

文章编号: 1672-8785(2023)04-0001-06

InAs/GaSb II类超晶格双色红外焦平面器件的干法刻蚀与湿法腐蚀制备对比研究

温 涛¹ 胡雨农¹ 李景峰¹ 赵成城¹ 王国伟² 刘 铭¹

(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, 北京 100083)

摘 要: 分别采用干法刻蚀工艺路线和湿法腐蚀工艺路线制备了面阵规模为 320×256 、像元中心距为 $30 \mu\text{m}$ 的 InAs/GaSb II类超晶格长/长波双色红外焦平面器件, 并对其台面形貌、接触孔形貌、伏安特性以及互连读出电路并封入杜瓦后的中测性能进行了对比研究。总结了采用干法工艺和湿法工艺制备双色 InAs/GaSb II类超晶格焦平面器件的特点。该研究对 InAs/GaSb II类超晶格焦平面器件的研制具有参考意义。

关键词: InAs/GaSb; II类超晶格; 焦平面; 双色

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.04.001

Comparative Study on Dry/Wet Etching Preparation of InAs/GaSb Type-II Superlattice Dual-Color Infrared Focal Plane Devices

WEN Tao¹, HU Yu-nong¹, LI Jing-feng¹, ZHAO Cheng-cheng¹, WANG Guo-Wei², LIU Ming¹

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

2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10083, China)

Abstract: InAs/GaSb type-II superlattice long-wave/long-wave dual-color infrared focal plane devices with an array size of 320×256 and a pixel pitch of $30 \mu\text{m}$ were prepared by dry/wet etching process, respectively. The mesa profile, contact hole profile, voltage-current characteristics, and mid-test performance after interconnecting the readout circuit and sealing dewar were compared. The characteristics of the fabrication of dual-color InAs/GaSb type-II superlattice focal plane devices by dry/wet etching process were summarized. This study has reference significance for the study of InAs/GaSb type-II superlattice focal plane devices.

Key words: InAs/GaSb; type-II superlattice; focal plane array; dual-color

收稿日期: 2022-10-31

作者简介: 温涛(1982-), 男, 山西晋中人, 高级工程师, 主要从事红外探测器器件方面的研究。

E-mail: wentao3@cetc.com.cn

0 引言

双色红外探测器具有抗干扰能力强、探测波段范围广、目标特征信息丰富等优点^[1-2]，因此被广泛应用于导弹预警、气象服务、精确制导、光电对抗和遥感卫星等领域。双色红外探测技术可降低虚警率，实现复杂背景下的目标识别，从而显著提高系统性能^[3]。碲镉汞材料、量子阱材料和铋化物Ⅱ类超晶格材料均可用于制备双色红外探测器^[4]。其中，InAs/GaSb Ⅱ类超晶格材料因其带隙灵活可调、电子有效质量更大、大面积均匀性高等特点以及成本优势，成为制备双色探测器的优选材料^[5]。

本文所采用的 InAs/GaSb Ⅱ类超晶格长/长波双色材料是在 N 型 GaSb 衬底上，用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)技术生长背靠背的 $NM\pi P-P\pi MN$ 结构来实现的。我们分别采用干法刻蚀工艺路线和湿法腐蚀工艺路线制备了面阵规模为 320×256 、像元中心距为 $30 \mu m$ 的 InAs/GaSb Ⅱ类超晶格长/长波双色红外焦平面器件，然后对其进行了性能测试，并对两种工艺路线制备的器件的台面形貌、接触孔形貌、伏安特性和中测性能进行了对比研究。

1 实验

如图 1 所示，材料采用 $NM\pi P-P\pi MN$ 背靠背结构实现长/长波双色红外探测。图 1 中，红色通道(上方深色区域)和蓝色通道(下方深色区域)均采用 $p-\pi-M-n$ 结构，通道内势垒层选用本征掺杂的 M 结构来抑制产生-复合电流和隧穿电流。M 结构中，在 InAs/GaSb 中间插入 AlSb 层，形成 InAs/GaSb/AlSb/GaSb，使能带结构呈“M”形。N 型上下电极和接触层以及势垒层均采用了 18ML/3ML/5ML/3ML 的 InAs/GaSb/AlSb/GaSb M 结构。其中，N 型接触层的厚度约为 $0.5 \mu m$ ，掺杂浓度在 10^{18} cm^{-3} 量级。蓝色通道吸收层采用弱 p 型掺杂 10.5ML/7ML 的 InAs/GaSb 超晶格，而红色通道则将弱 p 型掺杂 12.5ML/7ML 的 In-

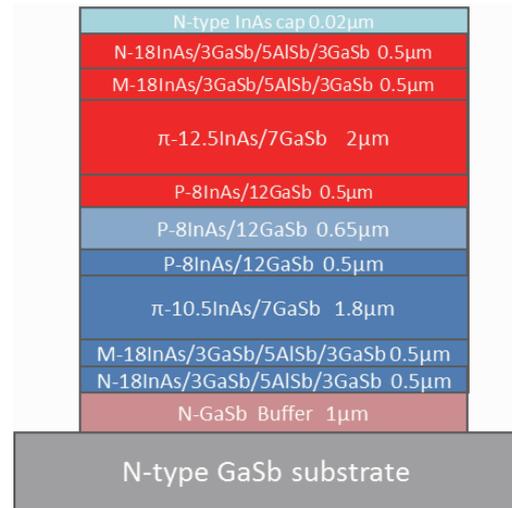


图 1 InAs/GaSb Ⅱ类超晶格长/长波双色材料的结构示意图

As/GaSb 作为吸收区。两通道的中间 P 型接触层通过 P 型掺杂 8ML/12ML 的 InAs/GaSb 连接在高 P 型 GaSb 中间层的两端。当上电极偏压为正值时，红色通道处于反偏状态(即处在工作模式)，下方的蓝色通道处于导通状态。反之，当上电极偏压为负值时，蓝色通道处于反偏状态(即处在工作模式)，上方的红色通道处于导通状态。

制作 InAs/GaSb Ⅱ类超晶格红外焦平面器件时，首先需要形成台面结构，将像元隔离，接着需要制备台面上与台面下的接触孔，最后在接触孔上覆盖电极以便实现像元的电学引出。完成电极制备的 InAs/GaSb Ⅱ类超晶格长/长波双色器件如图 2 所示。台面成型及接触孔制备工艺通常有干法刻蚀和湿法腐蚀两种方式。湿法腐蚀工艺简单且无损伤，但不可避免地存在钻蚀且各向同性，常被用于像元中心距较大的面阵器件制备。干法刻蚀工艺各向异性，几乎无钻蚀，但不可避免地存在刻蚀损伤，常被用于像元中心距较小的面阵器件制备。

实验采用一片 2 in 长/长波双色 InAs/GaSb Ⅱ类超晶格材料($NM\pi P-P\pi MN$ 背靠背结构)并将其划为 A、B 两片，然后通过光刻制备 320×256 ($30 \mu m$)焦平面阵列。采用由磷酸、柠檬酸、双氧水、水配置而成的腐蚀

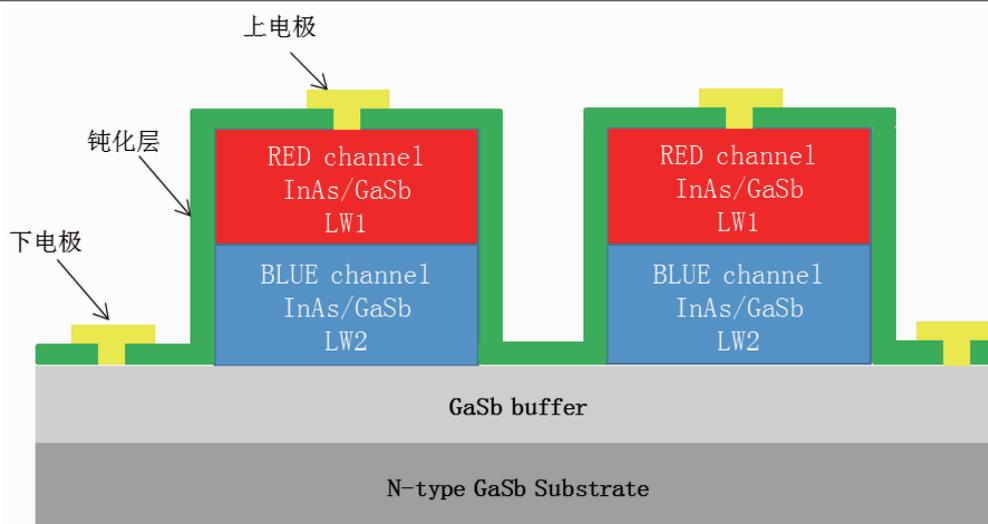


图 2 InAs/GaSb II类超晶格长/长波双色器件的结构示意图

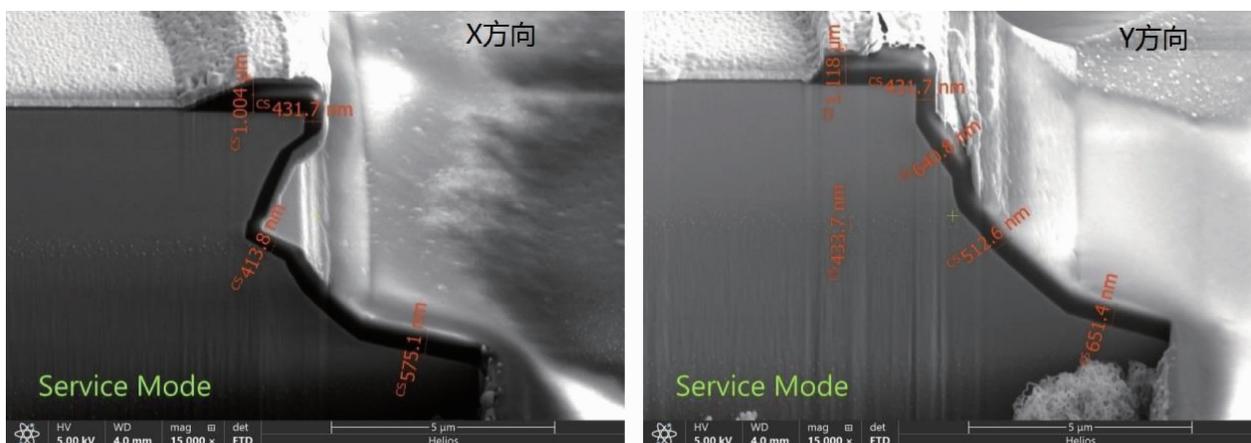


图 3 A片(湿法腐蚀)台面形貌的扫描电镜图

液对 A 片进行台面湿法腐蚀，并通过感应耦合等离子体 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 设备以及三氯化硼体系对 B 片进行台面干法刻蚀。台面制备完成后，利用等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 设备对 A、B 两片进行 SiO_2 表面钝化并完成接触孔光刻。A 片通过氟化铵缓冲液湿法腐蚀接触孔，B 片通过 ICP 设备以及三氟甲烷体系干法刻蚀接触孔，接着溅射 Ti/Pt/Au 金属化体系并通过剥离工艺形成电极。经伏安测试后，A、B 两片分别进行划片、清洗、表面筛选和倒装互连，最后将混成芯片分别封入杜瓦并在 77 K 下对其进行性能测试。器件尺寸通过扫描电镜及测量显微镜测得，台阶深度通过台阶仪测试得到，伏安曲线

通过半导体参数分析仪测得，器件形貌通过共聚焦显微镜以及扫描电镜观察和分析。

2 结果与讨论

2.1 台面形貌对比

台面成型是台面结焦平面器件制备的关键工序。台面的钻蚀程度、表面粗糙度、侧壁形貌对焦平面器件的信号及噪声具有直接的影响。InAs/GaSb II类超晶格双色器件的有源层较厚(通常为 $8\sim 10\ \mu\text{m}$)，需要形成深台面结构以实现像元之间的物理隔离。

图 3 所示为 A 片(湿法腐蚀)制备的台面形貌。可以看出，由于湿法腐蚀的各向同性，在向下腐蚀的同时也向两侧钻蚀，导致湿法腐蚀后台面的占空比较小。经计算可知，湿法腐蚀台面后红色通道的占空比仅为 25.8%，蓝

色通道的占空比为 65.7%。同时,两个方向的台面侧壁形貌还存在明显的差异,且侧壁坡度很不均匀。这些都会影响器件的性能。

图 4 为 B 片(干法刻蚀)制备的台面形貌。可以看出,由于干法刻蚀利用了等离子体的各向异性刻蚀,钻蚀很小,占空比较大。经计算可知,干法刻蚀台面后红色通道的占空比为 62.7%,蓝色通道的占空比为 76.5%。同时干法刻蚀后台面侧壁坡度均匀,有利于钝化层的覆盖。

2.2 接触孔形貌对比

接触孔形貌对器件电极的台阶覆盖好坏具有直接的影响。图 5(a)所示为 A 片(湿法腐蚀)制备的接触孔形貌。可以看出,由于湿法腐蚀的横向钻蚀,电极孔腐蚀后直径较大,但

侧壁坡度较缓,有利于金属体系的覆盖。图 6(b)所示为 B 片(干法刻蚀)制备的接触孔形貌。可以看出,干法刻蚀后电极孔侧壁比较陡直,这种形貌并不利于金属层的台阶覆盖。在电极制备完成后,侧壁处有明显的空隙。由于后续工艺要通过钢柱进行倒装互连,钢可能通过这些缝隙扩散到超晶格材料表面而导致漏电,严重影响器件的长期可靠性。

2.3 伏安曲线对比

红外焦平面芯片的伏安特性是评价器件性能的重要参数。其中,光电流与器件的信号值相关,阻抗最大值与器件的优值因子 R_A 直接相关。图 6 为湿法/干法工艺芯片在 77 K 下的伏安曲线对比图。具体测试结果如下:湿法工艺芯片红色通道的阻抗最大值为 1.9 M Ω ,相

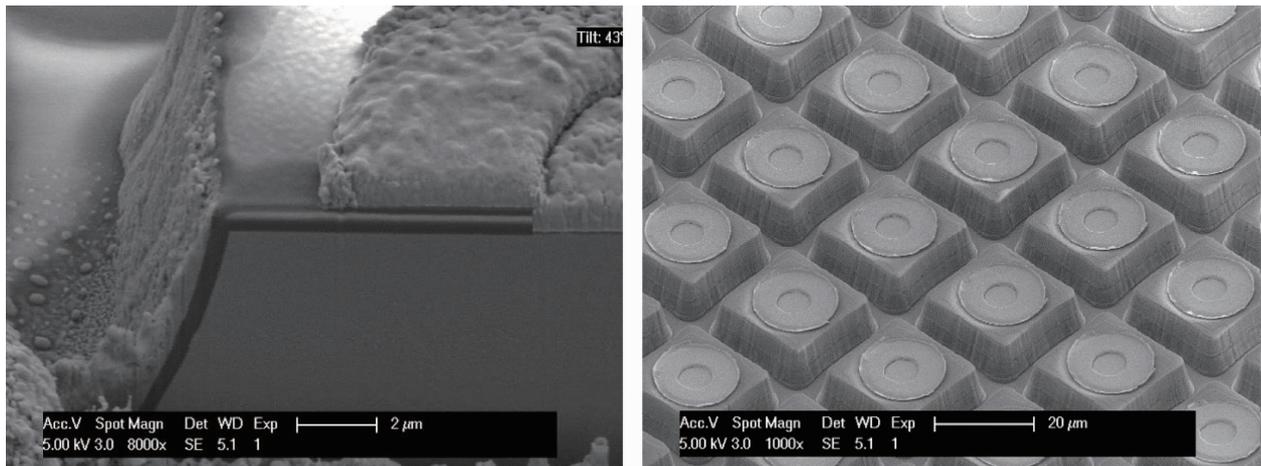


图 4 B 片(干法刻蚀)台面形貌的扫描电镜图

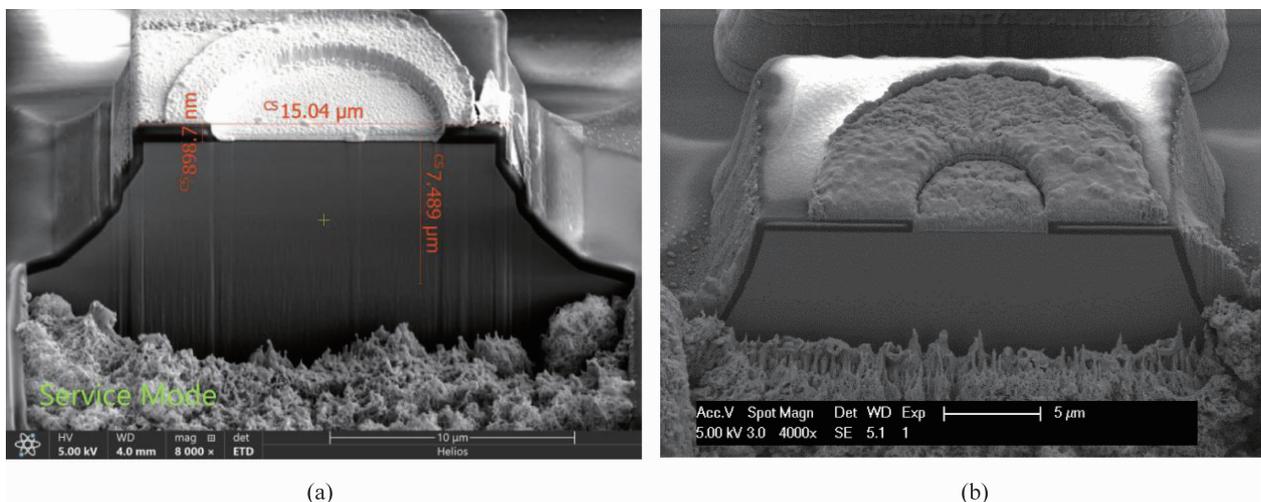


图 5 用湿法(a)/干法(b)工艺制备接触孔后的形貌对比图

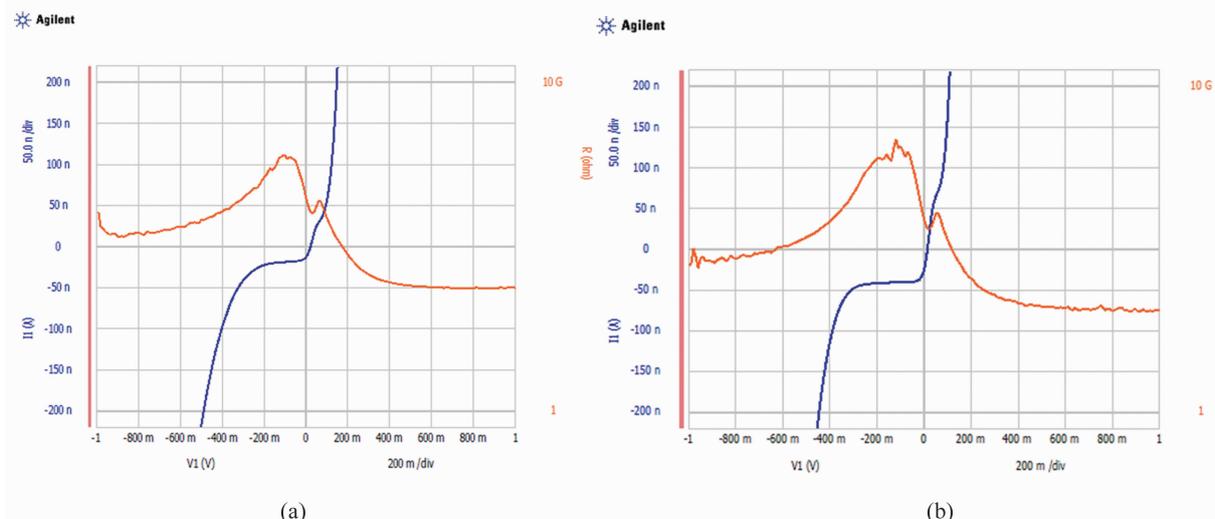


图 6 湿法(a)/干法(b)工艺芯片在 77 K 下的伏安曲线对比图

表 1 湿法/干法工艺芯片在 77 K 下的典型中测性能对比

通道	工艺路线	平均峰值探测率/ ($\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$)	盲元率/%	响应率非 均匀性/%	噪声等效 温差/K	信号/V
红色通道	A 片(湿法)	1.064×10^8	8.48	17.08	2.5452765	0.00497
	B 片(干法)	4.720×10^9	8.79	14.25	0.0728231	0.10472
蓝色通道	A 片(湿法)	5.367×10^9	5.73	2.81	0.0787929	0.16308
	B 片(干法)	8.299×10^9	7.15	5.46	0.0395862	0.30873

应电流为 29.5 nA；蓝色通道的阻抗最大值为 61.2 M Ω ，相应电流为 -18.7 nA。干法工艺芯片红色通道的阻抗最大值为 2.4 M Ω ，相应电流为 72.5 nA；蓝色通道的阻抗最大值为 137.9 M Ω ，相应电流为 -40.3 nA。可以看出，干法工艺芯片的阻抗值明显比湿法工艺芯片高，且光电流较大。

2.4 中测结果对比

表 1 列出了湿法/干法工艺芯片封入杜瓦后在 77 K 下的中测性能对比数据。可以看出，湿法工艺芯片无论是红色通道还是蓝色通道，其信号值都明显比干法工艺芯片小，平均峰值探测率及噪声等效温差也都明显比干法工艺芯片差，仅在盲元率方面略优于干法工艺芯片。在响应率非均匀性指标上，红色通道是干法工艺路线略优，蓝色通道是湿法工艺路线略优。

3 结束语

本文采用 InAs/GaSb II 类超晶格长/长波双色材料，分别基于干法刻蚀工艺路线和湿法腐蚀工艺路线，通过台面成型、表面钝化、开接触孔、电极制备和倒装互连等工艺，获得了面阵规模为 320 \times 256、像元中心距为 30 μm 的 InAs/GaSb II 类超晶格长/长波双色混成芯片。分别将其封入杜瓦，并在 77 K 下进行了性能测试。结果表明，用湿法工艺制备的器件信号弱，性能相对较差，不过有效像元率相对较高；用干法工艺制备的器件信号强，性能相对较好，但盲元率相对较高，电极台阶覆盖相对较差。该研究为 InAs/GaSb II 类超晶格双色焦平面器件的后续优化奠定了基础。然而目前制备的长/长波双色 InAs/GaSb II 类超晶格面阵器件还存在一些问题。比如，无论是用湿法工艺制备的器件还是用干法工艺制备的器件，其

红色通道伏安曲线的平坦区较短, 阻抗值较小, 各项性能指标明显比蓝色通道差, 后续还需要进一步优化。

参考文献

- [1] 马晓乐, 郭杰, 郝瑞亭, 等. InAs/GaSb 超晶格/GaSb 体材料中短波双色红外探测器 [J]. **红外与毫米学报**, 2021, **40**(5): 569–575.
- [2] 马晓乐. GaSb 基双色红外探测材料与器件研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [3] 蔡毅. 双色红外探测器的现状与发展 [J]. **红外技术**, 1997, **19**(5): 1–4.
- [4] 王国伟, 徐应强, 牛智川, 等. 新型低维结构铋化物红外探测器的研究与挑战 [J]. **中国科学: 物理学 力学 天文学**, 2014, **44**(4): 368–389.
- [5] 黄敏. 新型 InAs/GaAsSb II 类超晶格长波红外探测器研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2019.