

文章编号: 1672-8785(2025)07-0026-06

InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器 台面成型质量研究

王晓乾 刘 铭 倪宇鹏 李景峰 任 昂

(中国电子科技集团有限公司第十一所, 北京 100015)

摘 要: 以中长波双色 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器的深台面刻蚀为研究背景, 分析光刻坚膜工艺与深台面侧壁质量的关系。研究了不同坚膜温度对台面图形转印效果和台面侧壁成型质量的影响, 经优化得到了最佳的坚膜工艺。将光滑侧壁超晶格中长波双色光敏芯片与读出电路互连, 并将其封装进杜瓦内; 通过液氮降温至 77 K, 然后进行组件测试。实验结果表明, 中长波双色超晶格材料以 AZ4620 型光刻胶为图形掩膜, 梯度升温至 140 °C 坚膜后, 通过干法刻蚀成型获得了具有光滑侧壁的台面结器件。组件测试结果表明, 光滑侧壁可以有效降低组件的噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)、盲元率和非均匀性。

关键词: 光刻; 台面成型; 光滑侧壁

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.07.004

Study on the Mesa Forming Quality of InAs/GaSb Type-II Superlattice Infrared Detector

WANG Xiao-qian, LIU Ming, NI Yu-peng, LI Jing-feng, REN Ang

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: Taking the deep mesa etching of medium- and long-wave two-color InAs/GaSb type-II superlattice infrared detector as the research background, the relationship between the photolithographic solid-film process and the quality of the deep mesa sidewall is analyzed. The influence of different solid-film temperatures on the graphic transfer effect of the mesa pattern and the quality of the mesa sidewall forming is studied, and the best solid-film process is obtained through optimization. The superlattice medium- and long-wave two-color photo-sensitive chip with smooth sidewalls is interconnected with the readout circuit and packaged into the dewar; it is cooled to 77 K by liquid nitrogen, and then the component test is carried out. The experimental results show that the medium- and long-wave two-color superlattice material uses AZ4620 photoresist as a pattern mask, and after a gradient temperature increase to 140 °C for solid-film, a mesa junction device with smooth sidewalls is obtained by dry etching. The module test results show that the smooth sidewall can effectively reduce the noise equivalent temperature difference (NETD), blind pixel rate and non-uniformity of the module.

Key words: lithography; mesa forming; smooth sidewall

收稿日期: 2024-11-20

作者简介: 王晓乾(1996-), 男, 河北保定人, 硕士, 主要从事 II 类超晶格红外探测器器件工艺及性能研究。E-mail: wxq665328@163.com

0 引言

InAs/GaSb II 类超晶格材料是用于红外探测器研制的热点材料。该材料由不同厚度的 InAs 和 GaSb 交替生长而成。基于成熟的分子束外延技术, 可实现大尺寸超晶格材料均匀生长, 推动了大面阵 II 类超晶格红外探测器的蓬勃发展^[1-4]。通过堆叠不同厚度的 InAs 与 GaSb, 可调控超晶格材料的有效禁带宽度, 从而实现红外探测波长在 $3 \sim 30 \mu\text{m}$ 连续可调^[5]。

本文研究生长在 n 型 GaSb 衬底上的 $\text{P}\pi\text{MN-NM}\pi\text{P}$ 结构中长波双色超晶格探测器。台面结红外探测器采用光刻-干法刻蚀工艺制备。首先将涂敷在材料表面的光刻胶曝光, 利用显影液冲洗后形成图形掩模; 再经过合适的温度坚膜, 利用干法刻蚀完成台面的隔离成型。与平面结红外探测器相比, 台面结器件由于需要隔离成型, 具有较大的侧壁表面积; InAs 和 GaSb 同属于极易被氧化的物质, 在工艺过程中与空气接触形成可导电的单质 Sb, 导致在侧壁形成漏电通道^[6]; 接触式曝光工艺会在光刻胶掩模图形边缘留下明显的衍射纹, 干法刻蚀工艺后会被放大, 使得台面侧壁呈现凹凸不平的纤维状, 进一步增大台面结的侧壁表面积。与其他体材料不同, 超晶格台面侧壁还包含数微米的异质断层, 容易产生悬挂键和电势缺陷^[7-8]。综上所述, 超晶格台面的侧壁往往处于非常复杂的状态, 尽管在结构设计时通过引入各种势垒用于降低超晶格暗电流, 但表面漏电依然是超晶格探测器不得不重视的暗电流来源。

本实验通过改善光刻胶掩模图形质量, 提高台面结构侧壁的光滑度, 减少侧壁表面积, 从而减少侧壁悬挂键和电势缺陷; 另外还可以改善钝化膜附着效果以减少漏电。文中主要研究 AZ4620 型光刻胶作为图形掩模, 在经过不同坚膜工艺后, 干法刻蚀获得超晶格探测器台面的侧壁质量情况, 并对比了超晶格芯片与电路互连后封装进杜瓦内所形成组件的性能。

1 光刻胶选择

选用美国 Shipley 公司生产的 AZ4620 型正性光刻胶, 它具有分辨率高、可制备高深宽比台面、吸收系数小等特点。该光刻胶在较低的坚膜温度(一般低于 110°C)下可以保持图形的一致性; 而在高温(一般高于 140°C)下坚膜时, 它会发生热熔回流现象, 可以减少光衍射作用造成的台面边缘毛糙的情况。

2 光刻工艺设置

2.1 旋涂光刻胶

光刻胶的涂胶质量会影响图形的转印质量。设置低转速 500 r/min , 时间为 5 s ; 成膜转速为 3000 r/min , 时间为 40 s ; 截止缓冲转速为 500 r/min , 时间为 2 s 。匀胶完成后, 用黄光显微镜检查光刻胶的质量。结果表明, 无落渣, 无浮毛和胶泡。去除芯片边缘堆积的胶边后, 放在 110°C 热板上烘 3 min ; 用台阶仪测得胶厚度约为 $6.5 \mu\text{m}$ 。

2.2 对准曝光

对准曝光是光刻工艺中的重要部分。掩膜图形的线宽、光刻胶的厚度以及光刻胶的光敏特性决定光刻曝光剂量的大小。合适的曝光剂量对应着边界清晰的掩膜图形。针对固定的图形微结构, 设定不同的曝光剂量, 探究曝光剂量对图形转印质量的影响。实验采用红外探测器 $20 \mu\text{m}$ 中心距、 $5 \mu\text{m}$ 线宽的方形台面结构光刻板。曝光显影后采用奥林巴斯显微镜观察光刻图形。曝光显影后图形边界清晰, 测量台面之间的线宽为 $5.2 \mu\text{m}$, 说明曝光显影工艺具有高可靠性。

2.3 显影与坚膜

在显影过程中, 控制合适的显影液配比与时间, 达到去除曝光后改性光刻胶而不损伤台面边缘的效果。采用 AZ400K 作为去胶剂。去胶剂与水采用 $V(\text{AZ400K}):V(\text{H}_2\text{O})=1:3$ 的比例配合形成显影液, 在室温环境下显影 60 s 。在显影完成和镜检合格后进行坚膜。坚膜可以显著提高光刻胶的耐蚀性, 有效保障光刻图

形的刻蚀质量。

实验选择 GaSb 衬底和 II 类超晶格双色外延材料作为研究目标, 设置了不同温度梯度的坚膜工艺。详细的坚膜工艺如表 1 所示。坚膜完成后进行干法刻蚀, 刻蚀气体为 Cl_2/BCl_3 , 刻蚀深度约为 $8\text{ }\mu\text{m}$ 。刻蚀完成后, 采用赛默飞的聚焦离子束扫描电镜 (Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscope, SEM-FIB) 观察台面成型和侧壁质量。II 类超晶格材料完成台面成型后, 继续红外探测器工艺流片, 流片完成后测试红外探测器的 $I-V$ 曲线和组件性能。

3 结果与讨论

图 1 为 AZ4620 型光刻胶掩膜的显微图像。可以看出, 在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温坚膜时, 光刻胶未发生热熔回流, 掩膜图形与光刻版设计图形的一致性高。放大观察图形发现, 图形的边缘较毛糙。因为在曝光过程中, 紫外光在通过狭缝时发生衍射, 狭缝边缘不应曝光的光刻胶吸收了衍射的紫外光, 显影后造成边缘参差不齐。当坚膜温度升高至 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时, 光刻胶发生热熔回流, 掩模图形产生微小形变, 在一

定程度上削弱了曝光时衍射造成的影响。这有望改善台面的侧壁成型质量。

图 2 为 GaSb 衬底表面胶掩膜在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温坚膜后刻蚀成型的扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 图。从图 2(a) 中可以看出, 未发生热熔回流 of 胶掩膜在成型后台面仍为直角方形, 说明图形转移效果好。从倾斜 45° 的图 2(b) 中可以看出, 台面的侧壁呈现纤维组织状, 说明紫外光的衍射作用使掩膜图形侧壁较粗糙, 经干法刻蚀后, 图形边缘的粗糙导致台面侧壁呈纤维状。

图 3 为利用梯度升温坚膜工艺在 GaSb 衬底台面刻蚀成型后的 SEM 图。可以看出, GaSb 衬底台面上表面均为圆角方形。胶掩膜发生热熔回流时, 图形的四角和侧边会趋于平滑。当坚膜温度上升到 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 图形呈现近圆形。继续升温至 $180\text{ }^\circ\text{C}$, 光刻胶图形收缩加剧, 台面尺寸进一步变小。对于台面型红外探测器, 小的占空比不利于面阵规格红外探测器的探测性能。当坚膜温度升高到 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 光刻胶发生热变性, 刻蚀完成后台面边缘处的残

表 1 AZ4620 型光刻胶坚膜工艺

坚膜工艺	工艺 1	工艺 2	工艺 3	工艺 4
工艺过程	$100\text{ }^\circ\text{C}/40\text{ min}$	$100\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ min};$ $110\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min};$ $120\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min};$ $140\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min}$	$100\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ min};$ $110\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min};$ $120\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min};$ $140\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min};$ $160\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min}$	$100\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ min};$ $110\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min};$ $120\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min};$ $140\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min};$ $160\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min};$ $180\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min}$

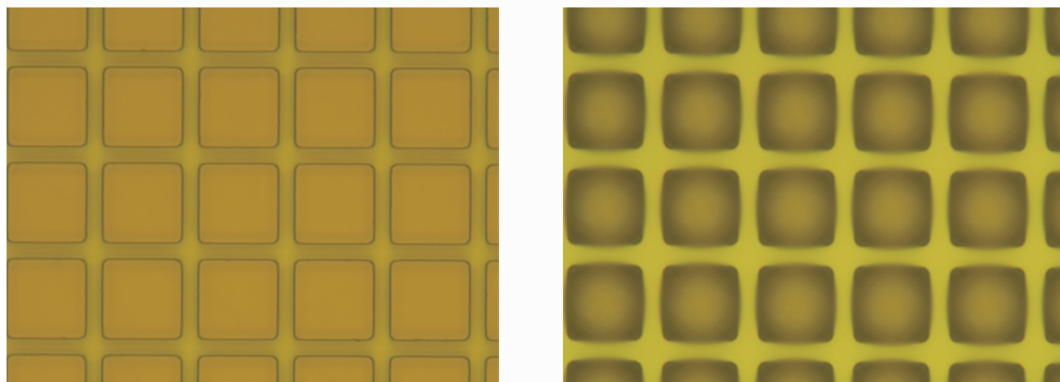


图 1 AZ4620 型光刻胶掩膜的显微图像

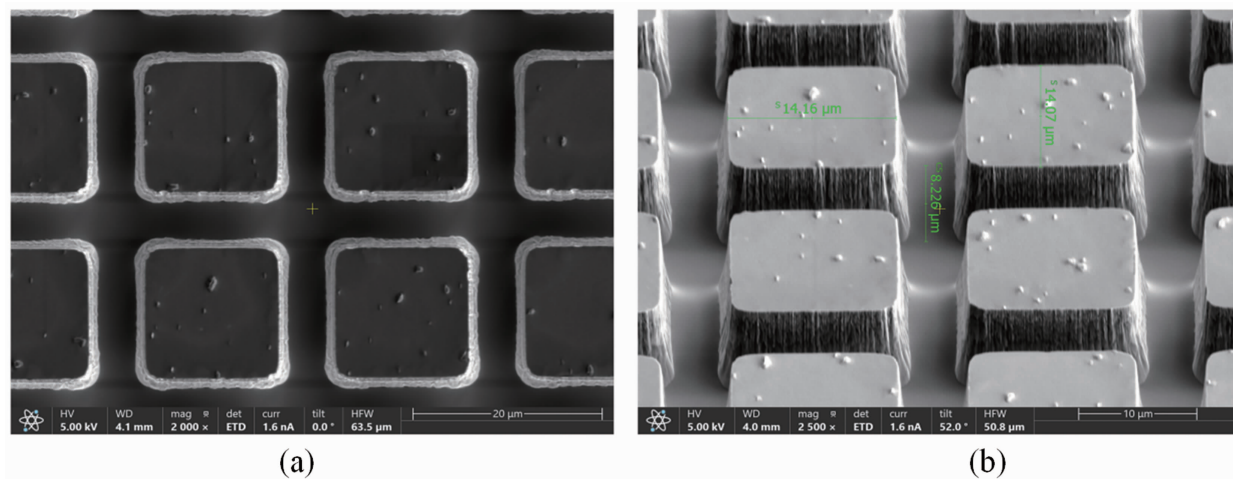


图 2 掩膜图形在 100 °C 恒温坚膜后台面刻蚀成型的 SEM 图

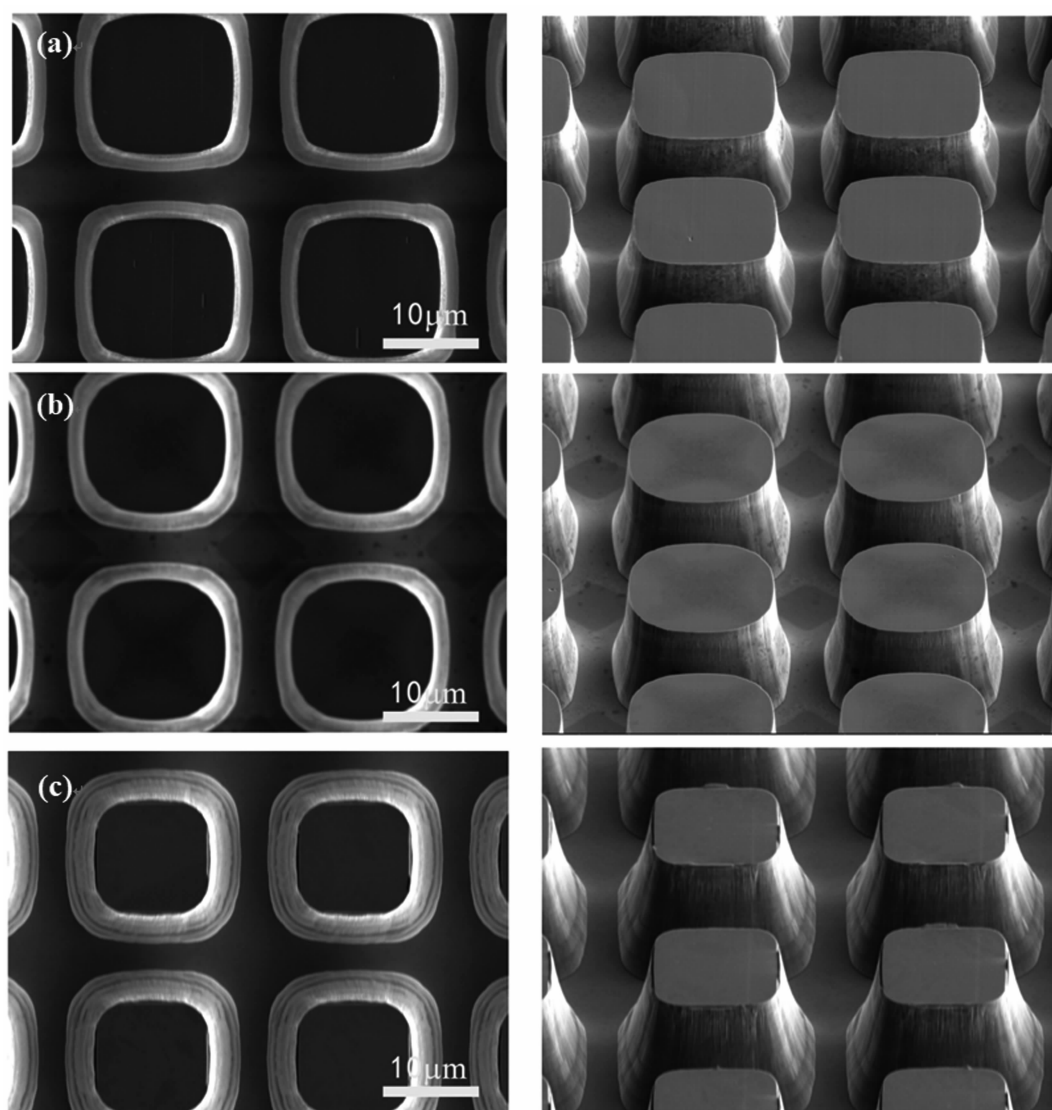


图 3 不同温度坚膜后台面刻蚀成型的 SEM 图: (a) 坚膜温度为 140 °C; (b) 坚膜温度为 160 °C; (c) 坚膜温度为 180 °C

胶难以去除。因此, AZ4620 型光刻胶的坚膜温度确定为 140°C , 此时可以获得较大的有效台面面积以及侧壁光滑的深台面结构。

使用不同坚膜温度的胶掩膜对 II 类超晶格中长波双色材料进行台面刻蚀成型, 完成器件前道工艺后进行扫描电镜成像。成像结果如图 4 所示。可以看出, 胶掩膜成型的 II 类超晶格双色光敏芯片结构深度约为 $8.6\text{ }\mu\text{m}$ 。双色超晶格深台面刻蚀成型效果与 GaSb 衬底具有相似的结果。通过 100°C 恒温坚膜制备的台面图形与光刻版更接近, 140°C 梯度坚膜后的成型结果更接近圆方形。从台面的侧壁成型效果看, 100°C 恒温坚膜台面侧壁及覆盖的钝化层呈现锯齿状, 140°C 梯度坚膜台面侧壁和钝化层光滑。光滑侧壁的台面更有利于钝化层的覆盖。对于用相同钝化工艺制备的钝化层, 光滑侧壁的钝化层厚度约为 323 nm , 毛糙侧壁的钝化层厚度约为 270 nm 。

将完成器件工艺的中长波双色超晶格光敏

芯片放置在 Agilent 公司生产的 B1500A 型低温探针台系统上进行电学特性测试。用于引出的单个像元面积为 $256\text{ }\mu\text{m}^2$, 利用液氮将温度降低到 77 K 。测得双色器件随偏压变化的电流密度-电压(J - V)曲线, 并通过计算得出图 5 所示的阻抗面积乘积-电压(R_0A - V)曲线。可以看出, 对于中波器件来说, 工作偏压为 200 mV 时, 测得的电流密度为 $3.4\times 10^{-2}\text{ A/cm}^2$, 差分电阻与面积乘积 R_0A 值为 $5.6\times 10^3\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。对于长波器件来说, 工作偏压为 -170 mV 时, 测得的电流密度为 2.1 A/cm^2 , 差分电阻与面积乘积 R_0A 值为 $11\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。中波二极管的平坦区较长, 达到 1 V 以上; 长波二极管的平坦区较短, 约为 300 mV 。

将完成器件前道工艺的光敏芯片与读出电路倒装互联后制成探测器芯片, 并将其封装进微杜瓦内。微杜瓦的冷屏 F 数为 2, 制冷机降温到 70 K 。先后将 20°C 黑体和 35°C 黑体对准微杜瓦的测试窗口, 通过焦平面测试系统统计

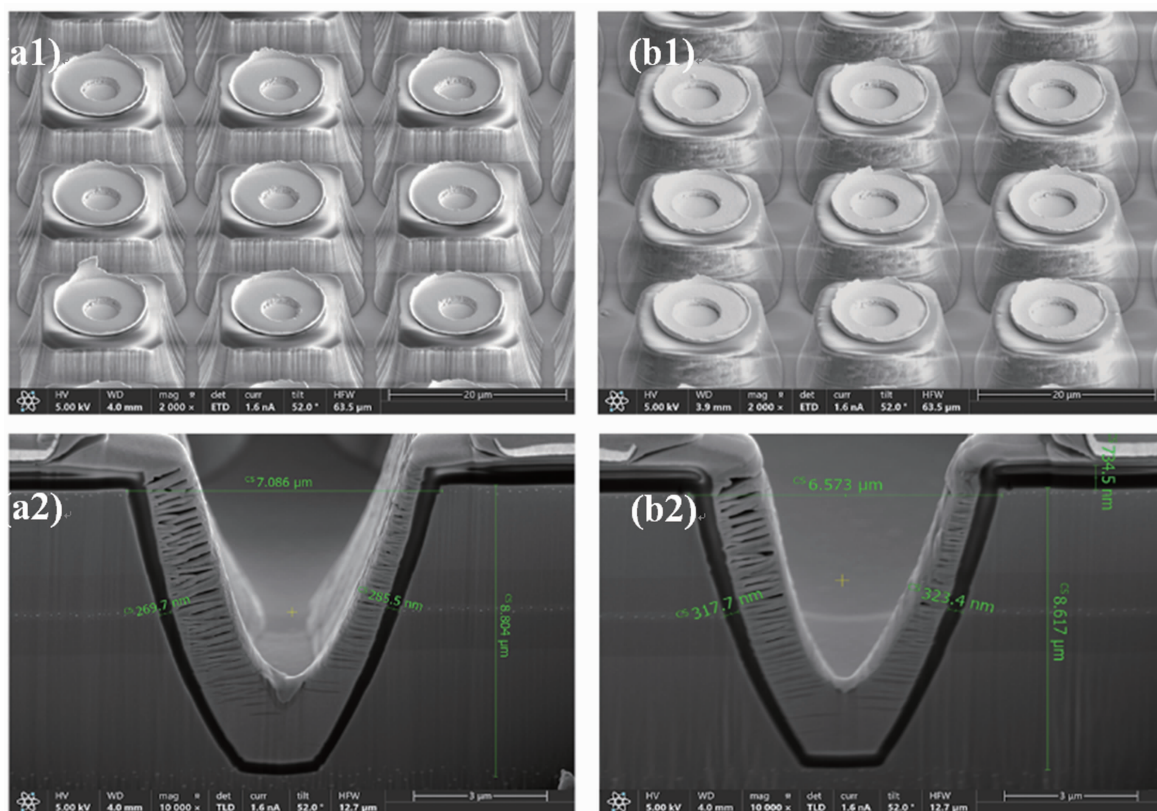


图 4 不同光刻胶台面成型后的侧壁质量及钝化层覆盖情况: (a) 100°C 恒温坚膜; (b) 140°C 梯度坚膜

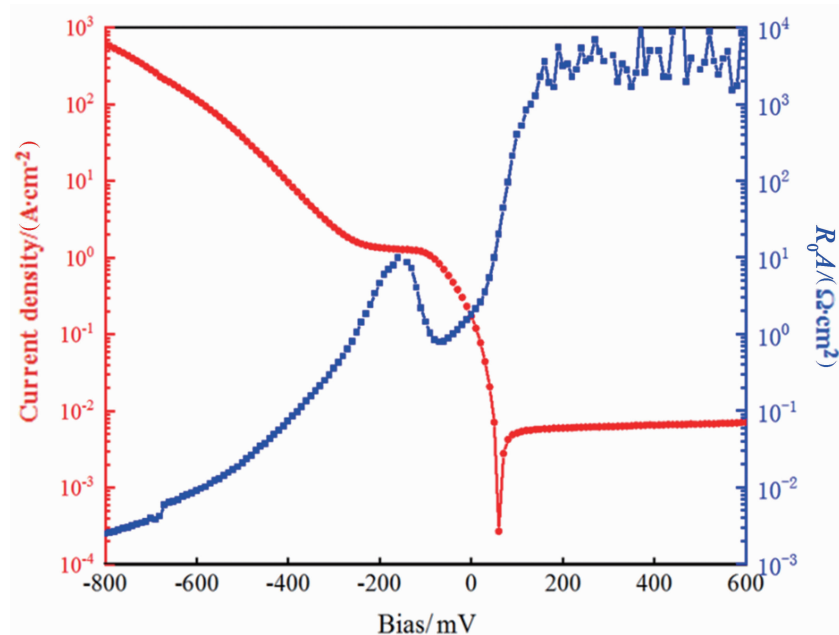


图 5 采用 AZ4620 胶掩膜成型制备的红外探测器的电学特性测试结果

表 2 采用 AZ4620 胶掩膜成型制备的中长波双色红外探测器组件的测试结果

测试参数	中波		长波	
	100 °C	140 °C	100 °C	140 °C
NETD/mK	22.6	18.35	24.8	17.26
盲元率/%	1.25	0.88	1.66	0.89
非均匀性/%	8.76	2.43	6.55	1.26

全面阵各像元的响应信号。设置积分时间和偏置电压, 计算出探测器的性能参数, 包括噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)、盲元率和响应非均匀性等。测试结果见表 2。

4 结束语

采用 AZ4620 型光刻胶作为图形掩膜, 梯度升温至 140 °C 坚膜后, 通过干法刻蚀成型获得了侧壁光滑的台面结红外探测器。电学特性测试结果显示, 中波二极管的 R_0A 值达到 $5.6 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 长波二极管的 R_0A 值达到 $11 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 证明该器件具有良好的电学性能。与电路互连后测试组件性能, 发现具有光滑侧壁的组件在有效像元率、NETD 和响应非均匀性等方面均有明显的提升效果。这对超晶格双色红外探测器的研究具有一定的参考意义。下一步将从器件工艺的角度继续提升像元响应的均匀性, 提高探测器的综合性能。

参考文献

- [1] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(3): 136–154.
- [2] Osbourn G, Dawson L, Biefeld R, et al. III-V strained layer superlattices for long-wavelength detector applications: Recent progress [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1987, **5**(5): 3150–3156.
- [3] Rogalski A, Kopytko M, Martyniuk P. InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: Three decades of development [C]. *SPIE*, 2017, **10177**: 1017715.
- [4] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M, et al. Type-II superlattice photodetectors versus HgCdTe photodiodes [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2019, **68**: 100228–100236.

(下转第 48 页)

- moving target indication: Processing approaches and system concepts [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, **8**(11): 5015–5029.
- [2] Knoll F, Holler M, Koesters T, et al. Joint MR-PET reconstruction using a multi-channel image regularizer [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2017, **36**(1): 1–16.
- [3] Rivenson Y, Göröcs Z, Günaydin H, et al. Deep learning microscopy [J]. *Optica*, 2017, **4**(11): 1437–1443.
- [4] Nguyen H, Agbinya J I, Devlin J. FPGA-based implementation of multiple modes in near field inductive communication using frequency splitting and MIMO configuration [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2015, **62**(1): 302–310.
- [5] Izquierdo A, Villacorta J J. Design and evaluation of a scalable and reconfigurable multi-platform system for acoustic imaging [J]. *Sensors*, 2016, **16**(10): 1671.
- [6] Kang M, Kim J, Kim J M. An FPGA-based multicore system for real-time bearing fault diagnosis using ultrasampling rate AE signals [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(4): 2319–2329.
- [7] Bian H, Guo H, Chang S, et al. Hardware Design of Multichannel Video Acquisition System Based on FPGA [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, **452**(4): 042145.
- [8] 芮东峰, 宗德. 基于 FPGA 的视频拼接系统的硬件设计 [J]. *应用科技*, 2013, **40**(6): 63–68.
- [9] 蔡芸. 基于 Jacinto 6 的多屏显示车载终端系统设计 [D]. 苏州: 苏州大学, 2017.

(上接第 31 页)

- [5] Kinch M A. Fundamentals of Infrared Detector Materials [M]. Bellingham: SPIE Press, 2007.
- [6] Sidor D E, Savich G R, Wicks G W. Surface Leakage Mechanisms in III-V Infrared Barrier Detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, **45**(9): 4663–4667.
- [7] 张利学, 孙维国, 吕衍秋, 等. InAs/GaSb II 类超晶格材料台面腐蚀 [J]. *红外与毫米波学报*, 2014, **33**(5): 472–476.
- [8] 张翔宇, 蒋洞微, 贺雯, 等. InAs/GaSb 超晶格台面刻蚀工艺研究综述 [J]. *航空兵器*, 2023, **31**(5): 41–49.