

文章编号: 1672-8785(2019)08-0015-04

分子束外延硅基碲镉汞材料技术研究现状

高 达 王经纬 王 丛 李 震 吴亮亮 刘 铭

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 目前, 高性能大面阵中波及短波红外探测器已经得到了越来越多的应用。材料参数控制精确、材料质量良好的碲镉汞材料是获得高质量碲镉汞探测器的先决条件。报道了华北光电技术研究所分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)生长硅基中波及短波碲镉汞材料方面的最新研究进展, 并介绍了现阶段 MBE 生长碲镉汞材料的研究现状。

关键词: 硅基碲镉汞; 分子束外延; 材料性能

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.08.002

Research Status of Si-based HgCdTe Material Technology Grown by Molecular Beam Epitaxy

GAO Da, WANG Jing-wei, WANG Cong, LI Zhen, WU Liang-liang, LIU Ming

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

Abstract: At present, high-performance mid-wave and short-wave infrared detectors with large array size have been used more and more widely. Mercury cadmium telluride (HgCdTe) material with precise control of material parameters and good material quality is a prerequisite for obtaining high-quality HgCdTe detectors. The latest research progress of silicon-based mid-wave and short-wave infrared HgCdTe materials grown by molecular beam epitaxy (MBE) in North China Research Institute of Electro-Optics is reported, and the current research status of MBE-grown HgCdTe materials is introduced.

Key words: Si-based HgCdTe; MBE; material property

0 引言

随着红外成像技术的发展, 超大规模、多光谱探测、智能集成化和更低综合成本的第三代焦平面探测器已经逐渐开始应用, 而且大型红外焦平面探测器的需求持续增长, 导致大尺寸、低缺陷、高质量、高均匀性红外探测器材

料的需求也在持续增加。其中, 碲镉汞材料由于具有许多理想的特性(禁带宽度随组分连续变化、可覆盖整个红外波段、本征载流子浓度低、电子迁移率高、载流子寿命长、吸收系数大等)而成为应用最为广泛的第三代焦平面探测器材料之一。

收稿日期: 2019-07-12

作者简介: 高达(1988-), 男, 河北黄骅人, 工程师, 主要研究方向为红外焦平面材料的制备与表征。
E-mail: 330589421@qq.com

传统的碲镉汞材料制备方法是使用液相外延的方式在碲锌镉单晶材料上进行外延生长。但由于高质量、大尺寸碲锌镉单晶材料生长困难,衬底不易加工以及与读出电路的热失配等原因,大尺寸碲锌镉基碲镉汞薄膜材料不易获得且价格高。因此,硅基复合衬底成为了大面阵碲镉汞材料的主要衬底之一。它拥有以下几个优势:(1)尺寸更大,为制备大尺寸碲镉汞材料提供了可能;(2)硅基材料与读出电路的热匹配,避免了互联过程中读出电路与碲镉汞材料的热失配问题;(3)平整度和粗糙度较高,在大面阵焦平面探测器制备中降低了器件工艺难度。因此,硅基复合衬底已经成为了最具优势的碲镉汞衬底之一,尤其在大面阵中波、短波碲镉汞探测器的制备中更具优势^[1]。下面介绍在 3 in 硅衬底上生长短波、中波红外材料的相关研究进展。

1 碲镉汞表面缺陷与材料均匀性

碲镉汞材料的均匀性主要包括组分和厚度的均匀性,它们会直接影响焦平面器件响应率和相应光谱特性的均匀性。为了获得均匀性良好的碲镉汞材料,需要改进 MBE 系统,以保证外延生长温度的均匀性和 MBE 系统源束流的均匀性。

碲镉汞表面缺陷会直接影响碲镉汞器件的性能,尤其是均匀性和盲元率。衬底缺陷和碲镉汞工艺过程是产生表面缺陷的主要原因。基于 MBE 获得的硅基碲镉汞材料的表面缺陷大都具有尺寸较小、缺陷种类较多、密度较高等特点^[2]。随着焦平面器件的像元间距越来越小,表面缺陷对盲元的增加有着直接的影响。由表面缺陷造成的盲元的数量随之增大,由缺陷导致连续盲元的数量也将增大。因此,低表面缺陷硅基碲镉汞工艺技术将成为碲镉汞材料技术的研究重点。

2 实验

实验所用设备为芬兰 DCA 公司生产的

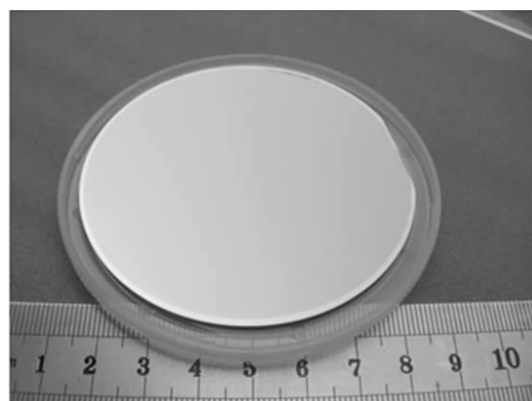


图 1 生长后的 CdTe/Si 复合衬底

P600 型 MBE 系统。该系统配有 CdTe 源、Te 源和阀控 Hg 源,所用 CdTe/Si 复合衬底(见图 1)由本实验室制备^[3]。

在生长过程中,使用反射式高能电子衍射(Reflection High-Energy Electron Diffraction, RHEED)装置和高温计对生长表面进行实时监控。其中,前者负责监控表面状态,后者负责监控表面温度。对于组分控制,在考虑粘附系数修正的情况下,依据式(1)来调整碲镉汞薄膜中 Cd 的组分:

$$x = \frac{BEP_{CdTe}}{BEP_{Te} + BEP_{CdTe}} \quad (1)$$

3 中波和短波碲镉汞材料

由于 MBE 生长碲镉汞材料的质量对生长参数的变化很敏感,因此获得高质量碲镉汞材料是颇有难度的。通过改进 MBE 系统来解决束流稳定性、束流测量精确性和生长温度控制稳定性等三个 MBE 生长碲镉汞材料精确控制的关键问题^[4],从而获得材料参数精确控制的各波段碲镉汞材料。接着,通过用正交试验优化生长参数来获得低表面缺陷的碲镉汞材料。

3.1 材料参数的均匀性

随着焦平面探测器向着更大面阵、更小像元间距的方向发展,对材料均匀性的要求越来越高。良好的组分与厚度均匀性是获得高质量大面阵碲镉汞探测器的基本条件之一。本文采用 WQF-310 型傅里叶变换红外光谱仪对碲镉

汞薄膜的厚度和组分进行测量。通过透过干涉曲线的叠加图计算各层薄膜的厚度。测量时, 选取 3 in 硅基碲镉汞材料上的 11×11 个点作为测量样本(步进值为 5 mm)。

从图 2 中可以看出, 3 in 中波碲镉汞材料中心处与边缘处的厚度差约为 0.2 μm, 3 μm 短波材料约为 0.11 μm, 2.6 μm 短波材料约为 0.09 μm, 均小于材料厚度的 2.5%。从图 3 中可以看出, 3 in 中波碲镉汞材料中心处与边缘处的组分差约为 0.0015, 3 μm 短波材料约为 0.001, 2.6 μm 短波材料约为 0.001, 均小于材料组分的 0.5%。

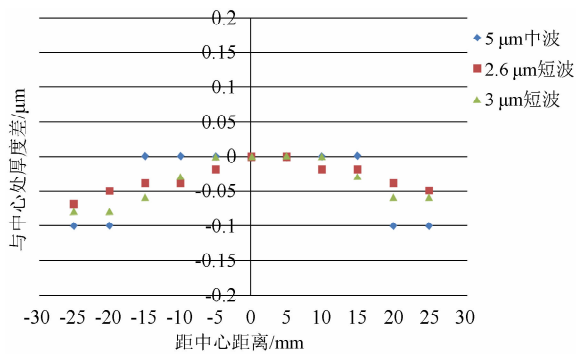


图 2 各波段碲镉汞材料的厚度均匀性

图 4 所示为多个批次工艺中各波段碲镉汞材料的波长统计结果。经分析可知, 大部分材料的截止波长都能控制在 0.1 μm 的波动范围之内。

3.2 材料缺陷密度

图 5 所示为某一片硅基碲镉汞材料的显微

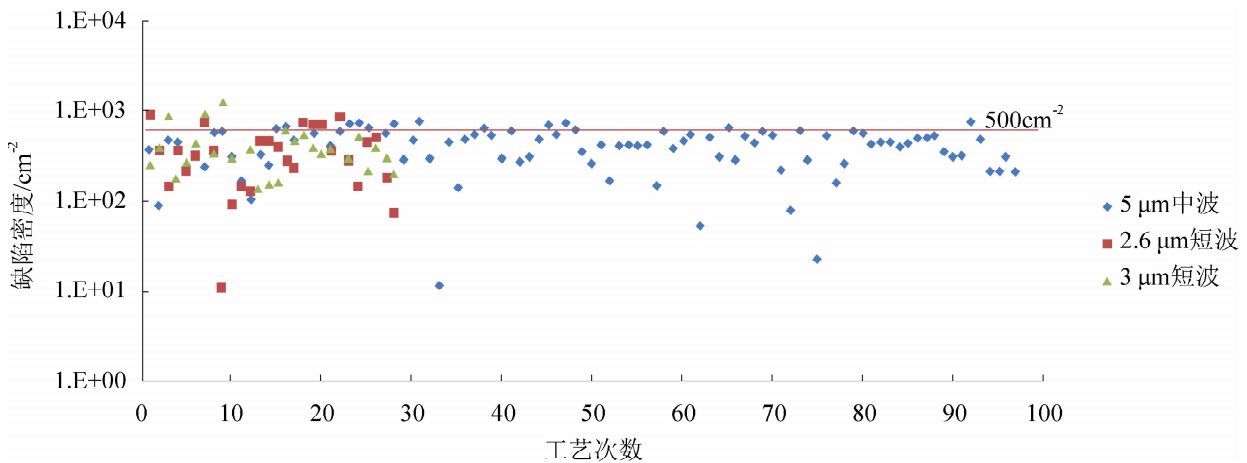


图 4 各波段碲镉汞材料的缺陷密度

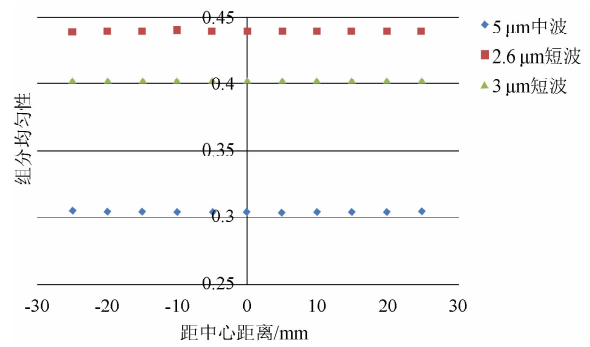
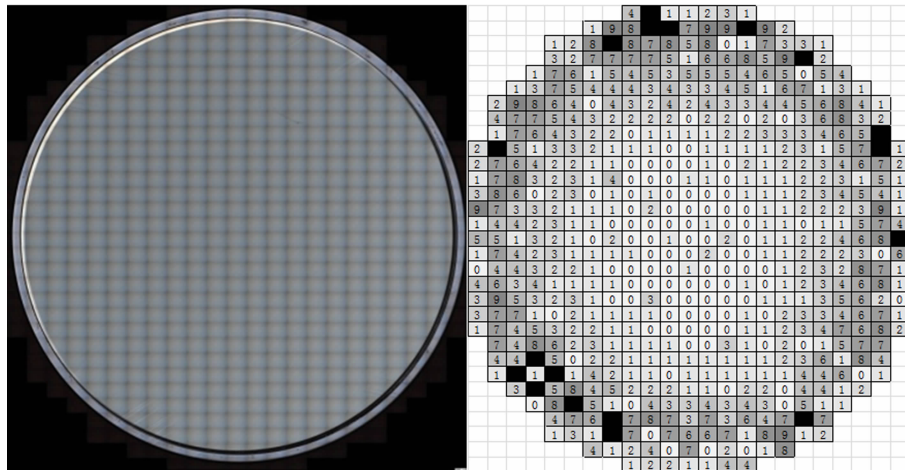


图 3 各波段碲镉汞材料的组分均匀性

镜照片拼接图以及缺陷密度(>2 μm 缺陷)统计结果。可以看出, 现有的工艺水平能够将碲镉汞缺陷控制在 100 cm⁻² 以内, 此片硅基碲镉汞材料的缺陷密度达到 57.83 cm⁻², 而且外延片中心区域的缺陷密度更低。该研究为我们获得高质量的大面阵碲镉汞探测器奠定了坚实的基础。

4 结论

经过多年的技术积累, 华北光电技术研究所已经具备了获得材料参数均匀性良好、缺陷密度低的高质量 3 in 硅基中波及短波碲镉汞材料的能力。碲镉汞材料的厚度均匀性控制在 2.5% 以内, 组分均匀性控制在 0.5% 以内, 多批次碲镉汞材料间的截止波长波动小于 0.1 μm, 碲镉汞材料的缺陷密度能够控制在 500 cm⁻² 以内。高质量的硅基碲镉汞材料为高性能、大面阵红外探测器的研制提供了坚实的材料基础。



| 代码 | 个数范围 | 单元格数量 |
|----------------------|---------|-------|
| 0 | 0~20 | 102 |
| 1 | 21~40 | 144 |
| 2 | 41~60 | 81 |
| 3 | 61~80 | 62 |
| 4 | 81~100 | 57 |
| 5 | 101~120 | 31 |
| 6 | 121~140 | 27 |
| 7 | 141~160 | 39 |
| 8 | 161~180 | 22 |
| 9 | 181~200 | 10 |
| 20 | >200 | 18 |
| 统计单元数 | | 593 |
| 平均密度/cm ² | | 57.83 |

图 5 某中波碲镉汞材料的缺陷密度统计

参考文献

[1] 王经纬, 巩锋, 刘铭, 等. Si 基碲镉汞分子束外延工艺优化研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42 (10): 1161-1164.

[2] He L, Wu Y, Chen L, et al. Progress in MBE growth of HgCdTe at SITP [C]. SPIE, 2002,

4795: 17-26.

[3] 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.

[4] 高达, 王经纬, 王丛, 等. 低缺陷 Si 基碲镉汞分子束外延工艺研究 [J]. 红外, 2018, 39 (10): 12-15.