

文章编号:1001-9014(2011)03-0260-04

钝化界面植氢优化的碲镉汞中波红外探测芯片

叶振华^{1,2}, 黄建^{1,2}, 尹文婷^{1,2}, 冯婧文¹, 陈洪雷¹, 陈路¹,
廖清君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:报道了在钝化界面进行低能等离子体植氢优化的 n^+ -on-p 碲镉汞 (HgCdTe) 中波 (MW, mid-wavelength) 光伏红外探测芯片的研究成果. 基于由采用分子束外延技术生长的 HgCdTe 薄膜材料, 通过注入阻挡层的生长、注入窗口的光刻、形成光电二极管的 B^+ 注入、钝化介质膜的生长、优化钝化界面的等离子体植氢、金属化和钢柱列阵的制备等工艺, 得到了钝化界面植氢优化的 HgCdTe 中波红外探测芯片. 从温度为 78K 的电流与电压 (I - V) 和动态阻抗与电压 (R - V) 特性曲线中, 发现钝化界面植氢优化的 HgCdTe 红外中波探测芯片的光电二极管开启电压比未经过植氢处理的增加了 50mV 左右, 零偏与反偏动态阻抗提高了 10 倍, 且正向串连电阻也明显减小. 这表明钝化界面等离子体植氢处理可以抑制 HgCdTe 中波光电二极管的暗电流和优化探测芯片的欧姆接触, 从而能提高中波红外焦平面探测器的探测性能.

关键词: HgCdTe; 钝化界面; 等离子体植氢; 暗电流

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

HgCdTe mid-wavelength infrared detector with interface passivated by hydrogen implantation

YE Zhen-Hua¹, HHUANG Jian^{1,2}, YIN Wen-Ting^{1,2}, FENG Jing-Wen¹, CHEN Hong-Lei¹,
CHEN Lu¹, LIAO Qing-Jun¹, 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 Science, Shanghai 200083, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The results of n^+ -on-p HgCdTe mid-wavelength infrared detector with a passivation interface is presented. The interface passivation process was optimized using high-density hydrogen plasma implantation. By implantation barrier layer deposition, ion-implantation window exposure, B^+ implantation, passivation film deposition, plasma hydrogen-implantation, metallization and indium-bump arrays fabrication, n^+ -on-p HgCdTe mid-wavelength infrared detector was obtained from a $Hg_{1-x}Cd_xTe$ film grown by MBE. Cut-in voltages of HgCdTe mid-wavelength detector Photodiodes with interface optimized were 50mV approximately larger than those of the one without optimization. The dynamic resistances at zero bias and reverse bias region were improved 10 times and dynamic resistances at the larger forward region were decreased significantly. Thus, it is obvious that plasma hydrogen-implantation is beneficial to suppress the dark currents and improve the ohmic contact of HgCdTe mid-wavelength infrared detector photodiodes, and then to enhance the operating dynamic range and performance uniformity.

Key words: HgCdTe; passivation interface; plasma-hydrogen-implantation; dark current

PACS: 85.60.Dw

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. 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

收稿日期: 2010-10-21, 修回日期: 2011-03-18

Received date: 2010-10-21, revised date: 2011-03-18

基金项目: 国防科技创新基金 (cxjj-10-m29, 9140A02021909zk0703)

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: zhye@mail.sitp.ac.cn.

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、智能化和甚中波等为特征的第三代红外焦平面^[1-3].与量子阱红外光探测(QWIP)的光电探测器相比,HgCdTe 光伏中波红外焦平面探测器具有更高的量子效率和工作温度.因而,HgCdTe 仍然是新一代中波红外探测器的首选材料^[2].

常规的 HgCdTe 中波 n^+ -on-p 平面型光伏红外探测芯片是基于采用分子束外延(MBE)技术生长的 p 型 HgCdTe 材料,并通过注入阻挡层的生长、离子注入区的光刻、形成 p-n 结的 B^+ 注入、硫化锌(ZnS)或 CdTe/ZnS 钝化膜生长、金属化和钢柱列阵的制备等工艺获得的.其中,表面钝化的质量与光敏感元二极管的光电特性直接相关.表面钝化层不仅要起到绝缘的效果,而且还要使探测芯片的能带在表面处尽可能接近平带.因此,HgCdTe 红外焦平面光伏探测器的表面钝化是制备 HgCdTe 红外探测芯片的关键工艺^[4-6].

作为 HgCdTe 红外焦平面探测器常用的钝化方法,ZnS 或 CdTe 介质膜可在 HgCdTe 红外探测芯片表面起到绝缘的效果.但是,常规的 HgCdTe 探测芯片工艺难免在钝化界面还会存在一些未被中和的界面悬挂键,以及快态、慢态的界面电荷.这使常规钝化的 HgCdTe 红外焦平面探测器光敏感元阵列芯片钝化界面不可能真正处于平带,从而影响红外焦平面探测性能^[4-6].

为此,本文展开钝化界面低能等离子体植氢优化的 n^+ -on-p 型 HgCdTe 中波红外探测芯片的研究.首先,介绍 HgCdTe 中波红外探测芯片钝化界面植氢的方法和工艺设备.其次,介绍经过和未经过钝化界面植氢的中波光伏探测芯片的制备与测试.最后,分析经过和未经过钝化界面植氢的中波光伏探测芯片光电二极管的电流与电压($I-V$)和动态阻抗与电压($R-V$)特性曲线,并讨论 HgCdTe 中波探测芯片钝化界面植氢处理对光电性能的优化效果.

1 钝化界面植氢的方法与设备

1.1 钝化界面植氢的方法

钝化界面植氢优化是在 n^+ -on-p 型 HgCdTe 中波红外探测芯片的制备过程中,采用高密度、低能量的氢等离子体对 HgCdTe 红外探测芯片与 ZnS 钝化介质膜之间的界面进行植氢处理的芯片加工工艺.图 1 是 HgCdTe 中波探测芯片光电二极管的钝化介质膜生长与钝化界面植氢优化的示意图.如图 1 所示,钝化界面植氢优化是直接将经过热蒸发沉积钝

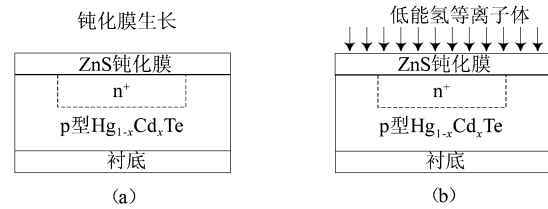


图 1 HgCdTe 中波探测芯片光电二极管的钝化介质膜生长与钝化界面植氢优化的示意图 (a) ZnS 钝化膜的热蒸发沉积 (b) HgCdTe 探测芯片 ZnS 钝化界面的植氢优化

Fig. 1 Passivation film growth and hydrogen-implantation of schematic diagram of HgCdTe mid-wavelength photo-detector (a) thermal deposition of ZnS film (b) hydrogen-implantation on the interface of ZnS passivation layer and HgCdTe photodetector

化膜的 n^+ -on-p 型 HgCdTe 中波红外探测芯片,暴露于低能量、高密度的氢等离子体中来实现的.

1.2 钝化界面植氢的设备

n^+ -on-p 型 HgCdTe 中波红外探测芯片的钝化界面植氢是在诱导耦合等离子体(ICP)增强反应离子刻蚀(RIE)设备上实现的.图 2 是本文钝化界面植氢工艺采用的 OXFOED 公司 ICP 增强型 RIE 设备结构简图.ICP 等离子体源是继 ECR 源后发展起来的一种新技术,与 ECR 源相比,ICP 源的结构要简单、工作要稳定和等离子体的均匀性也更好^[5].ICP-RIE 技术采用两个独立的 RF 源来分别控制产生等离子体的密度和等离子体刻蚀能量,能满足 HgCdTe 中波红外探测芯片钝化界面植氢优化的高等离子体密度、低刻蚀能量和高均匀性等特殊要求.

2 实验样品的制备与测试

基于由 MBE 技术生长的同一批 HgCdTe 材料和相同的芯片工艺加工平台,本文制备了经过和未经过钝化界面植氢的两类中波探测芯片,以对比研究 HgCdTe 中波探测芯片的钝化界面植氢优化的效

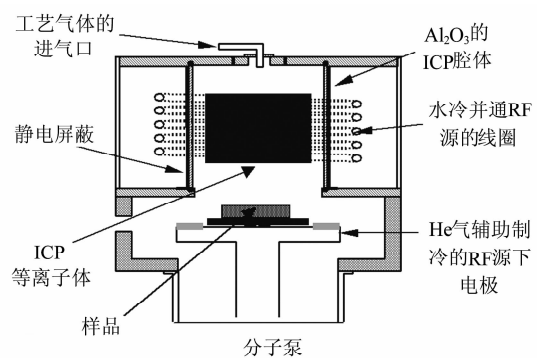


图 2 钝化界面植氢工艺采用的 ICP 增强型 RIE 设备结构简图 Fig. 2 Schematics of ICP enhanced RIE for hydrogen-implantation on the passivation interface

果. 中波探测芯片的光敏元尺寸为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$, B^+ 注入窗口大小都设计为 $22 \times 22 \mu\text{m}^2$, n 区金属化窗口的大小设计为 $8 \times 8 \mu\text{m}^2$.

制备两类中波探测芯片的 HgCdTe 材料是相同的. 它们都是采用 MBE 技术生长的厚度为 $10.3 \mu\text{m}$ 、 Hg 空位掺杂浓度为 $9.27 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 和组分 $x = 0.295$ 的中波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜材料. 同时, 两类中波探测芯片的离子注入阻挡层及其厚度、 B^+ 注入工艺、钝化介质膜生长工艺及其厚度, 以及金属化电极的制作工艺也都是相同的, 而且是同一批次完成的. 两类探测芯片制作工艺的最大区别是在芯片制作过程中, 钝化界面植氢的 HgCdTe 中波探测芯片在 B^+ 注入形成的 $n^+ \text{-on-p}$ 光电二极管阵列后, 增加了将 HgCdTe 中波红外探测芯片放置于 OXFOED 公司 ICP 增强型 RIE 设备产生的低能量、高密度氢等离子体进行处理的芯片加工工艺.

中波探测芯片的 I - V 特性曲线测试采用 Keithley 2400 SourceMeter 分析设备. 测量时, 中波探测芯片使用液氮进行制冷, 制冷温度为 78K . I - V 特性曲线采用电压触发, 同时测量电压和电流的方法来获得. 电流测量的准确率达到 100pA , 分辨率高于 20pA .

3 实验结果与分析

图 3 是经过和未经过钝化界面植氢的两类 HgCdTe 中波探测芯片光电二极管阵列在温度为 78K 时的 I - V 特性曲线, 以及由 I - V 特性曲线微分求倒数得到的 R - V 特性曲线. HgCdTe 探测芯片光电二极管阵列的响应光谱实验获得探测芯片的截止波长为 $5.3 \mu\text{m}$ (以峰值响应的 50% 计算).

如图 3 所示, 经过钝化界面植氢优化的 HgCdTe

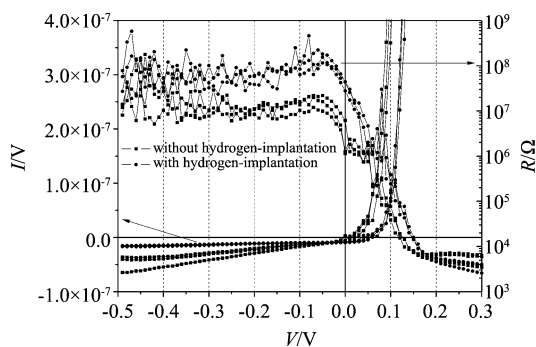


图 3 经过和未经过钝化界面植氢的 HgCdTe 中波光伏探测芯片的 I - V 和 R - V 特性曲线

Fig. 3 I - V and R - V characteristic curves of the HgCdTe mid-wavelength photodiodes with and without hydrogen-implantation on the passivation interface

红外中波探测芯片光电二极管的开启电压比未经过植氢处理的增加了 50mV 左右. 而且, 钝化界面植氢优化的 HgCdTe 红外中波探测芯片的光电二极管零偏与反偏动态阻抗比未经过植氢处理的提高了 10 倍, 并在大的正向偏压下钝化界面植氢优化的 HgCdTe 红外中波探测芯片的光电二极管动态阻抗也明显减小. 这表明钝化界面等离子体植氢可以抑制 HgCdTe 中波光电二极管的暗电流和优化探测芯片的欧姆接触, 从而能提高中波红外焦平面探测器的探测性能.

4 讨论

如图 3 所示, 经过和未经过植氢处理的 HgCdTe 探测芯片光电二极管动态阻抗, 在反向小偏压下先后达到了各自的最大值, 并随反向偏压的继续增加都基本不再变化. 然而, 经过植氢处理的 HgCdTe 探测芯片光电二极管动态阻抗比未经过植氢处理的提高了 10 倍, 且其开启电压比未经过植氢处理的增加了 50mV 左右. 这可能与植氢处理改善了 HgCdTe 探测芯片与钝化层之间的界面特性有关. 由于若在 HgCdTe 探测芯片与钝化层之间界面存在正的固定电荷, 不仅会减小光电二极管的开启电压, 还会引起 HgCdTe 探测芯片表面反型, 从而导致探测芯片大的表面沟道漏电流^[4,6]. 因此, 推断低能等离子体中的小体积氢原子、离子与钝化界面的不饱和键和有害电荷发生了相互作用, 致使钝化界面植氢处理减小了在 HgCdTe 探测芯片与钝化层之间界面正的固定电荷, 从而改善了 HgCdTe 探测芯片与钝化层之间的界面特性.

又如图 3 所示, 经过植氢处理的 HgCdTe 探测芯片光电二极管动态阻抗在大的正向偏压下比未经过植氢处理的减小得非常明显. 这可能是由于钝化界面植氢处理优化了 HgCdTe 探测芯片表面的电学特性, 从而改善了 HgCdTe 中波探测芯片金属化工艺的欧姆接触, 进而能减小探测芯片光电二极管的串联电阻. 因此, 钝化界面植氢处理还可以通过优化欧姆接触来降低中波红外焦平面探测器的部分噪声^[6].

5 结论

本文展开了 $n^+ \text{-on-p}$ 型 HgCdTe 中波红外探测芯片钝化界面等离子体植氢的研究. 基于由采用 MBE 技术生长的 HgCdTe 薄膜材料, 通过阻挡层的生长、注入窗口的光刻、 B^+ 注入、低能氢等离子体植

(下转 267 页)

6206:620610-1—620610-10.

- [7] Bergeron A, Jerominek H, Doucet M, *et al.* Lightweight uncooled TWS equipped with catadioptric optics and microscan mechanism [J]. *Proc. SPIE.* 2006, **6206**: 620662061N-1—62061N-14.
- [8] Cabanski W, Breiter R, Mauk K-H, *et al.* Miniaturized high performance staring thermal imaging system [J].

Proc. SPIE. 2000, **4028**:208—219.

- [9] JIN Wei-Qi, WANG Chun-Yong, ZHANG Nan, *et al.* Study on sub-pixel processing algorithm for scanning FPA thermal imaging system[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (金伟其,王春勇,张楠.等.扫描型焦平面热成像系统的亚像元处理算法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4): 261—264.

(上接 262 页)

氢、金属化和钢柱列阵的制备等工艺,得到了钝化界面植氢的 HgCdTe 中波红外探测芯片.实验发现钝化界面植氢优化的 HgCdTe 红外中波探测芯片的光电二极管开启电压比未经过植氢处理的增加了 50mV 左右,零偏及反偏动态阻抗提高了 10 倍,且正向串连电阻也明显减小.这表明钝化界面等离子体植氢处理可以抑制 HgCdTe 中波光电二极管的暗电流和优化探测芯片的欧姆接触,从而能提高中波红外焦平面探测器的探测性能.

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、陈洪雷和曹妩媚等的支持,作者在此一并表示衷心的感谢.

REFERENCES

- [1] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation in-

frared photodetector arrays [J]. *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 2009, **105**(09):091101 - 1.

- [2] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors[J]. *SPIE*, 2009, **7388**:73880J - 1.
- [3] 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/中波双色红外焦平面探测器. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(6):415—418.
- [4] Dewames R E, Williams G M, Pasko J G, *et al.* Current Generation Mechanisms In Small Band Gap HgCdTe p-n Junctions Fabricated by Ion Implantation [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1988, **86**:849 - 858.
- [5] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, ZHANG Hai-Yan, *et al.* Study of dark current for Mercury Cadmium Telluride long-wavelength photodiode detector with the different structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华,胡晓宁,张海燕,等.不同结构的碲镉汞中波光伏探测器的暗电流研究. *红外与毫米波*), 2004, **23**(2):86 - 90.
- [6] 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.