

## 〈材料与器件〉

# 320×256 锗基中波碲镉汞红外焦平面探测器研究

赵俊，杨玉林，李艳辉，杨春章，谭英，齐航，  
韩福忠，邢一山，王羽，王晓璇，姬荣斌，孔金丞

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要：**报道了分子束外延锗基中波碲镉汞薄膜材料以及 320×256 锗基中波碲镉汞红外焦平面探测器研究的初步结果。利用分子束外延技术基于 3 英寸锗衬底生长的中波碲镉汞薄膜材料，平均宏观缺陷密度低于  $200 \text{ cm}^{-2}$ ，平均半峰宽优于  $90 \text{ arcsec}$ ，平均腐蚀坑密度低于  $2.9 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ；采用标准的二代平面工艺制备的 320×256 锗基中波碲镉汞红外焦平面探测器，平均峰值探测率达到  $3.8 \times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，平均等效噪音温差优于  $17.3 \text{ mK}$ ，非均匀性优于 6.5%，有效像元率高于 99.7%。

**关键词：**分子束外延；锗基碲镉汞；红外焦平面探测器

中图分类号：TN215 文献标示码：A 文章编号：1001-8891(2014)06-0439-04

## Analysis of MW 320×256 IRFPA Detector Based on MCT/Ge

ZHAO Jun, YANG Yu-lin, LI Yan-hui, YANG Chun-zhang, TAN Ying, QI Hang, HAN Fu-zhong,  
XING Yi-shan, WANG Yu, WANG Xiao-xuan, JI Rong-bin, KONG Jin-cheng

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** MBE grown HgCdTe-on-Ge MW 320×256 IRFPA detector is investigated in this article. The macro-defect of 3 inch MW HgCdTe-on-Ge is lower than  $200 \text{ cm}^{-2}$ , the FWHM is lower than  $90 \text{ arcsec}$ , and the EPD is lower than  $2.9 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ . And the MW 320×256 IRFPA detector based on MCT/Ge by the second standard plant art is also introduced, with the  $D^*$  better than  $3.8 \times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ , NETD lower than  $17.3 \text{ mK}$ , the non-uniformity of respond lower than 6.5%, and the operability higher than 99.7%.

**Key words:** MBE, MCT/Ge, IRFPA

## 0 引言

碲镉汞 ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ) 具有量子效率高、响应速度快等特点<sup>[1-2]</sup>，而且通过改变镉组分 ( $x$ ) 能够使它的光电响应覆盖  $1\sim3 \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>、 $3\sim5 \mu\text{m}$ <sup>[4]</sup>、 $8\sim12 \mu\text{m}$ <sup>[5]</sup> 三个红外“大气窗口”以及  $18 \mu\text{m}$  以上甚长波红外波段<sup>[6]</sup>，因此，自碲镉汞被发现，就被用于红外探测器的研究。当前，用于红外焦平面探测器研制的碲镉汞材料主要以外延薄膜材料为主。

衬底对碲镉汞材料的外延生长至关重要。碲锌镉 ( $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ) 通过调整锌组分 ( $y$ ) 实现与碲镉汞的晶格匹配，是一种理想的衬底材料，但是，碲锌镉也存在一系列的不足，如大面积难于获得、生产成本高、与读出电路的热失配大等，难以满足百万像素以上规

模的红外焦平面探测器对碲镉汞材料的需求。

晶格匹配的碲锌镉衬底之外，用于外延碲镉汞薄膜材料的衬底还有砷化镓、锗、硅等<sup>[7]</sup>。砷化镓与碲化镉之间的晶格失配有 14%，同样极性的闪锌矿结构以及良好的热匹配使它成为碲镉汞常用的衬底材料。虽然大直径砷化镓衬底材料的成本逐渐降低，但与同样直径的锗、硅相比，价格仍然十分昂贵。近年来，在锗、硅衬底上外延碲镉汞材料是向大面积低成本红外焦平面器件发展的一个趋势<sup>[8-9]</sup>。

本文采用分子束外延技术基于 3 英寸锗衬底生长了中波碲镉汞薄膜材料，其宏观缺陷密度低于  $200 \text{ cm}^{-2}$ ，半峰宽优于  $90 \text{ arcsec}$ ，腐蚀坑密度低于  $2.9 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ；采用标准的二代平面工艺制备了 320×256 锗基中波碲镉汞红外焦平面探测器，其探测率达到

收稿日期：2014-01-15；修订日期：2014-04-29。

作者简介：赵俊（1980-），男，高级工程师，主要从事先进光电材料与器件方向研究。

基金项目：国家重大专项。

$3.8 \times 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ , 等效噪音温差优于 17.3 mK, 非均匀性优于 6.5%, 有效像元率高于 99.7%。

## 1 锗基中波碲镉汞材料

锗基中波碲镉汞薄膜材料基于法国 Riber 公司的 MBE 32P 型分子束外延系统完成生长制备, 使用外购 3 英寸 Epi-ready 级别 211 面锗 (Ge) 单晶圆片作为衬底。

锗衬底开封后, 在氮气氛围下, 采用铟 (In) 作为粘接剂, 在约 160°C 温度下, 粘于钼 (Mo) 衬底架表面, 传入分子束外延系统, 在反射式高能电子衍射 (RHEED) 系统监控下, 经约 600°C 温度 10 min 脱氧后, 在裂解砷 (As) 氛围下, 降温至约 300°C, 形成极性面; 待温度稳定后, 生长一层锌 (Zn) 层, 形成稳定的 211B 极性面; 生长一层约 6 μm 厚的碲化镉 (CdTe) 层作为缓冲层后, 直接生长一层约 8 μm 厚的碲镉汞层; 生长过程, 使用反射式高能电子衍射对表面进行监测, 如图 1 所示, 显示为二维生长; 使用红外测温仪 (Pyrometry) 进行温度监测, 如图 2 所示, 显示生长过程温度稳定。



图 1 二维结构碲镉汞反射式高能电子衍射图样

Fig.1 The RHEED picture of the 2D structure MCT

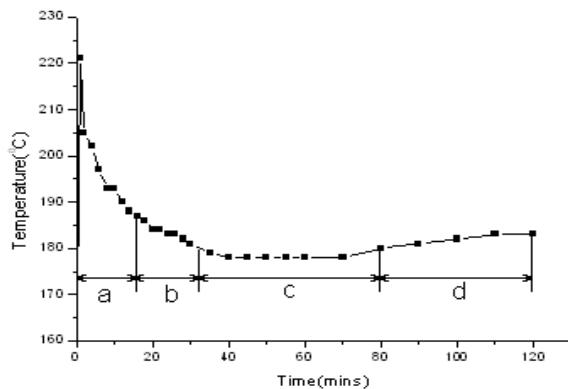


图 2 红外测温仪监测生长过程碲镉汞温度曲线

Fig.2 The temperature curve of MCT during growth by Pyrometry

利用傅里叶红外透射光谱, 获得锗基碲镉汞薄膜组分和厚度; 利用光学显微镜, 200 倍放大倍数, 选

取 9 个视场平均 (“十”型), 获得锗基碲镉汞薄膜表面宏观缺陷; 利用 X 射线衍射仪, 采用双晶回摆衍射方法, 测定锗基碲镉汞薄膜的半峰宽 (FWHM); 经 0.5% 溴 + 甲醇腐蚀液处理, 采用  $\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{KCrO}_7=80 \text{ mL}:10 \text{ mL}:20 \text{ mL}:8 \text{ g}$  溶液进行 EPD 腐蚀后, 使用光学显微镜, 1000 倍放大倍数, 选取 9 个视场平均 (“十”型), 获得锗基碲镉汞薄膜腐蚀坑密度 (EPD)。

## 2 锗基中波碲镉汞焦平面芯片

$320 \times 256$  锗基中波碲镉汞芯片采用标准的二代红外焦平面平面工艺制备。

锗基碲镉汞薄膜经过清洗、钝化、光刻、刻蚀、离子注入、热处理、电极化后形成光电二极管阵列, 与标准的读出电路通过铟柱倒装互连, 形成焦平面芯片, 如图 3 所示, 其中光电二极管阵列完成红外辐射到电信号的转换, 读出电路实现光电信号的积分读出。

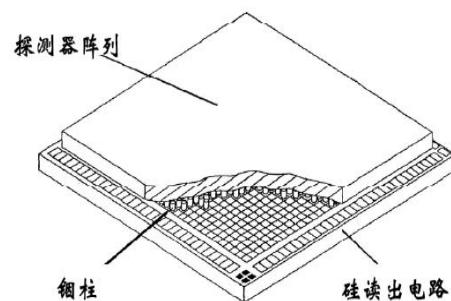


图 3 焦平面探测器芯片与硅读出电路铟柱互连结构

Fig.3 The interconnection structure of FPA detector chip and silicon readout circuit connected by indium column

采用面源黑体作为辐射源, 通过采集系统分别采集每个焦平面像元在 20°C 黑体辐照和 35°C 黑体辐照条件下的信号电压, 计算得到峰值探测率 ( $D^*$ ) 和噪音等效温差 (NETD), 通过软件统计得到平均峰值探测率 ( $D^*$ )、平均噪音等效温差 (NETD)、响应率不均匀性和有效像元率; 采用 1000°C 黑体, 通过分光光度计分光, 获得焦平面的响应光谱。

## 3 结果与讨论

### 3.1 锗基中波碲镉汞材料

#### 1) 表面形貌

如图 4 所示, 在 3 英寸 Ge (211) 上生长的  $\text{HgCdTe}/\text{CdTe}(211)\text{B}$ , 表面为镜面光亮; 在 200 倍显微镜下观察表面平整, 以 “十” 字形选取 9 个视场平

均得到表面宏观缺陷小于  $200\text{ cm}^{-2}$ 。



图 4 3 英寸锗基中波碲镉汞薄膜表面形貌

Fig.4 The morphology of 3 inch MW HgCdTe/Ge film

表面缺陷的尺寸主要集中在直径  $5\sim10\mu\text{m}$ , 约占到所有缺陷的约 90%, 剩余的 10% 主要以小于  $3\mu\text{m}$  的为主, 有极个别的缺陷超过  $30\mu\text{m}$ , 可能是来源于衬底表面的污染物。

如图 5 所示, 在 3 英寸 Ge (211) 上生长的 HgCdTe/CdTe(211)B, 在中心 2 英寸范围内的组分平均值为 0.300, 标准偏差为 0.003, 相对偏差为 1.0%; 厚度平均值为  $7.72\mu\text{m}$ , 厚度偏差为  $0.30\mu\text{m}$ , 相对偏差为 3.9%。

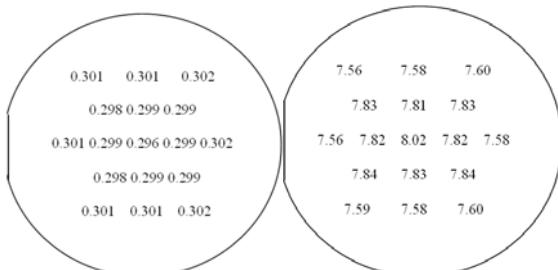


图 5 3 英寸锗基中波碲镉汞薄膜组分与厚度均匀性分布

Fig.5 The uniformity of  $x$  value and thickness on 3 inch MW HgCdTe/Ge film

## 2) 厚度和组分

在中心 2 英寸范围外, 组分偏高、厚度偏薄主要是由于衬底架四周辐射发射率不同, 导致衬底边缘区域温度略高于中心区域, 引起表面轻微缺汞 (Hg), 导致镉组分偏高, 生长速率偏低。

## 3) X 射线双晶衍射半峰宽

如图 6 所示, 在 3 英寸 Ge (211) 上生长的 HgCdTe/CdTe(211)B, 在中心 2 英寸范围内的半峰宽平均值为  $90.23\text{ arcsec}$ , 半峰宽偏差  $3.03\text{ arcsec}$ , 相对偏差为 3.3%。

在中心 2 英寸范围外, 半峰宽偏高主要是由于衬底架四周辐射发射率不同, 导致衬底边缘区域温度略高于中心区域, 引起表面轻微缺汞 (Hg), 晶格质量下降, 半峰宽偏高, 与组分、厚度的情况一致。

## 4) 位错腐蚀坑密度

在 Ge (211) 上生长的 HgCdTe/CdTe(211)B, 经

0.5% 溴 + 甲醇腐蚀液处理, 采用  $\text{H}_2\text{O:HCl:HNO}_3$ :  
 $\text{KCrO}_7=80\text{ mL:10 mL:20 mL:8 g}$  溶液进行 EPD 腐蚀后, 在 1000 倍显微镜下观察, 以“十”字形选取 9 个视场平均得到腐蚀坑密度陷小于  $2.9\times10^6\text{ cm}^{-2}$ 。

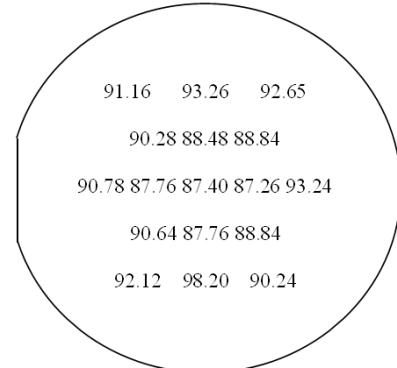


图 6 3 英寸锗基中波碲镉汞薄膜半峰宽均匀性分布

Fig.6 The uniformity of FWHM on 3 inch MW HgCdTe/Ge film

如图 7 所示, 腐蚀坑尺寸分布均匀、尺寸较小, 说明过渡层结构较为优化, 有效的抑制了由于衬底与外延层之间 14.6% 的晶格失配引入的位错向碲镉汞外延层的蔓延。



图 7 3 英寸锗基中波碲镉汞薄膜腐蚀坑密度

Fig.7 The EPD of three inch MW HgCdTe/Ge film

## 3.2 锗基中波碲镉汞焦平面芯片

### 1) 相对光谱响应

如图 8 所示,  $320\times256$  锗基中波碲镉汞焦平面探测器芯片的后截止响应波长为  $4.9\mu\text{m}$ 。

相对光谱响应从 90% 下降到 50% 的波长差为  $0.15\mu\text{m}$ , 从 50% 下降到 10% 以下的波长差为  $0.20\mu\text{m}$ , 较为陡峭, 说明碲镉汞外延层的纵向组分均匀性较好。

### 2) 峰值探测率

如图 9 所示,  $320\times256$  锗基中波碲镉汞焦平面探测器芯片不同像元的峰值探测率灰度分布均匀, 通过软件统计得到平均峰值探测率为  $3.8\times10^{11}\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。

### 3) 噪音等效温差

如图 10 示,  $320\times256$  锗基中波碲镉汞焦平面探

测器芯片不同像元的噪音等效温差灰度分布均匀，通过软件统计得到平均噪音等效温差为  $17.3\text{ mK}$ 。

#### 4) 响应率不均匀性和有效像元率

如图 11 所示， $320\times 256$  锗基中波碲镉汞焦平面探测器芯片不同像元的响应率强度和有效像元分布均匀，通过软件统计得到响应率非均匀性为  $6.5\%$ ，有效像元率为  $99.7\%$ 。

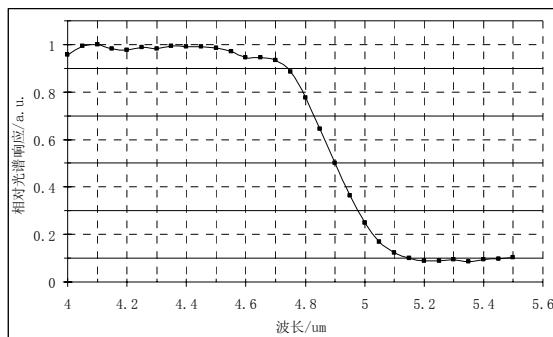


图 8  $320\times 256$  锗基中波碲镉汞红外焦平面探测器相对光谱  
Fig.8 The spectrum of  $320\times 256$  MW IRFPA based on MCT/Ge

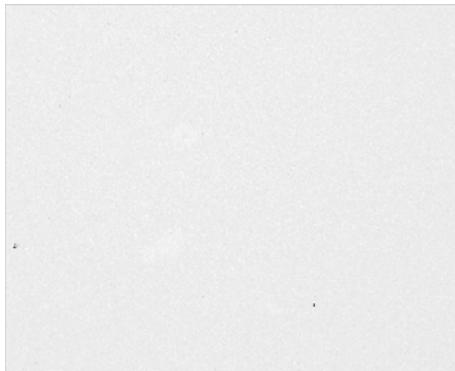


图 9  $320\times 256$  锗基中波碲镉汞探测器峰值探测率和响应率分布  
Fig.9 The  $D^*$  and  $R_p$  of  $320\times 256$  MW IRFPA based on MCT/Ge

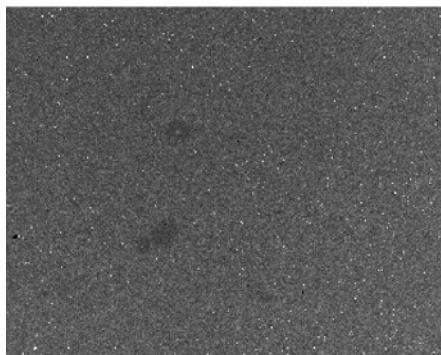


图 10  $320\times 256$  锗基中波碲镉汞探测器噪音等效温差分布  
Fig.10 The NETD of  $320\times 256$  MW IRFPA based on MCT/Ge

判别有效像元的方法很多，本文采用响应率平均值的  $\pm 30\%$ 、直流电平平均值的  $\pm 30\%$  和噪音平均值的 2 倍以内视为有效像元。如图 12 所示，由响应率

判定的有效像元率为  $99.87\%$ ，由直流电平判定的有效像元率为  $99.98\%$ ，由噪音判定的有效像元率为  $99.81\%$ ，三者之和排除重复计算的像元即为总的有效像元。

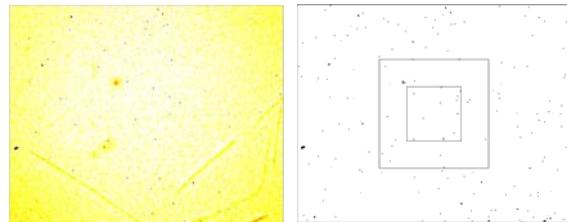


图 11  $320\times 256$  锗基中波碲镉汞探测器响应率和有效像元率分布  
Fig.11 The  $R_p$  and operability of  $320\times 256$  MW IRFPA based on MCT/Ge

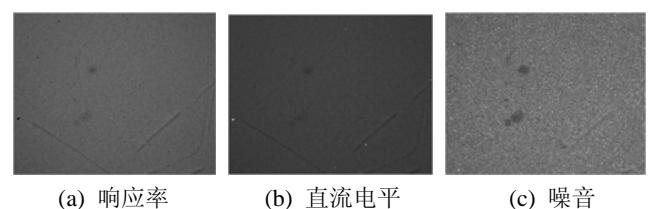


图 12  $320\times 256$  锗基中波碲镉汞探测器响应信号、直流电平和噪音信号有效像元率分布  
Fig.12 The operability from  $R_p$ ,  $V_t$  and  $V_n$  of  $320\times 256$  MW IRFPA based on MCT/Ge

## 4 总结

采用分子束外延技术基于 3 英寸锗衬底生长了中波碲镉汞薄膜材料。利用傅里叶红外透射光谱，确定锗基碲镉汞薄膜组分为  $0.300$  和厚度为  $7.72\text{ }\mu\text{m}$ ；利用光学显微镜，确定锗基碲镉汞薄膜平均表面缺陷密度小于  $200\text{ cm}^{-2}$ ；利用 X 射线衍射仪，采用双晶回摆衍射方法，测定锗基碲镉汞薄膜的平均半峰宽优于  $90\text{ arcsec}$ ；经  $0.5\%$  溴十甲醇腐蚀液处理，采用 EPD 腐蚀溶液进行 EPD 腐蚀后，使用光学显微镜，确定锗基碲镉汞薄膜平均腐蚀坑密度低于  $2.9\times 10^6\text{ cm}^{-2}$ 。采用标准的二代平面工艺制备了  $320\times 256$  锗基中波碲镉汞红外焦平面探测器并进行了光电性能测试，其平均峰值探测率达到  $3.8\times 10^{11}\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，平均等效噪音温差优于  $17.2\text{ mK}$ ，非均匀性优于  $6.5\%$ ，有效像元率高于  $99.7\%$ 。

## 参考文献：

- [1] A Rogalski. Toward third generation HgCdTe infrared detectors [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, **371**: 53-57.
- [2] A Rogalski. Progress in focal plane array technologies[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, **36**: 342-473.

(下转第 456 页)

### 3 结论

本文通过理论分析与推导，结合被动消热差理论，合理的选择透镜结构及透镜相对位置，设计出了一款长波消热差枪瞄系统。使用 AIM 公司研制的长波非制冷探测器对目标进行接收。F#为 2.5，可通过轴向变焦方式实现  $1.13^\circ/4.52^\circ$  双视场，各个视场  $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$  范围内均有良好的成像质量，光学系统全部采用球面进行设计，减少了实际加工的难度，具有结构简单，易于加工的优点。

#### 参考文献：

- [1] 梁宝雯, 吴晗平, 王华泽. 空间相机离轴三反红外光学系统设计[J]. 红外技术, 2013, 35(4): 217-222.
- [2] 李婕, 张志明, 冯生荣. 弹载红外光学系统被动消热技术[J]. 红外技术, 2005, 27(3): 196-201.
- [3] 吴海清, 王海霞, 赵新亮, 等. 双波段/双视场红外光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, 32(11): 640-644.
- [4] Grey D S. Athermalization of optical systems[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1948, 38(6): 542-546.
- [5] Jamieson T H. Lens systems: aplanatic anastigmatic two and three element[J]. *J. Appl. Opt.* 1976, 15: 2276-2282.
- [6] 陈昌吉, 徐曼, 王红伟. 手持双视场红外光学系统设计[J]. 红外技术, 2011, 33(2): 100-107.
- [7] Kingslake R. *Lens design[M]. Applied Optics and Optical Engineering III*, New York: Academic Press, 1965.
- [8] 崔莉, 赵新亮, 李同海, 等. 无调焦非制冷红外光学系统的无热化设计[J]. 红外技术, 2010, 32(4): 187-190.
- [9] 陈昌吉, 陈津津, 李萍. 新颖变焦双视场长波红外光学系统设计[J]. 红外技术, 2011, 33(7): 406-410.
- [10] Smith W J. *Optical-design technique[M]. Handbook of Optics*, New York: W. G. Driscoll, 1978.

(上接第 442 页)

- [3] Gravrand O, Molland L, Boulade O, et al. Ultralow dark current CdHgTe FPA in the SWIR range at CEA and Sofradir[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2012: 83530C-83530C-13.
- [4] Martyniuk P, Rogalski A. Modelling of MWIR HgCdTe complementary barrier HOT detector [J]. *Solid State Electronics*, 2013, 80: 96-104.
- [5] Rhiger D R. Performance Comparison of Long-Wavelength Infrared Type II Superlattice Devices with HgCdTe[J]. *Journal of electronic materials*, 2011, 40(8): 1815-1822.

- [6] Gilmore A S, Bangs J, Gerrish A, et al. Advancements in HgCdTe VLWIR materials[C]//Defense and Security. International Society for Optics and Photonics, 2005: 223-230.
- [7] 李艳辉, 杨春章, 苏栓, 等. Ge (211) 衬底上分子束外延 CdTe 薄膜[J]. 红外技术, 2011, 33(10): 598-601.
- [8] Gravrand O, Destefanis G. Recent progress for HGCDTE quantum detection in France[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 59: 163-171.
- [9] Lindsay D, Bangs J W, Vampola J, et al. Large format high operability low cost infrared focal plane array performance and capabilities[C]//SPIE Optical Engineering Applications. International Society for Optics and Photonics, 2011: 81540S-81540S-13.

(上接第 450 页)

- [5] 秦强, 朱惜晨, 杨文运. Pt/CdS Schottky 势垒紫外探测器的研制[J]. 红外技术, 2006, 28(4): 234-237.
- [6] Chattopadhyay S, Bera L K, Ray S K, et al. Pt-p-strained-Si Schottky diode characteristics at low temperature[J]. *Appl. Phys. Lett.* 1997, 71: 942(doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.119696>).
- [7] F Roccaforte, F La Via, S Di Franco, et al. Reduction of the power dissipation in silicon carbide Schottky rectifiers by a dual -metal

- planar structure[J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2002, 81: 1125 (doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1498873>).
- [8] 黄江平, 王羽, 袁俊, 等. 热释电探测器 PZT 晶片制备工艺研究[J]. 红外技术, 2013, 35(6): 368-372.
- [9] 孙涛, 李强. 硫化镉晶片抛光工艺研究[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(3): 208-212.
- [10] 孙海燕, 邵楠. 对影响碲锌镉晶片红外透过率因素的研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(5): 348-351.