

(112)B 碲锌镉衬底表面 Everson 腐蚀坑 与材料缺陷的关系

周昌鹤^{1,2*}, 杨建荣², 周梅华², 徐超²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 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: 通过研究碲锌镉衬底(112)B面缺陷腐蚀坑和(111)B面缺陷腐蚀坑之间的关系, 揭示了(112)B面腐蚀坑与材料缺陷之间的关系。结果显示, Everson 腐蚀剂在碲锌镉材料(112)B面上揭示的棒状腐蚀坑起源于材料中的体缺陷, 或由延伸缺陷腐蚀坑在缺陷终止后演变而成, 三种典型形状的锥形腐蚀坑分别来自延伸方向为<110>、<112>和<123>的延伸缺陷。研究结果同时显示, Everson 腐蚀剂对部分取向的延伸缺陷所形成的腐蚀习性面在(112)B表面不能构成锥形腐蚀坑, 通过观察(112)B面锥形坑随腐蚀深度发生横向移动的方向, 进一步证实 Everson 腐蚀剂只能揭示延伸方向位于(112)极图上[011]和[101]连线附近区域的延伸缺陷。基于上述实验结果, 文章进一步讨论了(112)B面 Everson 腐蚀坑密度与材料缺陷密度的关系, 其结果将有助于碲镉汞分子束外延识别源自衬底的材料缺陷, 并对碲锌镉(112)B衬底的质量进行更好的控制。

关键词: 碲锌镉; 腐蚀坑; 体缺陷; 延伸缺陷

中图分类号: O77

文献标识码: A

Correlation between Everson etch pits and material defects of (112) B CdZnTe substrates

ZHOU Chang-He^{1,2*}, YANG Jian-Rong², ZHOU Mei-Hua², XU Chao²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: By studying the relationship between Everson etch pits on CdZnTe (112)B surface and (111)B surface, the correspondence of Everson etch pits on the (112)B surface and the defects in CdZnTe materials were revealed. The results show that the rod-shaped etch pits on the (112)B surface originate from the bulk defects in the material, or develop from the residual pyramidal etch pits after the extending defects terminate. Three kinds of different pyramidal etch pits on the (112)B surface come from the extending defects with the extending directions in <110>, <211> and <123>, respectively. Results also show that the habit etching faces of some pyramidal etch pits on (111)B surface can no longer form pyramidal etch pits on (112) surface. By observing the lateral shift of etch pits during prolonged etching, it was confirmed that Everson etchant could only reveal the extending defects with the crystal orientations situated near the connection line of [011] and [101] on the (112) pole figure. Based on the experimental results, the relationship between etch pit density on CdZnTe (112)B surface and the defect density of CdZnTe materials was discussed. The results will be helpful for HgCdTe molecular beam epitaxy to identify the defects in HgCdTe epilayers originating from CdZnTe substrates and better control the quality of CdZnTe (112)B substrates.

Key words: CdZnTe, etch pit, bulk defects, extending defects

收稿日期: 2020-08-15, 修回日期: 2020-09-23

Received date: 2020-08-15, Revised date: 2020-09-23

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX-299)

Foundation items: Supported by the Innovation Program of SITP (CX-299)

作者简介(Biography): 周昌鹤(1985-), 男, 河南商城人, 博士研究生, 主要研究领域为碲锌镉晶体生长和缺陷评价

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

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

引言

碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, HgCdTe)是制备高性能红外探测器的优良材料,在资源探测、气象预报和天文观测等领域中有重要的应用。碲锌镉晶体($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, CdZnTe)通过调节 Zn 组分,能够和碲镉汞材料晶格完全匹配,是碲镉汞外延的优质衬底。虽然, Si 基和 GaAs 基等异质衬底上的 HgCdTe 分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)已取得了长足的进展^[1-2],但其实际应用仍限于高背景应用领域中的中短波红外焦平面探测器,而高性能的长波、甚长波、双色、雪崩工作模式和高工作温度的 HgCdTe 红外焦平面器件仍需要使用在(112)B 晶向 CdZnTe 单晶衬底上获得的低缺陷密度外延材料,大尺寸低缺陷密度(112)B CdZnTe 衬底是 HgCdTe 分子束外延及 HgCdTe 红外焦平面技术发展的一项关键技术^[3-4]。

碲锌镉晶体中的缺陷主要有延伸缺陷(由若干位错和微缺陷组成)和体缺陷(沉淀或夹杂物), Everson 腐蚀剂(Lactic Acid: HNO_3 : HF =25 ml: 4 ml: 1 ml)是目前常用于 CdZnTe 衬底(111)B 面和(112)B 面缺陷检测的腐蚀剂, Nakagawa 腐蚀剂(HF : H_2O_2 : H_2O =3: 2: 2)常用于(111)A 面,通常使用腐蚀坑密度(Etch Pit Density, EPD)来代表材料表面的位错密度。碲锌镉衬底(111)B 面和(111)A 面上的腐蚀坑特性,如密度、形状和网络结构已被大量研究^[5-9]。崔晓攀等人将(111)B 面上的 Everson 腐蚀坑归纳为三角锥形坑、三角平底坑、彗星状坑和不规则坑 4 种类型,其中三角锥形坑的坑尖又有多种不同的空间取向,对应不同的缺陷延伸方向^[10-11]。2019 年虞慧娴等人提出腐蚀坑实时观察技术,使用 Nakagawa 腐蚀剂观察了碲锌镉衬底(111)A 面上腐蚀坑的演变过程,揭示了缺陷的起源,并追踪了缺陷的空间延伸特性。研究发现微沉淀缺陷腐蚀后会形成平底坑,碲锌镉衬底表面的锥形腐蚀坑在缺陷终止后也会变成平底坑,锥形腐蚀坑密度(Pyramidal Etch Pit Density, PEPD)才反映了穿越衬底表面的延伸缺陷密度^[12]。进一步的研究还发现,碲锌镉材料中的延伸缺陷位于 $\{111\}$ 面,缺陷的延伸方向主要有 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$,也有一些缺陷的延伸方向出现在 $\langle 123 \rangle$ 方向。在碲锌镉(111)A 面上, Nakagawa 腐蚀剂只能揭示与 $[111]$ 方向相邻的 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 112 \rangle$ 和 $\langle 123 \rangle$ 取向的延伸缺陷,对大角度的 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 112 \rangle$ 和 $\langle 123 \rangle$ 延伸缺陷不起作用^[13]。碲锌镉(111)

B 面 Everson 腐蚀坑密度与 Nakagawa 腐蚀剂在(111)A 面形成的腐蚀坑密度有很好的致一致性^[14],衬底双面减薄腐蚀也观察到(111)B 面和(111)A 面锥形腐蚀坑具有对应关系。

反观 HgCdTe 分子束外延所使用的(112)B 碲锌镉衬底的缺陷腐蚀坑,相关的工作还比较少。顾惠明^[15]和 Burgess^[16]等人发现碲锌镉(112)B 面上的 Everson 腐蚀坑密度明显低于对应(111)B 面上的密度,二者相差可达 1~5 倍。杨建荣等人初步分析了(112)B 面和(111)B 面上 Everson 三角锥形腐蚀坑的形状关系,并根据 EPD 的大小推断(112)B 面上的“棒状”腐蚀坑和(111)B 面的三角平底坑相对应^[17]。目前, CdZnTe 衬底(112)B 面的腐蚀坑密度比(111)B 面明显偏低的原因尚不清楚,对(112)B 面不同形状的腐蚀坑所揭示的材料缺陷类型也不明确,这给使用选择性腐蚀法来表征(112)B 碲锌镉衬底质量带来一定困扰,同时也给 CdZnTe 基 HgCdTe 分子束外延材料缺陷形成机理的分析和研究造成了很大的困难。

本文从研究 CdZnTe 衬底(112)B 面 Everson 腐蚀坑与(111)B 面腐蚀坑之间的对应关系入手,对(111)B 面上各类缺陷腐蚀坑能否在(112)B 上形成以及所形成腐蚀坑的形状进行了分析和实验验证,由此揭示出了(112)B 面 Everson 腐蚀坑与材料缺陷之间的关系,以及在(112)B 面上不能形成缺陷腐蚀坑的缺陷种类,进而对腐蚀坑密度与缺陷密度之间的关系进行了分析。

1 实验方法

实验所用样品来自垂直布里奇曼(Vertical Bridgman, VB)法生长的 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x \sim 4.5\%$)晶体,晶体生长速率为 0.3 mm/h,固液界面梯度约 3 K/cm。晶体沿(111)面或(112)面定向切片,定向精度优于 0.2° 。晶片经研磨、抛光、化学腐蚀和清洗去除表面损伤层,浸入新鲜配制的 Everson 腐蚀液静置 2.5 min 后取出漂洗烘干,然后使用光学显微镜(Olympus, BX51)观察衬底表面的腐蚀坑。图 1 展示了 CdZnTe 衬底(112)B 面上观察到的 Everson 腐蚀坑的形貌照片。

根据 CdZnTe 晶体解理面特性和 X 射线衍射测试,可以确定 CdZnTe 衬底表面腐蚀坑的一些特征结构的晶体学取向,图 1 标出了(112)B 面上的一些重要晶体学指向。(112)B 面 Everson 腐蚀坑具有梯形、棒状和三角形等不同形状,但这些腐蚀坑的长边都

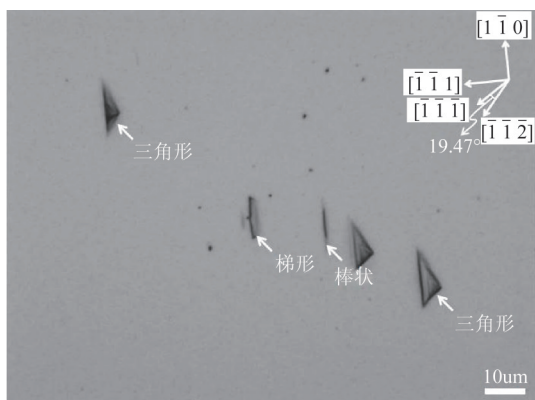


图1 碲锌镉(112)B面上观察到的不同形状的Everson腐蚀坑
Fig. 1 Everson etch pits of different shapes on CdZnTe (112)B surface

沿同一晶向,在图1中为 $[1\bar{1}0]$ 。

由于Everson腐蚀剂腐蚀碲锌镉材料时会产生气泡,腐蚀坑实时观察技术较难分辨腐蚀坑的动态演变过程和缺陷在材料中的延伸取向。为确定腐蚀坑对应缺陷在材料中的延伸特征,本实验采用了二次腐蚀技术,利用碲锌镉材料中的体缺陷作为定位标记,对缺陷腐蚀坑在形状和位置上的变化进行了测量。图2给出了二次腐蚀实验得到的一个典型测量结果,两次腐蚀的腐蚀时间都是2.5 min,图中位于材料表面下方的体缺陷为腐蚀坑的定位标记。

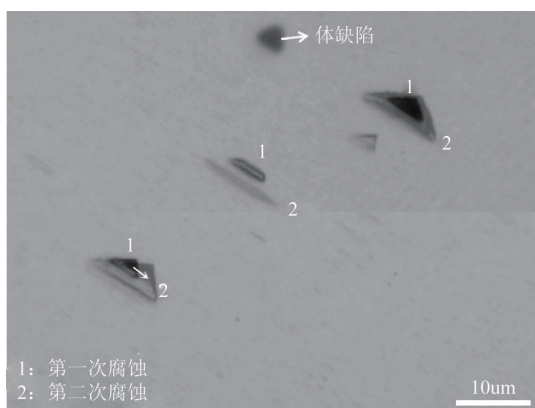


图2 二次腐蚀过程中(112)B表面腐蚀坑的形状和位置变化
Fig. 2 Changes of etch pit geometries and positions on the (112) B surface during secondary etching

基于Everson腐蚀剂对碲锌镉(112)B面和(111)B面具有相近的腐蚀特性,可以假定两个面上同类缺陷的Everson腐蚀坑具有相同的腐蚀习性面,进而从几何学上对各类(111)B面腐蚀坑在(112)B面上的坑形进行推导,即使用(112)面截取(111)B

面腐蚀坑的方法来获得(112)B面腐蚀坑的坑形,并将结果与实际观察到的腐蚀坑形状和延伸取向进行对比,进而找出(112)B面腐蚀坑与材料缺陷的对应关系。

2 结果和讨论

2.1 体缺陷在碲锌镉衬底(112)B面形成的Everson腐蚀坑

碲锌镉衬底(111)B面上的一部分Everson三角平底坑起源于材料中的体缺陷^[10, 18]。平底腐蚀坑的宽度和深度与缺陷的尺寸和缺陷被腐蚀的时间有关,平底腐蚀坑的侧面和(111)B面夹角一般大于 60° 。图3(a)展示了碲锌镉衬底(111)B表面观察到的不同深宽比(Depth to Width Ratio, D/W)的三角平底坑。根据腐蚀坑形状与晶向的关系,以图3(a)中腐蚀坑边线为轴将样品(111)B表面向下旋转 19.47° ,旋转后的表面即为(112)B面所在的位置。图3(b)给出了这些腐蚀坑被(112)面截取的构型示意图,结果显示被截取的平底坑形状与腐蚀坑的深宽比相关。通过简单计算,以腐蚀坑三角形的边长代表腐蚀坑的宽度,当 $D/W > 0.31$ 时,(111)B面三角平底坑截得“嵌套三角形”; $D/W > 0.06$ 时,截得“梯形”, D/W 进一步减小,截得的腐蚀坑为“棒状”,随着腐蚀时间的增加,深宽比越来越小,腐蚀坑将变得越来越细长,并逐渐消失。这类坑形的腐蚀坑在(112)B上都能被观察到,见图3(c)。在二次腐蚀的实验结果中,腐蚀坑向细长“棒状”演变并逐渐消失的过程也得到了证实。

2.2 延伸缺陷在碲锌镉衬底(112)B面形成的Everson腐蚀坑

碲锌镉(112)B面上的Everson锥形腐蚀坑应该和(111)B面上的Everson锥形腐蚀坑相对应,相应的缺陷是碲锌镉材料中的延伸缺陷。腐蚀坑实时观察技术的研究结果表明,碲锌镉材料中的延伸缺陷主要有三种取向,崔晓攀等人在衬底(111)B面上观察到的Everson锥形腐蚀坑^[11]也可归纳成相应的3种类型,即源于 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 112 \rangle$ 和 $\langle 123 \rangle$ 三种取向的延伸缺陷腐蚀坑。我们首先讨论 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$ 取向的延伸缺陷,在(111)B面,Everson腐蚀剂能够揭示的腐蚀坑为关于 $[111]$ 方向对称的三个相邻的 $\langle 110 \rangle$ 和三个相邻的 $\langle 112 \rangle$ 缺陷取向的腐蚀坑,图4列出了这6种缺陷腐蚀坑的形貌照片。

为获得(112)晶面对图4中列出的6种腐蚀坑截取后的构型,使用激光共聚焦显微镜(Olympus,

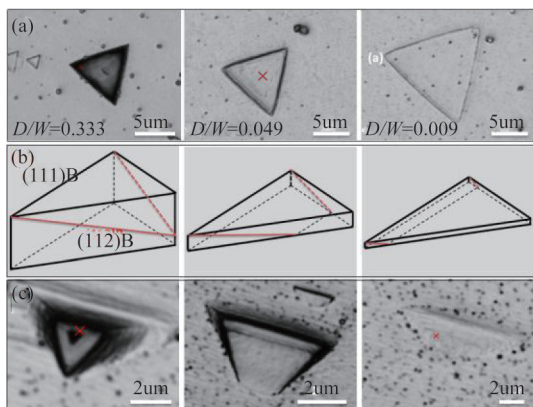


图3 碲锌镉(111)B面不同深宽比的平底坑与(112)B面腐蚀坑之间的对应关系 (a) 碲锌镉(111)B面上不同深宽比的平底腐蚀坑显微照片, (b) (111)B面平底腐蚀坑被(112)晶面截取的构型示意图, (c) (112)B面上观察到的与示意图(b)构型相同的腐蚀坑显微照片

Fig. 3 Relations of etch pits on the (112)B surface and flat-bottom etch pits with different D/W s on the (111)B surface (a) micrographs of etch pits with different D/W s on the (111)B surface, (b) schematic diagrams of flat-bottom etch pits sectioned by (112) plane, (c) micrographs of etch pits observed on the (112)B surface coinciding with the geometries in (b)

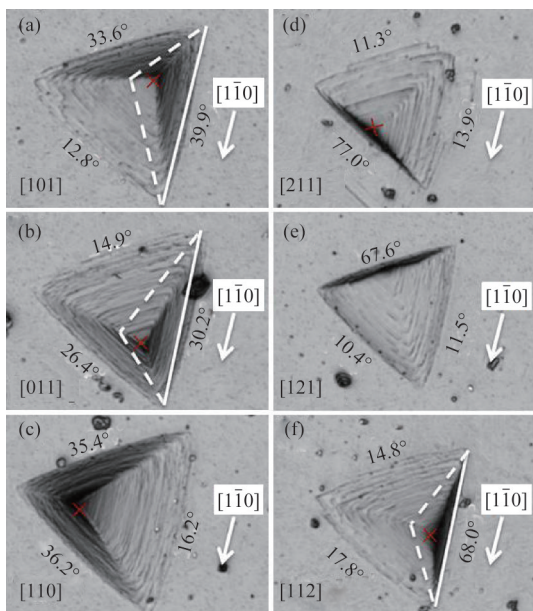


图4 (111)B面<110>和<112>延伸缺陷所形成的锥形腐蚀坑 (a) [101]取向, (b) [011]取向, (c) [110]取向, (d) [211]取向, (e) [121]取向, (f) [112]取向

Fig. 4 Pyramidal etch pits of extending defects oriented in $\langle 110 \rangle$ and $\langle 112 \rangle$ on the (111)B surface (a) [101] orientation, (b) [011] orientation, (c) [110] orientation, (d) [211] orientation, (e) [121] orientation, (f) [112] orientation

OSL4500)对这些锥形腐蚀坑侧面与(111)B表面的夹角进行了测量,结果见图4中各腐蚀坑侧面旁的角度数值。结果显示,<110>方向延伸缺陷的腐蚀坑有一腐蚀习性面和(111)B的夹角为 15° 左右,另外两腐蚀习性面在空间取向上呈对称分布,与(111)B面夹角在 35° 附近;而<112>方向延伸缺陷的腐蚀坑的一个习性面和(111)B的夹角大于 60° ,另外两面在空间取向上也接近对称,与(111)B夹角一般小于 19.47° 。当用(112)面以沿[1-10]方向的边为轴线对图4中6种锥形腐蚀坑进行截取时,只有与[1-10]边线对应的腐蚀习性面的角度大于 19.47° 的腐蚀坑,被(112)面截取后的腐蚀坑仍然为锥形腐蚀坑,参考图4(a)、(b)和(f)中虚线构成的锥形腐蚀坑。对于那些与[1-10]边线对应的腐蚀习性面角度小于 19.47° 的腐蚀坑,(112)截面的下方已不存在锥形腐蚀坑,即在(112)B表面上不能够形成锥形腐蚀坑,参考图4(c)、(d)和(e)。在碲锌镉(112)B衬底样品上实际观察到的锥形腐蚀坑的外形与截面法获得的腐蚀坑外形完全一致,见图5中的(a)和(b),图5中白色轮廓线为截面法分析得到的腐蚀坑外形。在(112)B面上缺陷取向为<110>的Everson锥形腐蚀坑的轮廓为不等腰三角形,缺陷取向为<112>的Everson锥形腐蚀坑的轮廓为等腰三角形。

根据截面法的分析结果,只有延伸方向为[112]及其相邻的[011]和[101]的延伸缺陷才能在(112)B面上被Everson腐蚀剂揭示出来。在连续腐蚀过程中,这些延伸缺陷在(112)B面形成的Everson锥形腐蚀坑的坑尖水平移动轨迹应该平行于[1-10]方向。为了证实这一结论,对已形成锥形腐蚀坑的(112)B碲锌镉衬底样品进行二次腐蚀,结果显示不等腰三角形锥形腐蚀坑的坑尖水平移动方向都沿着腐蚀坑长边所对应的[1-10]方向,而等腰三角形锥形腐蚀坑的坑尖位置基本保持不变,参见图2。除了<110>和<112>延伸缺陷形成的锥形腐蚀坑外,在碲锌镉(112)B面上也能看到一些外形轮廓与<110>和<112>延伸缺陷腐蚀坑不吻合的锥形腐蚀坑(见图5(c)),这和碲锌镉(111)B面存在着与图4所示腐蚀坑构型有偏离的锥形腐蚀坑是一致的^[11]。对碲锌镉(111)面腐蚀坑实时跟踪测量的结果也显示,碲锌镉材料中存在延伸方向介于<110>和<112>之间的延伸缺陷,其延伸方向落在<123>附近^[13]。基于上述实验结果,我们认为缺陷延伸方向

靠近 $\langle 123 \rangle$ 的锥形腐蚀坑也是存在的,但仅限于介于 $[011]$ 方向与 $[101]$ 方向之间的 $\langle 123 \rangle$ 延伸缺陷。

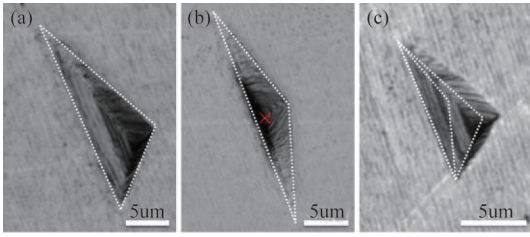


图5 碲锌镉衬底(112)B面上的典型Everson锥形腐蚀坑 (a) $\langle 110 \rangle$ 取向缺陷, (b) $\langle 112 \rangle$ 取向缺陷, (c) $\langle 123 \rangle$ 取向缺陷

Fig. 5 Typical Everson etch pits on CdZnTe (112)B surface (a) $\langle 110 \rangle$ extending defects, (b) $\langle 112 \rangle$ extending defects, (c) $\langle 123 \rangle$ extending defects

另外, (111)B面的锥形腐蚀坑在延伸缺陷终止后会变成平底坑,在碲锌镉(112)B表面,实验也观察到了锥形腐蚀坑随着腐蚀过程的进行演变成“棒状”腐蚀坑的现象,其过程与前述(112)B面上体缺陷形成的腐蚀坑类似。

2.3 (112)B面的PEPD与材料延伸缺陷密度之间的关系

碲锌镉材料中的延伸缺陷位于 $\{111\}$ 滑移面上, (111)A碲锌镉衬底上Nakagawa腐蚀坑的研究显示,只有延伸方向位于极图上 $[110]$ 、 $[101]$ 和 $[011]$ 连线附近的延伸缺陷能够被Nakagawa腐蚀剂腐蚀出来,对连线之外其他大角度穿越表面的 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 112 \rangle$ 和 $\langle 123 \rangle$ 延伸缺陷不起作用^[13]。根据已发表的文献^[14, 19],碲锌镉衬底(111)B面Everson腐蚀坑密度与(111)A面Nakagawa腐蚀坑密度基本相等,我们对深度减薄衬底(厚度 $< 25 \mu\text{m}$)上(111)B面和(111)A面锥形腐蚀坑在空间位置上的对应关系也进行了观察,结果也显示两种腐蚀剂所揭示的腐蚀坑具有很好的对应关系,这表明Everson腐蚀剂对于大角度穿越表面的延伸缺陷也是不起作用的。在二次腐蚀的实验中,也没有观察到大角度的延伸缺陷。因此,结合上一节的研究结果,Everson腐蚀剂只能揭示延伸缺陷取向位于极图上 $[011]$ 和 $[101]$ 连线附近的延伸缺陷。图6给出了两块(111)A碲锌镉衬底上Nakagawa锥形腐蚀坑对应的延伸缺陷的取向在(112)极图上的分布,Everson腐蚀剂在(112)B衬底上只能揭示出取向落在图中阴影区域的延伸缺陷,其锥形腐蚀坑密度明显小于在(111)衬底上测量到的锥形腐蚀坑密度。

基于上述讨论的结果,可以对(112)B衬底表面

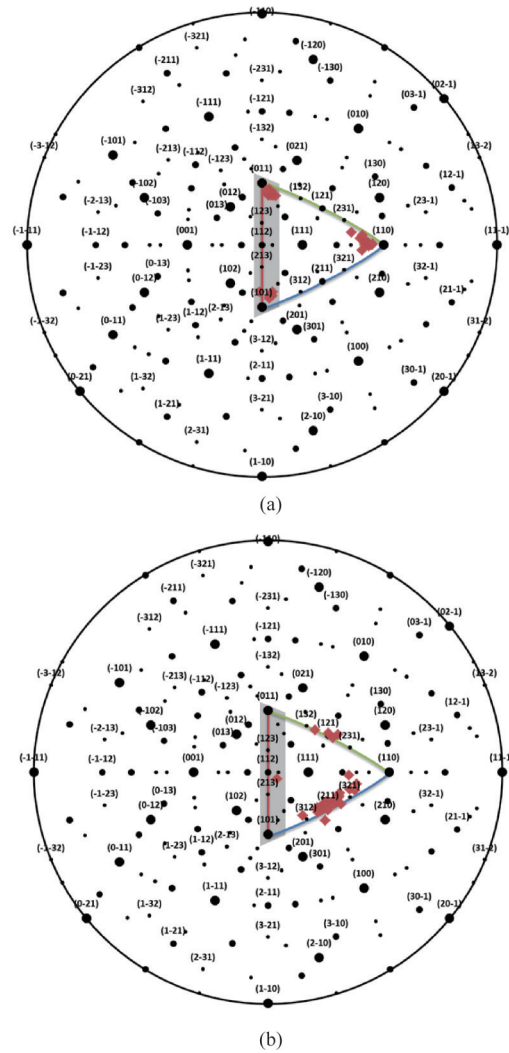


图6 CdZnTe衬底样品中延伸缺陷取向的极图分布,图中菱形点为腐蚀坑实时观察技术在(111)A表面观察到的延伸缺陷的取向,样品被观测区域的面积为 $897.7 \mu\text{m} \times 670.7 \mu\text{m}$ (a) 样品M4834, (b) 样品K4911

Fig. 6 Orientation distributions of the extending defects in CdZnTe substrate samples on the (112) polar figure. The diamond points are the orientations of the extending defects observed by etch pit real-time observation technology on the (111)A surfaces. The observed area of the samples is $897.7 \mu\text{m} \times 670 \mu\text{m}$ (a) sample M4834, (b) sample K4911

锥形腐蚀坑密度PEPD与材料中延伸缺陷密度的关系进行定量的分析。首先,将讨论外延技术最为关心的延伸缺陷穿越衬底表面的密度,该密度正比于 $\rho \cos \theta$,其中 θ 为延伸缺陷取向和衬底表面晶向的夹角, ρ 为延伸缺陷在其 $\{111\}$ 面内单位角度范围内的密度($\text{cm}^{-2} \text{rad}^{-1}$)。假定材料中延伸缺陷为对称均匀分布,考虑Everson腐蚀剂在碲锌镉衬底(112)B和(111)B面上能够揭示的延伸缺陷的取向范围,计

算结果显示,在(112)B衬底上,Everson腐蚀剂揭示的<110>方向延伸缺陷的PEPD近似为(111)B面<110>方向延伸缺陷的2/3;<112>和<123>方向延伸缺陷的PEPD只有(111)B面的1/3。通过对碲锌镉晶体中所有可能的<110>,<112>和<123>取向延伸缺陷进行求和计算,碲锌镉衬底(112)B面上锥形腐蚀坑密度 $PEPD_{(112)}$ 为(111)B面上 $PEPD_{(111)}$ 的43.5%,而穿越衬底(112)B表面的延伸缺陷密度是 $PEPD_{(112)}$ 的4.4倍。从材料生长技术的角度来看,延伸缺陷的体密度(Body Density of Extending Defects, BDED)能更好地反映碲锌镉晶体的质量,由于该参数与材料观察表面的取向无关,它等于 $\sqrt{2} \pi PEPD_{(111)}^{[13]}$,对于碲锌镉(112)B衬底,材料的BDED是其 $PEPD_{(112)}$ 的10.2倍。

在实际衬底材料中,延伸缺陷在取向上的密度分布有可能不均匀和不对称,这导致了(112)B面EPD和(111)B面EPD测试数据的离散性。图6中样品M4834中缺陷的延伸方向对称地分布在三个<110>方向附近,但[101]取向的缺陷密度相对较少。样品K4911的延伸缺陷则主要分布在[211]附近,其他方向较少。由于样品K4911中落在[011]和[101]之间的延伸缺陷很少,大部分延伸缺陷方向落在Everson腐蚀剂可显示区域外,其(112)B面上的 $PEPD_{(112)}$ 将比(111)B低很多。

3 结论

本文通过研究Everson腐蚀剂在碲锌镉衬底(112)B表面所形成的缺陷腐蚀坑与(111)B面缺陷腐蚀坑之间的对应关系,并借助于已有(111)B面腐蚀坑与材料缺陷关系的研究结果,揭示了(112)B面Everson腐蚀坑与材料缺陷之间的关系。研究工作从假设材料中同种缺陷在(112)B面和(111)B面上的Everson腐蚀坑具有相同的腐蚀习性面入手,采用“截面法”对(111)B面腐蚀坑在(112)B面的构型进行了推算,结果发现所截取的腐蚀坑与(112)B面观察到的腐蚀坑在构型上完全吻合。结果同时显示,(112)B面上的“嵌套三角形”、“梯形”和“棒状”腐蚀坑与(111)B面上的平底腐蚀坑相对应,来源于材料中的体缺陷或者由延伸缺陷终止后形成。Everson腐蚀剂在(112)B面上所揭示的三种典型锥形腐蚀坑来自取向为[011]、[101]、[112]、[123]和[213]的延伸缺陷,穿越(112)B面的其他34组<110>,<112>和<123>延伸缺陷无法形成锥形腐蚀坑,这一

结果也被二次腐蚀法追踪的腐蚀坑移动方向的实验结果所证实。从极图上看,对(112)B碲锌镉衬底,Everson腐蚀剂只能揭示取向位于[011]和[101]连线附近的延伸缺陷。对延伸缺陷取向均匀分布的碲锌镉材料,(112)B面上的Everson锥形腐蚀坑密度 $PEPD_{(112)}$ 是(111)B面上 $PEPD_{(111)}$ 的43.5%,穿越(112)B衬底表面的延伸缺陷密度为 $PEPD_{(112)}$ 的4.4倍,材料中延伸缺陷的体密度是 $PEPD_{(112)}$ 的10.2倍左右。

References

- [1] Carmody M, Yulius A, Edwall D, *et al.* Recent progress in MBE growth of CdTe and HgCdTe on (211)B GaAs substrates [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, **41**(10): 2719-2724.
- [2] Wenisch J, Eich D, Lutz H, *et al.* MBE growth of MCT on GaAs substrates at AIM [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, **41**(10):2828-2832.
- [3] 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.
- [4] Jerram P, Beletic J. Teledyne's high performance infrared-detectors for space missions [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, **11180**: 111803D01-111803D10.
- [5] Gilibert U, Trigubó A B, de Reca N E W. Chemical etching of CdZnTe (111) surfaces [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 1994, **27**(2): 11-15.
- [6] LIU Cong-Feng, FANG Wei-Zheng, TU Bu-Hua, *et al.* Morphology characteristics of etch pits on CdZnTe crystals developed by usual etchants [J]. *Infrared and Laser Engineering* (刘从峰, 方维政, 涂步华, 等. 碲锌镉晶体常用腐蚀剂的坑形特性研究. *红外与激光工程*), 2006, **35**(6): 759-763.
- [7] SUN Shi-Wen, SUI Song-Yin, He-Li, *et al.* X-ray diffraction topography and etched surface morphology of CdZnTe single crystals [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙士文, 隋淞印, 何力, 等. 碲锌镉晶体的X射线衍射形貌与腐蚀形貌. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(03): 291-296.
- [8] Rudolph P. Dislocation cell structures in melt-grown semiconductor compound crystals [J]. *Crystal Research and Technology*, 2005, **40**(1-2): 7-20.
- [9] Rudolph P. Dislocation patterning and bunching in crystals and epitaxial layers - a review [J]. *Crystal Research and Technology*, 2017, **52**(1): 1600171.
- [10] CUI Xiao-Pan, FANG Wei-Zheng, ZHANG Chuan-Jie, *et al.* Characteristics of CdZnTe defects revealed by etch pits [J]. *Infrared Laser Engineering* (崔晓攀, 方维政, 张传杰, 等. 碲锌镉材料腐蚀坑及其缺陷特性研究. *红外与激光工程*), 2010, **39**(3): 405-410.
- [11] Cui X P, Fang W Zh, Sun S W, *et al.* Characteristics of the dislocations in CdZnTe crystals revealed by etch pits [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, **321**(1): 40-44.
- [12] Yu H X, Yang J R, Zhang J J, *et al.* Measurement and

- evaluation of the defects in $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ materials by observing their etch pits in real time [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2019, **506**: 1–7.
- [13] Zhou C H, Yang J R, Yu H X, *et al.* Study of the extended defects in CdZnTe crystal [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, **544**: 125725.
- [14] Everson W J, Ard C K, Sepich J L, *et al.* Etch pit characterization of CdTe and CdZnTe substrates for use in mercury cadmium telluride epitaxy [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1995, **24**(5): 505–510.
- [15] GU Hui-Ming, YANG Jian-Rong, CHEN Xin-Qiang, *et al.* Difference of EPDs on (111)B and (211)B faces of CdZnTe crystals by using Everson etch. [J]. *Journal of Synthetic Crystals* (顾惠明, 杨建荣, 陈新强, 等。CdZnTe 材料(111)B 和(211)B 面上位错腐蚀坑密度的差异。人工晶体学报), 1999, **28**(02):172–176.
- [16] Burgess L, Kumar F J, Mackenzie J. Orientation dependence of etch pit density in (111) and (211) CdZnTe Everson etch [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(10): 3277–3282.
- [17] Yang J R, Gu H M, Chen X Q, *et al.* Dislocation assessment of CdZnTe by chemical etching on both 111B and 211B faces [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2002, **234**(2–3): 337–342.
- [18] Shen J, Aidun D K, Regel L L, *et al.* Etch pits originating from precipitates in CdTe and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ grown by the vertical Bridgman–Stockbarger Method [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1993, **132**(1–2): 351–356.
- [19] LIU Cong-Feng, YANG Jian-Rong. Application of Everson etchant for characterization of dislocations in CdZnTe material [J]. *Infrared* (刘从峰, 杨建荣. Everson 腐蚀剂在表征碲锌镉材料位错中的应用. 红外), 2004, **12**: 17–27.