

文章编号: 1672-8785(2020)10-0015-05

分子束外延 InAsSb 材料中 As 组分的研究

周 朋 徐碧婷 刘 铭 申 晨 邢伟荣

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 基于 nBn 结构的 InAsSb 器件具有扩散电流极限低、造价低廉、容易实现大面阵以及可兼容现有 III-V 族二极管电路等诸多优点, 是小型化、低功耗、低成本、高分辨率中长波探测器的首选之一。在 InAsSb 材料的外延生长过程中, As 的组分很难精确控制。为了找到允许的误差范围, 研究了用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 工艺生长 InAsSb 材料过程中 As 组分对材料表面形貌、晶格质量以及器件截止波长等方面的影响。试验结果表明, 在保证材料外延厚度小于临界厚度的前提下, 材料对压应力的容忍程度比拉应力高。将 As 组分控制在略小于 91% 的范围内, 不但可以保证材料的质量, 而且还能略微增大器件的响应波长。

关键词: 分子束外延; InAsSb; As 组分; 截止波长

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.10.002

Study on As Composition in InAsSb Grown by MBE

ZHOU Peng, XU Bi-ting, LIU Ming, SHEN Chen, XING Wei-rong

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The InAsSb device with nBn structure has many advantages, such as low diffusion current limit, low cost, easy realization of large array, compatibility with existing III-V diode circuit and so on. It is one of the first choices for medium and long wave miniaturized detector with low power consumption, low cost and high resolution detector. In the process of InAsSb epitaxial growth, it is difficult to accurately control the composition of As. In order to find the allowable error range, the influence of As component on the surface morphology, lattice quality and cut-off wavelength of InAsSb material is studied. The experimental results show that under the premise that the epitaxial thickness of the material is less than the critical thickness, the material has a higher tolerance for compressive stress than tensile stress. Controlling the As component within the range of slightly less than 91% can not only ensure the quality of the material, but also slightly increase the response wavelength of the device.

Key words: MBE; InAsSb; As composition; cut-off wavelength

收稿日期: 2020-07-28

作者简介: 周朋(1988-), 男, 河北沧州人, 工程师, 主要从事红外探测器材料设计及制备研究。

E-mail: zhoupeng8@foxmail.com

0 引言

InAsSb 材料具有吸收系数大、载流子寿命长、响应波长可调、生长难度低以及拥有晶格匹配的衬底和势垒层材料等优势。InAsSb 器件制备主要有两个分支：一是为了与 GaSb 衬底匹配，As 的组分固定为 91% 左右。这样可以获得较好的材料质量和器件性能，但响应波段会被限制在 $4\ \mu\text{m}$ 左右。二是通过调节组分尽可能地扩展其响应波段，而由晶格失配引入的应力则通过加入缓冲层来缓解。一些研究机构甚至干脆放弃 GaSb 衬底，而采用更廉价的 GaAs 衬底以降低成本，其代价是需引入更复杂的缓冲层^[1]。高晶体质量和更长的响应波段是无法同时获得的。

2006 年，Maimon S 等人提出了可使器件工作温度大幅提高的 nBn 结构^[2]。采用该结构的 InAsSb 材料具有与 HgCdTe 材料相当的低扩散电流极限，同时也像 InSb 材料一样拥有可实现大面阵、造价低廉以及可兼容现有 III-V 族二极管电路等诸多优点^[3]。由于 nBn 结构中的势垒层材料也可以使用与 GaSb 晶格匹配的 AlAsSb 来充当，使得前一个分支的热度上升。国外多家公司和研究机构都是从理论和工艺等方面对 nBn 型 InAsSb 器件进行了研究。其中，以色列 SCD 公司的 XBn 型 InAsSb 器件最为成熟，其工作温度可达 150 K，背景限 (Background-Limited Performance, BLIP) 温度为 170 K^[4]，因此具有非常好的应用前景。

对于 nBn 型 InAsSb/AlAsSb 材料，InAsSb 吸收层和 AlAsSb 势垒层与 GaSb 衬底的晶格匹配所需的 As 组分分别为 91% 和 8%。在实际生长过程中，较薄的 AlAsSb 势垒层可以使用“Digital alloy”方法^[5]进行精确的组分控制，但较厚的 InAsSb 吸收层使用该方法的难度会加大，且对设备的损耗较严重，因此只能通过调节 V 族源针阀的方法来控制组分。生长时所需的 Sb 束流非常小 (仅在 10^{-7} Torr 量级左右)，且组分对 Sb 束流的变化特别敏感，导致 As 的组分与晶格完全匹配的难度非常大。

因此，需要找到一个合适的误差范围。

本文研究了 As 组分表征及组分偏差对材料质量和探测器性能的影响。关于组件制备、变温性能测试和成像等方面的内容将另外发表。

1 试验过程

生长采用的方法为 MBE 法，采用的设备型号为 DCA P600，以双丝泄流源作为 III 族源，以裂解源作为 V 族源，提供 As_2 或 Sb_2 束流，且以 epi-ready GaSb(100) 为衬底。

生长时，首先对衬底进行除气和脱氧，然后生长 GaSb 缓冲层，最后生长 InAsSb 层。在生长的同时使用反射式高能电子衍射仪 (Reflection High-Energy Electron Diffraction, RHEED) 监测材料的表面。为了研究 InAsSb 材料中 As 组分的影响，我们通过调节 Sb 源针阀生长了一组不同组分的单层 InAsSb 材料 (厚度均为 $2.4\ \mu\text{m}$ 左右)。

生长结束后，使用高分辨率 X 射线衍射仪 (High-Resolution X-Ray Diffractometer, HR-XRD) 测定 InAsSb 材料的 As 组分值。为了验证这种测试方法的正确性，我们还对其中的几个实验片进行了红外光致发光 (Photoluminescence, PL) 光谱测试。

材料的质量表征包括表面形貌和晶格质量两部分。其中，表面形貌使用金相显微镜和原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, AFM) 等设备来表征；晶格质量通过 XRD 双晶衍射半峰宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 来表征。

2 结果分析

图 1 所示为某 InAsSb 外延片的 XRD 扫描结果。通过扫描得到 GaSb 衬底和 InAsSb 外延层晶格发生衍射时的角度。根据二者的位置差可以计算出材料的晶格常数，然后根据维加德定理可计算出 InAsSb 材料中的 As 组分。该外延片的 As 组分为 87.19%。

图 2 所示为同一实验片的 PL 光谱测试结

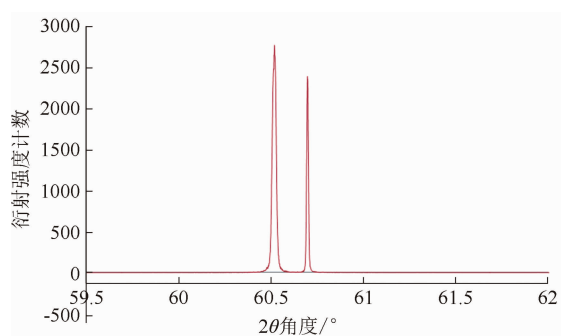
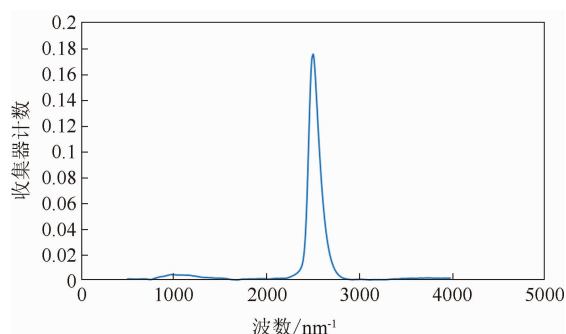
图 1 X 射线衍射仪的 $\omega-2\theta$ 扫描结果

图 2 PL 光谱测试结果

果。红外 PL 光谱通过材料的发光特性来表征材料的能带参数。根据算得的禁带参数并对比 InAs 和 InSb 材料的禁带参数及温度系数^[6], 可得出该材料的 As 组分值。根据计算, 该材料的 As 组分为 87.30%, 与 XRD 结果基本一致, 说明这两种测试方法均有效。由于 XRD 测试方便快捷, 测试手段以前者为主。

表 1 列出了具有代表性的不同组分外延片的光学显微镜形貌测试结果以及 XRD 双晶衍射半峰宽。当 InAsSb 层中的 As 组分大于 91% 时, 其晶格常数会小于 GaSb 的晶格常数, 外延层处于拉伸状态; 反之, 外延层则处于压缩状态。无论哪种情况都会引入应力, 而应力释放的过程就会引起明显的缺陷, 一般表现为

失配位错、微裂纹、小角晶界、表面波动或交叉网格线等^[7]。其中以交叉网格线的形貌特征最为明显。

各实验片的 AFM 形貌如图 3 所示。可以看出, As 组分对外延片的表面形貌和晶体质量均有很大影响。越靠近晶格匹配组分 91% 的外延片, 其 XRD 半峰宽越小。交叉网格线全部出现在 As 组分偏差大于 5% 的时候, 且正失配和负失配的情况也有所不同。当 As 组分略大于 91% 时, 较容易出现小丘缺陷, 会对器件性能造成一定的影响。但略小于此组分时, 材料质量依然较好。

文献[8]提出, 交叉网格线在外延层厚度超过临界厚度之后才会出现, 且临界厚度为

$$h_c = \frac{b(1-\nu\cos^2\alpha)}{2\pi f(1-\nu)\cos\lambda} \left(\ln \frac{h_c}{b} + 1 \right) \quad (1)$$

式中, b 为柏氏矢量。对于闪锌矿材料, $b=1/2\langle 110 \rangle$, 其模为 $a/\sqrt{2}$ 。 ν 为 InAsSb 材料的泊松比, 约为 0.35^[9]; f 为失配度, 其值为 $a_{\text{InAsSb}}/a_{\text{GaSb}} - 1$; α 为位错线与柏氏矢量的夹角; λ 为滑移方向与薄膜平面中垂直于界面和滑移面的方向。对于闪锌矿材料, $\cos\alpha = \cos\lambda = 1/2$ 。利用迭代法算得的临界厚度与 As 组分的关系如图 4 所示。当 As 组分偏差为 4% 时, 临界厚度为 2.55 μm 。当 As 组分偏差达到 5% 时, 临界厚度为 1.97 μm 。我们生长的外延片厚度均在 2.1~2.3 μm 之间, 超过了此时的临界厚度。因此外延片表面应当会出现交叉网格线形貌, 与实际观察到的结果一致。

值得注意的是, As 组分的偏差也能导致有益的结果。三元化合物材料的禁带宽度不是简单的百分比相加, 而是要考虑修正系数 B 。

表 1 各外延片的组分、形貌及 XRD 半峰宽

片号	As 组分/%	形貌状况	半峰宽/arcsec
A1	85.3	明显的网格线	32.78
A2	87.19	比较平整	9.68
A3	91.2	光滑平整	7.20
A4	93.4	较多小丘	15.15
A5	96.2	网格线和波纹	34.00

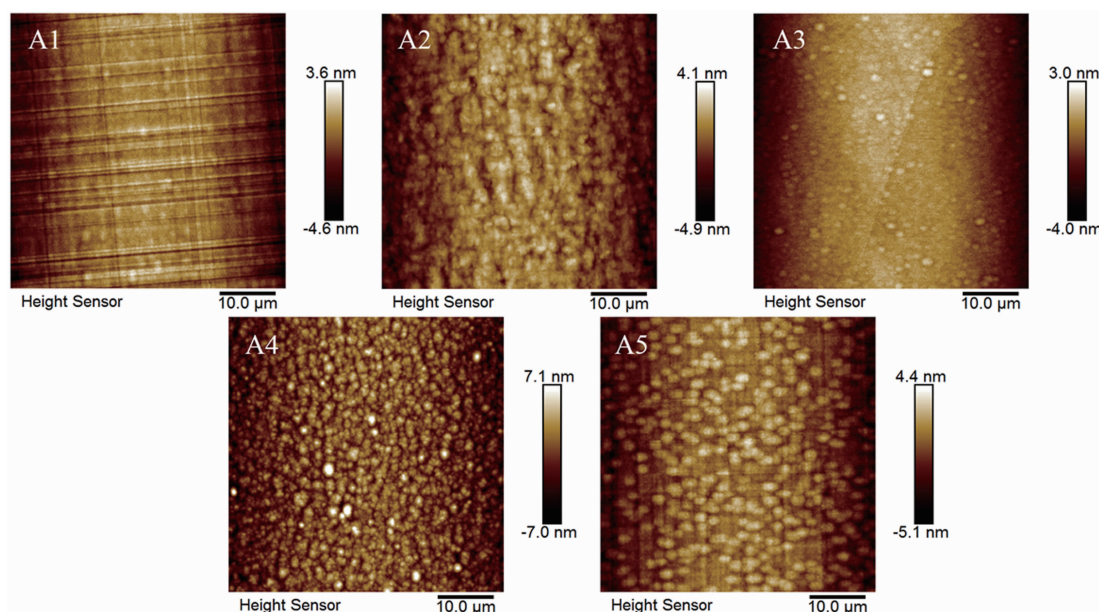


图 3 各外延片的 AFM 形貌图

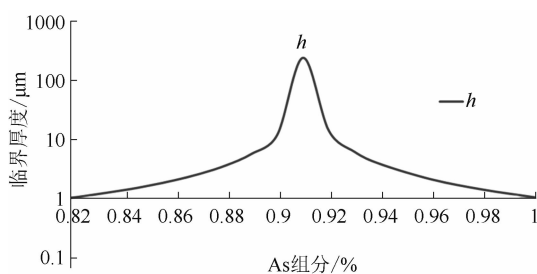


图 4 临界厚度与 As 组分的关系

以 InAsSb 材料为例, 其禁带宽度的计算公式为

$$E_{g\text{InAsSb}} = xE_{g\text{InAs}} + (1-x)E_{g\text{InSb}} - x(1-x)B \quad (2)$$

InAsSb 的修正系数为 0.67^[6]。考虑到高温工作情况, 经计算, 130 K 时 InAsSb 材料组分与截止波长的关系如图 5 所示。组分为 91% 的 InAsSb 材料的截止波长为 3.81 μm。组分每减小 1%, 其截止波长约增大 0.09 μm。

由此可见, 在一定的组分偏差范围内, 且在保持 InAsSb 层厚度小于临界厚度的前提下, 适当降低 As 组分对组件的应用扩展是有益的。或者可以采用文献[10]中提出的方法, 在 InAsSb 材料中插入少许 InSb 单层, 同样可以在引入较小压应力的前提下拓展材料的截止波长。两者的原理在本质上是相同的。不过也有文献指出^[11], 对于远距离探测, 由于穿透性

更强, 中波窗口的 CO₂ 窗口部分(截止波长在 4 μm 左右)即可满足需求。在实际应用中, 可以根据具体需求进行取舍。

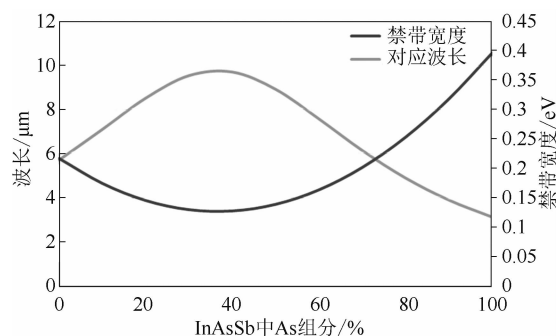


图 5 InAsSb 材料的禁带宽度及波长与 As 组分的关系

3 总结

本文讨论了分子束外延 InAsSb 材料中 As 组分对材料表面形貌、晶格质量以及器件截止波长等方面的影响。当 As 组分为 91% 时, InAsSb 材料与 GaSb 衬底完全晶格匹配, 表面形貌最好。当组分偏差较大, 使材料的厚度超过了临界厚度时, 材料质量大幅下降, 晶格表面出现交叉网格线。当 As 组分略大于 91% 时, 容易出现小丘缺陷, 对器件的性能有一定的影响。当 As 组分略小于 91% 时, 材料质量依然较好, 说明材料对压应力的容忍程度比拉应力

更高。另外, 此时器件的截止波长还会略微增大, 对器件响应波长的拓展有一定帮助。因此, 在实际生长过程中, 应当将 InAsSb 材料的 As 组分控制在略小于 91% 的范围内。

参考文献

- [1] Sarney W L, Svensson S P, Xu Y, et al. Bulk In-AsSb with 0.1 eV Bandgap on GaAs [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **122**: 025705.
- [2] Maimon S, Wicks G W. nBn Detector, an Infrared Detector with Reduced Dark Current and Higher Operating Temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(15): 151109.
- [3] Klipstein P, Klin O, Grossman S, et al. High Operating Temperature XBn-InAsSb Bariode Detectors [C]. *SPIE*, 2012, **8268**: 1-12.
- [4] Shkedy L, Brumer M, Klipstein P, et al. Development of 10 μm Pitch XBn Detector for Low SWaP MWIR Applications [C]. *SPIE*, 2016, **9819**: 98191D.
- [5] Hoang A M. Theoretical Design and Material Growth of Type-II Antimonide-based Superlattices for Multi-spectral Infrared Detection and Imaging [D]. Evanston: Northwestern University, 2016.
- [6] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band Parameters for III-V Compound Semiconductors and Their Alloys [J]. *Applied Physics*, 2001, **89**: 5816-5825.
- [7] Klin O, Klipstein P C, Jacobsohn E, et al. Molecular Beam Epitaxy Grown $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}/\text{InSb}$ Structures for Infrared Detectors [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2006, **24**(3): 1607-1612.
- [8] Matthews J W, Blakeslee A E. Defects in Epitaxial Multilayers. I. Misfit Dislocations [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1974, **27**: 18-125.
- [9] Mikhailova M P, Rumyantsev S, Shur M. Handbook Series on Semiconductor Parameters [M]. London: World Scientific, 1996.
- [10] Soibel A, Ting D Z, Hill C J, et al. Mid-wavelength Infrared InAsSb/InSb nBn Detector with Extended Cut-off Wavelength [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **109**(10): 103505.
- [11] Shtrichman I, Aronov D, Ezra M B, et al. High Operating Temperature Epi-InSb and XBn-InAsSb Photodetectors [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83532-Y.