

文章编号:1001-9014(2012)01-0026-04

HgCdTe 长波光电器件阵列的等离子体修饰

叶振华¹, 尹文婷^{1,2}, 黄建^{1,2}, 胡伟达¹, 冯婧文¹, 陈路¹,
廖亲君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:报道了 HgCdTe 长波离子注入 n⁺-on-p 型光电器件阵列低能氢等离子体修饰的研究成果. 基于采用分子束外延 (MBE) 技术生长的 HgCdTe/CdTe 薄膜材料, 通过注入窗口的光刻与选择性腐蚀、注入阻挡层的生长、形成光电器件的 B⁺ 注入、光电器件阵列的低能氢等离子体修饰、金属化和铟柱阵列的制备等工艺, 得到了氢等离子体修饰的 n⁺-on-p 型 HgCdTe 长波光电器件阵列. 从温度为 78 K 的电流与电压 (*I-V*) 和动态阻抗与电压 (*R-V*) 特性曲线中, 发现经过低能氢等离子体修饰的 HgCdTe 红外长波光电器件阵列动态阻抗极大值比未经过修饰处理的提高了 1~2 倍, 并在反向偏压大于动态阻抗极大值所处的偏压时动态阻抗得到更为明显的提升. 这表明低能氢等离子体修饰可以抑制 HgCdTe 光电器件阵列暗电流中的带带直接隧穿电流 I_{bb} 和缺陷辅助隧穿电流 I_{ta} , 从而提高长波红外焦平面探测器工作的动态范围和探测性能的均匀性.

关键词:碲镉汞 (HgCdTe); 氢等离子体修饰; 光电器件阵列; 暗电流

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

HgCdTe long-wavelength photodiode arrays modified with high-density hydrogen plasma

YE Zhen-Hua¹, YIN Wen-Ting^{1,2}, HUANG Jian^{1,2}, HU Wei-Da¹, FENG Jing-Wen¹,
CHEN Lu¹, LIAO Qin-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 high-density hydrogen plasma modification for HgCdTe long-wavelength n⁺-on-p photodiode arrays were presented in this paper. n⁺-on-p HgCdTe long-wavelength photodiode arrays with photodiode modified by hydrogen plasma immediately after B⁺-implantation were fabricated from a Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe film grown by MBE. The maximum values of the dynamic resistance of the photodiodes in the arrays treated by hydrogen plasma were increased by one to two times compared with those of diodes without modification. The dynamic resistances of the diodes at larger reverse biases away from the maximum point of dynamic resistances were increased more significantly. Thus, it is obvious that hydrogen plasma modification was beneficial to the uniformity of operation dynamic range and detection performance of HgCdTe long-wavelength photodiode arrays because it can suppress the band-to-band tunneling currents and the trap-assisted tunneling currents in the diode.

Key words: HgCdTe; hydrogen plasma modification; photodiode arrays; 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

收稿日期: 2010-12-21, 修回日期: 2011-06-18

Received date: 2010-12-21, revised date: 2011-06-18

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

Foundation item: National Natural Science of China (6070612), Defense Technology Innovation Fund from Chinese Academy of Sciences (cxjj-10-m29)

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

平面探测器又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、智能化和甚长波等为特征的第三代红外焦平面^[1-4]. $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 热红外波段具有最高的大气窗口目标辐射能量,是红外探测技术中最为重要的波段. 这一波段的红外焦平面器件能提高探测系统的探测距离、缩短探测时间和精确探测目标温度等,具有十分重要的需求背景^[1-2].

红外焦平面探测器是由红外辐射敏感的光电二极管阵列和与之耦合的硅读出电路两个部分通过钢柱阵列混成互连获得的. 原有的 HgCdTe 长波 n^+ -on-p 型光电二极管阵列是基于采用分子束外延 (MBE) 技术在表面生长有 CdTe 介质膜的 p 型 HgCdTe 材料,并通过离子注入区的光刻、注入窗口的选择性腐蚀、注入阻挡层的生长、形成 p-n 结的 B^+ 注入、金属化和钢柱阵列的制备等工艺获得的. 然而,许多研究表明这类 HgCdTe 长波光电二极管阵列的电学特性明显受离子注入形成光电二极管阵列的诱发物理损伤的限制^[5-6]. 虽然,高温退火能部分修复离子注入损伤,并将光电二极管耗尽区往离开注入损伤区的方向推进,以减小离子注入诱发物理损伤对 HgCdTe 长波光电二极管电学特性的不利影响^[5-6],但是,高温退火存在工艺稳定性较差以及影响 HgCdTe 长波光电二极管介质膜钝化效果的缺点.

为此,开展了 n^+ -on-p 型 HgCdTe 长波光电二极管阵列氢等离子体修饰的研究. 首先,介绍 HgCdTe 长波光电二极管阵列的氢等离子体修饰方法和工艺设备. 其次,介绍经过和未经过氢等离子体修饰的长波光电二极管阵列的制备与测试. 最后,分析了经过和未经过氢等离子体修饰的长波光电二极管阵列的电流与电压 (I - V) 和动态阻抗与电压 (R - V) 特性曲线,并讨论了 HgCdTe 长波光电二极管阵列氢等离子体修饰的作用.

1 氢等离子体修饰的方法与设备

1.1 氢等离子体修饰的方法

氢等离子体修饰是在 HgCdTe 长波 n^+ -on-p 型光电二极管阵列的制备过程中,采用高密度氢等离子体对 B^+ 注入形成的光电二极管阵列的 n 区注入诱发物理损伤进行修复和 p-n 结能带结构进行优化的长波光电二极管阵列加工工艺. 图 1 是 HgCdTe 长波光电二极管阵列的成结与修饰的示意图. 如图 1 所示,氢等离子体修饰是直接对经过 B^+ 注入形成光电二极管阵列的 n^+ -on-p 型 HgCdTe 长波光电二

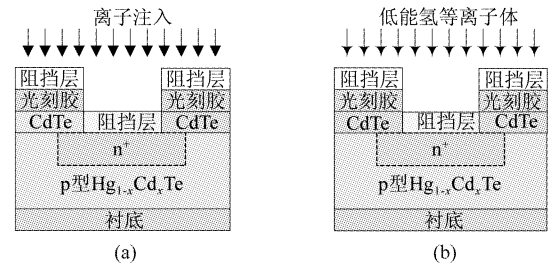


图 1 HgCdTe 长波光电二极管阵列的成结与修饰的示意图 (a)光电二极管阵列形成的 B^+ 注入 (b)光电二极管阵列的氢等离子体修饰

Fig. 1 Schematic diagram of HgCdTe long-wavelength photodiode formation and modification (a) B^+ implantation to form photodiode arrays (b) photodiode arrays modified by hydrogen plasma

极管阵列,暴露于低能量、高密度的氢等离子体中来实现的. 氢等离子体修饰工艺直接利用 B^+ 注入窗口的光刻图形,无需进行额外的 HgCdTe 长波光电二极管阵列光刻.

1.2 氢等离子体修饰的设备

n^+ -on-p 型 HgCdTe 长波光电二极管阵列的氢等离子体修饰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 是本文氢等离子体修饰工艺采用的 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^[6]. 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 长波光电二极管阵列氢等离子体修饰的高等离子体密度、低刻蚀能量和高均匀性等特殊要求.

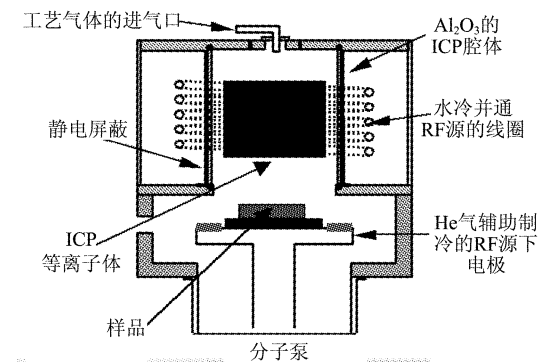


图 2 氢等离子体修饰工艺采用的 ICP 增强型 RIE 设备结构图

Fig. 2 Schematic drawing of ICP enhanced RIE for hydrogen plasma modification

2 实验样品的制备与测试

基于由 MBE 技术生长的同一批 HgCdTe 材料和相同的长波光电器件列阵工艺加工平台,本文制备了经过和未经过氢等离子体修饰的两类长波光电器件列阵,以对比研究 HgCdTe 长波光电器件列阵的氢等离子体修饰效果.长波光电器件列阵的光敏元尺寸为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$, 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 $8 \times 8 \mu\text{m}^2$.

制备两类长波光电器件列阵的 HgCdTe 材料是相同的.它们都是采用 MBE 技术生长的厚度为 $12.6 \mu\text{m}$ 、Hg 空位掺杂浓度为 $1.06 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 和组分 $x = 0.221$ 的长波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜材料.同时,两类长波光电器件列阵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.两类长波光电器件列阵制作工艺的最大区别是在长波光电器件列阵制作过程中,氢等离子体修饰的 HgCdTe 长波光电器件列阵在 B^+ 注入形成的 $\text{n}^+-\text{on-p}$ 光电器件列阵后,增加了将 HgCdTe 长波光电器件列阵放置于 OXFOED 公司 ICP 增强型 RIE 设备产生的低能量、高密度氢等离子体中进行的加工工艺.

长波光电器件列阵的 I - V 特性曲线测试采用 Keithley 2400 SourceMeter 分析设备.测量时,长波光电器件列阵使用液氮进行制冷,制冷温度为 78 K. 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 100 pA,分辨率高于 20 pA.

3 实验结果与分析

光电器件列阵在温度为 78 K 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.如图 3 所示,两类 HgCdTe 长波光电器件列阵动态阻抗在小反偏下随着反向偏压的增加指数增加,直至它们出现各自的最大值.这与在小反向电压范围内的暗电流以产生-复合电流为主的变化趋势是一致的^[6-7].在反向偏压 60 mV 附近,经过低能氢等离子体修饰的 HgCdTe 长波光电器件列阵动态阻抗极大值比未经过修饰处理的提高了 1~2 倍.

同时,在反向偏压大于动态阻抗极大值位置的偏压时,经过低能氢等离子体修饰的 HgCdTe 长波光电器件列阵动态阻抗得到更为明显的提升.这

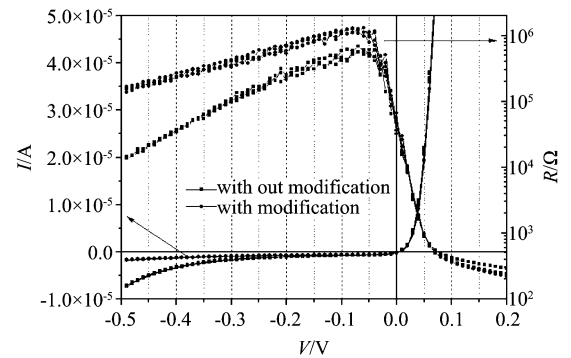


图3 经过和未经过氢等离子体修饰的 HgCdTe 长波光电器件列阵的 I - V 和 R - V 特性曲线

Fig. 3 I - V and R - V characteristic curves of the HgCdTe long-wavelength photodiode arrays with and without high-density hydrogen plasma modification

表明低能氢等离子体修饰可以抑制 HgCdTe 光电器件列阵暗电流中的带带直接隧穿电流 (I_{bbt} , band-to-band tunneling current) 和缺陷辅助隧穿电流 (I_{ta} , trap-assisted tunneling current), 从而能提高长波红外焦平面探测器工作的动态范围和探测性能的均匀性.

4 讨论

如图 3 所示,两类 HgCdTe 长波光电器件列阵动态阻抗,在反向小偏压下随反向偏压的增加而不断增大,且各自最大值位置的反向偏压也是基本相同的.这与它们采用完全相同的长波光电器件列阵加工工艺,特别是相同的钝化技术直接相关.由于两类 HgCdTe 长波光电器件列阵采用完全相同的钝化工艺,致使它们具有相同的界面特性和钝化效果.同时, HgCdTe 长波光电器件列阵在反向小偏压下光电器件的暗电流又以产生-复合电流为主.所以,两类 HgCdTe 长波光电器件列阵在小反向电压范围内具有相同的光电器件暗电流变化趋势.

从图 3 还可以看出,经过低能氢等离子体修饰的动态阻抗极大值比未经过修饰处理的提高了 1~2 倍.这可能是由于低能氢等离子体修饰能有效修复离子注入 n 区的注入诱导物理损伤,从而抑制了 HgCdTe 长波光电器件的缺陷辅助隧穿电流.较好钝化效果的长波光电器件列阵在动态电阻极大值位置,其光电器件暗电流由缺陷辅助隧穿电流和产生-复合电流共同主导.由于两类 HgCdTe 长波光电器件列阵具有相同的钝化界面特性和基本相等的产生-复合电流,可推断 HgCdTe 长波光电器件列

(下转 34 页)

- [6] YANG Hui, HOU Rui. An Analysis of Radome CBSE[J]. *Journal of Microwaves* (杨晖,侯瑞. 天线罩交叉瞄准误差成因分析. *微波学报*), 2006, **22**: 82 - 85.
- [7] WILSON K S. Polarization Sensitivity of Monopulse Radar Boresight Error Induced by Large, Ogive Radomes[R]. *Air Force Institute of Technology*, 1994.
- [8] WILSON K S, PYATI V P. Dependence of Monopulse Radar Boresight Error on Incident E-Field Polarization[C]. *IEEE International Radar Conference*, 2002: 568 - 572.
- [9] MENG Hong-Fu, DOU Wen-Bin, YIN Kai. Analysis of Antenna-Radome System at Millimeter Wave Band[C]. *Global Symposium on Millimeter Waves Proceeding*, 2008, (1): 380 - 383.
- [10] MENG Hong-Fu, DOU Wen-Bin, CHEN Tian-Tian, et al. Analysis of Radome Using Aperture Integration-Surface Integration Method With Modified Transmission Coefficient[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009, **30**(2): 199 - 210.

(上接 28 页)

阵动态阻抗极大值的提升是低能氢等离子体修饰抑制了光电二极管的缺陷辅助隧穿电流引起的. 又由于缺陷辅助隧穿电流与缺陷辅助中心的密度直接相关,因而可进一步推测低能氢等离子体修饰有效修复了离子注入 n 区的注入诱导物理损伤,从而减小了产生缺陷辅助隧穿电流的缺陷辅助中心的密度^[9].

在反向偏压大于动态阻抗极大值所处的偏压时,经过低能氢等离子体修饰的 HgCdTe 长波光二极管动态阻抗比没有经过修饰处理的明显增大. 这表明低能氢等离子体修饰能有效抑制 HgCdTe 长波光二极管的带带隧穿电流. 而且,由于 HgCdTe 长波光二极管列阵的带带隧穿电流与光电二极管 p-n 结的能带结构直接相关^[9],可以推断 HgCdTe 长波光二极管列阵的低能氢等离子体修饰,将光电二极管的 p-n 结向离开注入损伤区的方向实现推进,从而优化了光电二极管的 p-n 结的能带结构,进而减小了带带隧穿电流.

5 结论

开展了 n⁺-on-p 型 HgCdTe 长波光二极管阵列氢等离子体修饰的研究. 基于采用 MBE 技术生长的 HgCdTe/CdTe 薄膜材料,通过注入窗口的光刻与选择性腐蚀、阻挡层的生长、B⁺注入、低能氢等离子体修饰、金属化和钢柱列阵的制备等工艺,得到了氢等离子体修饰的 HgCdTe 长波光二极管阵列. 实验发现低能氢等离子体修饰的 HgCdTe 红外长波光二极管阵列动态阻抗极大值提高了 1~2 倍,并在反向较大偏压下动态阻抗得到更为明显的提升. 这表明低能氢等离子体修饰可以抑制 HgCdTe 光电二

极管暗电流中的带带直接隧穿电流和缺陷辅助隧穿电流,从而能提高长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 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]. *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 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] Ye Zhen-hua, Wu Jun, Hu Xiao-ning, et al. Spectral Study of HgCdTe two-color Detector Arrays[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华,周文洪,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.
- [5] EBE H, Tanaka M, Miyamoto Y. Dependency Of p-n Junction Depth On Ion Species Implanted in HgCdTe. *Journal of Electronic Materials*, 1999, **28**(6): 854 - 857.
- [6] 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. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(2): 86 - 90.
- [7] Nguyen T, Musca C A, Dell J M, et al. Dark Currents in Long Wavelength Infrared HgCdTe Gated Photodiodes[J]. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 2004, **33**(6): 621 - 629.