

文章编号: 1672-8785(2025)01-0023-05

一种铟化铟红外焦平面探测器的设计及制作

谭启广 李忠贺 张 轶 曹凌霞

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 裂片及串音问题限制了铟化铟(InSb)焦平面探测器向更大面阵规模、更小像元间距的发展。报道了采用分立感光像元的 InSb 焦平面探测器的试验研究结果。制备了阵列规模为 320×256 、像元间距为 $30 \mu\text{m}$ 的 InSb 红外探测器, 测得其信号响应均值为 441.112 mV , 噪声均值为 1.729 mV 。此阵列分立, 缓解了裂片及串音问题, 可靠性高且填充率较高。相较于键合硅片后刻蚀形成分立像元的方式, 该方法不存在硅片对入射光信息的吸收损失, 且制作工艺简单。

关键词: 红外焦平面探测器; InSb; 分立

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.01.003

Design and Fabrication of an InSb Infrared Focal Plane Detector

TAN Qi-guang, LI Zhong-he, ZHANG Yi, CAO Ling-xia

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

Abstract: The problems of splintering and crosstalk limit the development of indium antimonide (InSb) focal plane detectors to larger array sizes and smaller pixel pitches. The experimental results of an InSb focal plane detector using discrete photosensitive pixels are reported. An InSb infrared detector with an array size of 320×256 and a pixel pitch of $30 \mu\text{m}$ is prepared, and the average signal response value is measured to be 441.112 mV and the average noise value is measured to be 1.729 mV . This array is discrete, which alleviates the problems of splintering and crosstalk, and has high reliability and high filling rate. Compared with the method of bonding silicon wafers and then etching to form discrete pixels, this method does not have the absorption loss of incident light information by silicon wafers, and the manufacturing process is simple.

Key words: infrared focal plane detector; indium antimonide; discrete

收稿日期: 2024-04-24

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

E-mail: 13671289470@139.com

0 引言

InSb 是一种直接禁带 III-V 族半导体材料，其载流子的迁移率高，在低温下对红外光的吸收系数高，量子效率高。InSb 单晶尺寸大，常用于制备红外焦平面探测器。该探测器主要用于中波波段的红外探测与成像，并广泛应用于天文、航天、检测等领域^[1-3]。

目前，红外探测器正朝大面阵规模、小像元间距等方向发展。大面阵规模增加了探测器的像元数量，从而提升了探测器的分辨率，提供了更宽的视场^[4]。为了抑制背景噪声、提高探测器的信噪比，InSb 红外探测器芯片一般工作在 77 K 附近。在开机过程中，InSb 芯片、硅电路、互连钢柱以及底部填充胶等不同材料的热膨胀系数存在差异。这会引入热应力，导致芯片断裂或钢柱断裂等问题，限制了大面阵 InSb 焦平面探测器的良率，影响了探测器的寿命及可靠性。为了缓解热失配应力的影响，通过刻蚀应力释放结构^[5-6]、设计形变平衡结构^[7]、制作硅片键合 InSb 的孤立单元器件^[8]和设计网格结构^[9]等，提高低温工作红外探测器的可靠性。

小像元间距使得相同焦平面探测器面积内的面阵规格增大，像元数目更多，探测器分辨率更高。同时，在相同面阵规格的情况下，像元间距减小，使得芯片尺寸减小，从而降低了探测器组件的整体尺寸、功耗和成本^[10-13]。但随着探测器像元间距的缩小，像元间的串音会增大，影响小尺寸探测器阵列的分辨能力。串音主要有光串音和电串音两种。其中，光串音主要由光子折射与反射造成，电串音主要由探测器内载流子传递到相邻像元造成。一般可以通过在探测器像元间刻蚀沟道，形成光学和电

学隔离槽，从而减小传音^[13]。对于台面 InSb 器件，可通过减薄 InSb 厚度来减小背入射器件光生载流子产生区域到结区的距离，从而降低串音^[14]。另外，探测器多数载流子的耗尽也会降低串音^[15]。

为了缓解裂片问题和降低串音，本文提出一种像元分立的 InSb 焦平面探测器结构及其制作方法。利用刻蚀与背减薄工艺实现 InSb 探测器像元分立、隔离，并通过背面电极实现像元的电学导通。这与现有的 InSb 红外探测器制造工艺相兼容，在工艺上易于实现。分立像元可以缓解高低温过程中因 InSb 芯片不同材料间热失配造成的钢柱断裂、芯片裂片等问题。另外，分立像元不是通过 InSb 衬底而是通过金属电极相互连通，相邻像元间的载流子无法在衬底材料横向传递，从而降低探测器的串音。

1 试验设计

1.1 结构设计

我们设计了一种网格状的像元分立的 InSb 焦平面探测器。如图 1 所示，该探测器由阵列化的分立单元构成。图中存在 PN 结的区域为感光单元，其下表面及单元侧壁均覆盖钝化层，以稳定保护表面状态，控制表面漏电及相关噪声。在探测器阵列的 N 型层表面上制备增透膜及背面电极。背面网格电极的感光单元设计包括通光区域，在实现像元阵列 N 端整体连通的同时保证了光信号的入射。而且通光孔大小可以根据使用需求限制像元阵列的感光区域大小。图 1 中左侧 PN 结单元的 P 型层被去除，作为 N 端读出单元。探测器芯片通过倒装互连实现与读出电路的电学导通。

1.2 工艺设计

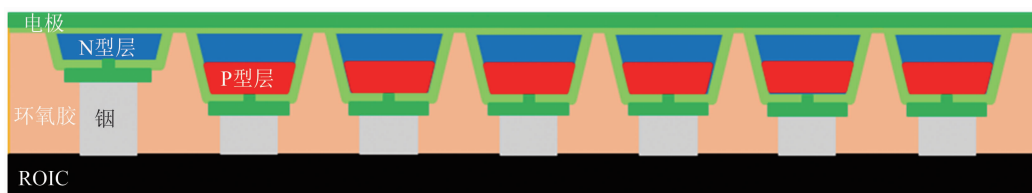


图 1 分立式 InSb 红外焦平面探测器的结构示意图

我们制作了阵列规模为 320×256 、像元间距为 $30 \mu\text{m}$ 的 InSb 红外探测器。InSb 焦平面探测器采用 N 型 $\langle 111 \rangle$ 晶向 InSb 材料片作为基底。制作了深度为 $7 \sim 12 \mu\text{m}$ 的台面结构。过浅的 PN 结会导致光吸收区过短, 光响应偏小, 甚至小于常规工作偏压下的中性区扩展长度, 造成器件贯通。同时, 过浅的 PN 结在工艺实现上难度较大, 对背面减薄厚度精度及均匀性控制的要求较高。过深情况下在工艺实现上也存在较多问题。由于钝化生长中对台面的侧壁覆盖, 电极孔腐蚀中的光刻胶侧壁覆盖难度增大。另外, 刻蚀过程中像元区域和非像元区域裸露的 InSb 面积不同, 刻蚀深度存在差异。若刻蚀深度过大, 则会增加光刻及金属剥离的工艺难度。

工艺上利用热扩散实现 Cd 掺杂。通过湿法腐蚀去除边缘 N 端读出像元的 P 型层, 并通过电感耦合等离子体 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 干法刻蚀及湿法腐蚀形成台面结构。然后通过等离子体增强化学气相沉积 (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 淀积钝化层, 并通过湿法腐蚀、金属化工艺制备读出电极。制备钢柱, 使其与读出电路键合。通过背减薄实现分立的像元阵列, 最后制备背面电极及背面增透膜。

1.2.1 台面刻蚀

为了实现分立单元的信号读出, 设计了读出互连单元及感光单元。由于干法刻蚀深宽比较大, 为了得到较高的像元填充率以及较好的表面状态, 台面制备采用了湿法腐蚀与干法刻蚀相结合的工艺。首先, 通过光刻及湿法腐蚀去除读出互连单元的 P 型层; 然后通过光刻及干法刻蚀工艺制备台面结构。ICP 干法刻蚀中, 通过调节光刻掩膜宽度和刻蚀射频功率, 获得高精度、高深宽比、侧壁垂直度好的台面结构, 从而实现设计的填充率及 N 型层厚度; 最后, 通过湿法腐蚀去除表面损伤层, 同时保证钝化前器件表面具有合适的粗糙度和洁净度。

1.2.2 混成芯片减薄

为了实现感光单元分立, 在互连后采用机械抛光法、机械化学抛光法、化学抛光法等对混成芯片进行背面减薄, 去除多余衬底。为了得到响应一致性高的焦平面探测器, 需要控制减薄后分立台面尺寸及高度的一致性。通过控制互连钢柱的高度均匀性、互连倾斜度以及互连整体面型, 控制减薄前高度的一致性。通过增加减薄过程中的测量次数, 提高减薄厚度的工艺精度, 实现像元高度、尺寸均匀性高的 InSb 焦平面探测器。

2 试验结果

2.1 工艺结果

在工艺试验中, 经扩散形成 P 型掺杂, 通过正面刻蚀形成台面; 在互连读出电路后, 通过背面减薄将台面下相连的 InSb 去除, 形成分立的感光像元阵列。单元结构厚度的差异会影响光能量吸收区域及主要载流子到达结区的距离, InSb 的吸收层尺寸和厚度对信号的影响较大。工艺过程中, 通过调节刻蚀气体、功率、温度以及光刻胶掩膜的尺寸、厚度, 得到了深宽比较好、侧壁平整的台面结构, 并利用湿法工艺进行清洗、去除损伤层。

探测器芯片与读出电路互连后填充环氧树脂, 提高芯片机械强度的同时将其作为减薄的截止标识, 控制减薄厚度。背面减薄到接近预定厚度时, 通过调整磨抛盘方向, 控制时间、多次减薄, 控制减薄厚度、整体均匀性及表面状态, 最终得到剩余厚度在 $8.5 \mu\text{m}$ 左右的分立 InSb 像元。减薄后的探测器如图 2 所示。从图 2(a)中可以看出, 像元单独隔开, 整体均匀性较好。通过 500 倍放大的显微镜测得像元边长为 $26 \mu\text{m}$, 像元填充率约为 75%, 像元边缘清晰, 一致性好。

2.2 性能表征及讨论

在 77 K 下对器件进行表征, 测量器件的信号为 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 与 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 黑体响应的差值, 积分时间为 $1200 \mu\text{s}$ 。盲元判据如下: 信号超过均值 50%、噪声大于平均噪声 2 倍的像元为盲元。

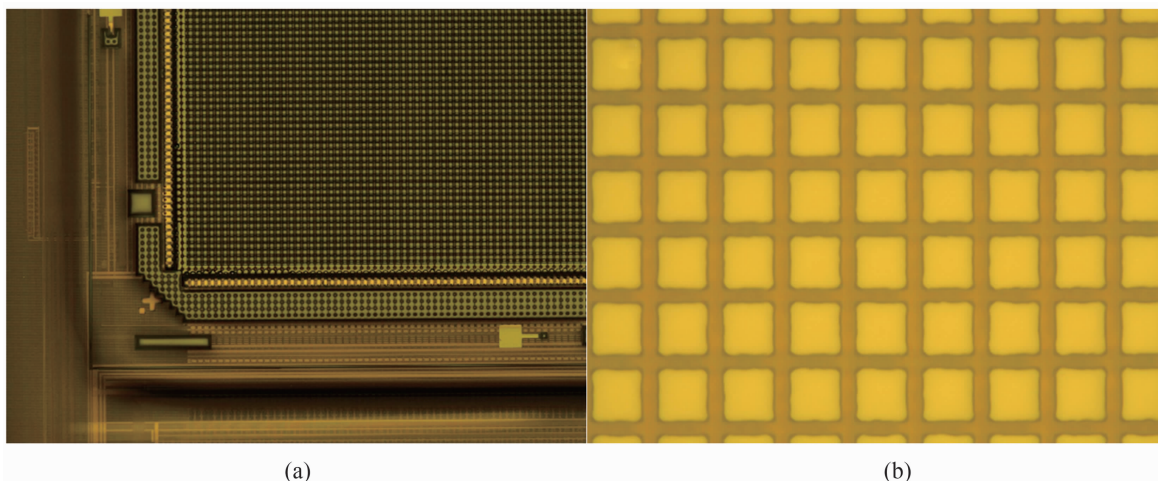


图 2 分立式 InSb 红外焦平面探测器减薄后的显微镜图：(a) 50 倍放大；(b) 500 倍放大

测得信号非均匀性为 12.68%，信号响应均值为 441.112 mV，噪声均值为 1.729 mV，盲元率为 4.82%。信号响应与噪声分布如图 3、图 4 所示。可以看出，信号响应集中在 300~500 mV 左右，噪声集中在 0.7 mV 左右，大部分像元可正常读出。但是存在信号响应为 0 的计数，部分像元未读出。

InSb 探测器工作在反偏状态下，背入射光子在吸收区产生光生载流子，靠近结区的光生载流子被收集，产生信号。分立像元的 InSb 探测器台面区域外无 InSb 材料，且衬底区域不相互连通，解决了光生载流子横向扩散在相邻像元收集时引发串音的问题。由于材料及工艺问题，像元刻蚀深度有差异，存在圆斑状区域性未分离像元。减薄后此区域反而低 1.4~1.5 μm ，刻蚀更深的区域会磨漏。另外，底部填充中的气泡和清洗过程中的冲击会使部分像元脱落，相应 700 个像元无信号响应，噪声为零。另一方面，背面电极光刻的套刻偏差，使得最大、最小的通光区域尺寸存在偏差。通光区域为矩形，宽度与电极相关，边长约为 19~23 μm ；长度与减薄后的像元尺寸相关，边长约为 24~25 μm 。信号响应随尺寸区域性差异而存在区域性差异，且噪声差异不大。以上两方面影响了器件的响应和噪声均匀性，此外也有由其他因素造成的盲元。

为了缓解裂片及串音问题，我们研制了像

元分立的 InSb 红外焦平面探测器。该探测器的响应和噪声与现有常规的 InSb 红外焦平面探测器相当，表明像元分立的设计在工艺上是可行的。

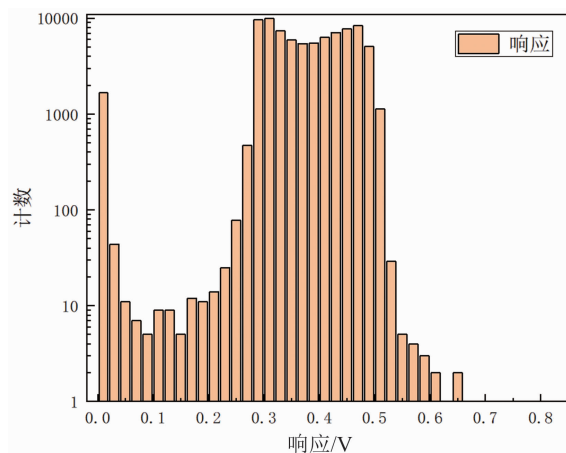


图 3 分立式 InSb 焦平面红外探测器的响应分布

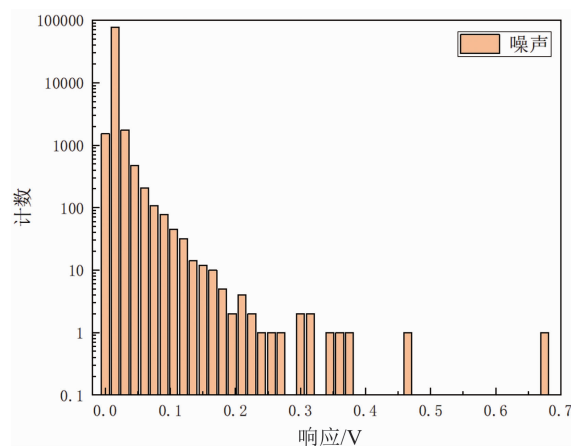


图 4 分立式 InSb 焦平面红外探测器的噪声分布图

3 结束语

本文提出并制备了一种 InSb 焦平面探测器。利用刻蚀及背减薄工艺实现了像元分立, 并通过背面电极实现了像元的电学导通。分立像元可以缓解 InSb 裂片及串音问题, 在工艺上与现有的 InSb 红外探测器制造工艺相兼容, 只是额外增加了正面腐蚀及背面电极两步工艺。相较于现有的键合硅晶圆, 刻蚀形成分立像元的方法, 使得器件制作工艺简单, 不存在硅晶圆吸收入射光的问题。测试结果表明, 探测器像元的填充率较高, 响应及噪声与现有常规的探测器相当。该研究未来有潜力应用于大面阵、小像元间距探测器以及曲面器件等多种形貌的探测器。

参考文献

- [1] 朱旭波, 李墨, 何英杰, 等. 小像元 InSb 红外焦平面器件光电性能仿真 [J]. *航空兵器*, 2022, **29**(3): 61-65.
- [2] Minoglou K, Nelms N, Ciapponi A, et al. Infrared Image Sensor Developments Supported by the European Space Agency [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **96**: 351-360.
- [3] 鲁星, 李墨, 吕衍秋. 铋化物红外探测器国内外发展综述 [J]. *航空兵器*, 2020, **27**(5): 1-12.
- [4] 叶振华, 张伟婷, 陈星. 大面阵红外探测器的发展现状与趋势 [C]. 苏州: 2019 年红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛, 2019.
- [5] 胡晓宁, 叶振华, 何力. 可释放热失配应力的硅基碲镉汞凝视红外焦平面器件芯片: CN100444393C [P]. 2008-12-17.
- [6] 谭振, 孙浩, 张敏, 等. 碲镉汞焦平面探测器芯片的应力释放方法及碲镉汞焦平面探测器芯片: CN107978654A [P]. 2017-10-24.
- [7] 廖清君, 胡晓宁. 一种碲镉汞基碲镉汞红外焦平面器件复合结构: CN207282478U [P]. 2018-02-06.
- [8] Timlin H A, Martin C J. Method of Making Electro-optical Detector Array: US5304500A [P]. 1994-04-19.
- [9] 胡晓宁, 李言谨, 叶振华, 等. 硅基碲镉汞器件的伸缩网络结构芯片: CN100479174C [P]. 2009-04-05.
- [10] Mcewen R K, Jeckells D, Bains S, et al. Developments in Reduced Pixel Geometries with MOVPE Grown MCT Arrays [C]. *SPIE*, 2015, **9451**: 94512D.
- [11] Caulfield J, Wilson J, Dhar N. Benefits of Oversampled Small Pixel Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2014, **9070**: 907035.
- [12] Caulfield J T, Curzan J P, Lewis J S. Benefits of Small Pixel Focal Plane Array Technology [C]. *SPIE*, 2015, **9555**: 95550L.
- [13] Jeckells D, Mcewen R K, Bains S, et al. Further Developments of 8 μm Pitch MCT Pixels at Finmeccanica (Formerly Selex ES) [C]. *SPIE*, 2016, **9819**: 98191X.
- [14] Guo N, Meng C, Pan J, et al. Effects of Crosstalk on Photoresponse for Mid-wavelength InSb Infrared Focal Plane Arrays [C]. Rome: 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2010.
- [15] Vallone M, Goano M, Bertazzi F, et al. Reducing Inter-pixel Crosstalk in HgCdTe Detectors [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, **52**(1): 25.