

320 × 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格长波 红外焦平面探测器

许佳佳¹, 陈建新^{1*}, 周易¹, 徐庆庆¹, 王芳芳¹, 徐志成^{1,2}, 自治中¹,
靳川^{1,2}, 陈洪雷¹, 丁瑞军¹, 何力¹

(1. 中国科学院中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:报道了 320 × 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面阵列探测器的研制和性能测试. 采用分子束外延技术在 GaSb 衬底上生长超晶格材料, 器件采用 PBIN 结构, 红外吸收区结构为 14 ML(InAs)/7 ML(GaSb), 焦平面阵列光敏元尺寸为 27 μm × 27 μm, 中心距为 30 μm, 通过刻蚀形成台面、侧边钝化和金属接触电极生长, 以及与读出电路互连等工艺, 得到了 320 × 256 面阵长波焦平面探测器. 在 77 K 温度下测试, 焦平面器件的 100% 截止波长为 10.5 μm, 峰值探测率为 8.41 × 10⁹ cmHz^{1/2} W⁻¹, 盲元率为 2.6%, 不均匀性为 6.2%, 采用该超晶格焦平面器件得到了较为清晰的演示性室温目标红外热成像.

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

320 × 256 long wavelength infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice

XU Jia-Jia¹, CHEN Jian-Xin^{1*}, ZHOU Yi¹, XU Qing-Qing¹, WANG Fang-Fang¹, XU Zhi-Cheng^{1,2},
BAI Zhi-Zhong¹, JIN Chuan^{1,2}, CHEN Hong-Lei¹, DING Rui-Jun¹, 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: The growth and fabrication of a 320 × 256 type-II InAs/GaSb superlattice long wavelength infrared focal plane array detector were reported. The superlattice material was grown on GaSb substrate using molecular beam epitaxy (MBE) technology with a PBIN structure. The structure of infrared absorption layer is 14 ML (InAs)/7 ML (GaSb), the focal plane array had a pixel size of 27 μm × 27 μm and a pitch of 30 μm. The device fabrication process consisted of mesa dry etching, side-wall passivation, metallization and flip-chip hybridization with readout integrated circuit (RO-IC). At 77 K, the detector had a 100% cut-off wavelength of 10.5 μm, and a peak detectivity of 8.41 × 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 planes array

PACS: 78.30.Fs

引言

InAs/GaSb II 类超晶格是被寄予厚望的基于 III-V 族化合物材料的新一代红外探测技术. II 类超

晶格的概念早在 1977 年就已提出^[1], 1987 年美国科学家提出将 InAs/GaSb II 类超晶格材料用于红外探测, 1996 年采用分子束外延 (MBE) 技术制备出了超晶格红外探测器, 而后超晶格红外探测技术获得

收稿日期: 2013-00-00, 修回日期: 2014-00-00

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61176082)

作者简介 (Biography): 许佳佳 (1986-), 女, 陕西咸阳市人, 硕士, 助理研究员, 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

Received date: 2013-00-00, revised date: 2014-00-00

了全面而快速的发展. 吸收波段在8~12 μm的长波红外焦平面探测器在夜视、地物目标探测、环境监测等领域应用广泛,但随着波段延伸,红外探测器的暗电流呈几何级增加,从而限制了焦平面器件的性能和工作温度. 但对于InAs/GaSb II类超晶格,可以通过能带结构设计、优化材料生长工艺、改善器件工艺等技术手段,有效提高超晶格材料的性能,抑制长波波段InAs/GaSb II类超晶格红外焦平面器件的暗电流,从而获得高性能的长波焦平面器件. 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近年来先后成功研制出高性能长波II类超晶格红外焦平面探测器,面阵规模达到1 K×1 K^[2],目前InAs/GaSb II类超晶格红外焦平面探测器正朝着大面阵、波长拓展、双色、多色等方向发展.

国内虽然对InAs/GaSb II类超晶格红外探测器的研发起步较晚,但进展迅速,2012年报道了100%截止波长8 μm的128×128元面阵InAs/GaSb II类超晶格红外焦平面探测器的初步结果^[3],同年制备得到了成像非常清晰的128×128中波II类超晶格红外焦平面探测器^[4],本文报道了320×256元InAs/GaSb II类超晶格长波红外焦平面阵列探测器的初步研究成果,在77 K温度条件下测试,焦平面器件的100%截止波长为10.5 μm,暗电流密度在反偏0.1 V时为 7×10^{-9} A,平均峰值探测率 8.41×10^9 cmHz^{1/2}W⁻¹,采用研制的超晶格红外焦平面获得了人手指较为清晰的红外热像.

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铟和镓,Be和Si分别用于P型和N型掺杂. 外延生长采用(100)晶向的N型GaSb衬底,衬底表面首先脱氧,并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InAs生长速率为0.128 nm/s, GaSb生长速率为0.200 nm/s, In/As和Ga/Sb的束流比由在线的离子规测量得到,束流比均为1:8,衬底温度为400 °C. 探测器采用PBIN结构,这里P代表P型接触层,B势垒层,I本征吸收层,N代表N型接触层,首先在衬底上外延P型GaSb缓冲层,缓冲层Be掺杂浓度为 1×10^{18} cm⁻³,在缓冲层上生长25个周期的P型长波超晶格(14 ML) InAs/(7 ML) GaSb,紧接着生

长周期结构为(7 ML) InAs/(7 ML) GaSb的中波势垒层,中波超晶格层的作用是抑制器件的暗电流. 红外吸收区是300周期未掺杂的InAs/GaSb长波超晶格材料,在吸收区上是50周期N型掺杂 1.5×10^{17} cm⁻³ Si的InAs/GaSb超晶格,最后是200 nm InAs欧姆接触层, Si掺杂浓度为 1×10^{18} cm⁻³.

焦平面探测器为320×256的面阵结构,光敏元面积为27 μm×27 μm,中心距为30 μm. 台面形成采用Cl₂/N₂电感耦合等离子体干法刻蚀技术,刻蚀形成面阵台面. 新制的台面采用电感耦合等离子沉积技术在低温下生长厚度为300 nm的Si₃N₄作为钝化层,钝化层有助于保护器件表面,防止材料表面因歧化反应形成漏电中心而造成表面漏电. 电极孔通过选择性刻蚀掉氮化硅的方式打开,电子束蒸发TiPtAu合金在电极孔上生长电极,最后热蒸发生长钢柱. 320×256的面阵器件经后道工序,包括背面机械减薄,切割、与电路倒焊互连、深减薄等过程,最终杜瓦封装进行液氮温度下红外焦平面测试.

2 结果与讨论

生长得到的InAs/GaSb长波超晶格材料首先采用高分辨X射线衍射仪表征. 图1是器件材料(004)面的X射线 $\omega/2\theta$ 摇摆曲线图,中间的最高峰为GaSb衬底衍射峰和超晶格外延层零级衍射峰, GaSb衬底峰与+1级卫星峰间的衍射峰来自N型InAs接触层. 长波外延层与衬底的晶格失配为 4×10^{-4} ,中波势垒层与衬底的晶格失配为 5×10^{-4} . 因此衍射图中的中波外延零级峰、长波外延零级峰与衬底峰接近重合. 长波超晶格一级卫星峰的半高全宽0.008度,中波超晶格卫星峰的半高全宽为0.015

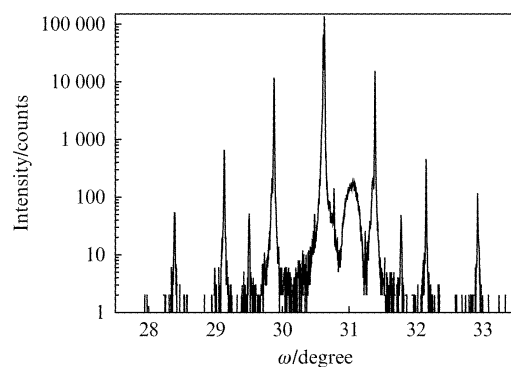


图1 InAs/GaSb II类超晶格器件结构的XRD摇摆曲线
Fig. 1 X-ray diffraction of type-II InAs/GaSb superlattice detector

度,说明超晶格器件结构中长波本征区与中波势垒区晶格质量完整.

探测器台面制备是器件工艺的重要环节,随着面阵规模扩大,台面和沟道尺寸趋于更小,320 × 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面器件沟道设计尺寸仅为 3 μm,湿法腐蚀虽然具有损伤小和操作简单等优点,但腐蚀的各向同性易造成台面的横向钻蚀,尤其对深台面、窄沟道台面器件难以进行加工.而干法刻蚀技术具有刻速快、方向性好,选择比高、大面积均匀性好等优点,因此对于大面阵、深台面、窄沟道器件,选择干法刻蚀制作台面是最有效的方法.电感耦合等离子体干法刻蚀技术是 III-V 族材料的台面刻蚀的优选技术,它能使等离子体密度和下电极自偏压得到独立控制,在下电极自偏压很低的同时维持高密度的等离子体,即在很低的轰击损伤下实现较高的刻蚀速率、较好的刻蚀形貌和图形侧壁陡直度.图 2 是以 Cl₂/N₂ 电感耦合等离子体刻蚀得到 II 类超晶格面阵台面扫描电镜图.

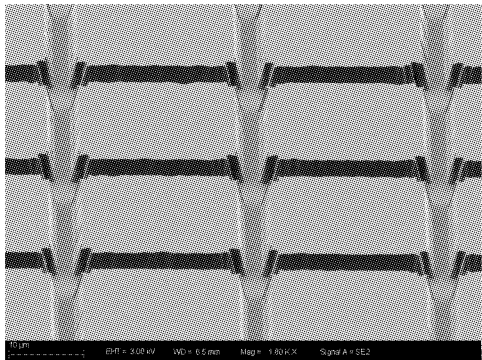


图 2 电感耦合等离子体刻蚀得到的 InAs/GaSb II 类超晶格台面
Fig. 2 SEM images of type II InAs/GaSb mesa etched by inductively coupled plasma

利用傅里叶变换红外光谱仪对长波 320 × 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面中测器件进行了光谱响应测试,77 K 温度下测得的光谱响应如图 3 所示,器件响应的 100% 截止波长为 10.5 μm,50% 截止波长为 9.5 μm. 中测器件 *I-V*、*R-V* 曲线如图 4 所示,结果表明,器件具有典型的 p-n 特性,暗电流密度在反偏压 0.1 V 时为 7×10^{-9} A, R_{\max} 为 $2 \times 10^7 \Omega$, R_0 为 $3 \times 10^6 \Omega$.

将 320 × 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器模块减薄至 200 μm,并进行 77 K 低温下红外焦平面测试,器件光学系统 *f* 数为 2.0,积分时间 650 μs,器件的盲元率约为 2.6%,不均匀性

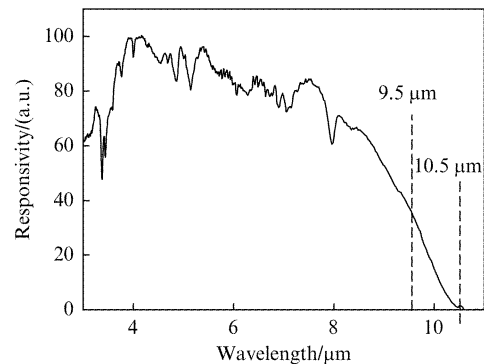


图 3 77 K 下测试得到的焦平面器件光谱响应
Fig. 3 Spectral response of IRFPAs detector at 77 K

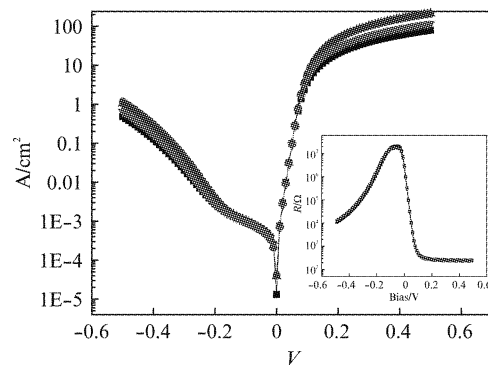


图 4 77 K 下测试得到的中测器件电流与电压、电阻与电压曲线
Fig. 4 The *I-V* and *R-V* curve of middle test device at 77 K

为 8.2%,平均响应率为 $1.81 \times 10^7 \text{ VW}^{-1}$,可得到较为清晰的红外演示人手像,如图 5 所示,5(a)为超晶格焦平面的盲元分布图,5(b)为人手的红外热成像,从中可以较清晰地分辨出人手的指甲.经文献研讨,这是我国首次报道长波超晶格红外焦平面器件和采用超晶格探测器实现红外热成像.

通过对 N 型 GaSb 衬底的室温透过率进行测试,发现 N 型 GaSb 衬底对长波辐射有很强的吸收,

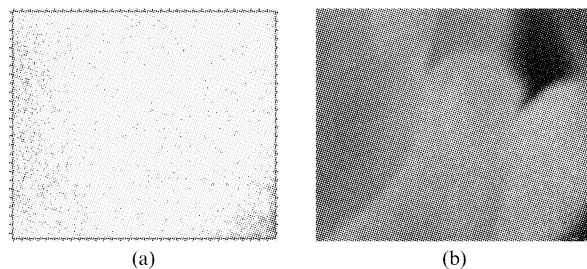


图 5 InAs/GaSb II 类超晶格 320 × 256 元红外焦平面盲元分布和演示成像
Fig. 5 The bad pixel distribution and images taken with 320 × 256 infrared superlattice focal plane array at 77 K

而且波长越长,吸收越强烈,这将大大降低长波器件的响应率和量子效率.因此要提高器件的整体性能,必须对衬底进行深减薄.本实验中将320×256元InAs/GaSb II类超晶格红外面阵器件模块衬底深减薄至50 μm,然后对焦平面器件进行77 K下红外焦平面测试,测试条件F数=2.0,积分时间=650 μs.测量得到长波超晶格焦平面的盲元率约为2.6%,不均匀性为6.2%,平均响应率为 $3.32 \times 10^7 \text{ VW}^{-1}$,平均峰值探测率 $8.41 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,噪声等效温差值(NETD)为153.6 mK,如表1所示.

表1 深减薄的320×256长波面阵红外焦平面探测器的测试性能

Table 1 Test results of different thickness of longwave 320×256 IRFPAs detector

参数	性能
平均响应率(VW^{-1})	3.32×10^7
平均峰值探测率($\text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$)	8.41×10^9
NETD(mK)	153.6
盲元率	2.6%
不均匀性	6.2%

3 结论

基于分子束外延PBIN型多层异质结构技术和微台面阵列工艺技术,制备了320×256面阵InAs/GaSb II类超晶格长波红外焦平面探测器.通过干法刻蚀方法、电感耦合等离子技术、电子束蒸发等工

艺,得到了光敏元尺寸为 $27 \mu\text{m} \times 27 \mu\text{m}$ 、中心距为 $30 \mu\text{m}$ 的焦平面阵列.在77 K温度下测试,探测器100%截止波长为 $10.5 \mu\text{m}$,平均峰值探测率 $8.41 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,盲元率为2.6%,不均匀性为6.2%,并成功地进行了实验室演示成像.这为今后发展实用化的超晶格红外焦平面探测器组件奠定了基础.

致谢

本工作得到了廖清君、马伟平、朱建妹、吴廷琪、曹菊英、何高胤、徐丹、吴云、王建新、张健怡、何恣、祝海彬等的支持,作者在此一并表示衷心的感谢.

References

- [1] Halasz G A S, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice[J]. *Appl Phys Lett*, 1977, **30**(12): 651–653.
- [2] Gunapala S D, Ting D Z, Hill C J. Demonstration of $1 \text{ k} \times 1 \text{ k}$ long-wave and mid-wave superlattice infrared focal plane array[C]//SPIE, 2010, 7808: 78080201–78080206.
- [3] XU Jia-Jia, JIN Jv-Peng, XU Qing-Qing, et al. 128×128 infrared focal plane arrays based on Type-II InAs/GaSb superlattice[J]. *J Infrared Millim Wave*. (许佳佳,金巨鹏,徐庆庆,等. 128×128 元InAs/GaSb II类超晶格红外焦平面探测器. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(6): 501–504.
- [4] Chen J X, Zhou Y, Xu Z C, et al. InAs/GaSb Type-II Superlattice Mid-wavelength Infrared Focal Plane Array Detectors Grown by Molecular Beam Epitaxy[J]. *J Cryst Growth*, 2013, **378**: 596–599.