

50 mm × 50 mm 高性能 HgCdTe 液相外延材料的批生产技术

孙权志^{1,2,*}, 孙瑞赞¹, 魏彦锋¹, 孙士文¹, 周昌鹤^{1,2}, 徐超^{1,2}, 虞慧娴¹, 杨建荣¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用富碲垂直液相外延技术实现了 50 mm × 50 mm × 3 高性能碲镉汞外延材料的制备. 外延工艺的样品架采用了三角柱体结构, 并设计了防衬底背面粘液的样品夹具. 为保证大面积材料的均匀性, 工艺中加强了对母液温度均匀性和组分均匀性的控制, 50 mm × 50 mm 外延材料的组分均方差达到了 0.000 4, 厚度均方差达到了 0.4 μm. 在批量生产技术中, 加强了对单轮次生长环境的均匀性和生长轮次之间生长条件一致性的控制, 同一轮次生长的 3 片材料之间的组分偏差小于 0.000 4, 厚度偏差小于 0.1 μm, 不同生长轮次之间材料的组分之间的波动在 ±0.002 左右, 厚度之间的波动在 ±2 μm 左右. 工艺中对碲镉汞衬底的 Zn 组分、缺陷尺寸和缺陷密度也加强了控制, 以控制大面积外延材料的缺陷, 晶体双晶衍射半峰宽 (FWHM) 小于 30 弧秒, 外延材料的位错密度小于 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$, 表面缺陷密度小于 5 cm^{-2} . 外延材料经过热处理后, 汞空位型的 P 型 $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ 外延材料 77 K 温度下的载流子浓度被控制在 $8 \sim 20 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 空穴迁移率大于 $600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. 材料整体性能和批生产能力已能满足大规模碲镉汞红外焦平面探测器的研制需求.

关键词: 碲镉汞; 液相外延; 大尺寸; 高性能

中图分类号: TN304.2; TN305 **文献标识码:** A

Batch production technology of 50 mm × 50 mm HgCdTe LPE materials with high performance

SUN Quan-Zhi^{1,2,*}, SUN Rui-Yun¹, WEI Yan-Feng¹, SUN Shi-Wen¹,
ZHOU Chang-He^{1,2}, XU Chao^{1,2}, YU Hui-Xian¹, YANG Jian-Rong¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors of CAS,

Shanghai Institute of Technical Physics of CAS, Shanghai 200083;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: High performance $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epitaxial materials with the size of 50 mm × 50 mm were produced by Te-rich vertical LPE technology. The sample holder with triangle cylinder structure and a function to prevent HgCdTe solution soaking into the back of the substrates was designed and used to obtain 3 epitaxial materials for each growth process. In order to obtain uniform epilayers, the temperature uniformity and composition uniformity of HgCdTe solution during the process were improved. The STDDEVs for x-value and thickness distributions of 50 mm × 50 mm epitaxial material are 0.000 4 and 0.4 μm, respectively. The average values of x-value and thickness of three epitaxial wafers grown at the same time have a very small difference, less than 0.0004 and 0.1 μm, respectively. The differences of average x-values and thickness values from run-to-run are about ±0.002 and ±2 μm, respectively. In order to control the defects of HgCdTe epilayers, the lattice parameters and defects of CdZnTe substrates have been strictly controlled. The full width at half maximum (FWHM) of X-ray double-crystal rocking

curve for HgCdTe epilayers was controlled within 30". The dislocation density is less than $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$, and the surface defect density is less than 5 cm^{-2} . Utilizing annealing technique, the carrier concentration of Hg vacancy doped p-type $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ epilayers at 77 K were controlled in a range of $8 \sim 20 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and their hole mobility exceed $600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. The material performance and production capacity based on the LPE technique described above can satisfy the demand for fabricating large format HgCdTe infrared focal plane arrays.

Key words: HgCdTe, LPE, large size, high performance

PACS: 78.30.Fs

引言

碲镉汞(HgCdTe)红外焦平面探测器是军民两用的空间遥感技术、武器装备的告警和制导技术以及地面和航空装备技术发展所依赖的高端核心元器件,在国民经济和国防建设中发挥着重要作用.新型碲镉汞红外焦平面探测器技术的研究热点主要聚焦在超大规模、雪崩增益探测模式和高工作温度等方面^[1-4],对探测器的材料而言,超大规模要求材料具有大面积和高均匀性,雪崩增益探测和高工作温度则要求材料具有更低的缺陷密度,以降低探测器的漏电流、固定图形噪声、盲元率和制造成本.近年来,HgCdTe/CdZnTe液相外延(LPE)材料的最大尺寸已做到 $60 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ^[5],常规工艺的先进水平为 $47 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ ^[6-7],材料的组分和厚度的偏差分别做到 0.001 和 $1.4 \mu\text{m}$ ^[8],外延材料的缺陷包括位错和表面缺陷,外延层材料的位错密度与 CdZnTe 衬底的位错密度、衬底/外延层的晶格失配度相关,表面缺陷则与衬底的沉淀相缺陷密切相关.高质量材料对位错密度的要求是小于 $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$. 最新报道的结果显示,碲镉汞液相外延对 CdZnTe 衬底的要求是沉淀相缺陷的尺寸小于 $1 \mu\text{m}$,即在红外透射显微镜下看不到沉淀相缺陷^[7].

报道了 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的 HgCdTe 液相外延材料常规化生产技术的最新进展,通过对液相外延样品架和生长系统的改进,在原来生产 $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 4$ 的垂直富碲液相外延系统上实现了 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 3$ 的材料生长,单片材料面积提高了一倍,外延材料的总面积提高了 50%. 通过对 CdZnTe 衬底性能参数的控制, $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 碲镉汞外延材料的缺陷密度得到了有效的控制. 对材料性能评价的结果显示,外延材料的质量水平达到了文献报道的先进水平.

1 实验

报道了采用垂直浸渍式富碲液相外延方式大规

模生长 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 大尺寸碲镉汞材料. CdZnTe 衬底采用 $\Phi 120 \text{ mm}$ 垂直 Bridgman 生长工艺,经过定向、切割、粗抛、精抛、位错及夹杂物检测等工艺后提供给液相外延工艺使用. 衬底及外延表面为 (111)B 面.

在外延生长前,衬底进入外延炉前需经过清洗、化学抛光及腐蚀、再清洗等工艺. 垂直富碲液相外延所用母液为 $(\text{Cd}_{0.0463}\text{Hg}_{0.9537})_{0.1532}\text{Te}_{0.8468}$,母液配制过程是先将纯度为 7N 的 Te、Cd 和 Hg 装入石英管,经真空密封后放入摇摆炉高温混合,并采用淬火方式冷却合成,将石英管中的母液装入生长坩埚,再高温熔合成整块后用于垂直液相外延生长. 外延生长所用石墨样品架采用高纯石墨加工制作,一次可生长 3 片外延材料. 外延生长开始温度约 $460 \text{ }^\circ\text{C}$,理论过冷度(母液液相线温度的理论计算值与起始生长温度的实测值之差)约为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$,在约 60 分钟内匀速降温约 $8 \text{ }^\circ\text{C}$ 完成外延生长过程^[9,10]. 为了获得高均匀性的外延材料,在外延开始前和过程中增加了搅拌过程,并对搅拌过程中的温度控制进行了优化. 生长好的外延材料还需经过退火热处理,以调整材料的电学性能. 退火在垂直退火炉中进行,样品和汞源的温度根据材料组分和所需载流子浓度进行设置.

本文中使用的 Nexus 670 傅立叶变换红外光谱仪测试外延材料的室温红外透射光谱,根据光谱计算出外延材料的组分及厚度,光谱测量范围为 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$,测试步长为 10 cm^{-1} . 采用改进型腐蚀剂 ($\text{H}_2\text{O} 8 \text{ ml}$ 、 $\text{HCl} 8 \text{ ml}$ 、 $\text{HNO}_3 12 \text{ ml}$ 、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 5.1 \text{ g}$ 、 $\text{CrO}_3 2.5 \text{ g}$) 腐蚀外延材料表面^[11],然后在 Olympus BX51 显微镜(放大倍数为 1000 倍)下对样品表面进行观察并对位错腐蚀坑进行计数. 材料晶格质量用 Philips X'Pert 双晶衍射仪测量的双晶半峰宽进行评价,衍射面为 HgCdTe 的 (333) 面,衍射角扫描范围为 $38.13^\circ \sim 38.43^\circ$,并用 BedeScan 貌相仪对外延材料的 X 射线形貌相进行测试,分辨率为 $20 \mu\text{m}$. 材料载流子浓度和迁移率是采用 ECOPIA HMS-3000 小型 Hall 测试仪进行测量,磁场强度为 0.6 T .

2 结果与讨论

本文所使用的 CdZnTe 衬底尺寸为 50 mm × 50 mm, 厚度约为 950 μm, 衬底 PV 值(衬底表面最高点与最低点的差值) ≤ 5 μm; Zn 组分在 3% ~ 6% 之间, 单片衬底上 Zn 组分均方差 ≤ 0.5%; 位错腐蚀坑密度 (EPD) ≤ 5 × 10⁴ cm⁻², 双晶衍射半峰宽 (FWHM) ≤ 21"; 材料中沉淀相缺陷的尺寸 ≤ 5 μm, 部分衬底材料在红外显微镜下看不到沉淀相缺陷. 为避免较大的晶格失配导致外延材料表面出现粗糙结构, 破坏外延材料表面晶体结构的完整性, 工艺中需对衬底晶格常数及其均匀性进行控制, 晶格失配度被控制在 0.02% ~ 0.11% 之间. 为获得大面积高均匀性的衬底材料, 碲锌镉晶体采用了 Φ120 mm 的生长技术, 合格的衬底晶片都取自晶锭中部组分均匀性较好的区域. 为降低衬底材料中沉淀相缺陷的尺寸和密度, 在单晶生长工艺中采用高精度源材料化学计量比控制技术, 并在后续工艺中采用了减小甚至消除沉淀相缺陷的晶片退火技术^[12-13].

为了能在生长 40 mm × 30 mm × 4 的液相外延系统中实现 50 mm × 50 mm 的材料生长, 我们对样品架的结构进行了设计和加工. 样品架的结构从单次生长 4 片的长方体变为单次生长 3 片的三角柱体, 通过减少生长材料的片数(从 4 片改为 3 片)来增加样品架容纳衬底的面积. 图 1(a) 是两种样品架底部对比示意图, 在同样的腔体里, 要在更大面积的衬底上实现外延生长, 只有通过减少衬底贴附面数量来增大衬底的横向尺寸, 通过将长方体样品架改为三角柱体样品架, 可使衬底横向尺寸从原来的 40 mm 增加到 50 mm. 在纵向尺寸上, 为了使 30 mm 的尺寸增加到 50 mm, 我们通过增加坩埚的深度来容纳纵向尺寸增加的样品架, 在更换样品架后, 坩埚中的母液含量和外延炉的温度分布都需做相应的调整, 以保证衬底能完全插入母液, 并生长出均匀的外延材料.

垂直浸渍式液相外延对于衬底的夹持, 是将衬底贴附在样品架的贴附面上, 在衬底上边缘和下边缘各采用一个石墨螺丝对衬底进行挤压固定, 螺丝与衬底边缘只有小面积的点接触. 采用这种固定衬底的方式会对衬底产生一定的挤压形变, 使得衬底背面与样品架贴附面的结合不紧密, 导致在生长时母液渗进衬底背面, 生长后母液在衬底背面的残留使衬底和样品架发生粘连. 对于 50 mm × 50 mm 大面积的外延材料, 将粘连在样品架上的衬底取下时,

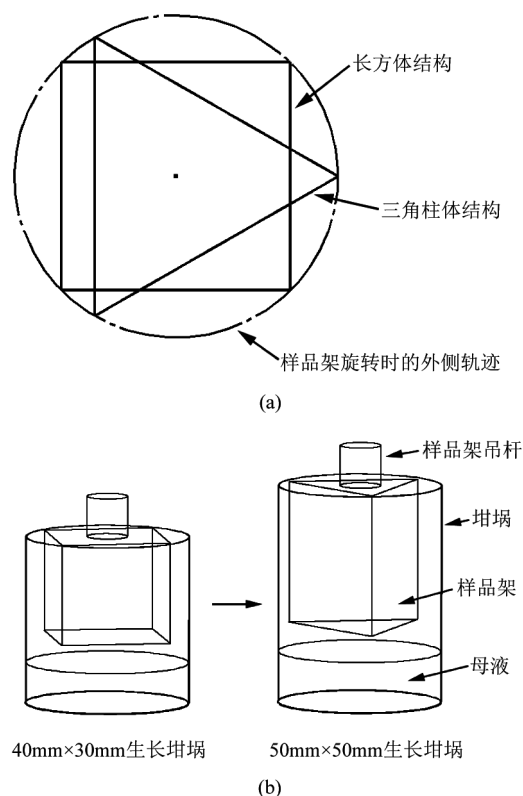


图 1 (a) 两种不同样品架底部对比示意图和 (b) 两种不同坩埚系统对比示意图

Fig. 1 The schematic drawing of (a) bottom view of two different sample holders and (b) two different crucibles

要采用很大的外力推动衬底, 这很容易造成外延材料裂片, 使得材料可用面积大大减小甚至报废. 为此, 在生长大面积外延材料时, 在样品架上采用了衬底背面保护技术, 如图 2 所示. 该技术是采用两条高纯石墨条紧密地压置在衬底垂直方向的两侧, 相比于点接触固定衬底的方法, 能够使得衬底与样品架贴附面的贴附更紧密, 从而使得在生长过程中, 熔化的母液不容易渗入到衬底背面, 有效地抑制了衬底背面粘液现象的出现, 这样不仅方便了取片, 同时也保证了外延材料的完整性. 通过采用这一技术, 外延材料的面积增大了一倍, 单次生长的材料总面积增加了 50%. 另外, 残留在衬底上的母液还会影响外延材料的红外光谱特性, 使基于红外透射光谱的 HgCdTe 外延材料组分和厚度表征无法直接进行, 为此, 需要增加去除母液工艺或改用其他表征技术. 因此, 采用衬底背面保护技术不仅避免了背面粘液, 也避免了材料参数表征的复杂化.

图 3(a) 是一块 50 mm × 50 mm 的液相外延材料, 可以看出外延材料表面平整, 整个外延材料没有

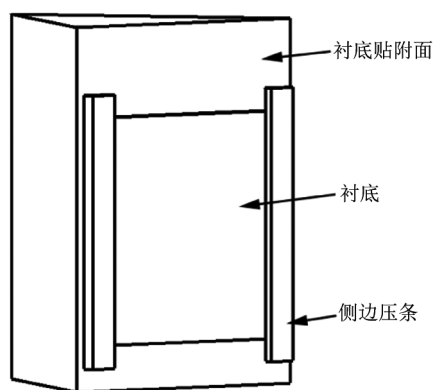


图2 衬底背面保护技术示意图
Fig. 2 The schematic drawing of substrate back protection technology

宏观缺陷. 在材料底部, 仅有少量母液残留, 这是样品架脱离母液时因母液粘滞造成的残留. 图 3(b) 是在 Nomarski 显微镜下放大 50 倍下观察到的外延材料表面形貌, 表面波纹为衬底表面原子层台阶 (与晶向偏离度相关) 造成的生长波纹, 使用与外延材料晶格失配度小和晶向偏离 [111] 方向小的衬底, 可以获得表面波纹稀疏的外延材料形貌. 加强对衬底沉淀相缺陷尺寸和密度的控制, 可以生长出低表面缺陷密度的碲镉汞外延材料, 镜检显示, 外延材料的表面缺陷密度小于 5 cm^{-2} .

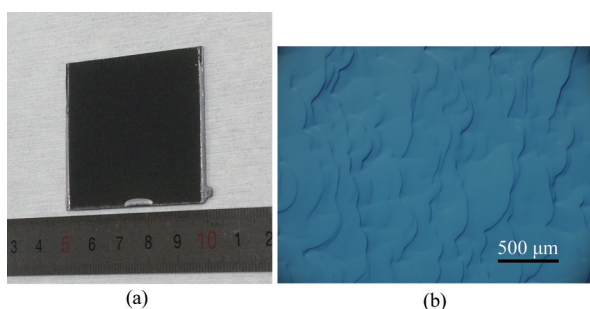


图3 (a) $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的碲镉汞液相外延样品和 (b) 其在 Nomarski 显微镜下观察到的表面显微形貌
Fig. 3 (a) $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ HgCdTe LPE sample and (b) its surface micro topography observed by Nomarski microscope

外延材料组分和厚度的均匀性采用红外透射光谱技术进行测量和表征 (本文中的“组分”若没有特别指出, 都表示 HgCdTe 外延材料中的 Cd 组分). 图 4(a) 是同一材料上 5 个不同位置处测量到的红外透射光谱曲线, 5 个测量点分别位于材料中央和四边中点偏离边缘 5 mm 处的位置, 如图 4(a) 中小图所示. 从图 4(a) 中可以看出这 5 条吸收光谱曲线的吸收边近似重合, 干涉峰间距近似相等, 说明这 5

处材料的组分和厚度非常均匀. 图 4(b) 列出了从图 4(a) 光谱曲线计算得到的材料组分和厚度, 可以看出, 外延材料的组分均方差为 0.000 4, 厚度均方差为 $0.4 \mu\text{m}$. 德国 AIM 报道中给出的液相外延材料的参数为: 在 20 cm^2 面积上截止波长波动范围 $0.05 \mu\text{m}$, 外延层厚度 PV 值小于 $1.4 \mu\text{m}$ ^[8], 若换算成厚度和组分均方差, 材料的组分均方差为 0.000 5, 厚度均方差为 $0.7 \mu\text{m}$. 可以看出, 图 4(b) 所示的材料组分厚度均匀性达到了 AIM 报道的先进水平. 外延材料组分和厚度的均匀性与生长母液和生长温场的均匀性密切相关. 生长母液的均匀性通过高温熔化段的充分旋转搅拌以及生长段的上下搅拌和样品架旋转搅拌来实现. 温场的均匀性通过监控坩埚内部和坩埚侧壁特定监测点的温度来实现. 每次生长完毕, 通过测试样品的组分和厚度均匀性来调整下一次的温场分布, 在得到均匀性良好的温场条件后, 每次生长通过调整炉子控温点的温度, 使监控点的温度满足均匀温场的要求, 在保证 Hg 损失不变的条件, 即可重复得到均匀性良好的外延材料.

外延每一轮次生长 3 片外延材料, 图 5(a) 是同一轮次生长的 3 片材料的组分与厚度, 3 片材料之间的组分偏差小于 0.000 4, 厚度偏差小于 $0.1 \mu\text{m}$. 为保证单轮次 3 片材料之间的均匀性, 除了要控制母液温度和组分的均匀性外, 还需要优化样品架的旋转条件, 维持 3 片材料生长环境的一致. 图 5(b) 是连续三轮次生长的材料的组分与厚度, 图中每一个点分别是单轮次生长的 3 片材料参数的平均值, 图中显示外延材料的组分之间的波动很小, 在 ± 0.002 左右, 相比之下, 外延层厚度之间的波动较大, 在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 左右, 这是由于垂直液相外延中存在的汞回流会对系统中的汞分压造成波动, 母液在工艺过程中总是存在一定量的汞原子泄露或流入, 进而引起母液熔点的波动. 为此, 工艺中将外延材料的厚度控制在正偏差, 外延后采用化学减薄的方法来满足芯片对外延材料厚度的要求.

位错密度是表征材料晶体质量的一个重要参数, 它与探测器的性能有着直接的联系. 为控制碲镉汞外延材料的位错密度, 工艺中衬底的位错密度被控制在 $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 以下, 衬底与外延材料的晶格失配度被控制在 $0.02\% \sim 0.11\%$ 之间, 采用 8°C 降温生长外延层厚度不超过 $15 \mu\text{m}$ 作为对生长状态下母液过冷度的控制条件, 采用此工艺条件后, 所获得的 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 碲镉汞液相外延材料的位错腐蚀坑密度能够做到小于 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$.

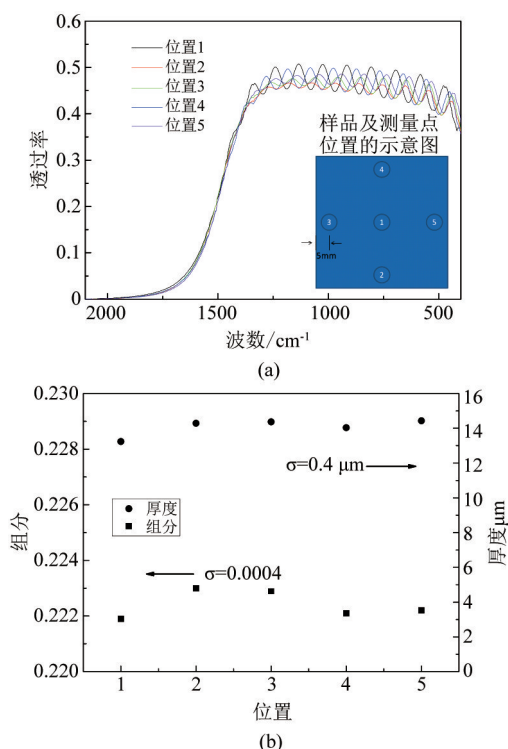


图4 50 mm × 50 mm 液相外延材料(a)五点不同位置的红外透射光谱和(b)对应的组分厚度计算数值

Fig.4 (a) Infrared transmitting spectra of five different points on a 50 mm × 50 mm LPE materials and (b) its corresponding calculative values of composition and thickness

外延材料的晶格完整性也可采用 X 射线双晶衍射来表征,如果晶格存在晶向偏差和缺陷,测试到的双晶衍射半峰宽(FWHM)将会展宽.测试结果显示,50 mm × 50 mm 碲镉汞外延材料的 FWHM 能达到 27",仅比衬底的展宽了几个弧秒.外延材料晶格的均匀性则可通过 X 光衍射光强度的面扫描成像来表征.测试结果显示,50 mm × 50 mm 材料晶格质量的均匀性良好.图6给出了材料中部约 35 mm 长度区域的 X 射线貌相图,图中显示出了分布均匀的 cross-hatch 形貌相,这种特征形貌是由衬底与外延层之间存在的较小的晶格失配引起的^[14-15],图中并未呈现沉淀相和晶界等缺陷.

对于 HgCdTe 红外焦平面探测器工艺来说, HgCdTe 材料的晶体质量是制备高性能探测器的基础,材料组分和厚度的均匀性和材料晶格的完整性与红外焦平面探测器的均匀性、盲元率以及探测器的空间图形噪声等参数密切相关,除此之外,碲镉汞材料的电学性能也是影响探测器性能(如漏电流、结电容和探测率等)的重要参数.通过采用开管式热处理工艺^[16],本实验为汞空位型 N⁺-on-P 器件研

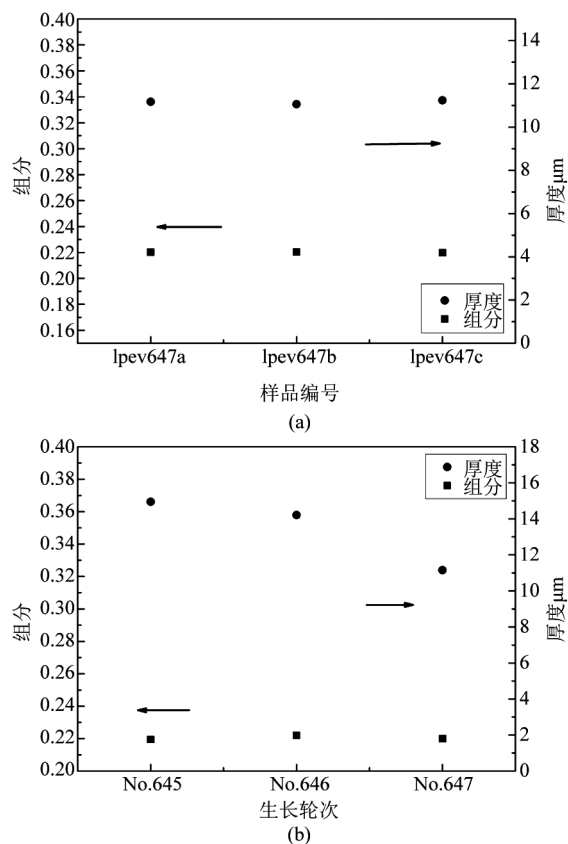


图5 (a)同一轮次生长的3片外延材料组分厚度和(b)连续三轮次生长的外延材料组分厚度

Fig.5 (a) Composition and thickness of three LPE materials grown in the same run and (b) composition and thickness of materials grown in three continuous runs



图6 液相外延材料 X 射线貌相图

Fig.6 X-ray topography of LPE materials

制了目标 p 型载流子浓度为 $1 \sim 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (77K 温度下)的 $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ 外延材料,退火后材料的实测霍尔浓度能被很好地控制在 $0.8 \sim 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 之间,霍尔迁移率在 $600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上,材料电学性能完全符合碲镉汞材料应有的内在特性.

3 结论

通过将样品架改造为三角柱体结构和应用防衬底背面粘液的样品夹具,在 $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 4$ 的碲镉汞液相外延系统中用富碲垂直液相外延工艺实现

(下转第 59 页)

photodiode characterization[J]. *Proc Spie*, 1999, 334 - 343.

- [11] Musca C A, Redfern D A, Smith E P G, *et al.* Junction depth measurement in HgCdTe using laser beam induced current (LBIC) [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1999, **28**(6): 603 - 610.
- [12] Qiu W. C, Hu W. D.. Laser beam induced current microscopy and photocurrent mapping for junction character-

ization of infrared photodetectors[J]. *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2014, **58**(2): 1 - 13.

- [13] Qiu W. C, Hu, W. D. Lin T, *et al.*, Temperature-sensitive junction transformations for mid-wavelength HgCdTe photovoltaic infrared detector arrays by laser beam induced current microscope [J]. *Applied Physics Letters*, 105, 191106 (2014)

(上接 53 页)

了 50 mm × 50 mm × 3 大尺寸碲镉汞液相外延材料的批量化生长. 采用这一技术后, 外延材料的面积增大了一倍, 单次生长的材料总面积增加了 50%. 外延工艺采用的 CdZnTe 衬底采用了 Φ120 mm 大直径晶锭生长单晶技术, 衬底缺陷通过后续退火技术进行了改善, 并采用检测技术进行了筛选. 外延工艺加强了对母液的温度均匀性和组分均匀性的控制, 生长出的 HgCdTe 材料的组分和厚度均匀, 组分均方差达到了 0.000 4; 厚度均方差达到了 0.4 μm; 为了实现批量生产, 同一轮次生长的 3 片材料之间的组分偏差 < 0.000 4, 厚度偏差 < 0.1 μm, 不同生长轮次之间材料的组分之间的波动在 ±0.002 左右, 厚度之间的波动在 ±2 μm 左右; 外延材料的晶体双晶衍射半峰宽 (FWHM) < 30", 位错腐蚀坑密度 < 1 × 10⁵ cm⁻², 表面缺陷密度 < 5 cm⁻², X 光貌相显示出的晶格完整性良好. 在 77 K 温度下, Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te 材料的载流子浓度被控制在 8 ~ 20 × 10¹⁵ cm⁻³, 空穴迁移率在 600 cm²/Vs 以上. 材料整体性能和批生产能力已能满足大规模碲镉汞红外焦平面探测器的研制需求.

致谢

作者衷心感谢为衬底生长工艺做出贡献的张诚、沈灏、陆丞、周梅华、王云和储远洋, 为液相外延工艺做出贡献的张娟、陈倩男和朱明星, 以及为工艺设备维护方面做出贡献的祝海彬等人.

References

- [1] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2011, **54**: 136 - 154.
- [2] 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: 3 - 7.
- [3] Reibel Y, Rouvie A, Nedelcu A, *et al.* Large format, small pixel pitch and hot detectors at SOFRADIR[J]. *Proc. of SPIE*, 2013, 8896: 88960B - 1 - 11.
- [4] Hanold B J, Figer D F, Lee J, *et al.* Large format MBE HgCdTe on silicon detector development for astronomy[J].

Proc. of SPIE, 2015, **9609**: 96090Y - 1 - 15.

- [5] Becker L. Current and future trends in infrared focal plane array technology[J]. *Proc. of SPIE*, 2005, 5881: 588105 - 1 - 15.
- [6] Gravrand O, Destefanis G, Bisotto S, *et al.* Issues in HgCdTe research and expected progress in infrared detector fabrication[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42**(11): 3349 - 3358.
- [7] Castelein P, Baier N, Gravrand O, *et al.* Latest developments on p-on-n HgCdTe architectures at DEFIR[J]. *Proc. of SPIE*, 2014, **9070**: 90702Y - 1 - 14.
- [8] Wenisch J, Bitterlich H, Bruder M, *et al.* Large-format and long-wavelength infrared mercury cadmium telluride detectors[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42**(11): 3186 - 3190.
- [9] Wei Yan-Feng, Chen Xin-Qiang, Cao Wu-Mei. Growth and defects characterization of HgCdTe film grown by LPE method[J]. *Infrared and Laser Engineering* (魏彦锋, 陈新强, 曹妩媚. HgCdTe 液相外延材料生长及缺陷表征. *红外与激光工程*), 2006, **35**(3): 294 - 296.
- [10] Yang Jian-Rong, Zhang Chuan-Jie, Fang Wei-Zheng, *et al.* Te-rich dipping technique of HgCdTe liquid phase epitaxy[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (杨建荣, 张传杰, 方维政, 等. 碲镉汞富碲垂直液相外延技术. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(5): 325 - 329.
- [11] Cui Xiao-Pan. Defects in CdZnTe substrates and its effects on the performances of the HgCdTe epilayers[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, CAS (崔晓攀. 碲镉汞衬底缺陷及其对碲镉汞外延材料性能的影响. 上海: 中科院上海技术物理研究所), 2012.
- [12] 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.
- [13] Sheng Feng-Feng. Study of characteristics of defects in CdZnTe materials and the annealing technique [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, CAS (盛锋锋. CdZnTe 材料缺陷特性及热处理技术研究. 上海: 中科院上海技术物理研究所), 2014.
- [14] Tobin S P, Smith F T J, Norton P W, *et al.* The relationship between lattice matching and crosshatch in liquid phase epitaxy HgCdTe on CdZnTe substrates[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1995, **24**(9): 1189 - 1199.
- [15] Rhiger D R, Sen S, Peterson J M, *et al.* Lattice mismatch induced morphological features and strain in HgCdTe epilayers on CdZnTe substrates[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1997, **26**(6): 515 - 523.
- [16] Yang Jian-Rong. Annealing technology of HgCdTe epilayers in open chamber(杨建荣. 开管式碲镉汞外延材料热处理方法)[P]. 中国发明专利, 2001, 01131924.0.