

文章编号: 1672-8785(2023)03-0001-07

低损伤、高深宽比 II 类超晶格材料的 台面刻蚀技术研究

李景峰 刘 铭 李海燕 温 涛 赵成城 王 丹

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 采用双色单钢柱结构的 II 类超晶格红外探测器件在台面成型过程中加工难度大且易于产生损伤, 影响器件的性能。针对此问题进行了低损伤、高深宽比 II 类超晶格材料的台面刻蚀技术研究。首先建立一种损伤评判机制, 判断现有工艺刻蚀后材料是否发生反型。然后通过优化光刻胶厚度、变功率分步刻蚀的方式, 实现低损伤、高深宽比 II 类超晶格材料的台面刻蚀, 同时有效解决单次刻蚀深台面时易堆积生成物以及侧壁过于陡峭等工艺问题。台面中心间距为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 刻蚀深度超过 $8\text{ }\mu\text{m}$, 缝隙深宽比可达 2。基于此台面制备的器件具有明显的双阻抗特征。其中, 长波阻抗峰值为 $100\text{ M}\Omega$, 并且 $I-V$ 曲线中长波侧的平坦区超过 100 mV 。从电学角度初步判断该器件具有双色探测的能力, 验证了本文工艺的可行性。

关键词: II 类超晶格; 低损伤; 刻蚀技术

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.03.001

Study on Mesa Etching Technology for Type-II Superlattice Materials with Low Damage and High Aspect Ratio

LI Jing-feng, LIU Ming, LI Hai-yan, WEN Tao, ZHAO Cheng-cheng, WANG Dan

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The fabrication of type-II superlattice infrared detectors with a dual color single indium column structure is difficult and prone to damage during the mesa forming process, which affects the performance of the device. In order to solve this problem, the mesa etching technology for type-II superlattice materials with low damage and high aspect ratio was studied. Firstly, a damage judgment mechanism is established to determine whether the material has inversion after etching in the existing process. By optimizing the photoresist thickness and variable power step etching, the mesa etching of type-II superlattice materials with low damage and high aspect ratio is realized, while effectively solving the process problems such as easy accumulation of products and excessively steep sidewalls in single etching of deep mesas. The distance between centers of mesa is $20\text{ }\mu\text{m}$. Etching depth exceeds $8\text{ }\mu\text{m}$. The gap depth to width ratio can reach 2. The devices subsequently fabricated on this mesa have significant dual impedance characteristics, with a peak long wave impedance of $100\text{ M}\Omega$, and a flat region on the long wave side of the $I-V$ curve exceeding 100 mV . From the perspective of elec-

收稿日期: 2022-11-07

作者简介: 李景峰(1990-), 男, 吉林梅河口人, 博士, 主要从事红外探测器设计及制备工艺开发研究。

E-mail: ljf_0902@163.com

tricity, it is preliminarily judged that the detector has the ability of dual color detection, and the feasibility of this process is verified.

Key words: type-II superlattice; low damage; etching technique

0 引言

用 II 类超晶格材料制备的红外探测器具有暗电流低、响应波段易于调控、均匀性易于控制等突出优点^[1], 为下一代红外探测器的发展提供了新方向。双色 II 类超晶格红外探测器可比单色探测器得到更多的信息, 具有更广泛的应用前景^[2-3]。现有双色探测器的器件成型路线分为单钢柱技术路线与双钢柱技术路线^[4-5]。其中, 单钢柱技术路线的工艺步骤相对简单, 易于实现。但单钢柱结构刻蚀过程中通常需要刻蚀较深的台面, 这对现有的干法刻蚀工艺提出了更高的要求^[6-8]。本文在现有刻蚀工艺的基础上, 进行了刻蚀损伤反型评判、光刻胶厚度和分步刻蚀等工艺的摸索, 实现了低损伤、高深宽比 II 类超晶格材料的台面刻蚀。

1 实验

刻蚀 II 类超晶格台面时, 将正性光刻胶用作掩膜。对 II 类超晶格材料进行干法刻蚀。刻蚀采用感应耦合等离子体 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 刻蚀机。刻蚀时, BCl_3 气体为刻蚀气体, Ar 气体为惰性气体。Ar 气既可保证工艺安全进行, 又可通过调节其气量来控制

反应速率。由于实现双色探测的技术路线采用单钢柱器件结构, 所以进行一次台面刻蚀成型。采用分步刻蚀的方案实现深台面的刻蚀。台面中心间距为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 设计台面宽度为 $15\text{ }\mu\text{m}$, 槽宽为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。在台面成型且经过表面处理后, 继续钝化、光刻电极孔、刻蚀电极孔、光刻电极和蒸镀电极, 完成器件制备。由于该方案进行了深台面刻蚀 (深度超过 $8\text{ }\mu\text{m}$), 因此需要一种评估方式来验证经刻蚀工艺后材料是否发生了反型损伤。图 1 为刻蚀工艺及后续器件制备的流程图。

2 结果与讨论

在同一片 II 类超晶格材料的对称位置上制备两个相同的电极 (见图 2(a) 的上半区域), 然后测试两者之间的 $I-V$ 及阻抗特性曲线 (结果见图 2(b))。图 2 中, 蓝色曲线为 $I-V$ 特性曲线, 红色曲线为阻抗曲线。由于电极与材料之间的功函数不匹配, 存在肖特基势垒, 所以 $I-V$ 特性曲线为典型的肖特基接触的特征曲线。由阻抗特性曲线可知, 左右势垒对称, 因此两侧电极下的材料为均匀一致的材料, 属于同种状态的半导体。随后将左侧一半的材料与材料表面的电极一起用光刻胶遮住, 并将右侧

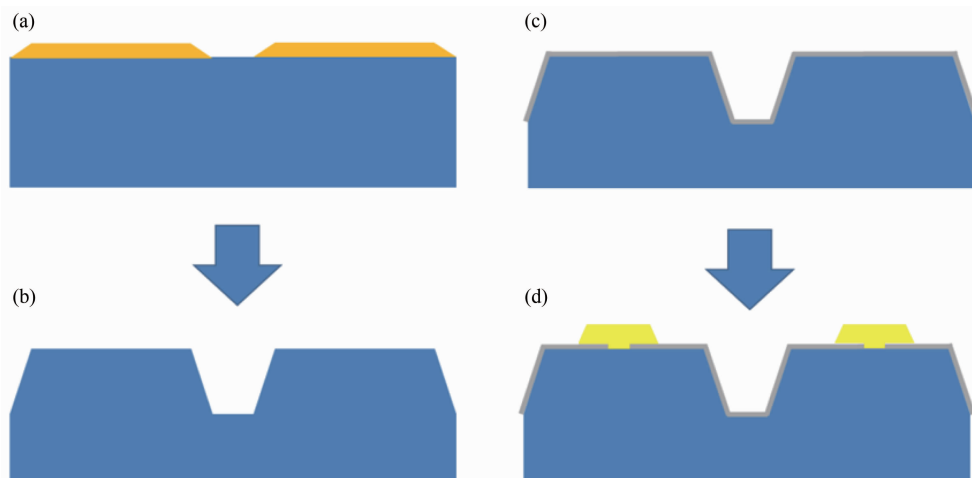


图 1 工艺制备流程图

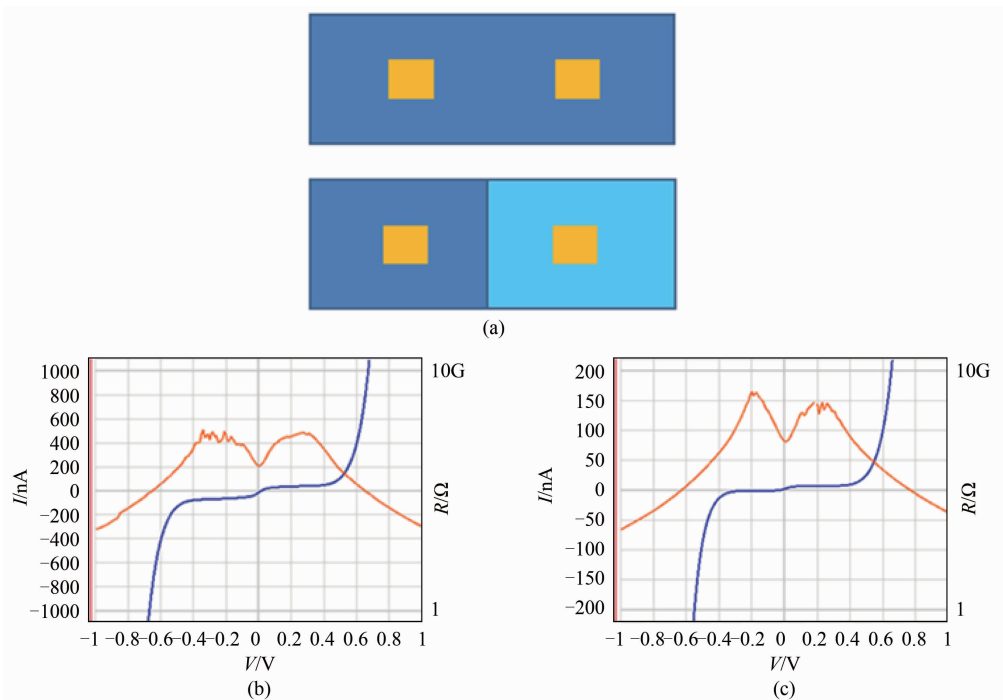


图 2 材料损伤反型的判别方法: (a) 器件结构示意图; (b) 刻蚀前的 $I-V$ 及阻抗特性曲线; (c) 刻蚀后的 $I-V$ 及阻抗特性曲线

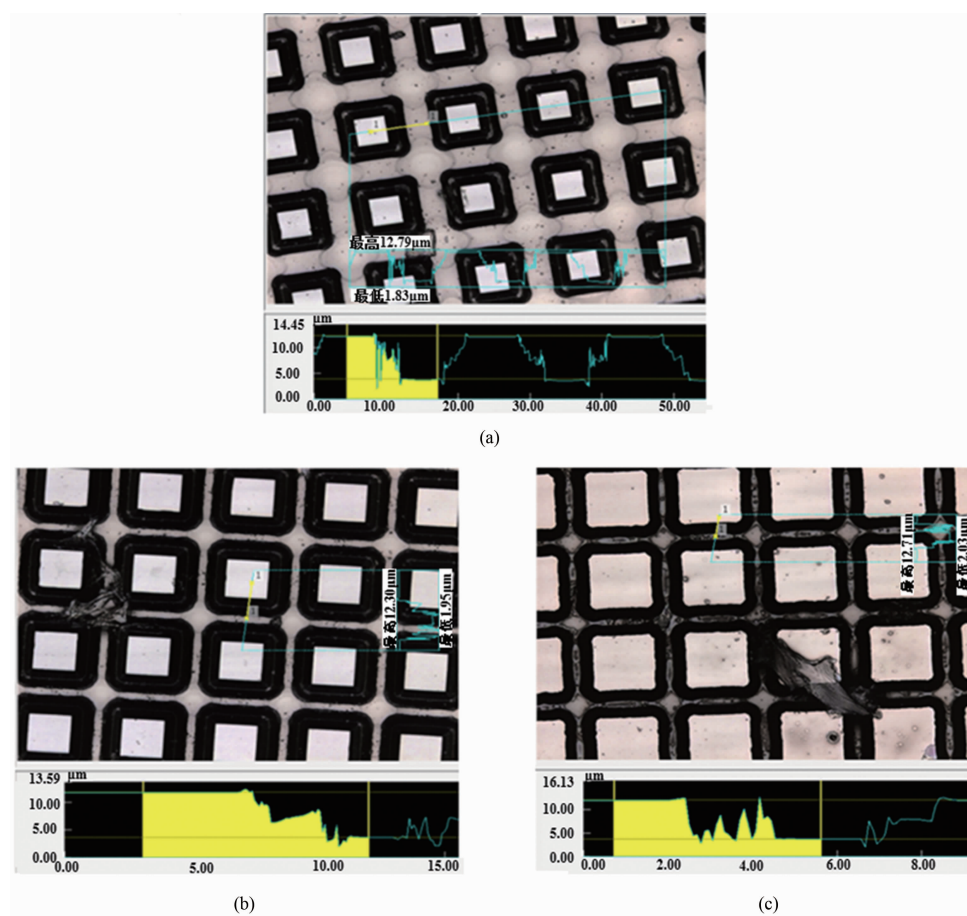


图 3 不同胶厚的掩膜对台面形貌的影响

电极用湿化学处理的方式漂掉。然后对材料的右半部分进行干法刻蚀。刻蚀后重新在右侧生长与左侧对称的新电极，并重新测试两侧电极之间的 $I-V$ 及阻抗特性曲线(结果见图 2(c))。可以看出，与刻蚀之前相比，该曲线特征没有明显的变化，说明现有的刻蚀技术没有使 II 类超晶格材料出现反型。

本文选用光刻胶作为干法刻蚀的硬掩膜。由于光刻胶的边缘有倾角，而且不同厚度光刻胶的倾角不同，因此将不同厚度的光刻胶作为硬掩膜，刻蚀相同深度的材料时，产生的深台面形貌会有所差异。我们可采用所制备探测器光敏面的占空比来衡量其具体差异。台面间距为 $20\ \mu\text{m}$ 。刻蚀 $8\ \mu\text{m}$ 深度后，擦去表面的光刻胶并进行形貌表征。采用的仪器为激光共聚焦显微镜。如图 3(a)~图 3(c)所示，光刻胶不断加厚，且将较厚光刻胶作为掩膜时刻蚀的台面会使器件有较高的占空比，同时也能有效隔离像元。由于深度测试的方式是在刻蚀后的芯片表面上直接用蘸有丙酮的棉签擦拭，所以会有少量残胶残留在结构的台面缝隙中，但台面整体的形貌并不受残留光刻胶的影响。因此，该方法不影响对刻蚀形貌的判断。

在确定最佳的刻蚀掩膜厚度后，为了获得良好形貌的台面，还需控制孔底生成物的生成，并在保证台面足够大的同时有效分离像元。于是采用变功率刻蚀的策略对 II 类超晶格深台面进行刻蚀。主要改变对刻蚀形貌影响较大的射频(Radio Frequency, RF)功率，因其大小会影响刻蚀能量的强弱。固定刻蚀 $8\ \mu\text{m}$ 左右，其中前 $4\ \mu\text{m}$ 为刻蚀的第一步，后 $4\ \mu\text{m}$ 为刻蚀的第二步。如图 4 所示，总共采用三种分步刻蚀的方式。

如图 4(a)所示，刻蚀前 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较小的 RF 功率，后 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较大的

RF 功率；如图 4(b)所示，刻蚀前 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较大的 RF 功率，后 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较小的 RF 功率；如图 4(c)所示，刻蚀前 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较大的 RF 功率，后 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较大的 RF 功率。可以看出，前 $4\ \mu\text{m}$ 采用不同的 RF 功率刻蚀后，台面面积并没有明显变化，而台面到底的斜坡宽度有一定的差异。采用较小的 RF 功率时，台面斜坡水平方向的宽度为 $1.6\ \mu\text{m}$ ；而采用较大的 RF 功率时，台面斜坡水平方向的宽度分别为 $0.9\ \mu\text{m}$ 和 $0.7\ \mu\text{m}$ 。后 $4\ \mu\text{m}$ 刻蚀后，图 4(a)中台面斜坡水平方向的宽度为 $1.8\ \mu\text{m}$ ，图 4(b)中台面斜坡水平方向的宽度为 $1.8\ \mu\text{m}$ ，图 4(c)中台面斜坡水平方向的宽度为 $1.2\ \mu\text{m}$ 。可见分步刻蚀中先采用较小的 RF 功率，还是先采用较大的 RF 功率，并不会影响斜坡宽度。全过程采用较大 RF 功率刻蚀形成的台面斜坡宽度只有 $1.2\ \mu\text{m}$ 。台面斜坡过于陡峭，不便进行电极钝化等工艺。而先采用较小 RF 功率、后采用较大 RF 功率的工艺，则可有效避免深台面刻蚀过程中生成物易于堆积的问题，同时还可规避台面过于陡峭进而影响其他工艺的问题。因此，在后续刻蚀中选择先采用较小 RF 功率、后采用较大 RF 功率的工艺。

在确定掩膜厚度及刻蚀工艺后，在正式工艺中进行低损伤、深台面的刻蚀。刻蚀形貌的不同放大倍数扫描电镜图谱如图 5 所示。可以看出，大规模焦平面阵列制备的台面形貌高度均一。大规模阵列中有效分离像元，台面底部较为光滑，侧壁没有明显的毛刺，台面没有产生生成物。现有工艺可以实现大面阵、深台面的刻蚀，为制备大面阵 II 类超晶格焦平面探测器提供结构保障。刻蚀深度超过 $8\ \mu\text{m}$ ，缝隙深宽比可达 2，实现了高深宽比刻蚀。

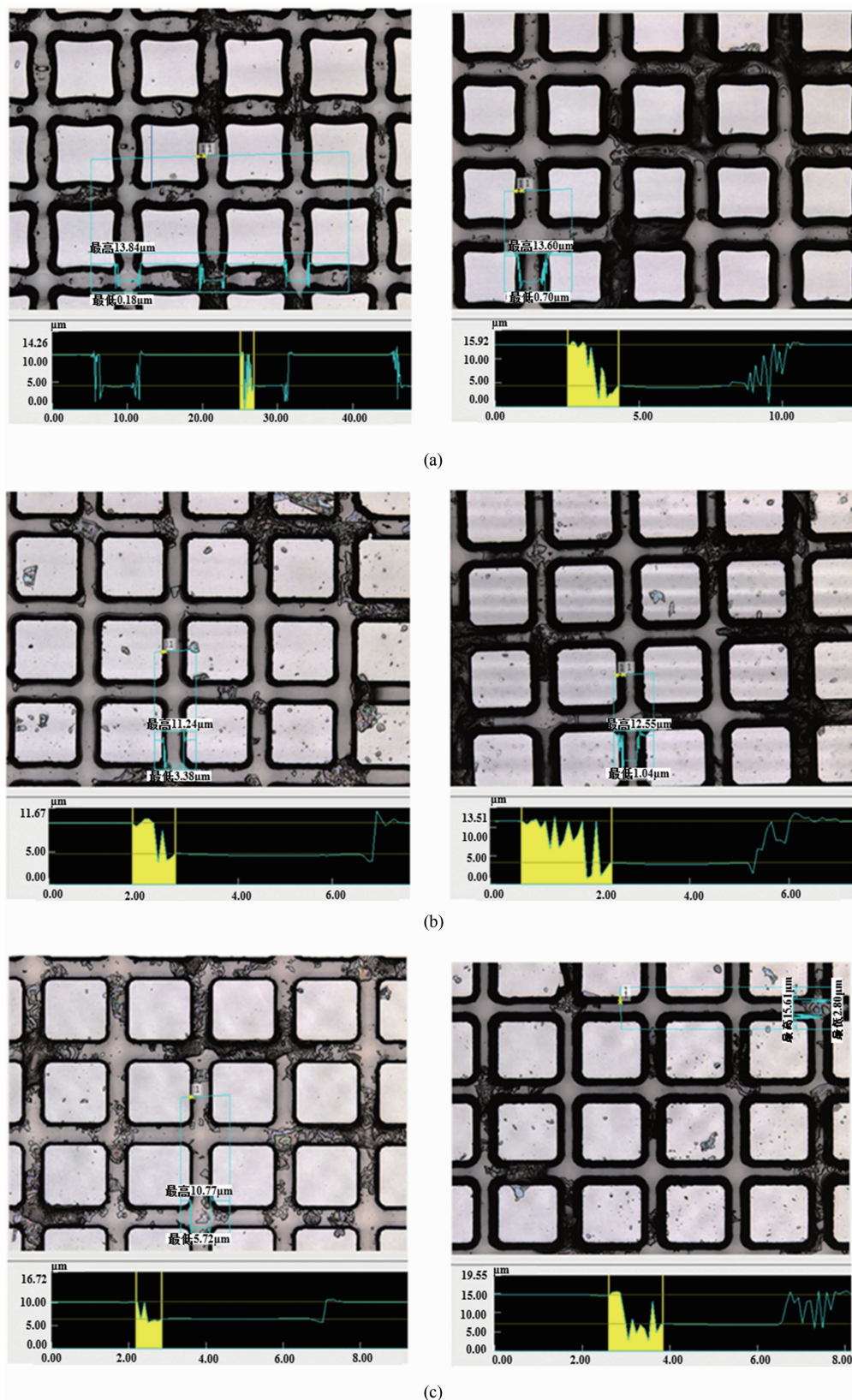


图 4 变功率分步刻蚀的台面形貌: (a)刻蚀前 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较小的 RF 功率, 后 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较大的 RF 功率; (b)刻蚀前 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较大的 RF 功率, 后 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较小的 RF 功率; (c)刻蚀前 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较大的 RF 功率, 后 $4\ \mu\text{m}$ 深度时采用较大的 RF 功率

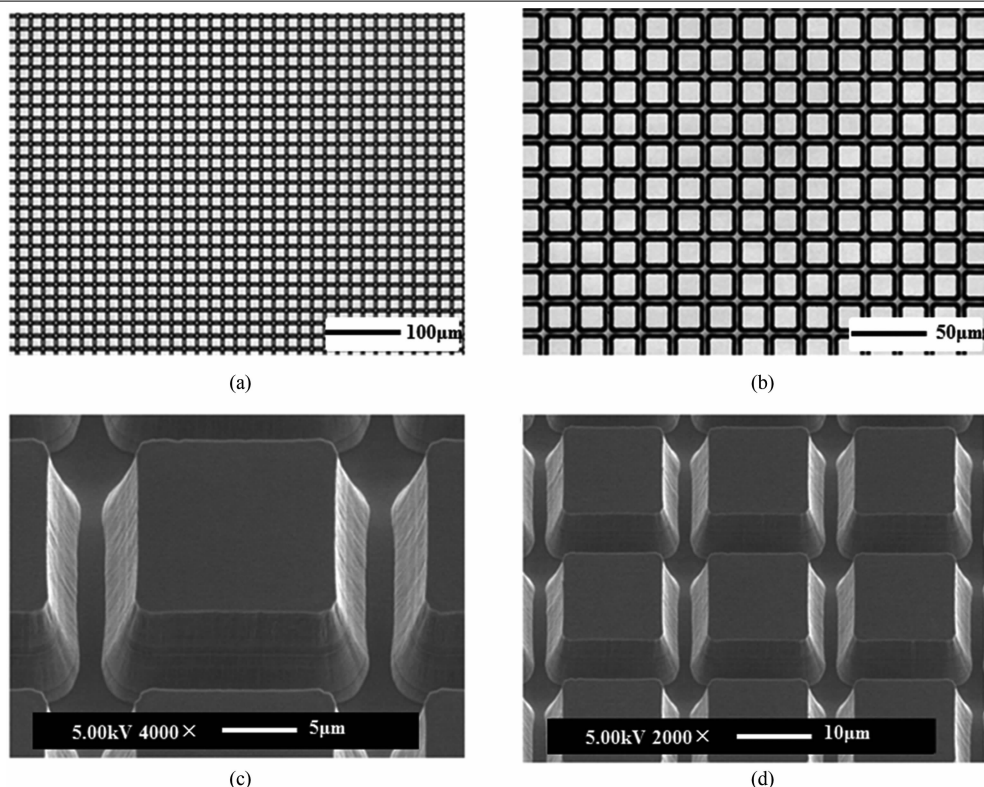


图 5 台面刻蚀后的扫描电镜图谱: (a) 100 μm ; (b) 50 μm ; (c) 5 μm ; (d) 10 μm

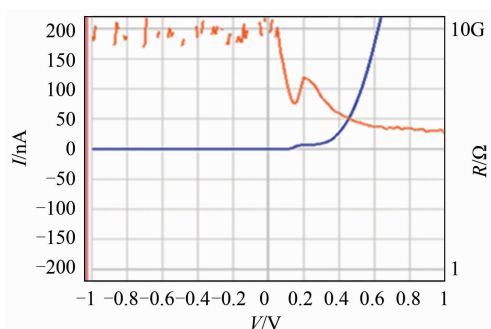


图 6 所制备器件的 $I-V$ 及阻抗测试结果

在中/长波双色焦平面探测器的制备过程中,刻蚀台面成型后,通过钝化和电极生长等获得焦平面器件。对器件进行了 $I-V$ 及阻抗测试(结果见图 6)。从图 6 中可看出明显的双阻抗特征,其为实现双色结构的两个背靠背 np 结。结合相关材料组分结构的设计判断,左侧明显的阻抗曲线为中波响应结的阻抗曲线,右侧尖锐的阻抗峰为长波响应结的阻抗峰;中波一侧的阻抗峰值为 200 $\text{G}\Omega$,平坦区超过 1 V。刻蚀损伤对探测器长波性能的影响通常更大(与中波相比)。测试曲线显示,该器件也具有明显的长波阻抗(峰值达 100 $\text{M}\Omega$),且曲线中

长波侧的平坦区超过 100 mV。从电学角度可初步判断此探测器具有双色探测的能力。这进一步验证了低损伤、深台面刻蚀技术的可靠性。

3 结束语

本文采用对称电极 $I-V$ 测试的评判方式,实现了对刻蚀是否发生反型及高损伤的判断。然后通过优化光刻胶厚度和采用分步变功率刻蚀工艺,实现了低损伤、深台面的 II 类超晶格刻蚀。相比于传统的一步刻蚀,该方法有效避免了生成物堆积以及侧壁过于陡直等工艺问题,得到了具有双色特征的 $I-V$ 及阻抗特性曲线。所制备器件的长波阻抗峰值达 100 $\text{M}\Omega$,并且曲线中长波侧的平坦区超过 100 mV。这项技术为高质量大面阵双色 II 类超晶格探测器的制备提供了一种新方法。目前该研究已应用于 640×512 元(20 μm)中/长波双色 II 类超晶格红外探测器的制备。后续研究中,随着像元间距的缩小,需对掩膜的抗刻蚀性作进一步研究以保障刻蚀质量。

参考文献

- [1] 李俊斌, 李东升, 吴圣娟, 等. 二类超晶格红外焦平面探测器的研究进展 [J]. 红外技术, 2021, **43**(11): 1034–1043.
- [2] 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, **25**(2): 56–59.
- [3] 蒋洞微, 徐应强, 王国伟, 等. 基于铋化物二类超晶格的多色红外探测器研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2020, **49**(12): 2211–2220.
- [4] Reibel Y, Chabuel F, Vaz C, et al. Infrared Dual Band Detectors for Next Generation [C]. SPIE, 2011, **8012**: 801238.
- [5] McEwen R K, Hipwood L, Bains S, et al. Dual Waveband Infrared Detectors Using MOVPE Grown MCT [C]. SPIE, 2019, **11002**: 1100218.
- [6] 许佳佳, 黄敏, 徐庆庆, 等. InAs/GaSb II 类超晶格台面 ICP 刻蚀研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2019, **38**(2): 171–174.
- [7] 郭杰, 郝瑞亭, 赵前润, 等. InAs/GaSb 超晶格红外探测器台面的 ICP 刻蚀研究 [J]. 功能材料, 2014, **45**(1): 1122–1128.
- [8] 陈永远, 邓军, 史衍丽, 等. InAs/GaSb 二类超晶格红外探测材料的 ICP 刻蚀 [J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 433–437.