

长/长波双色二类超晶格红外探测器研究

刘铭^{1*}, 游聪娅¹, 李景峰¹, 常发冉², 温涛¹, 李农², 周朋¹, 程雨¹,
王国伟^{2*}

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015;

2. 中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:报道了长/长波双色二类超晶格红外焦平面探测器组件的研制。通过能带结构设计和分子束外延技术, 获得了表面质量良好的长/长波双色超晶格外延材料。突破了长波超晶格低暗电流钝化、低损伤干法刻蚀等关键技术, 制备出像元中心距 30 μm 的 320 \times 256 长/长波双色 InAs/GaSb 超晶格焦平面探测器芯片。将芯片与双色读出电路互连, 采用杜瓦封装, 与制冷机耦合形成探测器组件。组件双波段 50% 后截止波长分别为 7.7 μm (波段 1) 和 10.0 μm (波段 2)。波段 1 平均峰值探测率达到 $8.21 \times 10^{10} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$, NETD 实现 28.8 mK; 波段 2 平均峰值探测率达到 $6.15 \times 10^{10} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$, NETD 为 37.8 mK, 获得了清晰的成像效果, 实现长/长波双色探测。

关键词: 二类超晶格; 长/长波; 双色; 焦平面阵列

中图分类号: TN214

文献标识码: A

Research on InAs/GaSb type-II superlattice dual-band long-/long-wavelength infrared photodetector

LIU Ming^{1*}, YOU Cong-Ya¹, LI Jing-Feng¹, CHANG Fa-Ran², WEN Tao¹, LI Nong², ZHOU Peng¹,
CHENG Yu¹, WANG Guo-Wei^{2*}

(1. North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China;

2. The State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China)

Abstract: The development of type II superlattice dual-band long-/long-wavelength infrared focal plane photodetector is reported. Through the design of energy band structure and molecular beam epitaxial technology, dual-band long-/long-wavelength superlattice epitaxial material with good surface quality has been obtained. The 320 \times 256 dual-band long-/long-wavelength InAs/GaSb superlattice focal plane photodetector with pixel center distance of 30 μm was prepared by breaking through the key technologies of low dark current passivation and low damage dry etching. The detector chip is interconnected with a dual color readout circuit, packaged in a Dewar package, and coupled to a refrigerator to form a detector assembly. The dual-band 50% cut-off wavelengths of the photodetector are 7.7 μm (band 1) and 10.0 μm (band 2), respectively. The average peak detectivity of band 1 reached $8.21 \times 10^{10} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$, and NETD achieved 28.8 mK. The average peak detectivity of band 2 reached $6.15 \times 10^{10} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$, and the NETD was 37.8 mK. Clear imaging of both colors has been achieved, demonstrating the realization of long-/long-wavelength dual-band photodetection.

Key words: type-II superlattice, long-/long-wavelength, dual-band, focal plane array

引言

双色红外探测器可以同时获取目标和环境在

两个波段的辐射特征, 从而有效抑制复杂的背景噪声, 实现不受环境制约的红外探测, 提升目标的探测效果, 在预警、搜索和跟踪系统中能明显地降低

收稿日期: 2023-03-22, 修回日期: 2023-06-13

Received date: 2023-03-22, Revised date: 2023-06-13

Foundation item: Supported by the Equipment Model Development Project.

作者简介 (Biography): 刘铭 (1985-), 男, 江西吉安人, 研究员, 主要研究领域为红外探测材料与器件。E-mail: kaka_851001@163.com

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: kaka_851001@163.com; wangguowei@semi.ac.cn

虚警率,显著地提高系统性能^[1]。目前双色红外探测器的研究主要包括短/中波、中/中波、中/长波和长/长波等^[2-6]。

近年来长/长波双色红外探测器应用研究上取得了较大的发展,采用的材料主要为二类超晶格与碲镉汞。2011年,美国西北大学报道了第一个 320×256 InAs/GaSb II类超晶格长/长波双色探测器,截止波长分别为 $9.5 \mu\text{m}$ 和 $13 \mu\text{m}$,噪声等效温差在两个波段均为约 20 mK 。进一步扩大面阵规格^[7],2012年西北大学报道了面阵规格为 640×512 的长/长双色焦平面探测器,像元间距为 $30 \mu\text{m}$,在 81 K 下测得蓝色和红色通道的 $NETD$ 分别为 15 mK 和 20 mK ^[8]。美国Raytheon公司的长/长波碲镉汞红外探测器阵列规模达到 512×512 ,截止波长分别为 $7.0 \sim 8.5 \mu\text{m}$ 以及 $10.0 \sim 11.5 \mu\text{m}$,其 70 K 下暗电流密度与液相外延单色长波碲镉汞探测器相当(10^{-6} A/cm^2 量级)^[9]。2019年,中科院半导体所报道了nipin型叠层长/长波双色单元红外探测器^[10]。当前国内尚无超晶格长/长双色红外焦平面探测器的相关报道和应用。

与碲镉汞相比,锑基II类超晶格具有暗电流低、工艺稳定性高、材料缺陷少等优点,尤其是在长波和甚长波波长的应用,超晶格展现出了更大的优势^[11-14]。本文开展了InAs/GaSb II类超晶格长/长波双色红外焦平面探测器结构设计、材料生长、探测器制备等研究,制备了像元中心距 $30 \mu\text{m}$ 的 320×256 长/长波双色超晶格红外探测器组件,通过偏压对工作波段进行选择。双波段后截止波长分别为 $7.7 \mu\text{m}$ (波段1)和 $10.0 \mu\text{m}$ (波段2)。波段1平均峰

值探测率达到 $8.21 \times 10^{10} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$, $NETD$ 实现 28.8 mK ;波段2平均峰值探测率达到 $6.15 \times 10^{10} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$, $NETD$ 为 37.8 mK ,并耦合光学系统实现了成像演示。

1 实验

1.1 器件结构设计

为抑制器件的暗电流和双波段间的光谱串音,本文基于 $\text{NM}\pi\text{P}-\text{P}\pi\text{MN}$ 结构,在两通道间插入 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Sb}$ 势垒阻挡电子反向移动,移除两个p型接触区,组成“ $\text{NM}\pi\text{B}\pi\text{MN}$ ”器件结构,通过改变势垒区的掺杂浓度调整两个通道的饱和偏压和光谱串音,器件结构及能带如图1所示。

1.2 材料生长与质量表征

文中使用材料采用分子束外延技术进行制备,针对长/长波双色超晶格材料生长温度窗口窄、中间势垒区与超晶格区生长温度相差大(约 $75 \text{ }^\circ\text{C}$)、长波吸收区InSb层厚度大使应力大的问题,本文通过调节材料的V族III族束流比、衬底温度、III族元素的源炉温度、快门开关顺序来保证材料符合器件制备标准。通过能带模拟,设计出短长波和长长波吸收区分别为 $10.5 \text{ ML InAs}/7 \text{ ML GaSb}$ 和 $14 \text{ ML InAs}/7 \text{ ML GaSb}$ 。根据已有经验,长波超晶格吸收区需要更多的InSb平衡应力,太多的InSb界面导致外延难度增大。在GaSb衬底上要实现共格生长, 1 ML 的InAs需要 0.1 ML 的InSb平衡张应力,因此短长波吸收区和长长波吸收区各需要 1.05 ML 和 1.4 ML 的InSb平衡应力。考虑到界面处存在的部分GaAs,实际需要的InSb厚度要更多,太多的InSb可能会导致

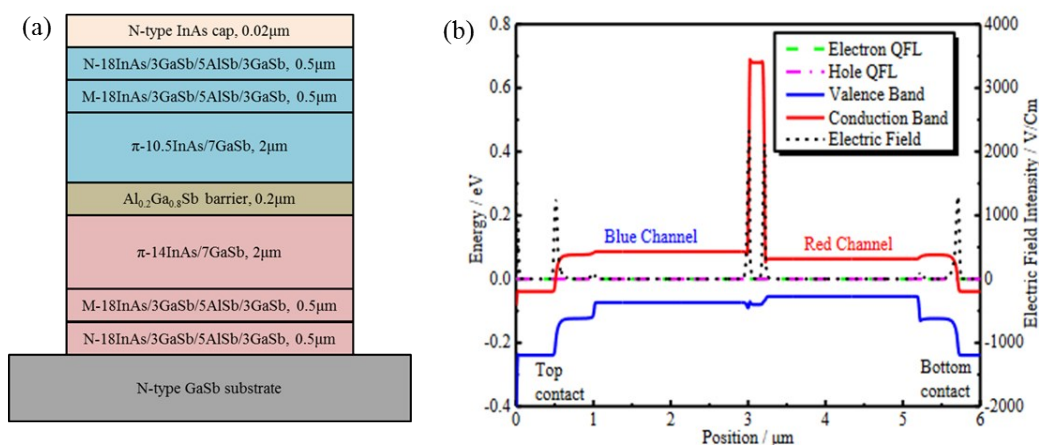


图1 长/长波双色器件结构及能带图

Fig. 1 Schematic of long-/long-wavelength dual-band photodetector architecture and corresponding energy band structure

应力释放,破坏晶格结构。10.5 ML InAs/7 ML GaSb 需要 1.05 ML InSb 平衡应力,在 InAs on GaSb 界面处更容易形成 InSb 界面。因此在 InAs on GaSb 界面处生长 0.52 ML InSb,在 GaSb on InAs 界面处生长 0.53 ML InSb。14 ML InAs/7 ML GaSb 需要 1.4 ML InSb 平衡应力,如果采用 InSb 双界面,两边的 InSb 厚度为 0.7 mL,这个数值接近晶格弛豫的临界值,因此采用三界生长方式,在 InAs on GaSb 界面和 GaSb on InAs 界面处各生长 0.45 ML InSb,并在 GaSb 层中间位置插入 0.5 ML InSb。界面生长顺序如图 2 所示。

为了表征材料质量,将外延的长/长波双色超晶格材料进行光学显微镜、原子力显微镜(AFM)、X 射线衍射仪测试(XRD),表征材料表面形貌和晶格完

整性。在外延样品选取多个点位进行测试。对表面缺陷数量进行统计,视场长度和宽度分别为 $344 \mu\text{m}$ 和 $245 \mu\text{m}$,视场面积为 0.08428 cm^2 。材料表面缺陷密度小于 120 cm^{-2} 。

图 4 为超晶格双色材料的 AFM 测试图像,扫描范围为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,结果显示材料表面粗糙度 R_a 均小于 0.2 nm ,表面起伏较小,证明了超晶格具有良好的表面质量。

图 5 为材料 X 射线衍射仪的测试图谱,材料有多级卫星峰,不同点位卫星峰的位置高度重合,吸收区一级卫星峰半峰宽均小于 30 arcsec ,应力均在 200 arcsec 以内,表明超晶格材料具有良好的生长周期和晶格质量。

根据材料设计,短长波吸收区设计厚度为

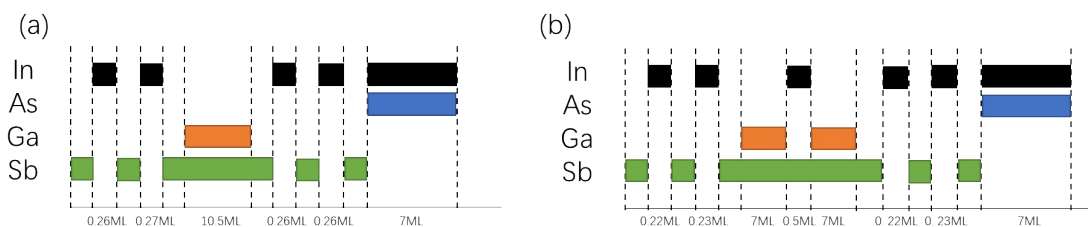


图 2 (a)10.5 ML InAs/7 ML GaSb 界面生长顺序,(b)14 ML InAs/7 ML GaSb 界面生长顺序

Fig. 2 (a) Growth sequence of 10.5 ML InAs/7 ML GaSb interface, (b) growth sequence of 14 ML InAs/7 ML GaSb interface

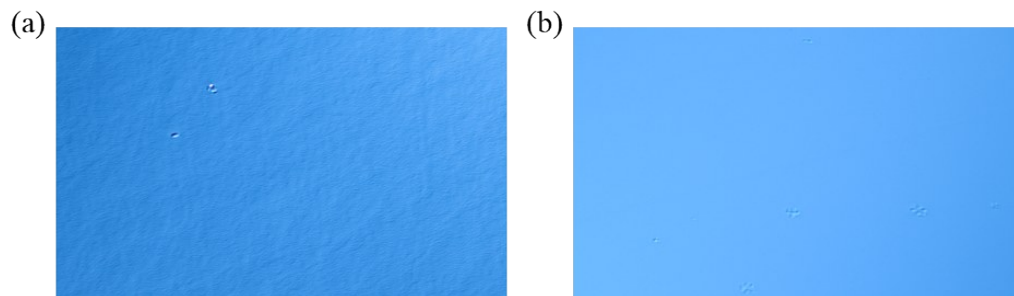


图 3 长/长波双色超晶格材料表面形貌(a)样品#1,(b)样品#2

Fig. 3 Surface morphology of long-/long-wavelength dual-band superlattice materials (a) sample #1 and (b) sample #2

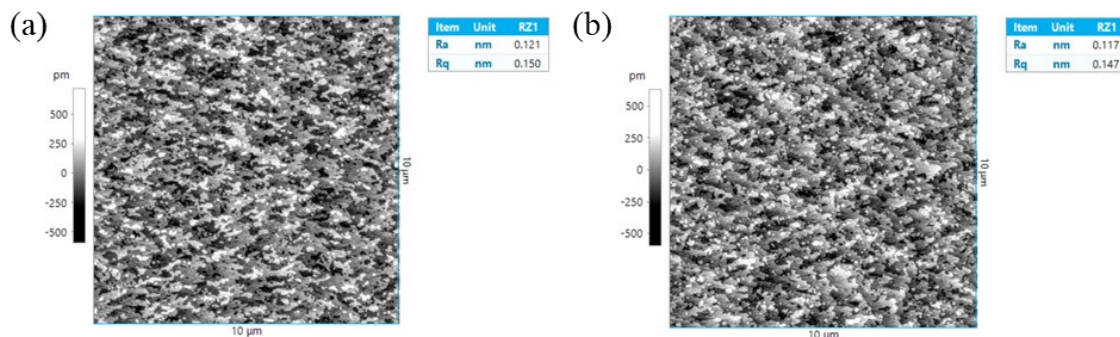


图 4 长/长波双色超晶格材料 AFM 测试图像(a)样品#1,(b)样品#2

Fig. 4 AFM image of long-/long-wavelength dual-band superlattice materials (a) sample #1 and (b) sample #2

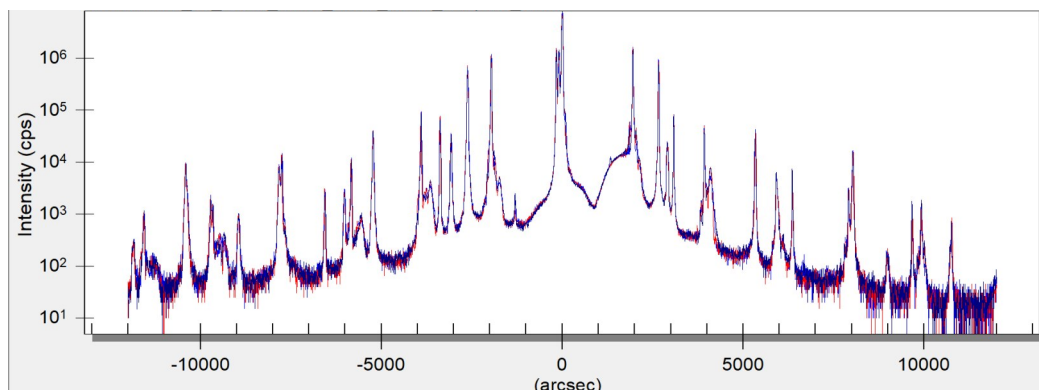


图5 长/长波双色超晶格材料XRD测试图谱

Fig. 5 XRD image of long-/long-wavelength dual-band superlattice

56.5395 Å; 长长波吸收区的设计厚度为 68.2741 Å; M 层(18 ML InAs /3 ML GaSb/5 ML AlSb/3 ML GaSb) 的设计厚度为 92.0481 Å。

设计吻合度的计算方法为周期厚度/设计厚度, 得到 M 层、长长波、短长波的设计吻合度分别为 99.29%、99.44% 和 97.37%。数据拟合结果和详细卫星峰参数如表 1 所示。

通过以上对外延的长/长波双色超晶格材料的表面形貌、粗糙度和 XRD 表征, 结果均验证了所生长的超晶格材料具备较好的晶体质量, 可以满足制备焦平面阵列的需求。

1.3 器件制备与性能测试

本文制备的焦平面探测器芯片阵列规格为 320×256, 像元中心距为 30 μm×30 μm。芯片的制备工艺流程包括: 通过光刻和 ICP 干法刻蚀形成台面结构, 使像素间产生隔离。采用 PECVD 等离子体化学气相沉积在台面结的表侧壁覆盖 SiO_xN_y/SiO₂ 钝化层。经过刻蚀工艺开出电极接触通孔, 通过光刻与电子束蒸发制备 Ti/Pt/Au 金属电极。将制备得的芯片与专用双色读出电路通过钢柱倒装互连, 形成混成芯片。再通过低应力底部填充与背减薄技术, 减薄衬底, 完成长/长波双色超晶格红外探测器芯片的制备, 芯片实物和焦平面像元阵列如图 6 所示。

将完成上述工艺的 320×256(30 μm)长/长波双

色超晶格红外探测器芯片进行微杜瓦封装, 冷屏 F 数为 2, 制冷至约 70 K。将 20 °C 黑体和 35 °C 黑体先后对准测试窗口, 通过焦平面测试系统采集全面阵各像元的响应信号。设置积分时间和调节偏置, 计算出探测器的性能参数, 包括探测率、盲元率、响应非均匀性等。

2 结果及分析

2.1 电学特性

采用低温探针台系统(Agilent B1500A)对 InAs/GaSb 超晶格长/长波双色探测器芯片的电学特性进行测试。光敏元面积为 30 μm×30 μm, 测试温度为 77 K。测试得随偏压变化的长/长波双色器件电流密度-电压($J-V$)曲线, 并通过计算得出阻抗面积乘积-电压($RA-V$)曲线如图 7 所示。从该图可以看出, 偏压为 -150 mV 时, 短长波二极管暗电流密度为 8.2×10^{-4} A/cm², 差分电阻和面积乘积 RA 值为 $7.4 \times 10^4 \Omega \text{cm}^2$ 。偏压为 50 mV 时, 长长波二极管暗电流密度为 1.2×10^{-3} A/cm², RA 值为 $70.3 \Omega \text{cm}^2$ 。

2.2 光谱响应

在 70 K 下通过傅里叶红外光谱仪(VERTEX 70)与高温黑体测试探测器的光谱响应特性。本文像元器件结构为两个背靠背的 PN 结, 通过调节整体工作偏压, 实现双波段的探测。偏压调节下焦平面器件的长波相对双色响应光谱如图 7 所示, 其中

表 1 长长波材料的 XRD 峰位、周期厚度及设计吻合度

Table 1 The XRD peaks, periodic thicknesses and design match of superlattice

峰位	-2级峰	-1级峰	1级峰	2级峰	平均值	周期厚度	设计厚度	吻合度
M结构	-4020	-2025	2005	4035	2015	91.3902	92.0481	0.9929
长长波	-5375	-2690	2735	5485	2712.5	67.8899	68.2741	0.9944
短长波	-6795	-3500	3190	6585	3345	55.0527	56.5395	0.9737

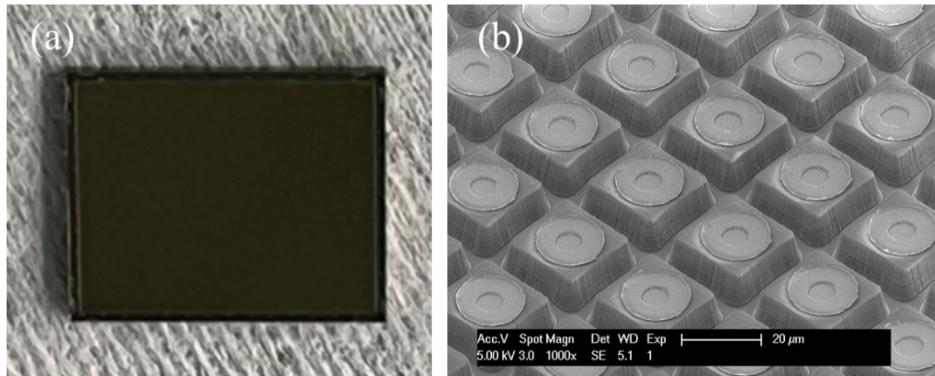


图6 (a)320×256(30 μm)长/长波双色超晶格探测器混成芯片照片,(b)焦平面像元阵列SEM照片

Fig. 6 (a)Microscopic image of 320×256 (30μm) long-/long-wavelength dual-band superlattice photodetector, and (b) scanning electron micrograph of focal pixel array.

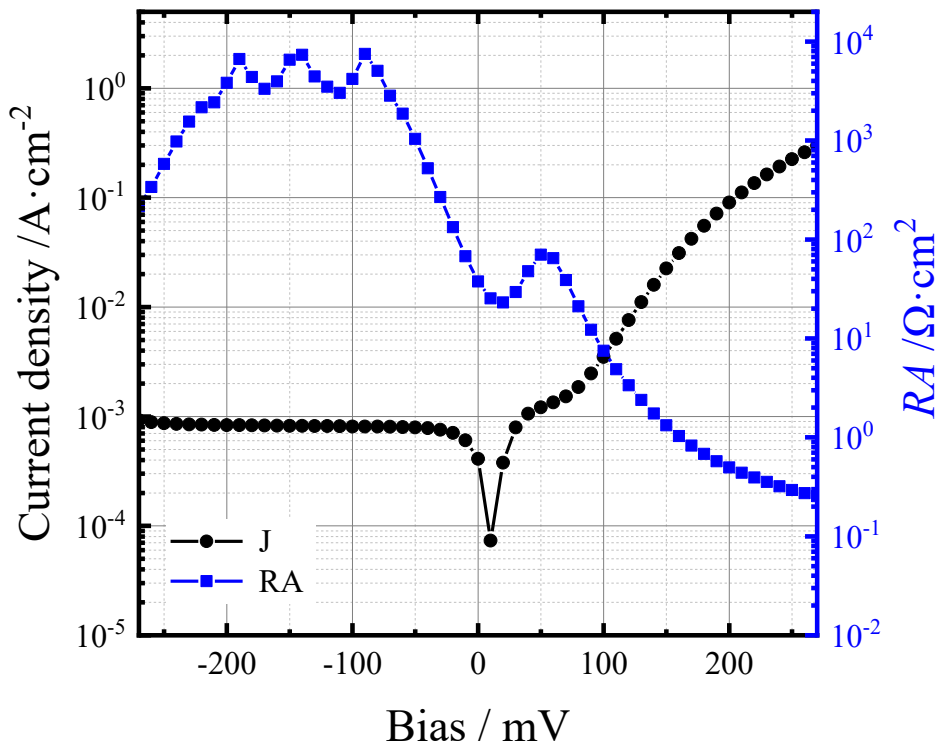


图7 J - V 和 RA - V 特性曲线

Fig. 7 Characterization of J - V and RA - V curves

波段1的50%后截止波长约为 $7.7 \mu\text{m}$,波段2的后截止波长约为 $10.0 \mu\text{m}$,体现了组件的长/长波双色红外探测功能。根据相对光谱串音的定义,计算得出短长波向长长波的串音为11.8%,长长波向短长波的串音为35.0%。长长波在短长波波段存在较大相对光谱串音,主要来源于较薄的短长波吸收层,未被吸收的光子辐射至长长波吸收层,被吸收后产生光谱串音。后续应进一步增加短长波波段的吸收区厚度,或在双色通道间引入反射光栅,减少辐射至长长波通道的短长波光子数量。

2.2 成像演示

将焦平面器件封装入微杜瓦,形成制冷型红外探测器组件。长/长波超晶格焦平面探测器组件的双波段成像效果如图9所示。从图中可清晰的分辨出人脸、口罩、帽檐等图像特征,成像效果清晰。组件通过双色读出电路实现信号提取,双波段图像信号反向。组件测试结果为短长波的平均峰值探测率达到 $8.21 \times 10^{10} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$, $NETD$ 实现28.8 mK,盲元率为4.17%;长长波的平均峰值探测率达到 $6.15 \times 10^{10} \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$, $NETD$ 为37.8 mK,盲元率为

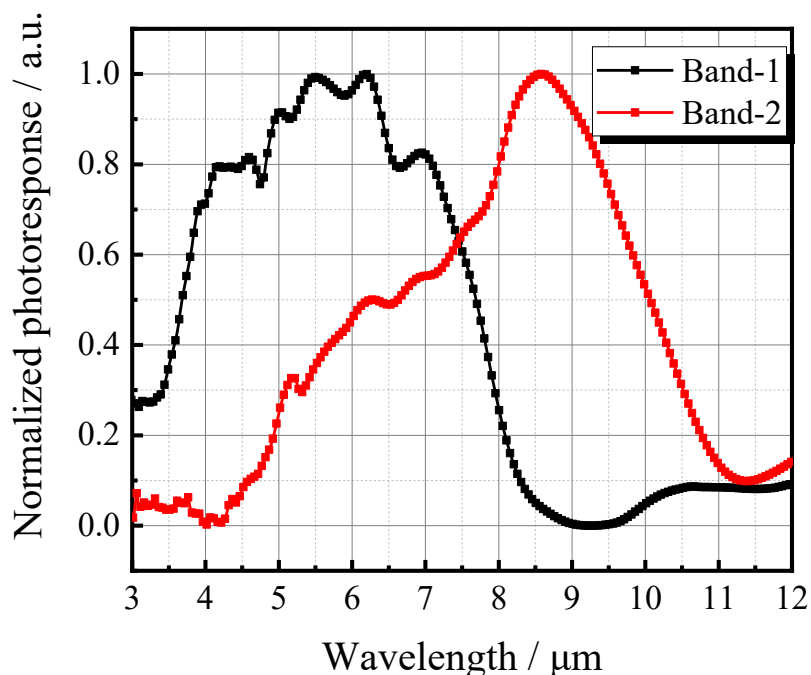


图8 长/长波双色超晶格探测器光谱响应曲线

Fig. 8 Spectral response of superlattice dual-band long-/long-wavelength infrared photodetector

4.95%;证明了器件具有双波段探测信息分辨能力。

3 结论

本文报道了基于双色叠层超晶格材料的长/长波双色焦平面探测器。通过分子束外延技术成功制备了NPN叠层结构的双色超晶格材料,并由材料表征验证了超晶格晶体质量。采用光刻、ICP干法刻蚀、PECVD钝化等工艺,实现了 320×256 规格、 $30 \mu\text{m}$ 像元中心距的长/长波双色超晶格焦平面探测器芯片制备。通过与长/长波双色读出电路倒装互连、杜瓦封装、耦合分体式制冷机后,形成长/长波双色

超晶格红外焦平面组件。在70 K下,通过响应光谱测试,验证了探测器的长/长波双色探测功能。组件性能测试得到,该双色超晶格焦平面探测器的双波段截止波长分别为 $7.7 \mu\text{m}$ 和 $10.0 \mu\text{m}$,NETD分别为28.8 mK和37.8 mK,并实现了清晰的成像演示,为后续长/长波双色超晶格焦平面探测器迈向工程化奠定了基础。

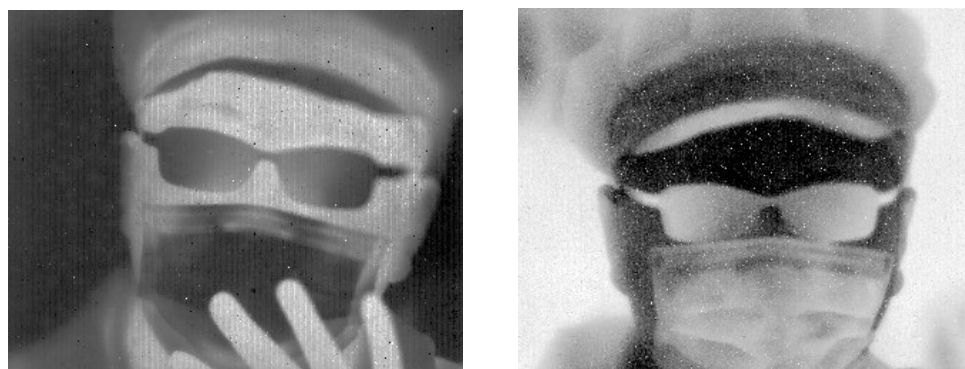


图9 双波段成像演示图(a)波段1成像图,(b)波段2成像图

Fig.9 Infrared imagings of dual-band FPA (a) Band-1 channel imaging (b)Band-2 channel imaging

Reference

- [1] YANN R, FABIEN C, CEDRIC V, *et al.* Infrared Dual Banddetectors for next generation [C]//Proc. of SPIE, 2011, **8012**: 801238.
- [2] REHM R, WALTHER M, RUTZ F, *et al.* Dual-color InAs/GaSb superlattice focal-plane array technology[J]. *J. Electron. Mater.*, 2011, **40**(8): 1738-1743.
- [3] REHM R, WALTHER M, SCHMITZ J, *et al.* Dual-colour thermal imaging with InAs/GaSb superlattices in mid-wavelength infrared spectral range[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(10): 577-578.
- [4] EDWARD S, LE P, GREGORY V, *et al.* Two-Color HgCdTe Infrared Staring Focal Plane Arrays [C]// Proc. of SPIE, 2003, **5209**: 160485.
- [5] BAI Zhi-Zhong, XU Zhi-Cheng, ZHOU Yi, *et al.* 320×256 dual-color mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (白治中, 徐志成, 周易, 等. 320×256 元 InAs/GaSb II 类超晶格中波红外双色焦平面探测器. 红外与毫米波学报), 2015, **34**(6): 716-720.
- [6] HOANG A M, CHEN G, HADDADI A, *et al.* Demonstration of high performance bias-selectable dual-band short-/midwavelength infrared photodetectors based on type-II InAs/GaSb/AlSb superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **102**: 011108.
- [7] EDWARD K H, ABBAS H, CHEN Guan-Xi, *et al.* Type-II superlattice dual-band LWIR imager with M-barrier and Fabry - Perot resonance [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(13): 2560-2562.
- [8] EDWARD K H, MANIJEH R. World's first demonstration of type-II superlattice dual band 640x512 LWIR focal plane array [C]// Proc. of SPIE, 2012, **8268**: 8268Z.
- [9] SMITH E P G, VENZOR G M, GALLAGHER A M, *et al.* Large format HgCdTe focal plane arrays for dual-band long-wavelength infrared detection [J]. *J. Electron. Mater.*, 2011, **40**(8): 1630-1636.
- [10] JIANG Zhi, SUN Yao-Yao, GUO Chun-Yan, *et al.* High quantum efficiency long-/long-wave dual-color type-II InAs/GaSb infrared detector [J]. *Chinese Phys. B*, 2019, **28**(3): 038504.
- [11] DOMINIC K, MANOJ K, EZEKIEL A, *et al.* Recent trends in 8-14 μm type-II superlattice infrared detectors [J]. *Infrared Phys. Tech.*, 2021, **116**: 103756.
- [12] KOPYTKO M., ROGALSKI A. Performance Evaluation of Type-II Superlattice Devices Relative to HgCdTe Photodiodes [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2022, **69**(6): 2992-3002.
- [13] RHIGER D R. Performance Comparison of Long-Wavelength Infrared Type II Superlattice Devices with HgCdTe [J]. *J. Electron. Mater.*, 2011, **40**(8): 1815-1822.
- [14] HÖGLUND L, RODRIGUEZ J B, NAUREEN S, *et al.* Very long wavelength type-II InAs/GaSb superlattice infrared detectors [C]//Proc. of SPIE, 2018, 10624.