

文章编号: 1672-8785(2017)02-0007-04

分子束外延 InSb 薄膜材料的 表面微观形貌研究

周 朋 刘 铭

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 用原子力显微镜等方法研究了在 InSb (001) 衬底和 (001) 偏 (111)B 面 2° 衬底上分子束外延生长的同质外延薄膜和掺 Al 薄膜样品表面的微观形貌。对比了不同衬底同质外延时生长模式的差异, 并观察了加入 Al 后引入的交叉影线, 分析了其产生的原因。研究表明, 使用有偏角的衬底更有利于减少分子束外延薄膜的表面缺陷。

关键词: InSb 薄膜材料; 原子力显微镜; 微观形貌; 衬底偏角

中图分类号: TN2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.02.002

Study of Microtopography of InSb Film Grown by Molecular Beam Epitaxy

ZHOU Peng, LIU Ming

(North China Institute of Photoelectric Technology, Beijing 100015, China)

Abstract: The microtopography of homoepitaxial and Al-doped thin films grown on InSb (001) substrates and (001) misoriented by 2° (111) B substrates by Molecular Beam Epitaxy (MBE) was studied by Atomic Force Microscopy (AFM). The differences of the growing modes of homoepitaxial films on different substrates were compared. The crosshatch introduced after Al was added into InSb films was observed and its cause was analyzed. The research showed that the use of misoriented substrates was more favorable to the reduction of surface defects of InSb films grown by MBE.

Key words: InSb film; AFM; micro topography; misoriented substrate

0 引言

InSb 是一种闪锌矿结构的 III - V 族金属化合物半导体材料, 其电子有效质量小, 迁移率高, 是制备中波 ($3\sim 5\ \mu\text{m}$) 红外探测器的首选材料之一。传统的 InSb 红外探测器通常采用掺 Te 的 n 型 InSb 体晶材料作为衬底, 晶面方向一般为 (111) 面, 并通过扩散或离子注入 Be 元素的方法进行 p 型掺杂, 制备 pn 结, 从而达到光电转换的目的。传统的 InSb 红外探测器具有量子效

率高、材料工艺成熟和成本低等优点。

随着红外探测器探测精度的提高及探测范围和距离的拓展, 红外探测技术已发展到了第三代。碲镉汞、II 类超晶格和量子阱等红外探测器材料异军突起, InSb 的优势越来越不明显。为了顺应发展潮流, 改进 InSb 材料生长方法是十分必要的。使用分子束外延法生长 InSb 薄膜材料, 不仅可以制备 pin 结构或者其他更复杂的结构, 还可以在生长过程中对材料进行一定比例

收稿日期: 2016-11-22

作者简介: 周朋 (1988-), 男, 河北沧州人, 助理工程师, 主要从事红外探测器材料生长研究。

E-mail: zhoupeng8@foxmail.com

的原位掺杂,使器件的性能变得更优异。

外延生长 InSb 薄膜所用的衬底一般选用 (001) 晶面。文献 [1] 指出,使用 (001) 偏 (111)B 面 2° 的衬底可以在降低生长温度时保持晶面缺陷较低,使得表面光滑,而且在低于重构转变点 85°C 的低温下生长的 p 型和 n 型 InSb 均拥有更好的电学性能。

另一方面,为了使 InSb 器件获得高温工作的特性,以色列 SCD 公司率先提出在 InSb 材料中掺入 Al 元素 [2]。由于 AlSb 的晶格常数 (6.1355 \AA) 与 InSb 晶格常数 (6.4794 \AA) 的差距较小,仅为 -5.31% ,而两者的禁带宽度差距很大,在 77 K 时,AlSb 的禁带宽度约为 InSb 禁带宽度的 4 倍。加入少量 Al 后即可在不引入较大晶格失配的前提下大大提高材料的禁带宽度,从而使器件的暗电流变小,探测器的工作温度得以提高。但是,由于 AlSb 的晶格常数比 InSb 小,引入的应力为张应力,相比于压应力,其更容易产生表面缺陷。当 Al 的组分过大或生长条件控制不当,应力无法得到释放时,材料表面就会产生橘皮状或交叉影线状缺陷。

本文通过观察使用 (001) 衬底和 (001) 偏 (111) 面 2° 的衬底生长的 InSb 材料以及掺 Al 的 InSb 材料表面形貌,对比了衬底偏角对外延生长模式的影响,并观察了加入 Al 后由应力导致的表面缺陷。

1 实验

本文所用衬底为自制的 2 in 大小的 InSb 晶片,晶向分为 (001) 面和 (001) 面偏 (111)B 面 2° 两种,外延设备为 DCA P600 MBE 系统。根据所使用的衬底以及外延材料中 Al 组分的不同,共设置四组平行实验,具体实验条件见表 1。其他生长条件如生长温度、V/III 束流比和生长速率等均相同。

表 1 四组平行实验所采用的实验条件

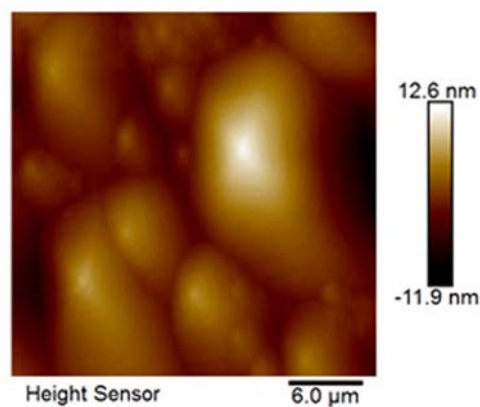
编号	衬底表面晶面指数	外延层 Al 组分值
1	(001) 面	0
2	(001) 面偏 (111)B 面 2°	0
3	(001) 面	20%
4	(001) 面偏 (111)B 面 2°	20%

生长完成之后,用光学显微镜测试 InSb 的表面状况,并使用 veeco 公司型号 icon 的原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, AFM) 进行了观察。

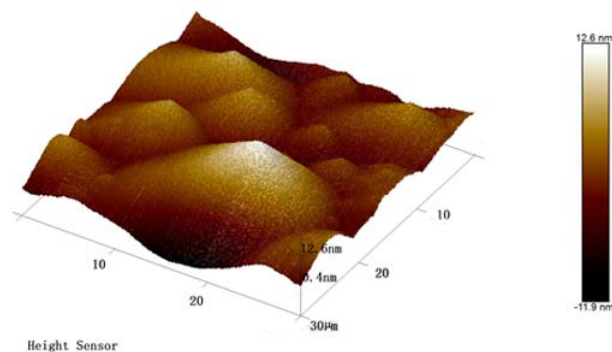
2 结果分析

2.1 衬底偏角对生长模式的影响

外延生长模式不仅受到动力学过程的限制,同时也受到热力学的影响。动力学过程决定了系统向平衡态转化的路径,如分子束沉积速率不同或是分子表面迁移速率不同,都会对薄膜表面的形貌特征有一定程度的影响。而热力学过程决定了系统在最终平衡状态下的表面形貌特征,其主要取决于材料本身的性质,不同材料的平衡态形貌特征可能存在较大的差别 [3]。通过观察样品 1(图 1)和样品 2(图 2)的 AFM 图片以及 3D 图,可以看出,两者的生长模式明显不同。

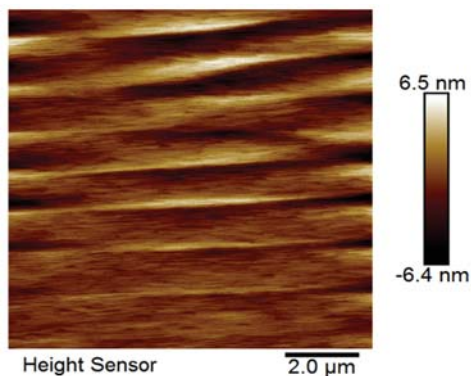


(a) AFM 图

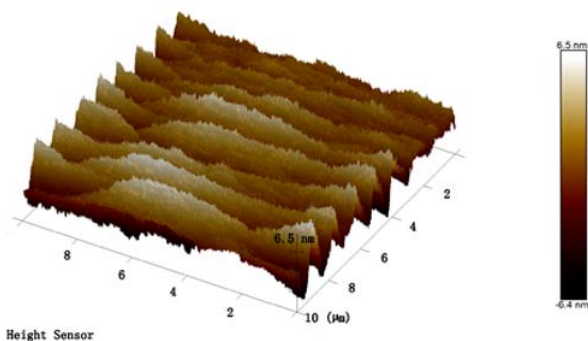


(b) 3D 图

图 1 样品 1



(a) AFM 图



(b) 3D 图

图 2 样品 2

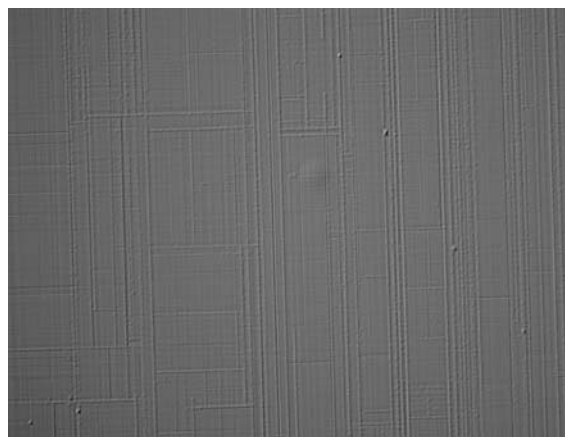
从图 1 中可以观察到, 分子在表面堆积成岛, 说明样品 1 中原子的生长模式为形核生长; 这种情况下, 沉积原子的层间传输比较困难, 原子首先在界面上形成二维晶核, 然后利用其周围台阶沿着界面扩展, 直至长满一层后再开始新的周期。形核的热力学能障比较大, 生长较困难; 且当生长条件改变以后, 很容易形成三维岛状生长模式, 使样品的表面质量大幅下降。

而在图 2 中, 外延生长呈台阶状, 形成二维台阶生长模式。沉积的原子在生长过程中较易进行层间跃迁, 这也就解释了使用 (001) 面偏 (111)B 面 2° 的衬底可以在降低生长温度时保持晶面表面缺陷较低的现象。

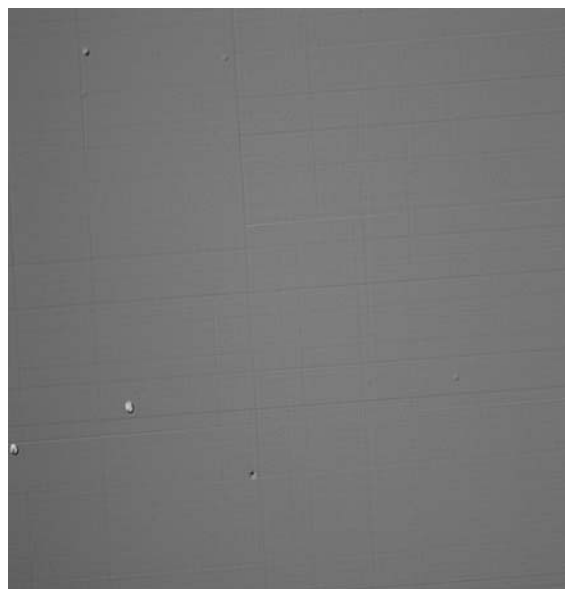
2.2 网格线缺陷的观察

样品 3 和样品 4 中故意加入了较高组分的 Al, 产生了晶格失配。外延层的晶格常数变得比衬底小很多, 外延层会受到来自衬底的张应力, 从而在表面产生不同程度的表面缺陷。缺陷表现

为两个垂直方向的交叉影线, 称为 crosshatch。图 3 为样品 3 和样品 4 表面的光学显微镜图。



(a) 样品 3

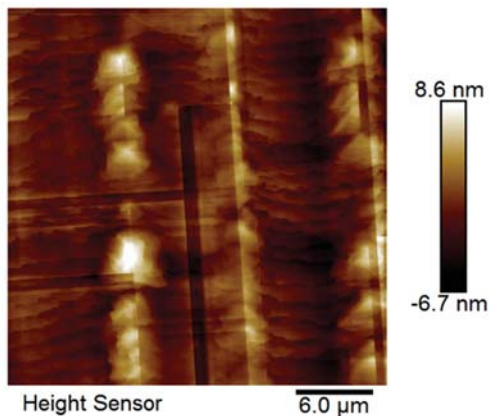


(b) 样品 4

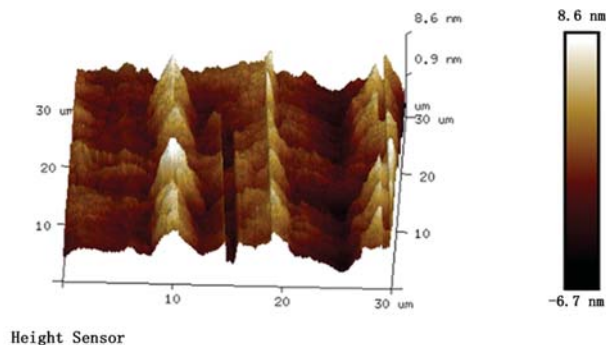
图 3 光学显微镜图

从图 3 中可以明显观察到, 互相垂直的两个方向存在交叉影线。由于圆片的参考边方向确定, 影线的方向分别沿 $\langle 110 \rangle$ 方向 (图 3 中水平方向) 和 $\langle -110 \rangle$ 方向 (图 3 中竖直方向)。样品 3 中的影线较样品 4 明显, 这是因为当样品的生长模式为二维岛状生长时, 外延层的应力无法得到释放。随着外延层厚度的增加, 应力很快堆积至临界值, 产生较严重的网格线。而当生长模式为台阶生长时, 外延层应力在台阶的起伏处得到释放, 最终所产生的网格线明显减少。

图 4 为样品 3 的 AFM 图片以及 3D 图。从图中可以看出岛状生长以及影线的痕迹。影线的位置不受岛位置的影响，可以形成于岛的峰值位置或岛的间隙，甚至可以切断岛。这说明影线形成于岛之后；而且根据之前的研究^[4]，影线的严重程度与生长过程中所达到的最高退火温度有密切关系，影线很可能形成于最后的退火阶段。因此，若想降低其对器件工艺的影响，需尽量降低生长阶段的最高退火温度。



(a) AFM 图



(b) 3D 图

图 4 样品 3

3 结论

使用光学显微镜和原子力显微镜对分子束外延 InSb 薄膜材料的表面形貌进行了研究。通

过对比 (001) 衬底和 (001) 偏 (111) 面 2° 的衬底外延 InSb 薄膜材料的形貌差异发现，使用这两种衬底生长材料时生长模式是不同的。前者为成核—生长模型，沉积原子的层间传输比较困难，很容易形成三维岛状生长模式，使样品的表面质量大幅下降。后者为二维台阶生长模式，有助于在降低生长温度时保持晶面表面缺陷较低，使表面光滑。此外，还对 InSb 薄膜材料掺 Al 后的形貌变化进行了研究。研究表明，由 Al 组分引入的应力会导致交叉影线的形成，影线方向为 $\langle 110 \rangle$ 方向和 $\langle -110 \rangle$ 方向；在无偏角的衬底上生长的样品比在有偏角衬底上生长的样品的影线更明显。这是因为台阶生长引起的起伏释放了一部分应力。综合以上两点可以得出，用分子束外延法生长材料时，用 (001) 偏 (111) 面 2° 的衬底比 (001) 衬底更利于表面状态的改善。根据显微结构中影线和岛位置的关系，结合之前的研究，推测影线很可能形成于最后的退火阶段。若想降低此类缺陷对器件工艺的影响，需要尽量降低生长阶段的最高退火温度。

参考文献

- [1] Ashley T, Buckle L, Smith G W, et al. InSb Focal Plane Arrays (FPA's) Grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE) [J]. *Proceedings of SPIE*, 4028(2000):0277-786X.
- [2] Glozman A, Harush E, Jacobsohn E, et al. High Performance InAlSb MWIR Detectors Operating at 100K and Beyond[J]. *Infrared Technology and Applications XXXII*, 2006, **6206**: 62060M-1.
- [3] 权茂华. InAs/In_xGa_{1-x}Sb 应变超晶格界面结构和光学性能 [D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [4] 刘铭, 周朋, 尚林涛, 等. 分子束外延 InAlSb/InSb 晶体的质量研究 [J]. *红外*, 2014, **35**(11):15-19.