

1 280 × 1 024 元 InAs/GaSb II 类超晶格中/中波双色 红外焦平面探测器

白治中*, 黄敏, 徐志成, 周易, 梁钊铭, 姚华城, 陈洪雷, 丁瑞军, 陈建新
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 本文报道 1 280×1 024 元 InAs/GaSb II 类超晶格中/中波双色红外焦平面阵列探测器的研究结果。探测器采用 PN-NP 叠层双色外延结构, 信号提取采用叠层双色结构和顺序读出方式。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中波 1: 6 ML InAs / 7 ML GaSb 和中波 2: 9 ML InAs / 7 ML GaSb。焦平面阵列像元中心距为 12 μm。在 80 K 时测试, 器件双波段的工作谱段为中波 1: 3~4 μm, 中波 2: 3.8~5.2 μm。中波 1 器件平均峰值探测率达到 6.32×10^{11} cmHz^{1/2}W⁻¹, 中波 2 器件平均峰值探测率达到 2.84×10^{11} cmHz^{1/2}W⁻¹。红外焦平面偏压调节成像测试得到清晰的双波段成像。本文是国内首次报道 1 280×1 024 规模 InAs/GaSb II 类超晶格中/中波双色红外焦平面探测器。

关键词: 焦平面; InAs/GaSb; 超晶格; 双色

中图分类号: TN304.2; TN305 **文献标识码:** A

1 280×1 024 dual-color mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays

BAI Zhi-Zhong*, HUANG Ming, XU Zhi-Cheng, ZHOU Yi, LIANG-Zhao Ming, YAO Hua-Cheng,
CHEN Hong-Lei, DING Rui-Jun, CHEN Jian-Xin
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In this paper, we report research results of 1280×1024 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 structures of each absorption region are Mid-Wavelength 1 (MW1): 6 ML (InAs) / 7 ML (GaSb) and Mid-Wavelength 2 (MW2): 9 ML (InAs) / 7 ML (GaSb). The pixel center distance of the detector is 12 μm. At 80 K measurements, the detector has spectral response wavelength of 3-4 μm and 3.8-5.2 μm respectively; The MW1 detector has a peak detectivity of 6.32×10^{11} cmHz^{1/2}W⁻¹; The MW2 detector has a peak detectivity of 2.84×10^{11} cmHz^{1/2}W⁻¹. Infrared images of both wavebands have been taken using infrared imaging test by adjusting the device voltage bias. It's the first time 1280 × 1024 InAs/GaSb Type II superlattice mid-wave length two-color infrared focal plane detector has been reported in China.

Key words: focal plane array, InAs/GaSb, superlattice, dual-color

引言

双色红外探测器可以在单个焦平面上同时获

取两个波段的特征信息, 从而提升红外探测系统在复杂背景中目标探测和识别的能力, 在告警、搜索

收稿日期: 2023-09-26, 修回日期: 2024-04-22

Received date: 2023-09-26, Revised date: 2024-04-22

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)、上海市启明星培育项目扬帆专项(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: Supported by the 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. Email: baizz@mail.sitp.ac.cn

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

和跟踪系统中能明显地降低虚警率,显著地提高红外探测系统性能和集成度^[1-2]。

InAs/GaSb II类超晶格是一种新型的量子结构材料,20世纪70年代初,由L. Esaki和Sakaki首次提出概念^[3]。作为一种红外探测材料,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,十分有利于获得高均匀性的外延材料;(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^[4]。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^[5-9]。

近年来,II类超晶格双色红外焦平面研究很受重视。由于单探测器集成了两个波段吸收区,双色超晶格焦平面的技术难度大,国际上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^[10-11]。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”(4~5 μm)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)。美国海军实验室(HRL)与美国空气动力实验室(JPL)及雷神公司(RVS)合作,报道了高性能的大面阵超晶格中/长波双色探测焦平面,规格达到了1 280×720,中心距12 μm ^[12]。

本文报道了1 280×1024规模的InAs/GaSb II类超晶格中/中波双色红外焦平面探测器的研究进展。该探测器采用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的双色探测工作模式。双色工作波段分别为3~4 μm (中波1)和3.8~5.2 μm (中波2)。在80 K温度下,中波1器件平均峰值探测率达到 $6.32 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$;中波2器件平均峰值探测率达到 $2.84 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。通过调节器件偏压,成功实现了两个工作波段的成像。

1 实验

本文研制的双色焦平面探测器采用背靠背叠

层双色的结构设计。探测器整体结构为PN-NP双P-N结结构,其中N-on-P结为中波1探测器,P-on-N结为中波2探测器。双色探测器的纵向结构设计既考虑中波1探测器和中波2探测器各自的最优化,同时考虑双色结构中两个不同波段探测器的兼容,达到双色探测器总体性能的最优化。图1为InAs/GaSb II类超晶格中/中波超晶格双色探测器纵向结构和能带结构设计图。

从结构上看,双色探测器为两个PN结通过P型倒扣在一起,器件的上下两端均为P型,而中间相连的部分为N型。该结构主要创新点就是中间采用了超晶格层结构作为两个波段器件的过渡层,叠层双色结构中使用过渡超晶格层作为过渡层,能够有效避免双色异质结构能带中的尖峰势垒,保障光生载流子的有效收集,从而保障双色器件的量子效率。对过渡超晶格层结构的掺杂浓度进行精确控制,调整两个通道的工作偏压点,过渡超晶格层还能够有效吸收中波1超晶格未能完全吸收的光子。

本文中双色探测器的工作模式为背入射模式。当宽波段的红外线从背面射入双色焦平面器件后,首先穿过GaSb衬底和GaSb缓冲层到达中波1器件吸收区,在此处红外线中3~4 μm (中波1)的部分被该器件吸收,产生光生载流子;红外线中3.8~5.2 μm (中波2)光子穿透该器件到达中波2器件吸收区,红外线中波2光子被该器件吸收,并同样产生光生载流子,由读出电路读出,从而实现了双色器件的分波段光吸收和载流子的产生。由于一束宽波段红外线既能够产生中波1信号,又能够产生中波2波段信号。探测器通过读出电路给出的不同偏置电压和输出极性的调节来实现两个不同波段器件信号的分别输出。

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,其中中波1超晶格的吸收区结构为6 ML InAs/7 ML GaSb;中波2超晶格的吸收区结构为9 ML InAs/7 ML GaSb。N区和P区的掺杂浓度均为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。焦平面规模为1 280×1 024,采用台面结构,像元中心距为12 μm 。像元与公共电极台面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 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

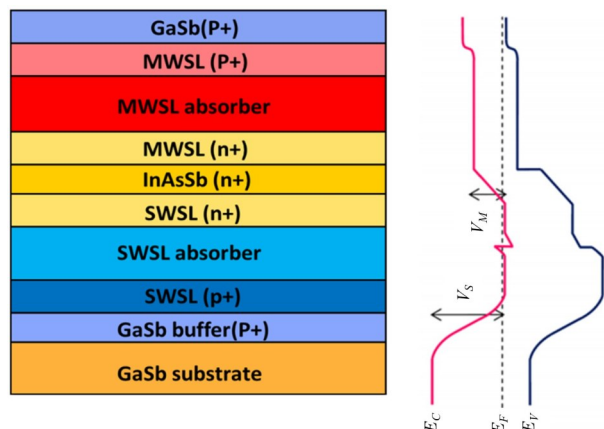


图1 中/中波双色超晶格探测器结构示意图(左)以及其对应的能带结构图(右)

Fig. 1 Structure of dual-color mid-wavelength superlattice infrared detectors (left) and band structure diagram (right)

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、与相应匹配双色读出电路(RO-IC)倒焊互连后,形成双色焦平面探测器。在 80 K 温度下,对探测器进行光学和电学性能测试。

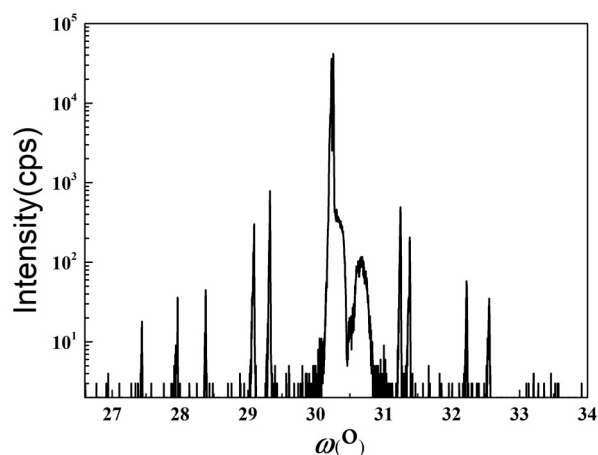


图2 超晶格PN-NP结构双色材料的 X射线 $\omega/2\theta$ 摇摆曲线
Fig. 2 XRD $\omega/2\theta$ scan of InAs/GaSb dual-color superlattice samples

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。中波1的超晶格结构为 6 ML InAs/7 ML GaSb;中波2的超晶格结构为 9 ML InAs/7 ML GaSb。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中波2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

组衍射峰为中波1超晶格结构的衍射峰。这是由于在进行 X 射线衍射测试的时候中波2结构处于中波1结构的上部,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,其中中波1一级半高宽为 29.1 arcsec,中波2一级半高宽为 29.3 arcsec,这显示了材料良好的晶格质量。根据卫星峰位置公式,可以分别计算出两个波段吸收区超晶格材料的周期厚度,分别为 4.47 nm(中波1超晶格)和 5.34 nm(中波2超晶格),超晶格探测器的周期结构与设计相吻合。

图3为双色材料的原子力显微镜(AFM)测试图像,扫描范围为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$,从图中可以看到规则排列的层状结构清晰可见,显示了超晶格双色分子束外延材料良好的表面形貌。对表面粗糙度测试结果显示,中/中波双色外延材料表面粗糙度 R_a 均小于 0.2 nm。

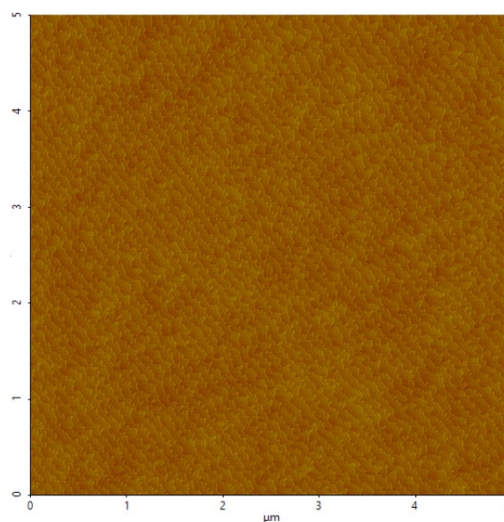


图3 中/中波双色超晶格材料 AFM 测试图像
Fig. 3 AFM test image of dual-color mid-wavelength superlattice infrared detectors

2 结果及分析

2.1 暗电流与光谱

图4为 80 K 温度下,超晶格红外双色探测器像元暗电流和结阻抗特性曲线图。从图中可以看出,探测器暗电流和结阻抗曲线呈现典型的背靠背 PN-NP 的双 P-N 结特性。从图中还可以看出,当探测器处于反向偏置时,中波1的 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,此时中

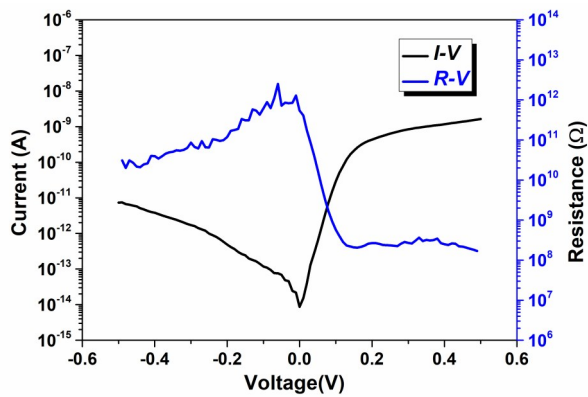


图4 中/中波双色超晶格探测器像元暗电流和结阻抗特性
Fig. 4 The dark current and dynamic resistance-area product as a function of the applied bias

波1探测器工作。反向偏压为 -0.05 V 处器件暗电流为 $6.9\times 10^{-14}\text{ A}$,器件的结阻抗为 $7.2\times 10^{11}\ \Omega$ 。当探测器处于正向偏置时,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,此时中波2探测器工作。正向偏压为 0.15 V 处器件暗电流为 $2.1\times 10^{-10}\text{ A}$,器件的结阻抗为 $2.1\times 10^8\ \Omega$ 。在正偏置的小偏置范围($0\sim 0.15\text{ V}$)器件暗电流随着偏压的增大提升明显。因此,可以看到超晶格双色探测器中,波长较长的P-on-N器件的电学特性较波长较短的N-on-P器件存在差距。主要影响来自于探测器材料的禁带宽以及探测器材料生长先后顺序造成的晶体质量的影响,后续研究工作主要将聚焦于提升P-on-N器件的电学特性。

在 80 K 温度下,通过光栅红外光谱仪测试探测器的光谱响应特性。本文焦平面中像元器件结构为两个背靠背的P-N结,通过调节施加在探测器两端的工作偏置电压,实现两个波段的切换。图5为通过偏压调节实现的器件双波段响应光谱,从图中可以看出,中波1的响应波段为 $3\sim 4\ \mu\text{m}$,中波2的响应波段为 $3.8\sim 5.2\ \mu\text{m}$,实现了探测器的中/中波双波段红外探测功能。由于该双色探测器波长紧密相连,使得两个波段的双色光谱交叠部分难以抑制,后续研究探测器光谱串音还需进一步抑制。

2.2 焦平面测试

本文研究的中/中波双色焦平面探测器通过双色读出电路实现信号提取。两个波段信号方向相反,采用顺序读出的方式实现双波段信号的探测。在 80 K 温度、F数为2条件下,探测器测试结果为中波1平均峰值探测率达到 $6.32\times 10^{11}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$;中

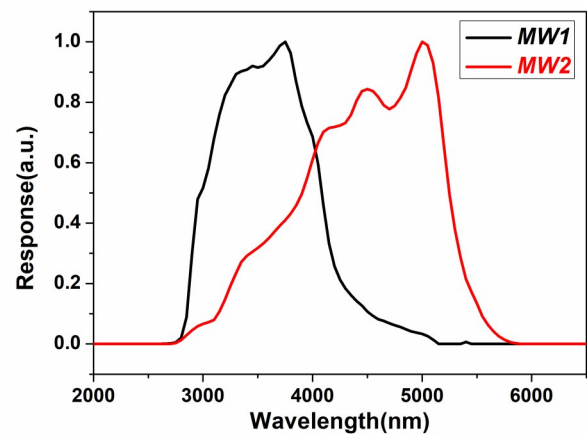


图5 中/中波双色超晶格探测器光谱响应曲线
Fig. 5 Spectral response of dual-color mid-wavelength superlattice infrared detectors

波2平均峰值探测率达到 $2.84\times 10^{11}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。从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,具备双色探测能力。对中/中波超晶格焦平面探测器进行了双波段成像演示,成像图如图6所示。从图中可清晰地分辨出人手、脸、眼镜等,甚至图中人物的头发都一根根清晰可见,显示了 1280×1024 规模 $12\ \mu\text{m}$ 中心距高像素密度高清成像的优点。成像图中人物手持 $4\ \mu\text{m}$ 前截止的滤光片,中波1波段该滤光片透过率低,在该波段成像中显示出不透明的成像特性,位于滤光片后的手指完全不可见;中波2波段该滤光片透过率高,在该波段成像中显示出透明的成像特性,位于滤光片后的手指轮廓清晰可见。说明该探测器具有中波1和中波2两个波段信息探测和波段分辨能力,具备实际应用的能力。

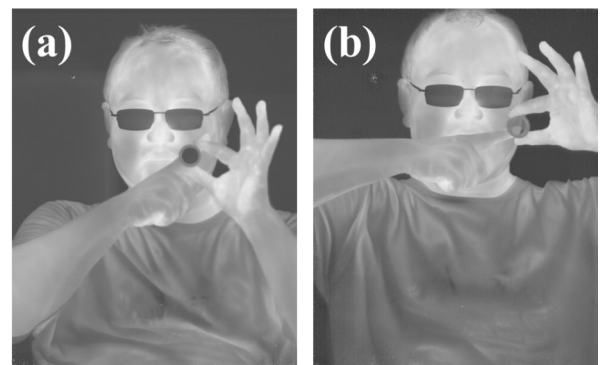


图6 双波段成像演示图:(a)中波1成像图;(b)中波2成像图

Fig. 6 Infrared images of dual-color mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays: (a) the MW1 band image; (b) the MW2 band image

3 结论

本文报道了基于超晶格结构的叠层中/中波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中波 1:6 ML InAs /7 ML GaSb 和中波 2:9 ML InAs /7 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 12 μm 、规模为 1 280 × 1 024 的红外双色超晶格焦平面探测器, 封装金属杜瓦。在 80 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, 中波 1 工作波段为 3~4 μm , 中波 2 工作波段为 3.8~5.2 μm 。该双色焦平面器件中, 中波 1 器件平均峰值探测率达到 $6.32 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$; 中波 2 器件平均峰值探测率达到 $2.84 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。该双色焦平面探测器在两个工作波段均获得了清晰的成像。

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] Yann Reibel, Fabien Chabuel, Cedric Vaz, *et al.* Infrared Dual Banddetectors for next generation[C]. Proc. of SPIE, 2011, **8012**: 801238.
- [2] Weida Hu, Zhenhua Ye, Lei Liao, *et al.* 128×128 long-wavelength/mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultralow spectral cross talk[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**: 5130–5133.
- [3] G. A. Sai-Halasz, R. Tsu, L. Esaki. A new semiconductor superlattice[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(12): 651–653.
- [4] Rogalski A. Material consideration for third generation infrared photon detectors[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2007, **50**: 240–252.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Walther M, Rehm R, Schmitz J, *et al.* InAs/GaSb type II superlattices for advanced 2nd and 3rd generation detectors[C]. OPTO. International Society for Optics and Photonics, 2010: 76081Z–76081Z–10.
- [11] 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.
- [12] PY Delaunay, BZ Nosh, AR Gurga, *et al.* Advances in III-V based dual-band MWIR/LWIR FPAs at HRL[J]. *Proc. of SPIE*, 2017, **10177**: 101770T.