

320 × 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格 中波红外双色焦平面探测器

白治中*, 徐志成, 周易, 姚华城, 陈洪雷, 陈建新, 丁瑞军, 何力
(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要:报道了 320 × 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格红外双色焦平面阵列探测器的初步结果. 探测器采用 PN-NP 叠层双色外延结构, 信号提取采用顺序读出方式. 运用分子束外延技术在 GaSb 衬底上生长超晶格材料, 双波段红外吸收区的超晶格周期结构分别为 7 ML InAs /7 ML GaSb 和 10 ML InAs /10 ML GaSb. 焦平面阵列像元中心距为 30 μm. 在 77 K 时测试, 器件双色波段的 50% 响应截止波长分别为 4.2 μm 和 5.5 μm, 其中 N-on-P 器件平均峰值探测率达到 $6.0 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 盲元率为 8.6%; P-on-N 器件平均峰值探测率达到 $2.3 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 盲元率为 9.8%. 红外焦平面偏压调节成像测试得到较为清晰的双波段成像.

关键词: InAs/GaSb; 超晶格; 双色; 焦平面
中图分类号: TN304.2, TN305 **文献标识码:** A

320 × 256 dual-color mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays

BAI Zhi-Zhong*, XU Zhi-Cheng, ZHOU Yi, YAO Hua-Cheng, CHEN Hong-Lei,
CHEN Jian-Xin, DING Rui-Jun, HE Li
(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In this paper, we report research results of 256 × 256 dual-color mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays. The detector structure is PN-NP epitaxial multilayer and the signal is read out by sequential mode. The superlattice structure was grown on GaSb substrate using molecular beam epitaxy (MBE) technology. The respective structure of each absorption region are 7ML (InAs) /7ML (GaSb) and 10ML (InAs) /10ML (GaSb). The pixel center distance of the detector is 30 μm. At 77 K measurement, the detector has 50% cut-off wavelength of 4.2 μm and 5.5 μm respectively; The N-on-P detector has a peak detectivity of $6.0 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ and dead pixels rate of 8.6%; The P-on-N detector has a peak detectivity of $2.3 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ and dead pixels rate of 9.8%. Infrared images of both wavebands have been taken using infrared imaging test by adjusting devices voltage bias.

Key words: InAs/GaSb, superlattice, double-color, focal plane array
PACS: 78.30.Fs

引言

InAs/GaSb II 类超晶格是一种新型的红外探测

材料. InAs/GaSb 材料体系具有特殊的能带排列结构; InAs 材料的禁带宽度小于 InAs/GaSb 的价带偏离, 因此 InAs 的导带底在 GaSb 的价带顶之下, 构成

收稿日期: 2014-12-15, 修回日期: 2015-10-10
基金项目: 国家自然科学基金(61176082, 1290302)

Received date: 2014-12-15, revised date: 2015-10-10

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61176082, 1290302)

作者简介(Biography): 白治中(1984-), 男, 湖南益阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器研究.

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

II 类超晶格. 其电子束缚在 InAs 层中, 而空穴限制在 GaSb 层中. 其有效禁带宽度为电子微带到重空穴子带的能量差. InAs/GaSb II 类超晶格具有以下几个优点: (1) II 类超晶格材料体系的响应波长可覆盖 3-30 μm 的宽广光谱范围; (2) 超晶格材料探测波长的调节是通过改变超晶格材料的层厚来实现的, 十分有利于双色或多色材料的制备. 特别是超晶格红外技术基于 III-V 化合物半导体, 采用分子束外延技术可一次直接生长出完整的双色或多色探测器结构, 十分有利于提高双色或多色探测器的性能; (3) InAs/GaSb II 类超晶格材料的电子有效质量大, 降低了隧穿电流, 可以获得高的探测率. 同时, II 类超晶格可以对垂直入射的光有强烈的吸收, 因此有较高的响应率^[1].

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^[2-6]. 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 $1 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ^[7]. 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^[8]. 此外, 德国的 Fraunhofer 研究所、美国的雷神公司、JPL 实验室和新墨西哥大学在 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^[9-15].

近年来 II 类超晶格双色红外焦平面研究很受重视. 但是由于双色超晶格焦平面的技术难度大, 仅德国弗朗霍夫固态电子研究所和美国西北大学先后研制了双色超晶格焦平面^[16-17]. 弗朗霍夫固态电子研究所 2012 年报道了规模为 288 × 384 的双色超晶格焦平面探测器, “蓝带”(3 ~ 4 μm) 波段噪声等效温差为 9.9 mK, “红带”为 14.3 mK. 2011 年美国西北大学报道了规格为 320 × 256 的长波(13 μm)/长波(9.5 μm) 双色超晶格焦平面, 噪声等效温差在两个波段均为约 20 mK. 2012 年西北大学研制出了规格为 320 × 256 的中长波双色超晶格焦平面, 噪声等效温差分别达到 10 mK (响应截止波长 5 μm) 和 30 mK (响应截止波长 11 μm). 近年来国内在 InAs/GaSb II 类超晶格中长波器件、以及双色红外探测器方面开展了相关的研究, 双色单元器件研究取得了重要的进展^[18-20].

本文报道了 320 × 256 规模的 InAs/GaSb II 类超晶格中波/中波双色红外焦平面探测器. 该器件采用 PN-NP 的叠层双色外延结构, 信号提取采用偏压调节顺序读出工作模式. 双色工作波段分别为 3 ~

4.2 μm (N-on-P) 和 4.2 ~ 5.5 μm (P-on-N). 在 77 K 温度下, N-on-P 器件平均峰值探测率达到 $6.0 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 盲元率为 8.6%, P-on-N 器件平均峰值探测率达到 $2.3 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 盲元率为 9.8%. 并且通过调节器件偏压成功实现了两个工作波段的演示性成像. 据文献查询, 这是我国首次报道超晶格红外双色焦平面器件.

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. 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 PN-NP 叠层双色外延结构, 其中 N-on-P 器件 (蓝带) 的吸收区结构为 7 ML InAs / 7 ML GaSb; P-on-N 器件 (红带) 的吸收区结构为 10 ML InAs / 10 ML GaSb. N 区和 P 区的掺杂浓度均为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 器件材料 MBE 生长过程参见前期工作^[20]. 焦平面规模为 320 × 256, 采用台面结构, 像元中心距为 30 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 SiN_x 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、与响应匹配电路 (ROIC) 倒焊互连后形成基本结构如图 1 所示的双色焦平面探测器件. 最后将器件封装于杜瓦中, 并在 77K 温度下对器件进行光学和电学性能测试.

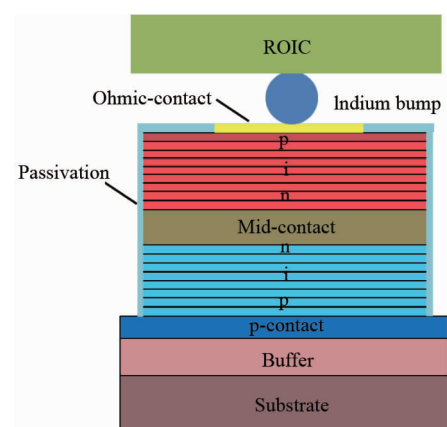


图 1 超晶格双色红外探测器件结构示意图
Fig. 1 Structure of dual-color superlattice infrared detectors.

2 结果与讨论

采用高分辨 X 射线衍射仪测试分析 InAs/GaSb

超晶格双色探测器结构的晶格质量和周期厚度. 图 2 是(004)晶面 X 射线 $\omega/2\theta$ 摇摆曲线图, 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. 从图中可以看出有两组衍射峰, 其中峰强较强且相互间隔较近的一组衍射峰为 10ML InAs/10 ML GaSb 超晶格结构的衍射峰, 而其中峰强较弱且相互间隔较远的一组衍射峰为 7 ML InAs/7 ML GaSb 超晶格结构的衍射峰. 这是由于在进行 XRD 测试的时候 10 ML InAs/10 ML GaSb 结构处于 7 ML InAs/7 ML GaSb 结构的上方, 因此得到的衍射峰强度较大; 且周期厚度较大, 因而其各级衍射峰之间间距也较小. 从图中可以看出各级衍射峰尖锐且半高宽较窄, 其中 10 ML InAs/10 ML GaSb 结构和 7 ML InAs/7 ML GaSb 结构的 -1 级衍射峰的 FWHM 值分别为 0.011° 和 0.009° , 显示了材料的晶格质量完整性. 超晶格 X 射线衍射卫星峰位置满足公式:

$$L = \lambda / (2\Delta\theta \cdot \cos\theta) \quad (1)$$

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 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, 分别为 4.6 nm (7 ML InAs/7 ML GaSb) 和 6.8 nm (10 ML InAs/10 ML GaSb). 超晶格探测器的周期结构与设计相吻合.

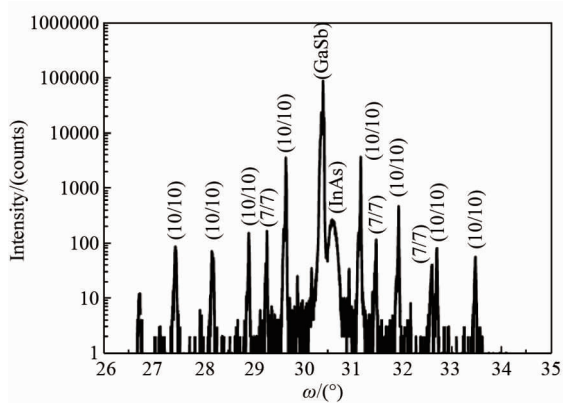


图 2 超晶格 PN-NP 结构双色材料的 X 射线 $\omega/2\theta$ 摇摆曲线

Fig. 2 XRD ω - 2θ scan of InAs/GaSb dual-color superlattice samples

图 3 为 77 K 温度下超晶格红外双色器件的 I - V 和 R - V 曲线图. 从图中可以看出, 当对器件施加反向偏压时, N-on-P 器件处于反向工作状态, 而 P-on-N 器件处于正向导通状态. 暗电流和结阻抗主要呈现 N-on-P 器件的特性. 当反向偏压为 -0.05 V 时, 器

件暗电流为 4.1×10^{-11} A, 器件的零偏结阻抗为 $2 \times 10^{10} \Omega$, 值得注意的是暗电流值并不随着反偏电压的增大而产生较大的变化. 当对器件施加正向偏压时, P-on-N 器件处于反向工作状态, 而 N-on-P 器件处于正向导通状态. 器件的暗电流和结阻抗特性主要呈现 P-on-N 器件的电学特性. 器件暗电流随着偏压的增大提升明显, 从 0.1 V 的 4.1×10^{-11} A 提升到了 0.3 V 的 9.8×10^{-9} A; 同时器件的结阻抗随之下降明显, 从 0.1 V 的 $1.5 \times 10^9 \Omega$ 下降到了 0.3 V 的 $7.5 \times 10^6 \Omega$. 因此, 可以看到超晶格双色器件中, P-on-N 器件的反向电学特性明显不如 N-on-P 器件. 其中的原因有待后续深入的研究. 如何获得高质量的较长波段 P-on-N 器件是获得高性能双色超晶格焦平面器件的一大关键.

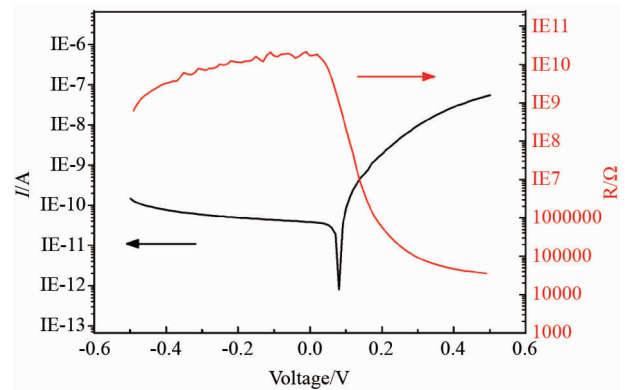


图 3 双色超晶格器件的 I - V 和 R - V 曲线图 (光敏元尺寸为 $27 \mu\text{m} \times 27 \mu\text{m}$)

Fig. 3 The dark current and dynamic resistance-area product as a function of the applied bias. The photodiode had an area of $27 \mu\text{m} \times 27 \mu\text{m}$

器件光谱测试过程中利用前置放大器将偏压加在器件的两端, 通过调节前置放大器中电压的偏置, 来实现器件工作偏压的调节. 本研究双色器件中两个背靠背 PN 结均为反偏工作器件, 通过调节器件整体的工作偏压, 分别实现其中一个器件反偏而同时另一个器件正偏导通, 从而实现器件的双波段探测. 图 4 为双色超晶格器件在不同偏压下的光电流响应谱曲线图. 从图中可以看出, 当器件处于零偏状态时, 器件的光谱 50% 响应截止波长为 $4.2 \mu\text{m}$, 器件在“蓝光”波段工作. 随着偏压的增加光谱变化并不明显. 当偏压提升到 0.06 V 的时, 在 $4.2 \mu\text{m}$ 到 $5.8 \mu\text{m}$ 的“红光”波段出现了少量的响应. 说明 0.06 V 的偏压使得 P-on-N 器件开始反偏工作. 随着偏压的增加, “红光”波段的响应随之增大, 而“蓝光”波段响应随之降低. 当偏压为 0.08 V 时两个波

段的响应强度基本持平;当偏压为 0.1 V 时“红光”波段响应强度开始超过“蓝光”波段;当偏压为 0.12 V 时“红光”波段响应强度进一步增强,此时器件的 50% 响应截止波长为 5.5 μm ,而“蓝光”波段响应强度则进一步降低.从图中可以看出,当“红光”波段器件反向工作时,“蓝光”波段的响应并没有完全消除.经分析由于 N-on-P 器件的吸收区只有 400 周期的超晶格,没有将“蓝光”波段信号全部吸收,双色器件存在部分的光谱串音.当进一步增加偏压达到 0.14 V 时,器件光谱测试开始出现饱和状态.从图中可以看出该器件存在的主要问题是器件的串音现象.首先,由于 N-on-P 器件的吸收区的吸收不充分,导致部分光子穿过短波吸收区而到达长波吸收区,从而产生了串音;其次,两个波段器件的截止波长器件相差较小,两个器件工作波段存在交叠,也给器件带来了部分串音.为此在接下来的工作主要从这两方面抑制串音入手:增加短波吸收区厚度,同时优化双波段器件超晶格结构实现双波段吸收区的分离,从而达到抑制串音的效果.

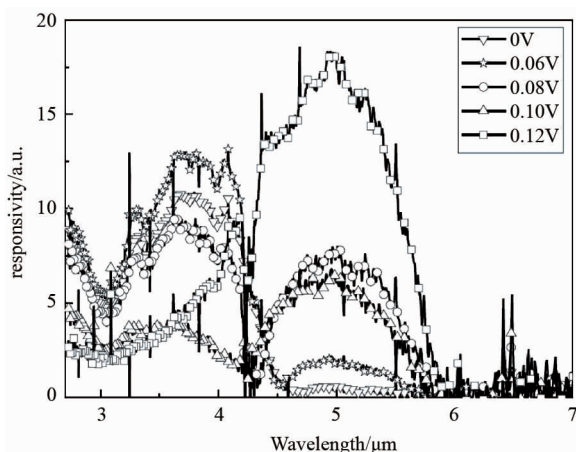


图 4 双色超晶格器件在不同偏压下的光电流响应谱
Fig. 4 The current responsivity spectrum of the dual-color superlattice detectors with different bias

图 5 为双色超晶格焦平面器件双波段成像演示图.图 5 (a) 为 N-on-P 器件在 0 偏压处 3 ~ 4.2 μm 波段的“蓝光”成像,5 (b) P-on-N 器件在 0.1 V 偏压处 4.2 ~ 5.5 μm 波段的“红光”成像.从图中可以清晰地分辨出人脸、手、水杯、头发等图像特征,成像效果较为清晰.其中 N-on-P 器件的平均峰值探测率达到 $6.0 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,盲元率为 8.6%. P-on-N 器件平均峰值探测率达到 $2.3 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,盲元率为 9.8%.在两个波段器件盲元主要为电频盲元,而非死像元,带来这些盲元的主要原因是器

件的响应不均匀性.从器件的成像演示图和焦平面测试数据可知该红外焦平面探测器具有正常的双波段光电性能,具备一定的双色探测能力.同时,由于两个波段器件的截止波长器件相差很小,器件存在一定的串音,因此从焦平面器件成像中难以实现光谱特征的观察.今后的工作将通过材料生长及器件工艺的优化,降低焦平面器件的噪音、光谱串音和盲元率,提高均匀性等性能.

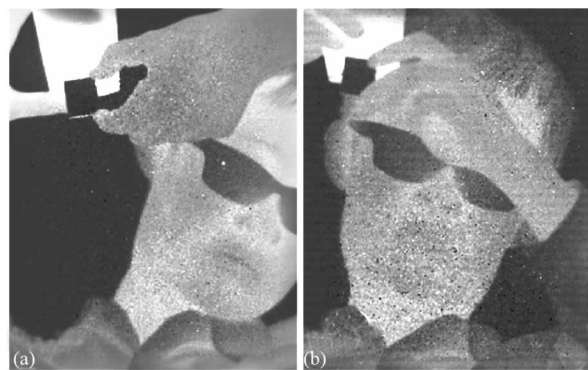


图 5 双色超晶格焦平面器件双波段成像演示图(a)为 N on P 器件“蓝”光波段成像,(b)为 P on N 器件“红”光波段成像
Fig. 5 Infrared images of dual-color mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays (a) shows the “blue” band image, (b) shows the “red” band image

3 结论

报道了基于超晶格结构的叠层双色顺序读出焦平面器件.采用分子束外延技术成功生长出了 PN-NP 结构的超晶格双色焦平面外延材料.双波段红外吸收区的周期结构分别为 7 ML InAs /7 ML GaSb 和 10 ML InAs /10 ML GaSb.通过 ICP 干法刻蚀,CVD 钝化和电子束蒸发等工艺,研制出了像元中心距为 30 μm ,规模为 320 × 256 的红外双色超晶格焦平面阵列.在 77 K 温度下,探测器的响应光谱曲线中可以看到随着偏压的变化器件实现了双色探测功能,50% 截止波长分别为 4.2 μm 和 5.5 μm ;该双色焦平面器件中,N-on-P 器件平均峰值探测率达到 $6.0 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,盲元率为 8.6%,P-on-N 器件的平均峰值探测率达到 $2.3 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,盲元率为 9.8%.焦平面器件在两个工作波段均能正常工作,分别拍摄了较为清晰的双色成像.

致谢

本工作得到了马伟平、杨勇斌、吴廷琪、朱建妹、吴云、何恣、曹菊英、王建新等同志的支持,作者在此表示衷心的感谢.

References

- [1] Rogalski A. Material consideration for third generation infrared photon detectors[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2007, **50**:240 – 252.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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**: 2749 – 2752.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Johnson J L, Samoska L A, Gossard A C, *et al.* Electrical and optical properties of infrared photodiodes using the InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice in heterojunctions with GaSb [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**:1116 – 1127.
- [8] Razeghi M, Wei Y, Bae J, *et al.* Type II InAs/GaSb superlattices for high-performance photodiodes and FPAs[J]. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*, 2003, **5246**:501 – 511.
- [9] 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.
- [10] 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**: 54206 – 54206.
- [11] 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.
- [12] Nguyen B M, Hoffman D, Delaunay P Y, *et al.* Band edge tenability of M-structure for heterojunction design in Sb based type II superlattice photodiodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**: 163502.
- [13] 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**: 183502.
- [14] 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**: 76601T.
- [15] Gunapala S D, Ting D Z, Hill C J, *et al.* Demonstration of 1k × 1k long-wave and mid-wave superlattice infrared focal plane arrays[J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7808**:780802.
- [16] Walther M, Rehm R, Schmitz J, *et al.* InAs/GaSb type II superlattices for advanced 2nd and 3rd generation detectors [J]. OPTO. International Society for Optics and Photonics, 2010: 76081Z – 76081Z – 10.
- [17] Huang E K, Haddadi A, Chen G, *et al.* Type-II superlattice dual-band LWIR imager with M-barrier and Fabry – Perot resonance[J]. *Optics letters*, 2011, **36**(13): 2560 – 2562.
- [18] ZHANG Yan-Hua, MA Wen-Quan, WEI Yang, *et al.* Long wavelength, very long wavelength and narrow-band long-/very-long wavelength two-color type-II InAs/GaSb superlattice photodetectors (in Chinese) [J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*(张艳华,马文全,卫炆,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. 中国科学: 物理学力学 天文学), 2014, **44**(4): 390 – 395.
- [19] Zhang Y H, Ma W Q, Wei Y, *et al.* Narrow-band long-/very-long wavelength two-color type-II InAs/GaSb superlattice photodetector by changing the bias polarity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**(17): 173511.
- [20] XU Qing-Qing, CHEN Jian-Xin, ZHOU Yi, *et al.* Mid-wavelength infrared InAs/GaSb type II superlattice detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*(徐庆庆,陈建新,周易,等. InAs/GaSb II类超晶格中波红外探测器,红外与激光工程), 2012, **41**(1):7 – 9.