

文章编号: 1672-8785(2023)11-0006-07

低损伤碲镉汞长波红外焦平面探测器 电极接触孔刻蚀技术研究

李景峰 刘世光 宁 提 刘 铭 王 丹

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 长波碲镉汞材料受结构、组分等因素影响。在制备器件过程中, 刻蚀电极接触孔易发生材料损伤, 影响芯片的成像性能。利用现有电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)设备刻蚀长波碲镉汞芯片电极接触孔, 采用分步刻蚀以避免损伤。该方法虽可提高芯片的成像质量, 但效率低, 难以应用于大规模生产。为了提高刻蚀效率和实现器件大规模制备, 通过对 ICP 刻蚀机上下电极射频功率的协同优化, 开发出长波碲镉汞芯片电极接触孔一次成型工艺。经中测验证, 探测器(长波 320×256 , 像元中心间距为 $30 \mu\text{m}$)的盲元率仅为 0.26% 。该工艺能够实现低损伤电极孔刻蚀, 可推广到大批量长波红外芯片制备。

关键词: 长波; 碲镉汞; 损伤; 刻蚀技术

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.11.002

Study on Electrode Contact Hole Etching Technique of Long-Wave Infrared HgCdTe Focal Plane Detectors with Low Damage

LI Jing-feng, LIU Shi-guang, NING Ti, LIU Ming, WANG Dan

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

Abstract: Long-wave mercury cadmium telluride materials are influenced by factors such as structure and composition. During the preparation of devices, material damage can occur to the etched electrode contact holes, which affects the imaging performance of the chip. The existing inductively coupled plasma (ICP) equipment is used to etch the electrode contact holes of long-wave mercury cadmium telluride chips, and step-by-step etching is used to avoid damage. Although this method can improve the imaging quality of chips, its efficiency is low and it is difficult to apply to large-scale fabrication. In order to improve etching efficiency and achieve large-scale device preparation, a one-step forming process is developed for the electrode contact holes of long-wave mercury cadmium telluride chips by co-optimizing the RF power of the upper and lower electrodes of the ICP etching machine. After verification by intermediate testing, the blind element rate of the long wave detector (320×256 pixels with a pixel pitch of $30 \mu\text{m}$) is only 0.26% . This process can achieve low damage electrode hole etching and can be extended to the preparation of large-scale long-wave infrared chips.

Key words: long-wave; HgCdTe; damage; etching technique

收稿日期: 2023-06-09

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

0 引言

碲镉汞红外探测器是目前大规模应用的红外探测器之一。经过研究人员的不懈努力,其覆盖波段可从短波红外到甚长波红外,被广泛应用于空间探测、军事、民用等领域^[1-2]。在特定的应用场景中,长波碲镉汞探测器具有不可替代的优势。根据光谱辐射通量公式,目标温度在 300 K 以下时,长波红外辐射比中波红外辐射强 30 倍。此时目标的长波辐射更加明显,且传输路径中水汽较少,透过率较高,选择长波红外探测器可提高系统的探测距离^[3]。因此研制并利用长波碲镉汞探测器进行低温探测显得十分重要。由于受到长波碲镉汞材料组分等因素的限制,在刻蚀工艺中易产生材料损伤。为实现高性能探测,开发低损伤刻蚀碲镉汞工艺技术尤为关键^[4-7]。本文介绍了一种低损伤碲镉汞长波红外焦平面探测器电极接触孔刻蚀技术。首先,尝试采用中波电极孔刻蚀工艺进行长波电极孔刻蚀。焦平面成像测试显示,探测器盲元较多。经综合分析判断,中波电极孔刻蚀工艺并不适用于长波电极孔刻蚀。于是通过对 ICP 刻蚀机上下电极射频功率的协同优化,最终实现了低损伤碲镉汞长波红外焦平面探测器电极接触孔刻蚀。该工艺为一次成型。这项技术可使阵列规模为 320×256 (像元中心间距为 $30 \mu\text{m}$) 的长波碲镉汞焦平面探测器的盲元率仅为 0.26%,并可应用于大批量探测器生产制备。

1 实验

首先在表面长有钝化层的碲镉汞芯片上进行光刻,将光刻胶作为刻蚀的掩模。光刻胶采用厚胶。经过坚膜(后烘)处理,光刻胶能够保护其他区域的钝化层,并确保光刻电极孔图案处在注入区的正上方区域,使后续电极接触孔有效地接触到注入区。随后利用 ICP 刻蚀设备刻蚀钝化层及注入区表层碲镉汞材料,形成电极接触孔。通过该接触孔,在钝化层表面生长的电极可与碲镉汞注入区域接触。接触孔的深

度要确保大于钝化层的深度,同时防止接触孔刻穿注入区,保障器件具有 PN 结的特性(详细工艺过程见图 1)。为了实现低损伤刻蚀,碲镉汞长波探测器电极孔刻蚀可采用分步刻蚀。首先采用较高的射频功率快速刻蚀硫化锌层,然后降低射频功率,低速刻蚀碲镉汞层,从而降低碲镉汞层的损伤。但由于两步刻蚀过程中每步刻蚀时间都需人为精确控制判断,并手动改变刻蚀速率,该方法只适合小批量样机的制备,难以实现工程化大规模生产。为实现大规模制备,需通过调节工艺来实现一次低损伤接触孔成型技术。

2 结果与讨论

2.1 长波刻蚀工艺的初步摸索

采用现有碲镉汞中波探测器电极接触孔刻蚀工艺所刻蚀长波探测器电极孔的形貌如图 2 所示。该工艺为一步刻蚀工艺,刻蚀采用的射频功率较大。图 2(a)和图 2(b)分别是比例尺为 $10 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 时相应的扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图谱。可以看出,电极接触孔尺寸约为 $4 \mu\text{m}$,孔底部光滑,没有明显的生成物;不同孔之间的刻蚀形貌差异较小,刻蚀具有良好的均一性。电极孔的激光共聚焦显微镜测试结果如图 2(c)所示。通过测试深度的结果可判断采用目前工艺刻蚀的电极孔能够满足实际接触孔功能需求。接触孔底具有较高的平整度,在孔侧壁底部没有出现由刻蚀导致的深槽,为后续电极与注入区的高质量接触以及电极较高平整度的制备奠定了良好的结构基础。

2.2 采用初步工艺制备的长波红外焦平面探测器性能

采用与刻蚀中波碲镉汞电极接触孔相同的工艺制备阵列规模为 320×256 (像元中心间距为 $30 \mu\text{m}$) 的长波红外焦平面探测器。其盲元率为 3.32%,如图 3(a)所示。可以看出,在探测器阵列上分布着过热盲元(红色)和死盲元(蓝色),且盲元分布分散,没有明显聚集在特定区域。如图 3(b)所示,测试电平图也显示

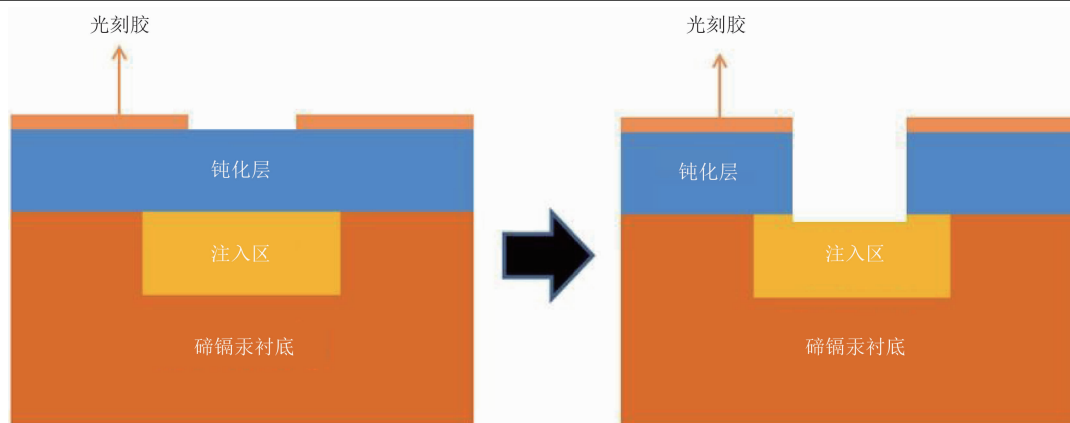
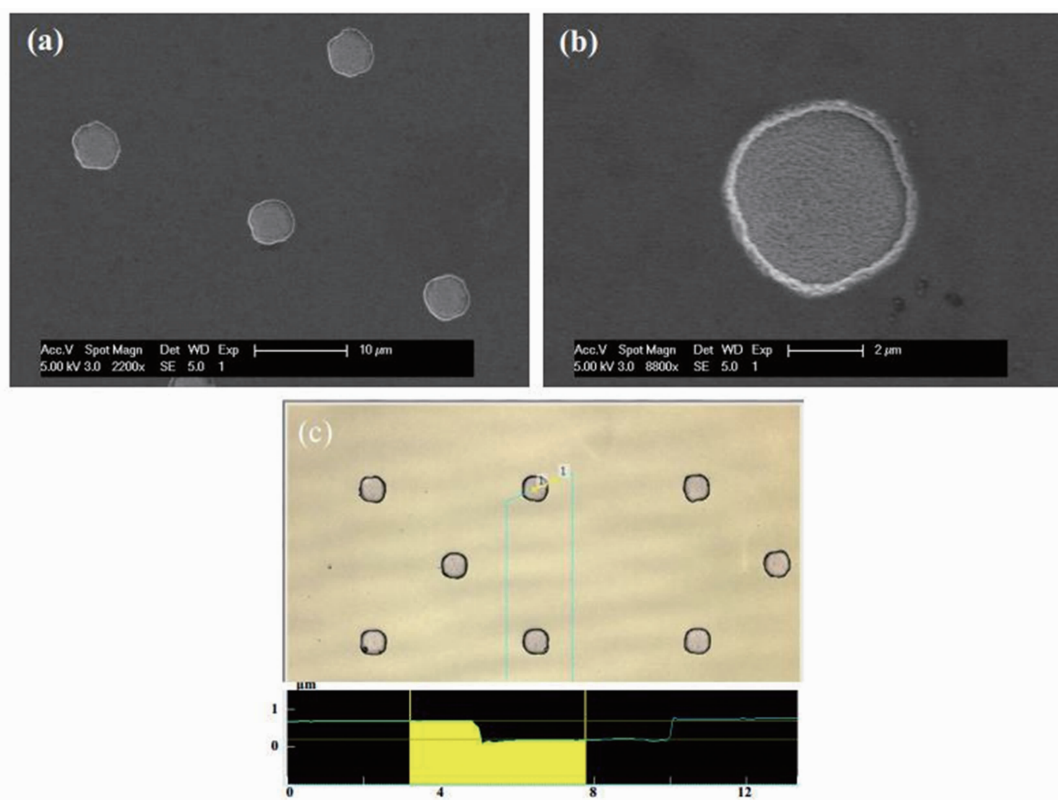


图 1 电极接触孔成形示意图

图 2 (a)比例尺为 $10\ \mu\text{m}$ 时相应刻蚀电极孔的 SEM 图谱；(b)比例尺为 $2\ \mu\text{m}$ 时相应刻蚀电极孔的 SEM 图谱；(c)电极孔的激光共聚焦显微镜测试结果

探测器信号具有较高的非均匀性。尝试对探测器芯片进行回流退火。回流前后盲元位置的 I - V 曲线没有明显的变化,说明回流后盲元率并没有明显改善。可初步判断盲元的产生与刻蚀过程中出现的损伤有一定程度的关联。对其响应谱宽进行了测试。结果表明,响应谱宽峰值波长为 $8\ \mu\text{m}$,截止波长为 $9.5\ \mu\text{m}$ (见图 3(c)),响应波段为长波。

2.3 对刻蚀工艺优化后的表征

由中测结果可知,初步刻蚀工艺存在零散盲元多、损伤大的问题。在工艺参数中,下电极射频功率以及上电极射频功率共同决定了设备工艺过程中自偏压的大小。而自偏压直接决定了刻蚀等离子体的能量。能量越大,刻蚀越容易产生损伤。此时需要作进一步优化,对刻蚀射偏等离子体的能量和浓度进行一定程度的调整,从而在一定程度上降低自偏压。

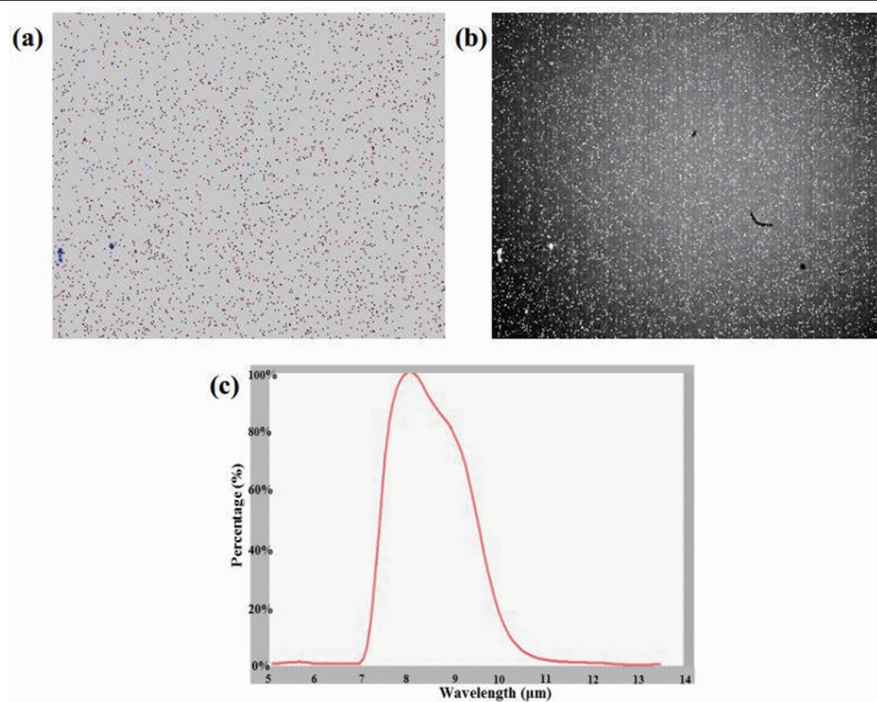


图 3 采用初步工艺制备的 320×256 器件: (a)盲元图; (b)电平图; (c)响应光谱图

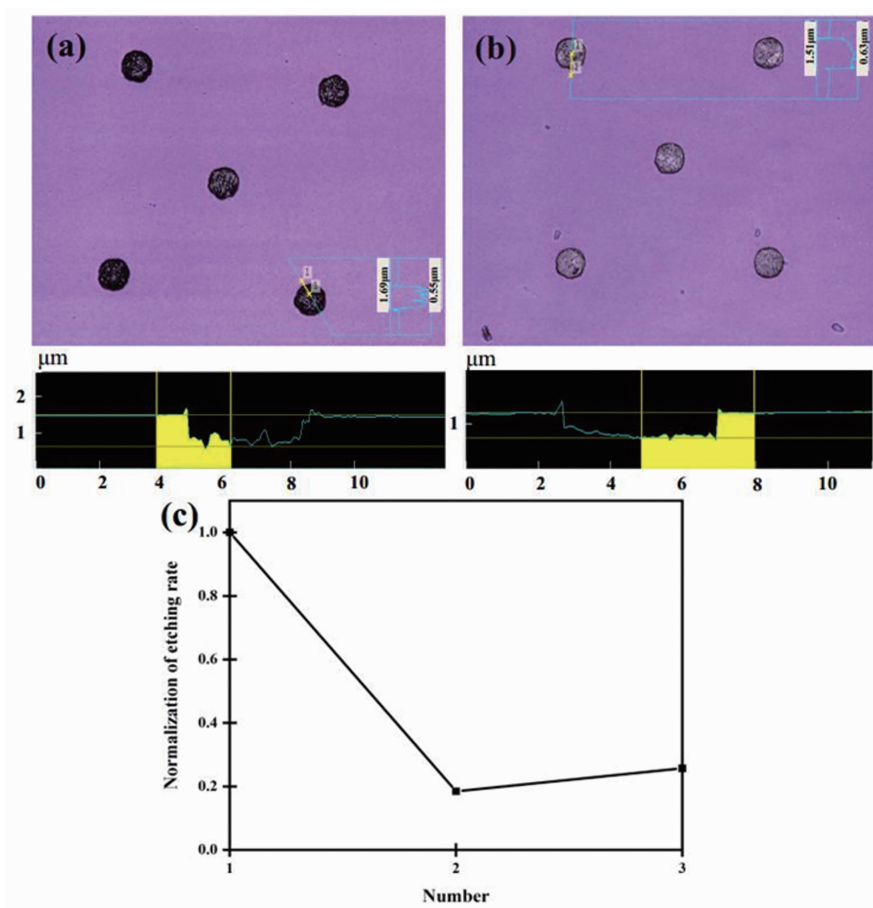


图 4 (a)较大上电极射频功率时相应孔底形貌的激光共聚焦显微镜测试图; (b)较小上电极射频功率时相应孔底形貌的激光共聚焦显微镜测试图; (c)归一化刻蚀速率变化

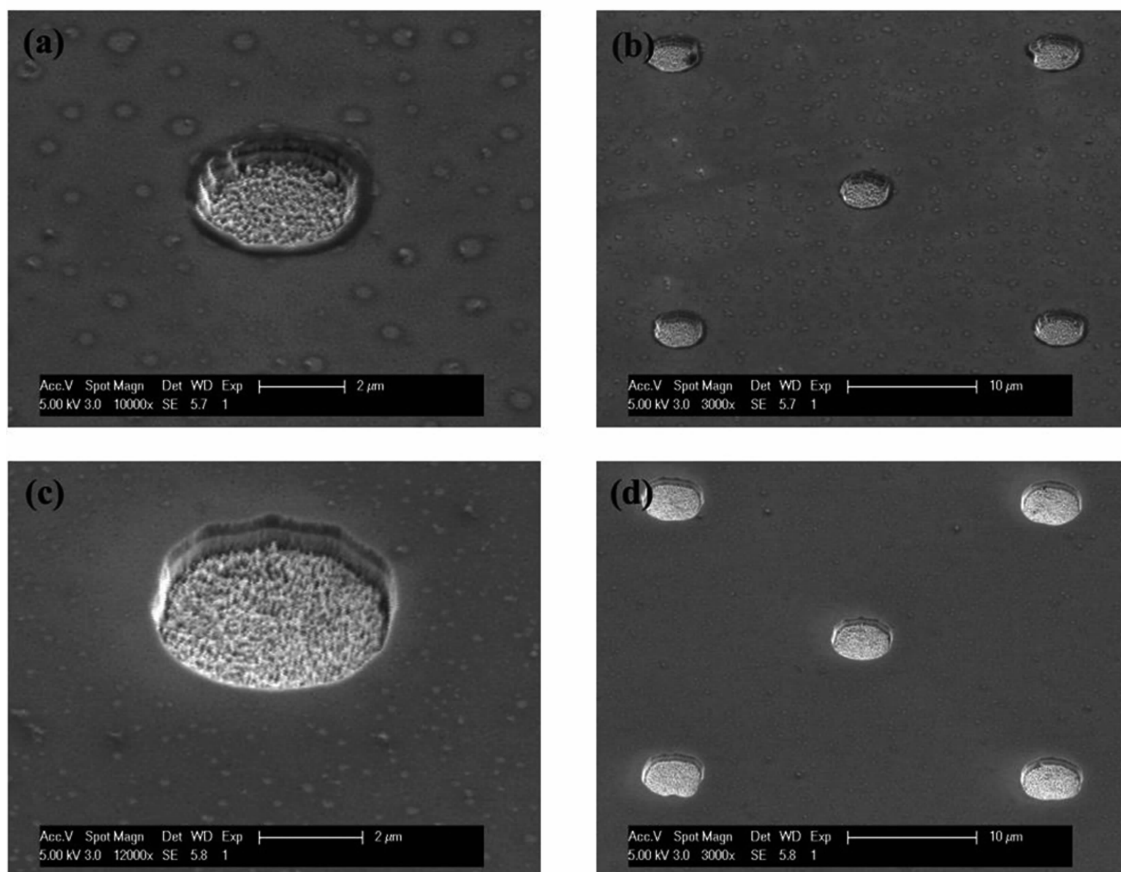


图 5 改进工艺后刻蚀接触孔对应的 SEM 图谱：(a)较大上电极射频功率(比例尺为 $2\ \mu\text{m}$)；
(b)较大上电极射频功率(比例尺为 $10\ \mu\text{m}$)；(c)较小上电极射频功率(比例尺为 $2\ \mu\text{m}$)；
(d)较小上电极射频功率(比例尺为 $10\ \mu\text{m}$)

首先降低下电极射频功率，调高上电极射频功率。其目的是极大程度地降低刻蚀速率，减小刻蚀损伤，使刻蚀速率降至原来的六分之一。但测试结果(见图 4(a))显示，电极接触孔中出现明显的生成物，孔底颜色较黑。为了有效地减少生成物的产生，同时抑制刻蚀损伤，适当降低上电极射频功率，使刻蚀速率降至原来的四分之一。如图 4(b)所示，孔底的生成物明显减少，底部较光滑，可保障接触孔的功能。归一化刻蚀速率随射频功率的变化关系如图 4(c)所示。

利用 SEM 对不同上电极射频功率下刻蚀的电极孔进行表征(结果见图 5)。图 5(a)和图 5(b)所示为较大上电极射频功率时刻蚀的电极孔(比例尺分别为 $2\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$)。可以看出，孔底有一定量的生成物，导致孔底不平；同时孔的侧壁较为粗糙。这与激光共聚

焦表征结果一致。图 5(c)和图 5(d)所示为较小上电极射频功率时刻蚀的电极孔(比例尺分别为 $2\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$)。可以看出，孔底的生成物明显减少，孔底较为平整，孔的侧壁十分光滑。这与激光共聚焦表征结果一致，也表明适当降低上电极射频功率和适当提高刻蚀速率可有效减少电极接触孔的生成物。不同电极孔的形貌类似，证明新工艺下电极孔依旧具有较高的均一性。

对较大/较小上电极射频功率时刻蚀的电极孔孔底进行元素能谱分析。结果表明，其主要组成元素为 Hg、Cd、Te 三种元素，并没有明显地存在其他元素。可见生成物并未引入其他元素，主要是这三种元素形成的单质或化合物。生成物并不会影响电极接触孔的功能，结果如图 6 所示。

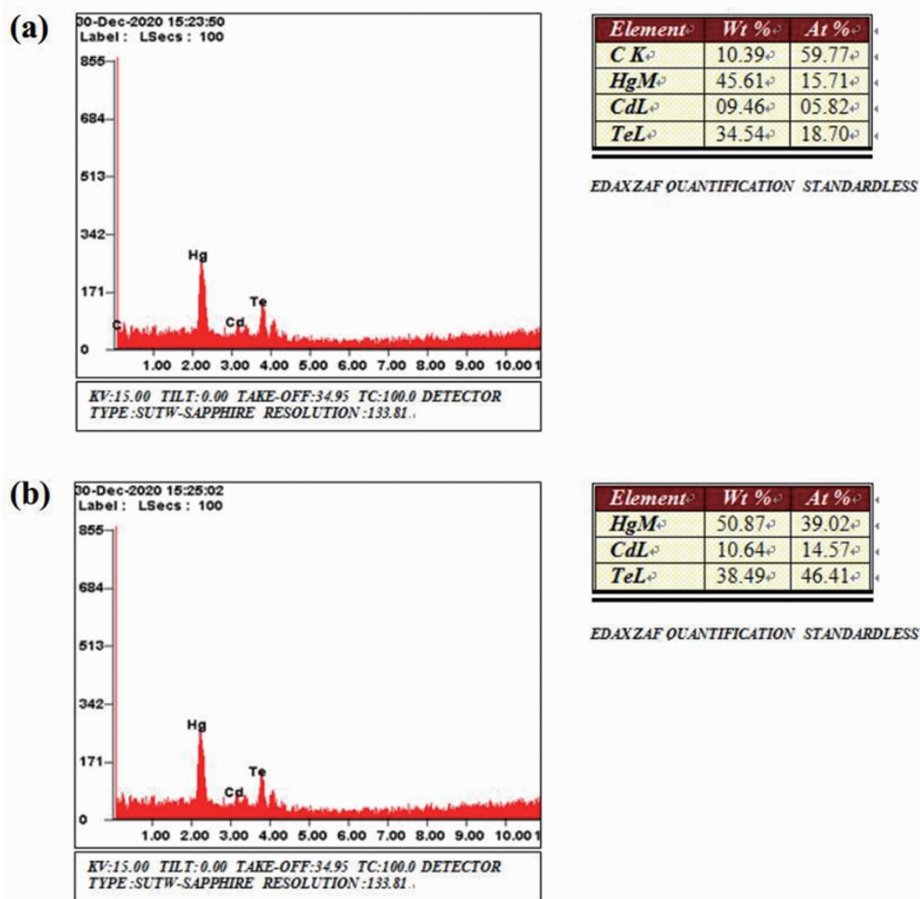


图 6 刻蚀接触孔对应的孔底位置能谱: (a)较大上电极射频功率; (b)较小上电极射频功率

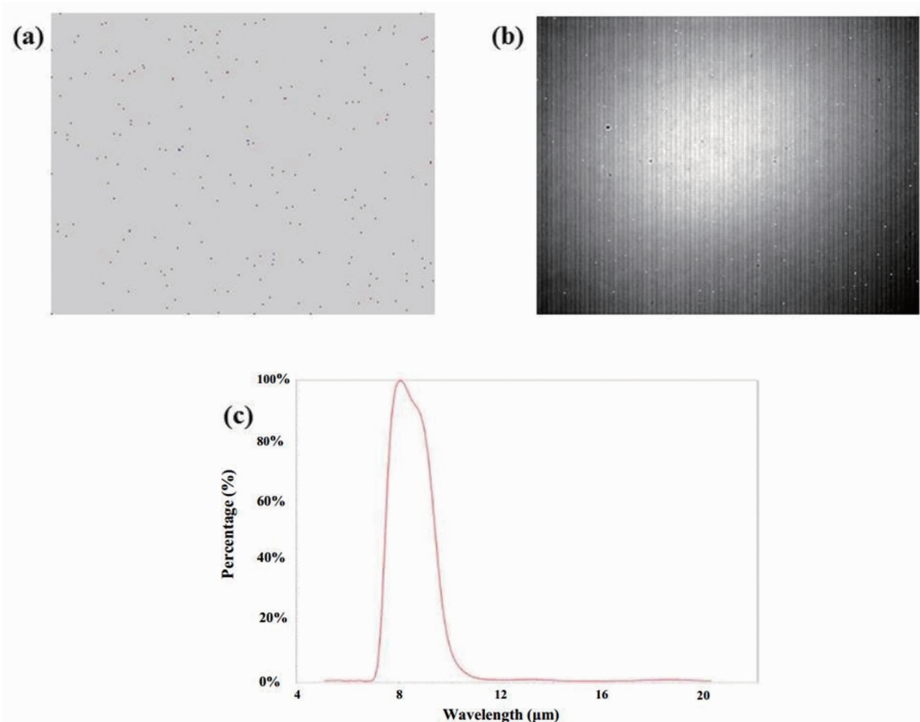


图 7 采用优化工艺制备的 320×256 ($30 \mu\text{m}$) 器件: (a)盲元图; (b)电平图; (c)响应光谱图

2.4 采用优化工艺制备的长波红外焦平面探测器性能

采用优化后的电极孔工艺制备阵列规模为 320×256 (像元中心间距为 $30\ \mu\text{m}$) 的长波红外焦平面探测器。该探测器的盲元率为 0.26% , 如图 7(a) 所示。相比于优化前的工艺, 此时盲元数目明显减少。电平图如图 7(b) 所示, 可判断器件具有较低的非均匀性。对探测器响应谱宽进行测试(结果见图 7(c))。可见响应谱宽峰值波长为 $8\ \mu\text{m}$, 截止波长为 $9.4\ \mu\text{m}$, 符合长波芯片的波长范围。因此判断探测器可在长波范围内进行探测。中测结果显示, 探测器性能已达到长波探测的需求。通过对探测器的成像性能及谱宽测试, 可确认优化后的工艺能够实现长波焦平面探测器低损伤电极孔的刻蚀。

3 结束语

通过对电极射频工艺进行优化, 实现了低损伤一步刻蚀长波碲镉汞器件电极接触孔, 得到了阵列规模为 320×256 的长波红外焦平面探测器(盲元率仅为 0.26%)。相比于分步刻蚀电极接触孔工艺, 该技术降低了刻蚀难度, 提高了刻蚀效率。此工艺可应用于大规模生产当中, 对进一步研究低损伤刻蚀具有一定的指导意义。目前该技术在 320×256 阵列规格的探

测器上得到了较好的验证, 在 640×512 及 $1\text{k} \times 1\text{k}$ 长波碲镉汞焦平面探测器上的表现还需要后续验证。

参考文献

- [1] 周立庆, 宁提, 张敏, 等. $10\ \mu\text{m}$ 像元间距 1024×1024 中波红外探测器研制进展 [J]. 激光与红外, 2019, 49(8): 915-920.
- [2] Ragalski A. Recent Progress in Infrared Detector Technologies [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2011, 54: 136-164.
- [3] 丁利伟, 甘宇红, 王宗俐, 等. 中波红外和长波红外探测系统性能的比较与选择 [J]. 红外, 2014, 35(5): 1-6.
- [4] 李震, 胡小燕, 史春伟, 等. 碲镉汞器件接触孔的 ICP 刻蚀工艺研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1211-1214.
- [5] 谭振, 杨海玲, 孙海燕, 等. 大面阵碲镉汞长波红外焦平面器件刻蚀工艺非均匀性研究 [J]. 红外, 2019, 40(9): 6-11.
- [6] 谭振, 亢喆, 李海燕. InSb 红外焦平面器件台面刻蚀工艺研究 [J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 72-75.
- [7] 宁提, 陈慧卿, 谭振, 等. 碲镉汞 p 型接触孔低损伤干法刻蚀技术研究 [J]. 激光与红外, 2018, 48(5): 601-604.