构,p-on-n结构器件的暗电流可降低2个数量级左右。另外p-on-n结构吸收层(n区)中多数载流子(电子)迁移率较高,有利于降低串行电阻;p-on-n结构采用外部掺杂,材料晶格结构稳定,受温度影响较小。即p-on-n结构长的少子寿命有利于实现低暗电流,提高 R_0A ,降低串行电阻,可进一步提升探测器性能。

由于p-on-n结构具有少子寿命长、低暗电流、高迁移率等优点,在长波、甚长波器件、高温器件以及空间探测领域具有独特优势,是红外焦平面器件的重要发展方向。目前p-on-n结构的红外焦平面器件主要以美国Teledyne公司的双层异质结(double layer heterojunction, DLHJ)为基础^[4-5],基于组分异质结制备基础,法国SOFRADIR、CEA/LETI公司及实验室已经制备出了短波到甚长波波段的p-on-n焦平面器件^[6-12],器件暗电流低,响应率高;长波甚长波器件NETD均在30 mK以内,其中78 K工作温度下截止波长为15.1 μm 的甚长波器件暗电流为24.4 nA^[7],各类器件 R_0A 值符合07定律^[13],国内还鲜有针对砷注入掺杂p-on-n结构的长波、甚长波焦平面器件的报道。为了满足航空、军事等领域对高性能、高灵敏度红外探测器的应用需求,昆明物理研究所针对p-on-n结构的碲镉汞红外焦平面探测器进行了长期的研究及制备,目前已取得一定的研究成果。本文将介绍昆明物理研究所在p-on-n长波、甚长波红外焦平面器件技术研究的相关成果,主要基于不同截止波长的焦平面器件,对焦平面器件进行性能测试分析;通过对器件性能的分析,进一步掌握p-on-n结构长波、甚长波焦平面探测器的制备技术,对高性能三代碲镉汞焦平面探测器的制备具有重要意义。

1 p-on-n碲镉汞红外焦平面器件制备

到目前为止,国外已经有很多学者和研究机构针对p-on-n结构的碲镉汞红外探测器进行了大量研究^[5-12,14-19]。本文将介绍由昆明物理研究所制备的基于p-on-n结构的碲镉汞长波、甚长波红外焦平面器件,器件截止波长为9.5~14.97 μm 。主要介绍

在77 K温度下截止波长为9.5 μm 、10.1 μm 和71 K温度下14.97 μm 的碲镉汞焦平面器件测试方法及性能。通过焦平面器件性能测试,分析三个不同波长器件的暗电流、 R_0A 值的差异,分析影响不同波长器件性能差异的可能因素。通过测试得到器件的偏置电压-响应电压($V_{\text{Gpol}}-V_s$)曲线,分析不同波长焦平面器件的pn结反向特性;通过器件的响应率及噪声等效温差(NETD)、 R_0A 等性能参数对器件性能进行分析评估。

碲镉汞红外焦平面器件基于p-on-n结构,焦平面规格为640×512,像元中心距为25 μm 。碲镉汞材料通过富Te的LPE技术在CdZnTe衬底上生长得到,通过原位掺In实现吸收层的n型掺杂,掺杂浓度在 $5 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 左右,p型掺杂则通过砷离子注入后退火激活实现。对于砷注入p-on-n结构的碲镉汞红外探测器,要实现p型掺杂,必须经过两步退火。首先通过高温富汞退火激活砷离子并修复一定的注入损伤,其次经过低温退火调整汞空位浓度,恢复吸收层n掺杂。

2 红外焦平面器件性能测试

红外焦平面器件的性能与探测器芯片及读出电路密切相关,在焦平面器件中,评价分析焦平面器件的特性参数有很多,主要包括响应率、噪声、有效像元率、NETD等。对响应率、探测率、NETD等参数的测试可采用两种不同温度黑体辐射条件下的电压响应测试,测试得到两个温度黑体辐射下的电压响应信号后通过计算得到相应的性能参数测试结果。

2.1 测试参数设置

在进行红外焦平面器件性能测试时,需要对不同器件的测试系统进行参数设置,以使输出信号达到半阱要求,从而得到准确良好的测试结果,表1给出读出电路(ROIC)的相关参数指标,三个器件分别为Set 1(9.5 μm)、Set 2(10.1 μm)、Set 3(14.97 μm),相应测试系统的参数设置如表2所示。

2.2 $V_{\text{Gpol}}-V_s$ 测试

通过配置好的测试系统对三个不同波长的焦平面器件进行性能测试,在293 K黑体辐射下测试了三个器件的 $V_{\text{Gpol}}-V_s$ 数据, V_{Gpol} 为偏置电压,测试输出电压信号 V_s 由读出电路积分得到,随后取平均值,测试结果如图1所示。 $V_{\text{Gpol}}-V_s$ 曲线与pn结特性相对应,由图1测试结果来看,三个器件的反向特性良好,大约在200~300 mV之间不等,器件pn结特

表1 读出电路参数

Table 1 ROIC parameters

参数	读出电路
工艺	CMOS 0.35 μm
面阵尺寸	640 \times 512
像元间距	25 μm
输入极性	p-on-n
电容/电荷存储能力	4.17 pC/26 Me ⁻
读出模式	快摄模式、ITR
帧频	\leq 200 Hz
动态范围	3.2 V

表2 焦平面器件参数及测试参数设置

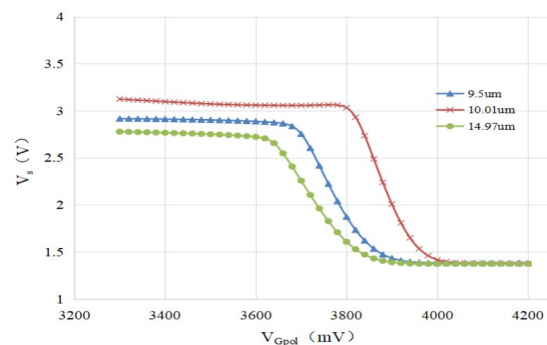
Table 2 focal plane device parameters and test parameter settings

参数	器件		
	Set 1	Set 2	Set 3
截止波长	9.5 μm	10.1 μm	14.97 μm
工作温度	77 K	77 K	71 K
视场角(FOV)	F2	F2	F2
电容值	4.17 pC	4.17 pC	4.17 pC

性正常。

2.3 响应率测试

针对以上三个红外焦平面器件,在77 K(Set 1、Set 2)和71 K(Set 3)的工作温度下,通过焦平面测试系统,系统配置参数由表2给出,对三个焦平面器件进行性能测试,响应率通过在293 K和303 K黑体辐射下测试计算得到。其中Set 1~Set 3波长的焦平面器件的响应率、盲元分布情况如图2所示(从左至

图1 Set 1~Set 3三个器件的 V_{Gpol} - V_s 曲线Fig. 1 V_{Gpol} - V_s curves of three devices in Set 1~Set 3

右依次为Set 1~Set 3)。

由图2的测试结果可以看出,Set 1~Set 3三个焦平面器件的信号响应均匀,器件不存在明显的缺陷,焦平面性能满足应用需求。同时,从盲元分布图来看,器件盲元分布随机,占比小,尤其值得一提的是,甚长波器件Set 3的有效像元率为99.82%,响应均匀。表3给出了所有器件的相关测试结果,从表3中可知甚长波14.97 μm 器件的平均峰值探测率为 $1.20\text{e}+11$ (cm. Hz^{1/2})/w。

表3 三个不同波长焦平面器件测试结果

Table 3 Test results of three focal plane devices with different wavelengths

参数	器件		
	Set 1	Set 2	Set 3
有效像元率	99.90%	99.78%	99.82%
峰值探测率	$2.10\text{e}+11$ (cm. Hz ^{1/2})/w	$1.61\text{e}+11$ (cm. Hz ^{1/2})/w	$1.20\text{e}+11$ (cm. Hz ^{1/2})/w

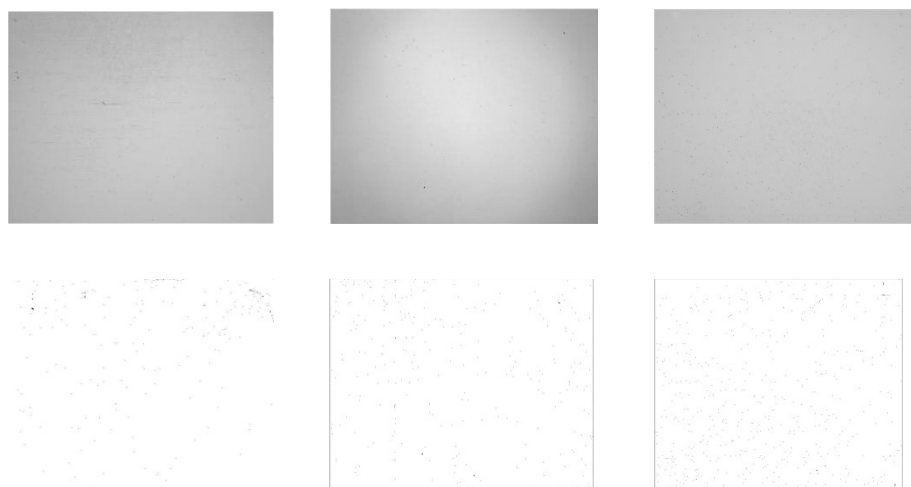


图2 Set 1~Set 3焦平面器件响应率(上)及盲元分布图(下):Set 1 Set 2 Set 3

Fig. 2 Set 1~Set 3 focal plane device responsivity (top) and blind pixel distribution map (bottom)

2.4 噪声和NETD测试分析

噪声表征了探测器对微弱信号进行探测的能力,噪声越小,探测器能探测到最小信号也就越小,说明器件性能越好,探测能力强。焦平面器件工作过程中,产生噪声的因素较多,噪声信号对器件的干扰不容忽视。NETD是评价红外探测系统性能优劣的重要参数,它表示探测器的热灵敏度,NETD越小,热灵敏度越高。

为了分析器件探测微弱信号的能力,同时评估焦平面器件性能,对以上提到的三个焦平面器件 Set 1~Set 3进行了噪声及NETD测试及计算,测试结果如图3和图4(a)~(c)所示。由测试结果可知,三个器件噪声分布均匀,表4列出了对应的平均噪声

值,相比之下 Set 2 噪声稍大,但NETD较优为18.2 mK,器件性能依旧稳定可靠。从三个器件的NETD直方图来看,三个焦平面器件的NETD直方图分布对称,不同器件之间仅有微小差异,三个器件的NETD值如表4所示,值得一提的是甚长波器件 Set 3的NETD为20.2 mK,满足高性能器件制备需求;另外在71 K工作温度下,Set 3器件的成像图如图4(d)所示,红外图像均匀,器件性能较优。

2.5 暗电流和R₀A测试分析

R₀A为光伏红外探测器零偏压时的动态电阻R₀与光敏元面积A的乘积,该参数消除了光敏元的影响,适合作为红外探测器的优值因子进而对器件性能进行表征。R₀A由式(1)给出^[20]:

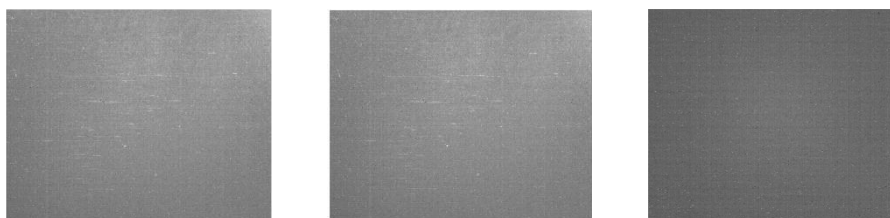


图3 Set 1~Set 3的噪声信号分布图(从左至右依次为 Set 1~Set 3)

Fig. 3 The noise signal distribution diagram of Set 1~Set 3 (Set 1~Set 3 from left to right)

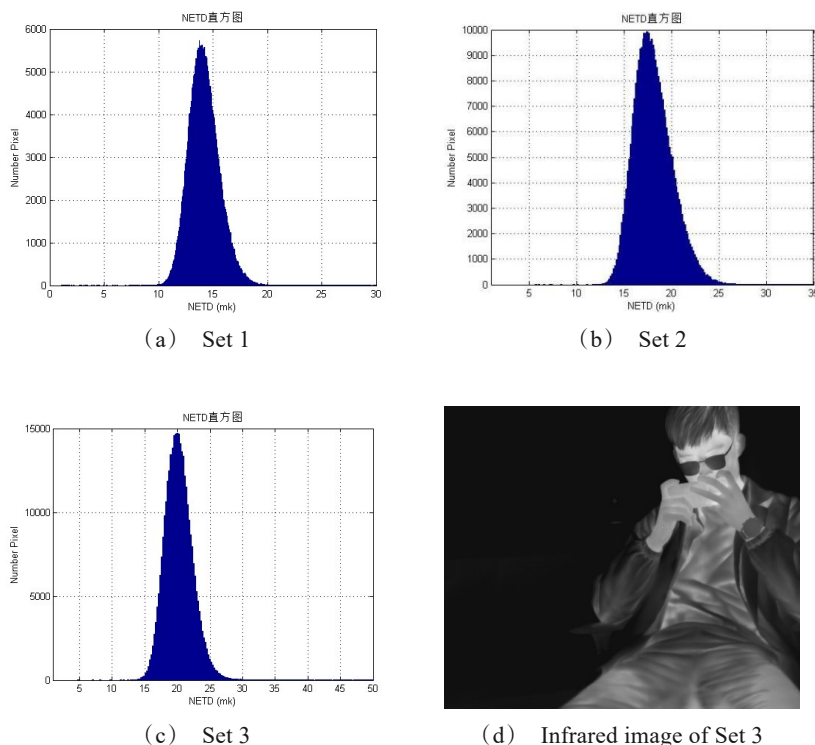


图4 Set 1~Set 3焦平面器件的NETD直方图及红外图像(Set 3)

Fig. 4 NETD histogram of focal plane devices in Set 1~Set 3 and Infrared image(Set 3)

$$R_0A = KT/qJ_0 (\Omega \cdot \text{cm}^2) \quad (1)$$

J_0 为暗电流密度, A 为有效像元面积, A 定义为像元间距的平方, K 为玻尔兹曼常数, T 为器件工作温度, 通过暗电流的测试结果可以计算出 R_0A 值。在 n-on-p 结构的探测器中, 汞空位缺陷引入大量复合中心, 会导致辅助隧道电流及产生-复合电流增大, 即器件暗电流增加。而砷注入的 p-on-n 结构器件, 主要以带间复合为主, 低浓度的 n 区易获得长的少数载流子寿命和扩散长度, 同时俄歇复合引入的扩散电流得到抑制, 暗电流主要以产生-复合电流为主, 因此相比 n-on-p 结构, p-on-n 结构器件的暗电流会更低, 相应的 R_0A 也会更高。

为了测试分析焦平面器件的暗电流及计算分析 R_0A 值的大小, 在 77 K (Set 1、Set 2) 和 71 K (Set 3) 的工作温度下, 对以上三个焦平面器件进行暗电流测试, 测试环境没有红外辐射的照射。三个器件的偏置电压均采用统一电压值, 测试时主要改变不同器件的积分时间来获得稳定准确的信号输出, 暗电流测试结果如表 4 所示, 通过测试得到的暗电流再由式 1 计算得到的 R_0A 值由表 4 列出。

表 4 三个不同波长焦平面器件测试结果

Table 4 Test results of three focal plane devices with different wavelengths

参数	器件		
	Set 1	Set 2	Set 3
截止波长	9.5 μm	10.1 μm	14.97 μm
暗电流	40.28 μA	58.8 μA	26.21 nA
NETD	15.2 mK	18.2 mK	20.2 mK
噪声	0.506 mV	0.527 mV	0.408 mV
有效像元率	99.90%	99.78%	99.82%
R_0A	1030.48 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	705.92 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	1.46 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)

图 5 是国外一些公司与实验室所研究制备的焦平面器件 R_0A 与截止波长的关系曲线, 图中包含了 n-on-p 与 p-on-n 结构的焦平面器件。由图 5 可知, 与 n-on-p 结构器件相比, p-on-n 结构器件的 R_0A 明显更高, 约高出两个数量级左右。由表 4 的测试及计算结果可以看出, 文中所提到的三个长波、甚长波焦平面器件, R_0A 值与国际先进水平接近, 并且 R_0A 与波长的对应关系与 07 定律相符。其中甚长波器件 Set 3 的 R_0A 为 1.46 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, 表明器件性能较优, 在甚长波波段, 制备出了较高 R_0A 的碲镉汞红外焦平面器件。

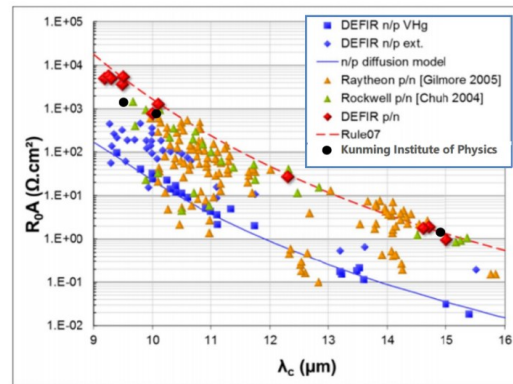


图 5 不同工艺下 R_0A 值与波长关系曲线

Fig. 5 The relationship between R_0A product and wavelength under different processes

3 总结

本文针对昆明物理研究所研发制备的三个不同截止波长的 p-on-n 长波、甚长波焦平面器件, 对焦平面器件进行性能参数测试分析。由测试分析结果显示, 器件表现出良好的 pn 结特性, 且响应均匀。其中器件噪声在合理范围内, NETD 满足器件应用需求; 另外, 针对不同波段的长波、甚长波焦平面器件, 通过测试及计算均得到低的暗电流以及高的 R_0A , 符合 p-on-n 结构优势特点, 接近国际水平, 其中截止波长为 14.97 μm 甚长波器件的 R_0A 为 1.46 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, 器件成像效果较优。研究分析结果表明, 昆明物理研究所具备自主研发制备 p-on-n 长波、甚长波碲镉汞红外焦平面器件, 器件有效像元率基本在 99.78% 以上, 性能良好, 制备技术稳定可靠, 对国内红外探测技术在军事、航天、遥感监测等领域的应用具有重要意义。

References

- [1] Zhou Shi-chun. Introduction to Advanced Infrared Opto-electronic Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2014, (周世春. 高级红外光电工程导论) [M]. 北京: 科学出版社, 2014
- [2] Shen Xue-chu. Optical properties of semiconductors [M]. Beijing: Science Press, 1992: 44-117, (沈学础. 半导体光学性质) [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 44-117
- [3] Yang Jian-rong. Material Physics and Technology of Mercury Cadmium Telluride [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.11: 11-29, (杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.11: 11-29
- [4] Tennant W E, Arias J M, Bajaj J. HgCdTe at Teledyne [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, 7298.
- [5] Arias J M, Pasko J G, Zandian M, et al. MBE HgCdTe heterostructure p-on-n planar infrared photodiodes [J]. Journal of Electronic Materials, 1993, 22(8): 1049-1053.

- [6] Mollard L, Destefanis G, Baier N, *et al.* Planar p-on-n HgCdTe FPAs by Arsenic Ion Implantation [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, **38**(8):1805-1813.
- [7] 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.
- [8] Mollard L, Destefanis G, Rothman J, *et al.* HgCdTe FPAs made by arsenic-ion implantation [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2008.
- [9] Bensussan P, Tribolet P, G Destéfanis, *et al.* Fifty years of successful MCT research and production in France [J]. *Proc SPIE*, 2009, **7298**:72982N-72982N-31.
- [10] Fieque B, Chorier P, Lamoure A, *et al.* Status of space activity and science detectors development at Sofradir [C]. // International Conference on Space Optics - ICSO 2018. 2019..
- [11] Reibel Y, Rouvie A, Nedelcu A, *et al.* Large format, small pixel pitch and hot detectors at SOFRADIR [C]. // Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications X. International Society for Optics and Photonics, 2013..
- [12] Baier N, Cervera C, Gravrand O. *et al.* Latest Developments in Long-Wavelength and Very-Long-Wavelength Infrared Detection with p-on-n HgCdTe [J]. *Journal of Elec Materi* 2015, **44**(9):1-7.
- [13] 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]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37**(9):1406-1410.
- [14] Dewames R, Maloney P, Billman C, *et al.* Electro-optical characteristics of a MWIR and LWIR planar heterostructure P+n HgCdTe photodiodes limited by intrinsic carrier recombination processes [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2011, **8012**(2):546-550.
- [15] Simingalam S, Vanmil B L, Chen Y, *et al.* Development and fabrication of extended short wavelength infrared HgCdTe sensors grown on CdTe/Si substrates by molecular beam epitaxy [J]. *Solid State Electronics*, 2014, 101 (nov.):90-94.
- [16] Wang C, Tobin S, Parodos T, *et al.* Investigation of HgCdTe p-n device structures grown by liquid-phase epitaxy [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**(6):1192-1196.
- [17] Rutkowski J, Madejczyk P, Gawron W, *et al.* Buried Long-Wavelength Infrared HgCdTe P-on-n Heterojunctions [C]. // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics AIP, 2005, **772**(1):1557.
- [18] Korotaev A G, Izhnin I I, Mynbaev K D, *et al.* Hall-effect studies of modification of HgCdTe surface properties with ion implantation and thermal annealing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, **393**:125721.
- [19] Izhnin I I, Mynbaev K D, Swiatek Z, *et al.* Direct comparison of the results of arsenic ion implantation in n- and p-type $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, **109**:103388.
- [20] Chen Bo-liang, Li Xiang-yang. Space infrared imaging detector [M]. Beijing: Science Press, 2016.7:12-63, (陈伯良,李向阳.航天红外成像探测器) [M].北京:科学出版社,2016.7:12-63