

文章编号: 1001-9014(2010)06-0415-04

128 × 128 短波/中波双色红外焦平面探测器

叶振华¹, 尹文婷^{1,2}, 黄建^{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:首次在国内报道了 128 × 128 面阵短波/中波 (SW/MW) 双色碲镉汞 (HgCdTe) 红外焦平面探测器 (infrared focal plane arrays, IRFPAs) 的研究成果. 基于由采用分子束外延 (MBE) 和原位掺杂技术生长的 p-p-P-N 型碲镉汞 (Hg_{1-x}Cd_xTe) 多层异质结材料, 通过 B⁺ 注入、台面腐蚀、台面侧向钝化和爬坡金属化, 以及双色探测芯片与读出电路 (Readout Integrated Circuit, ROIC) 混成互连等工艺, 得到了 128 × 128 面阵双色焦平面探测器. 通过湿化学腐蚀方法的优化, 将光敏元尺寸为 (50 × 50) μm² 的双色微台面探测器的占空比提高了一倍. 该面阵双色红外焦平面探测器具有较好的均匀性和正常的光电特性. 在液氮温度下, 二个波段的光电二极管截止波长 λ_c 分别为 2.7 μm 和 4.9 μm, 对应的峰值探测率 D_{ap}^{*} 分别为 1.42 × 10¹¹ cmHz^{1/2}/W 和 2.15 × 10¹¹ cmHz^{1/2}/W.

关键词: HgCdTe; 湿化学腐蚀方法; 双色微台面隔离; 峰值探测率
中图分类号: TN305.7; TN304.2+5 **文献标识码:** A

128 × 128 SW/MW TWO-COLOR HgCdTe IRFPAs

YE Zhen-Hua¹, YIN Wen-Ting^{1,2}, HUANG Jian^{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 Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The results of 128 × 128 SW/MW two-color HgCdTe infrared focal plane arrays (IRFPAs) were presented. By B⁺-implantation, mesa-isolation etching, side-wall passivation, side-wall metallization and flip-chip hybridization with readout integrated circuit (ROIC), 128 × 128 SW/MW two-color HgCdTe IRFPAs detector was fabricated from a four-layer p-p-P-N hetero-junction of Hg_{1-x}Cd_xTe film grown by molecular beam epitaxy and in-situ doping techniques. The micro-mesa fill-factor of (50 × 50) μm² two-color detector arrays was doubled by optimizing the wet-chemical etching process. The staring SW/MW two-color HgCdTe IRFPAs detector performed high uniformity and normal photo-electric properties. At liquid nitrogen temperature, the cut-off wavelengths of the two-color IRFPAs were 2.7 μm and 4.9 μm, respectively, and the peak detectivities (D_{ap}^{*}) were 1.42 × 10¹¹ cmHz^{1/2}/W and 2.15 × 10¹¹ cmHz^{1/2}/W respectively.

Key words: HgCdTe; wet chemical etching; two-color micro-mesa isolation; peak detectivity

引言

红外焦平面探测器是一种集红外信息获取和信息处理于一体的先进的成像传感器, 且第一代与第二代的红外焦平面器件已在空间、军事和国民经济等应用领域发挥了重要的作用^[1]. 近十年来, 红外焦平面探测器进入了又一个高速发展时期, 在国外已经出现了以高分辨率、多色化和智能化为显著特

征的第三代红外焦平面^[1~4]. 作为新一代红外焦平面器件的突出代表, 碲镉汞 (HgCdTe) 双色红外焦平面探测器是由响应两个不同波段的光电二极管在探测芯片纵向上叠加集成的. 它具有高度集成、高可靠、超高速和小型化等特点, 可将目标单一的探测功能扩展到对目标的认识, 进而最终实现对目标的快速识别^[1, 2]. 这种双波段纵向叠层的探测方式不仅为准确地获取信息提供了新的自由度, 极大地提

收稿日期: 2009-08-25, 修回日期: 2010-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (6070612)

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

Received date: 2009-08-25, revised date: 2010-05-31

高了目标的识别能力,而且还大大降低应用系统的设计、尺寸、重量和成本。

几年前,已经报道了基于 MBE 技术生长的 p-p-P-N 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 双色材料,通过区域性的 B^+ 注入、微台面列阵隔离、凹形表面钝化、爬坡金属化和混成互连等工艺,获得了我国第一个 SW/MW 双色红外焦平面原型器件,以及器件的光电特性^[3, 4]。双色微台面列阵是由各向同性的 HgCdTe 湿化学腐蚀来实现光敏感元列阵隔离的,其微台面占空比和探测率都相对较低。又由于 HgCdTe 材料的工艺损伤阈值比较低,各向异性的干法刻蚀技术易导致在双色微台面列阵隔离沟槽侧壁产生电学损伤,从而对双色焦平面探测器造成电极接触以及电学性能造成不良影响^[5-7]。为此,针对 HgCdTe 双色红外焦平面原型器件存在光敏元微台面占空比较低的缺点,文中展开了双色微台面列阵隔离的湿化学腐蚀方法的优化研究,并采用优化的湿化学腐蚀方法,进行了 128×128 面阵 SW/MW 双色碲镉汞红外焦平面探测器的研制与评价。

1 面阵 SW/MW 双色探测器的结构与制备

1.1 面阵 SW/MW 双色探测器的结构

图 1 是 HgCdTe 双色红外焦平面探测器单元结构的剖面图,它实际上是纵向并置的 2 个背靠背的光电二极管,能对目标辐射的两个波段产生响应。当红外辐射从背面入射到双色探测器上时,穿过透明衬底后,SW 辐射在第一个结的吸收区先被吸收,光生载流子被 SW 光电二极管的 P-N 结分开。而 MW 辐射继续前进,到达 MW 吸收层被吸收,光生载流子被 MW 光电二极管的 p-n 结分开。双色焦平面探测器两个波段的工作顺序是通过单元电极与公共电极之间的所加电压的极性来选择的。如图 1 所示,当

单元电极与公共电极间为正偏时, MW 光电二极管工作;而在反偏时,则为 SW 光电二极管工作。

SW/MW 面阵双色探测器单位光敏元采用单个电极接触的结构模式,具有光敏元列阵的芯片工艺相对简单并有很好的扩展性,可以使双色探测器两个波段各自光电二极管的工作点得到单独优化,以及能平衡它们相互间的性能关系。这种单位光敏元为单个电极的结构模式已经是面阵双色红外焦平面探测器的研究热点。最近,雷声夜视公司报道的 1280×720 双色红外焦平面探测器就是采用同样的结构。

128×128 面阵 SW/MW 双色碲镉汞红外光敏感探测芯片,必须由微台面列阵分离技术来完成光敏感元微台面列阵的隔离,见图 1。这不仅要求双色微台面光敏感元列阵之间的原位掺杂 $\text{P}_1\text{-N}^+$ 结完全被深沟槽隔断,又要确保光敏感元微台面列阵的公共基区 N^+ 层仍然保持连通,以形成分离的光敏感元列阵与公共电极之间的电学接触。同时,隔离沟槽还必须要求有较大的深宽比,以确保双色微台面光敏元有较大的占空比。所以,双色微台面列阵隔离技术必须要达到隔离沟槽深度可控、均匀性好、深宽比高和无电学与物理损伤等工艺要求。

1.2 HgCdTe 双色探测器的制备

p-p-P-N 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 多层异质结的双色材料是采用分子束外延(MBE)和原位掺杂技术生长的。先生长响应 SW 辐射的 P-on-N 异质结光电二极管, N 层为仅有 $4\mu\text{m}$ 、禁带宽度大的 SW 响应前截止窗口, $6\mu\text{m}$ 厚的 P 型区是双色探测器 SW 吸收层。然后,生长少数载流子(电子)的势垒阻挡层,以减少光谱串音。最后,生长 $6\mu\text{m}$ 厚 p 型 MW 辐射的吸收层。其中,3 层 p-p-P 材料是同型异质结,它们之间的界面是欧姆接触的,且在中间很薄的 p 区可形成电子的势垒阻挡层^[1, 2]。

由上述的 p-p-P-N 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 多层异质结材料,进行选择性的 B^+ 注入,形成 n-on-p 响应 MW 辐射的光电二极管。然后,进行双色微台面列阵隔离的湿化学腐蚀,隔离沟槽大约为 $14\mu\text{m}$ 。最后,经生长复合介质膜的钝化层、欧姆接触的爬坡金属化层、互连 In 柱列阵和混成互连等工艺,得到 128×128 面阵 SW/MW 双色碲镉汞红外焦平面探测器。单元注入的 n 区生长单元接触电极,而整个器件的公共电极是与通过最靠近衬底的 N 层相连的。

虽然,碲镉汞湿化学腐蚀是各向同性的,很难达到双色微台面光敏元列阵高占空比的要求,但是,用湿化学腐蚀方法来获得的双色微台面列阵,具有无

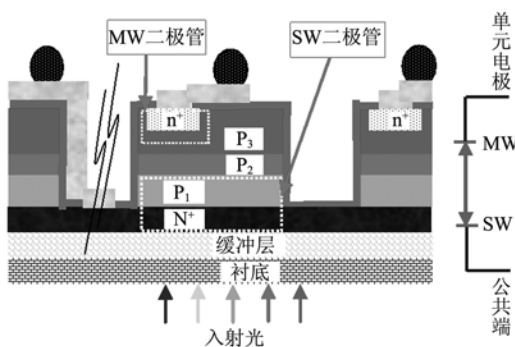


图 1 SW/MW 面阵双色探测器的单元结构剖面图

Fig. 1 Cross-section architecture of SW/MW two-color HgCdTe infrared detector

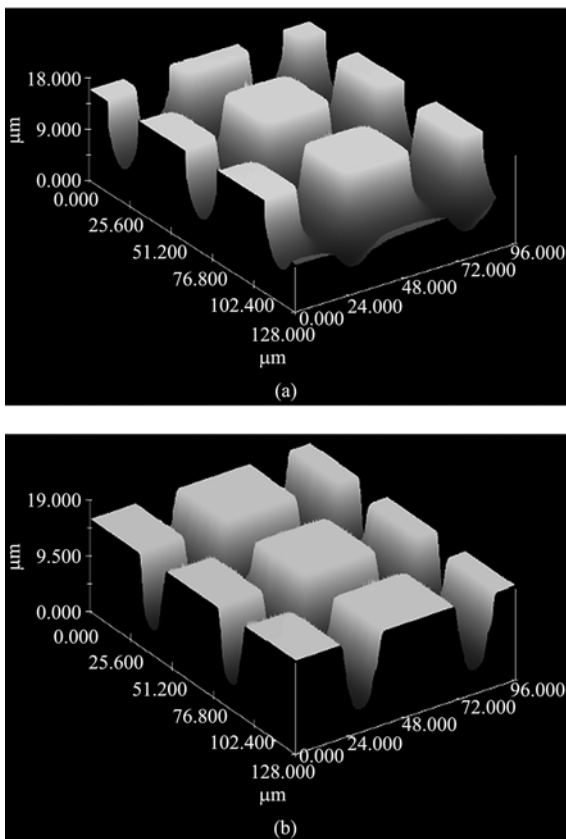


图2 HgCdTe 双色微台面阵列的共聚焦显微镜形貌图 (a) 常规湿化学腐蚀方法获得的微台面阵列 (b) 优化提高的湿化学腐蚀方法获得的微台面阵列

Fig. 2 Morphological images of HgCdTe two-color micro-mesa arrays using con-focal microscope (a) micro-mesa arrays obtained by conventional wet-chemical etching process (b) micro-mesa arrays achieved by optimized wet-chemical etching process

刻蚀工艺引起的电学损伤和腐蚀表面光滑的优点. 所以, 文中展开了用以面阵双色微台面阵列隔离的湿化学腐蚀方法的优化研究. 通过腐蚀方法的改进, 将光敏元尺寸为 $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$ 的双色微台面阵列的占空比提高了一倍. 图 2 是优化前、后的湿化学腐蚀方法获得的碲镉汞微台面阵列激光共聚焦形貌图. 在湿化学腐蚀方法优化前, 双色微台面阵列隔离沟槽的深宽比只有 0.4, 而在优化后深宽比提高到 0.85. 这能满足中心距为 $50 \mu\text{m}$ 的双色微台面阵列隔离的要求. 而且, 优化后的湿化学腐蚀方法仍然操作比较简单, 可重复性和腐蚀深度均匀性都比较好.

2 双色红外焦平面的光电特性与成像

由于 128×128 面阵 SW/MW 双色焦平面探测器是采用双色探测芯片与电容反馈跨阻抗放大器 (capacitor feedback trans-impedance amplifier, CTIA) 型输入级结构的 ROIC 混成互连的. 由于 CTIA 型输

入级的 ROIC 具有双向性, 可改变双色红外焦平面探测器单元电极与公共电极间的偏压方向, 从而实现双色焦平面探测器两个工作波段之间的选择.

采用常规的红外焦平面的测试方法, 并通过 CTIA 读出电路改变双色红外焦平面探测器单元电极偏压, 完成了 128×128 面阵 SW/MW 双色红外焦平面探测器的测试和演示成像. 双色红外焦平面探测器的测试性能, 如表 1 所示, 面阵红外双色焦平面探测器具有较好的均匀性和正常的光电性能. 图 3 是该双色红外焦平面探测器两个波段的响应光谱, 图 4 是两个波段的演示成像和它们的融合图像.

表 1 128×128 面阵 SW/MW 双色红外焦平面探测器的测试性能

Table 1 The performance of staring two-color IRFPAs detector summarized by IRFPAs test

技术参数	测试结果
中心距 (μm)	50
截止波长 (μm)	SW: 2.7; MW: 4.9
平均峰值探测率 ($\text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$)	SW: 1.42×10^{11} ; MW: 2.15×10^{11}
响应不均匀性 (%)	SW: 11.73; MW: 26.37
盲元率 (%)	SW: 1.30; MW: 13.60

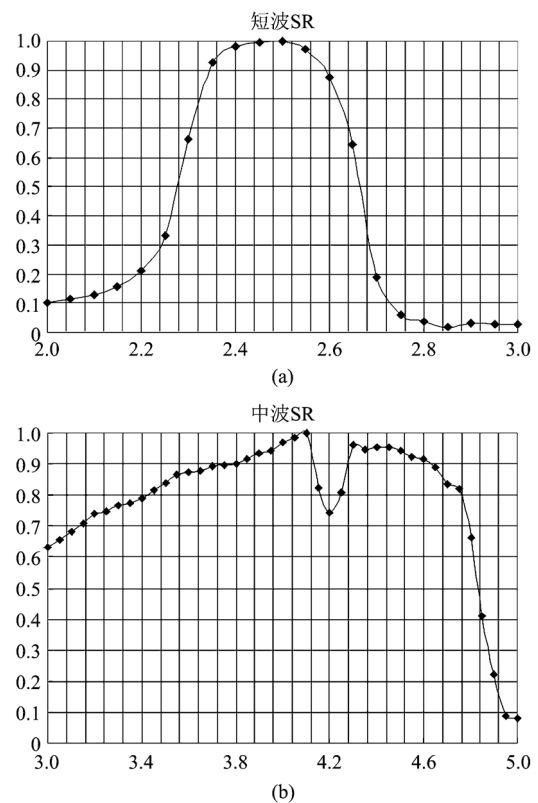


图 3 SW/MW 双色红外焦平面探测器的响应光谱 (a) SW 响应光谱 (b) MW 响应光谱

Fig. 3 Spectral responses of SW/MW two-color IRFPAs detector (a) SW spectrum (b) MW spectrum

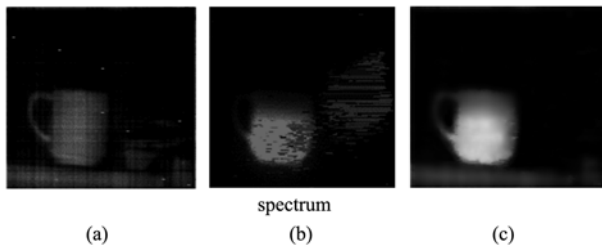


图4 128 × 128 面阵 SW/MW 双色焦平面器件的演示成像 (a)SW 照片 (b)MW 照片 (c)SW 与 MW 融合照片

Fig. 4 The imaging pictures of 128 × 128 SW/MW two-color IRFPAs detector (a)SW picture (b)MW picture (c)SW and MW merged picture

3 结果与讨论

128 × 128 面阵 SW/MW 双色焦平面器件 SW 响应的不均匀性为 11.73%, 其均匀性相当好, 如表 1 所示. 由于 SW 光电二极管位于 MW 光电二极管的下方, 可说明双色微台面探测器的隔离深度均匀性非常好. 而 MW 响应的不均匀性为 26.37%, 其均匀性较差可能是由形成双色微台面光敏元 MW 光电二极管的离子注入工艺的均匀性较差导致的.

128 × 128 面阵 SW/MW 双色焦平面器件的 SW 峰值探测率比 MW 的还要低. 这可能与 SW 光电二极管的钝化效果比较差有关. 改进后湿化学腐蚀方法获得的双色微台面阵列隔离沟槽的深宽比较大, 导致在双色微台面探测器复合介质钝化膜生长时, 因阴影效应而不能有效覆盖 SW 光电二极管侧壁暴露的结区, 从而影响 SW 光电二极管的钝化性能. 而 MW 光电二极管位于双色微台面阵列的顶部, 阴影效应对钝化膜生长的影响非常小, 因此 MW 具有较高的峰值探测率.

4 结论

基于 p-p-P-N 型 HgCdTe 多层异质结材料和双色微台面阵列加工技术, 制备了 128 × 128 面阵 SW/

MW 双色碲镉汞红外焦平面探测器. 通过湿化学腐蚀方法的优化, 将光敏元尺寸为 $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$ 的双色微台面探测器的占空比提高了一倍. 该面阵红外双色焦平面探测器具有较好的均匀性和正常的光电性能. 但是, 还需要改进形成双色微台面探测器 MW 光电二极管的离子注入工艺, 重点改善注入的均匀性, 从而提高 MW 响应均匀性. 以及优化双色微台面探测器介质钝化膜生长方法, 以减小高深宽比隔离沟槽在生长时存在较大的阴影效应的影响, 进而提高 SW 峰值探测率.

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、邢雯和曹妩媚等的支持, 作者在此一并表示衷心的感谢.

REFERENCES

- [1] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(09):091101-1.
- [2] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, **7388**:73880J-1.
- [3] Ye Z H, Wu J, He L, et al. A preliminary study on MBE-grown HgCdTe two-color FPAs[J]. *Proc. of SPIE*, 2004, **5640**:66-73.
- [4] Ye Z H, Quan Z J, Zhou W H, et al. An investigation on spectral-characteristic of HgCdTe two-color detector[C]. In the 2006 Joint 31st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, Shanghai, 2006.
- [5] 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 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ layer[J]. *J. Electron. Mater.*, 2007, **36**(8):913-918.
- [6] 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 $\text{Cd}_{x}\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**(6):849-852.
- [7] 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.