

同时模式的中波/长波碲镉汞双色红外探测器

叶振华¹, 李杨^{1,2}, 胡伟达¹, 陈路¹,
廖亲君¹, 陈洪雷¹, 林春¹, 胡晓宁¹, 丁瑞军¹, 何力¹
(1. 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;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用光刻胶喷涂技术,突破了碲镉汞双色探测器加工的非平面离子注入和金属化开口等工艺.基于分子束外延(MBE)和原位掺杂技术生长的 $p_3-p_2-p_1$ 型碲镉汞($Hg_{1-x}Cd_xTe$)多层异质结材料,通过 MW 光电二极管 n 型注入区的开口刻蚀、非平面的 MW/LW 同步 B^+ 注入、台面侧向钝化和爬坡金属化,得到了同时模式的 128×128 面阵 MW/LW 双色探测器.在液氮温度下, MW/LW 双色探测器两个波段的光电二极管截止波长 λ_c 分别为 $5.10 \mu m$ 和 $10.10 \mu m$, 对应的峰值探测率 D_{Ap}^* 分别为 $2.02 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/W$ 和 $3.10 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/W$.通过对同时模式双色探测器材料与芯片结构的优化设计, HgCdTe 双色探测器 MW 向 LW、LW 向 MW 的光谱串音分别抑制到了 3.8% 和 4.4%.

关键词: HgCdTe; 中波/长波双色; 同时模式; 光谱串音

中图分类号: TN305.7; TN304.2⁺5 **文献标识码:** A

Simultaneous mode MW/LW two color HgCdTe infrared detector

YE Zhen-Hua¹, LI Yang^{1,2}, HU Wei-Da¹, CHEN Lu¹, LIAO Qin-Jun¹,
CHEN Hong-Lei¹, LIN Chun¹, HU Xiao-Ning¹, DING Rui-Jun¹, HE Li¹
(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute
of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The results of simultaneous-mode 128×128 MW/LW two-color HgCdTe Infrared detector was presented in this paper. The photoresist (PR) spray-coating technology was developed to open the windows of non-planar implantation and metallization of two-color HgCdTe infrared detector. By etching to expose the n-type implantation-region of MW photodiodes, non-planar B^+ -implantation of MW photodiodes and LW photodiodes synchronously, side-wall passivation, side-wall metallization and flip-chip hybridization with Readout Integrated Circuit (ROIC), 128×128 MW/LW two-color HgCdTe Infrared detector was achieved from a triple-layer $p_3-p_2-p_1$ hetero-junction $Hg_{1-x}Cd_xTe$ film grown by molecular beam epitaxy. At liquid nitrogen temperature, the cut-off wavelengths of the simultaneous-mode MW/LW two-color Infrared detector were $5.1 \mu m$ and $10.1 \mu m$ individually, and the peak detectivities (D_{Ap}^*) were $2.02 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/W$ and $3.10 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/W$ respectively. Also the spectral cross-talks of MW-to-LW and LW-to-MW were suppressed to only 3.8% and 4.4% by optimizing the chip structure of the simultaneous-mode two-color infrared detector.

Key words: HgCdTe; MW/LW two-color; simultaneous mode; spectral crosstalk

PACS: 85.60.Dw

引言

随着科学技术的不断进步,红外探测器技术的

发展和尖端武器装备的更新换代从未停止过^[1]. 现代化战争迫使下一代武器系统将碲镉汞高分辨率、多色和智能化红外焦平面技术作为第三代红外焦平

收稿日期:2011-08-09,修回日期:2012-03-01

Received date: 2011-08-09, revised date: 2012-03-01

基金项目:国家自然科学基金(6070612);中国科学院国防科技创新基金(cxjj-10-m29)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(6070612); Defense Technology Innovation Fund from Chinese Academy of Sciences(cxjj-10-m29)

作者简介(Biography): 叶振华(1977-),男,江西玉山人,博士、副研,主要从事新一代红外焦平面探测器关键技术研究. E-mail: sitpcqzx@hotmail.com.

面的主流支撑技术^[1-2]. 应用集成双波段红外焦平面探测器,特别是同时模式的面阵 MW/LW 双色焦平面探测器,可在维持与单色探测系统基本相同的体积、功耗、可靠性及完全相同的空间分辨率的同时,大大提升系统探测与识别的距离、抗干扰和阳光散射的能力^[1-4]. 可以预见,双波段、多色工作的集成红外探测器将是国际上 2020 年前发展的重要课题.

最近,基于 MBE 技术生长的 p-p-P-N 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 双色材料已经报道,通过区域性的 B^+ 注入、微台面阵列隔离、凹形表面钝化、爬坡金属化和混成互连等工艺,获得了国内第一个 SW/MW 双色红外焦平面原型探测器和顺序模式的 128×128 面阵 SW/MW 双色碲镉汞红外探测器,以及探测器的光电特性^[4-5].

针对航天、航空和预警等红外成像系统对 MW/LW 双色焦平面探测器的迫切需求,本文在顺序模式的 SW/MW 双色碲镉汞红外探测器基础上,展开了同时模式的 MW/LW 双色探测器芯片的加工技术研究,重点探索了非平面离子注入和金属化开口的芯片加工工艺,并对首次获得的 128×128 面阵 MW/LW 双色碲镉汞红外探测器光电性能进行了测试与评价.

1 面阵 MW/LW 双色探测器的结构与制备

1.1 面阵 MW/LW 双色探测器的结构

同时模式的 HgCdTe 双色红外探测器单元结构剖面示意图如图 1 所示. 它实际上是纵向向上同向并置的两个光电二极管,能对目标辐射的两个波段产生响应. 通过分别优化 MW、LW 光电二极管阵列的工作偏置,同时模式的双色探测器两个波段在时间

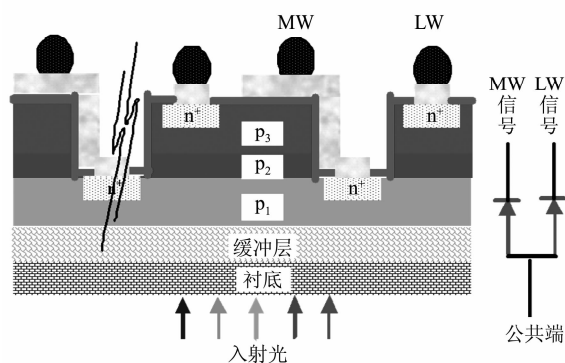


图 1 同时模式的 MW/LW 面阵双色探测器的单元结构剖面示意图

Fig. 1 Simultaneous-mode cross-section architecture of MW/LW two-color HgCdTe infrared detector

和空间上都能完全同步的有效探测.

由图可见, MW/LW 面阵双色探测器单位光敏元采用的是两个电极接触的结构模式. 虽然双色探测器的光敏元阵列结构设计和芯片工艺都非常复杂,但它两个波段的光电二极管都具有各自的工作点可以独立优化,它们相互间的性能关系能自由平衡. 这种同时模式结构的探测器已经是 MW/LW 面阵双色红外探测器的重要研究方向. 最近,法国 LE-TI 公司报道了这类结构的 640×512 MW/LW 双色红外探测器,其两个波段红外探测器性能已经接近相应波段的单色红外探测器性能.

1.2 HgCdTe 双色探测器的制备

$\text{p}_3\text{-p}_2\text{-P}_1$ 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 多层异质结的双色材料采用分子束外延(MBE)技术生长. 汞空位掺杂的 P_1 和 p_3 层 HgCdTe 材料分别作为 MW 和 LW 光电二极管的响应吸收区. 在 P_1 和 p_3 层中间约 $0.5 \mu\text{m}$ 厚的大组分 p_2 区作为电子的势垒阻挡层^[1-2],以减小两个光电二极管之间由电学串扰引起的 MW 向 LW 和 LW 向 MW 的光谱串音.

128×128 面阵 MW/LW 双色碲镉汞红外光敏感探测芯片,必须由微台面阵列成形技术来完成光敏感元微台面阵列的 MW 光电二极管 n 型离子注入区暴露. 这要求微台面阵列成形工艺在恰好完全刻穿 $\text{p}_3\text{-p}_2$ 层时终止. 同时,微台面阵列成形的凹槽轮廓应得到合理的控制. 一方面是凹槽底部的平坦区域面积要尽可能地大,以确保 MW 光电二极管 n 型离子注入区的面积和 MW 光电响应的占空比. 但为提高 MW/LW 双色碲镉汞红外光敏感探测芯片侧壁钝化质量和爬坡金属化引出成功率,又必须降低凹槽侧壁的陡度,从而限制了凹槽底部的平坦区域面积. 在实验中,刻蚀成形工艺获得的中心距为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,微台面阵列凹槽深度为 $12 \mu\text{m}$ 、开口宽度为 $24 \mu\text{m}$ 、底部宽度为 $15 \mu\text{m}$. 在双色碲镉汞红外光敏感探测芯片成形后,运用光刻胶喷涂设备(Delta Alta-80),突破了碲镉汞双色探测器加工非平面的离子注入和金属化开口的芯片工艺.

由上述的 $\text{p}_3\text{-p}_2\text{-P}_1$ 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 多层异质结材料,经过 MW 光电二极管 n 型注入区开口的成形刻蚀、非平面的 MW/LW 同步 B^+ 注入、台面侧向钝化、爬坡金属化、互连 In 柱阵列和混成互连等工艺,得到了同时模式的 128×128 面阵 MW/LW 双色碲镉汞红外探测器. MW/LW 双色碲镉汞红外光敏感探测芯片局部的形貌如图 2 所示.

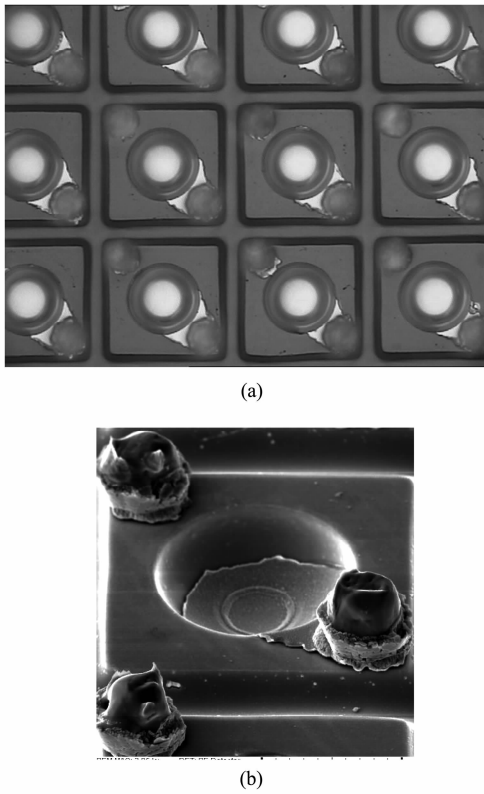


图2 MW/LW 双色碲镉汞红外探测器局部的形貌图 (a)金相显微镜照片, (b)SEM 照片
Fig. 2 The images of MW/LW two-color HgCdTe infrared focal plane partial arrays (a) the optical microscope image, (b) the SEM picture

2 结果与讨论

2.1 双色红外探测器的光电特性

采用红外探测器常规的评价方法,完成了 128×128 面阵 MW/LW 双色红外探测器的测试和性能评估. 图3是该双色红外探测器两个波段的 $I-V/R-V$ 曲线. 在液氮温度下, MW/LW 双色探测器的两个波段光电二极管的零偏动态阻抗 (R_0) 分别为 $9.05 \times 10^8 \Omega$ 和 $1.02 \times 10^5 \Omega$. 探测器测试得到双色探测器 MW 和 LW 两个波段对应的峰值探测率 $D_{\lambda p}^*$ 分别为 $2.02 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 和 $3.10 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$.

该双色红外探测器两个波段的 $I-V/R-V$ 曲线和响应光谱,如图4所示. 由图可见,在液氮温度下, MW/LW 双色探测器两个波段的光电二极管开启波长 λ_{on} 分别为 $2.50 \mu\text{m}$ 和 $5.10 \mu\text{m}$, 截止波长 λ_c 分别为 $5.10 \mu\text{m}$ 和 $10.10 \mu\text{m}$. MW/LW 双色探测器的 MW 截止波长与 LW 开启波长几乎相等,由计算得到双色探测器 MW 向 LW、LW 向 MW 的光谱串音分别为 3.8% 和 4.4%. 同时模式的 MW/LW 双色探测

器两个波段之间光谱串音非常小,表明双色探测器的材料与芯片结构的设计是合理的.

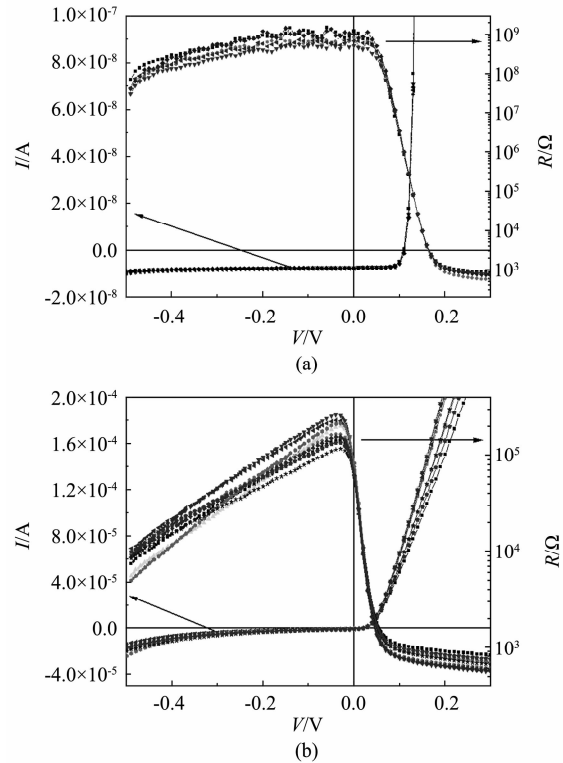


图3 MW/LW 双色红外探测器的 $I-V$ 和 $R-V$ 曲线 (a) MW 光电二极管, (b) LW 光电二极管
Fig. 3 $I-V$ and $R-V$ characteristic curves of MW/LW two-color infrared detector (a) MW photodiodes, (b) LW photodiodes

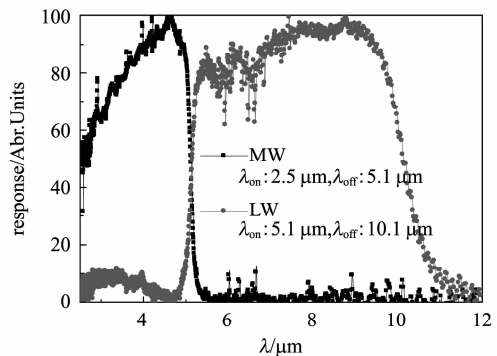


图4 MW/LW 双色红外探测器的响应光谱
Fig. 4 Spectral response of 128×128 MW/LW two-color infrared detector

2.2 讨论

作为双色探测器重要的性能参数,两个波段之间的光谱串音的本质意义在于反映两个波段响应光谱的交叠情况. 理想的双色探测器两个波段之间的光谱串音应该为零. 但是,短波长红外辐射在第一个

光电二极管区域被吸收的不充分和两个光电二极管之间的电学串扰,都会导致实际制备的双色探测器存在一定的光谱串音.其中,MW 向 LW、LW 向 MW 的光谱串音分别是指在 LW 光电二极管独立工作时 MW 段光信号与 LW 段光信号的比值和在 MW 光电二极管独立工作时 LW 段光信号与 MW 段光信号的比值.

如图 4 所示,MW/LW 双色探测器的 MW 截止波长与 LW 开启波长几乎相等.通过计算 LW 光谱响应曲线在 MW 段积分面积与 LW 段积分面积的比值和 MW 光谱响应曲线在 LW 段积分面积与 MW 段积分面积的比值,得到双色探测器 MW 向 LW、LW 向 MW 的光谱串音分别为 3.8% 和 4.4%.两个波段之间小的光谱串音可能与双色探测器采用了合理的材料与芯片结构有关.本文采用的 $p_3-p_2-P_1$ 构形的 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 多层异质结双色材料,可能在 P_1 和 p_3 层之间形成了阻止少数载流子运动的电子势垒^[1-2],从而有效地减小两个光电二极管之间由电学串扰引起的 MW 向 LW 和 LW 向 MW 的光谱串音.

3 结论

基于分子束外延(MBE)和原位掺杂技术生长的 p-P-P 型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 多层异质结材料,通过 MW 光电二极管 n 型注入区的开口刻蚀、非平面的 MW/LW 同步 B^+ 注入、台面侧向钝化和爬坡金属化,得到了同时模式的 128×128 面阵 MW/LW 双色探测器.在液氮温度下,MW/LW 双色探测器两个波段光电二极管的 R_0 分别为 $9.05 \times 10^8 \Omega$ 和 $1.02 \times 10^5 \Omega$,对应的峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 分别为 $2.02 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 和 $3.10 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$.双色探测器两个波段的截止波长 λ_c 分别为 $5.10 \mu\text{m}$ 和 $10.10 \mu\text{m}$,

且 MW 向 LW、LW 向 MW 的光谱串音分别抑制到了 3.8% 和 4.4%,表明双色探测器的材料与芯片结构的设计是合理的.

致谢

本工作得到了于梅芳、马伟平、朱建妹、陈兴国、祝海彬、刘丹、吴云、曹菊英、王建新、陈昱、邢雯和曹妮媚等的支持,作者在此一并表示衷心的感谢.

REFERENCES

- [1] Reibel Y, Rubaldoa L, Vaza C, *et al.* MCT (HgCdTe) IR detectors: latest developments in France [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, 7834:78340M-1.
- [2] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 2009, **105**(09): 091101-1.
- [3] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors [J]. *SPIE*, 2009, 7388: 73880J-1.
- [4] YE Zhen-Hua, YIN Wen-Ting, HUANG Jian, *et al.* 128×128 SW/MW TWO-COLOR HgCdTe IRFPAs [J]. *J. Infrared and Millim. Waves* (叶振华, 尹文婷, 黄建, 等. 128×128 短波/中波双色红外探测器. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(6): P415-418.
- [5] YE Zhen-Hua, WU Jun, HU Xiao-Ning, *et al.* Spectral study of HgCdTe two-color detector arrays [J]. *J. Infrared and Millim. Waves* (叶振华, 吴俊, 胡晓宁, 等. 碲镉汞红外双色探测器响应光谱研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(1): 4-7.
- [6] Park B A, Musca C A, Antoszewski J, *et al.* Effect of high-density plasma process parameters on carrier transport properties in p-to-n type converted Hg_{0.7}Cd_{0.3}Te Layer [J]. *J. Electron. Mater.*, 2007, **36**(8): 913.
- [7] Haakenaen R, Colin T, Steen H, *et al.* Electron beam induced current study of ion beam milling type conversion in molecular beam epitaxy vacancy-doped $Cd_xHg_{1-x}Te$ [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**(6): 849-852.
- [8] Musca C A, Siliquint J F, Smith E P G, *et al.* Laser beam induced current image of reactive ion etching induced n-type doping in HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1998, **27**(6): 661-667.