

碲锌镉衬底晶面极性对水平液相外延碲镉汞薄膜的影响

霍勤, 张诚, 焦翠灵, 王仍, 毛诚铭, 陆液, 乔辉*, 李向阳

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

摘要: 研究了碲锌镉衬底(111)晶面的不同极性对水平推舟液相外延生长碲镉汞薄膜的影响。实验结果显示, (111)A面碲锌镉衬底水平液相外延生长碲镉汞薄膜材料组分和厚度均与常规(111)B面碲锌镉衬底碲镉汞薄膜材料相当; 碲镉汞母液在采用(111)A面、(111)B面衬底进行液相外延生长的碲镉汞薄膜上接触角分别为 $(50\pm 2)^\circ$ 和 $(30\pm 2)^\circ$, 结合微观模型分析确认碲镉汞母液在碲镉汞薄膜(111)A面存在更大的表面张力; 观察并讨论了(111)A面碲镉汞与(111)B面碲镉汞薄膜材料表面微观形貌的差别; 实验获得的(111)A面碲镉汞薄膜XRD半峰宽为 33.1 arcsec 。首次报道了(111)晶面选择对母液残留的影响, 研究结果表明, 采用(111)A面碲锌镉衬底进行碲镉汞水平推舟液相外延生长, 能够在不降低晶体质量的情况下, 大幅减小薄膜表面母液残留。

关键词: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体; CdZnTe 衬底; 液相外延; (111)A面; (111)B面

中图分类号: TN213

文献标识码: A

Effect of polarity of CdZnTe substrate on slider liquid phase epitaxy of HgCdTe

HUO Qin, ZHANG Cheng, JIAO Cui-Ling, WANG Reng, MAO Cheng-Ming, LU Ye, QIAO Hui*, LI Xiang-Yang

(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The effect of CdZnTe substrates with different polarity (111) plane on slider liquid phase epitaxial growth of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ was studied. The experimental results show that the composition and thickness of HgCdTe films grown by slider liquid phase epitaxy on (111)A surface CdZnTe substrate were equivalent to those on conventional (111)B surface CdZnTe substrate. The contact angles between HgCdTe melt and (111)A surface and (111)B surface of HgCdTe films grown on CdZnTe substrate were respectively $(50\pm 2)^\circ$ and $(30\pm 2)^\circ$. It is confirmed that the surface tension between HgCdTe melt and (111)A surface of HgCdTe film is larger combined with micro model analysis. The difference between the surface morphology of HgCdTe film grown on (111)A surface and that on (111)B surface was observed and discussed. The FWHM of the HgCdTe film grown on (111)A surface was 33.1 arcsec . The effect of (111) plane polarity on melt droplet is reported for the first time, and the results show that slider liquid phase epitaxy of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ on (111)A surface CdZnTe substrate can greatly reduce melt droplet of the film without reducing the crystal quality.

Key words: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ crystal, CdZnTe substrate, liquid phase epitaxy, (111)A surface, (111)B surface

引言

碲镉汞是用于红外探测的一种极其重要的三元窄禁带半导体材料, 具有一系列其他红外半导体材料无可比拟的优点, 在红外遥感、红外夜视、红外

测温、红外报警等国防军事及国民经济各个领域发挥重要的作用^[1-3]。液相外延目前仍然是制备碲镉汞外延材料的主流技术之一^[4-5], 具有生长设备较为简单、成本相对低廉, 以及生长过程接近于热力

收稿日期: 2022-03-17, 修回日期: 2022-11-06

Received date: 2022-03-17, revised date: 2022-11-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504700); 上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1454800)

Foundation items: Supported by National Key R&D Program of China(2018YFB0504700); Shanghai Sailing Program(19YF1454800)

作者简介(Biography): 霍勤(1990-), 男, 四川射洪人, 助理研究员, 博士, 主要从事红外探测器材料生长和性能表征的研究。

E-mail: huoqin@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: qiaohui@mail.sitp.ac.cn

学平衡状态、薄膜的缺陷密度低和结晶质量高的优点。碲镉汞晶体的晶格常数可随锌组分的变化连续可调,因此可以和不同组分的碲镉汞晶格常数完美匹配,这是Si、GaAs等其他衬底无法相比的优势。因此,碲镉汞衬底成了第二代和第三代高性能碲镉汞红外焦平面探测器尤其是长波探测器所使用的主要衬底材料^[6]。

碲镉汞晶体具有闪锌矿结构,对于闪锌矿结构晶体而言,(111)面是表面原子密度最高的晶面,从微观上看也是最平整的表面。通常情况下,碲镉汞液相外延都在(111)晶面的衬底上进行。闪锌矿结构晶体的(111)晶面由两层不同原子交叉堆积而成,由于闪锌矿结构不具有对称中心,因此(111)晶片的两个表面具有不同的极性,正极性的金属原子层表面被定义为(111)A表面,负极性的非金属原子层表面被定义为(111)B表面^[7-8]。显而易见,在碲镉汞衬底上外延生长的碲镉汞薄膜具有与对应的衬底相同的极性^[9]。闪锌矿结构晶体(111)A表面与(111)B表面上原子的化学状态不同,以碲镉汞晶体为例,其(111)B面每个Te原子具有1个悬挂键,每个Cd原子具有3个悬挂键;而(111)A面每个Cd原子仅具有一个悬挂键,每个Te原子具有3个悬挂键^[10]。因此,(111)A表面与(111)B表面上原子活性与吸附特性有着明显差别^[11-12]。有理由认为,(111)面碲镉汞衬底的极性和表面化学状态会影响Te原子和Hg原子在(111)面上吸附和扩散的能力,从而进一步影响碲镉汞薄膜材料在(111)面碲镉汞衬底上液相外延的生长机制。然而,目前关于碲镉汞衬底(111)面晶向选择对碲镉汞液相外延的影响,并没有完整系统的研究工作被报道。(111)A面与(111)B面碲镉汞衬底均被用于碲镉汞薄膜材料的外延生长,比较而言,国内外绝大部分研究机构,如DRS公司、Teledyne公司、华北光电技术研究所、昆明物理所、上海技物所等均更多采用(111)B面进行外延生长^[13-17],这可能是因为(111)B面是碲面,碲原子在衬底表面相对镉原子受环境影响要小一些,也有报道称(111)B面具有不容易受衬底Cu杂质污染的优点^[18-19]。但也有部分机构坚持使用(111)A面衬底,其优点并没有被说明^[21]。美国Raytheon公司采用(111)A面碲镉汞衬底液相外延生长的(111)A面碲镉汞薄膜,其结晶质量良好,EPD密度小于 $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$,但表面形貌相对较为粗糙^[20]。

本文分别采用(111)A面和(111)B面碲镉汞衬底水平推舟外延生长了碲镉汞薄膜,对外延薄膜的光学性能、表面形貌、晶体质量等进行了表征,明确了碲镉汞衬底(111)A面与(111)B面在水平液相外延生长中的差别。本文首次报道了采用(111)A面碲镉汞衬底进行水平推舟液相外延生长可以大幅减少碲镉汞薄膜材料表面母液残留,并从碲镉汞(111)A面和(111)B面表面原子结构的差异出发,结合实验分析,认为碲镉汞生长母液在碲镉汞(111)A表面具有相对更大的表面张力,从而导致更少的残留母液。

1 实验

1.1 生长条件

本实验所采用的碲镉汞衬底为通过布里奇曼法生长的碲镉汞单晶材料切割而成,切割方向为(111)方向,衬底尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。在测试前,对表面进行机械抛光和化学机械抛光,去除表面损伤层,在生长前进一步使用0.5%的溴乙醇溶液腐蚀30 s以获得新鲜表面。外延生长采用水平推舟外延生长技术,母液配比为 $(\text{Cd}_{0.049}\text{Hg}_{0.951})_{0.170}\text{Te}_{0.830}$,目标薄膜组分为 $\text{Hg}_{0.80}\text{Cd}_{0.20}\text{Te}$ 。外延生长开始温度为 $470 \text{ }^\circ\text{C}$,降温速率为 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,生长时间为40 min。

1.2 测试设备和测试条件

本文中使用的Varian 3100 FI-IR红外光谱仪测试薄膜材料的室温红外透射光谱,根据红外透射光谱计算出外延薄膜材料组分和厚度;使用Olympus STM6偏光光学显微镜对薄膜表面形貌进行观察;使用D8 DISCOVER 2000高分辨双晶摇摆X射线衍射仪(XRD)对薄膜材料的晶体质量进行评价。

2 结果和讨论

图1(a)、(d)分别为一片(111)A面液相外延碲镉汞薄膜和一片(111)B面液相外延碲镉汞薄膜上5个不同点位的红外透射曲线,两个样品透过率均在30%~40%左右,从该图中可以清楚地分辨出干涉峰与吸收边位置,从中可以分别计算出(111)A面碲镉汞液相外延样品与(111)B面碲镉汞液相外延样品的组分和厚度。计算结果分别列入图1(b)、(e)中,根据计算,(111)A面碲镉汞液相外延样品的Cd组分 x 为0.205,组分均方差为0.0007,厚度平均值为 $13.84 \text{ } \mu\text{m}$,厚度均方差为 $1.26 \text{ } \mu\text{m}$; (111)B面碲镉汞液相外延样品的Cd组分 x 为0.203,组分均方差为0.0009,厚度平均值为 $17.51 \text{ } \mu\text{m}$,厚度均方差为

1.7 μm 。计算结果表明,在(111)A面和(111)B面生长的碲镉汞薄膜,Cd组分接近,组分分布均匀,厚度均匀性相对较差,在两个晶面生长的碲镉汞薄膜均匀性处于同一水平。图1(c)、(f)分别列出了(111)A面和(111)B面上三轮液相外延生长的碲镉汞薄膜组分与厚度,图中每一点为一片碲镉汞薄膜组分和厚度的平均值。结果显示,(111)A面外延碲镉汞薄膜的组分偏差值为0.0027,(111)B面外延碲镉汞薄膜的组分偏差值为0.0019,(111)A面外延碲镉汞薄膜的厚度偏差值为3.8 μm ,(111)B面外延碲镉汞薄膜的厚度偏差值为2.5 μm 。在(111)A面和(111)B面外延生长的碲镉汞薄膜均为组分偏差值在0.003左右,厚度偏差值在4 μm 左右的水平,该结果也与我们常规工程生产的水平接近。总共六轮不同晶面生长碲镉汞薄膜的组分偏差值为0.0028,厚度偏差值为4.4 μm ,与相同晶面LPE (liquid phase epitaxy)生长实验轮次间偏差值处于同一水平,说明采用不同晶向的(111)面碲镉汞衬底进行生长对于碲镉汞薄膜透过率,组分和厚度等参数并无明显影响。

图2为液相外延薄膜材料样品照片,可以看出(111)A面碲镉汞液相外延样品和(111)B面碲镉汞液相外延样品均表面平整,无宏观缺陷。母液残留位于液相外延薄膜材料边缘,可以看出,(111)B面碲镉汞液相外延样品的母液残留面积大于(111)A面碲镉汞液相外延样品的母液残留面积,此外,(111)A面碲镉汞液相外延样品与(111)B面碲镉汞液相外延样品的母液残留形貌迥然相异。(111)B面碲镉汞液相外延样品上的母液残留呈球冠状,与衬底接触面积较大,高度较低;(111)A面碲镉汞液相外延样品上的母液残留呈半球形,与衬底接触面积较小,高度更高。这说明碲镉汞液滴在(111)A面上更倾向于团聚成球形以减小和碲镉汞薄膜的接触面积,相同体积的碲镉汞液滴在(111)A面的接触面积更小。在生长过程中,完成碲镉汞LPE生长后,迅速拉舟冷却至室温,母液残留在此过程中快速冷却凝固,因此,薄膜表面母液残留的形貌基本可以反映高温下碲镉汞熔体与薄膜表面的接触形貌。据此可以判断碲镉汞熔体在(111)A面上具有更大的浸润角和更大的表面张力。

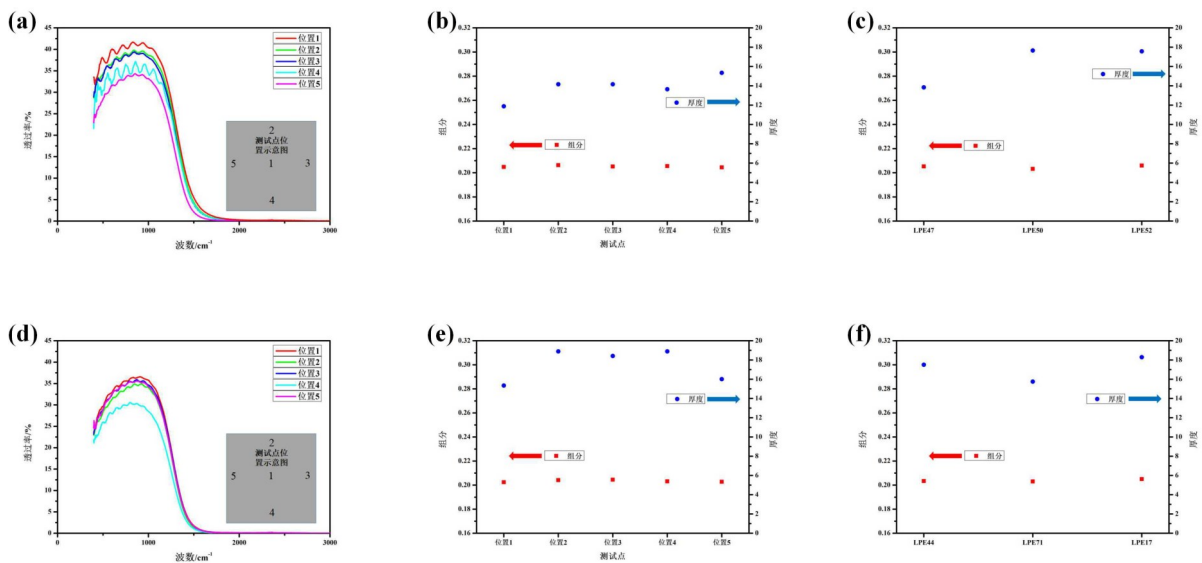


图1 (a)CdZnTe(111)A面液相外延HgCdTe五点红外透过光谱;(b)相应五点的组分和厚度计算值;(c)三片CdZnTe(111)A面液相外延HgCdTe的组分和厚度;(d)CdZnTe(111)B面液相外延HgCdTe五点红外透过光谱;(e)相应五点的组分和厚度计算值;(f)三片CdZnTe(111)B面液相外延HgCdTe的组分和厚度

Fig. 1 (a) Infrared transmission spectra of five points on HgCdTe LPE material on CdZnTe (111) A surface, (b) Its corresponding calculative values of composition and thickness of the five points, (c) Composition and thickness of three HgCdTe samples on CdZnTe (111) A surface, (d) Infrared transmission spectra of five points on HgCdTe LPE material on CdZnTe (111) B surface, (e) Its corresponding calculative values of composition and thickness of the five points, (f) Composition and thickness of three HgCdTe samples on CdZnTe (111) B surface

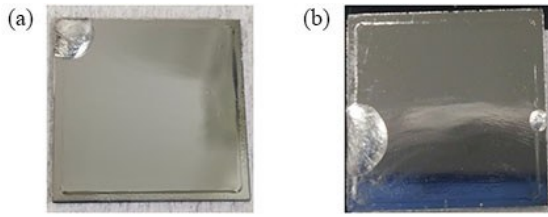


图2 (a)CdZnTe(111)A面液相外延HgCdTe材料的宏观表面形貌照片;(b)CdZnTe(111)B面液相外延HgCdTe材料的宏观表面形貌照片

Fig. 2 (a) Photo of LPE HgCdTe sample on CdZnTe (111) A surface; (b) Photo of LPE HgCdTe sample on CdZnTe (111) B surface

通过侧向拍照手段对碲镉汞母液残留的轮廓曲线进行更进一步的分析处理,初步计算了碲镉汞熔体在(111)A面和(111)B面的接触角和表面张力。图3(a)、(c)、(e)为碲镉汞母液残留在(111)A面的侧面照片,图3(b)、(d)、(f)为碲镉汞母液残留在(111)B面的侧面照片。为求实验结果的普遍性和有效性,图3(e)、(f)与3(a)-(d)中所采用的碲镉汞衬底产自不同的衬底生产厂商。通过图像处理,可以看出,在多层外延生长实验中,碲镉汞母液在

(111)A面和(111)B面的接触角分别保持不变,碲镉汞母液在(111)A面的接触角均为 $(50\pm 2)^\circ$,而在(111)B面的接触角仅为 $(30\pm 2)^\circ$ 。根据三相接触角公式^[22],可以计算碲镉汞母液在碲镉汞薄膜表面的表面张力:

$$\gamma_{gl} \cdot \cos\theta + \gamma_{sl} = \gamma_{sg} \quad (1)$$

式(1)中, γ_{gl} 为三相接触时气液表面的表面张力, γ_{sg} 为三相接触时气固表面的表面张力, γ_{sl} 为三相接触时液固表面的表面张力, θ 为三相接触时液体在固体表面的接触角。从式(1)可以得出 $\gamma_{Al} - \gamma_{Bl} = -\gamma_{gl} \cdot (\cos\theta_A - \cos\theta_B)$, $\gamma_{Al} = \gamma_{Bl} + 0.22\gamma_{gl}$ 。显而易见,碲镉汞熔体在碲镉汞薄膜(111)A面和(111)B面的表面张力也相应地均为定值,且在(111)A面的表面张力大于在(111)B面的表面张力。

该现象的成因本质是闪锌矿结构晶体(111)A面与(111)B面表面化学结构不同。碲镉汞晶体与碲镉汞晶体均为闪锌矿结构,且具有非常接近的晶格常数。闪锌矿结构的碲镉汞晶体和碲镉汞晶体(111)B面最外层为Te原子层,其中每个Te原子具有1个悬挂键,次外层为金属原子层,其中每个Hg

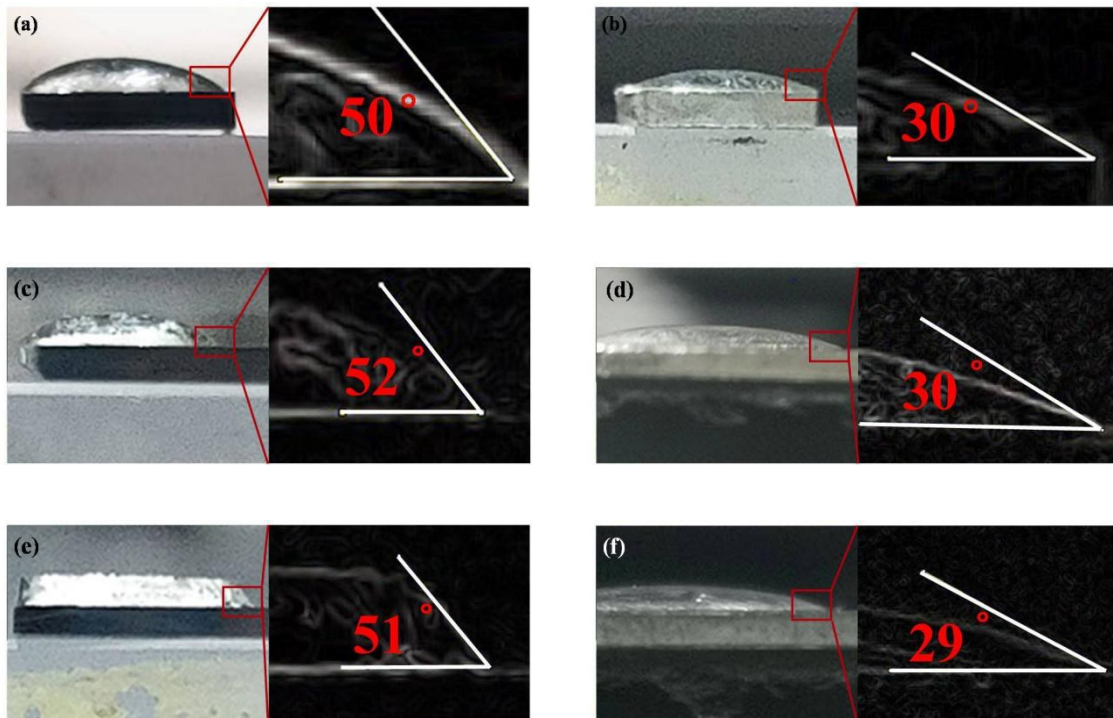


图3 (a)(c)(e)CdZnTe(111)A面液相外延HgCdTe材料母液残留正、侧向照片;(b)(d)(f)CdZnTe(111)B面液相外延HgCdTe材料母液残留正、侧向照片

Fig. 3 (a) (c) (e) Droplet photos of LPE HgCdTe film on CdZnTe (111) A surface; (b) (d) (f) Droplet photos of LPE HgCdTe film on CdZnTe (111) B surface

(或Cd)原子具有3个悬挂键;而(111)A面最外层为金属原子层,其中每个Hg(或Cd)原子仅具有一个悬挂键,次外层为Te原子层,其中每个Te原子具有3个悬挂键^[12, 21]。吸附原子在衬底表面的吸附能力取决于吸附原子在衬底表面的成键强度和成键数量,对Te原子而言,晶体表面Hg/Cd等金属原子的悬挂键数量决定了Te吸附原子的成键数量,随着表面金属原子悬挂键的数量的增加,表面对Te原子的吸附能力也随之提高^[23-24]。上述观点与过往诸多关于CdTe、CdZnTe、HgCdTe等闪锌矿结构晶体(111)表面吸附实验和第一性原理理论计算的工作也均完全相符^[11, 12, 25, 26];对于同种原子而言,吸附原子吸附在其次外层位点时能量更低,成键更强。因此,相比每个金属原子仅具有1个悬挂键的(111)A面,Te原子在每个金属原子具有3个悬挂键的(111)B面更容易被吸附,Te熔体在(111)B面具有更低的表面张力。水平推舟液相外延技术采用Te溶剂作为生长母液,在本实验母液组分中,碲原子含量接近90%,生长母液的润湿性质由碲原子主导,接近碲熔体。图4形象地描述了碲镉汞母液在碲镉汞薄膜(111)B面上因表面金属原子具有更多的悬挂键,从而被更牢固地吸附在碲锌镉衬底表面的机理过程。因此,液相外延母液在(111)A面上具有更大的表面张力,更容易团聚成球形,也更加容易在生长后被完全推出,这一点对于水平推舟液相外延生长来说是尤为有利的。在相同条件下,使用(111)A面碲锌镉衬底生长的碲镉汞薄膜母液残留更小。在适当调整外延生长工艺后,本课题组更是成功利用碲锌镉(111)A表面的这种特性,水平外延生长出了无母液残留的碲镉汞薄膜,解决了困扰碲镉汞水平推舟液相外延生长的一大痼疾。

图5(a)为(111)A面碲镉汞液相外延样品在

Normaski 偏光显微镜下放大500倍的液相外延材料表面形貌,图5(b)为(111)B面碲镉汞液相外延样品在Normaski 偏光显微镜下放大500倍的液相外延材料表面形貌。两者均有明显的表面波纹,这些表面波纹是由液相外延生长过程中的生长台阶所造成的,这反映了液相外延的生长模式。可以看出,(111)A面碲镉汞薄膜的表面波纹形貌明显异于(111)B面碲镉汞薄膜,(111)B面碲镉汞薄膜表面波纹轮廓呈自然弯曲的流线型,所有弯曲处均为圆角,与文献报道中形貌相同^[27-29];而(111)A面碲镉汞薄膜表面波纹的轮廓则为锯齿形,轮廓线上密布着一个个小齿结构,该形貌结构未见诸过往文献中。正如前文所述,生长台阶反映了液相外延的生长模式,生长台阶轮廓与碲镉汞成核岛横向生长前端轮廓密切相关,表面波纹轮廓形貌的差异意味着分别使用(111)A面与(111)B面液相外延生长时,横向生长机理存在一定的差异,但其具体原因目前仍有待进一步分析。

HRXRD 是分析晶体结晶质量的重要手段之一。在高分辨XRD测试中,我们可以通过双晶摇摆曲线的半峰宽(FWHM)来对晶体的质量进行表征。如果材料中存在晶格缺陷和位错,会导致测试到半峰宽展宽。为了研究衬底生长面极性对薄膜材料晶格质量的影响,我们使用高分辨XRD衍射仪对液相外延HgCdTe薄膜进行了 ω -扫描测试。测试的结果显示,(111)A面液相外延HgCdTe薄膜与(111)B面液相外延HgCdTe薄膜的FWHM分别为33.1 arcsec和39.6 arcsec。对于碲镉汞材料(333)晶面FWHM文献一般报道水平为25~40 arcsec^[30, 31]。该结果说明在(111)B面与(111)A面碲锌镉衬底上生长的碲镉汞薄膜材料均具有较高的晶体质量。33.1 arcsec的半峰宽表明使用(111)A面碲锌镉衬

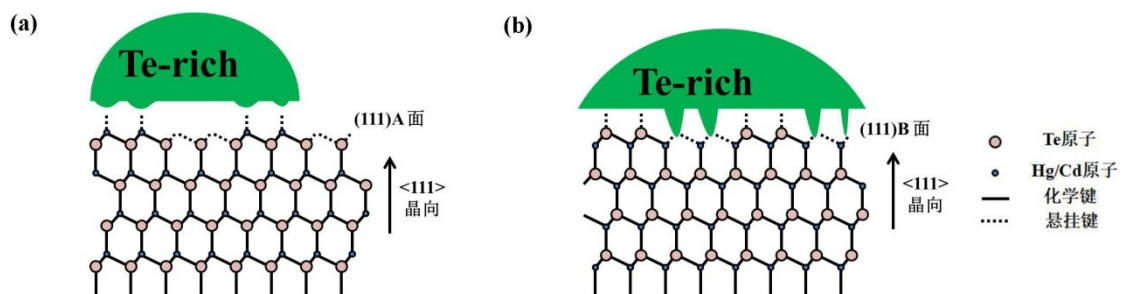


图4 水平推舟液相外延HgCdTe母液在碲镉汞(111)表面接触吸附示意图:(a)HgCdTe母液熔体位于(111)A面;(b)HgCdTe母液熔体位于(111)B面

Fig. 4 Schematic diagram of HgCdTe melt on HgCdTe film (111) surface in slider liquid phase epitaxial growth: (a) HgCdTe melt on HgCdTe (111) A surface, (b) HgCdTe melt on HgCdTe (111) B surface

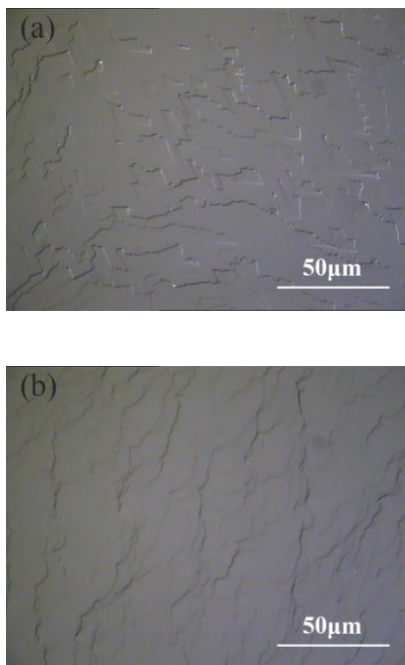


图5 (a)CdZnTe(111)A面液相外延HgCdTe的表面显微形貌;(b)CdZnTe(111)B面液相外延HgCdTe的表面显微形貌
Fig. 5 (a) Surface morphology of LPE HgCdTe on CdZnTe (111) A surface; (b) Surface morphology of LPE HgCdTe on CdZnTe (111) B surface

底进行外延生长,其晶体质量相对于使用(111)B面作为外延生长面并未恶化。

3 结论

本文采用水平推舟液相外延生长技术,在相同的工艺条件下,通过(111)A面和(111)B面碲锌镉衬底分别进行了碲镉汞外延生长实验,研究了不同极性的(111)晶面碲锌镉衬底对碲镉汞液相外延生长结果的影响。实验显示,碲锌镉(111)A面生长的碲镉汞薄膜组分、厚度、透过率等性能指标与碲锌镉(111)B面生长的碲镉汞薄膜相近。由于相较于(111)A面,(111)B面碲锌镉衬底外延生长的(111)B面碲镉汞薄膜表面Hg/Cd金属悬挂键更多,Te原子更容易在(111)B面上吸附,因此,碲镉汞母液在(111)A面上的表面张力更小,更容易在生长结束被扫出衬底,相同条件下,(111)A面上的母液残留面积更小。由于外延生长晶格输运机理有所区别,(111)A面碲锌镉衬底生长的碲镉汞薄膜生长台阶轮廓明显异于(111)B面,但其具体影响机制有待进一步研究。使用(111)A面和(111)B面外延生长的碲镉汞薄膜材料XRD半峰宽分别为33.1arcsec和

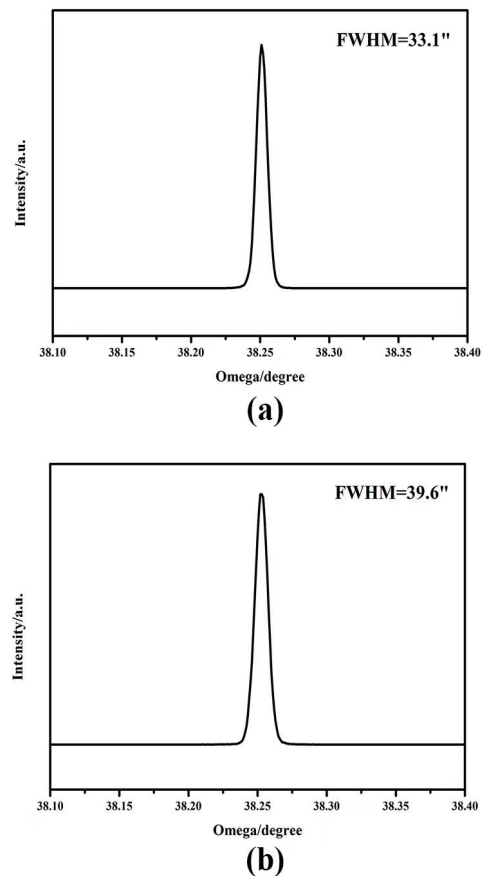


图6 (a)CdZnTe(111)A面液相外延HgCdTe材料XRD双晶摇摆曲线(b)CdZnTe(111)B面液相外延HgCdTe材料XRD双晶摇摆曲线

Fig. 6 (a) The ω -scans HRXRD rocking curve of LPE HgCdTe film grown on CdZnTe (111) A surface; (a) The ω -scans HRXRD rocking curve of LPE HgCdTe film grown on CdZnTe (111) B surface

39.6 arcsec,均具有较好的晶体质量。

本研究结果表明,采用(111)A面碲锌镉衬底外延生长的碲镉汞薄膜,晶体质量、表面形貌等均不劣于采用(111)B面碲锌镉衬底外延生长碲镉汞薄膜,(111)A面碲锌镉衬底还额外具有生长后母液易扫出的优势。因此可以认定,相较于通常使用的(111)B面碲锌镉衬底,使用(111)A面碲锌镉作为衬底材料是水平推舟液相外延碲镉汞薄膜更加优秀的技术途径。

References

- [1] Rogalski A. History of infrared detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2012, 20(3): 279 - 308.
- [2] Chen Boliang, Li Xiangyang. Infrared imaging detectors for space applications [M]. Science Press, 2016. (陈伯良, 李向阳. 航天红外成像探测器. 科学出版社), 2016.

- [3] WenLei, Antoszewski J, Faraone O. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, **2**(4): 041303.
- [4] 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): 3349–58.
- [5] Zeng Gehong. Development and Prospect of IR FPAs [J]. *Infrared Technology*, (曾戈虹. 红外焦平面器件的研制与展望. 红外技术), 1995, **17**(3): 1–5.
- [6] Sun Quanzhi, Wei Yanfeng, Zhang Juan, *et al.* Effect of Lattice Mismatch on HgCdTe LPE Film Surface Morphology [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, **45**(9): 1–6.
- [7] Capper P, Garland J, Kasap S, *et al.* Mercury cadmium telluride : growth, properties, and applications [J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 2010, **47**(1): 65 – 68.
- [8] Granozzi G, Rizzi G A, Herman G S, *et al.* Polarity determination of the HgCdTe (111) surface by azimuthal X-ray photoelectron diffraction experiments [J]. *Physica Scripta*, 1990, **41**(6): 913.
- [9] Herman G S, Friedman D J, Tran T T, *et al.* X-ray photoelectron diffraction from the HgCdTe (111) surface [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B Microelectronics & Nanometer Structures*, 1991, **235**(3): 1870–1873.
- [10] Takeuchi T, Kore-Eda T, Ebina A. Surface barriers formation mechanism of the chemically etched CdTe (111) polar surfaces and gold interfaces [J]. *Applied Surface Science*, 1996, s 100 – 101: 596–600.
- [11] Zha Gangqiang, Jie Wanqi, Tan Tingting, *et al.* The atomic and electronic structure of CdZnTe (1 1 1) A surface [J]. *Chemical Physics Letters*, 2006, **427**: 196–200.
- [12] Kowalski B J, Orłowski B A, Ghijsen J. Oxide formation on the CdTe (111) A (1×1) surface [J]. *Applied Surface Science*, 2000, **166**(1): 237–241.
- [13] Shih H D, Kinch M A, Aqariden F, *et al.* Development of high-operating-temperature infrared detectors with gold-doped Hg_{0.70}Cd_{0.30}Te [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(8): 1263–1265.
- [14] Tennant W E, Arias J M, Bajaj J. HgCdTe at Teledyne [C]. SPIE Defense, Security, & Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [15] Qiu Guangyin, Zhang Chuanjie, Wei Yanfeng, *et al.* As-doped HgCdTe films grown by Te-rich LPE [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (仇光寅, 张传杰, 魏彦锋, 等. As掺杂碲镉汞富碲液相外延材料特性的研究. 红外与毫米波学报), 2012, **31**(1): 15–20.
- [16] Wu Jun, Mao Xufeng, Wan Zhiyuan, *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.
- [17] Song Shufang, Tian Zhen. Preparation study of p-type As doped HgCdTe material [J]. *Laser and Infrared*, 2018, **48**(12): 3. (宋淑芳, 田震. 原位 As 掺杂 p 型碲镉汞薄膜的制备研究. 激光与红外), 2018, **48**(12): 1500–1502.
- [18] Weiss E. Thirty years of HgCdTe technology in Israel [C]. *Infrared Technology & Applications XXXV*. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [19] Weiss E, Klin O, Benory E, *et al.* Substrate quality impact on the carrier concentration of undoped annealed HgCdTe LPE layers [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**(6): 756–761.
- [20] Benson J D, Varesi J B, Stoltz A J, *et al.* Surface structure of (111)A HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**(6): 1434–1442.
- [21] Yang Jianrong. Physics and technology of HgCdTe materials [M]. National Defense Industry Press, 2012. (杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术. 国防工业出版社), 2012.
- [22] L.D.Landa, E.M.Lifshitz. Statistical Physics [M]. Higher Education Press, (L.D.朗道, E·M·栗弗席兹. 统计物理学, 高等教育出版社), 2012.
- [23] Shigenaka K, Sugiura L, Nakata F, *et al.* Effects of growth rate and mercury partial pressure on twin formation in HgCdTe (111) layers grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1993, **22**(8): 865–871.
- [24] Nishino H, Murakami S, Nishijima Y. Structure and Surface Properties of Metalorganic Vapor Phase Epitaxial CdTe and HgCdTe (111)B Layers Grown on Vicinal GaAs (100) Substrates [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, **38**(Part 1, No. 10): 5775–82.
- [25] Wang Jianli, Tang Gang, Wu X.S., *et al.* The adsorption of O on (001) and (111) CdTe surfaces: A first-principles study [J]. *Thin Solid Films*, 2012, **520**: 3960–3964.
- [26] Bai Xuxu, Jie Wanqi, Zha Gangqiang, *et al.* Adsorption of water molecules on the CdZnTe (111) B surface [J]. *Chemical Physics Letters*, 2010, **489**(1–3): 103–106.
- [27] Radhakrishnan J K, Sitharaman S, Gupta S C. Surface morphology of Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te epilayers grown by LPE using horizontal slider [J]. *Applied Surface Science*, 2003, **207**: 33–9.
- [28] Mao Xufeng. Research on Preparation of HgCdTe films Crystal by liquid crystal phase epitaxy [D]. Yunnan University, 2013. (毛旭峰. 利用液相外延制备 HgCdTe 薄膜晶体的研究. 云南大学), 2013.
- [29] Pellicciari B. Te-rich liquid-phase epitaxy of Hg_{1-x}Cd_xTe [J]. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 1994, **29**(1–4): 1–39.
- [30] Castelein P, Baier N, Gravrand O, *et al.* Latest developments on p-on-n HgCdTe architectures at DEFIR [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2014, **9070**: 90702Y–1–14.
- [31] Sun Quanzhi, Sun Ruiyun, Wei Yanfeng, *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. 50mm×50mm 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.