

CdZnTe 中富碲沉积相缺陷引起的液相外延 HgCdTe 薄膜表面缺陷

张 阳, 吴 军, 木 胜, 左大凡, 李东升*

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 为了研究液相外延碲镉汞薄膜表面缺陷形成机制, 采用光刻工艺结合化学腐蚀方法在碲锌镉衬底表面实现了网格化, 研究了碲锌镉近表面富碲沉积相与外延薄膜表面缺陷的关系. 结果表明: 衬底近表面富碲沉积相会导致碲镉汞薄膜表面孔洞、类针形凹陷坑缺陷以及三角形凹陷坑聚集区; 在液相外延过程中, 高温碲镉汞熔液与 CdZnTe 衬底间的回熔作用可以减少与富碲沉积相相关的表面缺陷, 薄膜表面缺陷与衬底表面富碲沉积相的匹配度与回熔深度负相关; 回熔过程以及富碲沉积相形态、深度影响 HgCdTe 薄膜表面缺陷形态和分布.

关键词: 富碲沉积相; 液相外延; 碲镉汞; 碲锌镉; 表面缺陷

中图分类号: O484.1 **文献标识码:** A

Surface defects of Liquid Phase Epitaxial growth of HgCdTe film induced by Te-rich precipitates in CdZnTe substrates

ZHANG Yang, WU Jun, MU Sheng, ZUO Da-Fan, LI Dong-Sheng*

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Correlation between surface defects on Liquid Phase Epitaxial (LPE) growth of HgCdTe films and Te-rich precipitates in CdZnTe substrates were studied. Results shown that three kinds of surface defects of LPE growth of HgCdTe film are as follows: surface crater defects, pinhole-like defects and concave pits, which related to the Te-rich precipitates in CdZnTe substrates. Substrate remelting process during LPE growth of HgCdTe film can reduced these defects. There was the negative correlation between the depth of the remelting layer and the matching of the surface defects and the Te-rich precipitates. The remelting of substrate surface layers during the LPE process affect the number and morphologies of HgCdTe surface defects, as well as the depth and the morphologies of the Te-rich precipitates.

Key words: Te-rich precipitates, Liquid Phase Epitaxy (LPE), HgCdTe, CdZnTe, surface defects

PACS: 42.55.Px, 78.55.Cr, 78.67.De, 68.65.Fg

引言

HgCdTe 是一种重要的红外光敏材料, 通过调节镉组分, 其探测范围可以覆盖所有的红外波段. 基于材料优异的光电性能, 碲镉汞是制备高性能红外焦平面探测器最常用材料^[1-3]. 位错、表面缺陷、杂质以及化学计量比偏离是影响碲镉汞材料质量的主要因

素, 在 HgCdTe 应于大面阵、多色、甚长波红外焦平面探测器中, 高密度的材料缺陷被认为是重要的缺点^[4-6]. 对液相外延碲镉汞材料而言, 通常存在一定数量的表面缺陷, 10~30 μm 尺度的表面缺陷密度一般为 5~10 个/cm², 少数缺陷尺度大于 50 μm. 当像元处于或者接近材料缺陷区时会导致单个或者多个失效像元^[7], 尤其是在像元尺度逐渐降低, 红外

收稿日期: 2018-03-05, 修回日期: 2018-09-17

基金项目: 973 项目 (613230)

Foundation items: Supported by 973 Program (613230)

作者简介 (Biography): 张 阳 (1984-), 男, 内蒙古通辽人, 硕士学位, 主要研究领域为红外材料及器件. E-mail: 57868509@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: lds@irdc-km.com

Received date: 2018-03-05, revised date: 2018-09-17

焦平面阵列逐渐扩大的发展趋势下,表面缺陷对红外探测器性能的影响尤为严重.除了表面缺陷对焦平面器件有较大影响外,材料位错也是制约器件性能提升的重要因素,液相外延 HgCdTe 薄膜中位错密度一般在 $1E4 \sim 5E4 \text{ cm}^{-2}$ 之间,器件研究表明位错导致器件漏电流增加,其对 $1/f$ 噪音也存在影响^[7-14].表面缺陷、位错对材料均匀性的影响与红外探测器超大规模、多色、甚长波和高温工作的发展方向对碲镉汞材料的要求也是矛盾的^[15].

在液相外延过程中,一些表面缺陷被证明是起源于碲锌镉衬底,文献[16-17]发现 HgCdTe 薄膜表面缺陷与衬底缺陷存在较好的对应关系,部分实验中并不存在对应关系,说明了 HgCdTe 薄膜表面缺陷形成机制的复杂性,其与实验条件存在一定关系导致实验结果相互矛盾^[7].

本文研究了水平推舟富碲液相外延工艺中,碲锌镉衬底中富碲沉积相缺陷引起的 HgCdTe 薄膜表面缺陷以及二者间的相关性,分析了碲镉汞母液与碲锌镉衬底表面间的回熔作用对碲镉汞薄膜表面缺陷的影响.

1 实验过程

实验所用衬底为(111)B面 $\text{Cd}_{1-z}\text{Zn}_z\text{Te}$ ($z \approx 0.04$) (CZT),采用垂直布里奇曼单晶生长法生长,衬底沉积相检测方法为红外透射显微镜(Olympus BX61),衬底及薄膜表面形貌观察、记录采用配有 Nomarski 模式的光学显微镜(Olympus MX61)、扫描电镜(NOVA NANO SEM 200),白光干涉显微镜(NanoMap-D)用于分析 HgCdTe 薄膜表面缺陷形貌特征.

为了精确定位碲锌镉衬底富碲沉积相和液相外延 HgCdTe 薄膜表面缺陷,采用光刻工艺在碲锌镉衬底表面制备网格线,网格规格为(1 mm × 1 mm);显影后,在光刻胶保护下用 0.5% 的溴加氢溴酸溶液腐蚀 3 min,衬底表面网线区形成 3 ~ 5 μm 的沟槽,实现表面网格化;采用去胶清洗液去除衬底表面的光刻胶并进行清洁后,用光学显微镜、红外透射显微镜记录 CZT 衬底表面形貌,参见图 1(a-b);在该 CZT 衬底上采用富碲水平推舟液相外延技术进行碲镉汞薄膜生长,网格区域内为碲镉汞母液形成的网格线,薄膜表面存在与衬底相同的网格结构;将网格按顺序分组(2 × 2)编号,编号格式为(X#),用光学显微镜准确查找相应的网格并实现缺陷定位,参见图 1(c),便于分析相同区域衬底富碲沉积相和薄膜

表面缺陷的相关性.

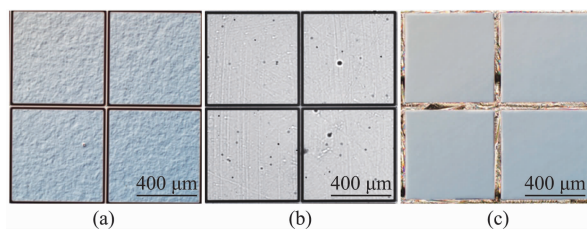


图 1 (a) CZT 46#区域的光学形貌,(b)红外透过形貌,(c) HgCdTe 薄膜 46#区域的光学形貌

Fig. 1 A patterned surface of CdZnTe substrates. (a) optical microscope image, (b) IR transmission image, (c) optical microscope image of Frame(46#) in the MCT film

2 结果及讨论分析

2.1 碲锌镉衬底富碲沉积相形貌特征

图 2(a-b)显示了富碲生长的碲锌镉衬底经过磨抛、化抛后露出表面的富碲沉积相缺陷的形貌特征.该缺陷典型的形貌特征为尺度大于 10 μm 的六边形或三角形结构,与文献所述富碲沉积相特征一致,EDX 测试结果显示该区域组分为 100% 的碲^[16,18].

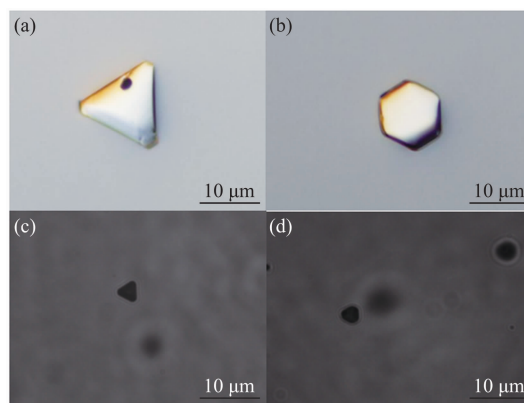


图 2 CZT 衬底表面富碲沉积相典型光学形貌(a-b) 以及其红外透射显微镜形貌(c-d)

Fig. 2 Morphological of the Te-rich precipitates in the surface of CdZnTe substrates; (a-b) optical microscope image, (c-d) IR transmission image

图 2(c-d)分别为图(a-b)所示富碲沉积相在红外透射显微镜 200 倍观察时的形貌.富碲沉积相对红外光的散射和吸收导致其在红外透射显微镜图谱内形成形状相似的阴影区,对于材料内部的沉积相缺陷,由于观察时聚焦于表面的原因,多虚化成近似圆形阴影区(图(d)右上角),观察发现在 CZT 表面也存在非标准形态(近似圆形、非规则多边形)的富

碲沉积相缺陷,表面沉积相在红外透射显微镜下的衬度、尺度有较大差别,与观测时富碲沉积相缺陷在表面的残留状态有关,50倍光学显微镜以及红外透射显微镜观察时富碲沉积相显示为黑色圆斑。

2.2 与富碲沉积相相关的碲镉汞薄膜表面缺陷

图3(a-b)分别为同区域碲锌镉衬底红外透射形貌和液相外延碲镉汞薄膜表面光学形貌,相同位置的方框区内存在富碲沉积相以及对应的薄膜表面孔洞缺陷(类型I)。沉积相阴影区尺度接近 $20\ \mu\text{m}$,放大后的光学形貌显示薄膜表面缺陷近似圆形(图3(c)),直径约为 $20\ \mu\text{m}$ 。结合白光干涉形貌(图3(d)、图3(e)),该缺陷为深度大于 $10\ \mu\text{m}$ 的孔洞,其深度与周围薄膜厚度相近,可以认为该缺陷起源于衬底;缺陷底部尺度约为 $5\ \mu\text{m}$,随着薄膜厚度的增加,缺陷尺度近似均匀变大,在薄膜表面凹陷区扩大至 $20\ \mu\text{m}$ 。

从缺陷形态上可以看到,缺陷底部尺度小于图3(a)中阴影区的尺度,一方面液相外延生长过程中,高温碲镉汞母液与碲锌镉衬底间的回熔作用对富碲沉积相有一定的消除作用;一方面红外透射形貌对缺陷有一定的放大作用。在碲镉汞晶体生长过程中,暴露于衬底表面的富碲沉积相与碲镉汞晶体间的晶格失配过大,导致晶体生长过程不能正常进行,形成表面孔洞。而且,碲镉汞母液与碲锌镉衬底表面间的回熔过程可能导致富碲沉积相处形成衬底表面凹坑,造成碲镉汞晶体生长异常,形成表面孔洞。显然,孔洞起源于衬底表面,其形态与富碲沉积相的尺度、深度以及回熔过程有关。

图4(a-c)分别为同区域碲锌镉衬底红外透射形貌和碲镉汞薄膜表面光学形貌,图4(b)为衬底方框区域附近的光学形貌。在方框区域内,光学观察衬底表面无可见的富碲沉积相,红外形貌中存在尺度较小,颜色较浅的阴影区,尺度约为 $5\ \mu\text{m}$,是存在于衬底近表面的富碲沉积相;碲镉汞薄膜表面存在对应的类针形表面缺陷(类型II)。1000倍光学形貌(d)显示该缺陷近似圆形,参考白光干涉形貌图4(e-f),该缺陷深度约为 $1.6\ \mu\text{m}$,凹陷区直径约为 $6\ \mu\text{m}$,缺陷底部区域尺度约为 $2\ \mu\text{m}$,存在台阶形状,随着薄膜厚度的增加,缺陷尺度均匀变大,距表面为 $0.4\ \mu\text{m}$ 时,薄膜表面凹陷区迅速扩大至 $6\ \mu\text{m}$ 。

碲镉汞薄膜中此类表面缺陷的主要特征是缺陷深度浅,缺陷底部处于薄膜内部;相对于表面孔洞,缺陷尺度较小。我们认为此类缺陷与碲锌镉衬底近表面较小的富碲沉积相有关,在液相外延工艺过程

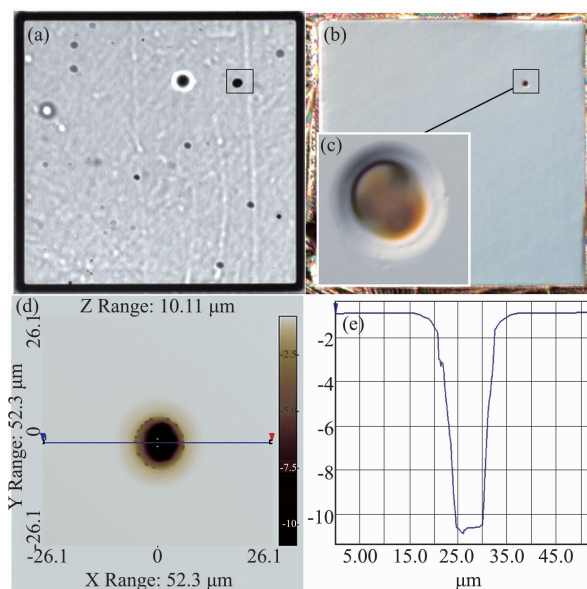


图3 碲镉汞薄膜表面孔洞缺陷:(a)相同区域碲锌镉衬底红外透射显微镜形貌,(b)HgCdTe薄膜表面缺陷光学形貌,(c)为孔洞缺陷区的1000倍光学形貌,(d)、(e)白光干涉显微镜记录的孔洞缺陷的空间形态

Fig. 3 Crater defects on the HgCdTe surface: (a) IR transmission image of CZT, (b) optical microscope image of HgCdTe film and (c) Enlarged morphologies of the crater defect, (d) (e) space morphology of the crater defect observed by white-light Interferometer microscope

中,衬底近表面富碲沉积相回熔后形成微小的凹陷区,在碲镉汞晶体生长过程中,形成薄膜表面凹陷坑。此类缺陷的形成与沉积相深度有关,只有近表面深度、形态合适的富碲沉积相可能导致此类表面缺陷。图(a)中存在其他沉积相缺陷,形态尺度有所不同,在图(b)中并不是都存在相应的表面缺陷,由红外显微镜聚焦时沉积相形貌衬度的变化可知,其为深度较深的富碲沉积相缺陷,对碲镉汞晶体生长过程无影响。近表面的富碲沉积相缺陷与碲镉汞薄膜表面缺陷的相关性比较复杂。一方面,在不损坏样品的情况下,在实验上很难精确测量沉积相深度;一方面,在液相外延工艺中,碲镉汞母液与衬底间的回熔作用能否消除衬底富碲沉积相的影响也很难确定。

图5(a)中碲锌镉衬底表面存在富碲沉积相缺陷1、2,缺陷1在图5(b)碲镉汞薄膜表面中存在与之对应的三角形凹陷坑聚集区3(类型III),分布范围大于 $10\ \mu\text{m}$,见图5(c)。图5(a)中缺陷1、2尺度约为 $10\ \mu\text{m}$;图5(d-e)显示薄膜表面凹陷坑最大深度约为 $0.22\ \mu\text{m}$,最浅的凹陷区深度接近 $0.1\ \mu\text{m}$,凹陷区直径约为 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 之间,缺陷为近似圆锥形,随着薄膜厚度的增加,缺陷尺度均匀变大。缺陷2对应的碲镉汞薄膜表面不存在表面缺陷。

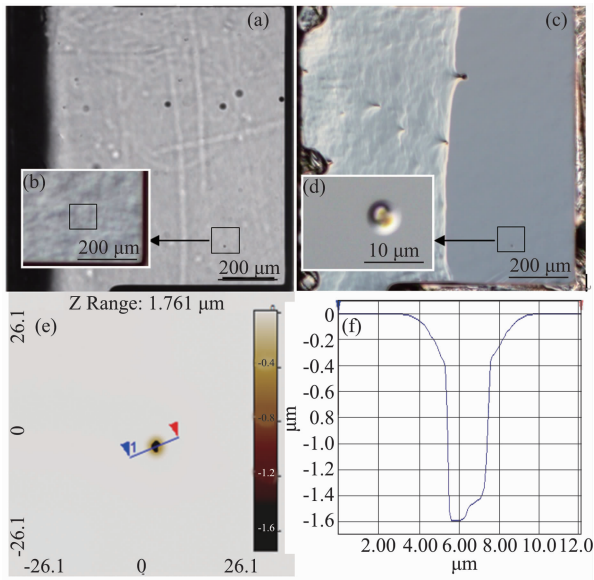


图 4 碲镉汞薄膜表面针形坑缺陷: (a) 碲锌镉衬底红外透射形貌, (b) 方框区域碲锌镉衬底光学形貌, (c) 碲镉汞薄膜表面光学形貌, (d) 方框内凹陷区缺陷区的 1000 倍光学形貌, (e-f) 凹陷坑缺陷的空间形态
 Fig. 4 pinhole-like defects on HgCdTe surface: (a) IR transmission image, (b) optical microscope image of CZT surface in the black box, (c) optical microscope image of HgCdTe surface, (d) enlarged morphologies, and (e-f) white-light interferometer image of the pinhole-like defects in the black box

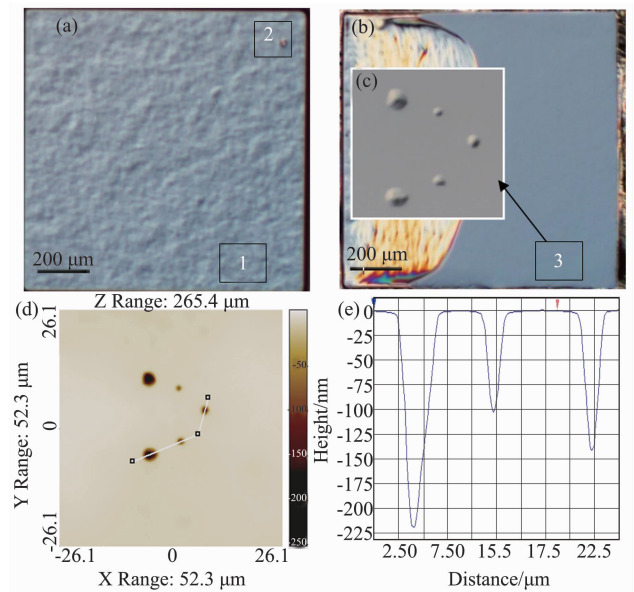


图 5 碲镉汞薄膜表面三角形凹陷坑缺陷: (a) 碲锌镉衬底光学形貌, (b) 相同区域碲镉汞薄膜表面形貌, (c) 方框内凹陷缺陷区 3 的 1 000 倍光学形貌, (d-e) 凹陷坑缺陷的空间形态
 Fig. 5 Concave pits defects in HgCdTe: (a) optical microscope image of CZT, (b) optical microscope image of HgCdTe of the same area, (c) enlarged morphologies, and (d-e) the white-light interferometer image of the concave pits

图 5(c) 中表面缺陷呈横“V”字形分布, 形成三角形聚集区, 参考图 2 中的富碲沉积相三角形结构, 结合位置对应关系可知其与表面富碲沉积相 1 有关, 液相外延工艺中, 回熔过程无法完全消除富碲沉积相 1, 残留的影响导致碲镉汞晶体生长后形成表面缺陷; 回熔过程消除了富碲沉积相 2 对碲镉汞晶体生长过程的影响, 碲镉汞薄膜表面无表面缺陷, 由于回熔作用, 碲锌镉衬底表面富碲沉积相与碲镉汞薄膜表面缺陷并不存在完全的对对应关系。

上述分析表明, 影响碲锌镉衬底富碲沉积相与碲镉汞薄膜表面缺陷之间的关系的主要因素有: 回熔过程、富碲沉积相形态、深度。三者的综合作用决定了是否会引起碲镉汞薄膜表面缺陷; 表面缺陷形态受到富碲沉积相形态的影响。

2.3 富碲沉积相与表面缺陷的相关性

进一步分析液相外延过程中回熔作用对碲镉汞薄膜表面缺陷的影响, 研究了碲镉汞薄膜边缘表面缺陷的分布状态, 图 6(a) 为碲锌镉衬底边缘区域以及对应的碲镉汞薄膜表面(b), 在薄膜边缘存在接近 0.4 mm 的过渡区(生长台阶), 衬底表面裸露的沉积相 1 在薄膜表面并无对应的表面缺陷; 沉积相 2 在 HgCdTe 薄膜与 CZT 衬底表面的过渡区内(生长台阶处), 薄膜边缘生长台阶内存在与之对应的表面缺陷 3。分别以生长台阶和薄膜内部区域统计 HgCdTe 薄膜表面缺陷数量(见图 6), 见表 1。其中 CZT 衬底富碲沉积相包括表面富碲沉积相(金相显微镜可见)和近表面富碲沉积相缺陷(红外透射显微镜可见), 显然近表面沉积相包括表面沉积相和

表 1 MCT 薄膜表面缺陷与富碲沉积相的分布相关性

Table 1 Correlation between defects on HgCdTe surface and Te-rich precipitates in CdZnTe substrate

分布位置	碲镉汞薄膜表面缺陷数量/个	对应 CZT 衬底近表面富碲沉积相数量(红外透过显微镜)/个	对应 CZT 表面富碲沉积相数量(金相显微镜)/个	碲镉汞薄膜表面缺陷与相应近表面富碲沉积相匹配度	碲锌镉表面富碲沉积相总数(金相显微镜)/个	表面富碲沉积相与相应表面缺陷匹配度
生长台阶(边缘)	11	10	6	90.9%	65	18.5%
薄膜内部	21	14	6	66.7%		

部分非常接近表面但并未暴露的沉积相缺陷。

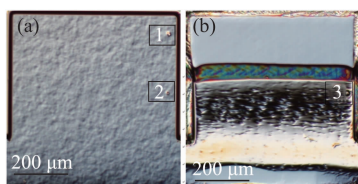


图6 碲镉汞薄膜边缘区的表面缺陷
Fig. 6 Surface defects in HgCdTe

由表1发现,与65个表面富碲沉积相位置对应的碲镉汞薄膜表面缺陷仅为12个(第3列),二者的匹配度仅为18.5%,也就是说在液相外延过程中,多数表面富碲沉积相缺陷被消除了;生长台阶处碲镉汞薄膜表面缺陷中与近表面富碲沉积相相关的表面缺陷占比为90.9%,在薄膜内部该比率为66.7%(第二列),衬底近表面富碲沉积相在生长台阶处更容易导致表面缺陷,可能的原因是在碲镉汞薄膜外延生长过程中,衬底边缘处回熔深度浅,导致边缘处表面缺陷与衬底表面富碲沉积相相关性较强。

为了证明上述结论,利用过热碲镉汞母液对CZT衬底回熔,而后水平推舟移走母液,图7为回熔过后CZT衬底边缘处表面回熔深度分布图,图中的凸起处为母液残留,对应液相外延碲镉汞薄膜边缘台阶的起始位置。可以看到,由母液边缘至较为平坦的回熔区底部,存在约为0.4 mm的过渡区,对应碲镉汞薄膜的生长台阶区域,过渡区内回熔深度由0逐渐增至4 μm。生长台阶处回熔深度较浅,液相外延过程CZT衬底近表面处的沉积相被消除的概率降低,这解释了为何在薄膜生长台阶处薄膜表面缺陷与衬底近表面处沉积相匹配度较高,匹配度与回熔深度负相关。富碲沉积相的成分接近单质Te^[16],单质Te的熔点为449.5℃,液相外延过程中的高温阶段母液温度高于500℃,有理由相信,碲镉汞母液对富碲沉积相具有较强的消除效果。回熔过程对于消除由富碲沉积相引起的表面缺陷有一定作用,富碲CZT衬底的液相外延工艺中,适当延长回熔时间有益于减少碲镉汞薄膜表面缺陷,实际应用需要评价工艺的可行性。

3 结论

在富碲水平液相外延碲镉汞薄膜生长工艺中,碲镉汞衬底近表面富碲沉积相会导致三种碲镉汞薄膜表面缺陷,分别是表面孔洞、类针形凹陷坑缺陷以及三角形凹陷坑聚集区。液相外延过程中,高温碲镉

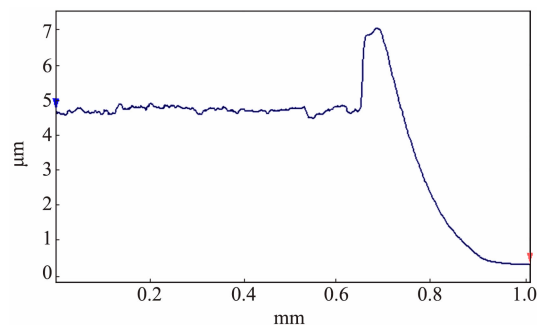


图7 CZT衬底边缘处表面回熔深度分布
Fig. 7 The depth of the remelting layer in CZT

汞熔液对碲镉汞衬底的回熔作用可以消除富碲沉积相的影响,消除效果受到回熔深度以及沉积相形态、深度的影响,碲镉汞衬底表面富碲沉积相与碲镉汞薄膜表面缺陷的匹配度与回熔深度负相关,适当延长回熔时间有益于减少薄膜表面缺陷;回熔过程以及富碲沉积相形态、深度影响碲镉汞薄膜表面缺陷的形态、分布。

References

- [1] Rogalski A. Infrared detectors: an overview [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, **43**:187–210.
- [2] Norton P. HgCdTe infrared detectors[J]. *Opto—Electronics Review*, 2003, **10**(3): 159–174.
- [3] Sun C H, Zhang P, Zhang T N, et al. ZnS Thin films grown by atomic layer deposition on GaAs and HgCdTe Substrates at very low temperature [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **85**: 280–286.
- [4] Aoki T, Chang Y, Badano G, et al. Defect characterization for epitaxial HgCdTe alloys by electron microscopy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, **265**: 224–234.
- [5] Wang H, Hong J, Yue F, et al. Optical homogeneity analysis of Hg_{1-x}Cd_xTe epitaxial layers: How to circumvent the influence of impurity absorption bands? [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **82**: 1–7.
- [6] Hu W D, Ye Z H, Liao L, et al. 128 × 128 long-wavelength/mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultralow spectral cross talk [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**: 5130–5133.
- [7] Sheng F F, Zhou C, Sun S, et al. Influences of Te-Rich and Cd-Rich precipitates of CdZnTe substrates on the surface defects of HgCdTe liquid-phase epitaxy materials [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(5): 1397–1402.
- [8] Yoshikawa M. Dislocation in Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_{1-z}Zn_zTe epilayers grown by Liquid-Phase Epitaxy [J]. *Journal of Applied physics* 1988, **63**(5): 1533–1540.
- [9] Johnson S M, Rhiger D R, Rosbeck J P, et al. Effect of dislocations on the electrical and optical properties of long-wavelength infrared HgCdTe photovoltaic detectors [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* 1992, **10**(4), 1499–1506.
- [10] D'Souza A I, Bajaj J, De Wames R E, et al. MWIR DLPH HgCdTe photodiode performance dependence on sub-

- strate material[J]. *Journal of Electronic Material*, 1998, **27**(6): 727–732.
- [11] Li Q, He J L, Hu W D, *et al.* Influencing sources for dark current transport and avalanche mechanisms in planar and mesa HgCdTe pin electron-avalanche photodiodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2018, **865**: 572–576.
- [12] Wang P, He J L, Xu J, *et al.* Parameters extraction from the dark current characteristics of mid-wavelength HgCdTe photodiode after annealing. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, **36**(3): 289–294.
- [13] Starr B, Mears L, Fulk C, *et al.* RVS WFIRST sensor chip assembly development results [J]. *Proc. of SPIE*, 2016, **9915**: 99150Q1–99150Q11.
- [14] List R S. Electrical effects of dislocations and other crystallographic defects in $H_{0.78}C_{0.22}Te$ n-on-p photodiodes[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1993, **22**(8): 1017–1025.
- [15] Zandian M, Scott D, Garnett J, *et al.* Ten-inch molecular beam epitaxy production system for HgCdTe growth [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, **34**:891–907.
- [16] Sen S, Liang C S, Rhiger D R, *et al.* Reduction of CdZnTe substrate defects and relation to epitaxial HgCdTe quality [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1996, **25**(8):1188–1195.
- [17] Price S L, Hettich H L, Sen S, *et al.* Progress in CdZnTe substrate producibility and critical drivers of IRFPA yield originating with CdZnTe substrates [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1998, **27**(6):564–572.
- [18] Belas E, Bugár M, Grill R, *et al.* Reduction of inclusions in (CdZn)Te and CdTe: In single crystals by post-growth annealing [J]. *Journal of Electronic materials*, 2008, **37**(9):1212–1218.

(上接第 727 页)

- [16] Yu X, Arbabi E, Goddard L L, *et al.* Monolithically integrated self-rolled-up microtube-based vertical coupler for three dimensional photonic integration [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2015, **107**(3):031102.
- [17] Schmidt J O, Eberl K. Nanotechnology, Thin solid films roll up into nanotubes [J]. *Nature*, 2001, **410**(6825): 168.
- [18] Yu D, Liu F. Synthesis of carbon nanotubes by rolling up patterned graphene nanoribbons using selective atomic adsorption [J]. *Nano Lett.* 2007, **7**(10):3046.
- [19] Prinz V Y, Seleznev V A, Gutakovskiy A K, *et al.* Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays [J]. *Phys. E*. 2000, **6**(1):828–831.
- [20] Huang M, Boone C, Roberts M, *et al.* Nanomechanical architecture of strained bilayer thin films: from design principles to experimental fabrication [J]. *Adv. Mater.* 2005, **17**(23):2860–2864.
- [21] Bell D J, Dong L X, Nelson B J. Fabrication and characterization of three-dimensional InGaAs/GaAs [J]. *Nano Lett.* 2006, **6**(4):725–729.
- [22] Schmidt O G, Deneke C, Manz Y M, *et al.* Semiconductor tubes, rods and rings of nanometer and micrometer dimension [J]. *Phys. E*. 2002, **13**(2-4): 969–973.
- [23] Mei Y F, Kiravittaya S, Harazim S, *et al.* Principles and applications of micro and nanoscale wrinkles [J]. *Mat. Sci. Eng. R*. 2010, **70**(3):209–224.
- [24] Schmidt O G, Schmarje N, Deneke C, *et al.* Three-dimensional nano-objects Evolving from a two-dimensional layer technology [J]. *Adv. Mater.* 2001, **13**(10):756–759.
- [25] Zhang L, Ruh E, Grützmacher D. Anomalous coiling of SiGe/Si and SiGe/Si/Cr helical nanobelts [J]. *Nano Lett.* 2006, **6**(7):1311.
- [26] Gerbode S J, Puzey J R, McCormick A G, *et al.* How the cucumber tendril coils and overwinds [J]. *Science*, 2012, **337**(6098):1087.
- [27] Huang J S, Liu J, Kroll B, *et al.* Spontaneous and deterministic three-dimensional curling of pre-strained elastomeric bi-strips [J]. *Soft Matter*. 2012, **8**(23):6291–6300.
- [28] Chen Z, Majidi C, Srolovitz D L, *et al.* Tunable helical ribbons [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2011, **98**(1):11341.
- [29] Deneke C, Zschieschang U, Klauk H, *et al.* InGaAs / GaAs/al-kanethiolate radial superlattices [J]. *Phys. Lett.* 2006, **89**(26): 828.
- [30] Maniwa Y, Fujiwara R, Kira H, *et al.* Multiwalled carbon nanotubes grown in hydrogen atmosphere: An x-ray diffraction study [J]. *Phys. Rev. B*. 2001, **64**(7):073105.
- [31] Hosoda M, Kishimoto Y, Sato M, *et al.* Quantum-well microtube constructed from a freestanding thin quantum-well layer [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2003, **83**(5): 1017–1019.
- [32] Zhen H L, Huang G S, Kiravittaya S, *et al.* Light-emitting properties of a strain-tuned microtube containing coupled quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2013, **102**(4): 828.
- [33] Krause B, Mocuta C, Metzger T H, *et al.* Local structure of a rolled-up single crystal: an X-ray microdiffraction study of individual semiconductor nanotubes [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2006, **96**(16): 165502.
- [34] Nishidate Y, Nikishkov G P. Generalized plane strain deformation of multilayer structures with initial strains [J]. *J. Appl. Phys.* 2006, **100**(11):181.
- [35] Deneke C, Müller C, Phillipp N Y J, *et al.* Diameter scalability of rolled-up In(Ga)As/GaAs nanotubes [J]. *Semicond. Sci. Tech.* 2002, **17**(12):1278–1281.
- [36] Songmuang R, Deneke C, Schmidt O G. Rolled-up micro- and nanotubes from single-material thin films [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2006, **89**(22): 493.
- [37] Fedorchenko A I, Wang A, Mashanov V I, *et al.* Strain-induced wrinkling on SiGe free standing film Cheng [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2006, **89**(4):828.
- [38] Sun Y, Choi W M, Jiang H, *et al.* Controlled buckling of semiconductor nanoribbons for stretchable electronics [J]. *Nat. Nanotechnol.* 2006, **1**(3):201–207.
- [39] Zhang T, Zhang X, Zohar Y. Buckling of polysilicon microbeams during sacrificial layer removal [J]. *J. Micro-mech. Microeng.* 1998, **8**(3):243–249.
- [40] Huang W, Cheng H H, Fedorchenko A L, *et al.* Strain on wrinkled bilayer thin film [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2007, **91**(5):1790.
- [41] Mora T, Boudaoud A. Buckling of swelling of swelling gels [J]. *Eur. Phys. J. E* 2006, **20**(2):119–124.
- [42] Cerda E, Mahadevan L. Geometry and physics of wrinkling [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2003, **90**(7):074302.