

12.5 μm 1 024 \times 1 024 长波 InAs/GaSb II 类超晶格 红外焦平面探测器

白治中*, 黄 敏, 徐志成, 周 易, 朱艺红, 沈益铭, 张君玲, 陈洪雷, 丁瑞军, 陈建新
(中国科学院上海技术物理研究所红外探测全国重点实验室, 上海 200083)

摘要:报道了 12.5 μm 的 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面探测器。实验采用分子束外延技术在 GaSb 衬底上生长超晶格材料。吸收区超晶格结构为 15ML(InAs)/7ML(GaSb)。探测器采用 PB π BN 的双势垒结构以抑制长波探测器暗电流。研制了规模为 1 024 \times 1 024, 像元中心距为 18 μm 的长波焦平面探测器。采用金属杜瓦封装, 与制冷机耦合形成超晶格长波探测器制冷组件。在 60 K 温度下测试了探测器各项性能。探测器 50% 截止波长为 12.5 μm , 平均峰值探测率达到 $6.6 \times 10^{10} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 盲元率为 1.05%, 噪声等效温差 NETD 为 21.2 mK。红外焦平面成像测试得到了清晰的长波成像。

关 键 词:焦平面; InAs/GaSb; 超晶格; 长波

中图分类号: TN304.2; TN305

文献标识码: A

12.5 μm 1 024 \times 1 024 long-wavelength infrared InAs/GaSb Type II superlattice focal plane arrays

BAI Zhi-Zhong*, HUANG Ming, XU Zhi-Cheng, ZHOU Yi, ZHU Yi Hong,
SHEN Yi-Ming, ZHANG Jun-Lin, CHEN Hong-Lei, DING Rui-Jun, CHEN Jian-Xin
(National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In this paper, the research results of 12.5 μm long-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays were reported. The superlattice structure was grown on GaSb substrate using molecular beam epitaxy (MBE) technology. The respective structure of absorption region is 15ML (InAs) /7ML (GaSb). The detector adopts PB π BN double barrier structure to suppress the dark current. A long-wave focal plane detector with the size of 1 024 \times 1 024 and the pixel center-to-center distance of 18 μm was developed. The detector is packaged by a metal dewar, and a superlattice long-wavelength detector cryocooler assembly is formed by coupling with a refrigerator. At 60 K measurement, the detector has 50% cut-off wavelength of 12.5 μm . The detector has a peak detectivity of $6.6 \times 10^{10} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, dead pixels rate of 1.05% and a noise equivalent temperature difference (NETD) is 21.2 mK. The Infrared images of the test have been taken clearly using the infrared imaging detector.

Key words: focal plane array, InAs/GaSb, superlattice, long wavelength

引言

InAs/GaSb II 类超晶格红外探测技术建立在较

为成熟的 III-V 化合物半导体技术之上, 具有能带
灵活可调的特点, 其探测波长可覆盖 3~30 μm 中波

收稿日期: 2023-09-19, 修回日期: 2023-09-30

Received date: 2023-09-19, Revised date: 2023-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62004205, 62104236, 62104237, 62222412)、国家重点研发计划项目 (2022YFB3606800)、上海市启明星
项目扬帆专项 (21YF1455000、22YF1455800)、中国科学院上海技术物理研究所创新专项基金资助项目 (CX-455)。

Foundation items: Project supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) Fund (62004205, 62104236, 62104237, 62222412),
National Key Research and Development Program of China (2022YFB3606800), Shanghai Rising-Star Program (21YF1455000, 22YF1455800) and
Special Fund for Innovation of SITP, CAS (CX-455).

作者简介 (Biography): 白治中 (1984-), 男, 湖南益阳人, 博士, 副研究员, 主要从事 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器研究。E-mail:
baizz@mail.sitp.ac.cn

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

至远红外波段。除了可以调节能带宽带, InAs/GaSb 超晶格结构还可以应用能带工程来改变能带结构。通过能带结构设计, 使得重空穴带和轻空穴带有较大的分离, 从而抑制 Auger 复合。超晶格材料的有效质量不直接依赖于其禁带宽度。相比 HgCdTe 材料, InAs/GaSb 超晶格有更大的有效质量, 特别在长波波段, 高的有效质量将十分有助于抑制隧穿暗电流^[1-2]。InAs/GaSb II 类超晶格红外探测技术是通过改变超晶格周期厚度来调节探测截止波长。现代的材料生长技术如, 分子束外延, 可以在单原子层的精度上控制材料生长, 保证材料周期厚度的精确控制, 因此超晶格材料具有均匀性高的技术优势。当探测器的探测率达到 $1 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 以上时, 决定焦平面探测器性能的主要因素是其均匀性, 而不是探测率。均匀性对于提高红外系统的温度分辨率以及提高将探测目标从背景中区分出来的能力是十分重要的。因此, 针对长波和甚长波波段, II 类超晶格以其优越的暗电流特性和材料器件均匀性, 有望提高焦平面探测器的温度分辨率, 具有鲜明的特色和潜在优势, 成为目前最为热门的红外探测器技术。

由于其优异的红外探测性能, InAs/GaSb II 类超晶格受到了广泛的关注, 近年来在国际上发展极为迅速^[3-8]。美国加州大学在 1996 年第一个报道 InAs/GaSb 超晶格单元探测器。在 78 K 温度下, 响应波长达到 10.6 μm 、8.8 μm 波长时, 探测率达到 $1 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ ^[9]。2003 年美国西北大学报道了第一个 II 类超晶格焦平面探测器^[10]。此外, 德国的 Fraunhofer 研究所、美国的雷神公司、JPL 实验室、以色列 SCD 公司和新墨西哥大学在 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面研究方面也取得了一系列进展^[11-18]。

本文报道了截止波长为 12.5 μm 的 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面探测器组件。该探测器采用 PB π BN 的双势垒外延超晶格结构抑制长波暗电流, 吸收区超晶格结构为 15ML (InAs)/7ML (GaSb)。研制了规模为 1 024×1 024, 像元中心距为 18×18 μm 的长波焦平面探测器。采用金属杜瓦封装, 与斯特林制冷机耦合形成超晶格长波探测器制冷组件。在 60 K 温度下, 探测器平均峰值探测率达到 $6.6 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$, 盲元率为 1.05%, NETD 为 21.2 mK。

1 实验

1.1 器件结构设计

针对 12.5 μm 长波探测器, 利用铟化物超晶格能带结构灵活可调的特性, 设计并构建了具有暗电流抑制功能的 pB π Bn 双势垒结构超晶格探测器。势垒结构的引入是抑制长波探测器的暗电流的有效方法。特别是利用超晶格材料体系能带可调的优势, 人工设计器件结构中的电子势垒和空穴势垒, 既能够抑制台面器件的纵向漏电, 又能够将耗尽区主要形成在势垒区, 减少长波器件的隧穿电流。

针对 12.5 μm 长波超晶格焦平面组件的器件结构进行了设计和优化, 主要采用双势垒的异质结器件结构, 图 1(a) 所示, 该结构包含 P 型和 N 型的重掺杂电极区、厚膜吸收区以及电子势垒区和空穴势垒区, 可表示为 PB π BN 结构。

对于吸收区, 主要考虑了探测器量子效率的设计。长波超晶格在未进行补偿掺杂时体现为弱 n 型, 少子为空穴, 由于在超晶格材料中, 空穴有效质量远大于电子, 其扩散长度远小于电子, 因此将无法通过增加器件吸收区的厚度来提高器件的量子效率。通过前期的研究, 将吸收区进行 P 型的补偿掺杂, 将吸收区的少子由空穴改变为电子, 可以有效提高吸收区的少子扩散长度, 从而使得增加吸收区材料厚度来提高探测器量子效率的方法可行。针对探测器量子效率的需求, 吸收区采用了补偿掺杂技术及厚膜材料生长技术来提高超晶格吸收区材料的扩散长度及量子效率。

对于势垒区, 针对 12.5 μm 截止波长的长波红外探测器禁带宽度窄、暗电流高的特点, 设计了包含电子势垒和空穴势垒的势垒增强型探测器结构, 提高器件信噪比, 满足焦平面的研制要求。图 1(b) 为 PB π BN 的能带结构图和电场分布图。双势垒的结构可以有效降低耗尽区的内建电场, 从而减小探测器的暗电流, 提高器件性能。同时本文的设计中采用了缓变异质结来消除尖峰势垒。优化的长波超晶格探测器结构通过优化设计的缓变结的引入, 可以在抑制暗电流的同时保证光电流的输运不受尖峰势垒的阻挡, 从而保证了探测器的量子效率。

InAs /GaSb II 类超晶格材料的生长采用固态源分子束外延技术。实验采用 (100) GaSb 衬底, 衬底表面的脱氧过程和外延过程由在线反射式高能电子衍射 (RHEED) 监控。探测器采用 pB π Bn 双势

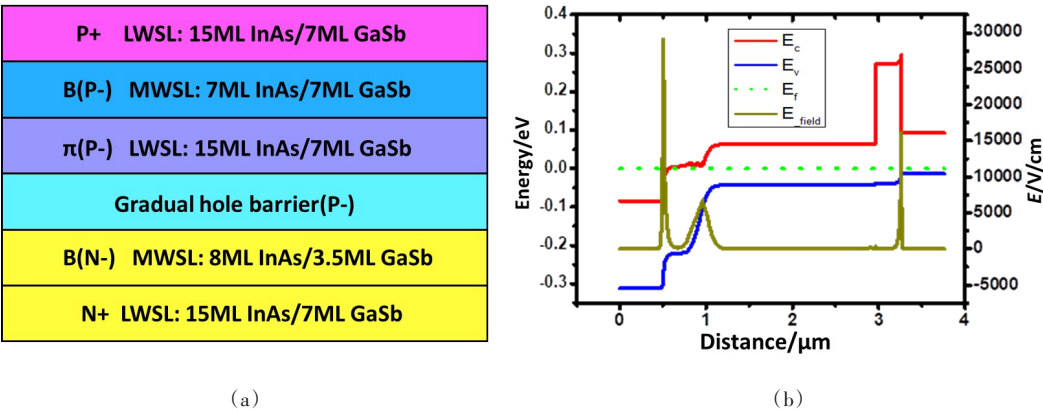


图1 (a)长波超晶格探测器器件结构;(b)对应的能带结构图
Fig. 1 (a)Structure of long-wavelength superlattice detectors; (b)band structure diagram

垒外延结构,超晶格的吸收区结构为 15 ML InAs/7ML GaSb。本文研制的焦平面器件规模为 1 024 × 1 024,采用台面结构,像元中心距为 18 μm。像元与公共电极台面形成采用电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀技术获得,化学气相沉积技术(CVD)生长 300 nm 厚的 SiN₂ 薄膜作为钝化层,ICP 刻蚀形成电极孔,电子束蒸发 TiPtAu 合金制备欧姆接触电极,在电极表面生长钢柱。器件经背面机械减薄、切割、与读出电路(ROIC)倒焊互连后形成长波焦平面探测器件。最后将器件封装于杜瓦中,与制冷机耦合形成超晶格长波制冷组件。在 60 K 温度下对器件进行光学和电学性能测试。

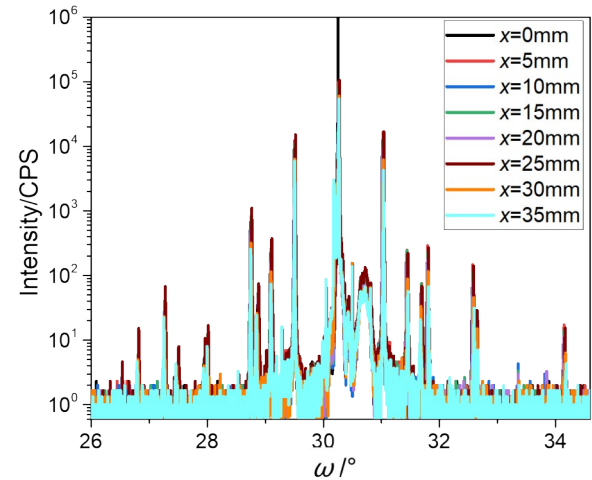


图2 超晶格长波外延材料的 X 射线 $\omega/2\theta$ 摇摆曲线
Fig. 2 XRD $\omega/2\theta$ scan of long-wavelength superlattice wafers

采用高分辨 X 射线衍射仪测试分析 InAs/GaSb 超晶格长波探测器结构的晶格质量和周期厚度。图 2 是沿 3 英寸超晶格外延材料径向取点测试的

(004)晶面 X 射线 $\omega/2\theta$ 摇摆曲线图。每一个点的 X 射线衍射 $\omega/2\theta$ 摇摆曲线高度重合,显示了超晶格外延材料的高均匀性。图中位于正中间的主峰及其肩部分别为 GaSb 衬底衍射峰和超晶格外延层零级衍射峰。从图中可以看出有三组一级衍射峰,其中位于 31.2° 处峰强较强、且相互间隔较近的衍射峰为长波吸收区超晶格结构 15 ML InAs /7ML GaSb 的正一级衍射峰,而位于 31.6° 处峰强次强、且相互间隔较远的一组衍射峰为电子势垒超晶格结构 7 ML InAs/7ML GaSb 的正一级衍射峰。而位于 31.8° 处峰强最弱、且相互间隔最远的一组衍射峰为空穴势垒超晶格结构 8 ML InAs /3.5ML GaSb 的正一级衍射峰。随着周期厚度增大,各级衍射峰之间间距也随之减小。从图中可以看出,各级衍射峰尖锐且半高宽较窄,其中吸收区正一级峰半高宽为 14.33 arcsec,电子势垒区正一级峰半高宽为 38.26 arcsec,空穴势垒区正一级峰半高宽为 55.03 arcsec。显示了材料的良好晶格质量。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,分别为 6.43 nm(吸收区)、4.35 nm(电子势垒)和 3.66 nm(空穴势垒)。超晶格探测器的周期结构与设计相吻合。

图 3 为长波超晶格材料的 AFM 测试图像,扫描范围为 5 μm×5 μm,从图中可以看到,规则排列的层状结构清晰可见。结果显示,长波超晶格材料表面粗糙度 Ra 均小于 0.2 nm。

2 结果及分析

2.1 暗电流特性

图 4 为 60 K 温度下超晶格长波探测器像元的 I -

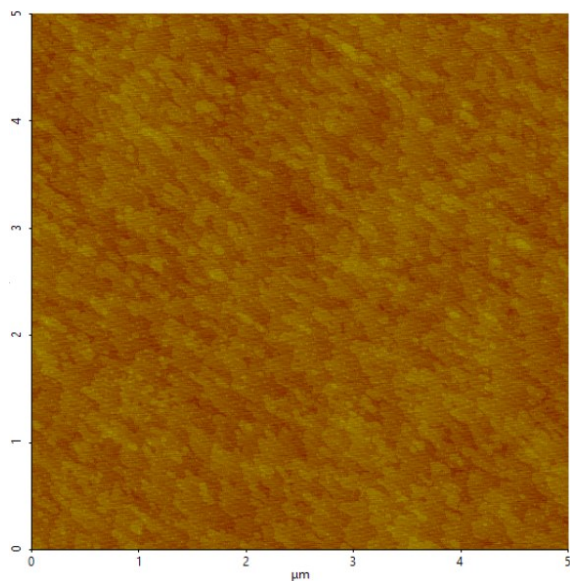


图3 长波超晶格材料AFM测试图像

Fig. 3 Long-wavelength superlattice materials AFM test image

I 曲线图。从图中可以看出,得益于本文采用的双势垒探测器暗电流抑制结构,长波探测器的暗电流得到了显著的抑制。在偏置电压为 -0.05 V 时探测器像元暗电流为 0.6 nA 。满足了高性能 $12.5\text{ }\mu\text{m}$ 长波焦平面探测器对像元暗电流特性的要求。如何进一步降低长波探测器暗电流是获得高性能长波超晶格焦平面探测器的关键,后续工作将主要围绕探测器结构优化和表面钝化开展。

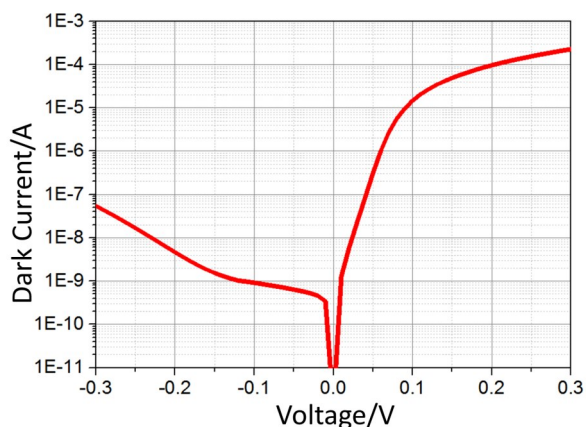
图4 长波超晶格探测器的像元 I - V 曲线图

Fig. 4 The dark current of long-wavelength superlattice detectors

2.2 光谱响应

通过傅里叶红外光谱仪测试探测器的光谱响应特性。图5为该长波探测器的响应光谱,从图中

可以看出该探测器响应截止波长为 $12.5\text{ }\mu\text{m}$,该探测器成功实现了探测器组件的长波段红外探测功能。本探测器衬底已经完全去除,光谱曲线中的震荡由探测器超晶格的F-P腔震荡现象造成。

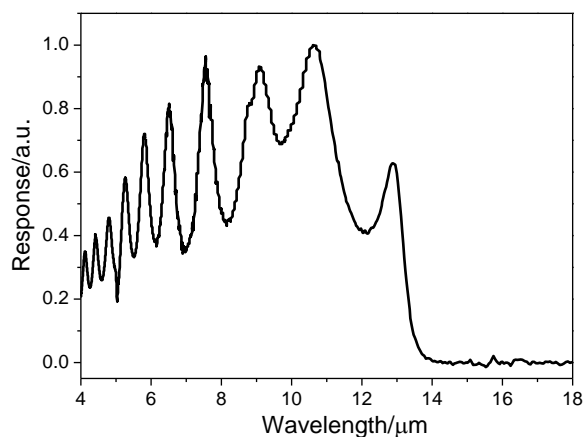


图5 长波超晶格探测器光谱响应曲线

Fig. 5 The responsivity spectrum of long-wavelength superlattice detectors

2.3 焦平面结果

本文研制的长波探测器组件工作温度为 60 K ,组件稳定功耗为 $53\text{ W}_{\text{a.c.}}$ 。在黑体温度为 $20^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$,F数为2的条件下测试探测器各项性能指标。本文长波焦平面探测器测试结果如表1所示。其平均峰值探测率为 $6.6\times 10^{10}\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$,盲元率为 1.05% ,响应非均匀性达到 6.2% 。图6为该长波探测器噪声等效温差柱状分布图。图中柱状分布呈现正态分布的特征。该长波探测器噪声等效温差均值为 21.2 mK ,正态分布中心值为 21 mK 。

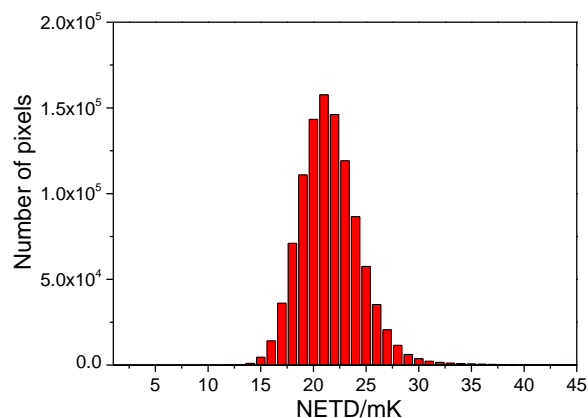


图6 超晶格长波探测器噪声等效温差柱状分布图

Fig. 6 NETD column distribution of superlattice long-wavelength detectors

长波超晶格焦平面探测器的成像演示图如图 7 所示。从图中可清晰地分辨出人的五官、眼镜等图像特征,成像效果清晰。图中人物手持的为一杯冷水,可以看出,冷水杯与人脸温度之间的差异明显。此外,从成像图中还可以看出成像人物脸上皮肤不同温度的细微差别,显示了该探测器良好的温度分辨能力。该成像图中盲元未进行校正,为长波探测器原始成像。从器件的成像演示图和焦平面测试参数情况可知,该长波红外焦平面探测器具备了开展实际应用的前景。

表 1 超晶格长波焦平面组件 60 K 温度下的测试结果

参数	性能
规模	1 024×1 024
平均响应率 (V/W)	7.9×10^7
平均峰值探测率 ($\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$)	6.6×10^{10}
响应非均匀性 (%)	6.2
NETD (mK)	21.2
盲元率 (%)	1.05
组件功耗 ($\text{W}_{\text{a.c.}}$)	53



图 7 百万像素长波探测器高清晰成像图
Fig. 7 High definition image of megapixel long-wavelength detectors

3 结论

报道了 12.5 μm 的 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面探测器组件的研究结果。设计了长波暗电流抑制的 PB π BN 的双势垒超晶格探测器结构。采用分子束外延技术在 GaSb 衬底上生长了高质量的超晶格材料。研制了规模为 1 024×1 024,像元中心距为 18×18 μm 的长波焦平面探测器。60 K 下像

元在 -0.05 V 偏压处暗电流达到了 0.6 nA。采用金属杜瓦封装,与制冷机耦合形成超晶格长波探测器制冷组件。在 60 K 温度下测试了探测器各项性能,该探测器平均峰值探测率达到 $6.6\times10^{10} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$,盲元率为 1.05%,NETD 为 21.2 mK。红外焦平面成像测试得到清晰的长波成像。

致谢:本工作得到了钟艳红、陈昱、杨勇斌、朱建妹、何高胤、曹晓莹等同志的支持,作者在此表示衷心的感谢。

References

[1] Smith D L, Maihiot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**: 2545-2548.

[2] Hu W D, Chen X S, Ye Z H, *et al.* A hybrid surface passivation on HgCdTe long wave infrared detector with in-situ CdTe deposition and high-density Hydrogen plasma modification [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **99**(9): 091101.

[3] Sai-Halasaz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(12): 651 - 653.

[4] Golding T D, Shih H D, Zborowski J T, *et al.* Investigation of molecular-beam epitaxially grown InAs/(In, Ga) Sb strained-layer superlattices [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1992, **10**(2): 880-884.

[5] Zborowski J T, Fan W C, Golding T D, *et al.* Epitaxial and interface properties of InAs/InGaSb multilayered structures [J]. *Journal of applied physics*, 1992, **71** (12) : 5908-5912.

[6] Feenstra R M, Collins D A, Ting D Z Y, *et al.* Interface roughness and asymmetry in InAs/GaSb superlattices studied by scanning tunneling microscopy [J]. *Physical review letters*, 1994, **72**(17): 2749-2752.

[7] Walther M, Schmitz J, Rehm R, *et al.* Growth of InAs/GaSb short-period superlattices for high-resolution mid-wavelength infrared focal plane array detectors [J]. *Journal of Crystal growth*, 2005, **278**(1): 156-161.

[8] Haugan H J, Grazulis L, Brown G J, *et al.* Exploring optimum growth for high quality InAs/GaSb type-II superlattices [J]. *Journal of crystal growth*, 2004, **261**(4): 471-478.

[9] Johnson J L, Samoska L A, Gossard A C, *et al.* Electrical and optical properties of infrared photodiodes using the InAs/Ga1-xInxSb superlattice in heterojunctions with GaSb [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**(2):1116-1127.

[10] Razeghi M, Wei Y, Bae J, *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.

[11] Walther M, Rehm R, Fuchs F, *et al.* 256×256 focal plane array mid-wavelength infrared camera based on InAs/GaSb short-period superlattices [J]. *Journal of electronic materials*, 2005, **34**: 722-725.

[12] 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]. *Proc. of SPIE*, 2007, **6542**:

- 83–90.
- [13] Rhiger D R, Kvaas R E, Harris S F, *et al.* Progress with Type II superlattices IR detector arrays [J]. *Infrared Technology and Applications*. 2007, **6542**: 54202–54202.
- [14] Nguyen B M, Hoffman D, Delaunay P Y, *et al.* Band edge tunability of M-structure for heterojunction design in Sb based type II superlattice photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(16): 163502.
- [15] Ting D Z, Hill C J, Soibel A, *et al.* A high-performance long wavelength superlattice complementary barrier infrared detectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95** (2) : 183502.
- [16] Gautam N, Plis E, Kim H S, *et al.*, “Heterostructure band engineering of type II InAs/GaSb superlattice based long wave infrared photodiodes using unipolar current blocking barriers [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7660**: 572–577.
- [17] Gunapala S D, Ting D Z, Hill C J, *et al.* Demonstration of 1k \times 1k long-wave and mid-wave superlattice infrared focal plane arrays [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7808**: 780802.
- [18] Klipstein P C, Avnon E, Benny Y, *et al.* Type-II superlattice detector for long-wave infrared imaging [C]. *Proc. of SPIE*, 2015, **9451**: 94510K.