

InAs/InAsSb 超晶格红外中/中波双色焦平面探测器研制

何英杰^{1,2,3*}, 彭震宇^{1,2,3}, 曹先存^{1,2,3}, 朱旭波^{1,2,3}, 李墨^{1,2,3}, 陶飞^{1,3},
丁嘉欣^{1,3}, 姚官生^{1,2,3}, 张利学^{1,2,3}, 王雯^{1,3}, 吕衍秋^{1,2,3}

- (1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471099;
2. 红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471099;
3. 河南省锑化物红外探测器工程技术研究中心, 河南 洛阳 471099)

摘要:超晶格材料已经成为了第三代红外焦平面探测器的优选材料。双波段红外探测器能够通过对比两个波段内的光谱信息差异,对复杂的背景进行抑制,提高探测效果,在需求中尤为重要。本文开展了 InAs/InAsSb 超晶格中/中双色焦平面探测器设计及制备技术研究,从器件设计、材料外延、芯片加工等方面展开研究,制备了中心距 30 μm 的 320 \times 256 InAs/InAsSb 二类超晶格中/中波双色焦平面探测器。器件短中波峰值探测率达到 $7.2\times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 中波峰值探测率为 $6.7\times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 短中波有效像元率为 99.51%, 中波为 99.13%, 获得了高质量的成像效果, 实现中中双色探测。

关键词:InAs/InAsSb; 双色中/中波; 焦平面; 红外探测器
中图分类号:TJ765 **文献标识码:**A

Dual-color mid- mid-wavelength infrared InAs / InAsSb superlattice focal plane arrays

HE Ying-Jie^{1,2,3*}, PENG Zhen-Yu^{1,2,3}, CAO Xian-Cun^{1,2,3}, ZHU Xu-Bo^{1,2,3}, LI Mo^{1,2,3}, TAO Fei^{1,2,3},
DING Jia-Xing^{1,3}, YAO Guan-Sheng^{1,3}, ZHANG Li-Xue^{1,2,3}, WANG Wei^{1,3}, LYU Yan-Qiu^{1,2,3}

- (1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471099, China;
2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang 471099, China;
3. Research Center of Henan Antimonide Infrared Detector Engineering Technology, Luoyang 471099, China)

Abstract: Superlattice materials have become the preferred materials for the third-generation infrared focal plane detectors. The dual-band infrared detector can suppress the complex background and improve the detection effect by comparing the spectral information difference in the two bands, which is particularly important in demand. In this paper, it reports research results of 320 \times 256 dual-color mid-mid-wavelength infrared InAs /InAsSb superlattice focal plane arrays. The detector structure is NBN epitaxial multilayer and the signal is read out by sequential mode. The pixel center distance from the detector is 30 μm . At 77 K measurement, the SMW detector has a peak detectivity of $7.2\times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ and dead pixels rate of 0.49%. The MW detector has a peak detectivity of $6.7\times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ and dead pixels rate of 0.87%. Infrared images of both wavebands have been taken well-infrared imaging test by adjusting devices voltage bias.

Key words: InAs/InAsSb, dual-color mid- mid-wavelength, focal plane arrays, infrared detector

引言

双波段红外探测器能够通过对比两个波段内的光谱信息差异,对复杂的背景进行抑制,提高探

测效果,这对鉴别军事目标、跟踪快速移动的目标和预警等应用尤为重要。空中目标,其光谱辐射能量主要集中于中波红外段。中波红外波段具有探

收稿日期:2021-10-08,修回日期:2022-03-02
基金项目:航空科学基金项目(20200024012002)

Foundation items: Supported by the Aero Science Foundation(20200024012002).

作者简介(Biography):何英杰(1979—),女,河南南阳人,高级工程师,硕士,主要从事红外探测器用薄膜材料和器件制备方面的研究. Email: heyj211@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: heyj211@163.com

Received date: 2021-10-08, **Revised date:** 2022-03-02

测距离远、对比度较高等优点,利于分辨目标热辐射差异。双中波段对于背景和存在明显对比度差异,可提高目标探测和识别能力,显著降低虚警率,具有重要的应用价值。在红外双色中/中波探测器研究中,美国、德国、以色列等国家一直处于世界领先地位^[1-4]。2006年,德国弗朗霍费固态电子研究所报道了规模为 288×384 的中/中波双色超晶格焦平面器件,该器件蓝色通道的NETD达到了 29.5 mK ,而红色通道则达到了 16.5 mK ^[5];2011年,该研究所对器件结构和生长工艺进行了优化,蓝色通道和红色通道的NETD性能分别提高到 17.9 mK 和 9.9 mK ^[6]。法国的Lynred(原SOFRADIR)公司于2011年开发出 640×512 中/中波双色焦平面探测器,像元中心距 $24\text{ }\mu\text{m}$,并计划进一步将像元减小至 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。该探测器的蓝色通道能够观察到 10 km 以外的直升机以及 100 km 以外的富士山^[7]。2015年,中国科学院上海技术物理研究所InAs/GaSb II类超晶格红外双色焦平面阵列探测器的结果,得到清晰的双波段热成像^[8]。2017年,中国科学院半导体研究所报道了niBin结构的双色InAs/GaSb和中波InAs/GaSb II类超晶格探测器^[9-10]。铋化物II类超晶格是一种新型窄禁带半导体材料,主要指的是以InAs/GaSb II类超晶格材料为代表的红外探测器,通过改变InAs层和GaSb层的厚度比例能够实现从短波红外到甚长波的波段调节,具备暗电流低、稳定性高、工艺重复性好、制备成本低和可实现叠层多波段光谱响应的优点,被认为是第三代红外探测器的主要材料之一^[11-12]。随着材料设计及外延技术的进步,InAs/InAsSb材料在减小材料缺陷,降低暗电流等方面逐渐显示出独特的特性^[13-16]。本文开展了InAs/InAsSb超晶格中/中双色焦平面探测器设计及制备技术研究,从器件设计、材料外延、芯片加工等方面展开研究,制备了中心距 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的 320×256 InAs/InAsSb II类超晶格中/中波双色焦平面探测器。短中波峰值探测率达到 $7.2\times 10^{11}\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,中波峰值探测率为 $6.7\times 10^{11}\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,并对人脸进行了高质量的成像。

1 双色器件结构设计

中/中波超晶格双色焦平面探测器的功能是将接收到的中/中波红外辐射图像分别转换成电信号,并对阵列信号进行处理和读出。在红外探测系统中完成红外信号光电转换功能。探测器的光谱响应范围通常由光敏芯片和滤光片的特性决定。在

叠层双色探测器中,中/中波的分离由光敏芯片完成,中波响应层位于短中波响应层之后,接受短中波辐射被吸收后剩余的中波辐射。本文选用的两个红外中波波段为蓝色通道 $3\sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 和红色通道 $4\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 。

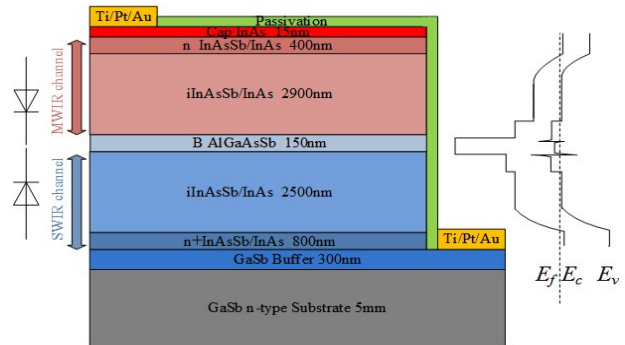


图1 InAs/InAsSb中/中双色超晶格材料能带结构图

Fig. 1 The schematics of InAs/InAsSb Mid-/Mid-wave two-color superlattice energy band material structure

超晶格的能带结构理论计算主要通过经验紧缚理论和kp微扰理论,建立InAs/InAsSb超晶格的能带结构近似模型,计算超晶格的能带结构,电学和光学性能,从而指导实际探测器的设计。根据理论计算经验,文中设计InAs/InAsSb niBin II类超晶格材料结构如图1所示,短中和中波吸收层采用不同周期的InAs和InAsSb层,从而实现相应响应波长和其他性能,利用异质结材料能带差主要落在导带的特点,用宽禁带隔离层构成的势垒 ΔE_c 来阻止多数电子的传输,同时减小了产生-复合电流,降低器件的暗电流^[12],通过正反向电压来选取两个通道。

文中使用材料采用分子束外延设备生长外延薄膜,采用III-V族化合物半导体制备工艺,通过光刻、刻蚀、钝化等制备 320×256 焦平面阵列芯片。电路读出方式为顺序积分模式,通过单钢柱结构和Si基读出电路混成互连。将探测器芯片组件置于 77 K 左右的低温环境中,芯片采用背入射方式,入射光通过滤光片先后作用于芯片的短中波和中波,响应信号通过电路输出。

2 材料生长和器件制备

采用分子束外延(MBE)设备在直径为2英寸的GaSb衬底上生长niBin结构的InAs/InAsSb中/中双色超晶格材料。首先生长 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的GaSb缓冲层,然后依次生长 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的InAs/InAsSb电极接触层、 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的InAs/InAsSb短中波吸收层、 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 的

AlGaAsSb势垒层、 $2.9\ \mu\text{m}$ 的InAs/InAsSb中波吸收层、 $0.4\ \mu\text{m}$ 的InAs/InAsSb电极接触层以及 $15\ \text{nm}$ 的InAs盖帽层。通过金相显微镜观察材料表面的缺陷情况,通过X射线衍射(XRD)设备分析材料内部晶格质量。超晶格材料的双晶衍射曲线如图2所示,XRD的0级峰的半高宽(FWHM)为 $28.7\ \text{arcsec}$,并且至少能看到4级清晰陡峭的卫星峰,表明外延材料内部具有良好的生长周期和晶格质量。另外,各衍射峰的FWHM平均在 $40\ \text{arcsec}$ 左右,说明超晶格材料晶格周期性非常完整。超晶格零级衍射峰与衬底峰间距为 $60\ \text{arcsec}$,外延材料与衬底间的晶格失配仅为 0.074% ,说明在外延过程产生的晶格畸变量非常小,整个生长过程为晶格匹配生长。从金相显微镜 100 倍放大倍数观察如图3,对超晶格材料表面缺陷数量进行统计,外延材料表面的缺陷密度小于 $200\ \text{cm}^{-2}$ 。

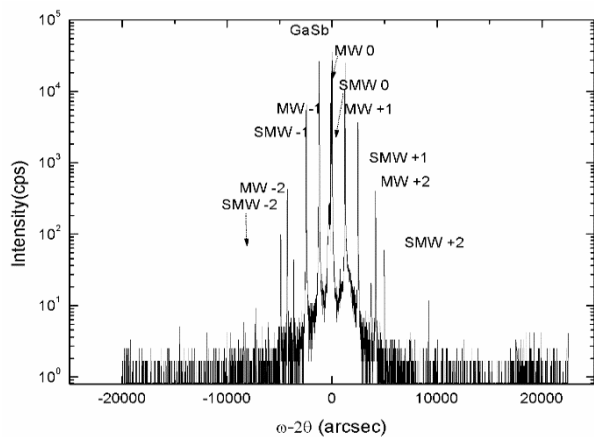


图2 超晶格材料的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of superlattice materials

InAs/InAsSb中/中双色超晶格芯片的工艺流程长,工艺复杂度高,其中的关键工艺为台面加工、钝化技术、金属电极制备等。超晶格探测器芯片阵列



图3 超晶格材料表面金相显微镜图片

Fig. 3 Metallographic micrograph of the superlattice material surface

采用台面结构。由于双色探测器具有多层复杂结构,每层的组分还有区别,且做出需要的双色二极管结构所需要的刻蚀深度比单色二极管大得多^[17]。为保证有效的占空比,保证精确的刻蚀深度和深宽比,本文采用ICP干法刻蚀技术,以 CH_4 、 Cl_2 和Ar气混合气体,利用物理刻蚀和化学刻蚀相结合的方法,设计优化刻蚀工艺方案;提升阻挡层制备工艺与刻蚀工艺,提高掩膜图形质量;开展交叉工艺试验,优化工艺参数,得到好的刻蚀面型,深宽比达到 $3:1$,台面边沿光滑,陡直度高,最终获得低刻蚀损伤的台面阵列,如图4所示。

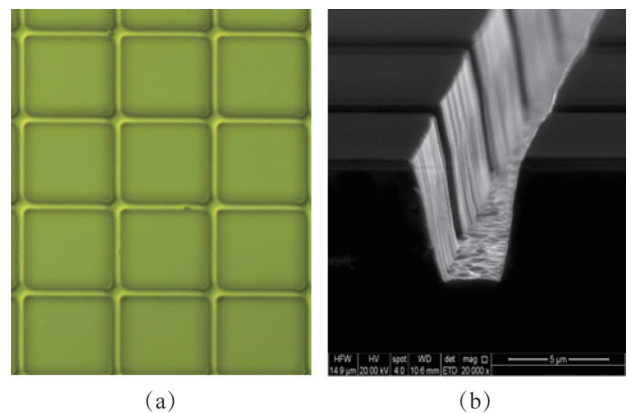


图4 刻蚀台面的金相显微镜照片(a)和扫描显微镜照片(b)

Fig. 4 Metallographic micrograph (a) and SEM of the etched mesa (b)

刻蚀后的台面侧壁表面存在悬挂键、缺陷、杂质和污染物等物质,这会在表面引入大量的复合中心,严重影响器件的电学性能。双色焦平面的二极管侧壁位于很窄的深槽中,给钝化技术增加了不少困难,通过电化学钝化加介质膜层的方法。通过优化刻蚀工艺,降低损伤,同时通过去损伤工艺清除表面损伤层,得到良好的钝化效果如图5(a)所示。中/中双色超晶格结深比较大,对于超晶格上下电极深度差,采用光刻剥离方法,优化电极生长参数,解决窗口不干净、电极不牢的问题,得到电极 99.9% 完好率,如图5(b)所示。互连钢柱通过光刻参数优化及钢柱生长工艺优化完善解决钢柱生长均匀性问题,得到高质量均匀的钢柱阵列如图5(c)所示。

3 性能测试结果及分析

InAs/InAsSb中/中双色超晶格芯片采用低温探针台系统对芯片的电特性进行测试。测试温度为 $77\ \text{K}$,对光敏元面积为 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 测试元进行测试

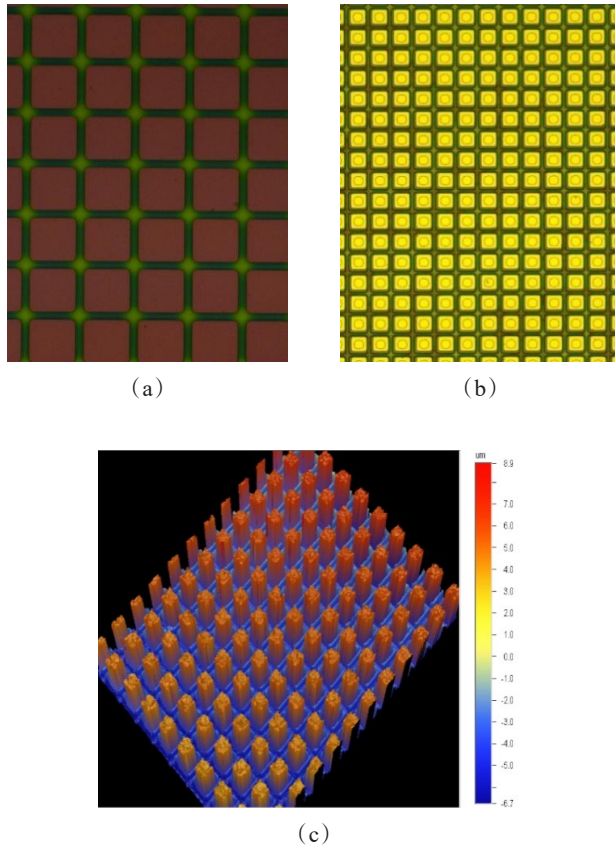


图5 器件的钝化后金相显微镜图片(a),金电极金相显微镜照片(b),钢柱三维轮廓图片(c)
Fig. 5 Metallographic micrograph of passivation (a), gold electrode (b) and profile photo of indium bump (c)

试,测试范围从 -1.5 V 到 1.5 V 。图6所示为二极管的电流密度-电压特性(J - V)曲线,阻抗和面积乘积-电压特性(RA - V),对于niBin结构二极管,根据测试上电极加连接测试系统的正极,坐标轴正向为上面中波二极管的反偏特性,反向为短中二极管的反偏特性。

对于短中波来说,偏压为 -250 mV 时,电流密度 $7.5\times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$, RA 为 $3.7\times 10^4\ \Omega\cdot\text{cm}^2$,偏压为 -1.0 V 时,电流密度为 $1.4\times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$, RA 为 $4.5\times 10^4\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 。在此电压范围内电流密度随着偏压的增加变化不大。对于中波来说,偏压为 300 mV 时,电流密度 $1.2\times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$, RA 为 $1.1\times 10^4\ \Omega\cdot\text{cm}^2$,偏压为 1.0 V 时,电流密度为 $2.9\times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$, RA 为 $1.3\times 10^4\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 。niBin结构的二极管中主要的暗电流由扩散电流、G-R电流、隧穿电流、表面漏电构成,如公式(1)所示。niBin结构中没有pn结的耗尽区,使得G-R电流大幅减小,同时AlGaAsSb构成的势垒能够有效减小表面漏电和隧穿电流,niBin结构的二极管电流

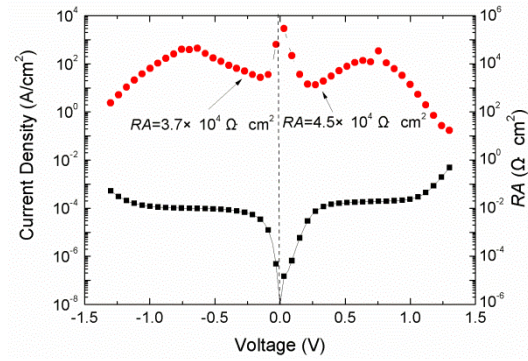


图6 J - V 特性和 RA 特性测试结果

Fig. 6 Characterization of current destiny and differential resistance vs voltage

密度比较小。短中波和中波二极管都具有随偏压变化不大的工作区间,为焦平面器件响应的均匀性提供了有利条件。中波的电流密度大于短中波的电流密度,一方面由于随着截止波长增大,中波的禁带宽度略小于短中波,使得暗电流增加;另一方面可能是中波在短中波材料的上面,材料缺陷和工艺污染增多,导致暗电流增大。

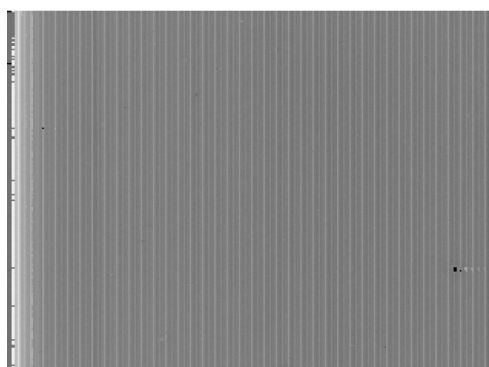
总的电流密度 J 为:

$$J = J_D + J_{G-R} + \left(\frac{P}{A}\right)J_s + J_T + J_p \quad (1)$$

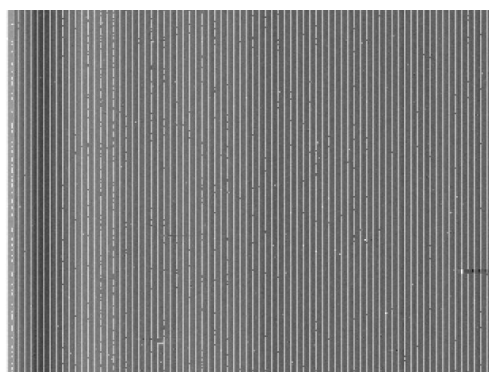
其中 J_D 为体内扩散电流, J_s 为表面漏电流, J_{G-R} 为复合电流密度, J_T 为隧穿电流, J_p 为光生电流。

将 $30\ \mu\text{m}$ 中心距的 320×256 中/中双色超晶格焦平面阵列组件封装到测试杜瓦中并进行制冷到液氮温度,采用法国HGH systems infrarouges焦平面测试系统,对器件的光电响应进行测试,短中波通道和中波通道响应如图7所示。器件的双色峰值探测率短中波达到 $7.2\times 10^{11}\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,中波达到 $6.7\times 10^{11}\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,短中波峰值电压响应率为 $9.2\times 10^9\text{ V/W}$,中波峰值电压响应率为 $8.1\times 10^9\text{ V/W}$ 。图8为器件的盲元图,从统计值看,短中波通道的有效像元率为99.51%,盲元率为0.49%,中波通道的有效像元率为99.13%,盲元率为0.87%。中波的盲元率大于短中波,主要原因是中波生长在短中波上面,材料缺陷增加,结区受工艺加工水平影响大。

光谱响应曲线图如图9所示,从中可以分析出,短中波的响应波段为 $2.8\sim 3.9\ \mu\text{m}$,中波的响应波段为 $4.1\sim 5.2\ \mu\text{m}$ 。中波在短中波波段有较大比例的串音,主要是由于短中波吸收层的厚度较薄无法完全吸收 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 的入射辐射。在 77 K 温度下,对器件组件进行成像,如图10所示。其中图为短中波人



(a)



(b)

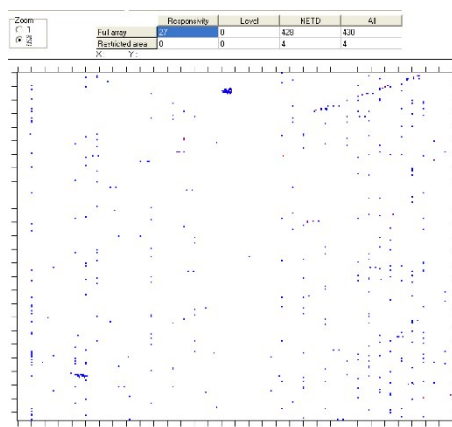
图7 InAs/InAsSb 双色器件的短中波通道(a)和中波通道(b)响应图

Fig. 7 Response diagram of short-Mid-wave channel (a) and mid-wave channel (b) of InAs/InAsSb two-color device

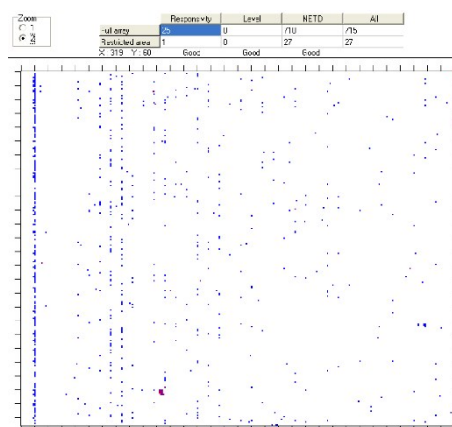
脸成像,右图为中波人脸成像,成像图比较清晰地反映出人面部细节,具有较高的成像质量。器件具有双波段探测信息分辨能力。

4 结语

本文研制 InAs/InAsSb 二类超晶格中/中波双色探测器组件,像元规模为 320×256,像元中心距为 30 μm。短中波二极管的 RA 值达到 4.5×10⁴ Ω·cm²,中波达到 1.3×10⁴ Ω·cm²。光谱响应测试表明短中波响应波段为 2.8~3.9 μm,中波为 4.1~5.2 μm。双色峰值探测率短中波达到 7.2×10¹¹ cm·Hz^{1/2}W⁻¹,中波 6.7×10¹¹ cm·Hz^{1/2}W⁻¹,短中波有效像元率为 99.51%,中波为 99.13%。文中通过对二极管的 I-V 特性进行测试,验证了器件良好的电学性能。本文研制的中/中波超晶格双色焦平面器件,具有良好的光/电性能,获得了清晰的成像效果,具有双波段探测能力。后续将在材料结构设计和器件制备工艺



(a)



(b)

图8 InAs/InAsSb 双色超晶格器件的短中波通道(a)和中波通道(b)盲元图

Fig. 8 Blind metagraph of short-Mid-wave channel (a) and Mid-wave channel (b) of InAs/InAsSb two-color device

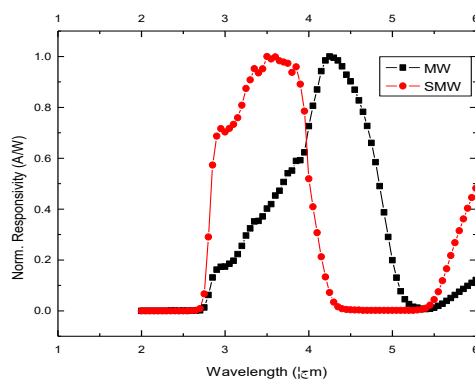


图9 InAs/InAsSb 双色超晶格器件的光谱响应曲线
Fig. 9 Normalization responsivity spectrum curves of InAs/InAsSb two-color superlattice device

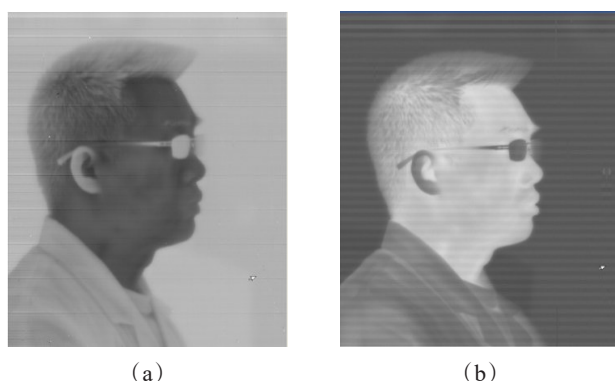


图 10 InAs/InAsSb 双色超晶格器件的短中波通道(a)和中波通道(b)的成像图

Fig. 10 Thermal image of short-Mid-wave channel (a) and mid-wave channel (b) of InAs/InAsSb two-color device

等方面开展研究,进一步减小中/中波双色探测器的串音和盲元率。

References

- [1] Rogalski. Recent progress in infrared detector technologies [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2011, **54**: 136–154.
- [2] LIU Wu, CHEN Jian-xin. Research progress of InAs/GaSb type II superlattice infrared detection technique [J]. *Laser & Infrared*, 2016, **46**(6): 659–664. (刘武, 陈建新. InAs/GaSb II 类超晶格红外探测技术研究进展 [J]. *激光与红外*, 2016, **46**(6): 659–664.
- [3] LI Junbin, LI Dongsheng, YANG Yulin, *et al.* III-V Semiconductor Infrared Detector Research in SCD of Israel [J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(10): 936–945. (李俊斌, 李东升, 杨玉林, 等. 以色列SCD公司的III-V族红外探测器研究进展 [J]. *红外技术*, 2018, **40**(10): 936–945.
- [4] Lyu Yanqiu, Lu Xing, Lu Zhengxiong, *et al.* Review of Antimonide Infrared Detector Development at Home and Abroad [J]. *Aero Weaponry*, 2020, **27**(5): 1–12. 吕衍秋, 鲁星, 鲁正雄, 等. 碲化物红外探测器国内外发展综述 [J]. *航空兵器*, 2020, **27**(5): 1–12.
- [5] Rehm R, Walther M, Rutz F, *et al.* Dual-color InAs/GaSb superlattice focal-plane array technology [J]. *Journal of electronic materials*, 2011, **40**(8): 1738–1743.
- [6] Rehm R, Walther M, Schmitz J, *et al.* Dual-colour thermal imaging with InAs/GaSb superlattices in mid-wavelength infrared spectral range [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(10): 577–578.
- [7] Yann R, Fabien C, Cedric V, *et al.* Infrared Dual Band detectors for next generation [C]. *Proc. of SPIE*, 2011, **8012**: 801238–1~801238–13.
- [8] 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*, 2015, **34**(6): 716–720. (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 [J]. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(6): 716–720.
- [9] Huang J, Ma W, Zhang Y, *et al.* Two-Color InAs/GaSb Type II Superlattice Infrared Photodetector With External Quantum Efficiency Larger Than 100% [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, **38**(9): 1266–1269.
- [10] Xiang Wei, Wang Guowei, Xu Yingqiang, *et al.* InAs/GaSb Superlattices Mid-Wavelength Infrared Focal Plane Array Detectors [J]. *Aero Weaponry*, 2015(1): 49–51. (向伟, 王国伟, 徐应强, 等. 中波 InAs/GaSb 超晶格红外焦平面探测器 [J]. *航空兵器*), 2015(1): 49–51.
- [11] SHI Yan-li. Type-II InAs/GaSb Superlattices Infrared Detectors—one of the Best Choices as the Third Generation Infrared Detectors [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(11): 621–624. (史衍丽. 碲基 II 类超晶格红外探测器——第三代红外探测器的最佳选择 [J]. *红外技术*), 2011, **33**(11): 621–624.
- [12] M. Razeghi, A. Haddadi, A. M. Hoang, *et al.* Antimonide-Based Type II Superlattices: A Superior Candidate for The Third Generation of Infrared Imaging Systems [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(8): 2802–2807.
- [13] A. Rogalski. New material systems for third generation infrared detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2008, **16**(4): 458–482.
- [14] Smith D L, Mailhot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(6): 2545–2548.
- [15] Rehm R, Walther M, Schmitz J, *et al.* Dual-colour thermal imaging with InAs/GaSb superlattices in mid-wavelength infrared spectral range [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(10): 577–578.
- [16] Rogalski A. Material consideration for third generation infrared photon detectors [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2007, **50**: 240–252.
- [17] Zhu Xubo, Peng Zhenyu, Cao Xiancun, *et al.* Mid-/short-wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(11): 1104001–1~1104001–6. 朱旭波, (彭震宇, 曹先存, 等. InAs/GaSb 二类超晶格中/短波双色红外焦平面探测器 [J]. *红外与激光工程*), 2019, **48**(11): 1104001–1~1104001–6.