

# 过冷度对液相外延 HgCdTe 薄膜厚度均匀性的影响

陆 骏, 李东升\*, 吴 军, 万志远, 宋林伟, 李 沛, 张 阳, 孔金丞  
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:**探索了一种准确测量过冷度的实验方法,并在此基础上,利用光学显微镜、傅里叶红外透射光谱仪、台阶仪、白光干涉仪等测试手段分析了过冷度对 HgCdTe 薄膜厚度均匀性的影响. 研究表明,过冷度小于 2 °C,薄膜容易出现中心凹陷、四周凸起的现象;过冷度大于 3 °C,薄膜中心将会明显凸起,出现宽度为毫米级的周期性起伏,并伴随有 crosshatch 线产生. 当过冷度为 2.5 °C 时,薄膜厚度极差可缩小至 0.5 μm,0.5 mm × 0.5 mm 范围内薄膜相对于衬底的粗糙度增加量为 9.07 nm.

**关键词:**碲镉汞;过冷度;厚度均匀性;液相外延

**中图分类号:**TN304.2; O484.1 **文献标识码:**A

## Influence of supercooling on the thickness uniformity of HgCdTe film grown by LPE

LU Jun, LI Dong-Sheng\*, WU Jun, WAN Zhi-Yuan, SONG Lin-Wei,  
LI Pei, ZHANG Yang, KONG Jin-Cheng  
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** In this paper, a method to accurately measure the supercooling of HgCdTe films grown by LPE has been proposed. Influences of supercooling on the thickness uniformity of HgCdTe films have been studied by combining with optical Microscope, Fourier transform infrared (FTIR), step profiler and White-light Interferometer (WLI). Results show that, thickness in the center of a 20 mm × 25 mm film decreases when supercooling is less than 2 °C, while it increases significantly with cross-hatch pattern when supercooling is more than 3 °C. Thickness variation of a 20 mm × 25 mm film could be less than 0.5 μm, and the surface roughness is comparable with CZT substrate when the supercooling is around 2.5 °C.

**Key words:** cadmium mercury tellurium, supercooling, thickness uniformity, liquid phase epitaxy (LPE)

**PACS:** 78.55. Et, 85.60. Gz

## 引言

在各种目前已知的红外材料中, HgCdTe 材料由于具有高量子效率、禁带宽度可调节且覆盖整个红外波段的优势,使其成为高性能红外焦平面器件最常用的材料<sup>[1-3]</sup>. 液相外延技术(LPE)具有掺杂剂选择范围广泛、生产成本低以及可以制备高纯度、低位

错密度外延层的特点,是高性能 HgCdTe 薄膜的主要制备手段<sup>[4,6]</sup>. 富碲水平滑舟式液相外延是制造碲镉汞薄膜材料的主流技术之一,法国 Sofradir 公司采用水平滑舟式液相外延工艺作为 288 × 4、320 × 256、640 × 512 和 1 k × 1 k 等系列的碲镉汞红外焦平面材料的生产技术<sup>[7]</sup>,昆明物理研究所和河北光电研究所主要也采用富碲水平滑舟式液相外延技

收稿日期:2018-11-05,修回日期:2018-12-20

基金项目:973 项目(613230)

Foundation items: Supported by 973 Program (613230)

作者简介(Biography): 陆 骏(1993-),男,云南曲靖人,助理工程师,硕士研究生,主要从事红外探测器材料研究. E-mail: ricardo693@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author); E-mail: li\_d\_s@163.com

Received date: 2018-11-05, revised date: 2018-12-20

术<sup>[8]</sup>.

随着 HgCdTe 焦平面探测器向大面阵、小像元和低噪声方向发展,对 HgCdTe 外延材料厚度均匀性提出了更高要求<sup>[9-10]</sup>. 通过提高 HgCdTe 薄膜的厚度均匀性,可以提升包括响应率、盲元、非均匀性和信号强度等相关器件参数<sup>[11-14]</sup>. 从晶体学角度分析,过冷度提供了 HgCdTe 薄膜外延生长的驱动力,决定了外延生长速率,能够直接影响薄膜的均匀性<sup>[15]</sup>. 不仅如此,过冷度还与温度场分布、降温速率、母液厚度、汞损失等多因素耦合影响薄膜的均匀性. 由此引出了对水平滑舟式 HgCdTe 液相外延技术中过冷度参数优化的需求. 法国 Sofradir 公司在上世纪九十年代,使用富碲水平滑舟液相外延生长的 HgCdTe 薄膜厚度非均匀性在 2  $\mu\text{m}$  以内,而 2013 年其尺寸为 20  $\text{cm}^2$  的薄膜厚度非均匀性小于 0.5  $\mu\text{m}$ <sup>[16]</sup>;美国 Raytheon 公司报道其液相外延碲镉汞薄膜厚度非均匀性为 0.8  $\mu\text{m}$ <sup>[17]</sup>. 而国内上世纪 90 年代才开始对 HgCdTe 薄膜液相外延技术开展相关研究,在材料均匀性控制技术方面落后于西方国家. 上海技物所使用富碲垂直液相外延技术,外延生长的薄膜厚度标准差为 0.4  $\mu\text{m}$ <sup>[18]</sup>.

HgCdTe 薄膜水平滑舟式液相外延过程为:先将母液升温到混合温度待其均匀化后降温至  $T_d$ ,并移动石墨舟,改变母液与衬底的位置,使其接触开始外延生长,生长区需要控制降温速率  $\beta$ ,生长  $t_d$  时间后再次移动石墨舟,使母液与已经外延的薄膜分离,结束外延生长. 过冷度  $\Delta T_s$  定义为:

$$\Delta T_s = T_1 - T_d \quad (1)$$

式中,  $T_d$  是母液与衬底接触时的温度,  $T_1$  是母液与衬底接触时的液相线温度. 直接计算  $\Delta T_s$  会面临一个问题:  $T_d$  可以由设备精确控制,  $T_1$  取决于母液与衬底接触时母液的成分,与母液的配比、熔源条件和石墨舟气密性等有关,很难精确测量,一般只能通过经验估计,误差较大. 因此,需要找到一种能够通过实验准确测定过冷度的方法.

本文报道了一种能够精确测量 HgCdTe 薄膜过冷度的方法,并基于此方法研究了水平滑舟式液相外延 HgCdTe 薄膜技术中过冷度对薄膜厚度均匀性的影响.

## 1 实验方法

### 1.1 外延实验

过冷度对 HgCdTe 薄膜均匀性的影响探究实验使用的设备为 CVD 水平液相外延炉,实验分两步进

行:1)过冷度的精确测量;2)不同过冷度下外延生长 HgCdTe 薄膜. 具体实验步骤如下:

1)过冷度的测量使用 20 mm  $\times$  25 mm 规格的 (111)B 面  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$  (CZT) 衬底,实验前需要将衬底放入 0.25% 的溴甲醇溶液中腐蚀约 15 s,以获得清洁表面. 在一次外延过程中通过多次滑舟的方式进行过冷度测量,图 1 是多次滑舟实验示意图,将 CZT 衬底和 HgCdTe 母液装入石墨舟,加热到一定温度使母液熔融并均匀化后,开始第 1 次滑舟,使母液与衬底接触;以 0.1  $^\circ\text{C}/\text{min}$  速率降温,待母液与衬底接触 5 min、10 min、20 min、40 min 后分别滑舟 4 次,每次滑舟距离均为 5 mm;60 min 完成第 6 次滑舟,则使母液与衬底分离.

2)通过改变过冷度和外延时间,控制其他外延条件相同,外延生长 6 片厚度为  $(12 \pm 1)$   $\mu\text{m}$  的 HgCdTe 薄膜样品.

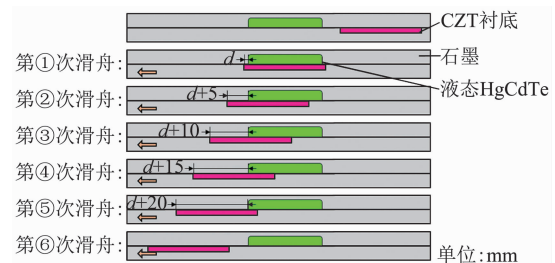


图 1 多次滑舟测量过冷度实验示意图

Fig. 1 Schematic of the supercooling measurement by moving graphite slider

## 1.2 样品表征

样品的厚度采用傅里叶红外透射光谱仪 (FIRT, Nuxus 670) 进行测量,测试光斑直径为 0.2 mm;采用台阶仪 (KLA-Tencor) 分析生长台阶及外延表面起伏;采用光学显微镜 (Olympus MX61 Japan) 观察样品表面微观形貌;采用白光干涉仪 (AEP NanoMap-D) 分析样品表面微观粗糙度和三维形貌.

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 过冷度的计算

以 B. Pellicari 提出的经典液相外延 HgCdTe 薄膜厚度经验公式<sup>[19]</sup>为理论基础,推导出液相外延 HgCdTe 薄膜的厚度  $d$  与外延时间  $t_d$  的关系:

$$d(t_d) = K(\Delta T_s t_d^{\frac{1}{2}} + \frac{2\beta t_d^{\frac{3}{2}}}{3}) \quad (2)$$

其中,  $\Delta T_s$  是过冷度,  $\beta$  是降温速率,  $K$  是一个二项式经验常数(量纲为  $\mu\text{m}/^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{1/2}$ ),只与不同石墨舟

和加热炉相关。

图 2 是采用 6 次滑舟外延生长得到的 HgCdTe 薄膜厚度分布,其中图 2(a)是使用 FIRT 测得的薄膜厚度结果,N 代表衬底基本没有外延上 HgCdTe 薄膜,薄膜最厚的地方在右边,厚度向左依次减小.从图 2(b)中金相显微镜测试的表面形貌可以发现,靠近上边缘的区域台阶清晰明显,靠近下边缘台阶逐渐向左边延伸,这与红外透射光谱得出的结果一致.使用台阶仪对距离上边界 7.5 mm 的区域进行厚度测试,其结果如图 2(b)所示,纵向分为 5 个台阶,每个台阶都有起伏主要是因为毛细作用和边界效应.其中台阶 4、5 平均厚度与红外透射光谱测试结果一致,说明台阶仪寻找的基准平面准确.台阶 1 表面较粗糙,主要是因为衬底与母液有过接触,发生回溶且残留了少量母液所致.

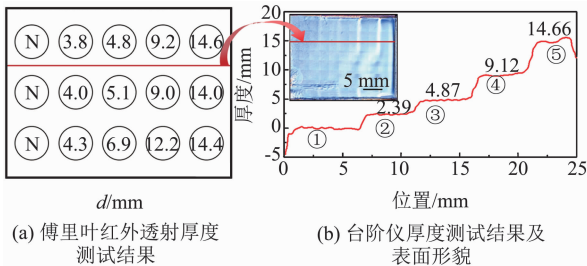


图 2 6 次滑舟后的 HgCdTe 薄膜测试结果  
Fig. 2 Thickness measurements on the HgCdTe films by (a) FTIR, (b) step profiler

把降温速率及厚度测试结果代入式(2),采用最小二乘法求解得经验常数  $K = 0.32 \mu\text{m}/\text{C} \cdot \text{min}^{1/2}$ ,过冷度  $\Delta T_s = 1.88 \text{C}$ .

图 3 是当  $K = 0.32 \mu\text{m}/\text{C} \cdot \text{min}^{1/2}$ ,  $\beta = 0.1 \text{C}/\text{min}$  时薄膜厚度与过冷度和生长时间的关系图,其中  $f(\Delta T_s, t_d)$  是  $\Delta T_s$  和  $t_d$  的函数,其表达式为:

$$f(\Delta T_s, t_d) = \Delta T_s t_d^{1/2} + \frac{2\beta t_d^{3/2}}{3} \quad (3)$$

确定了目标厚度,可以直接得出应该采用的过冷度及所需要的外延时间.以目标厚度  $12 \mu\text{m}$  为例,不同过冷度需要的外延时间如表 1 所示.表 1 给出了对应条件下外延的 HgCdTe 薄膜实际厚度(实验值).图 3 给出了目标厚度分别是  $8 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$  和  $12 \mu\text{m}$  时,外延生长后薄膜平均厚度及其分布范围,相对目标值偏离都在  $0.9 \mu\text{m}$  范围内.

### 2.2 薄膜厚度测试

薄膜材料的厚度均匀性可以由厚度极差和厚度标准差来评价.假设存在两个平行的基准面,它使得

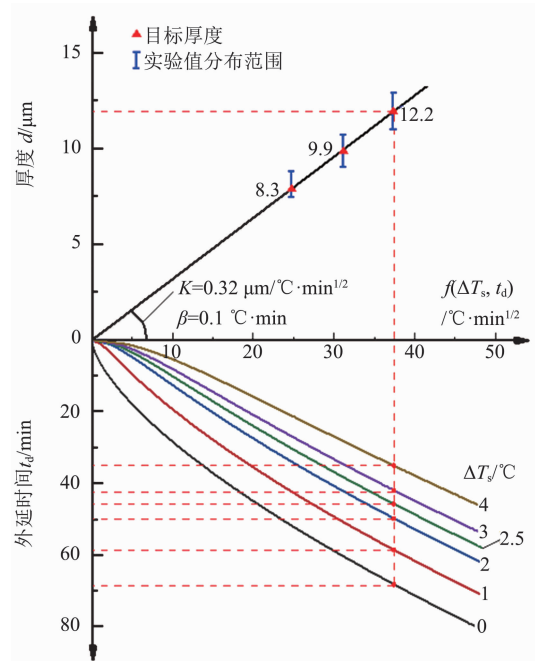


图 3 过冷度和生长时间与液相外延 HgCdTe 薄膜厚度的关系  
Fig. 3 Thickness of the HgCdTe LPE films as a relationship with supercooling and growth time

表 1 目标厚度为  $12 \mu\text{m}$  薄膜样品外延实验条件及实际厚度

Table 1 Thickness of HgCdTe samples related with different supercooling and growth time

样品编号	1	2	3	4	5	6
过冷度 $\Delta T_s/\text{C}$	0	1	2	2.5	3	4
生长时间 $t_d/\text{min}$	69	59	50	46	42	35
实际厚度/ $\mu\text{m}$	12.2	12.2	11.8	12.4	12.4	12.9

在规定区域内的薄膜表面均落在基准面之间,两个基准面之间的最小距离定义为薄膜的厚度极差,该距离也是表面起伏的峰谷差.使用 FIRT 对薄膜样品 23 个点的厚度进行测试,测试区域及位置如图 4 所示.图 4 还给出了过冷度为  $2.5 \text{C}$  外延生长的薄膜厚度分布情况.可以看出,23 点的厚度平均值为  $12.4 \mu\text{m}$ ,极差为  $0.9 \mu\text{m}$ ,标准差为  $0.2 \mu\text{m}$ ;中心 11 点的厚度平均值为  $12.4 \mu\text{m}$ ,极差为  $0.5 \mu\text{m}$ ,标准差为  $0.2 \mu\text{m}$ .极差、标准差一定程度上与薄膜的平均厚度有关,因此引入相对极差(RHL)和相对标准差(RSD)对厚度均匀性进行评价,其中相对极差为极差/厚度平均值,相对标准差为标准差/厚度平均值.结果表明,薄膜 23 点的相对极差为  $7.26\%$ ,相对标准差为  $1.61\%$ ;中心 11 点的相对极差为  $4.03\%$ ,相对标准差为  $1.61\%$ .

对不同过冷度下外延生长的薄膜采取相应的数

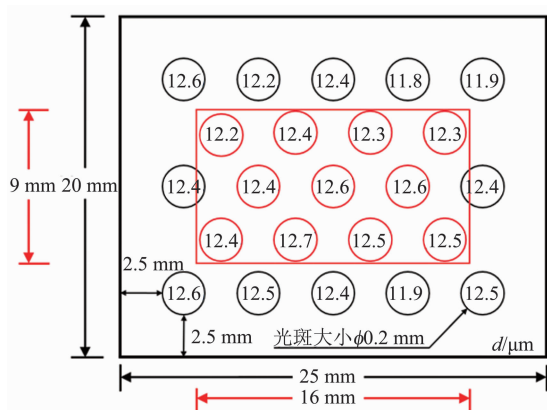


图4 2.5°C过冷度外延的HgCdTe薄膜厚度分布  
Fig. 4 Thickness of 23 measurements on a 20 mm × 25 mm HgCdTe film grown with 2.5°C supercooling

据处理. 图5是6片薄膜样品全部23点、中心11点及边缘12点厚度相对极差和标准差对比. 从图5可以看出, 过冷度为2.5°C外延生长的薄膜厚度相对极差和相对标准差最小. 过冷度降低, 边缘12点厚度相对极差增加量明显高于中心11点厚度相对极差增加量, 边缘区域厚度极值点对厚度均匀性的影响较大; 过冷度增加, 边缘12点相对厚度极差与11点厚度相对极差逐渐接近, 边缘区域厚度极值点对厚度均匀性的影响减小. 厚度相对标准差反映的是薄膜厚度的分散程度, 与厚度相对极差相同, 过冷度为2.5°C外延生长的薄膜厚度分散程度最小, 而过冷度增加或减小厚度分散程度都有所上升. 分析图5边缘12点与中心11点厚度相对标准差测试结果, 可以得出, 过冷度小, 容易使薄膜边缘的厚度均匀性下降, 降低了HgCdTe薄膜的利用率; 当过冷度大于3°C时, 将容易导致薄膜中心的厚度均匀性迅速下降, 直接使整片HgCdTe薄膜不能用于焦平面器件的制备. 因此, 需要对造成厚度不均匀的原因展开深入的讨论.

### 2.3 表面起伏分析

图6是对不同过冷度下外延生长的薄膜表面横向和纵向进行台阶仪扫描测试的结果, 可以发现过冷度越小, HgCdTe薄膜越容易出现中心凹陷, 四周凸起的现象. 限于外延工艺, 水平滑舟式液相外延一般使用石墨舟作为HgCdTe外延生长的容器, 边界效应不可避免, 薄膜材料越靠近边缘厚度均匀性越差. 过冷度越小, 外延更加趋向于平衡状态外延, 石墨舟的边界效应更加明显. 通过改进石墨舟的导热结构可以减轻边界效应, 但这种方法存在实验周期

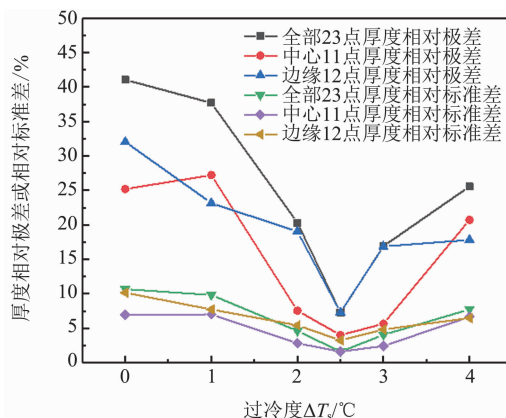


图5 HgCdTe薄膜厚度相对极差和相对标准差与过冷度的关系  
Fig. 5 Relationship between RHL, RSD of the HgCdTe LPE films and supercooling

长、成本高以及容易造成粘片等问题, 而通过调整过冷度, 可以有效地减轻边界效应对薄膜厚度均匀性的影响.

从图6中还可以发现, 当过冷度小于1°C时, 距离边缘5 mm薄膜逐渐增厚, 均匀性开始变差, 已经不能够应用于焦平面器件的制造. 过冷度增加至3°C时, 薄膜中心区域可以观察到纵向分布、宽度约为1 mm的明显起伏, 而在横向扫描结果无明显起伏. 过冷度为4°C时, 中间凸起, 横向和纵向都能观察到明显的起伏, HgCdTe薄膜的厚度均匀性变差.

### 2.4 表面粗糙度分析

薄膜材料的微观表面粗糙度也是影响其厚度均匀性的因素之一. HgCdTe薄膜的表面粗糙容易增加器件表面漏电流, 除此之外表面粗糙度还直接影响器件光学信号的传输特性. HgCdTe薄膜的表面粗糙度 $S_q$ 可以用白光干涉仪来测量. 在本文中, 表面粗糙度 $S_q$ 是指0.5 mm × 0.5 mm面积内薄膜材料表面与基准面之间距离的标准均方差(RMS), 其中基准面是指到各表面点距离的算术平均值为零的参考平面.

外延生长的薄膜材料的粗糙度会受衬底影响, 因此需要尽可能减小衬底差异对实验结果产生的误差. 6组对照试验选用同一组分的同批次衬底, 处理工艺完全相同. 实验前, 先将衬底进行定位, 并进行网格划分, 整片衬底测试12个点的粗糙度; 外延生长薄膜后, 再测定对应点的粗糙度. 图7是不同样品的粗糙度增加量 $\Delta S_q$ , 即12个测试点薄膜粗糙度与对应衬底粗糙度差值的平均值, 误差棒表示粗糙度增加量的离散情况. 从图7可以看出, 过冷度在



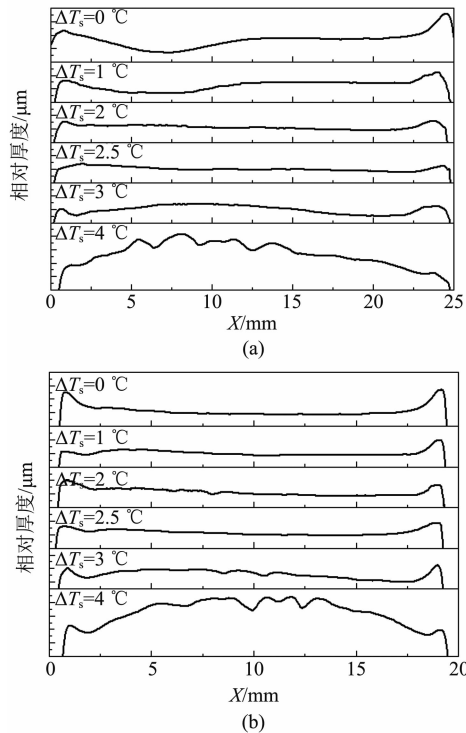


图 6 HgCdTe 薄膜横向(a)和纵向(b)表面起伏与过冷度的关系  
Fig. 6 Thickness variation of the HgCdTe films with supercooling in (a) horizontal and (b) vertical

2.5°C左右,  $\Delta S_q$  较小, 可达 9.07 nm.

随着过冷度减小,  $\Delta S_q$  也开始增加, 粗糙度增加归因于两个方面, 一方面, 过冷度较小时, 薄膜表面有密集的生长台阶(Terrace); 另一方面, HgCdTe 液相外延生长前期必然伴随着 CZT 衬底的回溶, 过冷度小、温度较高都将导致衬底回溶增加, 使生长界面粗糙度增加, 最终将粗糙界面延展至薄膜表面<sup>[20]</sup>. 随着过冷度增加, 生长台阶密度逐渐减小, 这是因为生长台阶一般认为是由于组分过冷造成的, 一旦台阶开始形成, 它们将很容易自增殖并不断长大.

在较大的外延过冷度下, HgCdTe 薄膜外延速度较快, 使得导致组分过冷的周期性热循环或选择性吸附现象不容易出现, 所以较大的外延过冷度下生长台阶密度较小. 当过冷度大于 3°C, 表面周期性起伏将成为影响薄膜表面粗糙度最主要因素, 图 8 能够很好的证明这一点. 图 8(a) 是过冷度为 0°C 外延生长的薄膜表面形貌及对应的 3D 图象, 从图中可以看出表面粗糙主要由细小的生长台阶造成的; 当过冷度为 4°C 时, 如图 8(b) 所示, 已经无法观察到明显的生长台阶, 但出现了明显的起伏, 起伏的宽度在毫米量级, 这与台阶仪数据分析结果一致. 值得注意的是, 图 8(c) 能够看到清晰的 CZT 衬底与

HgCdTe 薄膜晶格失配所致的 crosshatch 线<sup>[21]</sup>.

如图 7 误差棒所示, 外延过冷度过大和过小都会导致  $\Delta S_q$  的离散程度增加. 前者是由于薄膜中心区域的生长台阶密度较大, 靠近边缘则存在粗糙度非常低的区域; 而后者是因为薄膜存在宽度大于 1 mm 的周期性起伏, 起伏的曲率对粗糙度有较大的影响.

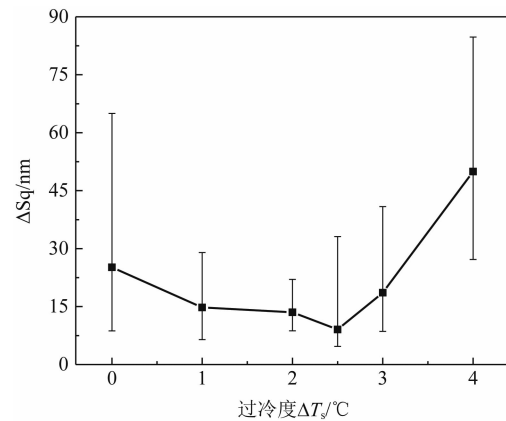


图 7 HgCdTe 薄膜样品相对于衬底的粗糙度增加量  
Fig. 7 Surface roughness increase of the HgCdTe films related to the supercooling compare to which of the CZT substrate

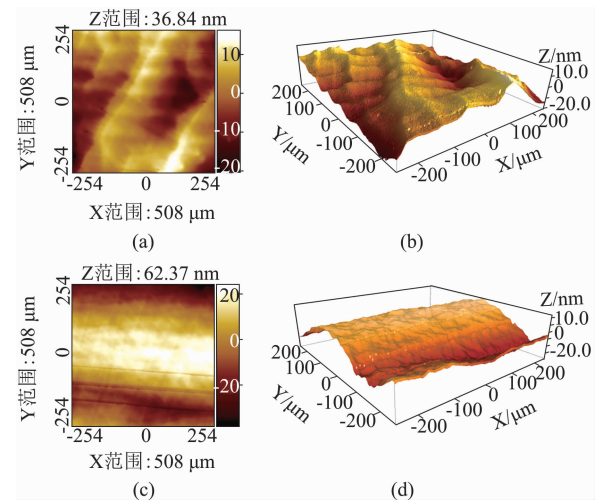


图 8 HgCdTe 薄膜样品表面形貌图: (a-b) 0°C 过冷度的 2D、3D 图; (c-d) 4°C 过冷的 2D、3D 图  
Fig. 8 White-light Interferometer (WLI) characterization of the HgCdTe films with 0°C and 4°C supercooling

### 3 结论

采用多次滑舟法研究了不同外延过冷度对碲镉汞液相外延薄膜厚度均匀性影响, 结果表明:

1) 当过冷度为 2~3°C 时, 能够获得厚度均匀性

较好的薄膜. 当过冷度为  $2.5^{\circ}\text{C}$  时, 薄膜 23 点的极差为  $0.9\ \mu\text{m}$ , 标准差为  $0.2\ \mu\text{m}$ ; 中心 11 点的极差为  $0.5\ \mu\text{m}$ , 标准差为  $0.2\ \mu\text{m}$ ,  $0.5\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$  范围内薄膜相对于衬底的粗糙度增加量  $9.07\ \text{nm}$ .

2) 过冷度小于  $2^{\circ}\text{C}$  时, 受石墨舟的边界效应影响, HgCdTe 薄膜容易出现中心凹陷, 四周凸起的现象; 除此之外, 过冷度小薄膜表面粗糙, 粗糙度的增加归因于两个方面, 一方面, 薄膜表面有密集的生长台阶; 另一方面, 高温导致衬底回溶增加, 使外延界面粗糙度增加, 最终将粗糙界面延展至薄膜表面.

3) 过冷度大于  $3^{\circ}\text{C}$  时, 薄膜中心将会明显凸起, 并出现宽度为毫米级的周期性起伏, 成为影响薄膜厚度均匀性最主要因素, 并且由于失配应力释放不充分, 薄膜更容易出现 crosshatch 线.

值得注意的是, 薄膜与熔融母液接触界面上各点的外延速率不一致是造成 HgCdTe 液相外延薄膜的厚度非均匀的根本原因. 决定外延速率的主要因素包括过冷度和降温速率, 通过进一步优化降温速率参数, 有望外延获得厚度均匀性更好的 HgCdTe 薄膜材料.

## References

- [1] Wang H, Hong J, Yue F Y, *et al.* Optical homogeneity analysis of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  epitaxial layers: How to circumvent the influence of impurity absorption bands? [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2017, **82**: 1–7.
- [2] Ahluwalia G K, Patro R. *Infrared detectors* [M]. Springer International Publishing, 2017.
- [3] Lutz H, Breiter R, Figgemeier H, *et al.* Improved high operating temperature MCT MWIR modules [C]. *Infrared Technology and Applications XL*. International Society for Optics and Photonics, 2014:90701D.
- [4] Breiter R, Benecke M, Eich D, *et al.* MCT SWIR modules for passive and active imaging applications [C]. *SPIE Defense + Security*. 2016:981908.
- [5] Kinch M A. The Future of infrared; III-Vs or HgCdTe? [J]. *J. Electronic Materials*. 2015, **44**(9): 1–8.
- [6] Wang X, Li Q, Zhou S M, *et al.* Study of dark current for LWIR HgCdTe detectors with a graded doped junction [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **92**: 358–362.
- [7] Boulade O, Gravrand O, Cervera C, *et al.* Development activities on NIR large format MCT detectors for astrophysics and space science at CEA and SOFRADIR [C]. *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII*, 2016:99150C.
- [8] WU Jun, MAO Xu-Feng, WANG Zhi-Yuan, *et al.* Improvement of Compositional Uniformity of HgCdTe Grown by LPE [J]. *Infrared Technology*. (吴军, 毛旭峰, 万志远, 等. 液相外延碲镉汞材料组分均匀性改善. *红外技术*) 2014, **36**(12): 973–975.
- [9] Zhang W K, Lin J M, Chen H L, *et al.* Analysis injection area-dark current characteristics for mid-wavelength HgCdTe photodiodes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **93**: 70–76.
- [10] HU Wei-Da, LIANG Jian, YUE Fang-Yu, *et al.* Recent progress of subwavelength photon trapping HgCdTe infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (胡伟达, 梁健, 越方禹, 等. 新型亚波长陷光结构 HgCdTe 红外探测器研究进展. *红外与毫米波学报*) 2016, **35**(1): 25–36.
- [11] YANG Hai-Yan, HU Shang-Zheng, GUO Ming-Zhu, *et al.* Influence of surface of CdZnTe substrate on the surface fluctuation of HgCdTe film [J]. *Laser & Infrared* (杨海燕, 胡尚正, 郭明珠, 等. 衬底表面状态对碲镉汞薄膜表面起伏的影响. *激光与红外*) 2017, **47**(6): 745–749.
- [12] Mouzali S, Lefebvre S, Rommeluère S, *et al.* Estimation of thickness and cadmium composition distributions in HgCdTe focal plane arrays [J]. *J. Electronic Materials*. 2016, **45**(9): 4607–4611.
- [13] Mouzali S, Lefebvre S, Rommeluère S, *et al.* Optical-based spectral modeling of infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2016, **77**: 351–359.
- [14] LIU Ling-Feng, CHEN Yi-Yu, YE Zhen-Hua, *et al.* A review on plasma-etch-process induced damage of HgCdTe [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **90**: 175–185.
- [15] YANG Jian-Rong. *Physics and technology of HgCdTe materials* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术. 北京: 国防工业出版社) 2012.
- [16] Gravrand O, Destefanis G, Bisotto S, *et al.* Issues in HgCdTe research and expected progress in infrared detector fabrication [J]. *J. Electronic Materials*. 2013, **42**(11): 3349–3358.
- [17] Johnson S M, Rhiger D R, Radford W A. Historical perspectives on HgCdTe material and device development at Raytheon Vision Systems [J]. *Proc. of SPIE*, 2009: Vol. 7298.
- [18] SUN Quan-Zhi, SUN Rui-Yun, WEI Yan-Feng, *et al.* Batch production technology of  $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$  HgCdTe LPE materials with high performance [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (孙权志, 孙瑞贇, 魏彦锋 等.  $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$  高性能 HgCdTe 液相外延材料的批生产技术. *红外与毫米波学报*) 2017, **36**(1), 49–53.
- [19] Pellicciari B. State of the art of LPE HgCdTe at LIR [J]. *Journal of Crystal Growth*. 1988, **86**(1-4): 146–160.
- [20] SONG Lin-Wei, WU Jun, KONG Jin-Cheng, *et al.* Thermal erosion effect to CZT substrate surface during LPE growth of HgCdTe process [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (宋林伟, 吴军, 孔金丞, 等. 碲锌镉衬底表面在碲镉汞液相外延工艺中的热腐蚀效应. *红外与毫米波学报*) 2018, **37**(1): 92–97.
- [21] Shapiro C, Huff E, Smith R. Intra-pixel response characterization of a HgCdTe near infrared detector with a pronounced crosshatch pattern [J]. *Instrumentation & Methods for Astrophysics*, 2018: 122.