

〈材料与器件〉

InAs/GaSb 超晶格长波红外探测器

汪良衡, 李云涛, 雷华伟, 杨 煜, 丁颜颜, 张 舟, 刘 斌, 周文洪

(武汉高芯科技有限公司, 湖北 武汉 410074)

摘要: InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器因其特殊的能带结构及其自身的材料和器件优势, 在红外成像技术上具备极大的应用价值和前景, 同时在大面积长波红外探测器及甚长波红外探测器领域展现出优异的器件性能, 并推动世界各国对这一低维半导体研究的持续发展, 成为第三代红外探测器技术的最佳选择, 并在国防建设、医疗、电力、天文学、抗灾方面有着广泛的应用。本文着重介绍了 II 类超晶格长波红外探测器器件的制备、焦平面的成像测试以及器件的相关性能。长波探测器器件在 77 K 条件下 10% 截止波长为 14 μm, 峰值量子效率为 35%, 峰值响应 2.6 A/W, 峰值探测率接近 1×10^{10} cmHz $^{1/2}$ W $^{-1}$ 。

关键词: InAs/GaSb; II 类超晶格; 长波红外

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2018)05-0473-04

Long-wavelength Super Lattice Infrared Detectors Based on InAs/GaSb

WANG Liangheng, LI Yuntao, LEI Huawei, YANG Yu, DING Yanyan, ZHANG Zhou, LIU Bin, ZHOU Wenhong
(Wuhan Global Sensor Technology Limited Corporation, Wuhan 430025, China)

Abstract: InAs/GaSb type-II superlattices have been shown to be important as third-generation infrared detectors. This is because of their special structure, excellent material properties and excellent device performance as large array long wavelength infrared detectors(LWIR) and very-long wavelength infrared detectors(VLWIR). In addition, they have demonstrated the best application value and prospect in infrared imaging technology, thereby encouraging continued research into this low dimensional semiconductor. It has comprehensive applications in national defense, medical treatment, power, astronomy and fight natural calamities. The preparation of the device, imaging test of the focal plane array and the relevant performance is presented. The 10% cutoff wavelength of the long wavelength infrared detectors device is 14 μm. The final peak quantum efficiency(QE) is 35% and the peak responsivity is 2.6 A/W with an average detectivity of 1×10^{10} cm·Hz $^{1/2}$ ·W $^{-1}$.

Key words: InAs/GaSb, type-II superlattice, LWIR

0 引言

红外波段大致可以分为短波红外(SWIR, 1~3 μm)、中波红外(MWIR, 3~5 μm)、长波红外(LWIR, 8~12 μm)、甚长波红外(VLWIR, >14 μm)^[1]。目前能实现长波红外探测的材料主要包括 HgCdTe(MCT)、量子阱(QWIP)和 InAs/GaSb 二类超晶格(Type-II)。长波红外探测器在军事和民用方面的重要应用涵盖航天、国防、生物医学、环保等诸多领域^[2]。其中对于弹道导弹防御、气象监测等空间红外系统具

有关键作用^[3]。

InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器因其独特的物理特性近年来得到迅速发展而备受人们的关注, 其特点是改变超晶格的周期厚度, 能量带隙可从 0.3 eV 调节至 0.1 eV 以下, 相应的红外响应截止波长可在 3~30 μm 连续可调^[4-5]。与 QWIP 材料相比, Type-II 类超晶格利用“带间跃迁”, 能够吸收正入射, 量子效率更高; 与 MCT 材料相比, 电子有效质量大, 可以抑制一部分隧穿电流, 从而可以降低暗电流^[2]。并且 InAs/GaSb 超晶格基于 III-V 族材料生长技术, 容易掺

收稿日期: 2017-08-18; 修订日期: 2018-02-28.

作者简介: 汪良衡(1985-), 女, 研发工程师, 主要研究方向为半导体光电子器件研发。

杂，没有合金涨落，大面积均匀性好，成本低^[6]。在长波红外波段，MCT 成本非常昂贵，材料和工艺难度急剧增大^[2]，而且理论计算表明，在相同的工作温度下，II 类超晶格器件性能在长波波段远远好于 MCT（如下图 1 所示）^[7]。因此，InAs/GaSb II 类超晶格探测器在长波段具有非常明显的优势。图 2 是美国天基红外系统，它覆盖了包含甚长波在内的全部红外波段^[8]。

随着分子束外延（MBE）材料生长技术的进步，人们能够研制出高质量的超晶格材料和探测器。2003 年，第一个概念性的超晶格焦平面探测器研制成功^[9]，2005 年德国报道了截止波长为 5 μm 的高性能超晶格焦平面探测器^[10]。2006 年，长波红外超晶格焦平面探测器研制成功^[11]。2008 年美国西北大学率先研制出 M 型结构的 InAs/GaSb II 类超晶格甚长波焦平面红外探测器，该器件在 77 K 条件下 50% 截止波长为 14.3 μm，量子效率 37%， R_0A 值为 $2.1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ^[12]。目前 II 类超晶格红外探测器朝着长波、甚长波、双色、大面阵探测方向发展。

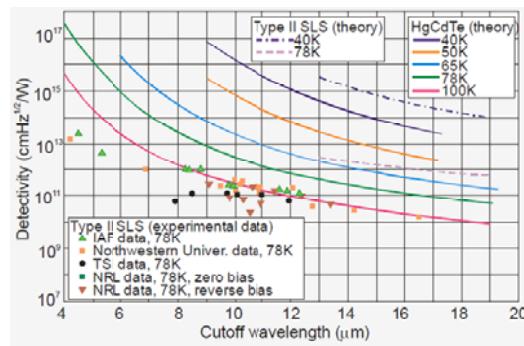


图 1 不同温度和波长下，II 类超晶格和 HgCdTe 探测器的理论探测率

Fig.1 The predical detectivity of Type-II and P-on-n HgCdTe photodiodes as functions of wavelength and temperature

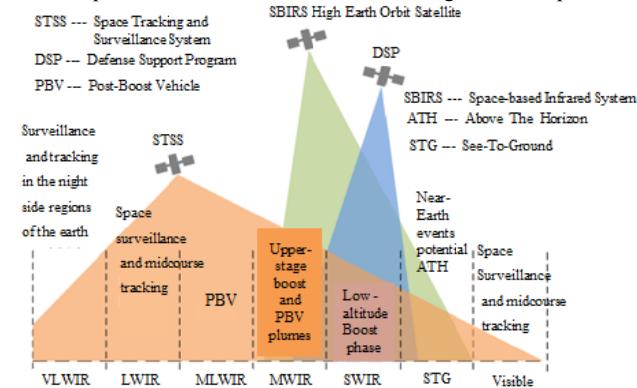


图 2 各种地球轨道上的天基红外系统，根据目标温度特征选择红外探测器

Fig.2 Space-based infrared systems in various earth orbits, where infrared detectors to be selected according to the temperature characteristics of targets

1 实验

理论研究表明，改变 InAs、GaSb 的厚度，以及 InAs/GaSb 的组成成分，可以改变材料的能带结构，从而获得 3~30 μm 内任意波长的探测。基于 II 类超晶格能带的可调节性，通过减小禁带宽度，实现长波、甚长波探测。M 型超晶格势垒结构是抑制器件暗电流的主要技术手段，本文中的长波器件采用 P π MN 结构，即在 GaSb 势垒层中插入 AlSb 来调节材料的禁带宽度，“M”型结构置于吸收层和 n 型接触层之间，以抑制长波探测器的隧穿电流。器件具体结构如图 3 所示^[13-14]。

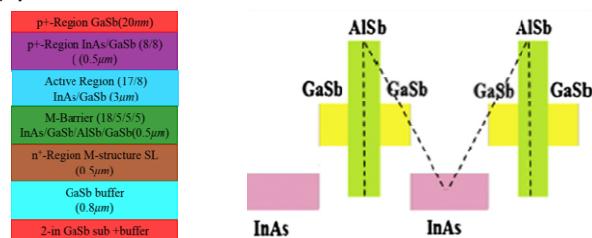


图 3 长波器件结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the LWIR structure

本文中焦平面探测器为 320×256 的阵列结构，像元中心距为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ ，并附带有不同面积的测试器件结构。芯片的制备主要包括微台面成型、器件表面钝化、金属化、高密度钢柱制备、高精度倒装焊以及衬底去除等工艺。台面成型采用干法加湿法腐蚀工艺，目的是减少干法刻蚀中等离子体带来的电学损伤，表面光滑、低损伤的台面刻蚀侧壁如图 4 所示。阳极硫化和 ZnS 物理钝化的方法有机结合，在降低暗电流的同时增加了器件的稳定性。探测器的单一光敏元和公共电极结构如图 5 所示，图 6 为封装后的红外焦平面芯片示意图。

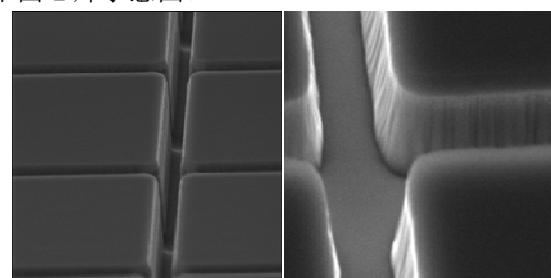


图 4 超晶格台面刻蚀示意图

Fig.4 Images of mesa sidewalls after etching for superlattice

2 器件特性测试分析

2.1 线列测试结果

对焦平面阵列附带的测试器件进行了 77 K 下的电流-电压 ($I-V$) 和黑体响应测试。单个光敏元的 $I-V$ 测试结果如图 7 和表 1 所示。从中可以看出，器件在

反偏 -0.05 V 时暗电流密度为 $1.03 \times 10^{-2}\text{ A/cm}^2$, 零偏下的结阻抗为 $2.4\Omega\cdot\text{cm}^2$, 最大动态电阻为 $114\Omega\cdot\text{cm}^2$, 达到了文献上报道的水平^[12,16]。

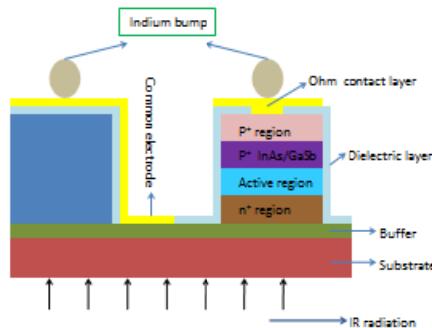


图 5 超晶格光敏元器件剖面示意图

Fig.5 Cross section schematic of InAs/GaSb superlattice

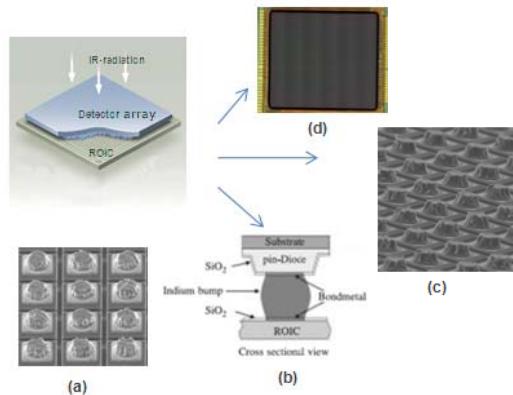


图 6 320×256 红外焦平面阵列与 Si 读出电路之间的倒焊互连技术示意图:(a)台面型二极管的 In 柱 SEM 照片,(b)In 柱互连技术^[15], (c)Si 读出电路的 In 柱形貌,(d)封装后的 320×256 阵列芯片

Fig.6 Hybrid IR focal plane array(FPA) for 320×256 with independently optimized signal detection and readout:
(a)SEM photo shows mesa photodiodes array with indium bumps; (b)indium bump technique; (c)indium bump for the silicon readout chip; (d)integrated IR arrays of 320×256 format

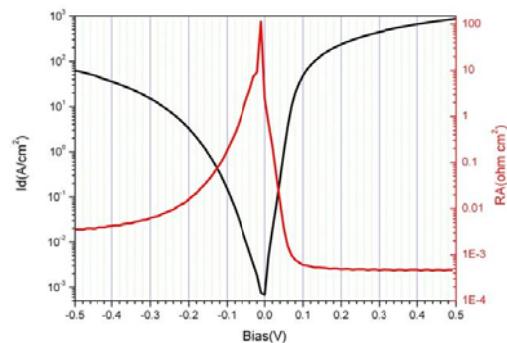


图 7 面积为 $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$ 器件的暗电流和动态电阻特性

Fig.7 Current-Voltage curve and Resistive-Voltage performance for a $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$ pixel at 77 K

表 1 长波探测器线列器件暗电流动态电阻测试结果

Table 1 The linear array of Resistive-Voltage and Current-Voltage result for LWIR device

Dark Current Density	Sample 1#
Bias = -0.05 V	$1.03 \times 10^{-2}\text{ A/cm}^2$
R_0A	$2.4\Omega\cdot\text{cm}^2$
$R_{-0.1}A$	$0.18\Omega\cdot\text{cm}^2$
$R_{\max}A$	$114\Omega\cdot\text{cm}^2$

器件的光谱响应由傅里叶红外光谱仪 (FT-IR) 在 77 K 温度下测试得到, 结合器件的黑体响应, 可以计算得到器件的电流响应谱, 如图 8 所示。图中可以看出器件的峰值响应率为 2.6 A/W , 10% 截止波长为 $14\mu\text{m}$, 通过测得的响应光谱和黑体电流响应率, 计算得到器件的峰值量子效率为 35%。

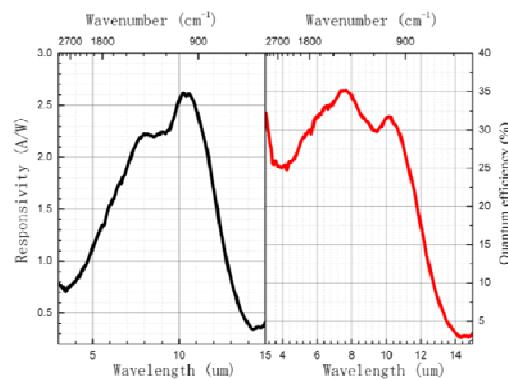


图 8 PtMN 结构的探测器响应光谱和量子效率

Fig.8 The response spectra and quantum efficiency of PtMN structure

2.2 面阵成像

采用红外焦平面测试系统, 完成了 320×256 长波红外焦平面探测器的测试和演示成像, 表 2、表 3 为焦平面探测器的性能, 器件的峰值探测率为 $1\times 10^{10}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 70 K 下噪声等效温差 (NETD) 为 50.8 mK。对于 P-π-M-n 结构的器件, 从表 3 可以看出, 随着焦平面温度降低, 暗电流变小, 响应增大, 噪声变小, 噪声等效温差 (NETD) 减小, 焦平面温度从 70 K 降至 60 K 时, 器件性能有明显提高, 响应信号由 0.21 V 增加至 0.25 V, 噪声由 0.71 mV 减小为 0.46 mV, NETD 由 50.8 mK 减小为 24.3 mK。主要是“M”型结构能消除俄歇复合过程中电子空穴对的分裂, 同时, AlSb 的加入, 阻止了毗邻 InAs 势阱中电子的相互作用, 降低了隧穿的几率, 很好的抑制了产生复合电流和隧穿电流^[13-14,17]; 温度从 60 K 到 53 K 时器件性能变化不大, 可能是由于占主导的隧穿电流所致。图 9 为红外焦平面探测器在焦温 70 K 时的成像演示。图 9(a)为人面像, 图 9(b)为手握经过液氮浸泡的金属

杯所成的像，成像结果显示该红外焦平面探测器具有优良的光电性能。

表2 320×256 长波红外焦平面探测器的性能

Table 2 Performance of the 320×256 format for LWIR at 70K

Performance	Result
Responsive voltage	0.21 V
Maximum detectivity	$1 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$
NETD	50.8 mK
Maximum QE	35%

表3 320×256 长波红外焦平面探测器不同焦温下测试结果

Table 3 The characteratation obtained from video frames with 320×256 of 30 μm pixels at different FPA temperature

Performance	53 K	60 K	70 K
Response/V	0.27	0.25	0.21
Noise/mV	0.43	0.46	0.71
NETD/mK	24.3	28.1	50.8

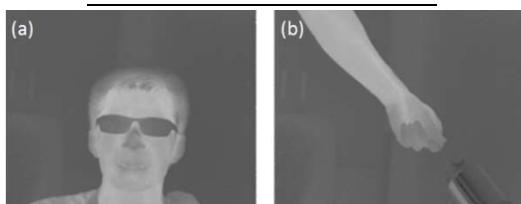


图9 焦温 70 K 时焦平面所成的像

Fig.9 Infrared images obtained using a LWIR type-II FPA at 70 K

3 结论

基于分子束外延材料技术和微台面阵列工艺技术，制备了 320×256 面阵规模的 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面探测器。通过电感耦合等离子体技术，化学湿法腐蚀的方法，电子束蒸发等技术，得到了光敏元尺寸为 30 μm×30 μm 的焦平面阵列。通过对器件的测试，探测器 10% 截止波长为 14 μm。器件的峰值响应率为 2.6 A/W，平均峰值探测率 D_{λ}^* 为 $1 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ，器件的峰值量子效率为 35%。采用红外焦平面测试系统对研制的 320×256 超晶格长波红外焦平面探测器进行了测试分析，并成功进行了实验室演示成像，为今后发展大规模、多色、高性能的超晶格焦平面探测器奠定了基础。

参考文献：

- [1] A. I. D'Souza, L. C. Dawson, D. J. Berger, et al. HgCdTe multispectral infrared FPAs for remote sensing applications[C]//SPIE, 1998, **3498**: 192-202.
- [2] 张艳华, 马文全, 卫煇, 等. 长波和甚长波及其双色 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器的研究进展[J]. 中国科学: 物理学力学 天文学, 2014, **44**: 390-395.
- ZHANG Yanhua, MA Wenquan, WEI Yang, et al. Long wavelength, Very long wavelength and narrow-band long-/very-long wavelength two-color type-II InAs/GaSb superlattice photodetectors[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, **44**: 390-395.
- [3] 王忆锋, 余连杰, 钱明. II 类超晶格甚长波红外探测器的发展[J]. 光电技术应用, 2011, **26**(2): 45-52.
- WANG Yifeng, YU Lianjie, QIAN Ming. Development of Type-II Superlattice for very long wavelength infrared detectors[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, **26**(2): 45-52.
- [4] 陈建新, 林春, 何力. InAs /GaSb II 类超晶格红外探测技术[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(5): 786-790.
- CHEN Jianxin, LIN Chun, HE Li. InAs/GaSb type II superlattice infrared detection technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(5): 786-790.
- [5] Rehm R, Walther M, Schmitz J. InAs/GaInSb superlattice focal plane arrays for high-resolution thermal imaging[J]. *Opto-Electronics Review*, 2006, **14**: 283-296.
- [6] 史衍丽, 余连杰, 田亚芳. InAs /(In) GaSb II 类超晶格红外探测器研究现状[J]. 红外技术, 2007, **29**(11): 621-626.
- SHI Yanli, YU Lianjie, TIAN Yafang. Development status of InAs/(In)GaSb II-type superlattice infrared detector[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(11): 621-626.
- [7] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Thrid-generation infrared photon detector arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**: 091101-44.
- [8] 王忆锋, 李培智, 刘黎明, 等. 甚长波碲镉汞红外探测器的发展[J]. 红外技术, 2012, **34**(7): 373-382.
- WANG Yifeng, LI Peizhi, LI Liming, et al. Developments of very long wavelength Mercury Cadmium Telluride infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(7): 373-382.
- [9] M.Razeghi, Y.Wei, J.Bae, et al. Type II InAs/GaSb superlattices for high-performance photodiodes and FPAs[J]. *Proceedings of SPIE the Internation Society for Optical Engineering*, 2003, **5246**: 501-511.
- [10] M. Walther, R. Rehm, F. Fuchs, J. Schmitz, et al. 256×256 focal plane array midwavelength infrared camera based on InAs/GaSb short-period superlattices[J]. *J. Electron. Mater.*, 2005, **34**: 722-725.
- [11] I Vurgaftman, E H Aifer, C L Canedy, et al. Graded band gap for dark-current suppression in long-wave infrared W-structured type-II superlattice photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**: 1211141-3.
- [12] Binh-Minh Nguyen, Darin Hoffman, Pierre-Yves Delaunay, et al. Very high performance LWIR and VLWIR Type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes with M-structure barrier[C]//SPIE, 2008, **7082**: 7082051-12.
- [13] B M Nguyen, M Razeghi. Type-II “M” Structure Photodiodes: An Alterna -tive Material Design for Mid-Wave to Long Wavelength Infrared Regimes[C]//SPIE, 2007, **6479**: 64790S1-9.
- [14] HAO Hongyue, WANG Guowei, XIANG Wei, et al. Fabrication of type-II InAs/GaSb superlattice long-wavelength infrared focal plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **72**: 276-280.
- [15] A ROGALSKI. History of infrared detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2012, **20**(3): 279-308.
- [16] ZHOU Yi, CHEN Jianxin, WANG Fangfang, et al. High performance InAs/GaSb superlattice long wavelength photodetectors based on barrier enhanced structures[C]//SPIE, 2015, **9522**: 9522231-6.
- [17] M Razeghi, A Haddadi, A M Hoang, et al. Advances in antimonide-based type-II superlattices for infrared detection and imaging at center for quantum devices[J]. *Infrared Phys. Technology*, 2013, **59**: 41-52.