

# 碲锌镉衬底表面在碲镉汞液相外延工艺中的热腐蚀效应

宋林伟, 吴 军, 孔金丞\*, 李东升, 张 阳, 李 沛, 杨 翔, 万志远, 黄元晋, 木 胜  
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 该研究以提高液相外延碲镉汞材料的质量为出发点, 研究液相外延生长过程中碲锌镉衬底受到高温汞蒸气影响后的变化情况, 并利用光学显微镜、白光干涉仪、能谱仪等分析测试手段对碲锌镉衬底表面进行分析. 研究结果表明, 液相外延生长过程中, 高温汞蒸气对碲锌镉衬底中表面沉淀物尺寸无明显影响, 但在衬底表面发现两种类型的腐蚀点, 一种是尺寸为 25  $\mu\text{m}$  左右的较大腐蚀点, 分布较均匀; 另一种是尺寸为 7  $\mu\text{m}$  左右的圆形腐蚀点, 分布不均匀. 衬底经过液相外延薄膜成核生长前的温度变化过程以及高温 Hg 蒸气的作用, 碲锌镉衬底表面形貌呈鱼鳞状, 粗糙度增大了 50% 以上.

**关键词:** 液相外延; 碲锌镉衬底; 汞腐蚀; 粗糙度

**中图分类号:** TN215; O484.1 **文献标识码:** A

## Thermal erosion effect to CZT substrate surface during LPE growth of HgCdTe process

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

**Abstract:** Influence of Hg vapor to CZT substrate during LPE growth of HgCdTe process were studied, CZT substrates were characterized by combining with Microscope, White-light Interferometer (WLI) and Energy Dispersive Spectrometer (EDS). Results show that the CZT substrates mainly suffered the Hg vapor during LPE process, Hg vapor has no effect on the precipitations in CZT substrates surface. Two kinds of typical Hg erosion defects are found on CZT substrates after Hg vapor treatment process. One is a kind of large defect that had size of 25  $\mu\text{m}$  and distributed uniformly, while the other is smaller size of 7  $\mu\text{m}$  presented nonuniform distribution. Furthermore, fish scale like surface morphology on CZT substrate is found after Hg vapor treatment process during LPE growth of HgCdTe, surface roughness increase more than 50%.

**Key words:** liquid phase epitaxy, CdZnTe substrate, mercury erosion, surface roughness

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

## 引言

碲镉汞材料是由具有负禁带的 HgTe 和正禁带的 CdTe 混合而成, 它是具有直接带隙的  $(\text{HgTe})_{1-x}(\text{CdTe})_x$  三元化合物材料, 其禁带宽度可随组分  $x$  的变化在 0 ~ 1.6 eV 范围内连续调节, 可实现对整个红外波段的探测, 是目前最重要的红外探测器

材料, 在国防和航空航天等领域有着重要的国家战略需求<sup>[1-4]</sup>. 碲镉汞材料生长方法很多, 其中液相外延法(Liquid Phase Epitaxy)是目前应用较广的一种生长方法, 相比其他生长技术, 碲镉汞材料液相外延技术在光响应性能、制备成本、掺杂材料生长等方面具有不可替代的优势<sup>[5]</sup>.

液相外延技术是一种准平衡态生长, 所生长的

收稿日期: 2017-07-23, 修回日期: 2017-08-25

基金项目: 国家 973 项目基金(613 \* \* \*)

Foundation items: Supported by National 973 Foundation (613 \* \* \*)

作者简介 (Biography): 宋林伟 (1989-), 男, 四川盐源人, 工程师, 硕士, 主要从事红外探测器材料研究. E-mail: songlinwei0111@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: kongjincheng@163.com

Received date: 2017-07-23, revised date: 2017-08-25

碲镉汞外延材料结构完整性非常好,除了衬底缺陷的延伸外,碲镉汞液相外延本身可以做到几乎不引入任何新的缺陷.围绕碲镉汞液相外延发展起来的工艺技术很多,从母液上分为富碲和富汞两种技术;从工艺方式上分为水平推舟法、垂直浸渍法以及倾舟法.从应用结果看,三种液相外延技术都获得了成功,法国 Sofradir 采用富碲水平推舟外延作为二代探测器材料的主流技术,外延材料尺寸可达到  $20 \text{ cm}^2$  以上,表面平整度控制到  $\pm 0.25 \text{ }\mu\text{m}$ ,位错密度控制到  $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ ,材料表面无  $1 \text{ }\mu\text{m}$  以上尺度的微缺陷,已经达到了非常高的水平<sup>[6,7]</sup>;同样采用富碲水平推舟法生长的 BAE 公司,则在外延材料生长尺寸方面达到了  $7 \times 7 \text{ cm}^2$ <sup>[8]</sup>.德国 AIM 公司采用富碲垂直浸渍法,一次可生长 4 片  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  的薄膜,均匀性重复性较好,表面平整度可达到  $\pm 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,位错密度在  $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$  以下<sup>[9]</sup>;而同样材料富碲垂直浸渍技术的美国 DRS 公司可利用该技术生长较厚的碲镉汞材料,用于环孔结构 (HDVIP) 红外焦平面探测器的研发,取得较好研究成果<sup>[10]</sup>.Teledyne 公司则采用富碲倾舟法,可生长 3 英寸大小材料,该技术是 Teledyne 公司材料生长的主流技术<sup>[11]</sup>.而美国 Raytheon 公司采用富汞垂直浸渍法,一次可同时生长 4 片  $30 \text{ cm}^2$  面积的材料,可用面积在 95% 以上,长波材料平整度控制在  $\pm 0.4 \text{ }\mu\text{m}$ ,组分均匀性达到  $\pm 0.0006$ ,采用此方法可直接生长 p-on-n 型双层异质结构<sup>[12]</sup>.而国内对液相外延碲镉汞材料的研究起步较晚,在外延材料尺寸、表面缺陷、位错密度等方面技术的控制都落后于西方国家.

碲镉汞液相外延技术是制备红外焦平面探测器材料最佳工艺技术途径之一,相比其它技术,液相外延材料在光响应性能和制备成本上具有不可替代的优势.随着碲镉汞焦平面探测器向高分辨率、高灵敏度、小像元间距、大面阵、高工作温度、高性能方向发展,对碲镉汞外延材料的表面平整度、表面缺陷、位错密度等方面提出了更高要求,急需从整体上提高外延材料的质量,以适应焦平面探测器的发展需求<sup>[13]</sup>.研究发现,液相外延过程中衬底表面粗糙度、缺陷等将直接影响碲镉汞外延薄膜的粗糙度以及缺陷状态.因此,控制衬底的粗糙度以及缺陷状态是获得高质量碲镉汞液相外延薄膜的有效方法.

碲镉汞材料液相外延生长工艺中,第一步需加热碲镉汞母液到熔点以上一定温度使其充分熔融,然后以一定的速率缓慢降温到外延生长温度,使母液与衬底接触进而进行外延生长.在母液熔融、降温

到外延生长前这一过程中,母液熔融温度一般在  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  以上,熔融母液与衬底处于同一气氛中,衬底不可避免将受到碲镉汞蒸气以及高温热影响.而在相同条件下,碲镉汞气氛中 Te、Cd 蒸气的分压较 Hg 分压低很多,应主要考虑高温 Hg 蒸气的影响.

碲镉汞衬底表面质量直接决定液相外延碲镉汞薄膜质量,然而碲镉汞材料液相外延生长工艺中,从母液熔融到最后液相外延生长完毕都是一个连续封闭的过程,无法观察衬底表面的变化,特别是衬底在高温汞蒸气的作用下的变化情况,液相外延薄膜生长结束后,往往难于评估生长前衬底的表面质量状况.虽然国外碲镉汞材料液相外延技术工艺较成熟,但碲镉汞衬底表面在碲镉汞液相外延过程中的变化情况还未见相关报道.本文设计了两种特别的液相外延生长用石墨舟和相应的生长工艺,并对经过两种不同过程的碲镉汞衬底表面进行了分析研究,探索高温 Hg 蒸气对碲镉汞衬底表面的影响,为优化液相外延工艺,提高液相外延碲镉汞薄膜质量奠定基础.

## 1 实验设计

为了研究液相外延过程中,高温环境下 Hg 蒸气对碲镉汞衬底的影响,我们设计了两种液相外延试验方案,分别实现了在外延试验过程中碲镉汞衬底暴露在 Hg 蒸气气氛和与 Hg 蒸气气氛隔离两种情况,试验完成后对衬底表面进行研究分析.衬底采用 (111) B 面  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$  衬底,衬底经表面磨抛后,液相外延生长前在 0.5%  $\text{Br}_2$  甲醇溶液中腐蚀处理,以获得新鲜表面.同时为了对比同一位置在受到碲镉汞蒸气影响前后的变化情况,利用光刻及腐蚀技术将  $\text{CdZnTe}$  衬底划分为  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  的小格,将这些格子标记为 xx 行 xx 列,以便在汞蒸气作用前后对同一位置进行精确定位观察分析.

液相外延过程温度曲线如图 1 所示,先将碲镉汞母液加热到熔点以上充分熔融,然后以一定速率降温到生长温度,随后在 A 点移动母液与衬底相对位置使母液与衬底接触开始外延生长,生长完后将母液与衬底分离完成生长,如图 1 中 f 曲线所示.如图中 A 点为母液与衬底接触开始生长的点,A 点之前衬底将受到高温汞蒸气的影响.为了观察分析汞蒸气影响后衬底表面的变化情况,实验设计时采用曲线 e 的温度曲线,当温度降低到 A 点时,不在进行后续工作,停止加热随炉降温,最后取出实验衬底进行对比观察分析.

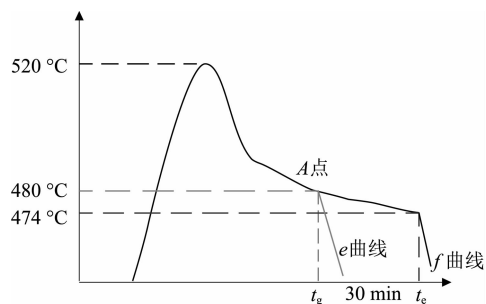


图1 碲镉汞液相外延过程温度曲线  
Fig. 1 Thermal cycle of HgCdTe LPE growth

考虑到在液相外延过程温度曲线 A 点前,碲镉汞衬底一方面受到汞蒸气的影响,另一方面受到高温热影响.为了区分汞蒸气和高温热的影响,实验设计时设定两种工艺条件:实验一衬底既有汞蒸气的影响又有高温热影响;实验二衬底无汞蒸气的影响而只有高温影响.挑选三组碲镉汞衬底分别在以上两种实验条件下处理,然后利用分析测试手段加以对比分析.外延设备为法国 AET (HFS 80) 水平液相外延炉.

采用光学显微镜 (Olympus MX61 Japan) 对碲镉汞衬底表面形貌进行观察分析,最高放大倍数为 1 000 倍;采用白光干涉仪 (NanoMap-D) 对碲镉汞衬底定位进行缺陷轮廓、三维形貌以及粗糙度分析;采用 X 射线能谱仪 EDS (Quanta 600FEG USA) 对碲镉汞衬底进行定位缺陷组分分析.

## 2 实验结果分析讨论

### 2.1 表面光学形貌分析

液相外延生长时汞蒸气对衬底最直观影响可从表面状态反应出来,如图 2 所示为经汞蒸气作用前后的具有典型特征的 CZT21-5#碲镉汞衬底的表面光学形貌对比图.如图 2(a)、(b) 所示分别为 CZT21-5#样品的同一位置汞蒸气作用前后的相同放大倍数下的光学形貌图,作用前(a)图中衬底的表面缺陷只有沉淀物(如图 A、B 点所示),经高温汞蒸气作用后沉淀物依然存在,但高倍显微镜下观察发现,经高温汞蒸气作用后沉淀物周围边缘部分被腐蚀,如图 2(b)中插图所示.

对比观察经高温汞蒸气作用后 CZT21-5#样品表面,作用前后同一视场范围发现,经汞蒸气作用后样品不仅有原来就有的沉淀物 A、B,还出现如 C 点尺寸较大的腐蚀点,如图 2(b)中插图所示,尺寸一般在  $25\ \mu\text{m}$  左右,这样如 C 点较大的腐蚀点在样品

表面普遍存在,分布较均匀,密度大约为  $7\ \text{个}/\text{cm}^{-2}$ ;此外,在高倍光学显微镜下观察发现,经汞蒸气作用后,样品表面还出现了尺寸较 C 点小的另一种腐蚀点 D,光学形貌图如图 3 所示,腐蚀点 D 尺寸约为  $7\ \mu\text{m}$  左右,呈圆形,在衬底表面呈现不均匀分布,密度较 C 类腐蚀点高.

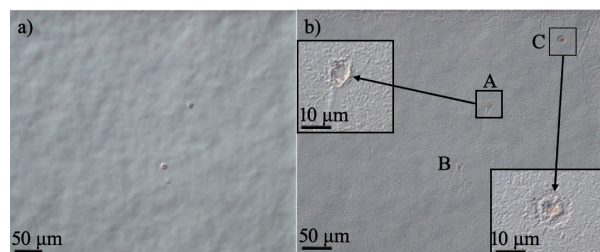


图2 CZT21-5#样品经汞蒸气作用前后光学形貌图,a) 汞蒸气作用前光学形貌图;b) 汞蒸气作用后光学形貌图  
Fig. 2 Surface morphology of CZT21-5# substrate, a) original surface. b) after a Hg vapor treatment process

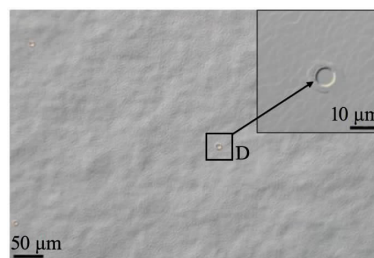


图3 CZT21-5#样品经汞蒸气作用后出现的尺寸较小的 D 类腐蚀点的光学形貌图  
Fig. 3 Type D erosion defect on Surface of CZT21-5# substrate after a Hg vapor treatment process

图 4 所示为经实验条件二(隔离汞蒸气只有高温热影响)作用前后的具有典型特征的 CZT21-6#碲镉汞衬底的表面光学形貌对比图.实验条件二中,经过实验工艺设计隔离了汞蒸气的影响,只考虑高温热影响.对比 CZT21-6#样品作用前后表面形貌发现,经实验条件二作用后,与作用前相比衬底表面未发现新增的腐蚀点,较大的沉淀物形貌尺寸未见明显变化.然而,对比作用前后表面部分小点状缺陷,作用后在光学显微镜中变得轮廓变得模糊,这可能是在较高温度下,原子扩散加快导致小点缺陷周围原子互扩散,进而致使作用后小点缺陷轮廓变得模糊<sup>[14]</sup>,如图 4 中圆圈所示.

对比实验条件一(有汞蒸气)和实验条件二(隔离汞蒸气)条件下的碲镉汞衬底表面形貌变化图.

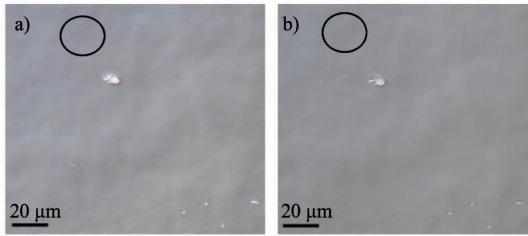


图4 CZT21-6#样品在实验条件二(隔离汞蒸气)作用前后光学形貌对比图,a)作用前光学形貌图;b)作用后光学形貌图

Fig.4 Surface morphology of CZT21-6# substrate, a) original surface and b) after a high temperature treatment without Hg vapor

隔离汞蒸气后,衬底只受到高温热影响,此时高温热作用后衬底表面较大沉淀物无明显变化,没有额外的腐蚀点缺陷产生;而经汞蒸气作用后,衬底表面出现了如上述所述的较大尺寸的C类以及分布不均匀尺寸较小的D类腐蚀点,同时沉淀物在经汞蒸气作用后边缘较平滑.对比以上两种条件可证实,衬底在液相外延生长前主要受汞蒸气影响,热影响的作用较小.

### 2.2 缺陷点特性分析

如图5 a, a-1, a-2)所示为经高温汞蒸气处理

后沉淀物 A 在白光干涉仪下的 2D、3D 形貌图以及轴线方向沉淀物周围高低走势图,白光干涉测量的缺陷形貌走势与光学及扫描电镜观察的高低走势一致,而白光干涉形貌图更能反应缺陷整体形貌及高低走势.由图可知,沉淀物尺寸范围在 20  $\mu\text{m}$  左右,中心和边缘凸起,中心凸起尺度在 1  $\mu\text{m}$  左右,边缘凸起在 0.4  $\mu\text{m}$  左右.如表一所示为采用 EDS 定位精确测量 CZT21-5#样品中各点的组分含量表.组分分析可知,经高温汞蒸气作用后,碲锌镉衬底表面发生了汞向衬底内部扩散现象,碲锌镉衬底表面有约 5.28% 的汞(原子比).而沉淀物 A、B 经高温汞蒸气作用后,汞含量略微比正常区域高.结合光学形貌图综合分析可知,沉淀物周围区域被汞腐蚀,且腐蚀程度较正常区域高.结合液相外延材料与衬底中沉淀物缺陷对应关系分析可知,如 A、B 类似的沉淀物在液相外延时经过高温汞蒸气作用、表面回熔后,部分尺寸较小的沉淀物缺陷在外延材料表面显现不出来,而大部分沉淀物缺陷将延伸到外延材料表面.衬底沉淀物将直接影响外延材料表面质量的影响,并不能通过后续工艺完全消除,控制衬底中的沉淀物是提高液相外延材料质量最直接有效的方法<sup>[15]</sup>.

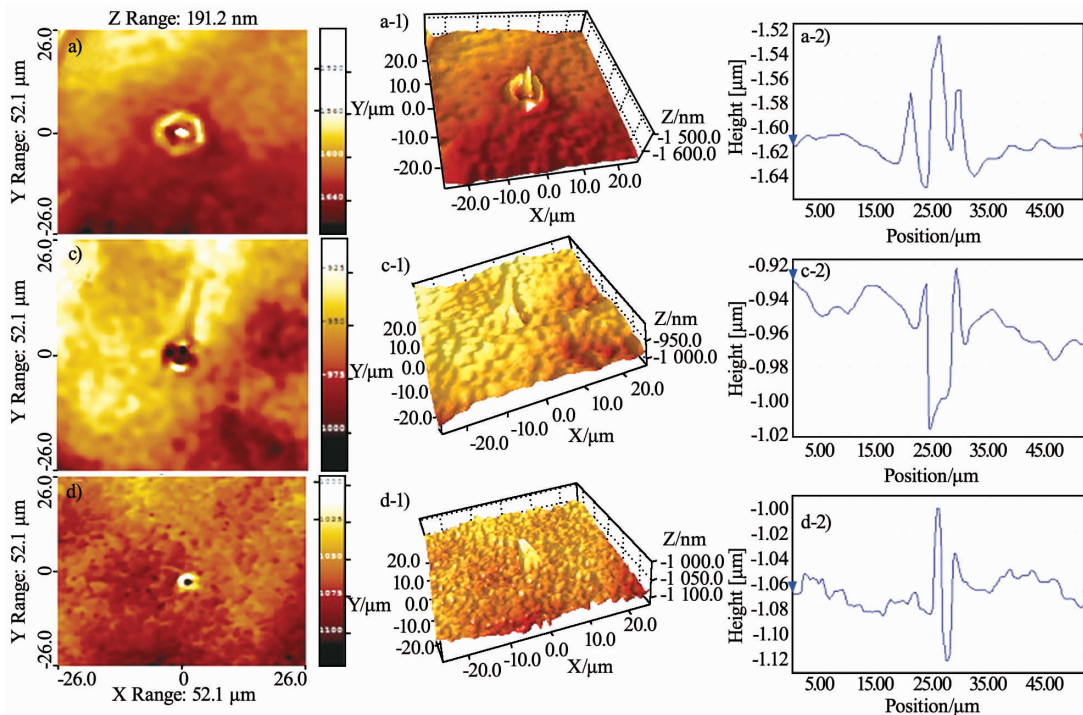


图5 经高温汞蒸气作用后衬底表面缺陷形貌图,a, a-1, a-2)沉积物 A 的 2D、3D 形貌图以及轴线方向高低走势图;c, c-1, c-2)腐蚀点 C 的 2D、3D 形貌图以及轴线方向高低走势图;d, d-1, d-2)腐蚀点 D 的 2D、3D 形貌图以及轴线方向高低走势图

Fig.5 White-light Interferometer (WLI) characterization of type A, C, D defect after a Hg vapor treatment process

表 1 经汞蒸气作用后碲锌镉衬底表面各点成分  
Table 1 Compositional analysis of different defects on CZT substrate

组分测试位置	Cd /at%	Te /at%	Zn /at%	Hg /at%
正常区域	44.08	49.07	1.57	5.28
沉淀物 A	43.74	48.77	2.14	5.35
沉淀物 B	43.53	48.46	2.00	6.01
汞腐蚀点 C	42.97	48.39	1.87	6.77
汞腐蚀点 D	43.07	48.85	1.85	6.23

如图 5 (c, c-1, c-2) 所示经高温汞蒸气作用后尺寸较大的 C 类腐蚀点在白光干涉仪下的 2D、3D 图以及轴线方向高低起伏走势图. 腐蚀点尺寸范围在 25  $\mu\text{m}$  左右, 呈现 U 型, 中心凹陷深度在 0.8  $\mu\text{m}$  左右. 经组分分析可知, C 类腐蚀点周围汞含量较周围正常区域高 28.2%. 图 5 (d, d-1, d-2) 所示为经高温汞蒸气作用后尺寸较小的 D 类腐蚀点在白光干涉仪下的 2D、3D 图以及轴线方向高低起伏走势图. 由图可知, 腐蚀点尺寸范围在 7  $\mu\text{m}$  左右, 呈现类似 U 型, 中心下凹, 边缘凸起, 中心凹陷深度在 0.6  $\mu\text{m}$  左右, 边缘凸起 0.4  $\mu\text{m}$ . 经组分分析可知, D 类较小腐蚀点周围汞含量较周围正常区域高 18.0%.

以上两种尺寸的腐蚀点中汞含量均高于周围正常区域, 主要受到汞腐蚀的影响, 汞腐蚀点的成因、分布规律以及周围缺陷情况需结合后续实验做进一步分析. 在充分掌握汞腐蚀点特性的基础上, 结合生长用石墨舟的设计以及液相外延工艺的优化, 消除汞腐蚀点对外延材料的影响, 提高碲镉汞液相外延材料质量.

### 2.3 表面粗糙度分析

表面粗糙度是衡量材料微区高低起伏的参数, 用规定面积内材料表面与基准面(各表面点到基准面距离的算术平均值为零)之间距离的标准均方差(RMS)来度量. 碲镉汞材料表面粗糙度将影响器件表面漏电流和光学信号的传输特性, 而衬底表面粗糙度决定了液相外延材料的表面粗糙度. 因此, 衬底表面粗糙度是衡量碲锌镉衬底质量的一个重要参数, 在分析液相外延时汞蒸气对衬底影响时需考虑汞蒸气对衬底表面粗糙度的影响. 衬底粗糙度用白光干涉仪测量.

实验前将衬底划分为  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  小格, 这样可对同一位置作用前后的粗糙度经行精确定位比较测量. 实验中选定的测量面积为  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ , 整片衬底测试 5 个点取其平均值作为该实验条件下的粗

糙度值. CZT21-5#和 CZT21-6#样品作用前后粗糙度测量值如表所示(测量五个点取其平均值).

表 2 碲锌镉衬底在不同条件处理前后粗糙度变化值  
Table 2 Surface roughness variation of CZT substrates after different process

样品编号及实验条件	粗糙度 Sq/nm
CZT21-5#高温汞蒸气作用前	13.27
CZT21-5#高温汞蒸气作用后	20.14
CZT21-6#高温无汞蒸气作用前	13.42
CZT21-6#高温无汞蒸气作用后	16.31

由表可知, 碲锌镉衬底 CZT21-5#经高温汞蒸气作用后, 粗糙度值变大, 与作用相比增大了 50% 以上; 而 CZT21-6#在高温热影响下, 粗糙度也变大了, 与作用前相比增大了 21%. 在光学形貌图中也可以发现, 在汞蒸气和高温热流影响下, 衬底表面变粗糙, 高倍光学显微镜下呈现鱼鳞状, 由此说明热流以及高温汞蒸气均对衬底表面粗糙度有较大影响. 衬底的表面粗糙度直接影响外延材料表面粗糙度, 在优化碲锌镉衬底磨抛工艺的同时, 控制液相外延时高温热以及汞蒸气对衬底表面粗糙度的影响, 是提高碲镉汞液相外延材料表面粗糙度的关键.

### 3 结论

碲镉汞薄膜液相外延生长过程中碲锌镉衬底主要受到高温汞蒸气的影响, 主要影响如下:

1) 碲锌镉衬底表面的沉淀物在高温汞蒸气的影响下尺寸无明显变化, 且分布在衬底表面的沉淀物对外延材料的影响并不能通过后续液相外延工艺完全消除, 大部分沉淀物缺陷会延伸到液相外延材料表面;

2) 液相外延过程中, 经高温汞蒸气作用后, 碲锌镉衬底表面会出现两种类型的腐蚀点. 一种呈现不规则凹型, 尺寸较均约 25  $\mu\text{m}$ , 在衬底中均匀分布, 汞含量较正常区域高 28.2% 左右; 另一种呈现规则圆形, 中间下凹, 尺寸较均约 7  $\mu\text{m}$ , 汞含量较正常区域高 18.0% 左右;

3) 受液相外延过程中高温汞蒸气的影响, 碲锌镉衬底表面粗糙度变大, 表面粗糙度较处理前增加了 50% 以上, 光学显微镜下呈现鱼鳞状. 衬底的粗糙度直接影响外延薄膜表面粗糙度, 因而优化衬底磨抛工艺的同时, 控制外延生长时高温汞蒸气对衬底的影响, 是降低液相外延碲镉汞薄膜表面粗糙度, 提高薄膜表面质量的有效途径.

值得注意的是在液相外延生长工艺中, 衬底与

碲镉汞母液接触时将发生表面回熔, 衬底表面这些腐蚀点及粗糙度将会继续发生变化, 值得开展进一步的研究.

## References

- [1] Lawson W D, Nielson S, Putley E H, *et al.* Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe [J]. *J. Phys. Chem. Solids.* 1959, **9**:325 - 329.
- [2] SUN Quan-Zhi, SUN Rui-Yun, WEI Yan-Feng, *et al.* Batch production technology of 50mm × 50mm HgCdTe LPE materials with high performance [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (孙权志, 孙瑞贇, 魏彦锋, 等. 50 mm × 50 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*) 2007, **36**(1), 49 - 53.
- [3] WANG Han, HONG Jin, YUE Fang-Yu, *et al.* Optical homogeneity analysis of Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te epitaxial layers: How to circumvent the influence of impurity absorption bands [J]. *Infrared Physics & Technology.* 2017, **82**:1 - 7.
- [4] 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.
- [5] HUANG Gen-Sheng, CHEN Xin-Qiang, YANG Jian-Rong, *et al.* Growth and characterization of liquid phase epitaxy Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te films [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (黄根生, 陈新强, 杨建荣, 等. 碲镉汞液相外延薄膜生长技术与性能. *红外与毫米波学报*) 2000, **19**(2), 145 - 148.
- [6] Bensussan P, Tribillet P. 50 years of successful MCT research and production in France [J]. *Proc. of SPIE.* 2009, 72982N.
- [7] Péré-Lapernea N, Rubaldoa L, Kerlain A, *et al.* 10 μm pitch design of HgCdTe diode array in Sofradir [J]. *Proc. of SPIE.* 2015, 9370.
- [8] Reine M. B. History of HgCdTe infrared detectors at BAE Systems [J]. *Proc. of SPIE.* 2009, 72982S.
- [9] Figgemeier H, Bruder M, Mahlein K. M, *et al.* Impact of critical processes on HgCdTe diode performance and yield [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, **32**(7):588 - 591.
- [10] Kinch M. A. 50 years of HgCdTe at Texas Instruments and Beyond [J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 72982T.
- [11] Tennant W. E, Arias J. M. HgCdTe at Teledyne [J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 72982V.
- [12] Bratt P. R, Johnson S. M, Rhiger D. R, *et al.* Historical perspectives on HgCdTe material and device development at Raytheon Vision Systems [J]. *Proc. of SPIE.* 2009, 72982U.
- [13] 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.
- [14] Sheng F F, Yang J R, Sun S W, *et al.* Influence of Cd-rich Annealing on Defects in Te-rich CdZnTe Materials [J]. *Journal of Electronic Materials.* 2014, **43**(7):2702 - 2708.
- [15] Sheng F F, Zhou C H, Sun S W, *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.
- [12] Knight M W, Sobhani H, Nordlander P, *et al.* Photodetection with active optical antennas [J]. *Science*, 2011, **332**:702.
- [13] FAN Zhi-Yong, Kapadia R, Leu P W, *et al.* Ordered arrays of dual-diameter nanopillars for maximized optical absorption [J]. *Nano Letters*, 2010, **10**:3823.
- [14] Urade Y, Nakata Y, Nakanishi T, *et al.* Broadband and energy-concentrating terahertz coherent perfect absorber based on a self-complementary metasurface [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(19):4472.
- [15] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, *et al.* Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers. [J]. *Nature Communications*, 2011, **2**(1):517.
- [16] LIANG Lei-Xia, XUE Wen-Rui, YANG Rong-Cao. Optical absorber from surface plasmonic grating with depth-linear-gradient grooves [J]. *Acta Optica Sinica* (梁磊霞, 薛文瑞, 杨荣草. 槽深线性渐变的表面等离子光栅光吸收器. *光学学报*) 2017, **37**(1):0123002.
- [17] CAO Tun, ZHANG Lei, Simpson R E, *et al.* Mid-infrared tunable polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, **30**(6):1580 - 1585.
- [18] ZHANG Nan, ZHOU Pei-Heng, CHENG Deng-Mu, *et al.* Dual-band absorption of mid-infrared metamaterial absorber based on distinct dielectric spacing layers [J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(7):1125 - 1127.
- [19] XIAO Shu-Yuan, WANG Tao, LIU Yue-Bo, *et al.* Tunable light trapping and absorption enhancement with graphene ring arrays [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, **18**:26661 - 26669.
- [20] Polyakov A, Padmore H A, LIANG Xiao-Gan, *et al.* Light trapping in plasmonic nanocavities on metal surfaces [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2011, **29**(6):06FF01.
- [21] Polyakov A, Thompson K F, Dhuey S D, *et al.* Plasmon resonance tuning in metallic nanocavities [J]. *Scientific Reports*, 2012, **2**(12):933.
- [22] Korobkin D, Urzhumov Y, Shvets G. Enhanced near-field resolution in midinfrared using metamaterials [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, **23**(3):468 - 478.
- [23] Palik E D. Handbook of optical constants of solids [M]. San Diego: Academic Press, 1985, 675 - 693.
- [24] Palik E D. Handbook of optical constants of solids [M]. San Diego: Academic Press, 1991, 1021 - 1034.

(上接第 91 页)