

128 × 128 元 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器

许佳佳¹, 金巨鹏^{1,2}, 徐庆庆¹, 徐志成^{1,2}, 靳川^{1,2},
周易¹, 陈洪雷¹, 林春¹, 陈建新^{1*}, 何力¹

(1. 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:报道了 128 × 128 元 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面阵列探测器的研究成果. 实验采用分子束外延技术在 GaSb 衬底上生长超晶格材料. 红外吸收区结构为 13 ML(InAs)/9 ML(GaSb), 器件采用 PIN 结构, 焦平面阵列光敏元大小为 40 μm × 40 μm. 通过台面形成、侧边钝化和金属电极生长, 以及与读出电路互连等工艺, 得到了 128 × 128 面阵长波焦平面探测器. 在 77 K 时测试, 器件的 100% 截止波长为 8 μm, 峰值探测率 6.0 × 10⁹ cmHz^{1/2} W⁻¹. 经红外焦平面成像测试, 探测器可得到较为清晰的成像.

关键词:长波红外探测器; InAs/GaSb II 类超晶格; 焦平面阵列
中图分类号: TN304.2; TN305 **文献标识码:** A

128 × 128 infrared focal plane arrays based on Type-II InAs/GaSb superlattice

XU Jia-Jia¹, JIN Ju-Peng^{1,2}, XU Qing-Qing¹, XU Zhi-Cheng^{1,2}, JIN Chuan^{1,2},
ZHOU Yi^{1,2}, CHEN Hong-Lei¹, LIN Chun¹, CHEN Jian-Xin^{1*}, HE Li¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, we reported the growth and fabrication of a 128 × 128 infrared focal plane array detector made of type-II InAs/GaSb superlattice. The superlattice structure was grown on GaSb substrate using molecular beam epitaxy (MBE) technology. It consisted of 200 periods of 13ML(InAs)/9ML(GaSb) for longwave infrared detection. The pixel of the detector had a conventional PIN structure with a size of 40 μm × 40 μm. The device fabrication process consisted of mesa etching, side-wall passivation, metallization and flip-chip hybridization with readout integrated circuit (ROIC). At 77 K, the detector had a 100% cut-off wavelength of 8.0 μm, and a peak detectivity of 6.0 × 10⁹ cmHz^{1/2} W⁻¹. Concept proof of infrared imaging was also demonstrated with the focal plane array at liquid nitrogen temperature.

Key words: long-wave infrared detector; InAs/GaSb superlattice; focal plane array
PACS: 78.30.Fs

引言

InAs/GaSb II 类超晶格是近年来迅速发展起来的 III-V 族红外探测器. Sakaki 和 Esaki 在 1977 年提出了 InAs/GaSb II 类超晶格的概念^[1], 1987 年

Smith 和 Mailhot 提出将该 II 类超晶格材料用于红外探测的设想^[2]. InAs/GaSb 异质材料体系的 InAs 导带底在 GaSb 价带顶之下, 构成“破带隙”II 类超晶格. 改变超晶格的周期, 其响应截止波长在 3 ~ 30 μm 范围内可调. 超晶格红外探测技术具有响应光

收稿日期: 2012-01-09, 修回日期: 2012-07-24
基金项目: 国家自然科学基金 (61176082)

Received date: 2012-01-09, revised date: 2012-07-24

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61176082)

作者简介 (Biography): 许佳佳 (1986-), 女, 陕西咸阳人, 硕士, 实习研究员, 主要从事 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器器件工艺研究. E-mail: xujiajia@mail.sitp.ac.cn.

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

谱范围广;可以通过能带结构设计,抑制俄歇复合;其有效质量,特别是长波红外超晶格材料的有效质量较同波段碲镉汞材料大,有利于抑制隧穿电流;同时该技术基于较为成熟的 III-V 化合物材料,可以获得良好的均匀性. 根据理论计算,超晶格红外探测器在长波(8~12 μm)波段可以超越碲镉汞红外探测器^[3]. 近年来,InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面探测器的关键性能获得了迅速的提高,正逐渐接近 HgCdTe 红外探测器的相关性能,显示了优良的应用前景.

采用分子束外延(MBE)技术,可以得到均匀性好,材料性能稳定的 InAs/GaSb II 类超晶格材料. 1996 年,美国加州大学圣特芭芭拉分校的 Jonshon 等人首次报道了 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器. 此后,美国西北大学量子器件中心、美国空气推进实验室(JPL)、德国 Fraunhofer 固态电子研究所等机构相继研制出 II 类超晶格红外焦平面探测器^[4-6]. 2010 年美国西北大学和空气推进实验室先后成功地研制出规模 1 k × 1 k 的长波 II 类超晶格红外焦平面探测器^[7]. 目前 II 类超晶格红外探测器朝着制作大面阵、双色探测方向发展.

国内对 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器的研发起步较晚,相关研究主要集中在超晶格材料及单元探测器性能上. 本文报道了 128 × 128 元面阵 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器. 77 K 温度下,探测器的 100% 响应截止波长为 8 μm ,平均黑体探测率达到 $2.7 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,为今后发展高性能 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器奠定了基础.

1 实验

InAs/GaSb II 类超晶格材料的生长采用固态源分子束外延技术. As 源和 Sb 源分别由带阀的裂解炉提供. In 源和 Ga 源分别是高纯固态金属 In 和 Ga, Be 和 Si 分别为材料的 p 型和 n 型掺杂剂. 实验采用(100)晶向的 GaSb 衬底,衬底表面的脱氧过程由在线反射式高能电子衍射(RHEED)监控,材料外延生长的速率由 RHEED 强度振荡曲线获得,其中 In/As 生长速率为 0.079 nm/min, Ga/Sb 生长速率为 0.217 nm/min, In/As 和 Ga/Sb 的束流比由在线的离子规测量得到,束流比分别为 1:10 和 1:6,衬底温度由红外测温仪监控,为 420°C. 探测器采用 p-i-n 结构,首先在衬底上外延 1 μm 的 P 型 GaSb 缓冲层,缓冲层 Be 掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,然后是 50

周期 p 型掺杂 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ Be 的 InAs/GaSb 超晶格材料;i 层是 200 周期未掺杂的 InAs/GaSb 超晶格;接着是 50 周期 n 型掺杂 $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ Si 的 InAs/GaSb 超晶格,最后是 200 nm InAs 欧姆接触层. 超晶格的结构是 13 ML InAs/9ML GaSb.

焦平面探测器为 128 × 128 的面阵结构,光敏元面积为 40 $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$,并附带有不同面积的单元测试器件. 台面形成采用湿法腐蚀,溅射生长 300 nm 厚的 SiO₂ 作为钝化层,电感耦合等离子体刻蚀形成电极孔,电子束蒸发 TiPtAu 合金制备接触电极,电子束蒸发 TiAu 作为反射层,最后生长钢柱,探测器的单一光敏元和公共电极结构如图 1 所示. 得到的器件经后道工序,包括背面机械减薄、切割与 CTIA IV 型电路倒焊互连过程,最终杜瓦封装进行测试.

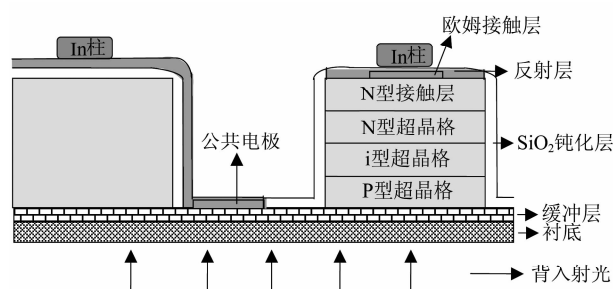


图 1 PIN 焦平面器件剖面示意图
Fig. 1 Cross-section of PIN FPA infrared detector

2 结果与讨论

生长得到的 InAs/GaSb 超晶格材料首先采用高分辨 X 射线衍射仪测试. 图 2 是器件材料(004)面的 X 射线 $\omega/2\theta$ 摇摆曲线图,中间的两个峰分别为 GaSb 衬底衍射峰和超晶格外延层零级衍射峰,30.9°对应的峰为 N 型 InAs 接触层峰. 超晶格 X 射线衍射卫星峰位置满足公式:

$$L = \lambda / (2\Delta\theta \cdot \cos\theta_{SL}) \quad (1)$$

其中, L 为超晶格周期厚度, λ 为 X 射线入射波长, $\Delta\theta$ 为相邻卫星峰的角间距, θ_{SL} 为超晶格外延材料的布拉格角.

根据卫星峰位置公式,可以分别计算出超晶格材料零级峰的位置和周期厚度. 经计算,生长得到的 InAs/GaSb 超晶格材料外延层与衬底的晶格失配为 1×10^{-3} . 超晶格 1 级卫星峰的全宽半高峰(FWHM)为 25.2 arcsec,这显示了材料的晶格质量完整. 超晶格材料拟合周期为 69.3 Å,设计值是 66.2 Å,两者大约相差的 3 Å 为 InSb 界面,因为设计的周期中没

有包括界面厚度. 从 X 射线衍射摇摆曲线上可以看到,超晶格器件结构的晶格质量完整,并且与设计相吻合.

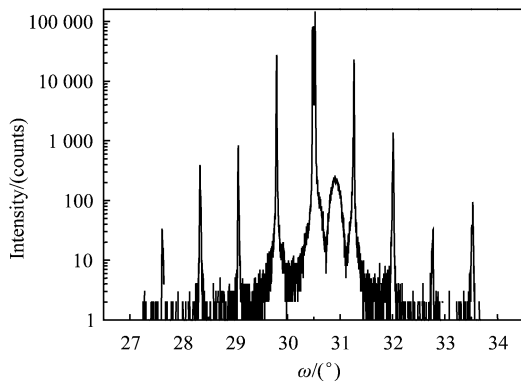


图 2 InAs/GaSb II 类超晶格器件结构的 XRD 摇摆曲线
Fig. 2 X-ray diffraction of type-II InAs/GaSb superlattice detector

用湿法化学腐蚀形成的 InAs/GaSb II 类超晶格微台面阵列,可以避免干法刻蚀工艺引起的电学损伤,而且腐蚀表面较为光滑. 磷酸/双氧水/柠檬酸基腐蚀试剂对光敏元间的狭窄区域和略宽的公共电极区域的腐蚀速率接近,这就保证了材料在腐蚀过程中的均匀性. SiO₂ 作为钝化层,一方面对器件表面进行保护,另一方面可以降低表面漏电流. 金反射层的生长可以防止入射光穿透光敏元而产生损失,另外对于公共电极而言,TiAu 的生长可以使公共电极端爬坡至高处,保证了所有的 In 柱几乎处于相同高度,有利于与电路的倒焊互连. 背面减薄可以减少衬底层对入射红外光的吸收. 封装得到的焦平面器件如图 3 所示.

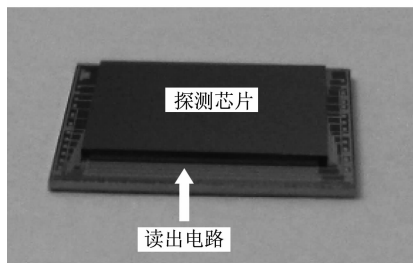


图 3 完成封装的 128 × 128 焦平面器件示意图
Fig. 3 The schematic diagram of 128 × 128 FPA detector after hybridization with ROIC

利用傅里叶变换红外光谱仪对长波 128 × 128 元 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面阵列探测器进行了光谱响应测试,77 K 温度下测得的光谱响应如

图 4 所示,器件响应的 100% 截止波长为 8 μm,落入长波范围. 通过光谱计算出转换因子,进而得到探测器的峰值探测率 D_{λ}^* 为 $6.0 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$.

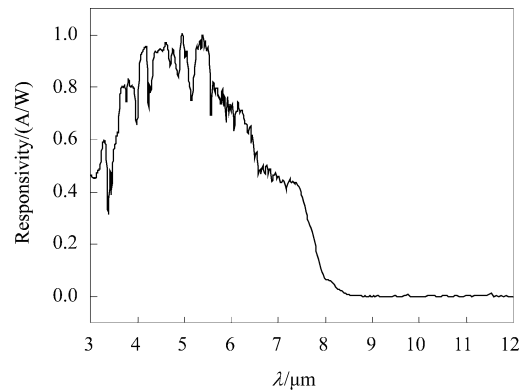


图 4 77 K 下测试得到的焦平面器件光谱响应
Fig. 4 Spectral response of IRFPA detector at 77 K

对焦平面阵列附带的单元器件进行 77 K 低温下的 I-V、黑体响应测试. 单个光敏元的 I-V 测试结果如图 5 所示. 结果表明,器件具有典型的 p-n 特性,钝化效果良好,暗电流密度在反偏压 -0.1 V 时为 $1 \times 10^{-2} \text{ Acm}^{-2}$, R_0A 约为 $7 \Omega\text{cm}^2$. 黑体响应测试采用标准黑体,温度设为 800 K,信号采集由前置放大器 and 锁相放大器完成. 在零偏下,探测器的电流响应率测试结果为 0.45 AW^{-1} ,黑体探测率为 $2.7 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$. 通过测得的响应光谱和黑体电流响应率,可以计算出量子效率,如表 1 所示.

表 1 128 × 128 面阵红外焦平面探测器的测试性能
Table 1 The performance of 128x128 IRFPA detector

参数	测试或计算结果
电流响应率	0.45 AW^{-1}
黑体探测率	$2.7 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$
峰值探测率	$6.0 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$
量子效率(6.6 μm)	16.1%
量子效率(7.5 μm)	10.3%

采用常规的红外焦平面测试方法,并通过 CTIA 读出电路改变 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器单元电极偏压,完成了 128 × 128 面阵红外焦平面探测器的测试和演示成像,图 6 为红外焦平面探测器成像演示. 图 6 (a) 为电烙铁像,6 (b) 为人手像,6 (c) 为手握热水杯图像. 该红外焦平面探测器具有正常的光电性能. 今后的工作将通过对材料生长及器件工艺的优化,降低焦平面器件的噪音和盲元率,提高均匀性等性能.

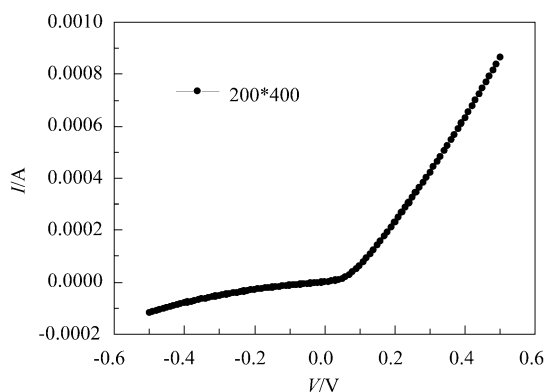


图5 77 K 下测试得到的单元器件电流与电压曲线
Fig. 5 The I - V curve of an element of the device at 77 K

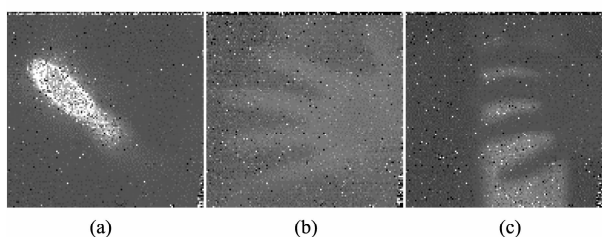


图6 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器成像演示
(a)电烙铁像, (b)人手像, (c)手握热水杯成像
Fig. 6 The images taken with 128×128 infrared superlattice focal plane array at 77 K, (a) electric soldering iron, (b) hand, and (c) hand holding a hot cup

3 结论

基于分子束外延 PIN 型多层异质结构技术和微台面阵列工艺技术,制备了 128×128 面阵 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器. 通过湿化学腐蚀方法,电感耦合等离子技术,电子束蒸发等技术,得到了光敏元尺寸为 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 的焦平面阵列. 通过对附带的单元器件测试,探测器100%截止

波长为 $8 \mu\text{m}$. 单元器件的电流响应率在液氮温度零偏为 0.45 AW^{-1} , 器件的黑体探测率达到 $2.7 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 器件在 $7.5 \mu\text{m}$ 处量子效率为 10.3%, 平均峰值探测率 D_{λ}^* 为 $6.0 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$. 采用常规的红外焦平面的测试方法对研制的 128×128 超晶格红外焦平面探测器进行了测试分析,并成功地进行了实验室演示成像. 为今后发展高性能超晶格焦平面探测器奠定了基础.

致谢

本工作得到了马伟平、朱建妹、祝海彬、吴云、何恣、曹菊英、王建新、周松敏和邢雯等的支持,作者在此一并表示衷心的感谢.

REFERENCES

- [1] Sa-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30** (12): 651 - 653.
- [2] Smith D L, Maihiot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors [J]. *J Appl Phys*, 1987, **62** (6): 2545 - 2548.
- [3] Yongdale E R, Meyer J R. Auger lifetime enhancement in InAs-GaInSb superlattice [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64** (23): 3160 - 3162.
- [4] Wei Y, Gin A, Razegh M, et al. Type II InAs/GaSb superlattice photovoltaic detectors with cutoff wavelength approaching $32 \mu\text{m}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **81** (19): 3675 - 3677.
- [5] Rhiger D R, Kvaas R E, Harris S F, et al. Progress with type-II superlattice IR detector arrays [J]. *SPIE*, 2007, **6542**: 654202.
- [6] Walther M, Rehm R, Fleissner J, et al. InAs/GaSb type-II short-period superlattices for advanced single and dual-color focal plane arrays [J]//*SPIE*, 2007, **6542**: 654206 - 654211.
- [7] Gunapala S D, Ting D Z, Hill C J, et al. Demonstration of $1\text{k} \times 1\text{k}$ long-wave and mid-wave superlattice infrared focal plane array [J]//*SPIE*, 2010, **7808**: 78080201 - 78080206.