

砷掺 HgCdTe 长波红外光电二极管阵列的制备与性能

李海滨^{1,2}, 林春¹, 陈兴国¹, 魏彦峰¹, 徐竞杰^{1,2}, 何力¹

(1. 中国科学院上海技术物理所 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:采用砷(As)掺杂 HgCdTe 材料研制了响应截止波长为 12.5 μm , 规格为 256 \times 1 的长波红外光电二极管阵列. 实验设计了一种新的 pn 结测量方法, 测量发现砷掺长波 HgCdTe 材料离子注入形成 pn 结深度在 3.6 ~ 5.3 μm 之间, 而其最大横向尺寸大约是设计尺寸的 1.3 倍. 实验采用一种改进的表面处理工艺制备了砷掺 HgCdTe 长波红外光电二极管阵列, 获得了良好的电学性能, 该工艺与常规表面处理工艺相比可以使器件峰值阻抗提高 2 个量级, 而 -0.5 V 偏压下的动态电阻可提高约 30 倍. 研究认为, 器件性能提高的原因是由于改进工艺可以有效抑制器件表面漏电流.

关键词:As 掺 HgCdTe; 长波 HgCdTe 红外光电二极管阵列; 伏安特性; 表面处理工艺

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Fabrication and performances of arsenic-doped HgCdTe long-wavelength infrared photodiode arrays

LI Hai-Bin^{1,2}, LIN Chun¹, CHEN Xing-Guo¹, WEI Yan-Feng¹, XU Jing-Je^{1,2}, HE Li¹

(1. Key laboratory of Infrared Imaging Material 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: Long-wavelength ($\lambda_c \sim 12.5 \mu\text{m}$) 256 \times 1 infrared photodiode arrays based on liquid phase epitaxy (LPE) grown arsenic-doped HgCdTe were fabricated. The performances of the devices were investigated in this work. The profile of implanted pn junction on arsenic-doped HgCdTe was determined by a novel method. The results show that the junction depth is about 3.6 ~ 5.3 μm and the largest lateral size is about 130% of the designed value. In the experiment, HgCdTe long-wavelength photodiode arrays were fabricated by traditional and modified surface processing techniques. The modified process can improve the electrical properties of the devices significantly. The peak resistance and dynamic resistance at -0.5 V in the R - V curves of the devices by modified process is about 100 and 30 larger than those of the devices by traditional process, respectively. The reason of the improvement is assumed to be the suppression of surface leakage current.

Key words: arsenic doped HgCdTe; long-wavelength HgCdTe infrared photodiode arrays; electrical characteristic; surface processing

PACS: 85.60.Gz

引言

近年来, 红外焦平面技术得到迅速发展. 由于室温下物体热辐射峰值波段落在长波范围内, 所以长波红外探测器具有重要的应用价值, 它已成为当今红外焦平面技术的主要发展方向之一. HgCdTe 由于其可调带隙、高的探测率以及较高的工作温度, 已成

为研制长波红外焦平面探测器首选材料之一^[1]. 因而长波 HgCdTe 红外焦平面探测器的研究得到广泛的重视.

对于 n-on-p 型 HgCdTe 红外焦平面探测芯片, 外延材料的 p 型掺杂是影响器件性能的关键技术之一. 常规 n-on-p 型 HgCdTe 红外焦平面探测芯片是基于 Hg 空位掺杂的 HgCdTe 外延材料. Hg 空位

收稿日期: 2011-04-26, 修回日期: 2011-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(6070612)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (607012)

作者简介 (Biography): 李海滨(1983-), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要研究领域为 HgCdTe 红外焦平面探测器制备工艺. E-mail: lihaibin@mail.sitp.ac.cn.

Received date: 2011-04-26, revised date: 2011-12-12

虽然提供了导电用的空穴,但是它们在 HgCdTe 中引入的大量的深能级,而这些深能级作为肖克莱里德-霍尔(SRH)产生复合中心会很大程度上减小材料的少数寿命.这不但会降低器件的量子效率,而且将明显增加器件中的 SRH 电流和缺陷辅助隧穿(TAT)电流.因而当探测器响应波段由中波提高到 $10.5\ \mu\text{m}$ 以上的长波波段时,器件的性能将会严重降低.为此,以提高少数寿命为目的的非本征 p 型掺杂技术的研究成为 HgCdTe 材料研究的热点^[2-3].

HgCdTe 材料 As 掺杂技术就是由此发展出来的 p 型掺杂技术之一.在 As 掺 HgCdTe 型材料中,As 受主能级较浅,不表现为较强的产生复合中心,所以少数寿命受深能级复合中心影响不大.据报道,As 掺 HgCdTe 比 Hg 空位掺杂 HgCdTe 中少数寿命可以高出一个量级以上^[4],因而 HgCdTe 器件结阻抗会由于少数寿命延长而得到提高^[5].所以 As 掺杂技术可用于制备 HgCdTe 长波红外焦平面(LWIR FPAs)探测器.

迄今,As 掺杂技术已经在 HgCdTe 中波红外焦平面探测器上获得了成功的应用^[6],而 As 掺 HgCdTe 长波红外焦平面探测器的研究却鲜有报道.本文首先通过测量 As 掺 HgCdTe 离子注入 pn 结的尺寸确定了光电二极管阵列的几何结构参数,而后采用不同的表面处理工艺制备了 n-on-p 型 As 掺 HgCdTe 长波红外光电二极管阵列并测量了器件电学特性.

1 实验

1.1 材料的制备

在 CdZnTe 衬底(211)晶面上采用富碲液相外延法(LPE)生长原位 As 掺杂 HgCdTe 材料,而后通过高温富 Hg 退火处理来激活 As 原子从而实现 p 型掺杂.所用 As 掺 HgCdTe 材料 Cd 组分(x)为 0.219 8.

1.2 成结与 pn 结尺寸测量

实验中采用 B 离子注入工艺形成 n 区,注入之前材料表面已淀积注入阻挡层,离子注入设备为日本真空 IM-200M 离子注入机.

pn 结尺寸是 HgCdTe 光电二极管的重要参数,它不但关系到光电二极管的伏安特性,还影响到探测器光敏元间的串音的大小.文献报道称 As 掺杂中波 HgCdTe 材料经离子注入所成 pn 结结深远大于 B 离子注入深度^[6],As 掺长波 HgCdTe 材

料上的情况也很有可能与此相似.为此,实验中对 As 掺长波 HgCdTe 离子注入 pn 结尺寸进行了测量.

传统 pn 结尺寸测量的方法主要有剥层霍尔法、电容-电压(C-V)法和激光束诱导电流(LBIC)法等,但它们往往只能测量一个维度的尺寸.本文提出了一种可以测量 pn 结纵向和横向尺寸的方法.此方法中,在距注入区中心不同距离处制备了一系列的细长长条金属半导体(Metal-Semiconductor, MS)接触,当长条 MS 接触从 n 区逐渐过渡到 p 区时,公共电极和长条 MS 接触间的零偏电阻 R_0 会出现由大到小的变化并最后变成常量,从而可以判定 n 区的横向尺寸.而纵向结深则是采用逐步剥层方法测量.根据设计结构,横向尺寸的测量精度可以做到 $0.5\ \mu\text{m}$,而纵向精度则取决于每次剥层腐蚀的厚度.图 1 为该方法的横向测量结构的示意图.

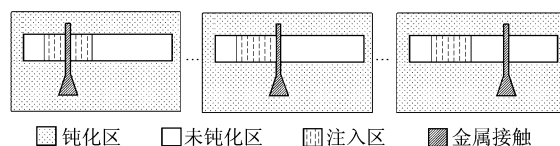


图 1 结横向尺寸测量结构示意图
Fig. 1 Schematic illustration of testing structures

图 2 给出了测得的 As 掺 HgCdTe 离子注入所成 n 区的轮廓尺寸示意图,其中横坐标为水平尺寸,纵坐标为沿深度方向的纵向尺寸.发现 As 掺 HgCdTe 离子注入 pn 结结深在 $3.6 \sim 5.3\ \mu\text{m}$ 之间,而横向结尺寸沿纵向深度方向由接近表面处的约 $52\ \mu\text{m}$ 减小为在 $3.56\ \mu\text{m}$ 深度处的约 $40\ \mu\text{m}$.实验中设计注入区尺寸为 $40\ \mu\text{m}$,所以最大 n 区扩展处的扩展尺寸是设计尺寸的约 30%.结深测量结果与文献^[6]报道相似.所以 As 掺 HgCdTe 离子注入 pn 结深度远大于 B 离子注入深度,而且结的横向尺寸也有明显的扩展.这对于制备长波红外探测器是有益的,因为较深的 pn 结对抑制长波探测器中隧穿电流有一定的帮助.

由于 As 掺 HgCdTe 离子注入 pn 结结深尺寸远大于 Hg 空位掺杂 HgCdTe 注入 pn 结,所以在设计光电二极管阵列结构时应当考虑 pn 结的扩展效应,以有效抑制光敏元间串音的产生.

1.3 器件制备与测试

根据 pn 结尺寸测量的结果,光电二极管阵列光敏元尺寸设计为 $46\ \mu\text{m} \times 46\ \mu\text{m}$,规格为 256×1 ,阵列结构采用品字形排列,这样可以使得光敏元间距

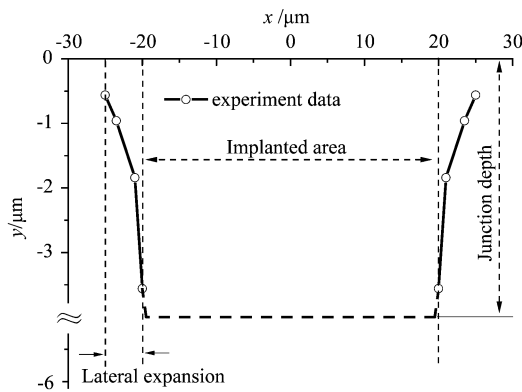


图2 As 掺长波 HgCdTe 离子注入 pn 结轮廓尺寸示意图
Fig. 2 Schematic illustration of the ion-implant junction profile on arsenic doped HgCdTe

远大于离子注入 pn 结的横向扩展,从而有效防止光敏元间的串音. 众所周知,富碲液相外延生长的 As 掺杂 HgCdTe 材料要经过高温热处理进行 p 型激活,而 Chandra 报道了高温热处理会改变 As 掺 HgCdTe 材料表面的电学特性^[7],所以实验中分别采用了常规和改进的两种表面腐蚀处理工艺对材料进行先行处理,再经离子注入、钝化介质膜生长、金属化电极、钢柱制备等工艺,制备了两种 n-on-p 平面结 As 掺 HgCdTe 长波红外光电二极管阵列探测芯片. 该 n-on-p 平面结器件剖面示意图如图 3 所示.

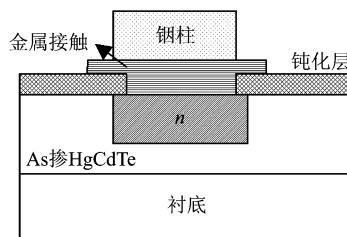


图3 n-on-p 平面结 As 掺 HgCdTe 长波器件示意图
Fig. 3 Schematic illustration of the device configuration

探测芯片的伏安特性的测量采用计算机控制的 Keithley236 系统. 系统采用电压触发,同时测量电压和电流. 测量中探测芯片安装在液氮制冷的杜瓦瓶中,制冷温度为 80 K,测量时,冷头上加上冷屏,样品处于零视场下. 器件光谱响应采用 Thermo Nicolet NEXUS 670 型傅里叶红外光谱仪测量.

2 实验结果

图 4 分别给出了采用常规和改进的表面工艺制备的 As 掺 HgCdTe 长波红外光电二极管阵列在 80

K 温度下的 $I-V/R-V$ 特性曲线以及相对响应光谱曲线.

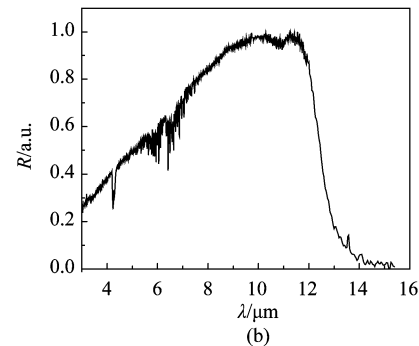
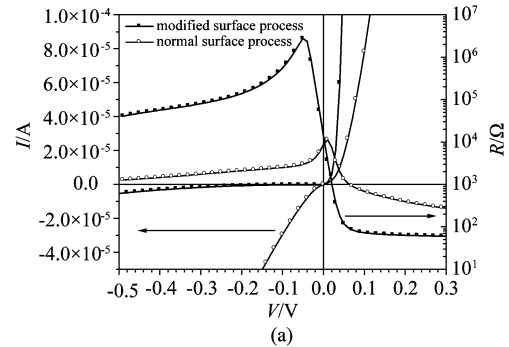


图4 (a)不同表面处理工艺器件 $I-V/R-V$ 曲线,(b) As 掺 HgCdTe 器件的相对响应光谱
Fig. 4 (a) $I-V/R-V$ curves of two devices by different surface processing, and (b) relative photo-response of the devices vs. wavelength

由图 4(a)中的 $I-V/R-V$ 曲线可以发现,改进表面工艺制备的器件(以下简称改进器件)伏安特性从整体上要远好于常规表面工艺制备的器件(以下简称常规器件). 常规器件零偏压时的暗电流为 1.14×10^{-6} A,零偏阻抗 R_0 约为 $8.8 \times 10^3 \Omega$,而改进器件零偏压时的暗电流约为 1.8×10^{-7} A, R_0 约为 $1.4 \times 10^4 \Omega$. 当反偏压增大到 -0.5 V 时,常规器件动态电阻约为 $1.3 \times 10^3 \Omega$,而改进器件动态电阻约为 $4.1 \times 10^4 \Omega$,比常规器件提高大约 30 倍. 常规器件的峰值动态电阻在 0.01 V 偏压下出现,为 $1.1 \times 10^4 \Omega$;而改进器件的峰值动态电阻在 -0.05 V 偏压下出现,为 $2.8 \times 10^6 \Omega$,其数值比常规器件提高了两个量级以上. 两种器件在反向偏压增大时都有一段结电阻快速下降的区域,常规器件出现在 $-0.05 \sim 0.01$ V 之间,改进器件在 $-0.15 \sim -0.05$ V 之间. 在正向偏压下,改进器件的电阻明显小于常规器件电阻, 0.5 V 偏压下改进器件阻抗约为 57Ω ,而常规器件阻抗约为 180Ω ,所以改进器件比常规

器件具有更好的欧姆接触. 图 4(b) 给出了 As 掺 HgCdTe 长波红外光电二极管在 80 k 下相对响应光谱曲线, 响应截止波长 λ_c . 定义为在长波方向上响应峰值的 50% 处所对应波长, 那么器件响应截止波长为 12.5 μm .

3 讨论

从图 4(a) 中看到, 改进器件正向偏压电阻很小, 表现出良好的欧姆接触的特性. 常规器件的正向电阻曲线表明其 MS 接触较差, 这可能是由于表面费米钉扎效应或者 HgCdTe 表面反型引起的. 而改进的表面处理工艺可以抑制表面费米钉扎效应或表面反型, 所以可以改善材料表面电学特性, 从而使得器件中的 p 型 MS 接触得以优化. 此外, 改进表面处理工艺还可以通过优化欧姆接触来降低长波红外探测器的部分噪声^[8].

器件在采用不同的表面处理工艺后, 反向偏压特性出现了明显的变化并获得了显著的提高, 这就表明在 As 掺 HgCdTe 红外光电二极管中, 表面漏电发挥着关键性的作用. 而常规器件的反偏特性很差, 应该是由表面漏电导致的. 众所周知, 长波 HgCdTe 往往存在表面反型的现象, 所以常规器件的表面漏电可能是由反型导致的表面沟道漏电引起的, 这符合其反偏电阻在远离零偏压后电阻变化缓慢的特点, 此外表面隧穿电流也可能对表面漏电有一定的贡献. 而改进表面处理工艺可以有效抑制表面的反型, 改善了表面-界面特性, 从而使得 pn 结本身的反向电学特性表现出来. 同时由 pn 结尺寸测量结果可知, 由于 As 掺 HgCdTe 离子注入 pn 结比较深, 所以 pn 结有很大一部分远离表面注入损伤区域, 这使得体内的 SRH 电流和 TAT 电流都将受到抑制. 此外, 又由于内部的 n 区掺杂浓度要低于表面处 n 区掺杂浓度, 那么内部的直接隧穿 (BBT) 电流也受到一定的抑制, 所以改进器件获得了较好的反向伏安特性. 综上可知, 常规器件的电阻峰值对应的电压是由表面沟道漏电、表面隧穿漏电以及 MS 接触综合作用的结果, 而改进器件的情况是由扩散电流、产生复合电流以及隧穿电流综合作用的结果. 总之, 改进表面处理工艺可以有效抑制表面漏电通道, 明显改善光电二极管的电学特性.

4 结论

采用 As 掺 HgCdTe 材料制备了响应截止波长为 12.5 μm , 规格为 256 \times 1 的长波红外光电二极管阵列, 并对比了不同表面处理工艺制备的光电二极管电学性能. 实验设计了一种新的 pn 结测量方法, 对 As 掺长波 HgCdTe 离子注入 pn 结的尺寸仅进行了测量, 测得 pn 结深度在 3.6 ~ 5.3 μm 之间, 而其最大横向尺寸大约是设计尺寸的 1.3 倍. 实验中采用了新的改进表面处理工艺制备了 HgCdTe 光电二极管阵列, 并获得了良好的伏安特性. 相比常规表面处理工艺制备的器件, 新工艺制备的器件动态电阻峰值提高两个量级, 并且金属半导体接触性能也得到改善. 这种改善应该是新的表面处理工艺优化了材料表面性能引起的. 实验所做的工作为制备性能更优的 As 掺 HgCdTe 长波红外焦平面探测器打下了良好的技术基础.

致谢: 本工作得到了马伟平, 朱建妹, 曹菊英, 陈昱, 邢雯, 冯婧雯等的支持, 作者在此一并表示衷心的感谢.

REFERENCES

- [1] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors [J]. *SPIE*, 2009, 7388: 73880J-1.
- [2] Cheung D T. An overview on defect studies in MCT [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1985, 3(1):128-130.
- [3] Schaake H F, Tregilgas J H, Beck J D, *et al.* The effects of low temperature annealing on defects, impurities and electrical properties of (Hg, Cd) Te [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1985, 3(1):143-149.
- [4] Reine M B, Tobinand S P, LoVecchio P. Very long wavelength (>15 μm) HgCdTe photodiodes by liquid phase epitaxy[J]. *SPIE*, 2004, 5564:54-64.
- [5] Chu M, Terterian S, Gurgonian H K, *et al.* Commercialization of liquid phase epitaxy (LPE) HgCdTe material, detectors, and arrays[J]. *Proc. SPIE*, 1994, 2228: 194-200.
- [6] Kinch M A, Chandra D, Schaake H F, *et al.* Arsenic-doped mid-wavelength infrared HgCdTe photodiodes[J]. *J. Electron. Mater.*, 2004, 33: 590-595.
- [7] Chandra D, Weirauch D F, Schaake H F, *et al.* Growth of very low arsenic-doped HgCdTe[J]. *J. Electron. Mater.*, 2005, 34: 963-967.
- [8] Gopal V, Westerhout R J, Faraone L. Surface leakage current contribution to the dynamic resistance and 1/f noise in mid-wave mercury cadmium telluride infrared photodiodes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2008, 51: 532-536.