

文章编号: 1672-8785(2023)09-0023-05

铟化铟红外探测器的微透镜 阵列设计及试验

谭启广 张 轶 任秀娟 李忠贺 宁 提

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 台面型铟化铟红外焦平面探测器的制作工艺简单, 量子效率高, 但是填充因子较低且会随着像元尺寸的减小而进一步降低。减小台面腐蚀深度可以提高探测器的填充因子, 但会增大串音。介绍了一种新型微透镜阵列的设计与制备方法, 以提高铟化铟红外探测器的填充因子并减小串音。与现有的热回流微透镜阵列相比, 该微透镜阵列的填充率、表面粗糙度以及尺寸均匀性能得到了较好的兼顾, 可直接在铟化铟红外探测器表面制作, 工艺简单。结果显示, 探测器的串音降低 26%, 光响应提高 22%。

关键词: 红外焦平面探测器; 铟化铟; 微透镜阵列

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.09.004

Design and Experiment of Microlens Array for InSb Infrared Detectors

TAN Qi-guang, ZHANG Yi, REN Xiu-juan, LI Zhong-he, NING Ti

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

Abstract: The mesa-type InSb infrared focal plane array (IRFPA) detector typically has a simple fabrication process and high quantum efficiency. However, its filling factor is low, and it will further decrease with the reduction of the pixel size. Reducing the corrosion depth of the mesa can improve the fill factor of the detector, but it will increase the crosstalk. A novel design and preparation method for microlens arrays is introduced to improve the filling factor of InSb infrared detectors and reduce the crosstalk. Compared with the existing re-flow microlens arrays, the filling rate, surface roughness, and size uniformity of this microlens array are well balanced, and it can be directly fabricated on the surface of InSb infrared detectors with a simple process. The results show that the crosstalk of the detector decreases by 26% and the optical response increases by 22%.

Key words: infrared focal plane detector; InSb; microlens array

收稿日期: 2022-11-21

作者简介: 谭启广(1995-), 男, 山东淄博人, 助理工程师, 主要从事红外探测器及其相关技术的研究。

E-mail: 13671289470@139.com

0 引言

红外焦平面探测器是一种工作在红外波段的固体探测器,被广泛应用于消防、安保、红外成像、污染监测和泄漏检测等领域^[1]。InSb 红外焦平面探测器是一种工作在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的重要的探测器,具有量子效率较高^[2]、成本较低的优势,已得到广泛的商业化应用。

填充因子是锑化铟红外探测器性能的一个重要限制因素。如图 1 所示, p 型层的表面积与探测器总面积的比值为探测器的填充因子,台面结构间的距离实现了阵列 p-n 结间的光学和电学隔离,但限制了探测器的有效填充因子。为了降低功耗和整体成本,红外探测器向小像元方向发展^[3],有效填充因子也随之进一步降低。减小台面的刻蚀深度和间距可以增大探测器的有效填充因子,但会使像元间的隔离变差,串音增大。二者往往需要参考实际用途及性能要求折中设计。微透镜阵列可以实现光的汇聚,从而降低串音,提高探测效率。常见的制作方法有光刻-热回流^[4]、激光微纳加工^[5]、机械加工^[6]、激光刻蚀^[7]、干法刻蚀^[8]和微滴喷墨打印^[9]等。通常需要将其沉积在器件上或者制作后对准集成。在应用于制冷型红外探测器时,需要考虑微透镜阵列材料与探测器不同带来的热失配、低温可靠性和红外透过率等问题。由于集成会引入耦合偏差,需要考虑其与锑化铟红外探测器制造工艺的兼容性。此外,还需要评价微透镜阵列的质量,包括尺寸均匀性、表面粗糙度和填充率等方面。

本文设计了一种复合微透镜阵列,以提高 InSb 红外焦平面探测器的填充因子,减小串音。在减薄后的锑化铟红外焦平面探测器表面上制作了 20×20 的微透镜阵列,并对其电学

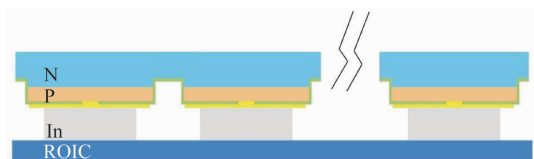


图 1 台面型 InSb 红外焦平面探测器的结构示意图

性能进行了测试。

1 微透镜阵列设计

为了获得高质量的微透镜阵列,并使其与制冷型锑化铟红外焦平面探测器相适应,采用光刻-腐蚀方法制作微透镜阵列。由于探测器工作在液氮温度下,不同材料的微透镜阵列在制作完成后粘接到探测器表面时,会引入热失配、可靠性等问题。因此,选用锑化铟材料作为基底来制备微透镜阵列。在探测器减薄时预留一定厚度的锑化铟,光刻出掩膜图形后通过刻蚀将其转移到锑化铟材料上。微透镜阵列直接在探测器表面制作完成。光刻工艺的对准精度较高,与探测器匹配的偏差小。湿法腐蚀工艺简单,产生的图形表面粗糙度低,且光刻-腐蚀工艺成熟,图形的一致性及其均匀性较好。为了得到高曲率半径的微透镜阵列,需要提高腐蚀的钻蚀程度,所以采用了相应的表面处理工艺。

为了实现光的汇聚,我们设计了图 2(a)所示的折射型微透镜阵列。在锑化铟红外焦平面探测器台面间设计了网状的凹透镜阵列,以将入射到台面间的光发散到台面中心。这样便可实现对光的汇聚作用,提高红外探测器的几何填充因子,从而减小光损失。汇聚后的光信号吸收位置更接近探测器的像元轴心,可减小光生载流子横向扩散到相邻像元的概率,从而减小串音;而且在网状凹透镜阵列中心设计了基底形状为方形的凸透镜阵列。相较于圆形基底的凸透镜,该设计可以更大限度地提高微透镜阵列的填充率,以收集大角度的入射光,从而提升红外探测器的几何填充因子并进一步减小串音。

图 2(a)所示的复合微透镜阵列的制作过程如下:

(1)在锑化铟表面光刻掩膜图案。将其作为氧化预处理的掩蔽膜,保护锑化铟其他区域及读出电路,并影响氧等离子体的氧化过程。

(2)进行氧化预处理。在光刻后的带有正性光刻胶的锑化铟材料表面用氧等离子体处理,以加剧湿法腐蚀的钻蚀程度。

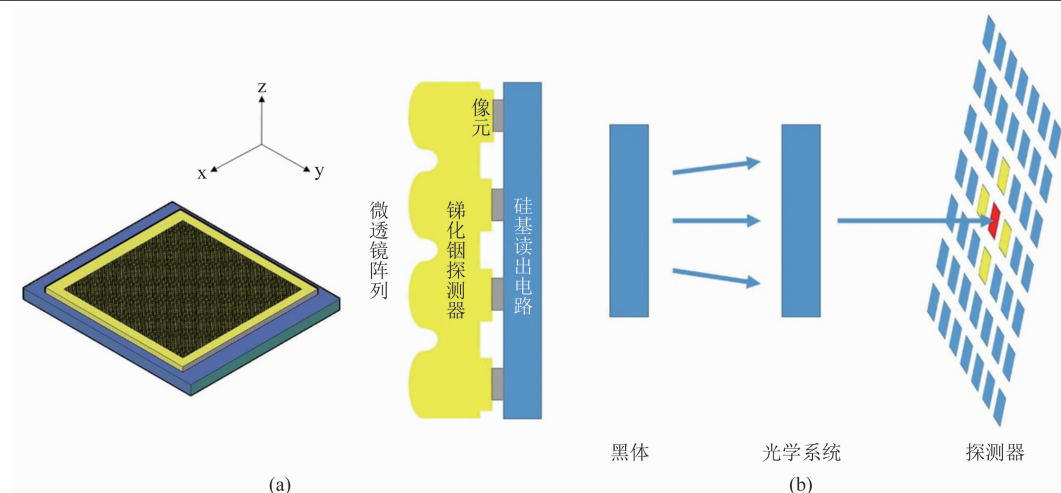


图 2 原理示意图: (a) 基于微透镜阵列的铟化锡焦平面探测器; (b) 小光点测试装置

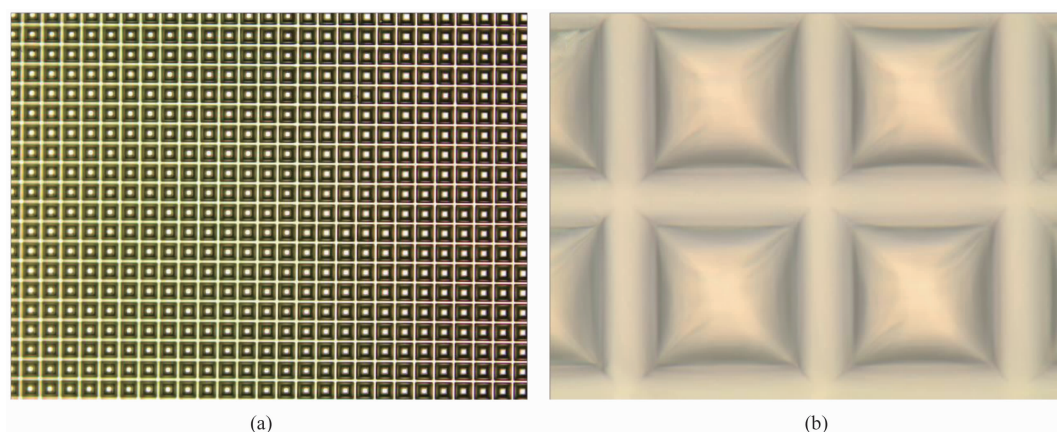


图 3 微透镜阵列显微镜图: (a) 100 倍放大; (b) 1000 倍放大

(3) 在去胶清洗后的铟化锡材料表面制作方形的腐蚀掩膜图案。在减薄后的铟化锡探测器背面光刻时, 通过读出电路上的对准标记对准, 光刻出与探测器像元一一对应的掩膜图形。

(4) 用湿法腐蚀工艺制作出上述凹透镜阵列与凸透镜阵列复合的微透镜阵列。方形光刻胶掩蔽膜限制了凸透镜的基底形状, 相较于圆形填充率更高; 掩蔽膜的尺寸限制了凸透镜阵列及凹透镜阵列的尺寸。

在制作过程中, 表面处理工艺及光刻工艺步骤非常关键。表面处理过程加剧了铟化锡材料湿法腐蚀的钻蚀程度, 设计的复合微透镜阵列结构得以成形, 光刻工艺的对准精度和光刻胶对电路的保护保证了最终微透镜阵列的良好光学效果以及探测器混成芯片的正常工作。

串音测试采用小光点串音的测试方法(装置见图 2(b))。黑体辐射经过光阑及透镜组汇聚到探测器表面, 形成单位像素大小的光斑; 测量该像元及相邻像元的信号, 计算得到探测器的串音。图中 1 个红色像元为测试像元, 4 个黄色像元为相邻像元, 相邻像元的串音为该像元的信号与测试像元信号的比值, 测试像元的串音为四个相邻像元串音的均值^[10]。

2 微透镜阵列应用

用上述光刻及湿法腐蚀方法在铟化锡背面制作微透镜阵列, 并用光学显微镜对其形貌进行了表征(结果见图 3)。从图 3(a)中可以看出, 在 100 倍放大下, 微透镜大小较一致, 且颜色变化情况接近。这表明阵列间的微透镜尺寸及高度变化的一致性较好, 制作的微透镜阵列具有较好的均匀性。在 1000 倍放大的光学



图 4 碲化铋焦平面探测器的响应灰度图

显微镜图像中可以看到微透镜阵列的形貌,包括底面呈正方形、表面近似马鞍面的凸透镜及其四边填充的凹透镜。两种透镜共同构成复合微透镜阵列。从图 3 中也可看出,腐蚀的碲化铋表面较光亮,表明该方法制备的微透镜阵列的表面粗糙度较低。

为了检验微透镜阵列的实际应用效果,我们在背面减薄后的碲化铋红外焦平面探测器的混成芯片表面制作微透镜阵列,并对器件的响应率和串音进行了表征。在试验过程中,我们只在部分区域制备了微透镜阵列,以对比集成微透镜阵列和未集成微透镜阵列情况下探测器的性能差异。图 4 所示为碲化铋焦平面探测器在集成微透镜阵列后光响应差异的部分数据。

将混成芯片封装到测试杜瓦中,进行响应率测试(结果见图 4)。像元响应越高,灰度图的颜色越深。在左侧 20×20 像素区域表面制备了微透镜阵列。右侧 20×20 像素区域表面无微透镜阵列,探测器无微透阵列区域的响应均值为 210 mV,有微透镜阵列区域的响应均值为 172 mV。响应率测量结果表明,微透镜阵列使探测器的响应率提高了 22%。通过小光点测试测量了探测器的串音:无微透镜阵列区域为 4.91%,有微透镜阵列区域为 3.64%,微透镜阵列使得探测器的串音降低 1.27%(占比 26%)。

该微透镜阵列的制作工艺简单,与探测器制作工艺相兼容。得到的微透镜阵列的均匀性较好。直接在探测器背面用碲化铋材料制成,耦合精度高,不存在由于其他材料微透镜阵列与探测器材料不同引起的热失配、光吸收损失和低温可靠性等问题。

3 结束语

本文设计并制作了一种用于碲化铋红外焦平面探测器的微透镜阵列,以提高探测光的汇聚效果。测量结果显示,制备有微透镜阵列区域的碲化铋红外探测器的光响应提高,串音降低。这种复合微透镜阵列在探测器表面直接制备,不存在集成微透镜阵列过程中引入的可靠性、对准偏差等问题。通过表面处理加剧了碲化铋腐蚀中的钻蚀,然后通过光刻腐蚀工艺制备,形成的微透镜阵列较好地兼顾了填充率、表面粗糙度以及尺寸均匀性的要求。其制作工艺简单,适用于批量化生产。后续可以继续增大微透镜阵列的曲率及面阵规模,提高微透镜阵列的汇聚效果,将其应用于更大面阵规模的碲化铋红外探测器。

参考文献

- [1] Bhan R K, Dhar V. Recent Infrared Detector Technologies, Applications, Trends and Development of HgCdTe Based Cooled Infrared Focal

- Plane Arrays and Their Characterization [J]. *Opto-Electronics Review*, 2019, **27**(2): 174–193.
- [2] 赵建忠. InSb 焦平面探测器的发展现状与趋势 [J]. *红外技术*, 2016, **38**(11): 905–913.
- [3] 侯治锦. 小像元 InSb 红外焦平面探测器制备及性能 [D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- [4] Nussbaum P, Völkel R, Herzig H P, et al. Design, Fabrication and Testing of Microlens Arrays for Sensors and Microsystems [J]. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 1997, **6**(6): 617–636.
- [5] 管迎春, 王海鹏. 一种高精度微透镜阵列结构的微纳制备方法: CN106501883A [P]. 2017–03–15.
- [6] 夏森彬, 王素娟, 董善坤. 微透镜阵列慢刀伺服金刚石车削位置精度的研究 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2020, **42**(8): 134–137.
- [7] 李乾坤, 刘学青, 成荣. 基于激光加工的玻璃透镜阵列制备 [J]. *激光技术*, 2021, **45**(2): 131–136.
- [8] 柯才军, 易新建, 赖建军. 提高 CCD 图像传感器填充因子的微透镜阵列的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(2): 209–212.
- [9] Alamán J, María López-Villuendas A, López-Valdeolivas M, et al. Facile Fabrication of Microlenses with Controlled Geometrical Characteristics by Inkjet Printing on Nanostructured Surfaces Prepared by Combustion Chemical Vapour Deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2020, **510**: 145422.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 红外焦平面阵列参数测试方法: GB/T 17444–2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.