

## 320×256 InAs/GaSb 超晶格中/短波双色探测器组件研制

吕衍秋<sup>1,2,3</sup>, 彭震宇<sup>1,2,3</sup>, 曹先存<sup>1,2,3</sup>, 何英杰<sup>1,3</sup>, 李 墨<sup>1,2,3</sup>, 孟 超<sup>1,2,3</sup>, 朱旭波<sup>1,2,3</sup>

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:** InAs/GaSb 超晶格材料制备的新型红外器件在最近十几年得到了迅速发展。文中开展了 InAs/GaSb 二类超晶格中/短波双色焦平面探测器组件研制, 设计了中/短波双色叠层背靠背二极管芯片结构, 用分子束外延技术生长出结构完整、表面平整、低缺陷密度的 PNP 结构超晶格材料, 制备出性能优良的 320×256 双色焦平面探测器组件, 对探测器组件进行了测试分析。结果显示, 在 77 K 下中波二极管 RA 值达到 26.0 kΩ·cm<sup>2</sup>, 短波的 RA 值为 562 kΩ·cm<sup>2</sup>。光谱响应特性表明短波响应波段为 1.7~3 μm, 中波为 3~5 μm, 满足设计要求。双色峰值探测率达到中波 3.12×10<sup>11</sup> cm·Hz<sup>1/2</sup>W<sup>-1</sup>, 短波 1.34×10<sup>11</sup> cm·Hz<sup>1/2</sup>W<sup>-1</sup>。响应非均匀性中波为 9.9%, 短波为 9.7%。中波有效像元率为 98.46%, 短波为 98.06%。

**关键词:** InAs/GaSb 超晶格; 双色; 中短波; 焦平面阵列; 红外探测器

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0103007

## 320×256 mid-/short-wavelength dual-color infrared detector based on InAs/GaSb superlattice

Lv Yanqiu<sup>1,2,3</sup>, Peng Zhenyu<sup>1,2,3</sup>, Cao Xiancun<sup>1,2,3</sup>, He Yingjie<sup>1,3</sup>,  
Li Mo<sup>1,2,3</sup>, Meng Chao<sup>1,2,3</sup>, Zhu Xubo<sup>1,2,3</sup>

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

**Abstract:** New infrared devices prepared by InAs/GaSb superlattice materials have developed rapidly in the last decade. The paper carries out practical researches on mid-/short-wavelength dual-color infrared detector based on type-II InAs/GaSb superlattice. Firstly, a mid-/short-wavelength dual-color chip structure was designed based on two back-to-back n-i-p junctions. Then the PNP superlattice material with complete structure, smooth surface and low defect density was grown by molecular beam epitaxy. Finally, 320×256 focal plane arrays with excellent performance was fabricated and measured. The RA value of middle-wave channel reached 26 kΩ·cm<sup>2</sup> and the short-wave channel reached 562 kΩ·cm<sup>2</sup> at 77 K. The spectral response indicated the short-wave response band of 1.7~3 μm and the middle-wave

收稿日期: 2019-10-20; 修订日期: 2019-11-21

作者简介: 吕衍秋(1978-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光电子技术及红外半导体技术应用方面的研究。Email: yanqiuLv@126.com

of 3–5  $\mu\text{m}$ . The middle-wave channel exhibits a detectivity value of  $3.12 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ , a photo-response non-uniformity of 9.9% and an effective pixel rate of 98.46%, while the short-wave channel exhibits a detectivity value of  $1.34 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ , a photo-response non-uniformity of 9.7% and an effective pixel rate of 98.06%.

**Key words:** InAs/GaSb superlattice; dual-color; mid-/short-wavelength; FPAs; infrared detector

## 0 引言

目前红外探测器的发展正由采用 HgCdTe、InSb 等材料制备凝视型焦平面的第二代向多光谱、多模式、高工作温度的第三代过渡。InAs/GaSb 超晶格材料其带隙宽波段可调(2~30  $\mu\text{m}$ ), 有非常灵活的能带结构设计空间, 外延材料尺寸大、均匀性高, 它能够满足多波段探测<sup>[1]</sup>, 例如中/短波<sup>[2]</sup>、中/中<sup>[3]</sup>、中/长波<sup>[4]</sup>、长波/甚长波<sup>[5]</sup>等, 也能满足高工作温度<sup>[6]</sup>的要求, 并且具有小体积、低功耗、轻质量、低成本、高可靠性等特点, 因此它已经成为了第三代红外焦平面探测器的优选材料<sup>[7-9]</sup>。

中/短波红外探测器在军事侦察、导弹预警和高端民用领域具有重要应用, 因为空中目标的光谱辐射能量主要集中于红外中波段, 而红外诱饵等人工干扰的短波辐射特别突出。因此中/短波红外探测器能够提升人工及复杂背景干扰下的目标识别能力。但双色叠层焦平面探测器组件研制的技术成熟度是中/短波探测器发展的重要制约因素。

随着 InAs/GaSb 二类超晶格技术的发展, 中/短波 InAs/GaSb 超晶格探测器已逐渐进入研制和应用阶段。2013 年, 美国西北大学制备出  $320 \times 256$  中/短双色超晶格探测器, 采用背靠背 PNP 结构的 InAs/GaSb/AlSb 超晶格材料<sup>[10]</sup>, 但其侧重于高工作温度。国内方面, 2017 年中国科学院半导体研究所报道了  $320 \times 256$  中/短双色超晶格器件<sup>[11]</sup>, 其为 NPN 结构。

文中开展实用化的 InAs/GaSb 超晶格双色焦平面探测器设计、材料外延、芯片加工, 短波光敏二极管为同质结, 中波采用异质结势垒以改善漏电性能, 优化了钝化方法, 制备了性能优良的 InAs/GaSb 二类超晶格中/短波双色焦平面探测器组件。

## 1 材料结构设计和器件制备

二类超晶格主要通过调节 InAs/GaSb 的相对层

厚来实现材料能带结构的设计, 从而实现响应波长和其他性能的调控。通过经验紧缚理论和 kp 微扰理论<sup>[12]</sup>, 建立 InAs/GaSb 超晶格的能带结构模型, 对材料的禁带宽度、电子有效质量、能带带阶等关键参数进行理论计算。

文中短波超晶格为 GaSb/InAs 8 ml/5 ml, 中波超晶格为 GaSb/InAs 8 ml/9 ml, 采用双色叠层背靠背二极管电压选择结构, 由下至上分别为短波二极管和中波二极管。短波光敏二极管为同质结, 中波二极管中可在接触层和吸收层之间插入异质结势垒以改善漏电性能。其材料结构如图 1 所示, 设计工作波长范围为中波 3~5  $\mu\text{m}$ , 短波 1.7~3  $\mu\text{m}$ 。

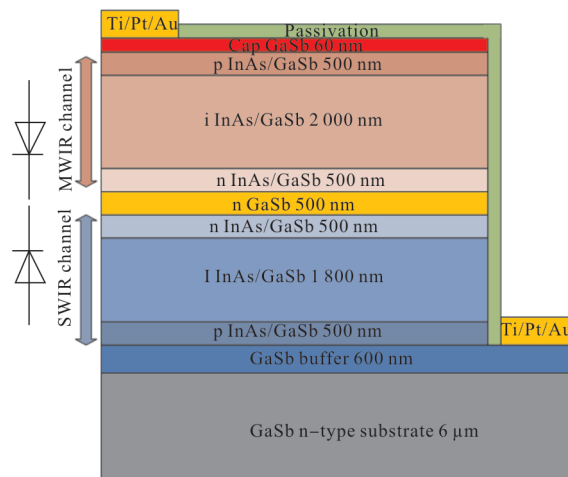


图 1 超晶格材料结构

Fig.1 Schematics of superlattice structure

采用分子束外延设备, 通过精确控制生长温度、V/III 比、生长速率、快门顺序等关键参数, 实现对材料结构和界面的精确控制, 制备出低缺陷、高质量的 InAs/GaSb 超晶格中/短波外延片。

采用半导体工艺制备 PNP 结构的  $320 \times 256$  像元焦平面阵列器件, 即两个 p-i-n 结构背对背, 中间公共电极为 n 型。与传统单色器件相比, 双色超晶格台面沟道具有高深宽比, 湿法腐蚀难以满足要求, 文

中采用基于氯气、甲基等刻蚀气体的电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀技术<sup>[13-14]</sup>。通过调节功率、气体流量、温度等参数,实现对超晶格材料高选择比、低损伤的刻蚀。特别是刻蚀后采用酸性腐蚀液,去掉材料刻蚀表面的损伤层。高深宽比沟槽、小间隙侧面也对钝化技术提出了更高的要求。文中进行了阳极硫化与 SiO<sub>2</sub> 复合钝化,其中 SiO<sub>2</sub> 钝化膜采用 PECVD 法生长 220 nm 厚。

## 2 结果与分析

首先对研制出的探测器组件进行电性能测试。测试温度为 77 K,光敏元面积为 27 μm×27 μm,测试范围从-1 V 到 1 V,并根据 *I-V* 测试结果计算出对应的 *RA* 值,如图 2 所示。

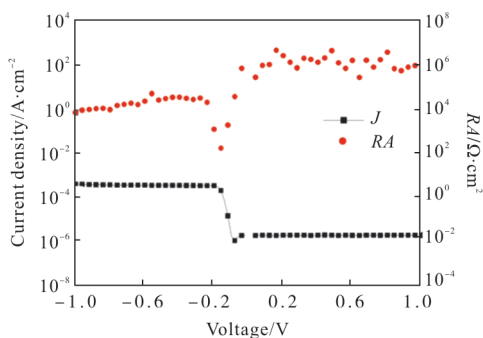


图 2 电流密度和 *RA* 与电压关系

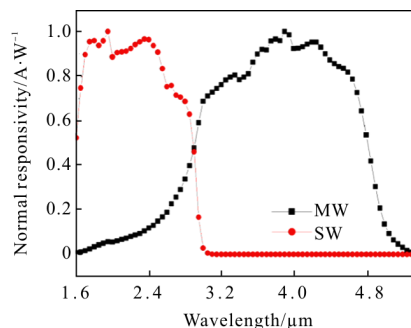
Fig.2 *I-V* and *RA-V* curves

-200 mV 以下表现出的中波二极管的 *I-V* 特性,0 mV 以上则表现出短波二极管的 *I-V* 特性。这是因为在-200 mV 以下时中波二极管的反偏阻抗远远大于短波二极管的正偏阻抗,而 0 mV 以上时短波二极管的反偏阻抗远远大于中波二极管的正偏阻抗。

在-250 mV 偏压下,器件样品的电流密度为  $3.05 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>, *RA* 值为 26.0 kΩ·cm<sup>2</sup>。在 100 mV 偏压下,器件样品的电流密度为  $1.64 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>, *RA* 值为 562 kΩ·cm<sup>2</sup>。随着偏压的增大,暗电流密度都在很小的范围,中波二极管的 *RA* 值略有下降,但还在 10 kΩ·cm<sup>2</sup> 以上,短波二极管的 *RA* 值几乎没有下降,说明器件样品中波和短波二极管的 *RA* 值足够大且稳定。

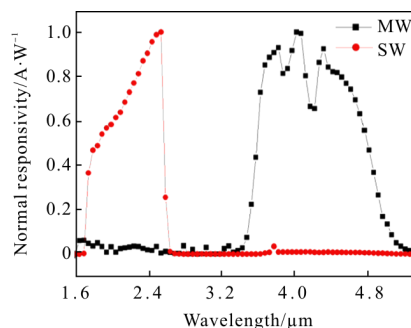
采用傅里叶转换红外光谱仪得到器件在 77 K

温度下的归一化光谱响应曲线,如图 3(a)、(b)所示,分别为实际光谱响应和增加带阻滤光片后的光谱响应。可以看出,增加了滤光片后,短波波段的 50%前截止波长为 1.7 μm,后截止波长为 2.6 μm,中波波段前截止波长为 3.7 μm,后截止波长为 4.8 μm。



(a) 未加滤光片时

(a) Without filter



(b) 加滤光片时

(b) With filter

图 3 归一化光谱响应曲线

Fig.3 Normalization spectral response curves

77 K 量子效率与波长的关系如图 4 所示。对于短波波段,峰值量子效率为 1.75 μm 处的 38.1%,中波峰值量子效率为 3.9 μm 处的 64.7%。中波测试偏压为-200 mV,短波为-50 mV。

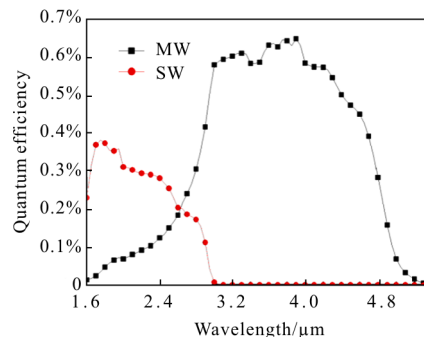


图 4 量子效率谱线

Fig.4 Quantum efficiency spectrum of the photodiode at 77 K

为了进一步量化双色红外器件的光学串扰,定义参数  $S^{[15]}$ :

$$S_{MW} = \frac{QE_{1.75\mu m}^M}{QE_{3.9\mu m}^M}, S_{SW} = \frac{QE_{3.9\mu m}^S}{QE_{1.75\mu m}^S}$$

式中:  $QE_{1.75\mu m}^M$ 、 $QE_{3.9\mu m}^M$ 、 $QE_{3.9\mu m}^S$ 、 $QE_{1.75\mu m}^S$  分别为中波通道和短波通道在  $1.75\mu m$  和  $3.9\mu m$  处的量子效率。可以算出中波的选择比为 0.112, 而短波的选择比为 0, 中波的选择比较高的原因是因为中波具有较宽的吸收谱, 上层的中波通道吸收了部分入射的短波信号。短波势垒本身能够在短波光照下激发产生载流子, 这部分载流子被中波势垒二极管收集形成中波通道响应中额外的短波串音。因此通过设计势垒区和光敏区的顺序和厚度分布, 可以减少这部分短波串音, 设计合适的势垒能带和掺杂分布可以进一步克服短波势垒串音问题。图 5 为文中设计的 PNP 结构器件在零偏压下的能带图,  $0.5\mu m$  的 GaSb 层用来隔离中波和短波结构, 重掺杂以形成欧姆接触和空穴势垒, 有效地克服短波势垒串音问题。

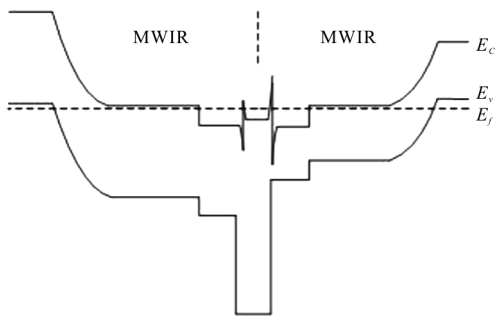


图 5 零偏压下的能带结构

Fig.5 Energy band structure at zero bias

计算出光谱探测率如图 6 所示, 可以看出, 在 77 K 下测试的双色峰值探测率( $D^*$ )中波达到  $3.12 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ , 短波达到  $1.34 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。

文中研制的双色探测器组件在 77 K 温度下成像如图 7 所示, 其中图 7(a)为中波人脸和烙铁成像, 图 7(b)为短波人脸和烙铁成像。中波的响应不均匀性为 9.9%, 短波为 9.7%, 不均匀性主要来源于测试冷屏高度偏低, 无冷屏时中波和短波不均匀性在 6% 以内。保证工艺优化、材料一致性和后截止滤光片优化, 可以进一步降低不均匀性。

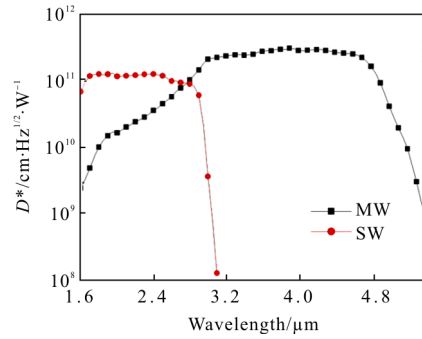


图 6 计算出的光谱探测率

Fig.6 Calculated specific detectivity



(a) 中波人脸和烙铁成像

(a) Human face imaging and iron imaging for MWIR channel



(b) 短波人脸和烙铁成像

(b) Human face imaging and iron imaging for SWIR channel

图 7 器件的红外成像

Fig.7 Infrared image of the device

目前, 超晶格焦平面探测器盲元率是性能主要限制, 焦平面探测器盲元率主要由工艺缺陷和材料缺陷两部分造成。相对于质量相当完善的体材料, 薄膜外延材料缺陷对盲元率的影响要大得多, 因此应尽量减小外延材料缺陷密度, 文中外延材料的表面缺陷密度小于  $800/\text{cm}^2$ 。中波有效像元率达到

98.46%, 短波达到 98.06%。

### 3 结 论

文中研制的 InAs/GaSb 二类超晶格中/短波双色探测器组件, 像元规模为 320×256, 中波二极管的 RA 值达到 26 kΩ·cm<sup>2</sup>, 短波达到 562 kΩ·cm<sup>2</sup>。光谱响应特性表明短波响应波段为 1.7~3 μm, 中波为 3~5 μm。双色峰值探测率达到中波 3.12×10<sup>11</sup> cm·Hz<sup>1/2</sup>W<sup>-1</sup>, 短波 1.34×10<sup>11</sup> cm·Hz<sup>1/2</sup>W<sup>-1</sup>。响应不均匀性中波为 9.9%, 短波为 9.7%。中波有效像元率为 98.46%, 短波为 98.06%, 文中的研制在中短波超晶格双色焦平面芯片结构设计及材料生长、器件制备、盲元抑制等关键技术取得突破, 体现出对中短波叠层式 320×256 超晶格双色焦平面探测器的研制开发能力。

#### 参考文献:

[1] Smith D L, Mailhiot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(6): 2545-0.

[2] 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.

[3] Linda Höglund, Rickard Marcks von Württemberg, Hithesh Gatty, et al. Type-II InAs/GaSb superlattices for dual color infrared detection[C]//SPIE, 2017, 10111: 1011116.

[4] Sun Yaoyao, Han Xi, Lv Yuexi, et al. Performance of dual-color mid-/long-wavelength infrared detectors based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Aero Weaponry*, 2018, 4(2): 56-59. (in Chinese)  
孙姚耀, 韩玺, 吕粤希, 等. 基于 InAs/GaSb 二类超晶格的中/长波双色红外探测器[J]. *航空兵器*, 2018, 4(2): 56-59.

[5] Aifer E H, Tischler J G, Warner J H, et al. Dual band LWIR/VLWIR type-II superlattice photodiodes [C]//Proc. of SPIE, 2005, 5783: 112-122.

[6] Yaoyao Sun, Guowei Wang, Xi Han, et al. 320×256 high operating temperature mid-infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice [J].

*Superlattices and Microstructures*, 2017, 111: 783-788.

[7] Shi Yanli. Type-II InAs/GaInSb Superlattices infrared detectors -one of the best choices as the third generation infrared detectors [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(11): 621-624. (in Chinese)  
史衍丽. 镓基 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.

[8] Razeghi M, Haddadi A, Hoang A M, 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.

[9] Huang Jianliang, Zhang Yanhua, Cao Yulian, et al. Antimonide type II superlattice infrared detectors [J]. *Aero Weaponry*, 2019, 26(2): 50-56. (in Chinese)  
黄建亮, 张艳华, 曹玉莲, 等. 砷化物二类超晶格红外探测器[J]. *航空兵器*, 2019, 26(2): 50-56.

[10] Razeghi M, Hoang A M, Chen G, et al. High-performance bias-selectable dual-band short-/mid-wavelength infrared photodetectors and focal plane arrays based on InAs/GaSb/AlSb type-II superlattices [C]//Proc of SPIE, 2013, 8704: 87041W.

[11] Sun Yaoyao, Han Xi, Hao Hongyue, et al. 320×256 Short-Mid-Wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on Type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 82: 140-143.

[12] Hong B H, Rybchenko S I, Itskevich I E, et al. Applicability of the kp method to modeling of InAs/GaSb short-period superlattices [J]. *Physical Review B*, 2009, 79: 165323.

[13] Martin Walther1a, Robert Rehman, Joachim Fleißner, et al. InAs/GaSb type-II short-period superlattices for advanced single and dual-color focal plane arrays[C]//Proc of SPIE, 2007, 6542: 654206.

[14] Hao Hongyue, Wei Xiang, Wang Guowei, et al. Etching mask optimization of InAs/GaSb superlattice mid-wavelength infrared 640×512 focal plane array [J]. *Chinese Phys B*, 2017, 26(4): 047303.

[15] Jiang Dongwei, Wei Xiang, Guo Fengyun, et al. Low crosstalk three-color infrared detector by controlling the minority carriers type of InAs/GaSb superlattices for middle-long and very-long wavelength [J]. *Chinese Phys Lett*, 2016, 33(4): 048502.