

分子束外延碲镉汞薄膜“燕尾”状缺陷

杨 晋, 孔金丞*, 俞见云, 李艳辉, 杨春章, 覃 钢, 李东升, 雷 文, 赵 俊*,
姬荣斌*

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘要:“燕尾”状缺陷是异质外延碲镉汞薄膜中一种形状、朝向统一的典型缺陷, 本文对“燕尾”状缺陷的表面形貌、结构及形成机理进行了表征及研究。结果表明, 在碲镉汞薄膜表面, “燕尾”状缺陷以两条凸起的“燕尾”边为特征形貌。在碲镉汞薄膜中, “燕尾”状缺陷为倒金字塔结构, 由 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(1\bar{1}1)$ 四个底面与 (211) 表面围成。“燕尾”状缺陷为 $(552)A$ 孪晶缺陷, $(552)A$ 孪晶与 $(211)A$ 基体间不同的生长速率导致了缺陷的形成。碲镉汞晶体中 12 个滑移系统间不同的 Schmid 因子决定了 $(552)A$ 孪晶成核生长于 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 和 $(1\bar{1}1)$ 面, 也决定了“燕尾”状缺陷的表面形貌及结构。

关键词:碲镉汞; 缺陷; 孪晶; 极性面; 施密特因子

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A

The ‘swallow-tailed defect’ in MBE HgCdTe film

YANG Jin, KONG Jin-Cheng*, YU Jian-Yun, LI Yan-Hui, YANG Chun-Zhang, QIN Gang, LI Dong-Sheng, LEI Wen, ZHAO Jun*, JI Rong-Bin*
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The swallow-tailed defect is a typical defect in MBE HgCdTe which has a uniform and regular shape. The morphology, structure and growth mechanism of swallow-tailed defect were investigated. Two raised swallow-tails are major characteristic on the surface, and an inverted pyramid structure surrounded by $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(1\bar{1}\bar{1})$, $(1\bar{1}1)$ and (211) crystal faces is demonstrated in the film of the defect. The swallow-tailed defect is $(552)A$ twin defect, the difference of growth rate between $(552)A$ twin crystal and $(211)A$ matrix is the root cause of defect formation. The nucleation sites and growth planes of $(552)A$ twin crystal, $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ and $(1\bar{1}1)$ crystal plane, which determines the morphology and structure of swallow-tailed defect, depend on different Schmid factor of 12 slip systems in HgCdTe.

Key words: HgCdTe, defect, twin crystal, polar surface, Schmid factor

PACS: 78. 55. Et, 91. 60. Ed, 81. 10. Aj

引言

碲镉汞(HgCdTe, MCT)材料在整个红外谱段带隙可调,同时具有高量子效率及低暗电流等优点,是目前军事领域应用最广泛的红外探测材料^[1-3]。碲镉汞中的宏观缺陷是指薄膜表面尺寸在微米量级的缺陷,包括衬底导致的缺陷,缺汞、富汞缺陷^[4-5],表面形貌缺陷^[6],堆垛层错、孪晶缺陷^[7-9]等。宏观缺陷会导致焦平面器件产生盲元,严重制约红

外焦平面性能,因此缺陷的形成机理及抑制方法一直是碲镉汞外延过程中所关注的重点^[10]。本文在Ge衬底上异质外延碲镉汞薄膜,在薄膜表面观察到了一种具有统一规则形状及朝向的“燕尾”状缺陷,对缺陷的形貌、结构及形成机理进行了表征及研究。

1 实验

实验使用Riber Epineat分子束外延系统,在两

收稿日期:2020-03-12,修回日期:2020-04-15

基金项目:国家科技重大专项

Foundation items: Supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China.

作者简介(Biography): 杨晋(1990—),男,云南昆明人,博士研究生,主要从事碲镉汞材料研究, E-mail: buaamseyj@163.com

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

Received date: 2020-03-12, **Revised date:** 2020-04-15

个独立腔室中分别制备碲化镉缓冲层和碲镉汞吸收层。衬底使用3 inch单抛(211)Ge衬底,衬底偏角为 $\pm 0.5^\circ$ 。Ge衬底传入腔体后,在600℃进行脱氧,用As和Zn进行钝化和极化,在280℃附近生长8 μm 碲化镉,180℃附近生长6~8 μm 短波碲镉汞。材料取出腔体后,观察到表面发白,显微镜观察到薄膜表面密布形如“燕尾”状的缺陷,薄膜XRD摇摆曲线(422)峰半峰宽值在150 arc sec以上。

使用微分干涉相差显微镜(Olympus MX63)、扫描电镜(FEI Nova Nano SEM)、白光干涉仪(aep NanoMap-D)表征了材料表面形貌。借助FIB刻蚀和解理获得薄膜截面,使用SEM观察了不同位置处缺陷截面形貌,研究了缺陷在薄膜内的结构。使用EDS(EDAX Element EDS)对缺陷特征区域进行了成分分析,使用HRXRD(Jordan Valley Delta-X) ω -2 θ 模式进行了物相分析。使用Everson腐蚀液判断了CdTe缓冲层表面极性类型。

2 结果及分析

2.1 缺陷表面形貌及结构分析

本文将碲镉汞薄膜表面一种形状及朝向统一、形似“燕尾”、以两条呈一定角度凸起边为特征形貌的宏观缺陷称作“燕尾”状缺陷。如图1(a-b)所示,“燕尾”状缺陷在薄膜表面均匀分布,密度在10 000~20 000 cm^{-2} 之间。缺陷表面外轮廓为梯形,如图1(c)四条虚线所示,梯形上下底与晶片定位边垂直,沿 $[0\bar{1}1]$ 方向。梯形的两条腰与下底夹角为 67.8° ,分别沿 $[\bar{2}31]$ 和 $[\bar{2}13]$ 方向,两条“燕尾”边位于梯形两条腰的内侧。 $[\bar{1}11]$ 方向缺陷尺寸分布较宽,最小约为4 μm ,最大约为17 μm ,约80%分布在14 μm ~17 μm 之间。图2为薄膜表面3D形貌,可以看出“燕尾”状缺陷为凸起缺陷,凸起区域为两条“燕尾”边,最大凸起高度约为200 nm。

“燕尾”状缺陷周边密布着尺寸稍小的三角形凸起缺陷,三角形凸起缺陷密度为“燕尾”状缺陷的数倍。三角形凸起边有两种形式,如图1(b)中箭头所示,1、2所指分别沿 $[\bar{2}31]$ 和 $[\bar{2}13]$ 两个方向。缺陷内一条边凸起高度最大,约为20nm,向另外两边过渡高度逐渐降低,如图2(c)。

使用FIB沿 $[0\bar{1}1]$ 方向在图3(a)中A边位置处对缺陷进行刻蚀开孔,截面形貌为图3(b),刻蚀过程中由于“燕尾”边内部存在孔洞,导致了不同区域去除速率不同,产生了图中截面上的白色线痕。除

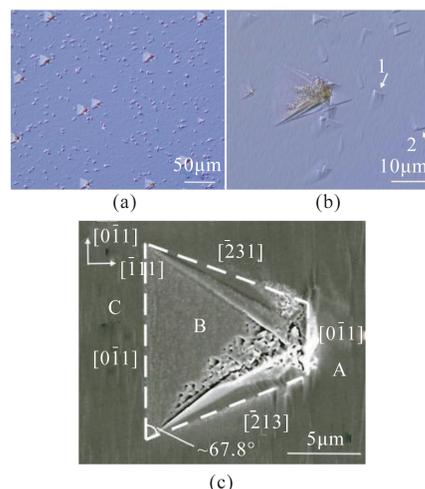


图1 “燕尾”状缺陷表面形貌(a)200x光学显微镜,(b)1000x光学显微镜,(c)SEM,注:图(c)中四条虚线表示缺陷轮廓,A、B、C三个区域为EDS测试区域

Fig.1 Surface topography of the swallow-tailed defect (a) optical microscope images with 200 magnification, (b) optical microscope images with 1000 magnification, (c) SEM image, Note(s): The arrays in (b) show different direction of raised side in triangle defect. The four dash lines in (c) are outlines of the defect. Capital A, B, C in (c) represent three EDS test areas.

白色线痕外,刻蚀截面形貌中无法观察到缺陷与正常区域的分界,缺陷区域与正常区域刻蚀速率可能较为接近,刻蚀截面无法分辨正常区域与缺陷区域。

对材料进行解理,选择 $(1\bar{1}\bar{1})$ 解理面进行观察,图3(a)中A、B、C三条边位置处截面形貌分别为图3(c-e),图中可清楚观察到缺陷区域与正常区域的交界(图中虚线标示)。截面形貌中,“燕尾”状缺陷在A处(图3(c))具有最大深度,可知缺陷起源于碲镉汞与碲化镉界面附近,B处(图3(d))缺陷具有一定深度,C处(图3(e))缺陷消失。在碲镉汞薄膜表面上,A、C边沿 $[0\bar{1}1]$ 方向,A边为解理面 $(1\bar{1}\bar{1})$ 面与 (211) 表面的交线,C边可能为 $(1\bar{1}\bar{1})$ 面或 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 面与 (211) 表面的交线。图3(a)中D、E边分别沿 $[\bar{2}31]$ 和 $[\bar{2}13]$,为 (211) 面与 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 面的交线,对应到截面上,图3(c)中F、G边分别沿 $[101]$ 和 $[110]$ 方向,夹角为 60° ,为解理面 $(1\bar{1}\bar{1})$ 分别与 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 面的交线。图3(d)中H边与C边类似,是 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 面与 (211) 面交线,F'、G'与F、G类似,缺陷由B、F'、G'、H四边围成。结合A、B、C三处缺陷截面形貌特征,推断“燕尾”状缺陷在碲镉汞薄膜

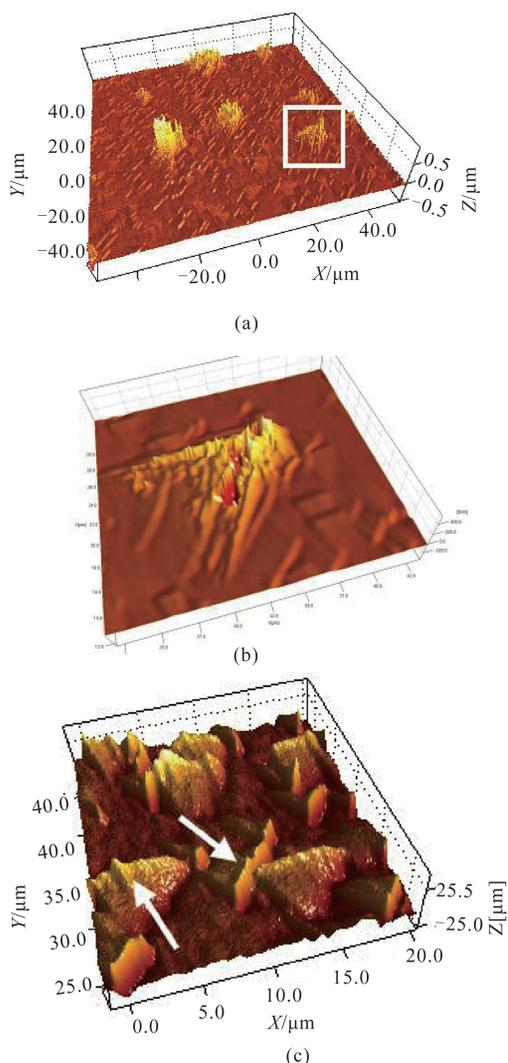


图2 白光干涉3D图(a)100 μm×100 μm, (b)图(a)中框内“燕尾”状缺陷, (c)三角形缺陷

Fig. 2 White light interferometry images of HgCdTe surface (a) 100 μm×100 μm area, (b) defect marked in figure (a), (c) triangular defects.

中为倒金字塔结构, 分别由 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 四个底面与 (211) 面围成, 其结构如图4(a)所示。图4(b)为使用Diamond软件选择上述五个面构建出的“燕尾”缺陷结构图, 图中标示出了缺陷五个表面及与图3对应的A、B、C三条特征线段, 构建出的缺陷表面形貌、空间结构均与表征结果一致。

2.2 缺陷形成机理

凸起缺陷可能与富汞生长条件有关^[4], 选取三个特征点进行EDS测试, 分别位于缺陷内凸起处(图1(c)A点)、缺陷内非凸起处(图1(c)B点)及缺陷外(图1(c)C点)。结果如表1所示, 三个区域碲

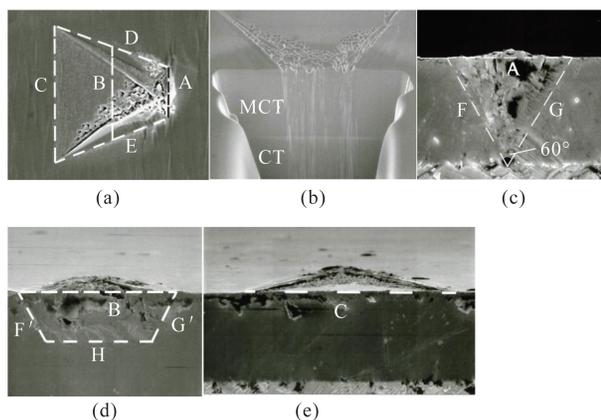


图3 刻蚀及解理后“燕尾”状缺陷不同位置处截面形貌(a)缺陷表面外廓及解理截面选择点示意, (b)A位置处FIB刻蚀后截面形貌, (c)解理后A处截面形貌, (d)解理后B处截面形貌, (e)解理后C处截面形貌

Fig. 3 Cross-sectional SEM images at different positions, the cross-sectional plane is $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ face (a) schematic of outlines of swallow-tailed defect and cleavage positions A, B, and C, (b) shows position A after FIB etching, (c-e) represents position A, B and C after cleavage, respectively.

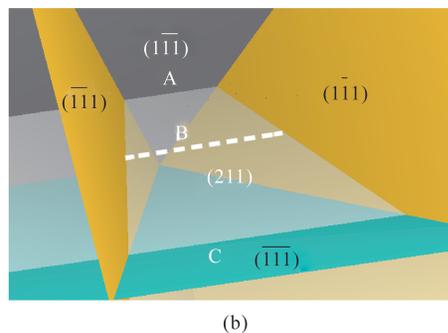
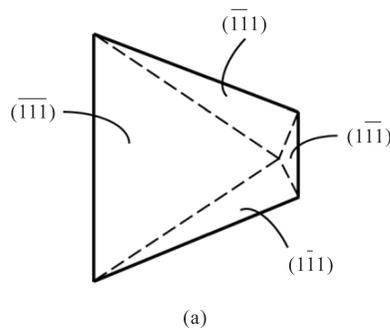


图4 “燕尾”状缺陷的结构(a)示意图, (b)diamond软件绘制的缺陷结构图

Fig. 4 Structure of swallow-tailed defect in epi-layer (a) Schematic graph, (b) defect structure from Diamond software.

镉汞组分值相近, Hg、Cd、Te 三种元素成分偏差在2%以内, 在EDX测试误差范围内, “燕尾”状缺陷不属于常见缺陷或富汞缺陷。

对存在“燕尾”状缺陷的碲镉汞材料进行了单

晶性分析,图5(a)为其HRXRD ω - 2θ 测试结果,衍射谱中存在碲镉汞(331)峰($2\theta=62.59^\circ$)、碲镉汞(422)峰($2\theta=71.69^\circ$),表明(211)与(331)面的晶面法线平行于衍射矢量,即(211)晶面、(331)晶面与薄膜表面平行,碲镉汞(211)基体中包含(331)孪晶。图5(b)为表面不存在“燕尾”状缺陷的碲镉汞衍射谱,谱线中仅存在碲镉汞(422)峰($2\theta=71.2^\circ$),进一步表明“燕尾”状缺陷与碲镉汞(331)孪晶相的对应关系。存在“燕尾”缺陷碲镉汞所对应的碲化镉衍射谱(图5(c))中存在碲化镉(331)、碲化镉(422)及Ge(422)峰,而单晶碲镉汞对应碲化镉衍射谱中不存在(331)孪晶峰(图5(d)),说明若碲镉汞表面存在“燕尾”缺陷,碲化镉缓冲层和碲镉汞吸收层中均有孪晶存在。存在“燕尾”缺陷碲镉汞(422)峰典型半峰宽在150arcsec附近,其对应碲化镉(422)峰典型半峰宽在150~180 arcsec附近,而正常碲化镉、碲镉汞(422)峰半峰宽均在70~90 arcsec之间,(331)孪晶不仅导致碲镉汞表面出现“燕尾”缺陷,同时使(422)相半峰宽展宽。

由于面心立方晶体结构的衍射消光, ω - 2θ 结果中(331)衍射峰实际上是(552)衍射峰。面心立方晶体中,孪晶界为 $\{111\}$ 晶面族,薄膜中(211)相与(552)相以 $\{111\}$ 晶面族为界呈镜面对称关系,互为孪晶相,如图6所示。

表1 “燕尾”状缺陷内及附近碲镉汞组分值

Table 1 Elementary composition of HgCdTe in defect area and normal area.

区域	成分
A	Hg26.90%, Cd19.66%, Te53.44%
B	Hg27.35%, Cd20.15%, Te52.50%
C	Hg28.71%, Cd19.40%, Te51.89%

在异质外延中,衬底与外延层间存在晶格失配,其对应的失配应变能在薄膜外延过程中逐步释放,产生位错及堆垛层错^[11],当堆垛层错达到一定层数后,相当于孪晶开始成核^[12-13]。(552)孪晶成核后,需要达到生长临界尺寸才能够稳定存在并继续长大,因此孪晶和基体存在竞争关系。图5(a)、(c)显示,存在“燕尾”状缺陷的碲镉汞及其碲化镉缓冲层中均存在(552)孪晶,说明其孪晶相生长速度大于基体相,孪晶相可超过其生长临界尺寸继续生长,在材料表面产生凸起缺陷^[14]。碲镉汞(552)A生长速度大于(211)A,而(552)B生长速度小于(211)

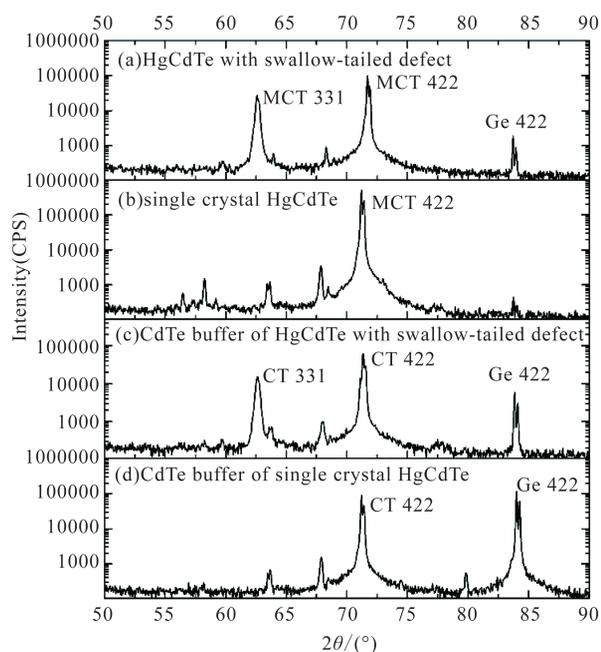


图5 HRXRD ω - 2θ 结果 (a)存在“燕尾”状缺陷碲镉汞,(b)单晶碲镉汞,(c)存在“燕尾”缺陷碲镉汞对应碲化镉,(d)单晶碲镉汞对应碲化镉

Fig. 5 HRXRD omega-2theta scan pattern, (a) HgCdTe with swallow-tailed defect, (b) single crystal HgCdTe, (c) CdTe buffer of HgCdTe with swallow-tailed defect, (d) CdTe buffer of single crystal HgCdTe

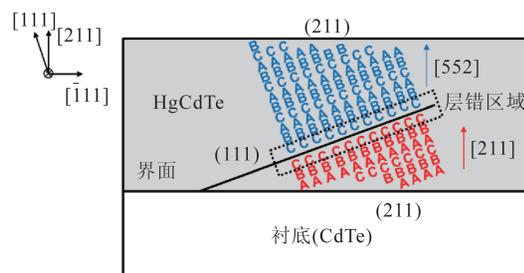


图6 (211)与(552)孪晶以(111)面为界呈180°镜像翻转关系

Fig. 6 Schematic of different atomic sequence along $[111]$ direction of (211) and (552) grain.

B^[15],可推断A极性面导致了(552)孪晶及“燕尾”状缺陷出现。为验证上述分析,对不同碲化镉(第一类碲化镉对应单晶(211)碲镉汞薄膜,第二类碲化镉对应表面分布“燕尾”状缺陷,存在孪晶的碲镉汞薄膜)进行Everson选择性腐蚀。图7(a)、(b)分别对应第一、二类碲化镉腐蚀后明场显微照片。第一类碲化镉表面有典型的钝角三角形位错腐蚀坑,极性面为B面,第二类碲化镉腐蚀后表面变黑,无特征位错腐蚀坑形貌出现,极性面为A面。选择性腐蚀实验结果验证了A极性面与“燕尾”状缺陷的对应

关系。

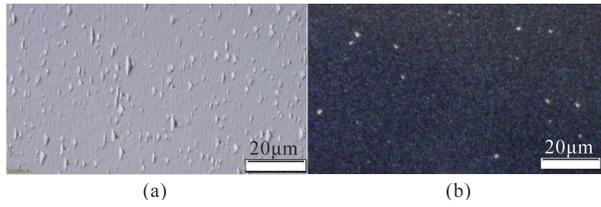


图7 经 Everson 腐蚀液腐蚀后碲化镉表面明场显微形貌 (a) 第一类碲化镉, 表面为 B 极性面, 表面呈现典型钝角三角形腐蚀坑, (b) 第二类碲化镉, 表面为 A 极性面, 表面变黑, 无规则腐蚀坑

Fig. 7 Bright field microscopy images of CdTe after Everson etching (a) the typical triangle etch pits observed on type-I CdTe, (b) surface turned to black and no etch pit found in Type-II CdTe

虽然 A 极性面碲化镉中存在 (552) 孪晶, 但其表面未出现凸起缺陷, 仅能观察高密度沿 $[\bar{1}11]$ 方向的短坑, 如图 8(b) 所示, 可能是碲化镉 (211)A 与碲化镉 (552)A 孪晶间生长速度差异较小导致的。A 极性面碲化镉表面短坑缺陷与 A 极性面碲化镉 (422) 半峰宽展宽两个特征一起可作为碲化镉表面 A 极性属性的快速判断方法。

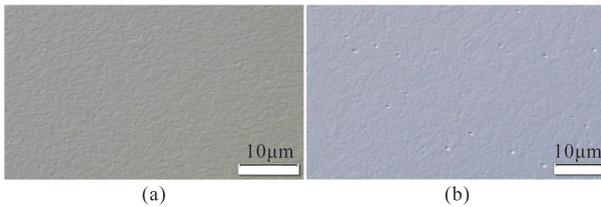


图8 碲化镉表面显微形貌 (a) B 极性面碲化镉, (b) A 极性面碲化镉

Fig. 8 Bright field microscopy images of Te-terminated CdTe and Cd-terminated CdTe (a) Te-terminated CdTe, (b) Cd-terminated CdTe

对于碲化镉和碲镉汞来说, (211)B 晶体生长速度大于 (552)B 晶体, 外延过程中由于失配应变能的释放同样会产生 (552)B 孪晶, 但孪晶增殖将受到 (211)B 碲镉汞基体的抑制, 孪晶可能仅存在于碲镉汞与碲化镉或碲化镉与 Ge 界面附近。对 2 μm CdTe/Ge 及 2 μm HgCdTe/CdTe 样品进行了 HRXRD ω -2 θ 测试 (x 射线穿透深度大于 4 μm), 衍射谱如图 9。(331) 峰仅存在于 B 极性面碲化镉中, 但 XRD 强度很低, 说明 (211)B 碲化镉将 (552)B 孪晶抑制在了碲化镉与 Ge 界面附近。

(552)A 孪晶起源于碲化镉与 Ge 界面, 由于

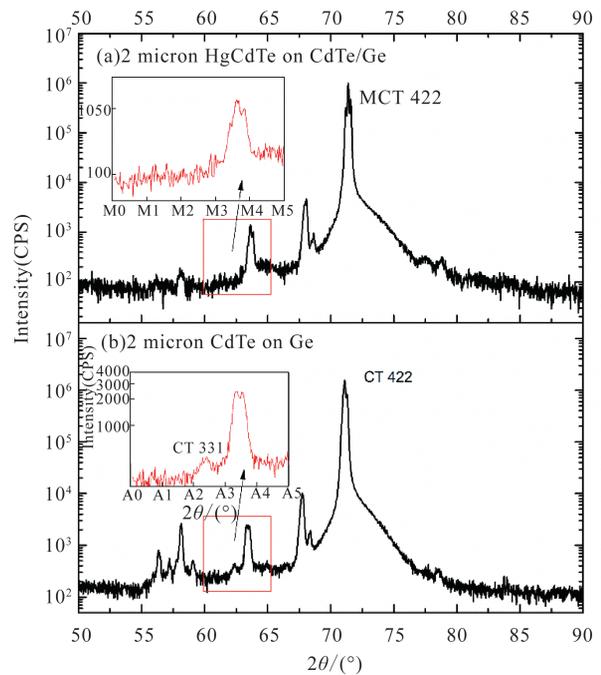


图9 2 μm CdTe/Ge 以及 2 μm HgCdTe/CdTe 样品 HRXRD ω -2 θ 衍射谱

Fig. 9 HRXRD ω -2 θ scan pattern (a) 2 μm HgCdTe on CdTe/Ge, (b) 2 μm CdTe on Ge

(552)A 碲化镉与 (211)A 碲化镉生长速度差异较小, A 极性面碲化镉表面未出现凸起缺陷。孪晶延伸进入碲镉汞后, 由于 (552)A 碲镉汞与 (211)A 碲镉汞生长速度差异较大, 在碲镉汞表面形成了“燕尾”状缺陷。“燕尾”状缺陷形貌主要决定于孪晶生长面。在碲化镉外延初期的三维生长模式阶段, 能量较低的 $\{111\}$ 面将被暴露出来^[5, 16], $\{111\}$ 晶面族中, $(\bar{1}\bar{1}1)$ $[110]$ 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ $[101]$ 滑移系统具有最大的 Schmid 因子, $(1\bar{1}\bar{1})$ $[0\bar{1}1]$ 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ $[0\bar{1}1]$ 滑移系统 Schmid 因子较小^[5]。 $(\bar{1}\bar{1}1)$ $[110]$ 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ $[101]$ 滑移系统上的失配应力分解切应力最大, 更容易促使位错的产生和运动, 因此孪晶主要成核于 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 和 $(1\bar{1}\bar{1})$ 面。孪晶若成核于 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 面, 则会沿 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 面继续生长, 在碲镉汞表面上形成具有 $[\bar{2}31]$ 方向凸起边的三角形缺陷; 若成核于 $(1\bar{1}\bar{1})$ 面, 则碲镉汞表面三角形缺陷凸起边为 $[\bar{2}13]$ 方向。孪晶在 $(1\bar{1}\bar{1})$ 和 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 面成核概率小, 因此碲镉汞表面上未出现具有 $[0\bar{1}1]$ 方向凸起边的三角形缺陷。在单个成核面上形成的孪晶尺寸相对较小, 对应的三角形缺陷的凸起高度为 20 nm 左右。而当多个孪晶相遇, 则会产生更大的孪晶^[13], 产生凸起高度达 200 nm 附近的“燕尾”状缺陷, 因此“燕尾”状缺陷密度远低于

三角形缺陷。“燕尾”状孪晶缺陷以 $\{111\}$ 晶面族中四个等效但不平行的晶面为界进行生长,最终与(211)表面围成空间上呈倒金字塔形的缺陷。

3 结论

本文将碲镉汞薄膜表面特征形貌为两条凸起边的缺陷称作“燕尾”状缺陷,“燕尾”边最高凸起约200 nm。“燕尾”状缺陷周围分布着密度更高的三角形缺陷,缺陷一条边凸起,最大凸起高度约20 nm。在碲镉汞薄膜内部,“燕尾”状缺陷为倒金字塔结构,由 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 四个底面与(211)表面围成。

不同于由衬底或外延条件偏离导致的缺陷,“燕尾”状缺陷为(552)A孪晶缺陷,“燕尾”缺陷的存在使碲镉汞材料XRD摇摆曲线(422)峰半峰宽展宽到150 arc sec以上。孪晶起源于碲化镉与Ge界面处,此处 $(\bar{1}\bar{1}1)$ [110]、 $(1\bar{1}1)$ [101]滑移系统具有最大的Schmid因子, $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 面上容易产生堆垛层错,成为孪晶成核及生长面。若材料终止面为金属面(A面),由于(552)A孪晶生长速度快于(211)A基体,孪晶容易达到其临界生长尺寸并继续生长,延伸到(211)A碲化镉及碲镉汞中。若材料终止面为Te面(B面), (552)B孪晶将被(211)B基体抑制,孪晶仅存在于碲化镉与Ge界面附近。(552)A碲镉汞与(211)A碲镉汞生长速度存在差距,导致碲镉汞表面存在高密度三角及“燕尾”缺陷。孪晶沿单个成核面生长,形成的孪晶较小,对应薄膜表面三角形缺陷;当两个或多个孪晶在后续生长过程中相遇,则形成更大尺寸孪晶,对应薄膜表面“燕尾”状缺陷。

Reference

[1] Lei W, Antoszewski J, Faraone L. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors [J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, **2**(4): 041303.
 [2] Kinch M A. The future of infrared; III - Vs or HgCdTe? [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(9): 2969-

2976.
 [3] Rogalski A. History of infrared detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2012, **20**(3): 279-308.
 [4] He L, Wu Y, Chen L, et al. Composition control and surface defects of MBE-grown HgCdTe [J]. *Journal of crystal growth*, 2001, **227**: 677-682.
 [5] Chang Y, Becker C, Grein C, et al. Surface morphology and defect formation mechanisms for HgCdTe (211) B grown by molecular beam epitaxy [J]. *Journal of electronic materials*, 2008, **37**(9): 1171-1183.
 [6] Reddy M, Radford W A, Lofgreen D D, et al. Study of morphological defects on dual-band HgCdTe on CdZnTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(8): 2991-2997.
 [7] Rujirawat S, Smith D J, Faurie J, et al. Microstructural and optical characterization of CdTe (211) B/ZnTe/Si (211) grown by molecular beam epitaxy [J]. *Journal of electronic materials*, 1998, **27**(9): 1047-1052.
 [8] Aoki T, Chang Y, Badano G, et al. Defect characterization for epitaxial HgCdTe alloys by electron microscopy [J]. *Journal of crystal growth*, 2004, **265**(1-2): 224-234.
 [9] Sabinina I, Gutakovskiy A, Sidorov Y G, et al. Nature of V-shaped defects in HgCdTe epilayers grown by molecular beam epitaxy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **274**(3-4): 339-346.
 [10] Wijewarnasuriya P, Zandian M, Young D, et al. Microscopic defects on MBE grown LWIR Hg_{1-x}Cd_xTe material and their impact on device performance [J]. *Journal of electronic materials*, 1999, **28**(6): 649-653.
 [11] Cullis A. Strain-induced modulations in the surface morphology of heteroepitaxial layers [J]. *Mrs Bulletin*, 1996, **21**(4): 21-26.
 [12] Bernstein N, Tadmor E. Tight-binding calculations of stacking energies and twinnability in fcc metals [J]. *Physical Review B*, 2004, **69**(9): 094116.
 [13] Kibey S, Liu J, Johnson D, et al. Predicting twinning stress in fcc metals: Linking twin-energy pathways to twin nucleation [J]. *Acta materialia*, 2007, **55**(20): 6843-6851.
 [14] Koestner R, Schaake H. Kinetics of molecular-beam epitaxial HgCdTe growth [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1988, **6**(4): 2834-2839.
 [15] Kawano M, Oda N, Sasaki T, et al. Twin-formation mechanisms for HgCdTe epilayers [J]. *Journal of crystal growth*, 1992, **117**(1-4): 171-176.
 [16] Yang B, Xin Y, Rujirawat S, et al. Molecular beam epitaxial growth and structural properties of HgCdTe layers on CdTe (211) B/Si (211) substrates [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, **88**(1): 115-119.