

文章编号: 1672-8785(2023)08-0028-06

硅基碲镉汞红外探测器 表面钝化研究

戴永喜 何 斌 郑天亮 宁 提 李 乾 张雨竹

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)材料的表面钝化是红外探测器制备中的关键工艺之一。高性能 MCT 器件需要稳定且可重复生产的钝化表面和符合器件性能要求的界面。因此, 探究 MCT 表面钝化技术具有重要意义。研究了 MCT 的分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)原位钝化与磁控溅射钝化两种钝化技术。结果表明, MBE 原位钝化膜层的致密性较好, 钝化层表面的缺陷孔洞较小, 钝化层与 MCT 的晶格匹配度较好, 器件流片的电流-电压($I-V$)特性要优于磁控溅射正常钝化。

关键词: 碲化镉; 分子束外延; 钝化; 电流-电压特性

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.08.004

Study on Surface Passivation of Silicon-based HgCdTe Infrared Detector

DAI Yong-xi, HE Bin, ZHENG Tian-liang, NING Ti, LI Qian, ZHANG Yu-zhu

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The surface passivation of mercury cadmium telluride (MCT) materials is one of the key processes in the preparation of infrared detectors. High-performance MCT devices require stable and reproducible passivation surfaces and interfaces that meet the device performance requirements. Therefore, it is of great significance to explore MCT surface passivation technology. Molecular beam epitaxy (MBE) in-situ passivation and magnetron sputtering passivation techniques of MCT were studied. The results show that the compactness of the in-situ passivation film by MBE is better, the defect holes on the surface of the passivation layer are smaller, the lattice matching between the passivation layer and the MCT is better, and the current-voltage ($I-V$) characteristics of the device streamer are better than normal passivation by magnetron sputtering.

Key words: CdTe; molecular beam epitaxy; passivation; current-voltage characteristics

收稿日期: 2022-11-23

作者简介: 戴永喜(1991-), 男, 山东临沂人, 工程师, 主要从事红外探测器芯片研究。

E-mail: BJUTYXD@163.com

0 引言

红外探测器发展历史悠久, 由第一代单元器件发展到第三代红外探测器, 应用领域也逐步向外扩展。MCT 材料的禁带宽度可调节, 电子有效质量小, 本征载流子浓度低, 可实现较高的量子效率^[1]。由 MCT 制成的红外探测器具有噪声低、探测率高、响应速度快等优点。硅基 MCT 材料有以下优点: 材料尺寸更大; 与读出电路的热匹配较好; 材料表面的平整度较高。这大大降低了红外探测器的制作工艺难度。因此, 硅基 MCT 材料已经越来越多地用于制作高性能大面阵中波及短波红外探测器。

短波和中波 MCT 红外探测器的暗电流水平基本取决于表面漏电情况。通过优化钝化技术可以大幅减少载流子的表面复合, 从而实现较低的暗电流水平。国际上, MCT 钝化技术包括磁控溅射、热蒸发、原子层沉积以及 MBE 等。本文通过对硅基 MCT 红外探测器的钝化进行初步研究, 对比了 MBE 钝化与磁控常规钝化的膜层状态以及后续的 $I-V$ 曲线特征, 最终发现 MBE 原位钝化技术可极大减少 MCT 的表面复合, 提高 $I-V$ 曲线的反向平坦区, 进而得到更稳定的 MCT 红外探测器。

1 实验步骤

1.1 样品制备

利用 MBE 生长系统在 CdTe/Si 复合衬底上制备 MCT^[2]。采用发射式高能电子衍射仪和红外高温计原位监控生长过程, 主要监控外延的表面状态与表面温度。

用相同方法制备两个 3 in 硅基外延 MCT 样品 A 与 B。

1.2 表征测试

在样品 A 的 MCT 材料生长后, 直接在 MBE 设备内对其进行原位钝化, 外延一层厚度约为 200 nm 的 CdTe。然后将样品 A 利用磁控溅射设备生长一层厚度约为 200 nm 的 ZnS。

在样品 B 的 MCT 材料制备好以后, 利用

磁控溅射设备生长双层复合钝化膜层 CdTe/ZnS(厚度分别为 100 nm 和 200 nm)。

用封闭石英管对钝化后的样品 A 与样品 B 进行热处理。利用椭偏仪测试样品的膜层厚度与折射率。使用聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)技术处理样品 A 与 B, 获得平整清晰的横截面。利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观测钝化层表面及其横截面形貌。然后进行红外探测器加工, 最终制备图 1 所示的器件结构。利用美国 Keithley 公司生产的 4200-SCS 系统进行电流-电压($I-V$)特性测试。

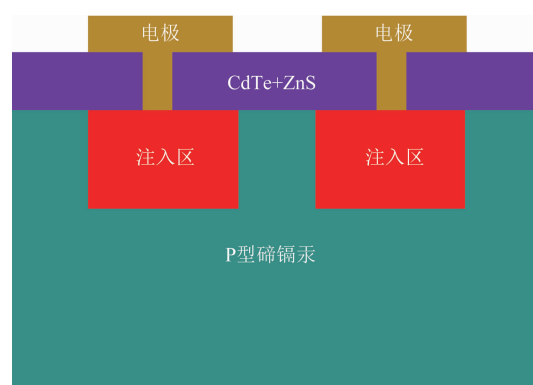


图 1 器件结构图

2 结果与讨论

2.1 钝化膜层的折射率分析

准备两片晶向为 $[110]$ 的双面抛光硅片, 分别通过 MBE 和磁控溅射生长厚度均为 200 nm 的 CdTe。膜层生长完成后, 利用法国 SOPRA 公司生产的光谱式椭偏仪完成了表 1 所示的膜层厚度与折射率表征。

一般来讲, 折射率可以表征钝化膜层的致密性。用椭偏仪表征膜层的厚度与折射率。从表 1 中可以看出, MBE 生长的 CdTe 膜层的折射率为 3.02, 大于磁控溅射生长的钝化膜层的折射率。也就是说, 在一定条件下, MBE 原位钝化生长的 CdTe 比磁控溅射生长的 CdTe 致密。以前曾有文献报道过此结果^[7]。

2.2 钝化表面及其横截面形貌

本次实验选取两片短波硅基材料。其中一

表 1 MBE 和磁控溅射生长的 CdTe 的膜层厚度与折射率

膜层种类	生长设备	膜层厚度/nm	折射率
CdTe	MBE	227	3.02
CdTe	磁控溅射	217	2.94

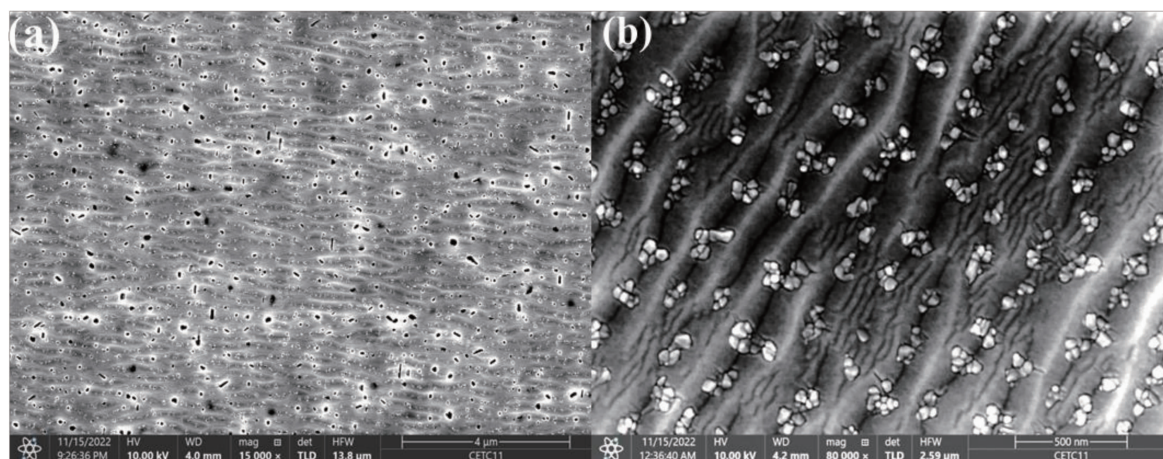


图 2 通过 MBE 法原位钝化的 CdTe 的 SEM 图

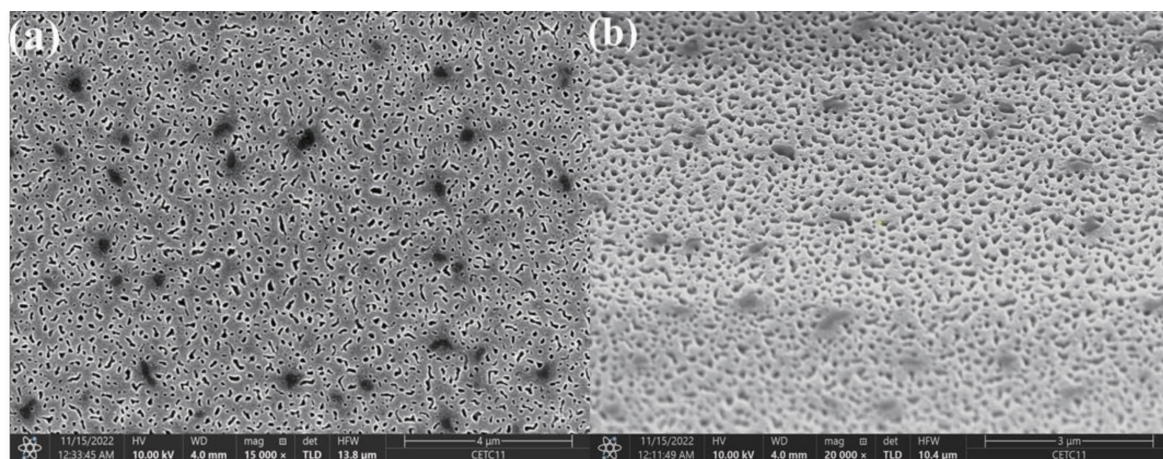


图 3 通过磁控溅射法钝化的 CdTe 的 SEM 图

片用 MBE 法进行原位钝化, 生长厚度为 200 nm 的 CdTe 膜层; 另一片用磁控溅射法进行钝化, 生长厚度为 100 nm 的 CdTe 膜层。图 2 所示为用 SEM 观察 MBE 钝化表面及其横截面形貌的结果。图 3 所示为用 SEM 观察磁控溅射钝化的结果。

通过对比图 2 与图 3 可以看出, MBE 原位钝化的 CdTe 呈较致密细致的单晶态, 原位钝化的 CdTe 表面形貌较好, 缺陷孔洞较少。由图 2(b)可以发现, CdTe 在生长过程中形成了晶粒, 因此用 SEM 观察时其表面有细小的晶粒物质。另外, 该表面出现相同方向的生长

波纹, 这是由 MBE 生长中的 $[211]$ 晶向到碲化镉生长时发生偏转导致的。

磁控溅射钝化的 CdTe 表面形貌较差。图 3(b)中出现了大量的不规则孔洞。它们可能是生长过程中原子团簇沉积到衬底上, 经过后熄火形成的缺陷孔洞。

图 4 是 MBE 原位钝化的器件横截面的 SEM 图。图 5 是磁控溅射钝化的器件横截面的 SEM 图。通过对比两者可以看出, 用 SEM 观察截面时, MBE 原位钝化的 CdTe 孔洞较小、数量也较少。磁控溅射钝化的 CdTe 孔洞较大且数量也较多。这些孔洞大多来源于生长

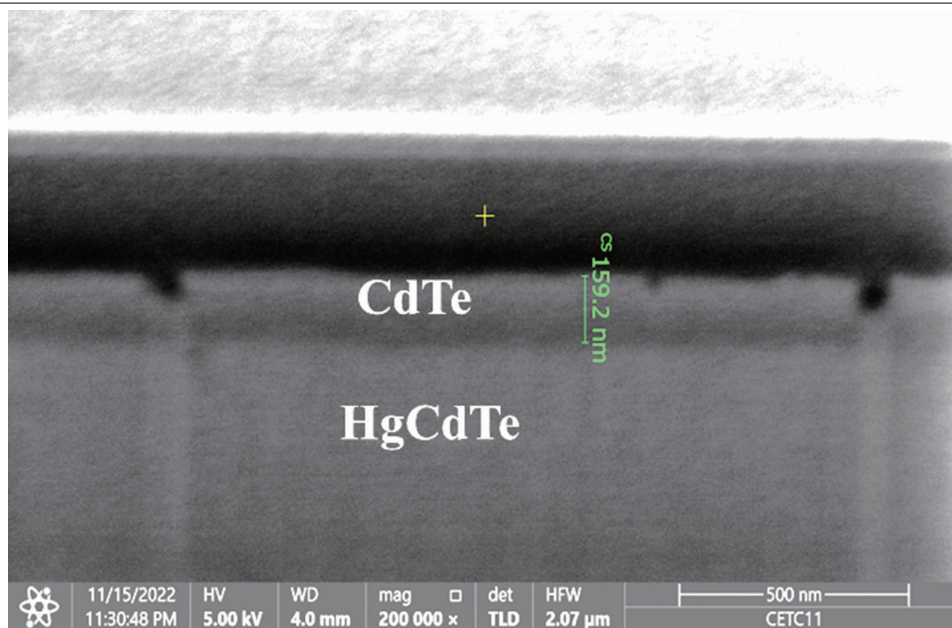


图 4 MBE 原位钝化的 FIB 截面的 SEM 图

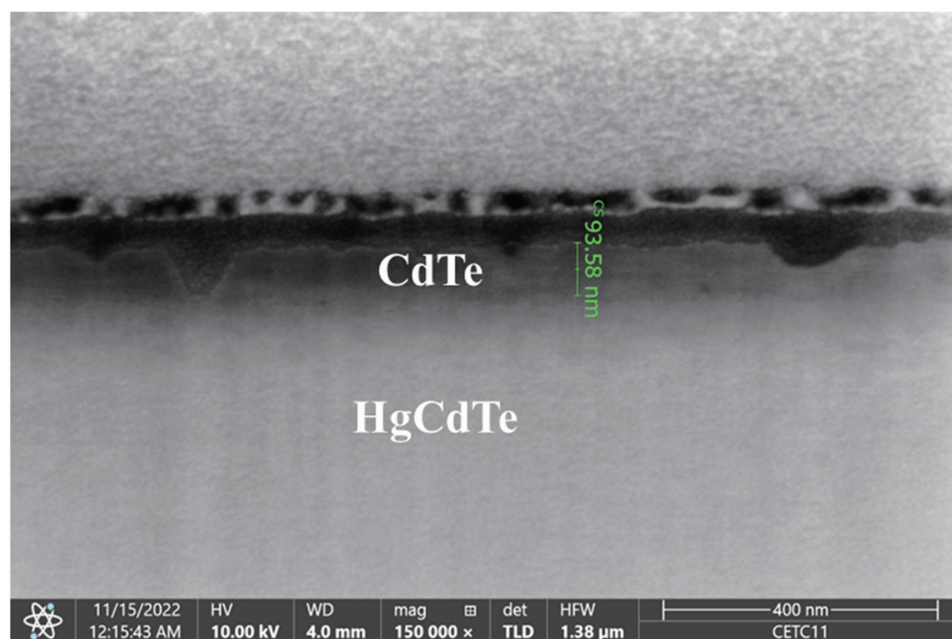


图 5 磁控溅射钝化的 FIB 截面的 SEM 图

过程中的缺陷。有些孔洞甚至直接贯穿整个钝化层。这些较大的孔洞对探测器流片过程中的接触孔腐蚀等其他工艺是否会产生进一步影响, 需要我们进一步去研究。

从钝化层与 MCT 接触的分层来看, MBE 原位钝化的分层更明显。两种不同钝化条件的芯片的热处理条件是相同的。原位钝化 MCT 和碲化镉之间主要依靠的是化学键作用, 退火时 310℃ 的温度不足以造成 Te-Cd 断裂, 仅存

在 Hg 交换, 所以退火后界面没有形成较好的“互扩散层”。磁控溅射钝化的 CdTe 与 MCT 在经过 310℃ 热处理后形成了较好的“互扩散层”。

2.3 不同钝化技术下的 $I-V$ 性能

在相同条件下同时对 MBE 原位钝化的短波硅基材料与磁控溅射钝化的短波硅基材料进行了热处理、光刻图形与电极沉积等器件流片工艺。对于采用不同钝化工艺制备的 MCT 短

波红外焦平面器件, 利用液氮制冷, 待温度稳定后使用美国 Keithley 公司生产的 4200-SCS 系统进行 I - V 特性测试。图 6 是 MBE 钝化芯片的 I - V 曲线, 图 7 是磁控溅射钝化芯片的 I - V 曲线。

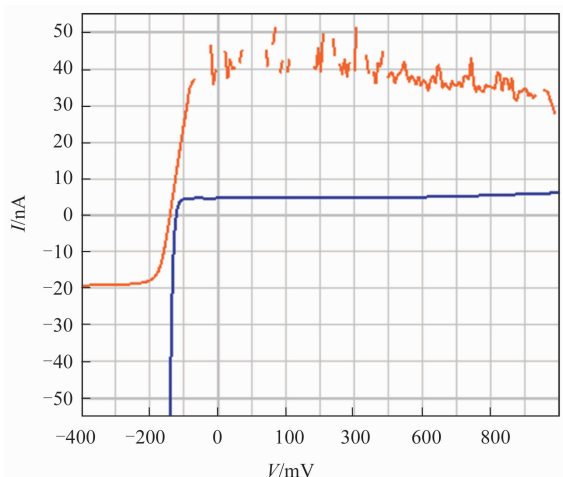


图 6 MBE 原位钝化芯片的 I - V 测试图

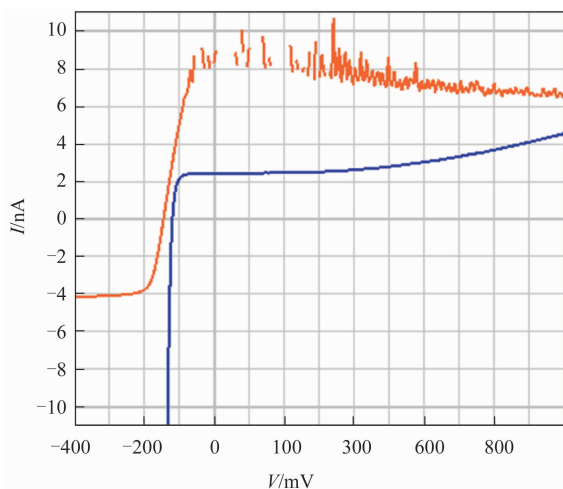


图 7 磁控溅射钝化芯片的 I - V 测试图

I - V 电学特性可以较好地表征器件 P-N 结的电学特性, 也可以从侧面表征钝化层的质量。优质的钝化层可以较好地消除材料表面的悬挂键, 降低表面暗电流, 使器件的电学性能得到进一步提升。

通过对比不同钝化条件的 I - V 测试结果可以看出: (1) MBE 原位钝化芯片的 I - V 结果是, 零偏阻抗值为 $2.8 \text{ G}\Omega$, 电流值为 3.45 nA , 反向平坦区可以达到 600 mV 。(2) 磁控溅射钝化芯片的 I - V 结果是, 零偏阻抗值为

$1.4 \text{ G}\Omega$, 电流值为 2.41 nA , 反向平坦区为 300 mV 。从数据对比来看, 磁控溅射钝化芯片的 I - V 结果较差, 这可能是由于常规 CdTe 钝化的红外探测器在生长 CdTe/ZnS 双层钝化膜前, MCT 材料经溴基腐蚀液腐蚀后, MCT 材料表面会有一段时间暴露于大气中, 此时表面会发生氧化, 形成的表面态对材料表面复合速率影响较大。钝化层表面缺陷孔洞较多, 也会影响表面的复合速率^[5-6], 导致器件的暗电流变大、 I - V 性能变差。对于 MBE 原位钝化的 CdTe, 在 MBE 生长完 MCT 后直接进行原位钝化, 不会使材料暴露在大气中, 因此 CdTe 与 MCT 之间可以形成一个良好的界面。MBE 原位钝化的 CdTe 表面缺陷孔洞较少, 因此它的 I - V 性能较好。

3 结束语

从折射率的表征结果发现, MBE 原位钝化膜层的致密性比磁控溅射常规钝化膜层好, 而且 MBE 原位钝化的钝化层表面的缺陷孔洞较小, 钝化层与 MCT 本身的晶格匹配度较好。对于 MBE 原位钝化的 CdTe, 在 MBE 生长完 MCT 后直接进行原位钝化, 不会使材料暴露在大气中, 因此 CdTe 与 MCT 之间可以形成一个良好的界面。MBE 原位钝化芯片的 I - V 性能结果较好, 零偏阻抗值为 $2.8 \text{ G}\Omega$, 电流值为 3.45 nA , 反向平坦区可以达到 600 mV 。实验结果表明, 原位钝化生长技术具有更致密的 CdTe 膜层和更洁净的表面, MBE 原位钝化比磁控溅射钝化有更明显的优势。MBE 原位钝化技术将是未来发展的重要方向之一, 其参数优化以及钝化后的热处理是我们以后研究的重点。

参考文献

- [1] 王丹. MBE HgCdTe/CdZnTe (211)B 表面缺陷研究 [J]. 红外, 2021, 10(7): 9-15.
- [2] 刘铭, 周立庆, 巩锋, 等. CdTe/Si 复合衬底 Ex-situ 退火研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(6): 917-920.

- [3] Rogalski A. Recent Progress in Infrared Detector Technologies[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2011, **54**(3): 136–154.
- [4] 叶振华, 黄建, 尹文婷, 等. MBE 原位碲化镉钝化的 MCT 长波光电二极管阵列 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(6): 495–498.
- [5] Bubulac L O, Tennant W E, Bajaj J, et al. Characterization of CdTe for HgCdTe Surface Passivation [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1995, **24**(9): 1175–1182.
- [6] Nemirovsky Y, Bahir G. Passivation of Mercury Cadmium Telluride Surface [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1989, **7**(2): 450–459.
- [7] Yuan S X, He L, Yu J, et al. Infrared Photoconductor Fabricated with a Molecular Beam Epitaxially Grown CdTe/HgCdTe Heterostructure [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, **58**(3): 914–916.