

文章编号: 1672-8785(2019)11-0007-06

nBn 型 InAsSb 探测器的材料及器件研究

周 朋 温 涛 邢伟荣 刘 铭

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: nBn 型红外探测器可有效抑制产生-复合电流, 进而提高探测器的工作温度。由于制备工艺可移植于 III/V 族成熟工艺以及存在晶格完全匹配的衬底等优势, InAsSb/AlAsSb 材料是 nBn 型红外探测器的首选。简单介绍了 InAsSb/AlAsSb nBn 型红外探测器的研究现状、工作原理以及近期的研究成果。通过生长试验实现了良好的材料表面质量、晶体质量和光学性能。相关结果表明, 在制备器件时, nBn 结构中势垒层的掺杂浓度不应低于 $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 否则就不利于减小 nBn 型器件的暗电流。

关键词: nBn 结构; InAsSb; 高工作温度; 暗电流

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.11.002

Research on Materials and Devices of InAsSb nBn Detector

ZHOU Peng, WEN Tao, XING Wei-rong, LIU Ming

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

Abstract: The nBn infrared detector can effectively suppress the generation-recombination current, thereby increasing the operating temperature of the detector. InAsSb/AlAsSb materials are preferred for nBn infrared detectors due to the advantages that the fabrication process can be transplanted from mature III/V processes and there are perfectly lattice-matched substrates. The research status, working principle and recent achievements of InAsSb/AlAsSb nBn infrared detector are briefly introduced. Through the growth test, good material surface quality, crystal quality, and optical properties are achieved. The related results show that when preparing the device, the doping concentration of the barrier layer in the nBn structure should not be lower than $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, otherwise it will not help to reduce the dark current of the nBn device.

Key words: nBn structure; InAsSb; HOT; dark current

0 引言

近年来, 红外技术逐渐发展成熟, 红外探测器已经广泛应用于航天、导弹探测、医疗、通信、夜视和红外成像等方面。这些领域对红外探测器的需求也变得多种多样。其中, 小型

化以及快速启动的需求日益增加, 提高探测器工作温度这个研究方向也开始受到人们的重视。常规的碲镉汞和锑化铟探测器需工作在 77 K 的液氮温度下。若升高温度, 器件的暗电流则会呈指数增大, 从而严重影响其探测效

收稿日期: 2019-09-10

作者简介: 周朋(1988-), 男, 河北沧州人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为红外探测器材料设计及制备。
E-mail: zhoupeng8@foxmail.com

果。为了维持低温工作环境,需配备大功率制冷机。这会使探测器变得笨重,在某些场合难以适用。如果探测器正常工作所需的温度得以提高,不仅可以达到小尺寸、低重量和低能耗(Size, Weight and Power, SWaP)的目的,而且还能加快器件的启动速度,并可明显增加探测器组件的寿命和可靠性。相关研究表明^[1],当工作温度提高 20%~30%时,探测器组件的寿命增加 50%~150%。

暗电流大小决定了器件的工作温度。与碲镉汞器件相比,III-V 族器件有着优异的稳定性,但同时由于复合中心的存在,它也更容易受到由肖克莱-里德-霍尔(Shockley-Read-Hall, SRH)中心引起的产生-复合电流的影响。根据暗电流原理分析,SRH 暗电流的激活能一般为材料禁带宽度的二分之一^[2],而扩散电流的激活能则与禁带宽度接近。换句话说,SRH 电流随温度升高的增幅是扩散暗电流的两倍。因此,抑制 SRH 产生-复合电流是提高 III-V 族材料工作温度的关键。2006 年, Maimon S 和 Wicks G W 提出了一种采用 nBn 结构的红外探测器设计^[3]。该研究可有效抑制 SRH 产生-复合电流,进而提高器件的工作温度。

目前,以色列的 SCD 公司、法国的 Sofradir 公司以及美国的新墨西哥大学和西北大学等已经在 InSb、InAsSb、SLS 等材料体系的 nBn 结构器件上做了大量研究,并在 nBn 器件的低暗电流、高温工作以及多色结构等方面取得了良好的结果^[4]。从晶格常数与禁带宽度的关系图来看,InAsSb 材料拥有晶格匹配的 GaSb 衬底,其势垒层材料 AlAsSb 同样可以做到晶格匹配,且制备工艺可移植 III/V 族成熟工艺,因此是 nBn 结构的绝佳选择。

本文从 nBn 结构的工作原理、InAsSb 材料和器件的工艺过程以及器件性能测试等方面介绍了我们在 InAsSb/AlAsSb nBn 结构红外探测器方面的研究工作。

1 nBn 结构介绍

nBn 结构主要由 n 型吸收层、势垒层 B 以

及 n 型电极层组成。为了更好地兼容器件工艺,有时也会在吸收层下或电极层上增加一个薄层,即采用同质或异质的高掺杂 n 型材料的电极接触层^[5]。在理想的 nBn 结构中,势垒层 B 的价带与吸收层价带的能级差为零,势垒全部在导带。图 1 为该结构工作时的能带示意图。可以看出,电极层的光生或热生电子无法移动到吸收区,最终会与空穴复合,不产生电流;只有吸收区产生的电子和空穴均无阻碍地到达两端电极,才能产生信号。

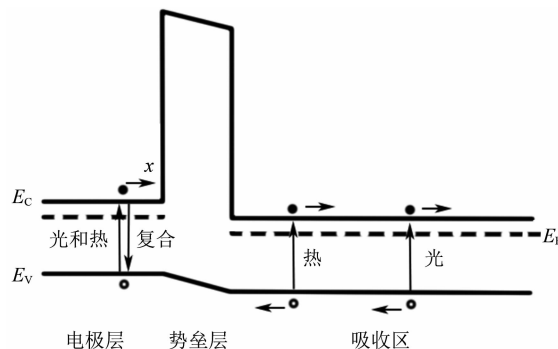


图 1 理想 nBn 结构反偏时的能带示意图

在实际状态下,还需考虑掺杂(尤其是势垒层掺杂)对能带的影响。当势垒层为 p 型掺杂时,其中会形成一个势阱,同时在吸收层引入耗尽区(能带图见图 2(a))。只要耗尽区存在,所产生的 SRH 电流就会急剧增大。而耗尽区的宽度与吸收层及势垒层的掺杂浓度有关,因此只有对吸收区进行重掺杂才能缓解这种现象^[7]。这与 nBn 结构设计的初衷相违背,应尽量避免。当势垒层为 n 型掺杂时,会形成向下弯曲的势垒,如图 2(b)所示。这时需要通过外加电压的方式来消除。

图 2(c)为外加反向偏压刚好可以克服价带势垒时的能带图。此时的外加电压称为开启电压。在此电压下,由杂质形成的势垒消除,空穴可以越过,且吸收层中依然存在耗尽区。外加电压的压降主要在势垒层。吸收层通过 SRH 中心产生的热电子空穴对无法被及时分开,其再次复合的概率大幅增加,使暗电流得到有效抑制,且器件的工作温度得以大幅提高。图 2(d)为反偏电压过大时的能带图。可

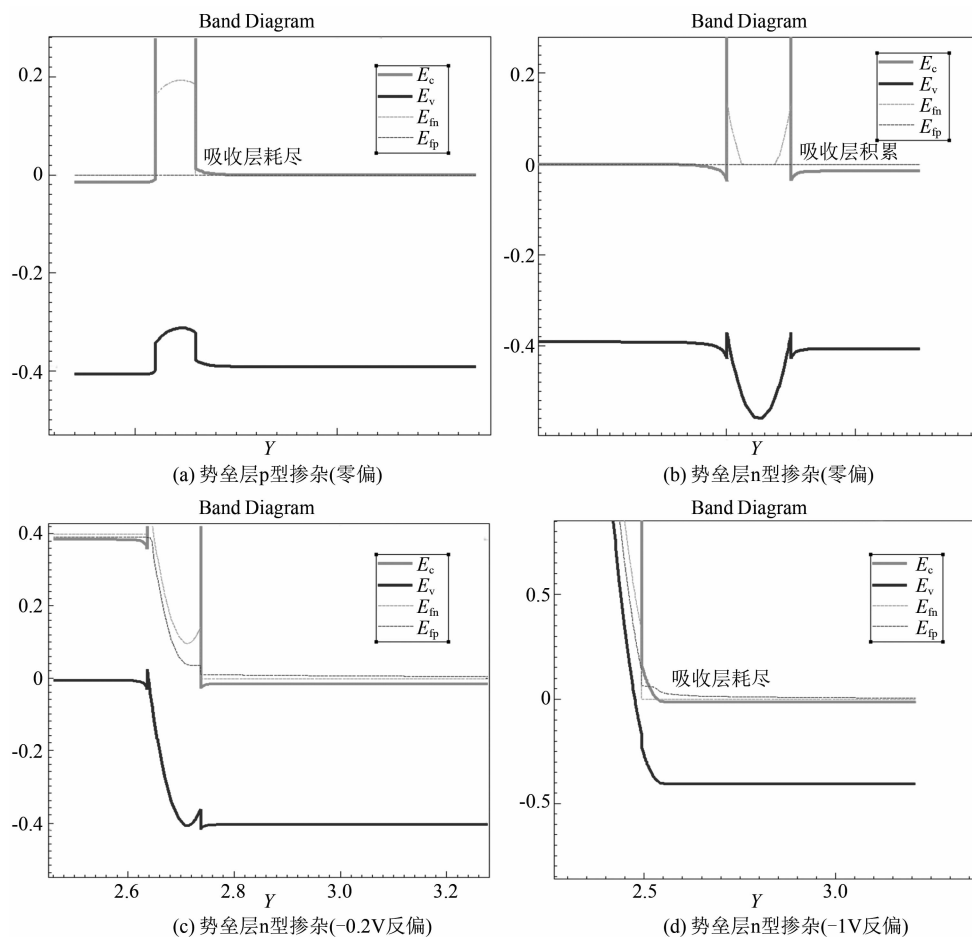


图 2 不同掺杂和外加偏压情况下的能带模拟图

以看出, 吸收层会再次产生耗尽区。因此, 控制势垒层的掺杂浓度以及选择合适的工作电压是比较重要的。

2 工艺过程

本实验采用芬兰 DCA Instruments 公司生产的 P600 型分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 系统; 使用的 III 族源炉为双丝泄流源, V 族源为裂解源 (提供 As_2 或 Sb_2 束流), 掺杂源材料为 Si。同时采用 epi-ready GaSb (100) 衬底。

图 3 所示为实验所采用的生长结构。首先在衬底上生长 GaSb 缓冲层, 然后生长 $0.4\ \mu\text{m}$ 厚的高掺杂 $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}$ 下电极层; 接着是 $2.5\ \mu\text{m}$ 厚的低掺 $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}$ 吸收层以及 $100\sim 200\ \text{nm}$ 厚的 $\text{AlAs}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ 势垒层; 最后覆盖一层 $200\ \text{nm}$ 厚的高掺杂 $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}$ 上电极层。为了研究势垒层掺杂浓度对器件性能的影响, 我们

0.2 μm 上电极层 $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}:\text{Si}\ 1\text{e}18$
0.1~0.2 μm 势垒层 $\text{AlAs}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$
2.5 μm 吸收层 $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}:\text{Si}\ 1\text{e}16$
0.4 μm 下电极层 $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}:\text{Si}\ 1\text{e}18$
GaSb 缓冲层 n.i.d.
epi-ready GaSb(100) 衬底 n 型掺杂

图 3 InAsSb nBn 结构的示意图

设置了 3 组对比实验。其中, 组 1 的势垒层掺杂浓度为 $8\times 10^{16}\ \text{cm}^{-2}$, 组 2 的势垒层掺杂浓度为 $1\times 10^{16}\ \text{cm}^{-2}$, 组 3 的势垒层未掺杂。

生长结束后, 分别对材料表面状态和晶体质量等参数进行表征。采用高分辨率 X 射线衍射仪 (High Resolution X-Ray Diffractometer, HRXRD) 对材料组分和晶体质量进行分析测试。使用的特征谱线为 $\text{CuK}\alpha 1$, 单色器为 4 个 $\text{Ge}(220)$ 晶体。

采用原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 对材料的表面状态进行观察, 并通过光致发光 (Photoluminescence, PL) 光谱测试获得材料的光学性能数据。

质量合格的材料经过台面刻蚀、钝化、金属化、互联、背减薄、增透等步骤后被加工成红外探测器组件。然后对该组件的光响应和均匀性等参数进行了测试。

3 实验结果

3.1 材料测试

图 4 所示为 AFM 测试结果。在 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 视野下, 材料的粗糙度仅为 $0.22\ \text{nm}$ 左右, 说明其表面质量良好。

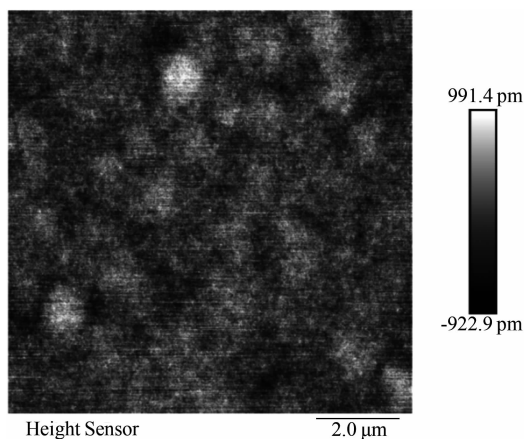


图 4 材料表面的 AFM 图

出, InAsSb 层与 GaSb 衬底层的峰值非常接近, 说明其晶格匹配较好; InAsSb 层的半峰宽仅为 $90\ \text{arcsec}$ 左右, 说明材料晶格质量良好。

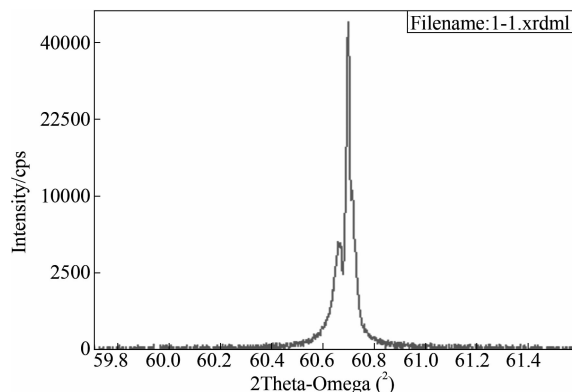


图 5 高分辨率双晶衍射 XRD 测试结果

图 6 所示为 $77\ \text{K}$ 下的 PL 测试结果。可以看出, InAsSb 材料峰值明显, 峰位位于 $3.88\ \mu\text{m}$ 处, 与该温度该组分下 InAsSb 材料的禁带宽度完美对应, 说明材料组分控制较好, 且材料的光学性能较好。

3.2 I-V 测试

图 7 所示为三组器件的暗电流 I-V 测试结果。可以看出, 只有势垒层高掺杂的元器件能够正常工作; 在反偏平坦段 ($-0.4 \sim -2\ \text{V}$), 暗电流密度约为 $2 \times 10^{-4}\ \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。低掺杂和不掺杂的元器件虽然开启电压变化不大

图 5 所示为 HRXRD 测试结果。可以看

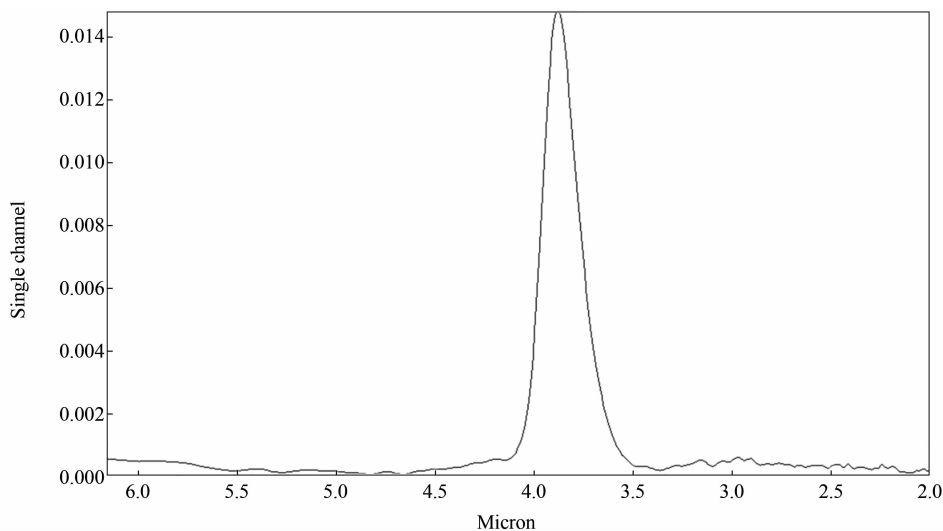


图 6 PL 光谱测试结果

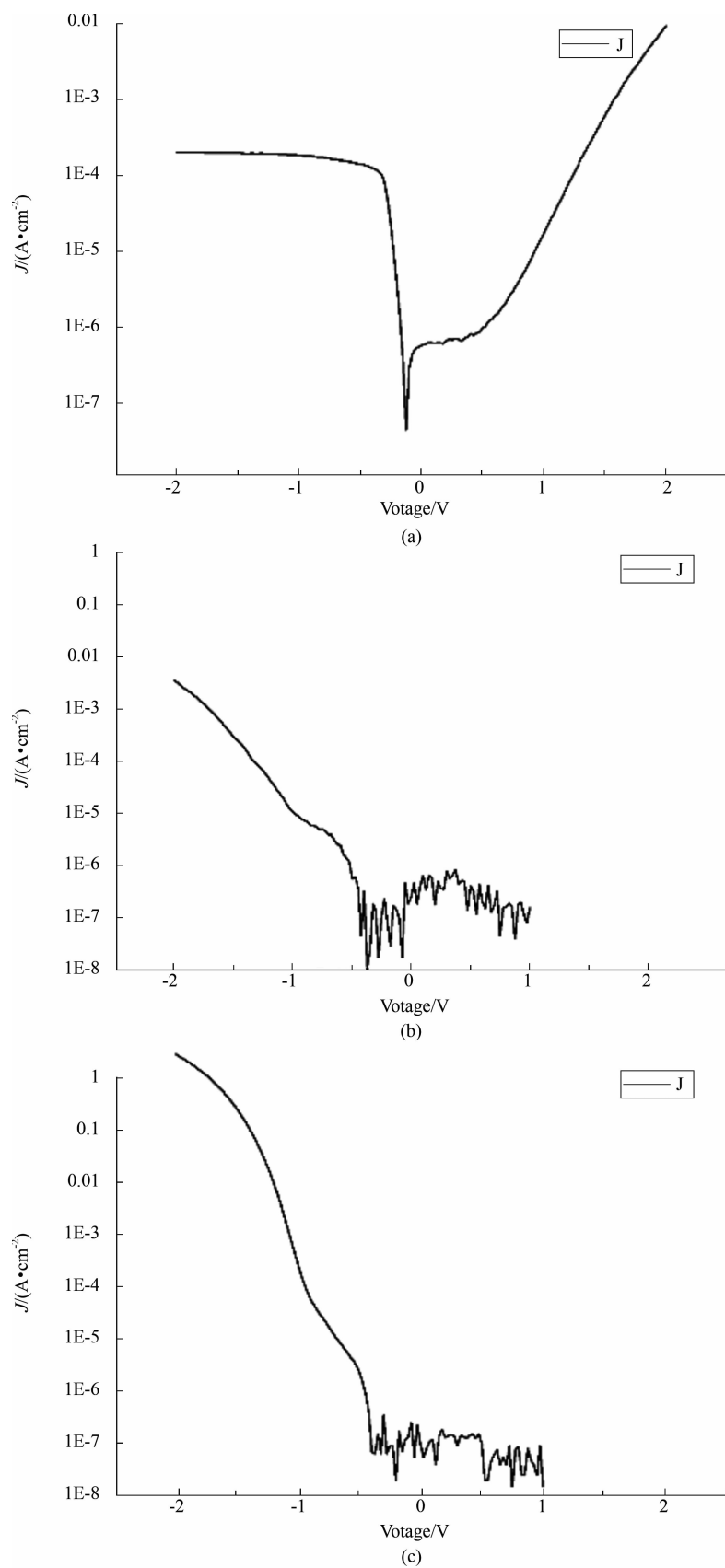


图 7 三组器件的暗电流 I-V 测试结果: (a)势垒层掺杂浓度为 $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$; (b)势垒层掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$; (c)势垒层未掺杂

(-0.5 V 左右), 但产生耗尽层的电压更低, 再增大反偏电压, 暗电流迅速上升。其中 SRH 暗电流占据主导地位, 推测原因是由于势垒层材料相对于吸收层材料存在价带势阱, 当掺杂浓度过低时, 因掺杂产生的价带偏移不足以抵消势阱, 进而影响器件的正常工作。因此, 势垒层的掺杂浓度不宜过低, 以 $8 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 左右为宜。

4 结束语

本文介绍了 nBn 结构 InAsSb/AlAsSb 材料和器件性能研究, 并通过实验验证了势垒层掺杂对 nBn 器件反偏暗电流特性的影响。结果表明, nBn 结构中势垒层的掺杂浓度不应低于 $8 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, 否则就不利于减小 nBn 型器件的暗电流。本文中的材料质量并没有达到最优, 仍有一定的提升空间, 且器件的工作温度也有望进一步提高。

参考文献

- [1] Glozman A, Harush E, Jacobsohn E, et al. High Performance InAlSb MWIR Detectors Operating at 100 K and Beyond [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 62060M.
- [2] Klipstein P C, Gross Y, Aronov D, et al. Low SWaP MWIR Detector Based on XBn Focal Plane Array [C]. *SPIE*, 2013, **8704**: 87041S.
- [3] Maimon S, Wicks G W. nBn Detector, an Infra-red Detector with Reduced Dark Current and Higher Operating Temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(15): 1–3.
- [4] 刘铭, 闻娟, 周朋, 等. Sb 基 nBn 型红外探测器发展现状 [J]. *激光与红外*, 2017, **47**(12): 1461–1467.
- [5] Khoshaklagha A, Myers S, Plis E, et al. Mid-Wavelength InAsSb Detectors Based on nBn Design [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76602Z.
- [6] Marion R, Benjamin P, Jonathan S, et al. New Model for the Ideal nBn Infrared Detector [C]. *SPIE*, 2014, **9070**: 907013.